

Johan Henrik Holm Ebbing

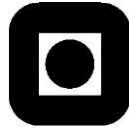
# Deteksjon av rotorfeil under drift i vannkraftgeneratorer

Masteroppgave i Energi og miljø  
Veileder: Professor Arne Nysveen  
Juni 2019



**NORGES TEKNISK-NATURVITENSKAPELIGE UNIVERSITET**

**NTNU**



**MA S T E R O P P G A V E**

Kandidatens navn : Johan Henrik Holm Ebbing

Fag : **ELKRAFTTEKNIKK**

Oppgavens tittel (norsk) : Deteksjon av rotorfeil under drift i vannkraftgeneratorer

Oppgavens tittel (engelsk) : On-line detection of rotor faults in hydropower generators

Oppgavens tekst:

The synchronous generator is a critical component in the hydropower plants and condition monitoring must be provided to detect faults (such as short circuit between turns in rotor or stator windings, eccentricity) and avoid failures. Condition monitoring techniques can be categorized into off-line and on-line methods. Offline methods can be applied when generator is not operating, in scheduled inspections. To be able to detect the faults in early stages, a continuous monitoring is needed and on-line fault detection methods have to be applied.

The focus is on on-line detection of rotor windings turn-to-turn short circuit faults in hydropower generators. The projects is a continuation of earlier work and the objective is to test the methods by comparing simulation results on a laboratory synchronous machine with measurements.

For the master project, the following tasks are foreseen:

- Use of FEM-model on laboratory synchronous generator (100 kVA). Perform relevant simulations to verify earlier results that terminal voltage and/or current can be used fault detection signal.
- Perform tests of the laboratory machine under different load conditions.
- Analysis and interpretation of the measured current and voltage waveforms
- If possible - perform similar measurement on synchronous machines in power stations

Further details to be clarified with the supervisors.

Oppgaven gitt	: 14. januar 2019
Oppgaven revidert:	: 4. juni 2019
Besvarelsen leveres innen	: 11. juni 2019
Besvarelsen levert	:
Utført ved (institusjon, bedrift)	: Inst. for elkraftteknikk/NTNU
Kandidatens veileder	: Professor Arne Nysveen
Faglærer	: Professor Arne Nysveen

Trondheim, 4. juni 2019



Arne Nysveen  
faglærer

# Sammendrag

Denne masteroppgaven har undersøkt hvordan rotorfeil kan oppdages i vannkraftgeneratorer ved å måle klemmespenning og ankerstrøm. Det ble gjennomført forsøk på en 100 kVA laboratoriegenerator med 14 poler der vindinger i feltviklingen kunne kortsluttes. Resultatene fra laboratorieforsøkene ble sammenlignet med resultater fra en numerisk modell laget i ANSYS Maxwell, der både kortslutning mellom vindinger i feltviklingen og eksentrisitet ble simulert. Det ble også utviklet analytiske modeller som beskrev vindingskortslutning i feltviklingen, statiske eksentrisitet, dynamiske eksentrisitet og vindingskortslutning i ankerviklingen. De analytiske modellene ga en god indikasjon på hvilke frekvenser som kunne forventes i spenningspekteret til en bestemt generatortopologi. Resultatene fra de to modellene stemte til dels overens med resultatene fra den fysiske laboratoriegeneratoren. I visse henseender kan modellene brukes for å predikere frekvensspekteret en rotorfeil vil gi i ankerstrøm og klemmespenning, men det viste seg å være vanskelig å bedømme feilgraden med sikkerhet. Lave feilgrader var vanskelig å detektere. Store feilgrader av kortslutning i feltviklingen kan trolig oppdages ved å sammenligne resultatene med en numerisk eller analytisk modell. Oppdagelse av mer moderate feilgrader fordrer historiske data å sammenligne med. Eksentrisitetsfeil ble ikke eksplisitt testet på laboratoriegeneratoren, men målingene antydte at det både kunne være statiske og dynamisk eksentrisitet i laboratoriegeneratoren. Den statiske eksentrisiteten så ut til å forandre seg med varigheten av hvert enkelt forsøk, trolig på grunn av termisk ekspansjon.

Det ble brukt to forskjellige oscilloskop. De tolket signalene noe forskjellig. Dette gjorde det vanskelig å sammenligne resultatene på tvers av oscilloskopene. Prøvene fra begge oscilloskopene viste de samme trendene. Frekvensspekteret til strøm og spenning ble analysert ved å bruke diskret Fouriertransformasjon (DFT/FFT). Signalet ble behandlet og manipulert på flere forskjellige måter for å undersøke hvilken effekt dette hadde på analysen. Fokuset lå på frekvensområdet null til 200 Hz, men forsøkene utelukker ikke at høyere frekvenskomponenter kan egne seg for deteksjon av rotorfeil.

Det ble også tatt strøm- og spenningsprøver fra to vannkraftgeneratorer på 2.1 MW og 2.9 MW. Disse var, i motsetning til laboratoriegeneratoren, koblet til et stivt nett. Dette hadde innvirkning på resultatene. Instrumenteringen fungerte problemfritt. Det var enkelt å koble seg til eksisterende 110 V/5 A kontrollanlegg.

# Abstract

This master's thesis investigates the possibility of detecting rotor faults by measuring current and voltage of the armature winding. A 100 kVA laboratory generator with the ability to short circuit the turns in the field winding was studied. The laboratory results were compared with results from a numerical model and several analytical models, that described inter-turn short circuits in the field winding, as well as static and dynamic eccentricity. The analytical models gave a valuable estimation of the frequency spectrum for specific generator topologies. The numerical and analytical models had their similarities and dissimilarities compared to the results from the laboratory generator. The models could be used to predict the faulty signatures to some extent, but it was hard to get a confident estimation of the fault severity. Faults of low severity were difficult to detect. Severe inter-turn short circuits in the rotor, however, can probably be easily detected. Detecting faults of moderate severity require historical data to compare with. Eccentricity was not explicitly tested, but the laboratory generator appears to have some eccentricity, both static and dynamic. The eccentricity seems to have changed over the testing period.

Two different oscilloscopes were used. They recorded the signals differently. This made comparison between results from the different oscilloscopes problematic. The Discrete Fourier transform (DFT/FFT) was used to analyse the current and voltage frequency spectra. The signals were manipulated in different ways to investigate the effect on the analysis. The frequency range in focus was 0 to 200 Hz.

Current and voltage samples from two hydroelectric power plants were investigated. The 2.1MW and 2.9MW generators were connected to a stiff grid, in contrast to the laboratory generator. The stiff grid had an impact on the results. It was fairly easy to take the voltage and current samples from the station control system.

# Forord

Denne masteroppgaven er en del av en femårig master ved Institutt for elkraftteknikk, NTNU på studieprogrammet Energi og miljø. Den ble skrevet våren 2019, men det ble gjort en del forarbeid i forbindelse med en prosjektoppgave høsten 2018. Arbeidet er en videreføring av tidligere forskningsarbeid gjort av masterstudenter ved NTNU, og stafettpinnen vil bli ført videre av fremtidige årskull.

Jeg vil først og fremst takke Ingrid Linea Groth for samarbeidet. Hun forsket parallelt med meg på de samme problemstillingene. Av praktiske og sikkerhetsmessige årsaker har vi gjennomført alle forsøk sammen. Det har gitt oss muligheten til å kryssjekke resultater og teorier. Det har vært viktig å ha en sparringspartner.

Veilederen min, Professor Arne Nysveen, har gjort at jeg og Ingrid har kunnet jobbe effektivt med oppgavene våre. Nysveen kom med viktige innspill og ideer som bidro til å løse teoretiske og praktiske problemer. Jeg vil også takke Mostafa Valavi for bistand med FEM-programvaren og numeriske simuleringer. Svein Erling Norum, Vladimir Klubicka og Bård Almås fra sørvisavdelingen har alltid vært svært behjelpelige og tilgjengelige, og har gjort veien fra teori til praksis enklere. Laboratoriearbeidet hadde ikke gått så smidig uten deres innsats. Kjell Ljøkelsøy ved SINTEF fikset de problemene vi måtte ha med omformere og motorstyringer.

Jeg har flittig benyttet meg av fagmiljøet ved instituttet. Professor Robert Nilssen og Dosent Trond Toftevaag har bistått med relevant litteratur og refleksjoner over kompliserte elektromagnetiske fenomener. Førsteamanuensis Jonas Kristiansen Nølands bistand var helt avgjørende for at de elektromagnetiske analysene gikk i orden. Jeg vil takke Professor Lars Magne Lundheim ved Institutt for elektriske systemer for å ha svart på spørsmål angående signalbehandling.

Jeg vil takke Firma Albert Collett for å ha stilt to av deres vannkraftverk til disposisjon. Driftspersonellet ved kraftverkene, Henning Bjørgan og Bjørn Åge Fosseng, var svært behjelpelige. Det er svært viktig at man tar steget ut av laboratoriet for å minke avstanden mellom forskning og praktisk anvendelse.

Det meste av naturvitenskapelig forskning i Norge skrives på engelsk, slik at det norske fagspråket har opplevd en gradvis utarming. Jeg slår derfor et (lite) slag for det norske fagspråket innen det elektromekaniske. Det har ikke alltid vært like lett å finne etablerte norske

oversettelser av engelske begrep og uttrykk. Der direkte oversettelse fra engelsk virket klønete ble svensk og tysk benyttet istedenfor.

Henrik Ebbing, Juni 2019, Trondheim



# Innhold

Figurer.....	xv
Kretser.....	xx
Tabeller .....	xx
Forkortelser/symboler .....	xxiii
1 Introduksjon.....	1
1.1 Bakgrunn .....	1
1.2 Mål og omfang.....	1
1.3 Oppbygning og strukturering.....	2
2 Synkronmaskinen .....	5
2.1 Rotor.....	6
2.1.1 Feltviklingen.....	6
2.1.2 Dempeviklingene .....	9
2.1.3 Rotorens mekaniske oppbygning og oppførsel .....	9
2.2 Stator.....	10
2.2.1 Ankerviklingen.....	11
3 Feiltilstander og deres innvirkning på magnetfelt, strøm og spenning.....	15
3.1 «IEL's Winding layout program» (WLP) .....	17
3.2 Kortslutning i feltviklingen (KF).....	17
3.2.1 Verifikasjon av KF algoritme.....	27
3.3 Statisk Eksentrisitet (SE).....	31
3.3.1 Verifisering av SE algorimen .....	34
3.4 Dynamisk eksentrisitet (DE) .....	35
3.4.1 Verifisering av algoritme .....	37
3.5 Kortslutning i ankerviklingen.....	38
3.6 Andre kilder til harmoniske .....	39
4 Dempeviklinger .....	41

4.1	Deteksjon av brukkede staver .....	42
4.2	Foreslått metode: Motroterende strøm .....	43
4.3	Motroterende strømmer .....	43
4.4	Feilsignatur med brudd i dempestav med motroterende og asynkrone strømmer.....	47
4.5	Modell av brudd i dempestav .....	49
5	Spektralanalyse .....	51
5.1	Diskret Fouriertransformasjon (DFT) .....	51
5.2	Vindusfunksjoner.....	52
5.2.1	Hann .....	54
5.2.2	Flat top.....	55
6	Maskinene.....	57
6.1	Brutus.....	57
6.2	Ulefoss .....	60
6.3	Liafoss .....	61
6.4	Kalvedalen – numerisk modell .....	62
7	Analytisk modell (AM) .....	63
7.1	Analytisk modell, Brutus .....	64
7.2	Analytisk modell, Ulefoss .....	66
7.3	Analytisk modell, Liafoss.....	68
8	FEM – Finite element method .....	69
8.1	Oppbygning av FEM-modellen av Brutus.....	69
8.1.1	Stator .....	69
8.1.2	Viklinger.....	70
8.1.3	Rotor.....	71
8.1.4	Masker «mesh» .....	72
8.2	FEM-modell av AM med KF .....	73
8.3	FEM Tomgang (T) med KF.....	73

8.4	FEM Resistiv last (R) med KF .....	73
8.5	FEM RL-last med KF .....	74
8.6	FEM fullast(FL) KF.....	75
8.7	FEM Statisk eksentrisitet, tomgang.....	76
8.8	Dynamisk eksentrisitet fullast og tomgang .....	76
8.9	FEM, Blandet eksentrisitet, tomgang .....	76
8.10	Blanding av DE og KF tomgang .....	76
9	Instrumentering.....	77
9.1	Tektronix MSO 3014.....	78
9.2	ROHDE & SCHWARZ, ROT 2044.....	79
9.3	Differensialprobe .....	79
9.4	Strømtang.....	80
10	Gjennomføring og oppsett av forsøk Brutus .....	81
10.1	Forsøk 1: Kortslutning i feltvikling(KF). T1, R og RL. 15.03.2019. MSO 3014 .....	82
10.2	Forsøk 2: KF. FL1. 27.03.19 MSO 3014.....	83
10.3	Forsøk 3: KF. T2 og FL2. 02.05.19. ROT 2044.....	84
10.4	Forsøk 4: KF. T3 og FL3. 15.05.19. ROT 2044.....	84
10.5	Forsøk 5: Dempeviklinger. 04.04.19. MSO 3014 .....	85
10.6	Salsbruket 25.03.19 MSO 3014.....	88
10.6.1	Ulefoss.....	88
10.6.2	Liafoss .....	89
11	Program og Algoritmer .....	91
11.1	Program 1: DFT med vindusfunksjoner og 10 sekunder av signalet. ....	91
11.2	Program 2a: DFT med rektangulært vindu på 1 sekunders biter av signalet. ....	93
11.3	Program 2b .....	94
12	Hovedresultater, Brutus.....	95
12.1	Resultater Analytisk Modell.....	95

12.1.1	Analytisk modell, Brutus.....	95
12.1.2	Komplekse feil, Brutus.....	98
12.1.3	Vindingskortslutning i ankerviklingen, Brutus .....	100
12.2	Resultater FEM: ANSYS Maxwell av Brutus .....	102
12.2.1	FEM-modell av AM, Kortsutning i feltvikling .....	102
12.2.2	FEM, Kortslutning i feltviklingen .....	103
12.2.3	FEM Statisk eksentrisitet og kortslutning .....	108
12.2.4	FEM Dynamisk eksentrisitet.....	109
12.2.5	FEM DE og KF .....	110
12.2.6	SE og DE.....	111
12.3	Resultater Brutus T1, R og RL Program 2b .....	112
12.3.1	Tomgang 1.....	112
12.3.2	R-last .....	113
12.3.3	RL-last.....	114
12.4	Resultat Brutus FL1, T2, FL2, T3 og FL3 Program 2b.....	115
12.4.1	FL1 .....	115
12.4.2	FL2 .....	116
12.4.3	FL3 .....	117
12.4.4	T2 .....	118
12.4.5	T3 .....	118
12.4.6	KF i to poler .....	119
12.5	Sammenligning av resultater på tvers. Program 2b.....	120
12.5.1	Byttet polaritet, serie 3 .....	120
12.5.2	Varm vs kald, frisk maskin .....	122
13	Resultater, Brutus, Program 1 .....	125
13.1	Program 1 T1 .....	125
13.1.1	Vurdering av vindu, signallengde og frekvensestimering.....	125

13.1.2	Vurdering av KF.....	130
13.2	FL1.....	131
13.3	FL2, 16-bit oscilloskop.....	132
14	Resultater, Brutus, Program 2a .....	135
14.1	FL1 Program 2a .....	135
14.2	FL2 Program 2a .....	137
15	Motroterende felt og feil i dempevikling, Brutus, program 2b .....	141
15.1	Frisk maskin .....	141
15.2	Feiltilstand 2 (Uten segment) .....	142
15.3	Feiltilstand 1 (Uten stav) .....	143
16	Andre frekvenser, Brutus .....	145
17	Resultat andre maskiner .....	147
17.1	Ulefoss .....	147
17.1.1	Analytisk modell Ulefoss .....	147
17.1.2	Program 1 .....	148
17.1.3	Program 2b .....	150
17.2	Liafoss .....	152
17.2.1	Analytisk modell Liafoss .....	152
17.2.2	Program 1 .....	153
17.2.3	Program 2b .....	155
18	Diskusjon.....	157
18.1	Instrumentering og manipulering av signalet .....	157
18.2	Deteksjon av feil, Brutus .....	160
18.2.1	KF, Brutus .....	161
18.2.2	DE, Brutus .....	162
18.2.3	Statisk eksentrisitet.....	165
18.2.4	Lagrene og giret, Brutus.....	168

18.2.5	35.7 Hz – sier litt om alt, Brutus .....	169
18.2.6	Last vs tomgang, Brutus .....	169
18.2.7	Brudd i dempeviklingen og skjevlast Brutus .....	170
18.2.8	Komplekse feil i AM.....	172
18.3	Vannkraftgeneratorene .....	172
18.3.1	Ulefoss.....	172
18.3.2	Liafoss .....	174
19	Konklusjon .....	177
19.1	Fremtidig arbeid .....	179
20	Referanser.....	181
21	Appendiks A.....	2
21.1	Teori om ankerviklinger fra prosjektoppgaven .....	3
21.2	Resultater, diverse .....	6
21.2.1	FEM av AM med 10 KF .....	6
21.2.2	Andre prøvekjøring av Brutus 1. februar, 7 KF .....	6
21.2.3	Test av MSO 3014 med 11- og 8-bit.....	7
21.3	Resultater T1, R, RL, FL2 program 1 og 2a.....	8
21.3.1	T1 program 2a .....	8
21.3.2	R program 1.....	10
21.3.3	R program 2a.....	11
21.3.4	RL program 1 .....	13
21.3.5	RL program 2a .....	14
21.3.6	T2 program 1 .....	16
21.3.7	T2 program 2a .....	18
21.3.8	FL2 program 1 .....	19
21.4	Metadata skjevlasttester.....	20
21.5	Matematikk.....	22

21.5.1	Alfa-operatoren [31].....	22
21.6	Kretser .....	23
21.7	Utstyr og måleinstrumenter .....	24
21.7.1	Induktans, «Bjørn» .....	24
21.7.2	Likeretter, magnetisering .....	24
21.7.3	Vekselretter, motor.....	24
21.7.4	Oscilloskop.....	24
21.7.5	Måleprober .....	25
21.8	Dokumentasjon.....	26
21.8.1	Kassifisering av måletrafoer[53].....	26
21.8.2	Lager.....	26
21.9	Koder og algoritmer.....	30
21.9.1	AM Kortsluning i feltviklingen, Brutus .....	30
21.9.2	AM Kortsluning i feltviklingen og statisk eksentrisitet, Ulefoss .....	33
21.9.3	AM Dynamisk eksentrisitet, Liafoss .....	36
21.9.4	Algoritme for å finne frekvensen for den grunnharmoniske.....	39
22	Appendiks B: Oppbygning av FEM-modell i ANYS Maxwell av Brutus fra prosjektoppgaven. ....	42
22.1	Rotor.....	42
22.1.1	Sammensetning .....	42
22.1.2	Polsko.....	43
22.1.3	Bue polsko.....	43
22.1.4	Polkjerne.....	43
22.1.5	Hull til dempeviklinger .....	43
22.1.6	Utskjæring til hull til dempeviklingene.....	45
22.1.7	Sekundært koordinatsystem .....	46
22.1.8	Duplisering av polsko og kjerne rundt aksling.....	47

22.1.9	Ytre radius rotoråk .....	47
22.1.10	Indre radius .....	47
22.1.11	Stort og lite hull i polkjernen.....	47
22.1.12	Tetting av hull.....	48
22.1.13	Feltvikling.....	48
22.1.14	Pol.....	50
22.2	Stator.....	51
22.2.1	Statoråk, indre og ytre radius .....	51
22.2.2	Spor .....	52
22.2.3	Ankerviklingene .....	53
22.3	Deler i modellen som er definert som vakuum.....	55
22.3.1	Roterende deler .....	55
22.3.2	Region .....	56



# Figurer

Figur 2.1: Modell av rotoren til Brutus i ANSYS Maxwell. [4] .....	6
Figur 2.2: To godt brukte poler fra Liafoss kraftstasjon. Disse er rammeviklet. Foto: FAC arkiv. .....	7
Figur 2.3: Kulelager og glidelager. $F_g$ er tyngdekraften.....	10
Figur 2.4: Statorblikk og ankervikling. [9] .....	11
Figur 3.1: Sykt felt. 10 vindinger av totalt 35 er kortsluttet i en av polene .....	18
Figur 3.2: Friskt felt .....	18
Figur 3.3: Syk komponent. $k_2$ er amplituden til den syke polen, som tilsvarer antall kortsluttede vindinger og magnetiseringsstrømmen. ....	19
Figur 3.4: Generell matematisk fremstilling av MMK til én syk pol.....	20
Figur 3.5: Reluktansmodell for KF-modell.....	22
Figur 3.6: 14 polet generator med 126 spor og sporskritt på 8 (fullt skritt er 9).....	23
Figur 3.7: 14 poler, 133 spor og et skritt på 9 (fullt skritt på 9.5).....	24
Figur 3.8: 14 poler, 114 spor og et skritt på 7 (fullt skritt på 8.14).....	25
Figur 3.9: Maskin 1: 126 spor med viklingskritt på 13. 10 vindinger er “kortsluttet” (KF)....	27
Figur 3.10: Maskin 1, KF 10 vindinger, lik figur 3.9 uten 50 Hz og 150 Hz .....	28
Figur 3.11: Maskin 1, 10 kortsluttede vindinger.....	28
Figur 3.12: Spenning, Maskin 1, varierende grad av KF [1] .....	29
Figur 3.13: Maskin 2, KF 10 vindinger: 120 spor og skritt på 13.....	30
Figur 3.14: Statisk eksentrisitet.....	31
Figur 3.15: Maskin 1, 10 kortsluttede vindinger, 20 % statisk eksentrisitet .....	34
Figur 3.16: Maskin 1, 10 kortsluttede vindinger, 10 % statisk eksentrisitet .....	35
Figur 3.17: Dynamisk eksentrisitet. Rotor har senter i B, som forflytter seg langs den stiplede linjen. Stator har senter i A.....	35
Figur 3.18: Maskin 1, 20 % DE .....	37
Figur 3.19: Maskin 2, 20% DE. ....	38
Figur 4.1: Venstre: friskt induksjonsbur. Høyre: én brukket stav.....	41
Figur 4.2: Medroterende-, motroterende- og nullsystem .....	43
Figur 4.3: Skjevlast .....	45
Figur 4.4: Kortslutning mellom to faser med impedans $Z_F$ i sekvensdomenet. Modifisert illustrasjon fra [31]......	46

Figur 5.1: Øverst: En bit av et sinussignal blir tatt opp, men det inneholder ikke et helt antall perioder. Nederst: DFT-analysen vil tolke signalet slik.....	53
Figur 5.2 Øverst: signal. Midten: vindusfunksjon (Hann). Nederst: signal behandlet med vindusfunksjon. Illustrasjon inspirert av [36]. .....	53
Figur 5.3: Rektangulært, Hann og Flat-top-vindu i frekvensplanet. Signalet er en ren 50 Hz sinus med en samplingsfrekvens på 1000 Hz.....	54
Figur 5.4: Flat-top-vindu i tidsplanet. ....	55
Figur 6.1: Rotor til Brutus. Koblingstavlen for å kortslutte polen vises tydelig. To av viftebladene er tatt av. Kortslutningsringen til dempestavene er også delvis demontert. ....	57
Figur 6.2: Skadet dempestav .....	59
Figur 6.3: Nummerering av polene .....	59
Figur 6.4: Generator på Ulefoss kraftstasjon. Foto: arkiv FAC [9] .....	60
Figur 6.5: Generator på Liafoss kraftstasjon. Foto: arkiv FAC .....	61
Figur 6.6: Kalvdalen [1] .....	62
Figur 7.1: Nærbilde av luftgap tegnet i ANSYS Maxwell.....	64
Figur 7.2: Tegningene av Brutus fra produsenten [42, 43]. .....	64
Figur 7.3: Nærbilde av en pol på Ulefoss.....	66
Figur 8.1: Stator.....	70
Figur 8.2: Venstre: modellert i ANSYS Maxwell. Høyre: tegninger av virkelig maskin.....	71
Figur 8.3: Maskenett .....	73
Figur 9.1 - Oscilloskopets behandling av signalet, Tektronix [47]......	78
Figur 9.2 - Forklaring av "Hig Res" fra Tektronix's hjemmeside [47]. .....	78
Figur 10.1: Fra venstre: Motor, gir og Brutus .....	81
Figur 10.2: Skisse av frisk dempevikling. Den røde staven har en produksjonsskade. Pilen viser dreieretningen på rotor. ....	86
Figur 10.3: Feiltilstand 1: Nest ytterste stav i pol 2 er tatt bort. Den røde staven har en produksjonsskade. Pilen viser dreieretningen på rotor.....	87
Figur 10.4: Feiltilstand 2: Hele segmentet til pol 3 er tatt bort. Den røde staven har en produksjonsskade. Pilen viser dreieretningen på rotor.....	87
Figur 10.5:Måletrafo Ulefoss: Spenningstransformator.....	89
Figur 11.1: Program 1, flytskjema .....	91
Figur 11.2: Program 2a, flytskjema. «Main» er lik den i figur 11.1 .....	93
Figur 11.3: Program 2b. «Main» er lik den i figur 11.1 .....	94
Figur 12.1:AM, KF 10, Brutus.....	95

Figur 12.2:AM, DE 2.5%, Brutus .....	96
Figur 12.3: AM, SE 5%, KF 10, Brutus .....	96
Figur 12.4:AM, SE 5%, KF 5, Brutus .....	97
Figur 12.5: AM, SE 10%, KF 5, Brutus .....	97
Figur 12.6:AM, SE10%, Pol1 KF 10, Pol2 KF10, Brutus .....	98
Figur 12.7: SE 0%, Pol1 KF10, Pol8 KF10 .....	98
Figur 12.8: AM SE 0%, Pol1 KF 10, Pol7 KF 10, Brutus .....	99
Figur 12.9: SE 0%, Pol 1 KF 10, Pol 9 KF 10 .....	99
Figur 12.10: AM, DE 2.5%, Kortslutning i statorvikling nr 3 topp, og nr 10 bunn, Brutus ..	100
Figur 12.11: AM, KF 10, Kortslutning i statorvikling nr 3 topp, og nr 10 bunn, Brutus.....	100
Figur 12.12: AM, SE 5%, KF 10, Kortslutning i statorvikling nr 3 topp, og nr 10 bunn, Brutus .....	101
Figur 12.13: AM, SE 5% forskjøvet $\pi/2$ (en kvart omdreining) i forhold til referansestav. KF 10, Kortslutning i statorvikling nr 3 topp, og nr 10 bunn. Brutus .....	101
Figur 12.14: Simulering av Analytiske modellen i ANSYS Maxwell, KF 10.....	102
Figur 12.15: Tomgang med Hann-vindu med trunkering, ANSYS Maxwell, program 1 .....	103
Figur 12.16: Tomgang med flat-top-vindu uten trunkering, ANSYS Maxwell, program 1 ..	103
Figur 12.17: Tomgang rektangulært vindu med omtasting og trunkering, ANSYS Maxwell, program 2b .....	104
Figur 12.18: Spenning, Tomgang, Brutus, KF, ANSYS Maxwell, Rektangulært vindu, program 2b.....	105
Figur 12.19:Spenning, R-last, Brutus, KF, ANSYS Maxwell, Rektangulært vindu, program 2b .....	105
Figur 12.20: Strøm, R-last, Brutus, KF, ANSYS Maxwell, Rektangulært vindu, program 2b .....	106
Figur 12.21: Spenning, RL-last, Brutus, KF, ANSYS Maxwell, Rektangulært vindu, program 2b.....	106
Figur 12.22: Strøm, RL-last, Brutus, KF, ANSYS Maxwell, Rektangulært vindu, program 2b .....	107
Figur 12.23:Spenning, FL-last, Brutus, KF, ANSYS Maxwell, Rektangulært vindu, program 2b .....	107
Figur 12.24: Strøm, FL-last, Brutus, KF, ANSYS Maxwell, Rektangulært vindu, program 2b .....	108

Figur 12.25: Spenning, R-last, Brutus, SE 5mm/28.6%, KF, ANSYS Maxwell, Rektangulært vindu, program 2b .....	108
Figur 12.26: Spenning, DE tomgang, Brutus, ANSYS Maxwell, Rektangulært vindu, program 2b.....	109
Figur 12.27: Spenning, DE FL, Brutus, ANSYS Maxwell, Rektangulært vindu, program 2b .....	109
Figur 12.28: Strøm, DE FL, Brutus, ANSYS Maxwell, Rektangulært vindu, program 2b ...	110
Figur 12.29: Spenning, Tomgang, KF, DE 10% , Brutus, ANSYS Maxwell, Rektangulært vindu, program 2b .....	110
Figur 12.30: Spenning, SE 5%, DE 5%, tomgang, Brutus, ANSYS Maxwell, Rektangulært vindu, program 2b .....	111
Figur 12.31: Spenning, T1, Brutus, KF, Rektangulært vindu, program 2b.....	112
Figur 12.32: Spenning, R-last, Brutus, KF, Rektangulært vindu, program 2b .....	113
Figur 12.33: Strøm, R-last, Brutus, KF, Rektangulært vindu, program 2b.....	113
Figur 12.34: Spenning, RL-last, Brutus, KF, Rektangulært vindu, program 2b.....	114
Figur 12.35: Strøm, RL-last, Brutus, KF, Rektangulært vindu, program 2b.....	114
Figur 12.36: Spenning, FL1, Brutus, KF, Rektangulært vindu, program 2b.....	115
Figur 12.37: Strøm, FL1, Brutus, KF, Rektangulært vindu, program 2b.....	115
Figur 12.38: Spenning, FL2, Brutus, KF, Rektangulært vindu, program 2b.....	116
Figur 12.39: Strøm, FL2, Brutus, KF, Rektangulært vindu.....	116
Figur 12.40: Spenning, FL3, Brutus, KF, Rektangulært vindu, program 2b.....	117
Figur 12.41: Strøm, FL3, Brutus, KF, Rektangulært vindu, program 2b.....	117
Figur 12.42: Spenning, T2, Brutus, KF, Rektangulært vindu, program 2b.....	118
Figur 12.43: Spenning, T3, Brutus, KF, Rektangulært vindu, program 2b.....	118
Figur 12.44: Spenning, T3. Blå: pol1 10 KF, pol8 10 KF. Grønn: Pol1 3 KF, pol8 10 KF. Rød: Pol1 10 KF, pol8 3 KF, program 2b.....	119
Figur 12.45: Spenning FL3. Blå: pol1 10 KF, pol8 10 KF. Lilla: Pol1 3 KF, pol8 10 KF. Rød: Pol1 10 KF, pol8 3 KF, program 2b.....	119
Figur 12.46: Strøm FL3. Blå: pol1 10 KF, pol8 10 KF. Lilla: Pol1 3 KF, pol8 10 KF. Rød: Pol1 10 KF, pol8 3 KF, program 2b.....	120
Figur 12.47: Spenning, T3, Brutus, KF, Rektangulært vindu, program 2b.....	120
Figur 12.48: Spenning, FL3, Brutus, KF, Rektangulært vindu, program 2b.....	121
Figur 12.49: Spenning, FL3, Brutus, KF, Rektangulært vindu, program 2b.....	121
Figur 12.50 Spenning, T3, Brutus, KF, Rektangulært vindu, program 2b.....	122

Figur 12.51: Spenning, FL3, Brutus, KF, Rektangulært vindu, program 2b. ....	122
Figur 12.52: Strøm, FL3, Brutus, KF, Rektangulært vindu, program 2b.....	123
Figur 13.1: Spenning, T1, Brutus, Program 1, Flat-top-vindu. 0-200 Hz, 10 sekunder.....	125
Figur 13.2: Spenning, T1, Brutus, Program 1, Flat-top-vindu. 0-200 Hz, 1 sekunder.....	126
Figur 13.3: Venstre: Hann-vindu. Høyre: Flat-top-vindu .....	132
Figur 15.1: Spenning, Frisk maskin, Brutus, Program 2b.....	141
Figur 15.2: Strøm, frisk maskin, Brutus, Program 2b .....	142
Figur 15.3: Spenning, uten segment, Brutus, Program 2b .....	142
Figur 15.4: Strøm, uten segment, Brutus, Program 2b.....	143
Figur 15.5: Spenning, uten stav, Brutus, Program 2b .....	143
Figur 15.6: Strøm, uten stav, Brutus, Program 2b.....	144
Figur 17.1: AM, KF 10 vindinger/17.9%, Ulefoss.....	147
Figur 17.2: AM, SE 10%, KF 10/ 17.9%, Ulefoss .....	148
Figur 17.3: AM, DE 10%, Ulefoss.....	148
Figur 17.4: Spenning Ulefoss, flat top-vindu.....	149
Figur 17.5: Strøm Ulefoss, Hann-vindu .....	149
Figur 17.6: Spenning Ulefoss. Merk at 100 Hz har så høyt utslag at den ikke er med i figuren. .....	150
Figur 17.7: Strøm Ulefoss .....	151
Figur 17.8: AM, KF 10, Liafoss.....	152
Figur 17.9: AM, SE 5%, KF 10, Liafoss .....	152
Figur 17.10: AM, DE 10%, Liafoss .....	153
Figur 17.11: Spenning liafoss, Flat top-vindu.....	153
Figur 17.12: Strøm liafoss, Flat top-vindu .....	154
Figur 17.13: Strøm Liafoss 2900 kW, Flat top-vindu .....	154
Figur 17.14: Spenning Liafoss .....	155
Figur 17.15: Strøm Liafoss.....	155
Figur 18.1: Analytisk modell. Sammenligning av KF, SE og DE. ....	160
Figur 18.2 T1 KF 10 vs FEM KF 10 og AM KF 10 .....	161
Figur 18.3: Spenning fra frisk maskin, tomgang. 100 Hz ligger på ca 0.08 % for alle andre enn T1 .....	163
Figur 18.4: Spenning fra frisk maskin, full last.....	164
Figur 18.5: Spenning KF 10, full last.....	165
Figur 18.6: Spenning, balansert resistiv last, Brutus.....	171

Figur 21.1: Ekvivalent skjema .....	3
Figur 21.2: Poldeling og viklingskritt.....	4
Figur 21.3: 3. harmoniske i trefasesystem. Hentet fra [10].....	5
Figur 21.4: Spenningen i tidsdomenet for FEM-modellen av AM .....	6
Figur 21.5: 1. Februar 2019, andre prøvekjøring, 7 KF.....	6
Figur 21.6: Spenning, tomgang, frisk Brutus, 11-bit MSO3014, 4 juni 2019.....	7
Figur 21.7: Spenning, tomgang, frisk Brutus, 8-bit MSO3014, 4 juni 2019.....	7
Figur 21.8: Spenning, T1, program 2a nærbilde av 21.4 Hz og 35.7 Hz .....	8
Figur 21.9: Spenning, T1, program 2a nærbilde av 64.3 Hz.....	8
Figur 21.10: Spenning, R-last, Program 1, Flat-top-vindu, 20-80 Hz.....	10
Figur 21.11: Spenning, R-last, Program 2a, 20-80 Hz.....	11
Figur 21.12: Strøm, RL, Program 1, Flat top-vindu, 7-55 Hz.....	13
Figur 21.13: Strøm, RL, Program 2a, 5-110 Hz.....	15
Figur 21.14: Spenning, T2, program 2, 16-bit, 100-190 Hz .....	18
Figur 21.15: Spenning, FL, Hannvindu vs flat-top-vindu, 16-bit, 85.75 Hz.....	20
Figur 21.16: Illustrasjon av radiell og aksiell klarering i et kulelager [55].....	26

## Kretser

Krets 8.1: FEM R-last simuleringer .....	74
Krets 8.2: FEM RL-last.....	74
Krets 8.3: FEM full last.....	75
Krets 10.1: Laboratorieoppsett.....	82
Krets 10.2: Forsøk 2, PF=0.93 .....	84
Krets 10.3: Skjevlast .....	85
Krets 21.1: Generator med last.....	23
Krets 21.2: Vannkjølt motstand. ....	23

## Tabeller

Tabell 3.1: Flytskjema analytisk modell av kortslutning i feltviklingen.....	26
--	----

Tabell 3.2: Flytskjema analytisk modell av statisk eksentrisitet i kombinasjon med kortslutning i feltviklingen .....	33
Tabell 3.3: Maskin 1, 20 % eksentrisitet, 10 kortsluttede vindinger.....	34
Tabell 3.4: Maskin 1, 20 % dynamisk eksentrisitet .....	38
Tabell 4.1: Frekvenser induisert i ankervikling på grunn av brudd i dempestav sammen med 5. og 7. harmoniske strømmer, jf (4.24).....	49
Tabell 7.1: Input-verdier til analytisk modell av Ulefoss.....	66
Tabell 7.2: Input-verdier til analytisk modell av Liafoss .....	68
Tabell 8.1: Maskevidde .....	72
Tabell 8.2: Forskyvning av «RelativeCS2» .....	76
Tabell 8.3: Forskyvning av «RelativeCS2» .....	76
Tabell 10.1: Metadata, T1 .....	82
Tabell 10.2: Metadata, R-last, $R = 11 \Omega$ .....	83
Tabell 10.3: Metadata, RL-last, $R = 11 \Omega, L = 20.56 \text{ mH}$ .....	83
Tabell 10.4: metadata forsøk med skjevlast og feil på dempeviklingen. ....	88
Tabell 11.1: Kategorisering av egnethet .....	92
Tabell 13.1: Sammenligning av detaljer i algoritmen, , Brutus Program 1, Flat-top-vindu. .	127
Tabell 13.2: Sammenligning av detaljer i algoritmen, Brutus, Program 1, Hann.....	128
Tabell 13.3: Tabell type A, T1, Brutus, Flat-top, 10 sekunder uten frekvensestimering.....	130
Tabell 13.4: Tabell type A, T1, Brutus, Flat-top, 10 sekunder uten frekvensestimering.....	130
Tabell 13.5: Senning, Tabell type A, FL, Brutus 1, Flat-top, 10 sekunder uten frekvensestimering .....	131
Tabell 13.6: Strøm, Tabell type A, FL1, Brutus, Flat-top, 10 sekunder uten frekvensestimering .....	131
Tabell 13.7: Spenning, Tabell type B, FL1, Brutus, Flat-top, 10 sekunder uten frekvensestimering .....	131
Tabell 13.8: Strøm, Tabell type B, FL1, Brutus, Flat-top, 10 sekunder uten frekvensestimering .....	132
Tabell 13.9: Senning, Tabell type A, FL2, Brutus, Hann-vindu, 10 sekunder uten frekvensestimering .....	133
Tabell 13.10: Senning, Tabell type A, FL2, Brutus, Flat-top, 10 sekunder uten frekvensestimering .....	133
Tabell 13.11: Strøm, Tabell type A, FL2, Brutus, Flat-top, 10 sekunder uten frekvensestimering .....	133

Tabell 13.12: Spenning, Tabell type B, FL2, Brutus, Hann, 10 sekunder uten frekvensestimering .....	133
Tabell 13.13: Spenning, Tabell type B, FL2, Brutus, flat-top, 10 sekunder uten frekvensestimering .....	134
Tabell 13.14: Strøm, Tabell type B, FL2, Brutus, Flat-top, 10 sekunder uten frekvensestimering .....	134
Tabell 14.1: Spenning, FL1, Brutus, Program 2a.....	135
Tabell 14.2: Strøm, FL1, Brutus, Program 2a.....	136
Tabell 14.3: Spenning, FL2, Brutus, Program 2a, 16-bit.....	137
Tabell 14.4: Strøm, FL2, Brutus, Program 2a, 16-bit .....	138
Tabell 16.1: Spenning i område 135 til 145 Hz, ROT 2044 .....	145
Tabell 16.2: Spenning i området 135 Hz til 145 Hz, MSO 3014 .....	145
Tabell 21.1: Spenning, tomgang, Program 2a.....	9
Tabell 21.2: Spenning, R-last, Hann-vindu.....	10
Tabell 21.3: Strøm, R-last, Hann-vindu .....	10
Tabell 21.4: Spenning, R-last, Program 2 .....	11
Tabell 21.5: Strøm, R-last, Program 2 .....	12
Tabell 21.6: Spenning, RL-last, Tybe B, Hann-vindu .....	13
Tabell 21.7: Strøm, RL-last, Type B, Hann-vindu.....	14
Tabell 21.8: Spenning, RL-last, Program 2a .....	14
Tabell 21.9: Strøm, RL-last, Program 2a .....	15
Tabell 21.10: Type A, Spenning, T2, flat-top-vindu 16-bit .....	16
Tabell 21.11: Type B, Spenning, T2, flat-top-vindu, 16-bit .....	16
Tabell 21.12: Type A, Spenning, T2, 16-bit .....	17
Tabell 21.13: Type B, Spenning, T2, flat-top-vindu, 16-bit .....	18
Tabell 21.14: Strøm , FL, Hann-vindu, 16-bit .....	19
Tabell 21.15: Klassifisering av klarering [55]. .....	26
Tabell 21.16: Klareringsverdier[39].....	27
Tabell 21.17: Dimensjoner kulelager SKF 2218[39].....	28



# Forkortelser/symboler

NTNU	Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
DFT	Diskret Fouriertransformasjon
FFT	Fast Fourier Transform
FEM	Finite Element Method (numerisk modell)
KF	Kortslutning i feltvikling
SE	Statisk eksentrisitet
DE	Dynamisk eksentrisitet
KA	Kortslutning i ankervikling
AM	Analytisk modell
(N)DE	(Non) Drive End
MMK	Magnetomotorisk kraft

---

$k$	<i>alle heltall, <math>\pm 1, 2, 3 \dots</math></i>	$f_s$	Synkronfrekvens
$S$	<i>antall statorspor</i>	$f_f$	Frekvenser relatert til feil på rotor
$P$	Antall poler		
$m$	Antall faser	$f_l$	Harmoniske frekvenser som mangler i strømmen
$Q$	Spor per pol		
$q$	Spor per pol per fase	$e$	Elektromotorisk spenning, momentanverdi
$R$	Ohmsk motstand		
$X$	Reaktans	$E$	Elektromotorisk spenning, effektivverdi
$X_s$	Synkronreaktans		
$Z$	Impedans	$i$	Strøm, momentanverdi
$I_e$	Feltstrøm	$I$	Strøm, effektivverdi
$U_e$	Feltspenning	$g$	Luftgapsavstand
$N_e$	Antall feltvindinger	$B$	Magnetfelt
$N_a$	Antall ankervindinger	$S_{vs}$	Skrittstørrelse i antall spor
$s$	Sakking	$N_{sps}$	Staver per spor
$D_s$	Diameteren til stator	$c$	Antall parallelle kretser
$\Lambda$	Permeans	$\mathcal{R}$	Reluktans
$\delta_s$	Grad av statisk eksentrisitet		



# 1 Introduksjon

## 1.1 Bakgrunn

Det har vært forsket på deteksjon av rotorfeil i vannkraftgeneratorer de siste par årene ved NTNU. To masteroppgaver har blitt skrevet i den forbindelse, og denne masteroppgaven er en videreføring av dette arbeidet. I masteren fra 2017 [1] kom man fram til en metode som egnet seg til å detektere kortslutningsfeil i feltviklingen. Metoden var å analysere induisert strøm og spenning i stator, som kan gjøres uten store inngrep i maskinen. Fjorårets master [2] brukte samme metode, men den undersøkte også rotoreksentrisitet. Begge masteroppgavene brukte numeriske simuleringer. Det har derfor vært et behov for å undersøke hvordan feildeteksjonsmetodene fungerer i praksis.

## 1.2 Mål og omfang

Målet for oppgaven var å detektere rotorfeil ved å analysere klemmespenning og ankerstrøm, og er sånn sett en videreføring av [1] og [2] sitt arbeid, som undersøkte problemstillingen teoretisk. I denne masteroppgaven ble flere av de partiske aspektene ved metoden undersøkt. Det har blitt gjennomført analytiske beregninger, numeriske simuleringer og fysiske målinger. En viktig del av oppgaven var å evaluere om modeller faktisk kan brukes til å predikere feilsignaturer. Laboratorieoppsett, signalbehandling og analyse ble viet mye tid. Her er noen av de viktigste momentene i oppgaven:

- Analytiske beregninger – Analytisk modell i MATLAB
- Numeriske beregninger – FEM-modell i ANSYS Maxwell
- Signalbehandling og Diskret Fourier Transform
- Laboratorieoppsett og instrumentering
- Strøm og spenningsprøver fra laboratoriegenerator
- Strøm og spenningsprøver fra to vannkraftverk
- Analyse

Det ble utviklet modeller for å kunne predikere feilsignaturer. Modellene omfatter feiltyper som kortslutning mellom vindinger i feltviklingen, statisk eksentrisitet og dynamisk eksentrisitet.

## 1-Introduksjon

Det ble laget programmer for å undersøke og analysere strøm- og spenningssignaler, hovedsakelig ved hjelp av Diskret Fourier Transformasjon (DFT).

Parallelt med målingene av strøm og spenning har styrken på magnetfeltet blitt målt i luftgapet ved hjelp av hall-sensorer. Resultatene og analysen av disse dataene er gjort i en egen masteroppgave [3].

## 1.3 Oppbygning og strukturering

Kapittel 2 omhandler synkronmaskinen generelt, og er særlig rettet mot vannkraftgeneratorer.

Kapittel 3 tar for seg de magnetiske og elektriske konsekvensene av rotorfeil. Her blir også analytiske modeller utviklet.

Kapittel 4 tar for seg dempeviklingen og feil på den.

Kapittel 5 tar for seg spektralanalyse med fokus på DFT og vindusfunksjoner.

Kapittel 6 presenterer de maskinene som har blitt undersøkt i oppgaven.

Kapittel 7 tar for seg de analytiske modellene utviklet i kapittel 3, anvendt på maskinene presentert i kapittel 6.

Kapittel 8 beskriver den numeriske modellen (FEM-modellen) av Brutus, og er i stor grad tatt fra forfatterens tidligere arbeid [4].

Kapittel 9 handler om instrumentering.

Kapittel 10 beskriver gjennomføringen av laboratorieprøvene, feltprøvene og relevant metadata.

Kapittel 11 beskriver programmene og algoritmene som ble brukt i analysen av signalene.

Kapittel 12 presenterer de viktigste resultatene fra testene med kortslutningsfeil i feltviklingen gjort i laboratoriet, analysert med «program 2b».

Kapittel 13 presenterer deler av resultatene analysert med «program 1», også fra testene med kortslutningsfeil i feltviklingen gjort i laboratoriet.

Kapittel 14 presenterer deler av resultatene analysert med «program 2a», også fra testene med kortslutningsfeil i feltviklingen gjort i laboratoriet.

## 1-Introduksjon

Kapittel 15 presenterer resultatene fra testene med skjev last og feil i dempeviklingen, analysert med «program 2b».

Kapittel 16 presenterer andre frekvenser som ikke er direkte koblet til feiltypene som ble undersøkt.

Kapittel 17 presenterer resultatene fra de to vannkraftgeneratorene.

Kapittel 18 diskuterer resultatene.

Kapittel 19 konkluderer med bakgrunn i diskusjonen.

## 1-Introduksjon

## 2 Synkronmaskinen

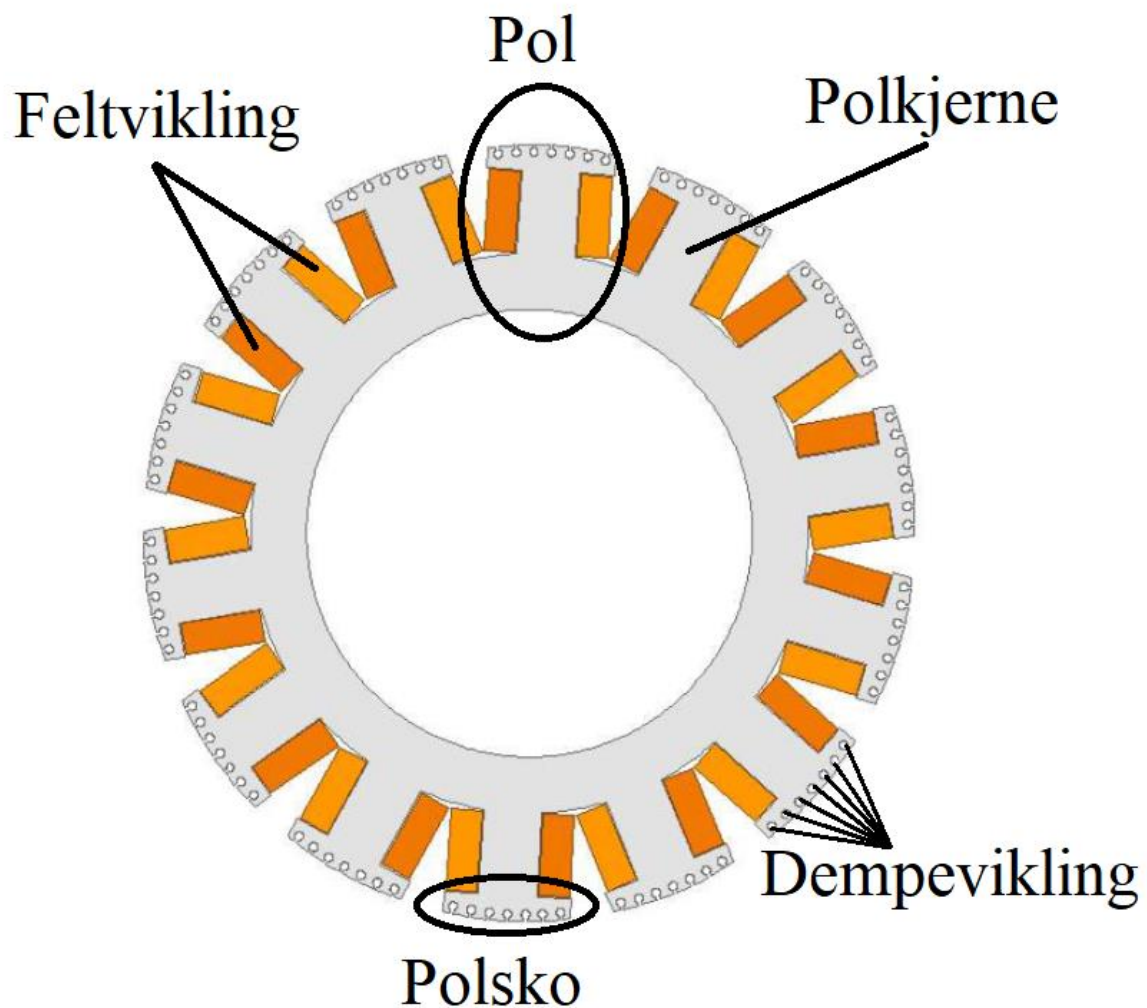
Synkronmaskinen består i grove trekk av en stillestående stator med ankerviklinger og en roterende rotor med feltviklinger. Rotoren beveger seg synkront ned det magnetiske feltet feltviklingen og ankerviklingen setter opp, derav navnet. En motor og en generator er i prinsippet samme konstruksjon, derav betegnelsen maskin. De teorier og metoder som blir presentert gjelder i de fleste tilfeller for både motor og generator selv om det først og fremst var generator som var i fokus i denne oppgaven.

En vannkraftgenerator gjør potensiell energi i vannet om til elektrisk energi ved at en turbin tar opp vannets energi og overfører denne til generatorens rotor direkte ved at de er koblet på samme aksling, eventuelt via et gir. Energien overføres fra rotor til stator ved at den roterende feltviklingen setter opp et varierende magnetfelt som induserer strøm og spenning i ankerviklingene i stator.

Fokuset i denne oppgaven var på rotorfeil. For å forstå hvilke feil som kan oppstå og hvordan disse gir utslag i klemmespenningen og ankerstrømmen er det viktig å kjenne rotors og stators elektriske og mekaniske oppbygning. Kapittel 2 vil handle om rotor og stator og feil som kan oppstå, mens kapittel 3 er viet til feltanalyse og hvordan feilene kan oppdages med analyse av klemmespenning og ankerstrøm.

Synkronmaskiner bygges både med horisontal og vertikal aksling. Generelt sett bygges store maskiner vertikalt og små maskiner horisontalt. I denne oppgaven ble bare horisontalmaskiner undersøkt.

## 2.1 Rotor



Figur 2.1: Modell av rotoren til Brutus i ANSYS Maxwell. [4]

### 2.1.1 Feltviklingen

Rotoren i en vannkraftgenerator består av et partall antall poler plassert radielt. Rundt hver pol ligger det en spole som setter opp et magnetfelt. Alle spolene er seriekoblet og utgjør i sin helhet feltviklingen. Det går med andre ord samme strøm gjennom alle spolene, og siden de består av samme antall vindinger så setter hver av dem opp et magnetfelt med lik styrke. Spolene er orientert slik at polene setter opp magnetfelt orientert annenhver nord-sør og sør-nord. Det romlige magnetfeltet vil derfor alternere, veldig likt en sinusbølge, men ikke helt. Dette vil bli diskutert nærmere i kapittel 3.





**Figur 2.2:** To godt brukte poler fra Liafoss kraftstasjon. Disse er rammeviklet. Foto: FAC arkiv.

Det går likestrøm i feltviklingen. Hver enkelt spole vil derfor sette opp et magnetfelt med en fast polaritet. Den vanligste metoden for å spenningssette feltviklingen er å bruke stillestående kullbørster, som presses mot en roterende slepering og dermed skaper galvanisk kontakt mellom feltviklingen og magnetiseringsutstyret som leverer likestrøm. Magnetiseringsutstyret kan være en likestrømsgenerator eller kraftelektronikk. Kullbørstene slites og må stadig byttes ut, og kullstøv som dannes er problematisk. Det er også mulig å spenningssette feltviklingen ved bruk av induksjon. Dette gjøres ved å sette en vregt generator på akslingen til generatoren som skal magnetiseres. Ankerviklingene til den vregte generatoren sitter på rotoren. Feltviklingene sitter på statoren til den vregte generatoren. Når ankerviklingene roterer i magnetfeltet satt opp av feltviklingene, vil det induseres en vekselspanning i ankeret. Denne likerettes med kraftelektronikk og magnetiserer feltviklingen til generatoren.

Siden feltviklingen er spenningsatt, trenger den elektrisk isolasjon. Spenningen er vanligvis i området 0-600 V [5], som er relativt lavt sammenlignet med den induserte spenningen i ankeret, som kan være på flere tusen volt. Det trengs derfor ikke særlig mye isolasjon mellom vindingene i feltviklingen. Spolen kan bygges opp på flere forskjellige måter. Dette vil ha betydning hvis det skulle oppstå en elektrisk feil i feltviklingen.

Lederen kan være en rektangulær tråd som vikles i flere lag rundt polen slik at den danner en spole med et bestemt antall vindinger. En enkelt vinding vil derfor ha opptil fire nabovindinger. Derfor kan to vindinger som er langt unna hverandre rent elektrisk være plassert fysisk nært hverandre. Det er et elektrisk potensial mellom vindingene som isolasjonen må stå imot.

## 2-Synkronmaskinen

Spenningen mellom to vindinger er gitt av (2.1).  $N_e$  er antall vindinger i én pol,  $P$  er antall poler,  $U_e$  er feltspenning, og  $\#_1$  og  $\#_2$  er hvilket nummer de to nabovindingene har i spolen.

$$U = \frac{U_e}{N_e * P} * (\#_1 - \#_2) \quad (2.1)$$

En annen måte å vikle på er å ikke bruke en tråd, men en ramme. Hver ramme utgjør en vinding, og ved å legge dem oppå hverandre lager de en spole. Rammen vil derfor bare ha to fysiske naboer, en oppe og en nede. Spenningen mellom dem vil være lik siden de alltid vil ligge etter hverandre elektrisk.

Isolasjonens holdfasthet forringes over tid av termiske, kjemiske, elektriske og mekaniske påkjenninger. Det er store sentrifugalkrefter i rotoren som kan føre til bevegelser i feltviklingen og skade isolasjonen. Samme effekt kan oppstå som følge av utvidelser i kobber og stål på grunn av temperaturforandringer. Kullstøv kan legge seg på feltviklingene og danne ledende veier mellom vindingene. I en trådviklet rotor kan det oppstå kortslutning mellom vindinger som ligger langt unna hverandre elektrisk. Dermed kan polen miste et stort antall vindinger av en enkelt kortslutning. En kortslutning i en rammeviklet rotor vil ikke umiddelbart ramme flere vindinger samtidig, med mindre to rammer får kontakt med jord eller at det dannes en ledende vei av kullstøv. Dog kan en liten feil utvikle seg på grunn av varmetvikling i kortslutningspunktet, slik at feilen sprer seg til flere vindinger over tid.

Det er flere metoder som benyttes for å finne elektriske rotorfeil. Den simpleste er å koble til spenning, enten like- eller vekselspenning, på sleperingene når rotoren står stille, for så å måle spenningen over hver pol. Hvis det ikke er lik spenningsfordeling over polene, er det trolig en elektrisk feil i den/de polene med lavest spenning over seg. Ulempen ved metoden er at maskinen må stoppes og delvis demonteres. Det er også mulig at den elektriske feilen bare oppstår når viklingen blir utsatt for sentrifugalkrefter, slik at feilen ikke oppdages når den står i ro. Det omvendte kan også være tilfelle; feilen er til stede når rotoren står i ro, men ikke når den roterer.

Første jordfeil er ikke farlig i et likespenningsanlegg, men andre feil kan få dramatiske følger. Hele rotoren kan i teorien kortsluttes ved feil nummer to. Det er mulig å kontinuerlig overvåke jordfeil i rotor ved å lage et kunstig potensial mot jord i rotorviklingen [6]. Denne metoden kan imidlertid ikke oppdage kortslutning mellom vindinger.

## 2-Synkronmaskinen

På samme måte som spenningsfordelingen endres ved en kortslutning mellom vindinger i feltviklingen, vil også magnetfeltet til rotoren endre seg. Dette er kjernen i metoden som ble undersøkt i denne oppgaven.

### 2.1.2 Dempeviklingene

Polskoene har gjennomgående hull med en glippe opp mot luftgapet. I hullene sitter det dempestaver som er koblet sammen i endene og danner et bur som kalles dempeviklingen, i teorien helt likt hamsterhjulet til induksjonsmotoren. Det induseres ingen strømmer ved stasjonære forhold i dempeviklingen, siden buret ikke opplever noen fluksendring. Ved transiente forløp, som ved lastavslag eller hurtig endring i pådrag, vil det induseres strøm i dempeviklingen og det resulterende magnetfeltet vil dempe svingningene i rotor [7]. Dempestavene kan skades slik at dempeviklingen ikke fungerer som den skal. Staver kan brette, korrodere og/eller smelte. En av stavene i dempeviklingen til laboratoriemaskinen kom ødelagt fra fabrikken. Det så ut som om staven, som bestod av en myk metallegering, hadde blitt skrudd i hjel under montasje. Det kan gå store strømmer i dempestavene ved asynkron drift av synkronmaskinen eller ved skjevlast, som kan smelte og deformere stavene. Dette vil bli nærmere undersøkt i kapittel 4.

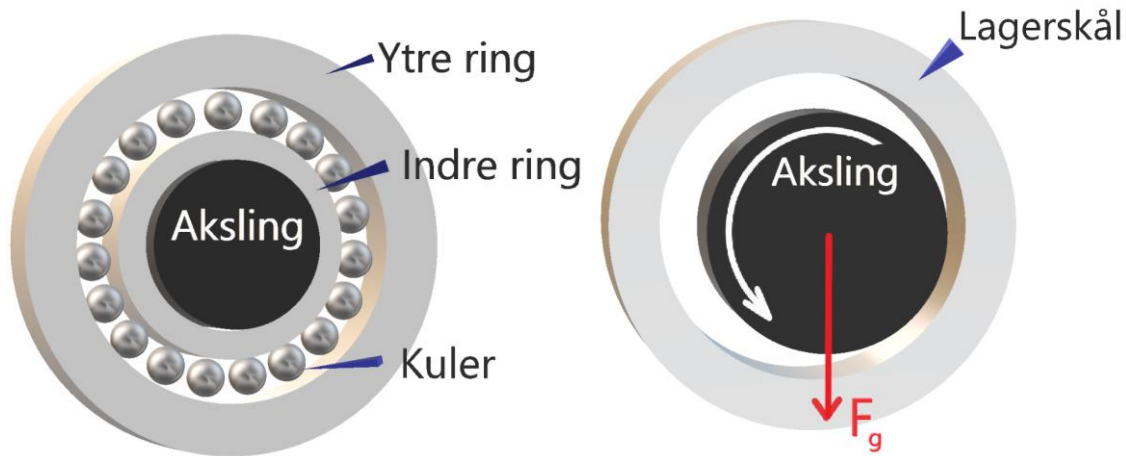
### 2.1.3 Rotorens mekaniske oppbygning og oppførsel

Rotoren blir utsatt for store krefter, og er derfor bygget svært solid. Dette medfører en betydelig vekt, som bærelagrene må ta opp. På en horisontalmaskin vil vekten være en radiell kraft, slik at bærelagrene også må ta opp andre radielle krefter som kunne oppstå. Aksielle krefter tas primært opp av styrelager. I en vertikalmaskin er vekten en aksiell kraft og følgelig må bærelageret også ta opp andre aksielle krefter. Styrelagrene tar derfor opp radielle krefter.

Det er i hovedsak to typer lager som brukes på generatorer: glidelager og rullingslager. Sistnevnte er en fellesbetegnelse for kulelager og rullelager, men disse er bare vanlige på maskiner under 300 kW, som de fleste elektriske maskiner er [6]. På høyere effekter, som vannkraftgeneratorer gjerne har, så er glidelager nesten enerådende. Glidelageret flyter på en tynn oljefilm, som settes opp av akslingens egen rotasjon og/eller av en ekstern oljepumpe. I et kulelager er det kuler som holder akslingen på plass og gjør at akslingen ruller mot den ytre lagerringen, som er den delen av lageret som er festet til lagerhuset, se figur 2.3. Vibrasjoner vil lettere forplante seg fra den roterende akslingen og over til den stillestående lagerbukken/statoren (og visa versa) i et rullingslager enn i et glidelager fordi oljefilmen i et

## 2-Synkronmaskinen

rullingslager er så tynn at akslingen får direkte kontakt med lagerhuset gjennom rullelementene. [6]



Figur 2.3: Kulelager og glidelager.  $F_g$  er tyngdekraften.

Lagrene må lages slik at de tåler termisk ekspansjon. Stålet og oljen vil utvide seg når lageret blir varmt. Et glidelager er romslig i sin natur, men vil løfte seg på grunn av utvidelser i lagerbukken. Et rullingslager er laget slik at det er en viss klarering når det er kaldt slik at det er plass til ekspansjon når det blir varmt. Det finnes industristandarder, tabellert i Appendiks A, som sier hvor mye klaring det skal være i et lager, det vil si relativ bevegelse mellom den indre og ytre lagerringen.

En netto radiell kraft som virker på akslingen vil ikke bare forflytte akslingen i kraftens retning, men også forskyve akslingen vinkelrett i forhold til den påførte kraften. Tyngdekraften på en horisontal maskin virker radielt på akslingen, og vil derfor føre til en statisk forskyvning av rotor, som man kan se på høyre skisse i figur 2.3. [8]

Det er vanskelig å lage en rotor helt symmetrisk. Rotoren vil prøve å rotere om sitt eget tyngdepunkt, så om dette ikke er i senter av akslingen vil det oppstå dynamisk eksentrisitet. Usymmetriske magnetiske krefter kan også forårsake dynamisk eksentrisitet. Eksentrisitet kan føre til vibrasjoner og ekstra slitasje på lager. [6]

## 2.2 Stator

Stator består av et statorhus, som holder på plass statorblikket, som igjen holder på plass ankerviklingen. Statorkjernen er laget av laminter for å unngå virvelstrømmer. I tillegg er den delt opp i seksjoner med glipper imellom slik at kjøleluft kan strømme gjennom kjernen.

## 2-Synkronmaskinen

Ankerviklingen ligger i spor i statorblikket. I likhet med rotoren så er det vanskelig å lage statoren helt perfekt, som kan forårsake ujevnheter og asymmetrier i luftgapet. Sammen med kreftene fra rotor kan hele blikkpakken bevege seg. [6]



Figur 2.4: Statorblikk og ankervikling. [9]

### 2.2.1 Ankerviklingen

Ankerviklingen kan designes på svært mange måter. Dette kapittelet vil primært dekke typiske design for vannkraftgeneratorer, som den i figur 2.4. En mer grundig innføring i hvordan ankerviklingen er bygd opp finnes i Appendix A [4]. Ankerviklingen består av flere spoler som ligger innfelt i spor i statorblikket, slik at hver spole vil trenge to spor. En spolehalvdel som ligger i et spor omtales som en stav, og et spor har typisk plass til to staver. En trefaset ankervikling består av tre grupper med spoler, som innad i hver gruppe kan være serie- og/eller parallelkoblet. De tre fasene kan være koblet i stjerne eller delta. I denne oppgaven behandles bare seriekoblede spoler koblet i stjerne. Dette er av betydning når klemmespenning og ankerstrøm skal analyseres.

Spenningen induisert i en enkelt spole er et produkt av antall vindinger i spolen og fluksendringen, se (2.2). Den magnetiske fluksen er gitt av magnetfeltet  $B$  innenfor det arealet spolen omfavner, (2.3). Eventuelt kan fluksen beskrives som et produkt av den magnetomotoriske kraften (MMK) feltviklingen setter opp og permeansen  $\Lambda$ , som er den inverse av reluktansen  $\mathcal{R}$  til luftgapet, se (2.4). [7]

## 2-Synkronmaskinen

$$e(t) = -N_a * \frac{d\phi(t)}{dt} \quad (2.2)$$

$$\phi = \int B dA \quad (2.3)$$

$$\phi = MMK_e * \Lambda = \frac{N_e i}{\mathcal{R}} \quad (2.4)$$

For å oppnå størst mulig spenning må spolen fange mest mulig av magnetfeltet, med andre ord spenne over et område som tilsvarende det arealet én pol dekker. For å unngå odde harmoniske spenninger som ikke forsvinner i strømmen (kommer tilbake til dette), så er arealet spolene dekker mindre enn det som gir høyest spenning. I tillegg er spolene i samme fase distribuert slik at spenningen som induseres i dem ikke er helt i fase. Dermed dempes uønskede (og ønskede) komponenter i spenningen. Dette fører til en viklingsfaktor  $K_v$ , som er et produkt av skrittforkortningen  $K_{sk}$  (altså forminsket spoleareal) og fordelingsfaktoren  $K_f$ .

$P$  – antall poler

$S$  – antall statorspor

$S_{sv}$  – viklingsskritt

$$Q = \frac{S}{P} \quad (2.5)$$

$$q = \frac{Q}{m} \quad (2.6)$$

$$\alpha_s = \frac{\pi P}{S} \quad (2.7)$$

$$K_v = K_f K_{sk} = \frac{\sin\left(n \frac{\pi}{6}\right)}{q * \sin\left(n \frac{\alpha_s}{2}\right)} * \sin\left(n \frac{\pi P}{2 S} S_{sv}\right) \quad (2.8)$$

Når generatoren belastes, vil det gå en strøm i ankerviklingen, slik at ankerviklingen setter opp  $MMK_a$ , se (2.9)[10]. Feltviklingens og ankerviklingens bidrag må legges sammen for å få den resulterende  $MMK'$ en.

$I$  – rms strøm i ankervikling

$x$  – definerer avstand fra referanse i statoromfanget

$N_{sps}$  – staver pr spor

## 2-Synkronmaskinen

$c$  – antall parallelle kretser

$D_s$  – diameter stator

$$\tau_p = \frac{\pi D_s}{P}$$

$$M = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} * \frac{N_{sps}}{c} * q * K_v * I$$

$$MMK_a = \frac{3}{2} M \cos\left(\omega t - \frac{x}{\tau_p} \pi\right) \quad (2.9)$$

Ikke alle induserte spenninger i ankerviklingen resulterer i en strøm. Harmoniske spenninger i en trefaset ankervikling som er et multiplum av 3 er et eksempel på dette. Generelt så gjelder (2.10), der spenning med frekvens  $f_l$  ikke vil resultere i en strøm om ligningen er oppfylt. [10]

$$f_l = m k f_s \quad (2.10)$$

$m$  – antall faser

$$k = 1, 2, 3 \dots$$

$f_s$  – synkronfrekvensen (50 Hz)





### 3 Feiltilstander og deres innvirkning på magnetfelt, strøm og spenning.

Dette kapitlet tar for seg de elektromagnetiske aspektene ved kortslutningsfeil og eksentrisitet. En feil som har sitt opphav i feltviklingen eller luftgapet vil danne romlige harmoniske i magnetfeltet som kan tolkes direkte ved målinger av fluks. Det er ikke like rett frem å tolke spenningen og strømmen induert i stator ved samme feil. Den induerte klemmespenningen er summen av de individuelle statorstavenes induerte spenning. Det er ikke mulig å dekomponere klemmespenningen til det opprinnelige magnetfeltet siden det er mer enn én løsning. Mange magnetfelt kan lage samme harmoniske spekter på klemmene, dog er noen mer sannsynlige enn andre. Det er langt enklere å ta utgangspunkt i et magnetfelt og finne spekteret dette induerer, noe som ble gjort i dette kapitlet.

(3.1) beskriver hvilke feilkomponenter som oppstår i magnetfeltet og derfor også i spenningen/strømmen ved en kortslutningsfeil og/eller eksentrisitetsfeil [2]. (3.1) kan skrives på formen (3.2) og er i seg selv triviell; alle feil og unøyaktigheter som påvirker magnetfeltet vil variere periodisk som en funksjon av rotorhastigheten. (3.1) gir en rekke med frekvenser, men bare noen av disse vil faktisk dukke opp i klemmespenningen. Hvilke frekvenser dette er avhenger av feiltype og oppbygningen av ankerviklingen. Som beskrevet i kapittel 2.2.1 vil noen komponenter fra magnetfeltet filtreres bort på grunn av pol/sporforhold og lengden på viklingskrittet.

$$f_f = \left(1 \pm 2 \frac{k}{p}\right) f_s \quad (3.1)$$

$$f_f = f_{mek} k \quad (3.2)$$

$$k = 1, 2, 3, ..$$

Flere har undersøkt effekten av ankerviklingens topologi på frekvensspekteret. [11] undersøkte hvordan ulike permanentmagnetmotortopologier oppførte seg ved feil på magnetene (som tilsvarer feltviklingen i vårt tilfelle), både analytisk og eksperimentelt. Frekvenskomponentene ble dempet avhengig av spor-pol-forholdet, viklingskritt og hvor mange magneter som var defekte og deres plassering. [2] undersøkte flere topologier i en 8-polet vannkraftgenerator med numeriske simuleringer (FEM-programvare) og bekreftet at frekvensene ikke ville dukke opp

3-Feiltilstander og deres innvirkning på magnetfelt, strøm og spenning.

dersom spor-pol-forholdet fulgte (3.3). Enkelt sagt vil ikke frekvensene fra (3.1) oppstå hvis ankerviklingen ikke er en brudden vikling. Vel å merke så er (3.3) en brudden vikling når  $k$  er oddetall, men likevel ikke gi noen signatur. Dette vil forklares nærmere senere i dette kapittelet.

$$q = \frac{k}{2} \quad (3.3)$$

For å kunne skille kortslutning, statisk og dynamisk eksentrisitet fra hverandre var det viktig å lage analytiske modeller (AM) som beskrev de ulike feiltypene og hvilke harmoniske komponenter som ville dukke opp i strøm og spenning. Det ble laget flere analytiske modeller av de ulike feiltypene. Inspirasjonskildene til modellene var [11], [2] og [12], som har lignende modeller.

Modellene vil bli beskrevet i detalj i de neste delkapitlene, men her er en kort overordnet beskrivelse. Det ble utviklet tre modeller:

- Kortslutning i feltvikling (KF) – kapittel 3.3
- Statisk eksentrisitet (SE), med kortslutning i feltvikling – kapittel 3.4
- Dynamisk eksentrisitet (DE) – kapittel 3.5

Modellene tok inn antall poler og ankerviklingsutlegget, som ble hentet direkte fra WLP (se kapittel 3.1), til en spesifikk maskin. Modellen hadde også en enkel reluktansmodell som bruker størrelsen på luftgapet, antall vindinger og strøm i feltviklingen som parametere. Kjernen i modellene var Fourierrekker som beskriver den spesifikke feilen. Fourierrekkene ble til en viss grad kombinert for å lage mer komplekse feiltyper. Ut av modellene kom de harmoniske spenningskomponentene i tidsdomenet og frekvensdomenet, med amplitude i volt. Følgende forenklinger gjelder alle fundamentale modeller:

- Rotor og stator var helt sirkulære.
- Ingen magnetisk metning.
- Generelle forenklinger i magnetfeltets form.
- Ingen strømfortrenging, flukslekkasjer og virvelstrømmer.
- Ingen ankerreaksjoner.

Det finnes mange eksempler på analytiske og numeriske modeller av eksentrisitetsfeil i elektriske maskiner, særlig i induksjonsmaskiner [13]. Induksjonsmaskiner er gjerne så små at de ofte bruker rullingslager, som gjør at de er særlig utsatt for lagerfeil [14]. Modellene tar ofte utgangspunkt i ankerstrømmen. De tar sjeldent sikte på å bestemme et nøyaktig amplitudeutslag

3-Feiltilstander og deres innvirkning på magnetfelt, strøm og spenning.

for å kunne bestemme feilgraden, men heller på å finne et trendmønster og hvilke frekvenskomponenter man bør holde øye med. Modellene tar derfor i varierende grad høyde for metning, statorspor, rotor geometri og ankerreaksjon. Også hybridmodeller, det vil si kombinert analytisk og numerisk modell, tar sikte på en økt presisjon sammenlignet med en ren analytisk modell.

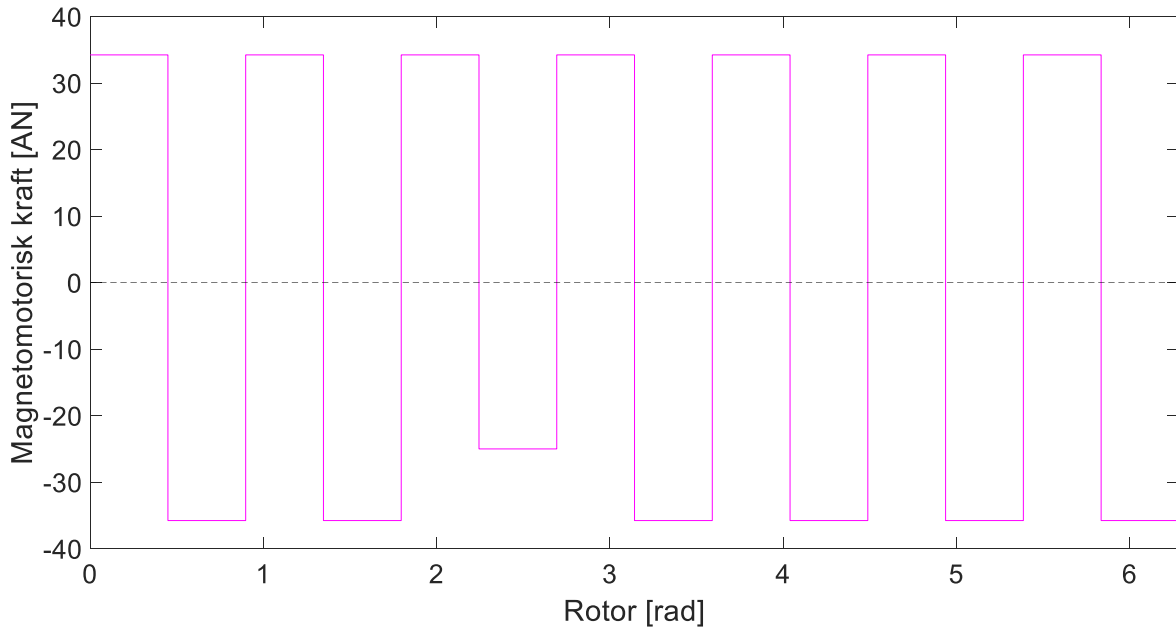
### **3.1 «IEL's Winding layout program» (WLP)**

Dette er en MATLAB-app med grafisk brukergrensesnitt som ble utviklet for undervisningsformål av Robert Nilssen, professor ved institutt for elkraftteknikk, NTNU [12]. Den tar inn parametere som sportall, antall faser, antall poler, viklingskritt og én eller tolags vikling. Ved å summere alle spenningskomponentene til hver enkelt statorstav konstruerer den det resulterende harmoniske spekteret. Appen legger selv ut vindingene som passer med de parameterne som brukeren har lagt inn.

### **3.2 Kortslutning i feltviklingen (KF)**

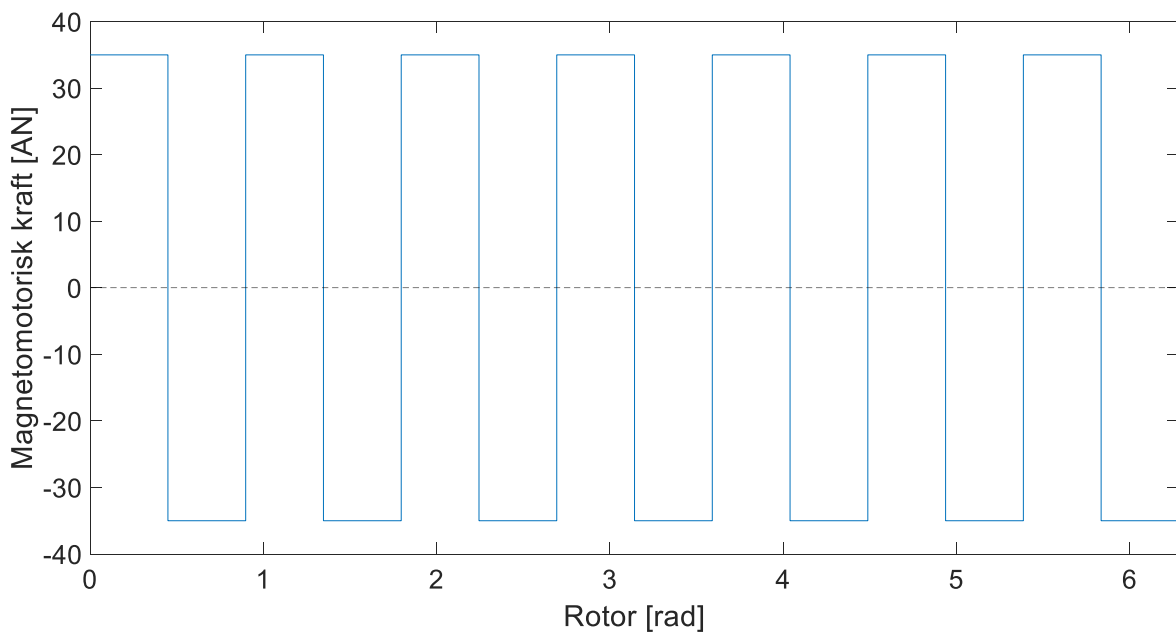
Feltviklingen setter opp en magnetomotorisk kraft i luftgapet, som avhenger av antall vindinger og størrelsen på strømmen som går gjennom dem. Hvis  $N$  vindinger er kortsluttet i feltviklingen, kan det resulterende feltet beskrives som superposisjonen av et friskt felt og et felt som er satt opp av en fiktiv spole med samme antall  $N$  vindinger som er kortsluttet [15]. Dette er en forenklet fremstilling som neglisjerer magnetisk metning [2, 16]. Den magnetomotoriske kraften er fremstilt som rektangler, men disse har i realiteten, blant annet på grunn av polskoens form og polenes plassering i forhold til hverandre, en mer buet form.

### 3-Feiltilstander og deres innvirkning på magnetfelt, strøm og spenning.



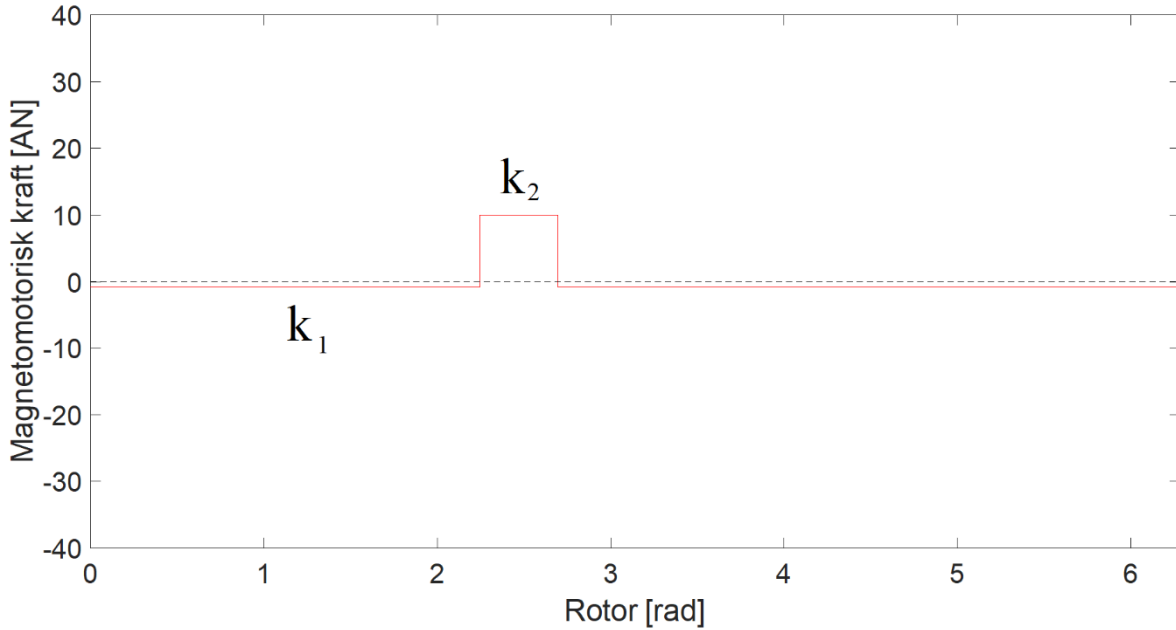
**Figur 3.1: Sykt felt. 10 vindinger av totalt 35 er kortsluttet i en av polene**

Feltviklingen i figur 3.1 har et «sykt» magnetfelt der 10 vindinger av totalt 35 i den ene polen er kortsluttet. Dette feltet kan dekomponeres i to felt, figur 3.2 og 3.3, henholdsvis friskt felt og syk komponent.



**Figur 3.2: Friskt felt**

### 3-Feiltilstander og deres innvirkning på magnetfelt, strøm og spenning.



Figur 3.3: Syk komponent.  $k_2$  er amplituden til den syke polen, som tilsvarer antall kortsluttede vindinger og magnetiseringsstrømmen.

Fourierrekken til det syke feltet fra figur 3.3, regnes ut på de påfølgende sidene. B-feltet biter seg selv i halen, slik at arealet på oversiden av x-aksen, (3.5), må være like stort som arealet under, (3.4). Ved å sette inne (3.4) og (3.5) inn i (3.6) får man (3.7), der  $k_1$  blir en funksjon av  $k_2$  i (3.8).

$$A_{k_1} = k_1 \left( \frac{P\pi}{2} - \frac{\pi}{2} \right) = k_1 \left( \frac{2p\pi - 2\pi}{P} \right) = k_1 2\pi \left( \frac{P-1}{P} \right) = k_1 2\pi \left( 1 - \frac{1}{P} \right) \quad (3.4)$$

$$A_{k_2} = k_2 \frac{2\pi}{P} \quad (3.5)$$

$$A_{k_1} = -A_{k_2} \quad (3.6)$$

$$-k_2 \frac{2\pi}{P} = k_1 2\pi \left( 1 - \frac{1}{P} \right) \quad (3.7)$$

$$k_1 = \frac{-1}{P} \left( \frac{P}{P-1} \right) k_2 = \frac{1}{1-P} k_2 \quad (3.8)$$

En Fourierrekke (3.9) har koeffisienter bestemt av (3.10), (3.11) og (3.12) [17].

$$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(nx) + b_n \sin(nx) \quad (3.9)$$

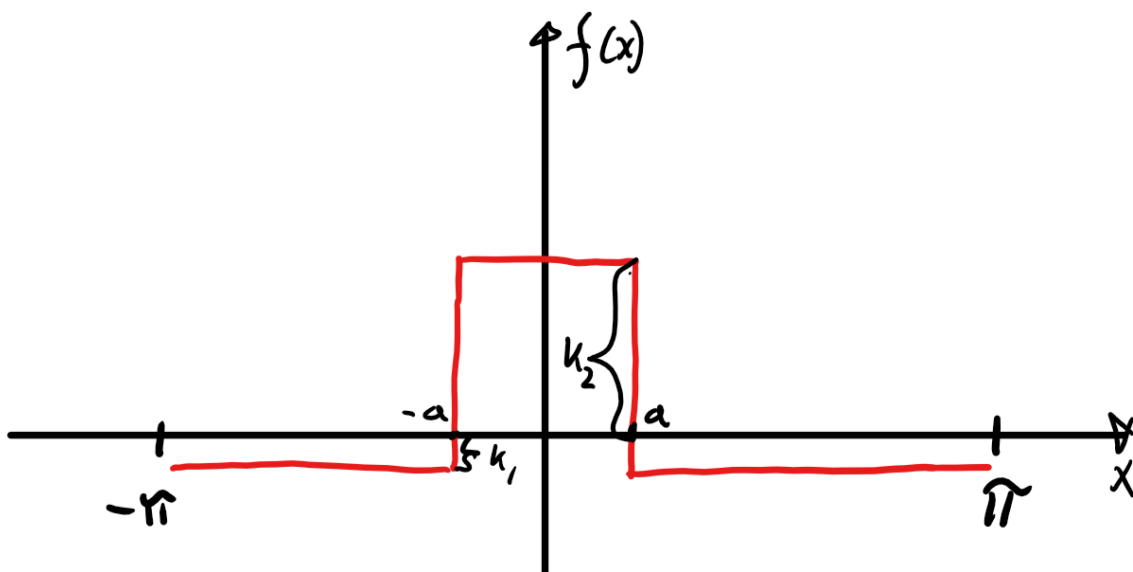
$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) dx \quad (3.10)$$

3-Feiltilstander og deres innvirkning på magnetfelt, strøm og spenning.

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos(nx) dx \quad (3.11)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \sin(nx) dx \quad (3.12)$$

Figur 3.4 er den generelle matematiske fremstillingen av MMK til en feltvikling med kortslutning i én pol. Hele rotoren spanner seg fra  $-\pi$  til  $\pi$ , mens den kortsluttede polen spanner seg fra  $-a$  til  $a$ .



Figur 3.4: Generell matematisk fremstilling av MMK til én syk pol

(3.10) blir null på grunn av samme areal over og under x-aksen.

$$a_0 = 0$$

Løser (3.11):

$$\begin{aligned} a_n &= \frac{1}{\pi} \left[ \int_{-\pi}^{-a} k_1 \cos(nx) dx + \int_{-a}^a k_2 \cos(nx) dx + \int_a^{\pi} k_1 \cos(nx) dx \right] \\ &= \frac{1}{\pi} \left( \left[ \frac{k_1 \sin(nx)}{n} \right]_{-\pi}^{-a} + \left[ \frac{k_2 \sin(nx)}{n} \right]_{-a}^a + \left[ \frac{k_1 \sin(nx)}{n} \right]_a^{\pi} \right) \end{aligned}$$

3-Feiltilstander og deres innvirkning på magnetfelt, strøm og spenning.

$$\begin{aligned}
 &= \frac{1}{\pi} \left( \frac{k_1 \sin(n(-a))}{n} - \frac{k_1 \sin(-n\pi)}{n} + \frac{k_1 \sin(n\pi)}{n} - \frac{k_1 \sin(na)}{n} + \frac{k_2 \sin(na)}{n} \right. \\
 &\quad \left. - \frac{k_2 \sin(-na)}{n} \right) \\
 &\quad \sin(n\pi) = \sin(-n\pi) = 0 \\
 &\quad \sin(-x) = -\sin(x) \\
 &= \frac{1}{\pi} \left( -\frac{1}{1-P} \frac{k_2 \sin(na)}{n} - 0 + 0 - \frac{1}{1-P} \frac{k_2 \sin(na)}{n} + \frac{k_2 \sin(na)}{n} + \frac{k_2 \sin(na)}{n} \right) \\
 &= \frac{k_2}{n\pi} \sin(na) \left( \frac{-2}{1-P} + 2 \right) = \frac{2k_2}{n\pi} \sin(na) \left( 1 - \frac{1}{1-P} \right) \quad (3.13)
 \end{aligned}$$

Løser (3.12):

$$\begin{aligned}
 b_n &= \frac{1}{\pi} \left[ \int_{-\pi}^{-a} -\frac{k_2}{13} \sin(nx) dx + \int_{-a}^a k_2 \sin(nx) dx + \int_a^{\pi} -\frac{k_2}{13} \sin(nx) dx \right] \\
 &= \frac{1}{\pi} \left( \left[ \frac{k_2}{13} \cos(nx) \right]_{-\pi}^{-a} + \left[ -\frac{k_2}{n} \cos(nx) \right]_{-a}^a + \left[ \frac{k_2}{13} \cos(nx) \right]_a^{\pi} \right) \\
 &= \frac{1}{\pi} \left( \frac{k_2}{13} \frac{\cos(-na)}{n} - \frac{k_2}{13} \frac{\cos(-n\pi)}{n} + \frac{k_2}{13} \frac{\cos(n\pi)}{n} - \frac{k_2}{13} \frac{\cos(na)}{n} - \frac{k_2 \cos(na)}{n} \right. \\
 &\quad \left. + \frac{k_2 \cos(-na)}{n} \right)
 \end{aligned}$$

$\cos(\pi) = \cos(-\pi) = -1$ $\cos(x) = \cos(-x)$
---

$$= \frac{1}{\pi} \left( \frac{k_2}{13} \frac{\cos(na)}{n} + \frac{k_2}{n} - \frac{k_2}{13} - \frac{k_2}{13} \frac{\cos(na)}{n} - \frac{k_2 \cos(na)}{n} + \frac{k_2 \cos(na)}{n} \right) = 0 \quad (3.14)$$

3-Feiltilstander og deres innvirkning på magnetfelt, strøm og spenning.

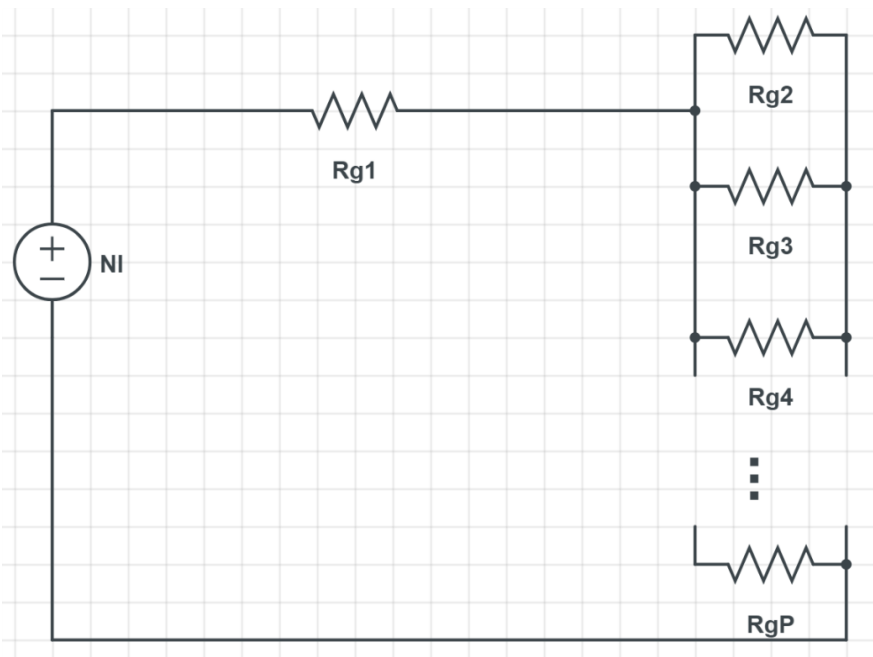
Setter (3.13) og (3.14) inn i (3.9), og kommer frem til den generelle ligningen (3.15), der  $a$  er en funksjon av antall poler.

$$f(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2k_2}{n\pi} \sin(na) \left(1 - \frac{1}{1-P}\right) \cos(nx) \quad (3.15)$$

$$a = \frac{\pi}{P}$$

$k_2$  representerer flukstettheten  $B_g$  i luftgapet. Denne ble regnet ut med en forenklet reluktansmodell av maskinen med feltvikling på én pol. Modellen tok ikke høyde for aspekter i geometrien til rotor og stator som kunne gi opphav til andre harmoniske frekvenser enn de beskrevet av (3.15). Merk følgende forenklinger:

- Reluktansen til stator- og rotorjernet er så liten at effekten av disse kan neglisjeres.
- Polene dekker hele luftgapet og magnetfeltet i luftgapet er homogent.



Figur 3.5: Reluktansmodell for KF-modell

Fra figur 3.5 får man (3.16), der reluktansen i luftgapet er gitt av (3.17). Ved å omrokere (3.18) og kombinere den med (3.16) og (3.17) får man (3.19), som ble brukt i AM.

$$N_e I = \left(R_g + \frac{R_g}{P-1}\right) \phi = R_g \phi \left(1 + \frac{1}{P-1}\right) \quad (3.16)$$



3-Feiltilstander og deres innvirkning på magnetfelt, strøm og spenning.

$$R_g = \frac{l_g}{\mu A_g} \quad (3.17)$$

$$\phi = A_g B_g \quad (3.18)$$

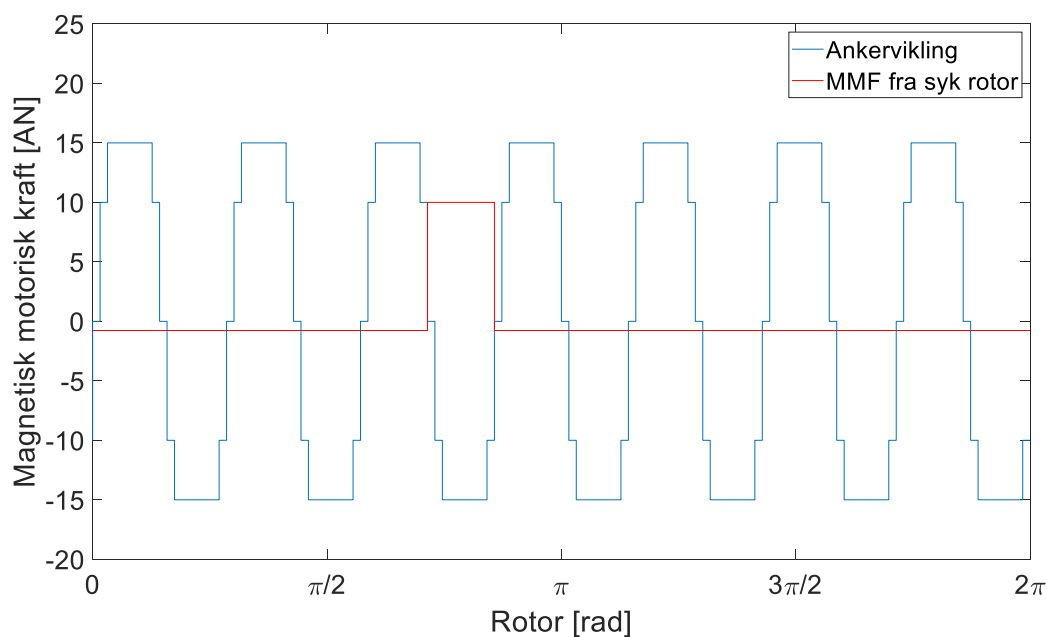
$$B_g = \frac{\phi}{A_g} = \frac{N_e I \mu A_g}{l_g A_g \left(1 + \frac{1}{P-1}\right)} = \frac{N_e I \mu}{l_g \left(1 + \frac{1}{P-1}\right)} \quad (3.19)$$

$$\mu = \mu_0 = 4\pi * 10^{-7}$$

Når feilkomponenten har tatt en omdreining, har den fullført en mekanisk periode. Men hvor lang er egentlig den elektriske perioden? Perioden må sees fra ankerviklingen, og ikke rotoren. Når den «friske»  $MMK_e$  har beveget seg  $\frac{4\pi}{p}$ , vil ankerviklingen ha opplevd det som en periode, altså  $2\pi$ . Hvordan vil ankerviklingen oppleve en «syk»  $MMK_e$ ?

For å kunne feilsøke modellen var det viktig å ha en intuitiv forståelse av hva man kunne forvente av komponenter. Ved å sammenligne feltets form med ankerviklingens distribusjon av generatorstaver kan man få en formening om de harmoniske komponentene.

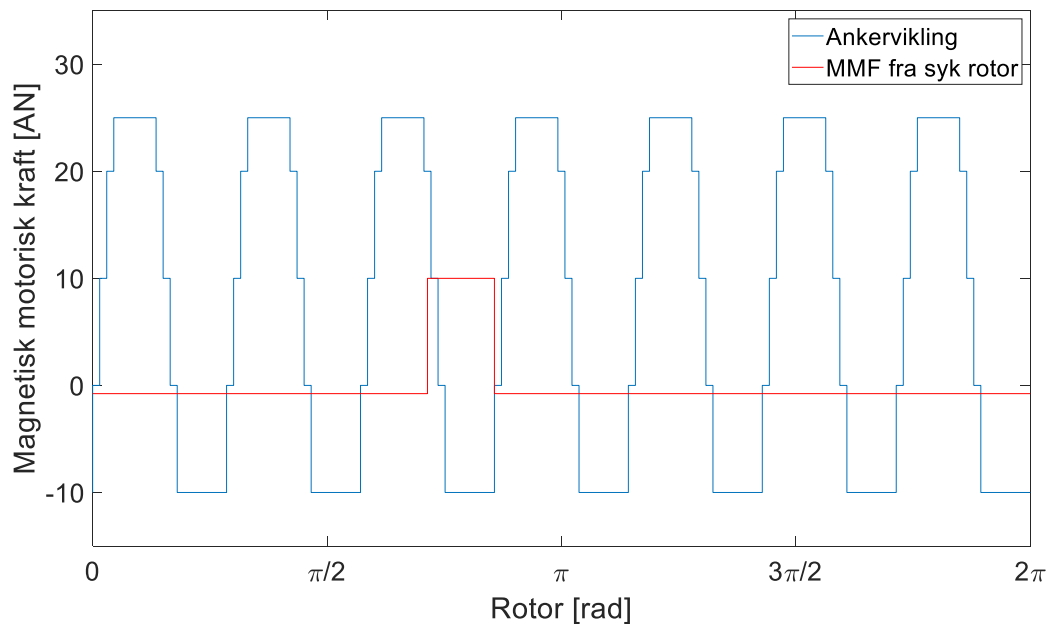
Hvis generatoren ikke har brudden vikling, for eksempel 126 spor og 14 poler, vil det syke feltet generere en 50 Hz, samt dens harmoniske, se figur 3.6. Den røde linjen er magnetfeltet i rommet og vil bevege seg som en funksjon av tid. Den blå er summen av antall vindinger/staver i stator og står fast i rommet. Det er ingen annen periodisk variasjon enn den som varer i 20 ms siden stavene er likt distribuert i statoren.



Figur 3.6: 14 polet generator med 126 spor og sporskritt på 8 (fullt skritt er 9).

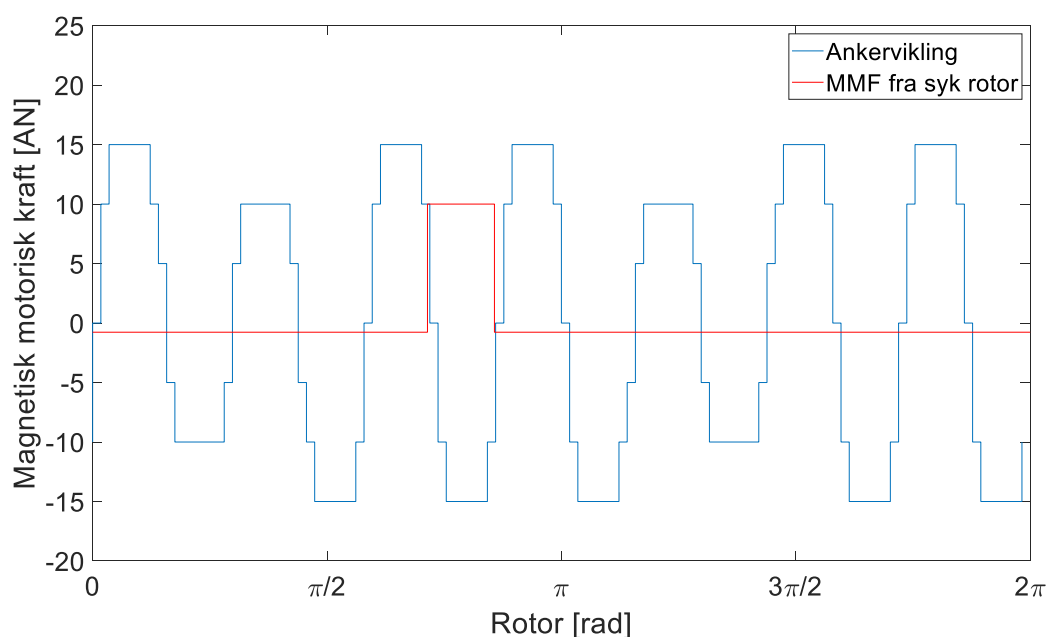
### 3-Feiltilstander og deres innvirkning på magnetfelt, strøm og spenning.

Hvis generatoren har en “halvbrudden vikling”, det vil si  $Q = x \frac{1}{2}$ , vil det også induseres en 50 Hz, 150 Hz og så videre av samme grunn som foregående eksempel, se figur 3.7.



Figur 3.7: 14 poler, 133 spor og et skritt på 9 (fullt skritt på 9.5)

Med 14 poler, 114 spor og et skritt på 8, som laboratoriegeneratoren hadde, vil det derimot induseres ikke bare en grunnharmonisk 50 Hz, men også andre frekvenser, uten at det er mulig å anslå direkte hvilke det er ved å se på figur 3.8. For å kunne gjøre dette ble det laget en mer detaljert modell.



### 3-Feiltilstander og deres innvirkning på magnetfelt, strøm og spenning.

Figur 3.8:14 poler, 114 spor og et skritt på 7 (fullt skritt på 8.14).

Ankerviklingen til en fase kan deles inn i viklingsgrupper, som igjen kan deles inn i de enkelte viklingene (som gjerne har flere vindinger), som igjen kan deles opp i de enkelte generatorstavene. Hver enkelt stav vil oppleve at det samme syke rotorfeltet passerer, men på forskjellig tidspunkt. Det vil si at de vil ha det samme spenningsforløpet, bare forskjøvet i tid. Spenningen som induseres i en enkelt statorstav er gitt av (3.20), der  $B_g$  er en funksjon av posisjon og tid.

$$e(\theta, t) = v * l * B_g(\theta, t) * c(\theta) \quad (3.20)$$

$$v = 2\pi r f_{mek}$$

$v$  er hastigheten på feltet og  $l$  er lengden på statorjernet.  $c$  er en koblingsfaktor som enten er  $N_a$  eller  $-N_a$ , slik at alle spenningene som induseres får samme fortegn og at antall vindinger i hver statorstav blir medregnet. Fourierrekken gjøres tids- og stedsavhengig, henholdsvis  $t$  og  $\theta$ , hvorav sistnevnte beskriver hvor langt en stav er unna referansestaven, som var stav i spor nummer 1 fra «WLP».

$$\theta(N_s) = \alpha_s N_s \quad (3.21)$$

$$N_s - \text{spornummer}$$

$$\alpha_s - \text{vinkelen mellom to nabospor}$$

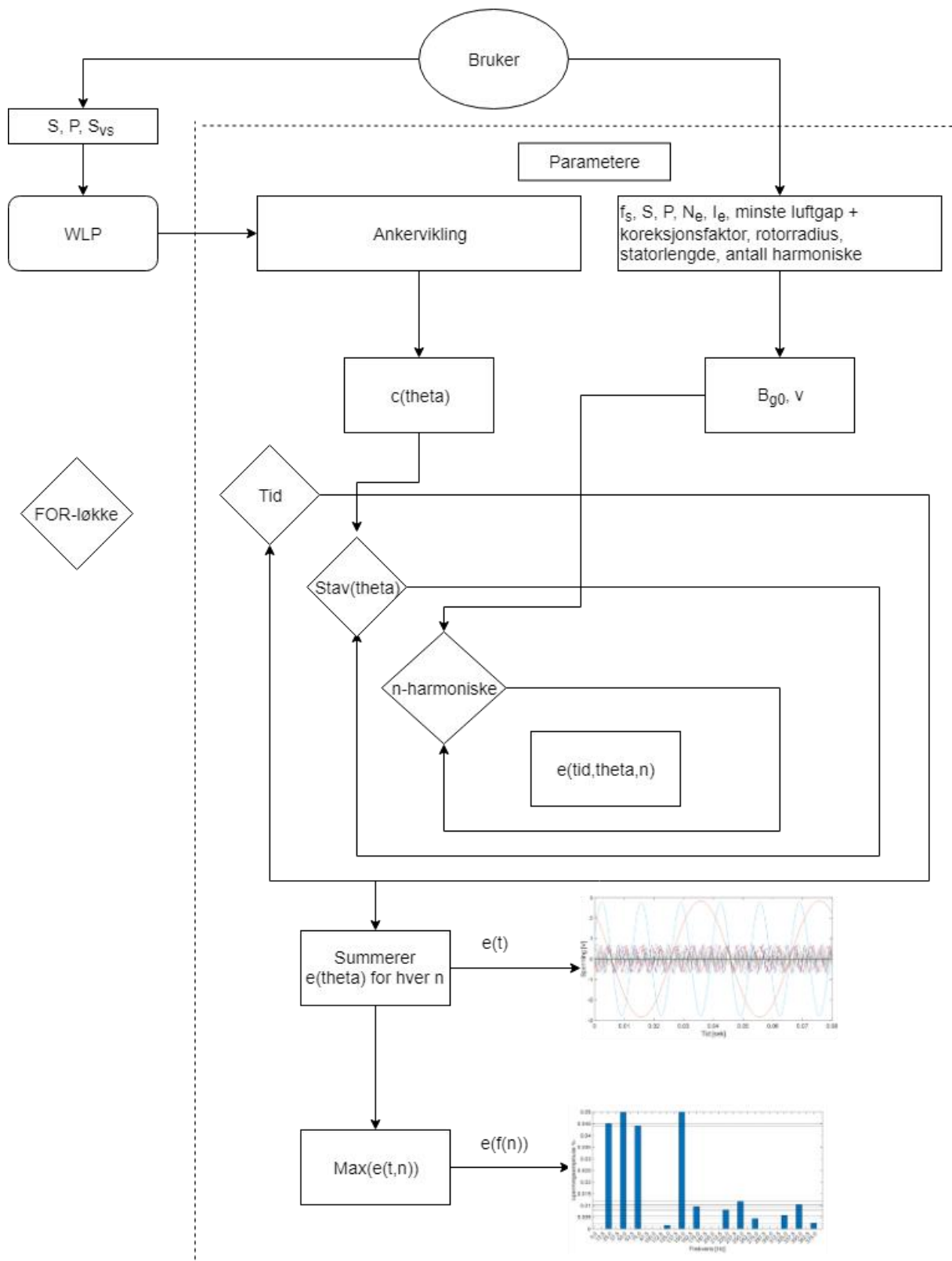
Fourierrekken for indusert spenning i en enkelt stav ble (3.22), som er (3.15) gjort tids- og posisjonsavhengig og satt inn i (3.20).

$$e(\theta, t) = vlc * a_n * \cos(n(\theta - 2\pi f_{mek}t)) \quad (3.22)$$

Klemmespenningen ble utregnet ved å legge sammen alle de induserte spenningene på et tidspunkt for hver enkelt harmonisk komponent. MATLAB-programmet for KF ligger i Appendiks A, med maskintopologien til laboratoriegeneratoren. Flytskjemaet for programmet står på neste side, tabell 3.1. Programmet gir primært ut en graf i tidsplanet med de individuelle harmoniske komponentene, og et søylediagram som viser amplituden til de harmoniske komponentene i tidsplanet.

### 3-Feiltilstander og deres innvirkning på magnetfelt, strøm og spenning.

Tabell 3.1: Flytskjema analytisk modell av kortslutning i feltviklingen



3-Feiltilstander og deres innvirkning på magnetfelt, strøm og spenning.

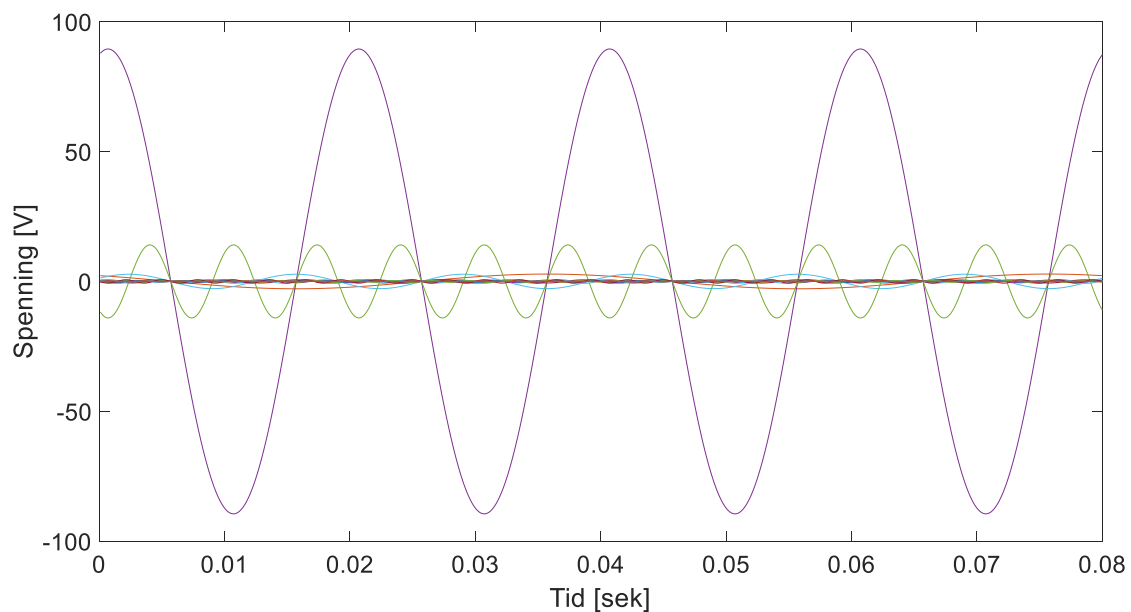
### 3.2.1 Verifikasjon av KF algoritme

[11] brukte en lignende analytisk modell som beskrevet i kapittel 3.2, samt FEM-simuleringer og laboratorietester. [2] verifiserte resultatene ved å gjøre simuleringer av en vannkraftgenerator i ANSYS Maxwell, samt at frekvenskomponentene til rotorfeltet ble funnet analytisk. [2] gjorde derimot ikke noen teoretisk analyse av hvilket utslag disse frekvensene ville gitt på klemmespenningen. Maskintopologiene til [2] ble derfor analysert med metoden utviklet i kapittel 3.2 for å sammenligne resultatene programmet gir med de resultatene [2] fikk i ANSYS Maxwell. Mer informasjon om «Maskin 1» finnes i kapittel 6.4.

Omtrentlig maskintopologi av «Maskin 1» for bruk i reluktansmodell [1]:

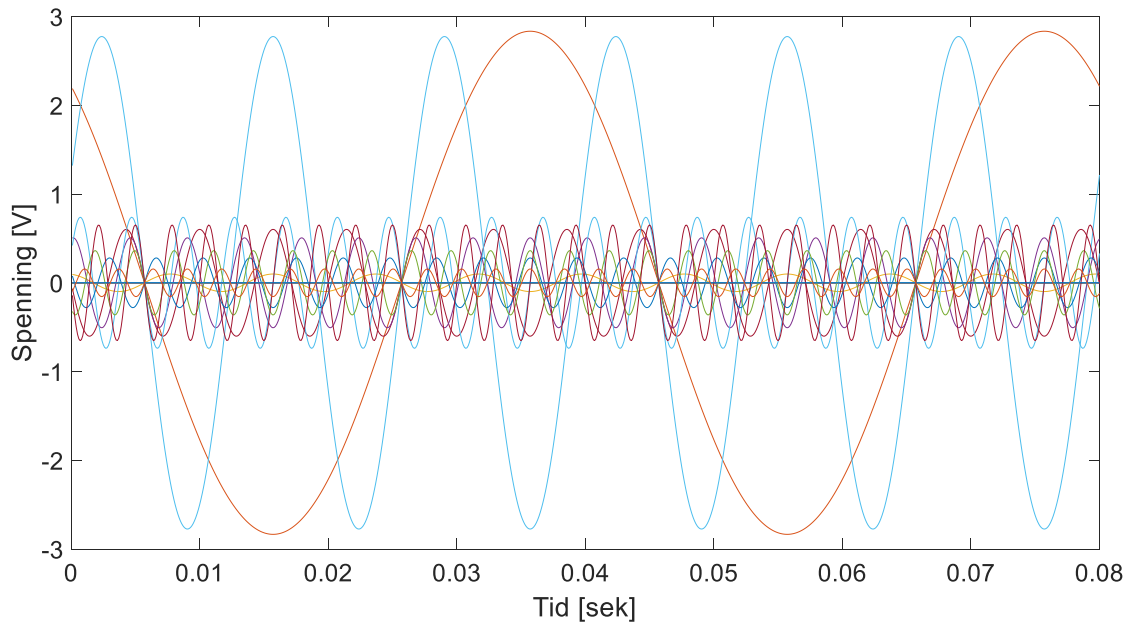
Rotordiameter	1994 mm
Stators indre diameter	2040 mm
Luftgap	46 mm
Effektivt luftgap	Faktor på 2
Lengde	1220 mm
$I_e$	279 A

Figur 3.9 viser de 30 komponentene med lavest frekvens i tidsdomenet. 50 Hz og 150 Hz var dominerende, men siden disse komponentene ikke var interessante ble de tatt bort i figur 3.10. For å kunne sammenligne resultatene mer systematisk ble amplituden til de 30 komponentene med lavest frekvens tabellert i et søylediagram, se figur 3.11.

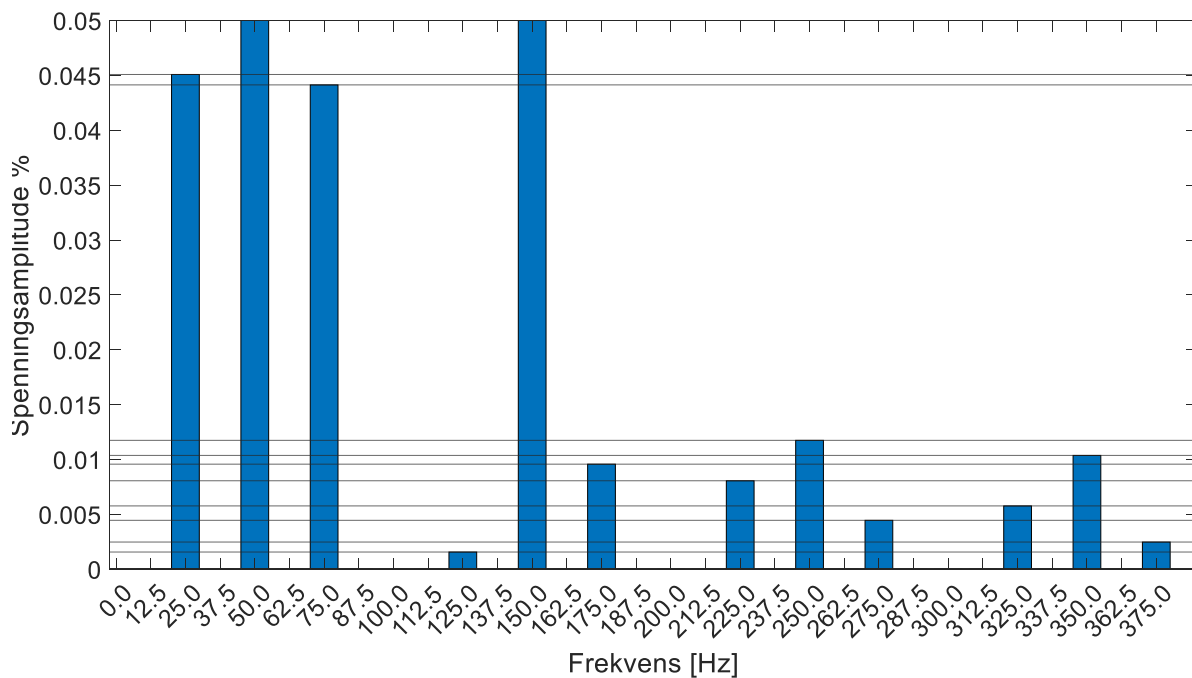


Figur 3.9: Maskin 1: 126 spor med vikleingskritt på 13. 10 vindinger er «kortslettet» (KF).

### 3-Feiltilstander og deres innvirkning på magnetfelt, strøm og spenning.



Figur 3.10: Maskin 1, KF 10 vindinger, lik figur 3.9 uten 50 Hz og 150 Hz

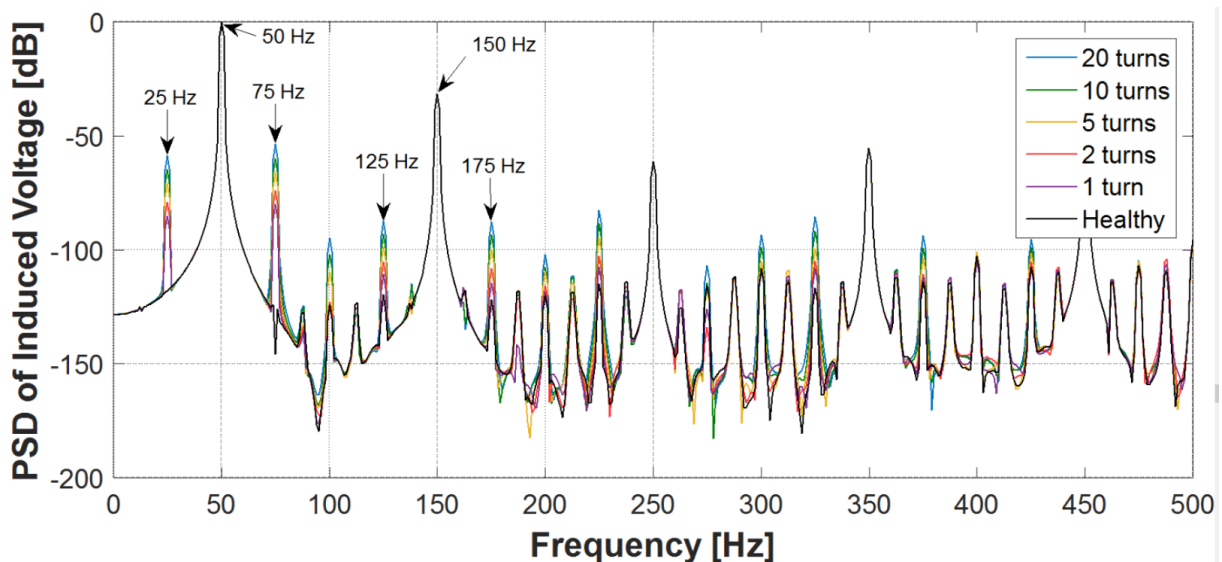


Figur 3.11: Maskin 1, 10 kortsluttede vindinger.

Den enkle modellen av en kortslutningsfeil bestående av 10 vindinger ga de samme feilfrekvensene som [1] fant i sin FEM-modell, men amplitudeverdiene til de harmoniske komponentene og forholdet mellom dem er ikke likt, se figur 3.12. Amplituden på 25 Hz i den analytiske modellen var på -66.92 dB, eller 2.83 V. 25 Hz i [1]'s FEM-modell var på -64.79 dB, eller 3.62 V. Det kunne tenkes at den friske maskinen produserte de manglende 0.8 voltene, men dette kan trolig utelukkes da den friske modellen til [1] ga et utslag på -118.2 dB, som

3-Feiltilstander og deres innvirkning på magnetfelt, strøm og spenning.

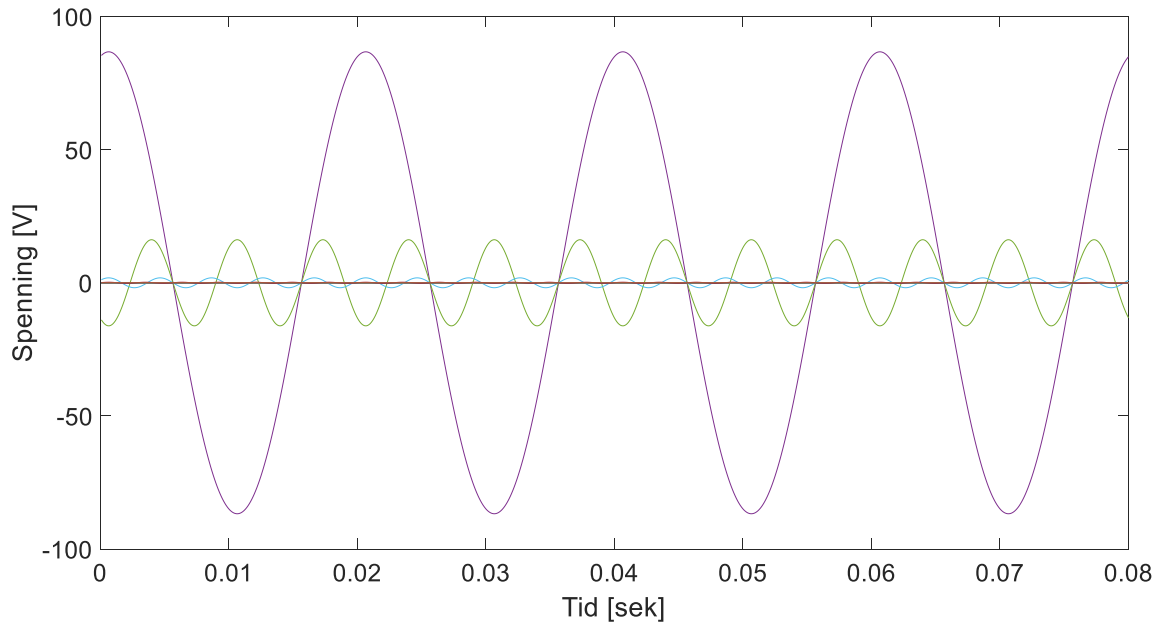
tilsvarende 0.008 V. Forholdet mellom de forskjellige frekvensene samsvarer heller ikke med [1]'s analyse, der 75 Hz-komponenten var større enn 25 Hz-komponenten, mens det var omvendt i den forenklede modellen. Det samme gjelder 125 Hz- og 175 Hz-komponentene, der 175 Hz var større enn 25 Hz i den forenklede modellen, men forholdet var omvendt i [1]'s modell. Det begge modellene var samstemte om var at 25 Hz- og 75 Hz-komponentene er betydelig større enn 125 Hz og 175 Hz.



Figur 3.12: Spenning, Maskin 1, varierende grad av KF [1]

Hva forårsaket disse forskjellene? Begge modellene er forenklede modeller av virkeligheten, hvorav den analytiske er svært forenklet. Formen på magnetfeltet i den fundamentale modellen er firkantet, uten mellomrom mellom polene, mens den i virkeligheten vil være mer sinusformet med rom mellom polene. Faktisk fremstår magnetfeltet i Maskin 1 mer som en trekantbølge [1]. Denne forskjellen i det romlige magnetfeltet kan være grunnen til at den induerte spenningen var noe lavere i den analytiske modellen og at forholdet mellom komponentene var annerledes. Det er i tillegg en rekke andre forenklinger som kan påvirke resultatene.

### 3-Feiltilstander og deres innvirkning på magnetfelt, strøm og spenning.



**Figur 3.13: Maskin 2, KF 10 vindinger: 120 spor og skritt på 13.**

Som forventet ga ikke Maskin 2 noe utslag for andre frekvenser enn 50 Hz og harmoniske av den. Figuren 3.13 viser at det bare ble utslag på 50 Hz (1.), 150 Hz (3.), 250 Hz (5.) og 350 Hz (7.) av de 30 første harmoniske komponentene til (3.1). Dette samsvarer med det [2] og [11] fant. Den fundamentale modellen av KF vurderes derfor som god nok til å avgjøre hvilke frekvenser man kan forvente å finne, samt til en viss grad vurdere størrelsesforholdet mellom dem.



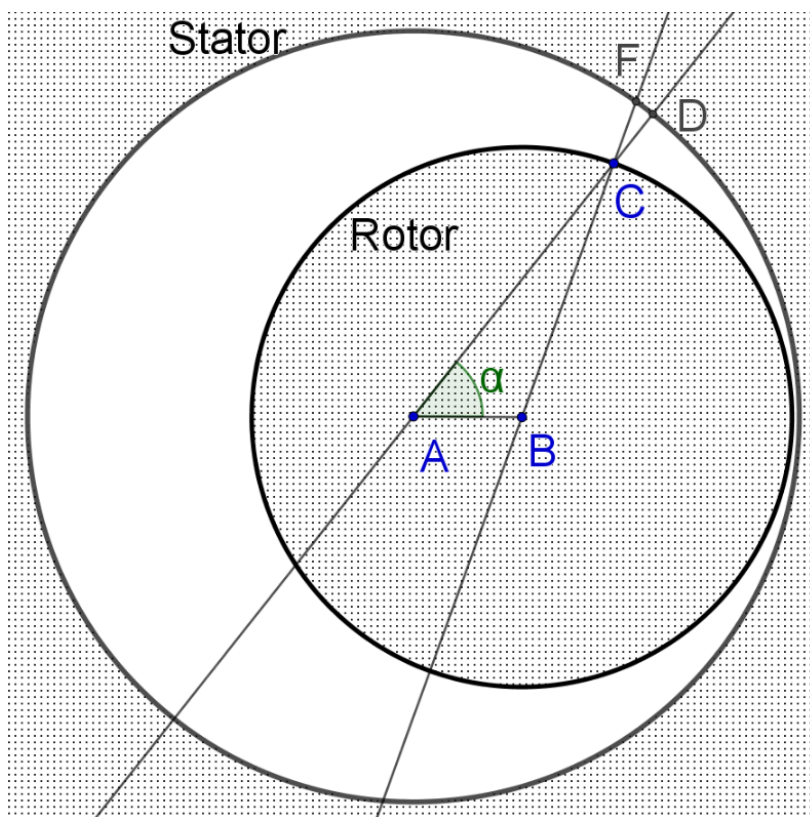
### 3.3 Statisk Eksentrisitet (SE)

Ved statisk eksentrisitet vil størrelsen på luftgapet variere som en funksjon av  $\theta$ . I [2] ble det utviklet en analytisk modell for statisk eksentrisitet med utgangspunkt i arbeidet til [18] og [19]. Resultatene derfra ble brukt direkte inn i den fundamentale modellen av KF siden det ble vist av [2] at statisk eksentrisitet ikke ville gi noe utslag med mindre det var en kortslutning i feltviklingen.

Figuren under er en modell av statisk eksentrisitet. Rotor ble modellert som en perfekt sirkel, det vil si uten utpregede poler som en vannkraftgenerator normalt sett har. Hvis feltviklingen roterer om senter av rotorakslingen, B, og senter til statorboret ligger i A, vil rotoren være statisk forskjøvet med lengden AB, som i prosent av et normalt luftgap,  $g_0$  blir:

$$\delta_s = \frac{AB}{g_0} \quad (3.23)$$

Luftgapet, avstanden CD, vil variere som en funksjon av  $\alpha$ , se figur 3.14. Det er verdt å merke at den korrekte luftgapsavstanden ligger et sted mellom CD og CF, men siden luftgapet er veldig mye mindre enn diameteren på rotor/stator (altså ikke som på figur 3.14) har det ingen praktisk betydning.



Figur 3.14: Statisk eksentrisitet

3-Feiltilstander og deres innvirkning på magnetfelt, strøm og spenning.

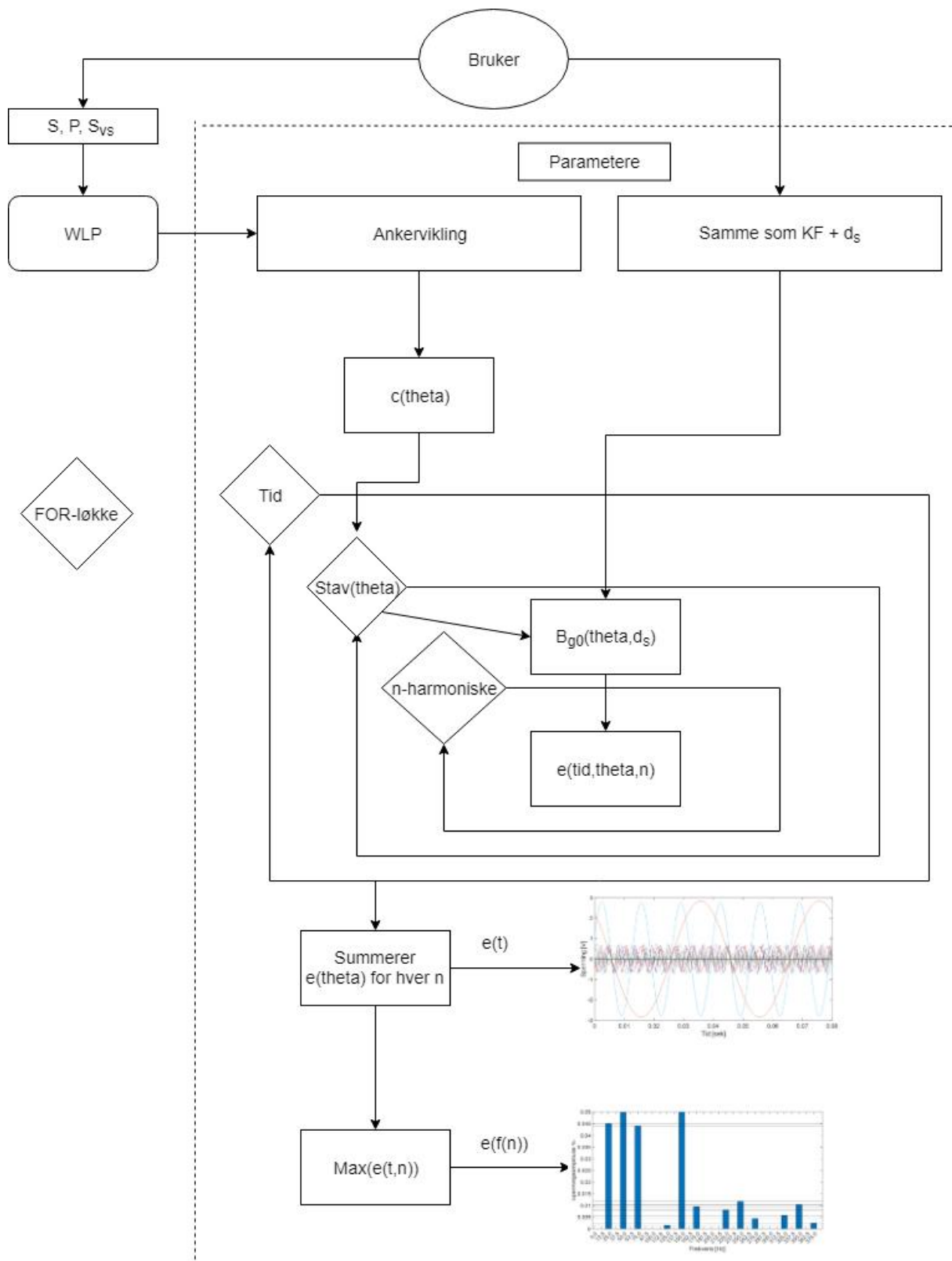
$$\begin{aligned}
 CD &\approx CF \\
 CD &= AD - AC \\
 AC &= AB \cos(\alpha) + \sqrt{BC^2 - AB^2 \sin^2(\alpha)} \\
 AB &= \delta_s g_0 \\
 BC &= R_r \\
 AD &= R_s \\
 \sqrt{BC^2 - AB^2 \sin^2(\alpha)} &\approx R_r \\
 CD &= g \\
 \mathbf{g}(\alpha) &= \mathbf{g}_0(1 - \delta_s \cos \alpha) \tag{3.24}
 \end{aligned}$$

I en maskin med statisk eksentrisitet og frisk feltvikling vil det ikke oppstå noen periodiske variasjoner. Statisk eksentrisitet kombinert med en kortslutning lager derimot et varierende felt som skiller seg fra vanlig kortslutning. Med den forutsetning at statisk eksentrisitet ikke påvirker det friske feltet, gjelder fortsatt superposisjonsprinsippet slik at (3.24) kunne settes direkte inn i den modellen som ble utviklet for kortslutninger.

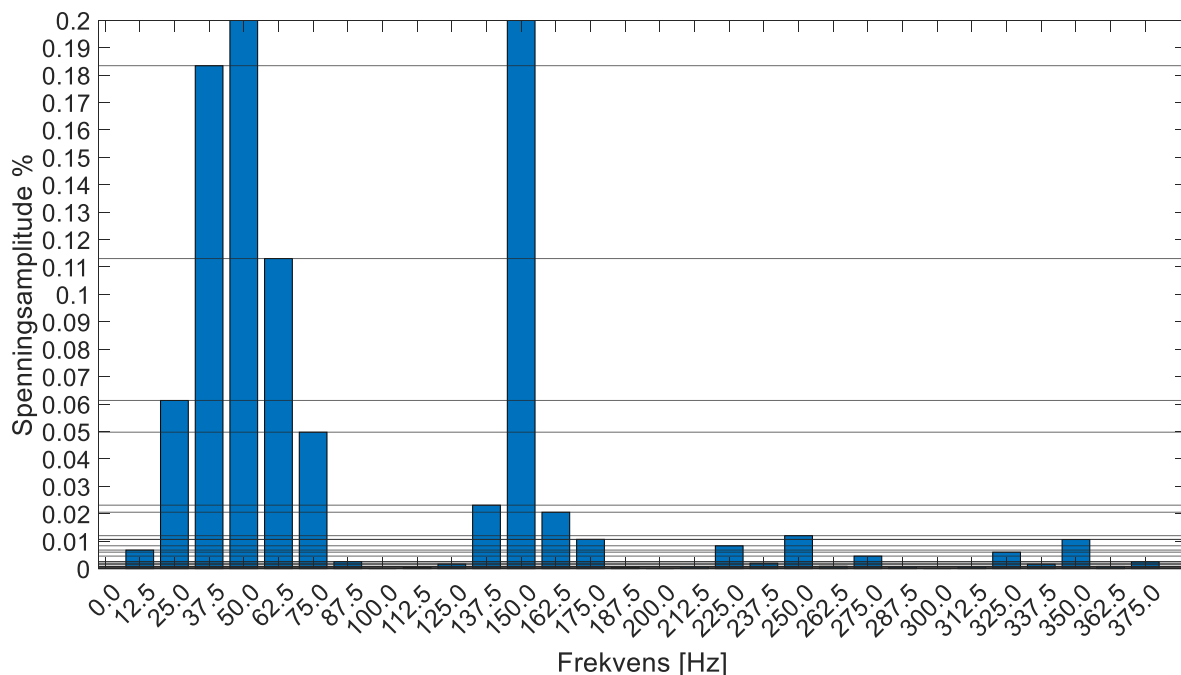
MATLAB-programmet for SE+KF ligger i Appendiks A, med maskintopologien til Ulefoss. Flytskjemaet for programmet står på neste side, tabell 3.2. Den eneste forskjellen mellom KF og SE + KF er at  $B_{g_0}$  er en funksjon av  $\theta$ .

### 3-Feiltilstander og deres innvirkning på magnetfelt, strøm og spenning.

Tabell 3.2: Flytskjema analytisk modell av statisk eksentrisitet i kombinasjon med kortslutning i feltviklingen



### 3.3.1 Verifisering av SE algoritmen



Figur 3.15: Maskin 1, 10 kortsluttede vindinger, 20 % statisk eksentrisitet

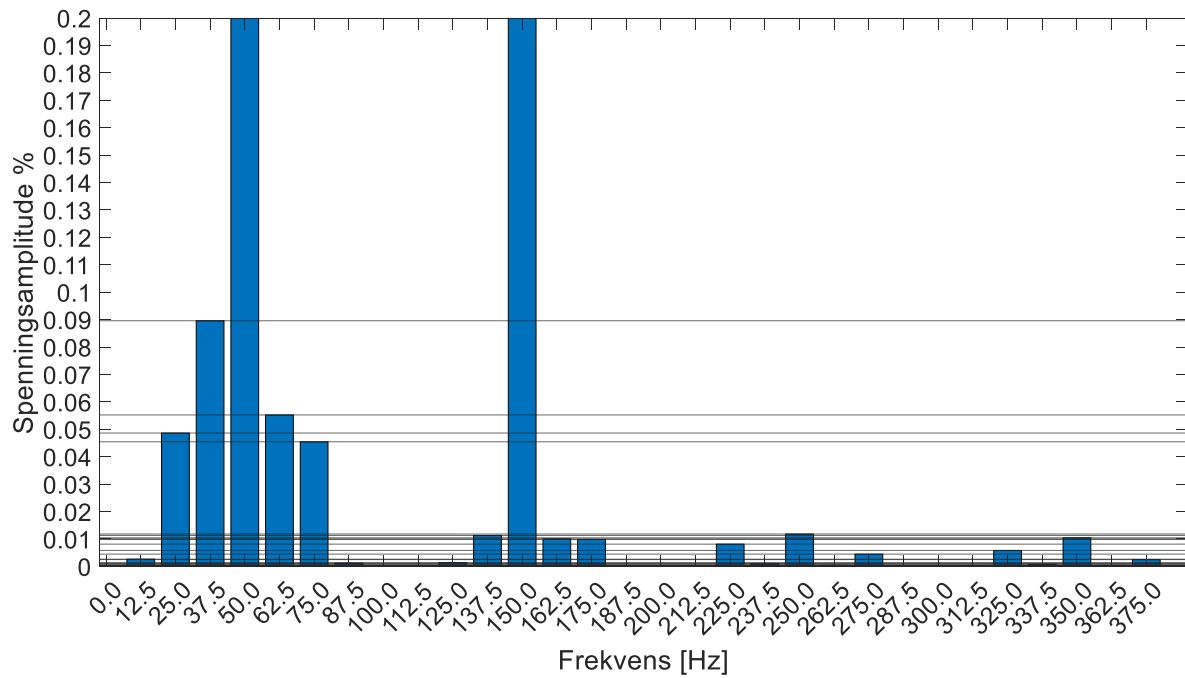
I [2] dukket det opp nye frekvenskomponenter ved å kombinere statisk eksentrisitet og kortslutning. De mest fremtredende av disse var 37.5 Hz og 62.5 Hz, samt 25 Hz og 75 Hz som også var tilstede ved ren kortslutning. Dette var også tilfellet med den fundamentale modellen, men 37.5 Hz og 62.5 Hz er langt større enn 25 Hz og 75 Hz, noe som ikke var tilfellet i [2]’s simuleringer der størrelsesforholdet var omvendt. Tabell 3.3 viser at 37.5 Hz og 62.5 Hz fikk et langt større utslag i den fundamentale modellen enn i [2]’s FEM-modell. Grunnen til dette kan være formen på magnetfeltet, magnetisk metning og/eller andre forenklinger gjort i den fundamentale modellen.

Tabell 3.3: Maskin 1, 20 % eksentrisitet, 10 kortsluttede vindinger

	25 Hz [dB]	37.5 Hz [dB]	62.5 Hz [dB]	75 Hz [dB]
Møller	-64.85	-66.32	-67.32	-59.86
AM	-64.25	-54.73	-58.93	-66.06

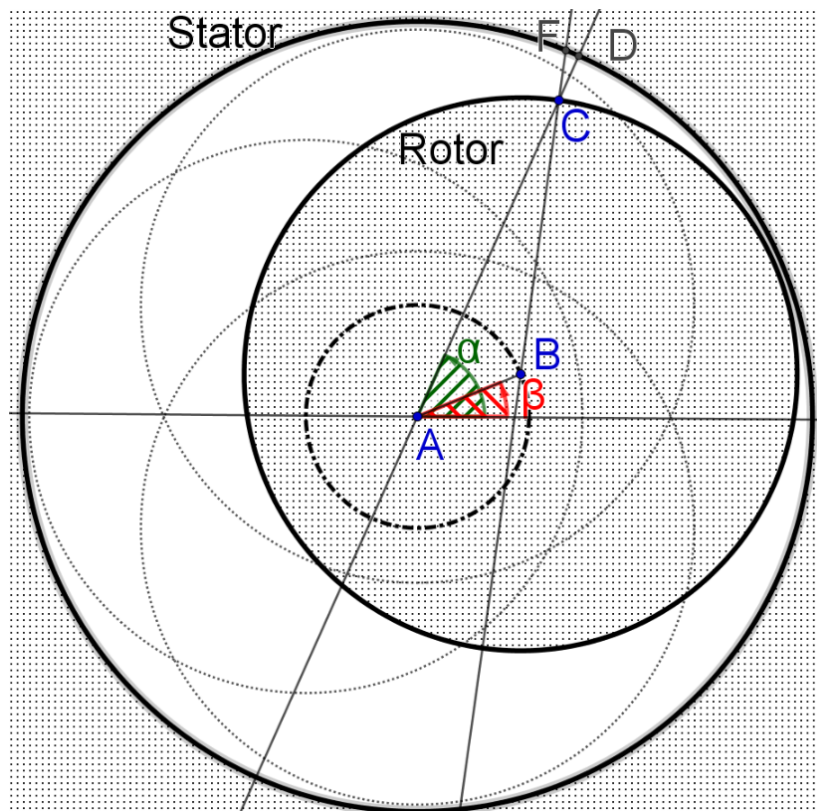
Ved å gå fra 20 % statisk eksentrisitet i figur 3.16 til 10 % figur 3.16 sank 37.5 Hz og 62.5 Hz betraktelig, mens 25 Hz og 75 Hz sank bare noe i verdi.

### 3-Feiltilstander og deres innvirkning på magnetfelt, strøm og spenning.



Figur 3.16: Maskin 1, 10 kortsluttede vindinger, 10 % statisk eksentrisitet

### 3.4 Dynamisk eksentrisitet (DE)



Figur 3.17: Dynamisk eksentrisitet. Rotor har senter i B, som forflytter seg langs den stiplede linjen. Stator har senter i A.

3-Feiltilstander og deres innvirkning på magnetfelt, strøm og spenning.

Dynamisk eksentrisk (DE) vil si at rotoren ikke roterer om senter av rotorakslingen, B, men istedenfor roterer om punktet A, se figur 3.17. Senter av rotorakslingen, B, flytter seg langs den stiplede linjen med en vinkelfart tilsvarende den mekaniske rotasjonshastigheten  $\omega_{mek}$ .  $\beta$  er en funksjon av tid og beskriver B's posisjon.  $\alpha$  beskriver posisjonene til viklingene og tilsvarende  $\theta$  i (3.25) og (3.29). Hvis A ikke er i senter av statorboret er det en blanding av dynamisk og statisk eksentrisitet. [2] kom frem til følgende matematiske modell:

$$g_d = g_0(1 - \delta_d \cos(\theta - 2\pi f_{mek} t)) \quad (3.25)$$

$$B(\theta, t) = \Lambda \int j d\theta \quad (3.26)$$

$$j(\theta, t) = J \sin\left(\omega_s t - \frac{1}{2} P \theta\right) \quad (3.27)$$

$$\Lambda(\theta, t) = \frac{\mu_0}{g_d(\theta, t)} \quad (3.28)$$

$$\begin{aligned} B_d = B_0 \cos\left(\omega_s t - \frac{1}{2} P \theta\right) + \\ \sum_{n=1}^{\infty} B_{n,d}^+ \cos\left[\left(1 + \frac{2n}{P}\right) \omega_s t - \left(\frac{P}{2} + n\right) \theta\right] + \\ \sum_{n=1}^{\infty} B_{n,d}^- \cos\left[\left(1 - \frac{2n}{P}\right) \omega_s t - \left(\frac{P}{2} - n\right) \theta\right] \end{aligned} \quad (3.29)$$

Utleddningen ble opprinnelig gjort for en permanentmagnetmotor [19], men det samme prinsippet vil gjelde for en vannkraftgenerator. (3.25) beskriver luftgapet som en funksjon av tid og rom. (3.27) er strømtettheten i stator, forutsatt at den magnetomotoriske kraften i luftgapet er sinusformet. Etter en del manipulasjon ender man opp med rekken (3.29). Denne ligningen var ikke optimal for å lage en fundamental modell, slik at den endelige ligningen ble (3.30). Det første cosinusleddet i (3.29) representerer den «friske» delen av luftgapet/feltet, og var uinteressant. Det var unødvendig komplisert å implementere to rekker i den fundamentale modellen, slik at disse ble slått sammen til én rekke.

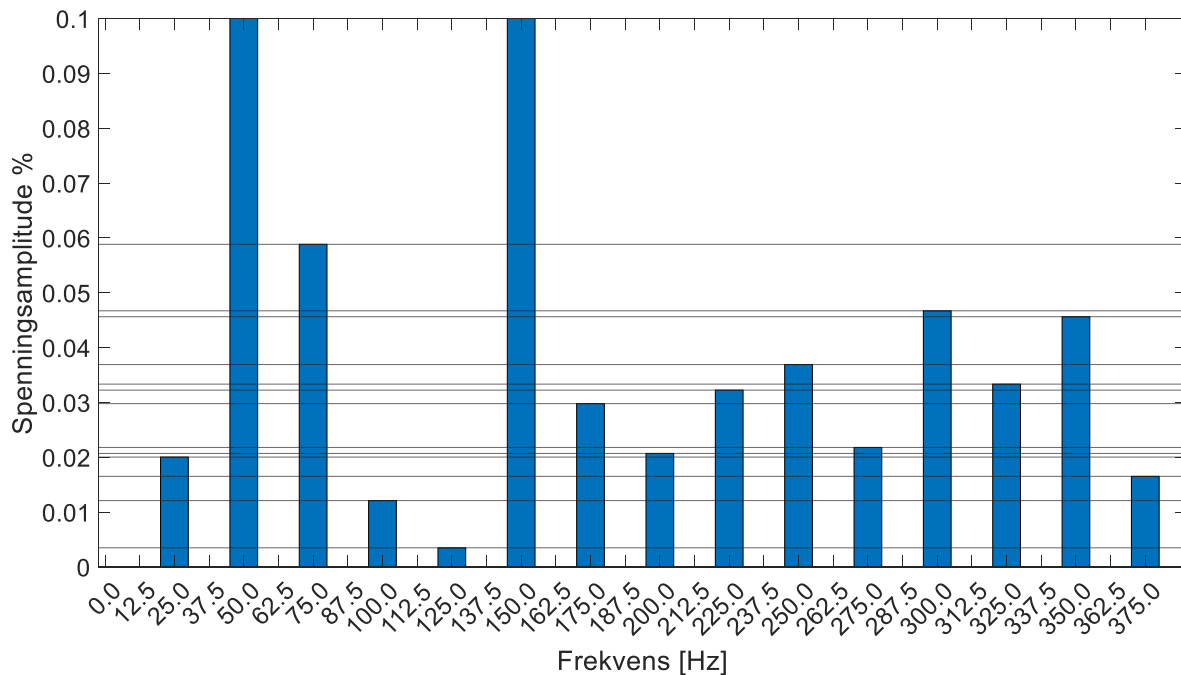
$$e(t, \theta, n) = v l c(\theta) B_g \cos\left(n 2\pi f_s t \frac{2}{P} - n\theta\right) \quad (3.30)$$

$$B_g = \frac{\delta_d N I \mu_0}{2 g_0} \quad (3.31)$$

3-Feiltilstander og deres innvirkning på magnetfelt, strøm og spenning.

Flytskjemaet til DE-programmet er helt likt KF-programmet, men parameterne er litt annerledes. I stedet for å ta antall syke vindinger, så tar programmet inn antall friske vindinger. MATLAB-programmet ligger i Appendiks A med maskintopologien til Liafoss.

### 3.4.1 Verifisering av algoritme



Figur 3.18: Maskin 1, 20 % DE

Figuren 3.18 viser frekvenskomponentene som oppstod i AM, og de var de samme som [2] fikk i sine eksperimenter, med ett unntak. 100 Hz, som gir et utslag på 0.76 V (78.34 dB) i AM ga et så svakt utslag i [2]'s analyse at den ikke er tabellert. 100 Hz-komponenten gjorde synlig utslag ved eksentrisitet i grafene til [2]. Amplituden var på omtrent 0.002 V (-130 dB). Grunnen til at 100 Hz var synlig i AM og ikke i [2]'s FEM kan være på grunn av forenklinger i AM, men [2]'s FEM-analyse kan også ha maskert denne komponenten. Det har blitt erfart i de forsøk som har blitt gjennomført i forbindelse med denne rapporten at detaljer i FEM-kretsens oppbygning og DTF-analysen har innvirkning på frekvenskomponentenes utslag. Uansett så var amplitudene i AM generelt betydelig større enn amplitudene i FEM, som tabell 3.4 viser. For å holde AM så ukomplisert som mulig tok den utgangspunkt i den korteste avstanden mellom polsko og stator da denne verdien var lett tilgjengelig, men denne avstanden var ikke nødvendigvis representativ. Det lå derfor inne en «luftgapsfaktor» der luftgapet kunne fininnstilles, enten ved å regne ut effektivt luftgap, eller ved å justere den opp mot en FEM eller

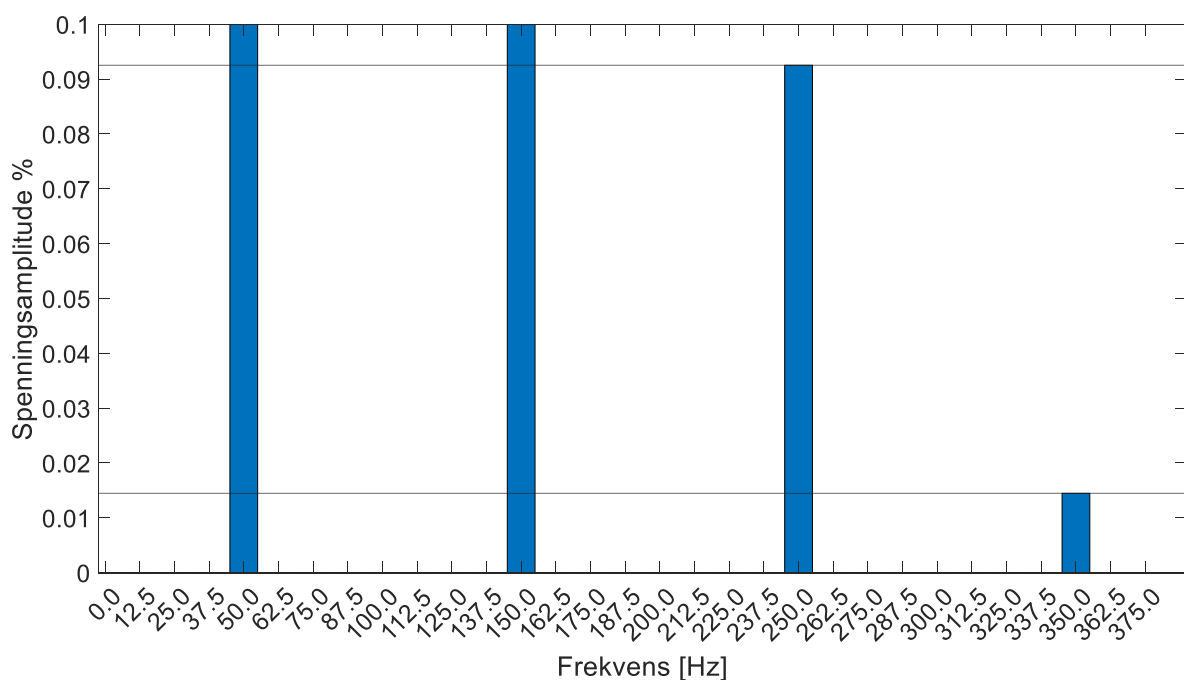
3-Feiltilstander og deres innvirkning på magnetfelt, strøm og spenning.

reel maskin. «AM, 4» i tabell 3.4 viser hva amplituden ble ved å sette luftgapsfaktoren til 4 i stedet for 2. Noen verdier er lavere i AM enn i FEM, mens andre er høyere. En korreksjon av luftgapsavstanden kunne ikke alene gjøre opp for forskjellene mellom modellene.

**Tabell 3.4: Maskin 1, 20 % dynamisk eksentrisitet**

	25 Hz		75 Hz		125 Hz		175 Hz	
	[dB]	[V]	[dB]	[V]	[dB]	[V]	[dB]	[V]
Møller	-81.04	0.5578	-68.66	2.3198	-112.6	0.0147	-88.18	0.2452
AM, 2	-73.96	1.2593	-64.60	3.6984	-89.15	0.2191	-70.52	1.8721
AM, 4	-79.98	0.6296	-70.62	1.8492	-95.17	0.1095	-76.54	0.9360

Figur 3.19 viser de harmoniske komponentene til Maskin 2 med dynamisk eksentrisitet, og komponentene skiller seg ikke nevneverdig ut fra det man forventer å finne i en frisk maskin.



**Figur 3.19: Maskin 2, 20% DE.**

### 3.5 Kortslutning i ankerviklingen

Modellen kan også ta høyde for kortslutning i ankerviklingen ved å redusere antall vindinger i stavene. Dette er i utgangspunktet utenfor oppgavens omfang, men noen resultater ligger i kapittel 12.1.3.



3-Feiltilstander og deres innvirkning på magnetfelt, strøm og spenning.

### 3.6 Andre kilder til harmoniske

Som det ble nevnt innledningsvis så er rotoren koblet til en turbin (eller en motor) på samme aksling, eller via et gir. Vibrasjoner i turbinen eller i et ubalansert svinghjul kan forplante seg videre til rotoren. Det samme gjelder for giret. Dette kan gi opphav til dynamiske bevegelser som er langt mer komplekse enn de beskrevet i forrige delkapittel. Vibrasjoner, skjevheter og magnetiske krefter kan vekselvirke med hverandre.

Reluktansen mellom stator og rotor vil være minst ved statortennene og størst over sporene [7]. I enkelte maskindesign vil det oppstå et tannhjulsmoment, det vil si at det er et netto moment mellom polen og statortannen [20]. Dette er dog et sjeldent tilfelle i en vannkraftgenerator med brudden vikling. Der vil netto dreiemoment fra tennene på polen være null. Likevel vil det oppstå en fluksvariasjon når polen beveger seg forbi statortennene, og frekvensene som oppstår i den elektromotoriske kraften som et resultat av dette følger formelen under [7].

$$f_{emf,t} = f \left( \frac{4S}{P} \pm 1 \right) \quad (3.32)$$

$$f_{maskin1} = 50 \left( 4 \frac{126}{8} \pm 1 \right) = 3100 \text{ Hz og } 3200 \text{ Hz}$$

$$f_{Brutus} = 50 \left( 4 \frac{114}{14} \pm 1 \right) = 1578.57 \text{ Hz og } 1678.57 \text{ Hz}$$

Frekvensene er mye høyere enn de frekvensene som det ble fokusert på i de fundamentale modellene og hadde trolig ingen innvirkning på de målinger og analyser som ble gjort. Polhodet har spor i seg der dempeviklingene sitter. Dette kan gi noe av den samme effekten som statortennene.

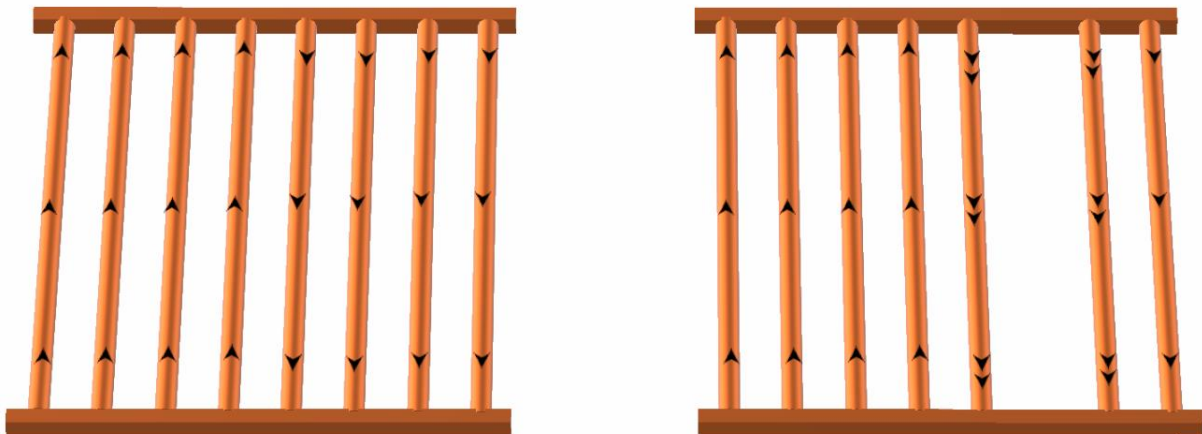
3-Feiltilstander og deres innvirkning på magnetfelt, strøm og spenning.

## 4 Dempeviklinger

Dempeviklingene til en synkronmaskin minner om rotoren til en asynkronmaskin. Dempeviklingene er staver som er koblet sammen til et bur. Ved en fluksendring gjennom stavene vil det induseres en strøm siden stavene er kortsluttet med hverandre. Under stasjonær og synkron drift vil det ikke induseres strømmer i dempeviklingene, men under følgende omstendigheter vil fluksen gjennom dempeviklingene forandres, og en strøm oppstår: [7]

- Lastendring, for eksempel ved endring av pådrag på turbinen.
- Endring i feltstyrken, for eksempel ved endring av reaktiv effekt.
- Asynkron MMK fra ankeret, for eksempel et motroterende felt [21].

På et mikroplan kan man si at synkronmaskinen oppfører seg asynkront. Uten dempeviklingene ville en synkronmaskin oscillere etter en lastendring, men dempeviklingene bidrar til å dempe oscilleringene slik at maskinen raskt finner et stasjonært punkt. Brudd i en stav i en induksjonsmotor fører til at det går en høyere strøm i nabostavene, slik figur 4.1 viser. Dempestavbrudd kan føre til vibrasjoner og i verste fall havari [22].



Figur 4.1: Venstre: friskt induksjonsbur. Høyre: én brukket stav.

## 4.1 Deteksjon av brukkede staver

«Motor current signature analysis» (MCSA) er en velkjent metode for å detektere rotorfeil i induksjonsmotorer. Ankerstrømmen analyseres ved hjelp av for eksempel FFT. Denne metoden er dog best egnet under stabil nominell last. «Wavelet analysis» (WA) og «Hilbert-Huang transform» (HHT) dekomponerer signalet i både frekvens- og tidsplanet, og egner seg derfor til å analysere transiente forløp. Analysen kan enten gjøres kvalitativt eller kvantitativt, det vil si at feilsignaturen er kjent før den oppstår eller at bare frisk signatur er kjent på forhånd [23]. Forskjellige typer feil har en tendens til å danne de samme eller lignende feilfrekvenser, slik at det er vanskelig å skille dem. Asymmetrier og brukne rotorstaver lager frekvenser som ligner på hverandre i den lavere delen av frekvensspekteret, se (4.1) [22].

4.1

$$f_f = f_s \left( \frac{2k}{p} (1 - s) \pm s \right) \quad (4.1)$$

$f_s$  – synkronfrekvens 50 Hz

$k = 1, 2, 3 \dots$

$p$  – antall poler

$s$  – sakking

$$s = \frac{\text{sakkefart}}{\text{synkron fart}} = \frac{n_s - n}{n_s} = 1 - \frac{n}{n_s} \quad (4.2)$$

Skadete dempeviklinger på synkrongeneratorer er ikke vanlig, men de forekommer. Det er derfor ikke mye litteratur på området, men noen metoder er foreslått, blant annet å måle fluksen eller ved å måle spenningsfordelingen i feltviklingen [24]. [25] foreslår å bruke 30 Hz- og 90 Hz-komponentene til en firepolet generator under stasjonær drift, som for øvrig er de samme sidebåndene som blir brukt til å detektere kortslutningsfeil i feltvikling og eksentrisitet [1, 2, 26].

En synkronmotor kan startes asynkront ved at maskinen kobles på nett uten spenning på feltviklingene. Det går dermed en stor strøm i dempeviklingene. I [24] analyserte de denne signaturen fra startstrømmen med «Discrete Wavelet Transform» (DWT), og fant feilsignaturen beskrevet i (4.1) som en funksjon av tid. Vannkraftgeneratorer startes vanligvis ved å akselerere

## 4-Dempeviklinger

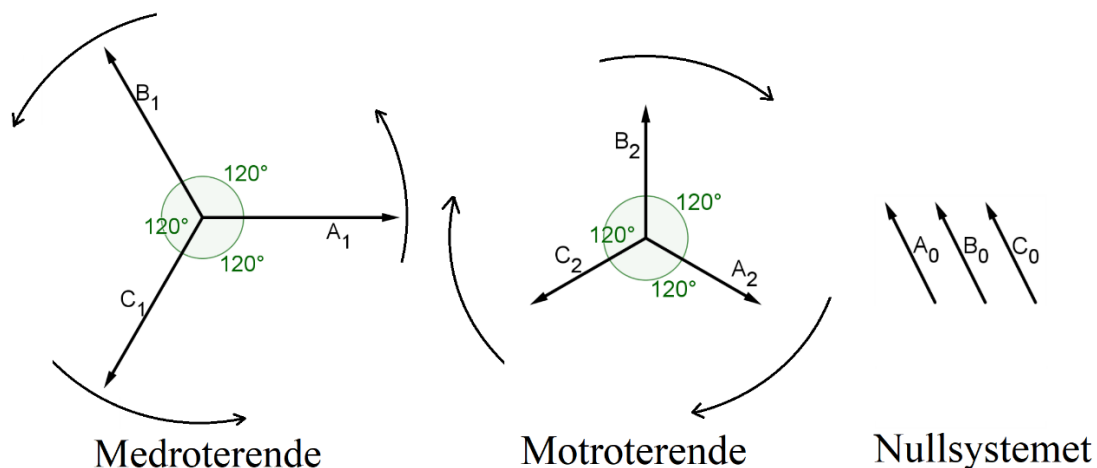
rotoren opp til nominell hastighet uten at ankerviklingene er koblet til nettet. Metoden beskrevet i [24] vil derfor ikke egne seg.

### 4.2 Foreslått metode: Motroterende strøm

Det ble foreslått av [27] å bruke motroterende strømmer for å detektere brudd i dempeviklingen. Motroterende strøm setter opp et roterende magnetisk felt som går i motsatt retning av rotasjonsretningen til rotoren. Det vil derfor induseres en strøm i dempeviklingene med dobbelt så høy frekvens som synkronfrekvensen, og det dannes varme som kan skade rotoren. En generator er dimensjonert for å tåle en viss mengde motroterende strøm, som ligger i området 10-15 % i en turbogenerator [21]. Laboratoriegeneratoren brukt i denne oppgaven er dimensjonert for 20 % av nominell strøm [27], som trolig er et nivå vannkraftgeneratorer generelt er dimensjonert for uten at det er funnet skriftlige kilder som kan bekrefte dette.

Det ble brukt skjevlast for å lage et motroterende felt, men det ble også foreslått av [28] å bruke en frekvensomformer til å lage motroterende strømmer og/eller overharmoniske. Laboratoriet har utstyr for å gjøre dette, men det lot seg ikke gjøre på daværende tidspunkt.

### 4.3 Motroterende strømmer



Figur 4.2: Medroterende-, motroterende- og nullsystem

Et balansert trefasesystem ligner skissen helt til venstre i figur 4.2. Systemet roterer med  $\omega$  i positiv dreieretning og fasene ligger  $120^\circ$  forskjøvet i forhold til hverandre. I et ubalansert system vil ikke dette være tilfellet. De kan ha forskjellig lengde og vinkler mellom seg. Det er mulig å dele opp det ubalanserte systemet i tre separate systemer, som innad er balansert. Den normale eller «friske» komponenten til systemet omtales som det medroterende eller det positive sekvenssystemet. Dette oppfører seg som et balansert system normalt ville ha gjort. De

#### 4-Dempeviklinger

to andre komponentene er det motroterende system (negative sekvenssystem) og nullsystem. Det motroterende systemet har tre faser (vektorer) med lik lengde forskjøvet  $120^\circ$  i forhold til hverandre, akkurat som det medroterende systemet, men de roterer motsatt vei. Skissen i midten på figur 4.2 viser det motroterende systemet. I nullsystemet er alle fasene i fase, altså  $0^\circ$  mellom dem, og har samme amplitude. Med disse tre systemene er det mulig å beskrive hvilket som helst ubalansert system [29].

Som det ble beskrevet tidligere så produserer en synkrongenerator ikke bare den grunnharmoniske med 50 Hz, men også dens odde multiplum. Noen av disse roterer samme vei som den grunnharmoniske, mens noen roterer motsatt vei, som er gitt av (4.3) og (4.4) der  $n$  er den  $n$ 'te harmoniske [30].

$$\text{Medroterende: } n = 3k + 1 \quad (4.3)$$

$$\text{Motroterende: } n = 3k - 1 \quad (4.4)$$

Med andre ord er den 5. harmoniske motroterende og den 7. harmoniske medroterende.

I de påfølgende ligningene er det opprinnelige (ubalanserte) systemet merket med indeks «a», «b» eller «c» for de tre fasene. Medroterende, motroterende og nullsystemet er indeksert med henholdsvis «1», «2» og «0». « $\alpha$ » er operator som angir vinkelen mellom fasene.

$$\begin{aligned} U_a &= U_0 + U_1 + U_2 \\ U_b &= U_0 + \alpha^2 U_1 + \alpha U_2 \\ U_c &= U_0 + \alpha U_1 + \alpha^2 U_2 \end{aligned} \quad (4.5)$$

$$\begin{aligned} I_a &= I_0 + I_1 + I_2 \\ I_b &= I_0 + \alpha^2 I_1 + \alpha I_2 \\ I_c &= I_0 + \alpha I_1 + \alpha^2 I_2 \end{aligned} \quad (4.6)$$

$$\alpha = 1 \angle 120^\circ$$

#### 4-Dempeviklinger

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

$$A^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix}$$

$$V_{a012} = A^{-1} V_{abc}$$

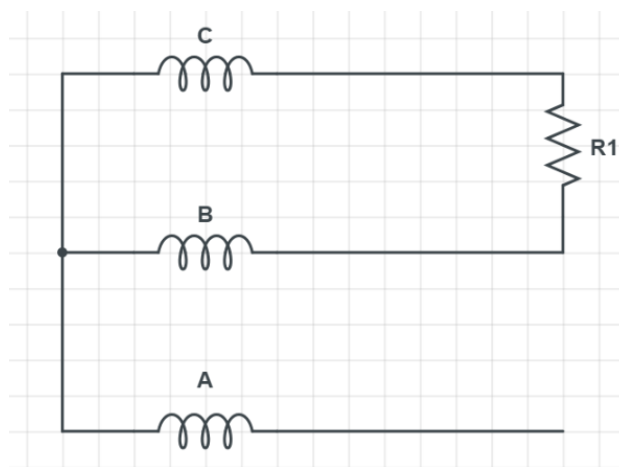
$$V_{abc} = A V_{a012}$$

$$I_1 = \frac{I_a + \alpha I_b + \alpha^2 I_c}{3} \quad (4.8)$$

$$I_2 = \frac{I_a + \alpha^2 I_b + \alpha I_c}{3} \quad (4.9)$$

$$I_0 = \frac{I_a + I_b + I_c}{3} \quad (4.10)$$

Ser på et enkelt tilfelle der to av fasene er koblet sammen via en resistans, og den tredje fasen har åpen klemme.



Figur 4.3: Skjevlast

$$I_a = 0 \quad (4.11)$$

$$I_c = -I_b \quad (4.12)$$

Den motroterende, medroterende og nullstrømmen blir dermed:

#### 4-Dempeviklinger

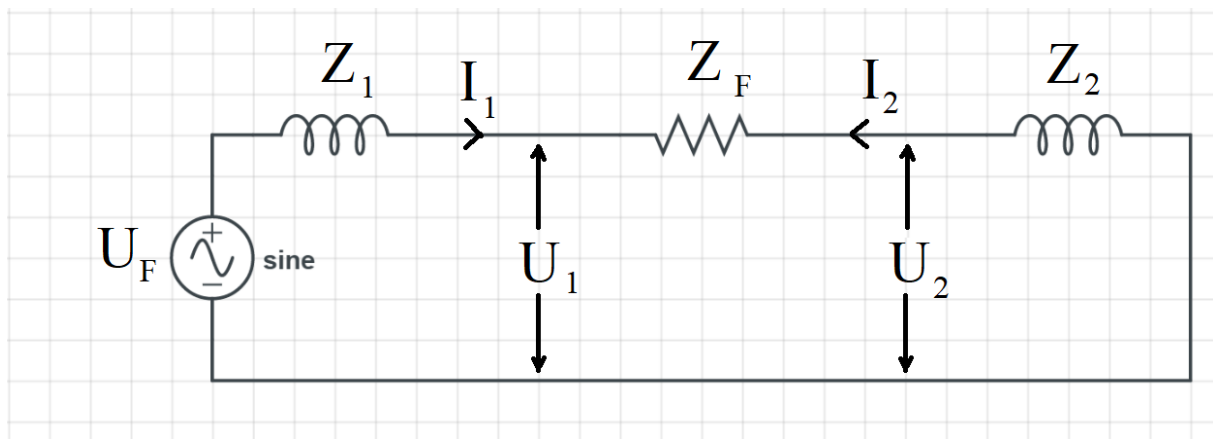
$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ I_b \\ -I_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{3}(\alpha - \alpha^2)I_b \\ \frac{1}{3}(\alpha^2 - \alpha)I_b \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

Som gir:

$$I_0 = 0 \quad (4.14)$$

$$I_2 = -I_1 \quad (4.15)$$

Det medroterende og motroterende systemet er koblet sammen som vist i figur 4.4 [31]:



Figur 4.4: Kortslutning mellom to faser med impedans  $Z_F$  i sekvensdomenet. Modifisert illustrasjon fra [31].

Tar utgangspunkt i figur 1.4:

$$I_1 = -I_2 = \frac{U_F}{Z_1 + Z_2 + Z_F} \quad (4.16)$$

(4.6), (4.13) og (4.14) gir:

$$I_b = I_0 + \alpha^2 I_1 + \alpha I_2 = (\alpha^2 - \alpha) I_1 = \sqrt{3} \angle(270^\circ) I_1 \quad (4.17)$$

Setter (4.15) inn i (4.16):

$$I_b = \frac{\sqrt{3} \angle(270^\circ) U_F}{Z_1 + Z_2 + Z_F} \quad (4.18)$$



## 4.4 Feilsignatur med brudd i dempestav med motroterende og asynkrone strømmer.

For en asynkron motor gjelder følgende:

$n_s$  – synkronturtall

$n_r$  – rotorturtall

$f_{rotor}$  – frekvens på induisert strøm i rotor

$P$  – antall poler

$$f_{rotor} = \frac{(n_s - n_r)P}{120} = \frac{n_s - n_r}{n_s} = s f_s \quad (4.19)$$

I en synkronmaskin er  $n_s = n_r$ , men en motroterende 50 Hz strøm vil gi en  $n_s = -n_r$ . Frekvensen på strømmen induisert i rotor blir, jamfør (4.19) og (4.2):

$$s = \frac{-n_r - n_r}{-n_r} = 2$$

$$f_{rotor} = 2 * 50 = 100 \text{ Hz}$$

Ved å bruke 4.1:

$$f_{fa} = f \left( 2 \frac{k}{P} (1 - s) \pm s \right)$$

$$k = 1, 2, 3 \dots$$

Setter inn  $s=2$ :

$$f_{fa} = f_s \left( 2 \frac{k}{P} (1 - 2) \pm 2 \right) = f_s \left( -2 \frac{k}{P} \pm 2 \right)$$

Deler på  $\pm 2$  og får:

$$f_{fa} = 2 f_s \left( 1 \pm \frac{k}{P} \right) \quad (4.20)$$

I følge (4.20) vil feilfrekvensene i klemmespenningen til en maskin med en brukket dempevikling ligge på de samme frekvensene som dannes ved kortslutning og eksentrisitet i rotor.

#### 4-Dempeviklinger

De harmoniske komponentene til 50 Hz vil ha en relativ hastighet i forhold til rotoren gitt av (4.21) [30], der  $s$  er null for en synkrongenerator.  $s_n$ , (4.23), er sakkefarten til den  $n$ 'te-harmoniske (4.22), som er en kombinasjon av (4.3) og (4.4), i forhold til rotor.

$n = \text{den } n' \text{te} - \text{harmoniske}$

$$n * n_s - (1 - s)n_s = (\mp 3k + s)n_s \quad (4.21)$$

$$n = 1 \mp 3k \quad (4.22)$$

$$s_n = \frac{\text{hastighet } n' \text{te harmoniske} - \text{hastighet rotor}}{\text{hastighet } n' \text{te harmoniske}}$$

$$s_n = \frac{3k}{3k \mp 1} \quad (4.23)$$

Frekvensspekteret til en brudde rotorstav på grunn av  $n$ 'te-harmoniske er gitt av (4.24), som er en kombinasjon av (4.23) og (4.1):

$$f_{fa} = f_s \left( 2 \frac{k}{P} \left( 1 - \frac{3k'}{3k' \mp 1} \right) \pm \frac{3k'}{3k' \mp 1} \right) \quad (4.24)$$

Den 5. og 7. harmoniske vil få en sakkefrekvens på henholdsvis 1.2 (6/5) og 0.857 (6/7). Løsningen for de fire første  $k$ 'ene i en 14-polet maskin vises i tabell 4.1. Intervallet mellom frekvensene for 5. harmoniske er -1.43 Hz (10/7), og for 7. harmoniske er den 1.02 Hz (50/49). De frekvensene som dannes på grunn av KF, DE og SE vil også dannes ved brudd i dempestaven i kombinasjon med 5. og 7. harmoniske strømmer, men det vil i tillegg være frekvenskomponenter mellom disse igjen. Tabell 4.1 viser noen av frekvensene som kan oppstå ifølge (4.24).

## 4-Dempeviklinger

**Tabell 4.1: Frekvenser induisert i ankervikling på grunn av brudd i dempestav sammen med 5. og 7. harmoniske strømmer, jf (4.24).**

k	5. harmoniske		7.harmoniske	
	-k	+k	-k	+k
1	-60.00	60.00	-42.86	42.86
2	-61.43	58.57	-41.84	43.88
3	-62.86	57.14	-40.82	44.90
4	-64.29	55.71	-39.80	45.92

## 4.5 Modell av brudd i dempestav

[13] lagde en kombinert analytisk og numerisk modell for å beregne tap i dempeviklingene ved statisk og dynamisk eksentrisitet. Hybridmodellen sparte mye tid sammenlignet med en ren FEM-modell. Dette arbeidet ble utført 2007, slik at regnekraften til datamaskiner er kraftig forbedret siden da. [32] utviklet en permeansmodell av en vannkraftgenerator i tomgang for å se på strømmer i dempestavene som oppstår på grunn av stator og rotorgeometrien. Den analytiske modellen stemte godt overens med FEM-modellen av samme maskin.

Det ble verken laget analytiske eller numeriske modeller av brudd i dempestav på grunn av problemets kompleksitet og tilgjengelig tid. Litteraturen viser at det kreves langt mer omfattende modeller av en dempeviklingsfeil enn ved de andre feiltypene som er undersøkt her.

## 4-Dempeviklinger

## 5 Spektralanalyse

Spektralanalyse går ut på å analysere spekteret av frekvenser som finnes i et signal. Det er flere måter å gå fra tidsdomenet til frekvensdomenet, tilpasset typen signal og målet med analysen. Ethvert signal kan dekomponeres i rene sinussignaler, som kalles de harmoniske komponentene til signalet. De har hver sin frekvens og amplitude. Fouriertransformasjonen tar utgangspunkt i et uendelig stasjonært signal, men dette er ikke alltid tilfellet i virkeligheten. Derfor er det utviklet metoder for å analysere signaler som ikke er stasjonære, og representasjonen blir følgelig ikke bare i frekvens- og energidomenet, men også i tidsdomenet. Noen eksempler på dette er «Short-time Fourier Transform» (STFT), «Wavelet Transform» (WT) og «Hilbert-Huang transform» (HHT).

### 5.1 Diskret Fouriertransformasjon (DFT)

Diskret Fouriertransformasjon tar inn og gir ut diskrete verdier. Energien i signalet blir fordelt på frekvenser med et gitt frekvensintervall (5.1), som bestemmes av lengden på biten av signalet som analyseres. Resultatet av DFT-analysen fremstår som et «stakittgjerde», der «plankene» i gjerdet er de analyserte frekvensene. Energien til de frekvensene som ikke er eksplisitt analysert, altså mellomrommet mellom plankene, er bakt inn i de analyserte frekvensene. Dette er en form for spektral lekkasje. En analyse av et datasett med få punkter vil få dårlig frekvensoppløsning. Hvis det er spesielle frekvenskomponenter som ønskes undersøkt må  $\Delta f$  justeres slik at disse blir en del av stakittgjerdet [33].

$$\Delta f = \frac{f_t}{N} = \frac{1}{T_{signal}} \quad (5.1)$$

$f_t$  – tastefrekvens

$N$  – antall punktprøver

$T_{signal}$  – lengden på signalet

Det finnes enda en form for spektral lekkasje, og den har sitt opphav i hvordan utsnittet, eller vinduet, av signalet ser ut. En DFT-analyse tar utgangspunkt i at signalet er stasjonært. Lengden på signalet må bestå av et helt antall perioder av den fundamentale perioden som ønskes undersøkt. Hvis dette ikke gjøres vil de enkelte frekvenskomponenter komme dårlig frem.

## 5-Spektralanalyse

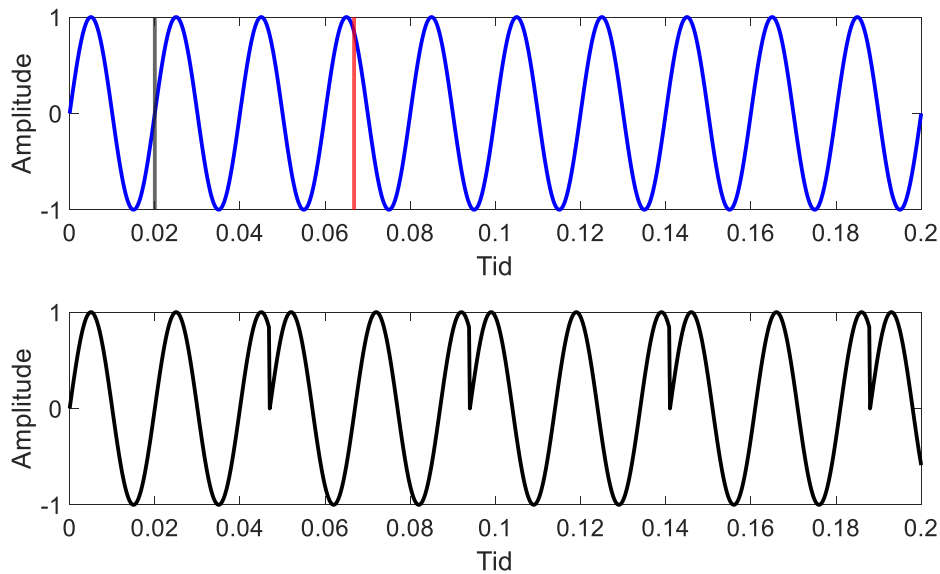
Fast Fourier Transform (FFT) er en underkategori av DFT og består av spesielle algoritmer som gjør at transformasjonen fra tidsplanet til frekvensplanet går raskt. For eksempel vil en «Radix 2» FFT-algoritme kreve at antall punkter som signalet består av er et produkt av 2 opphøyd i en eksponent. Et høyere radix-tall vil gi en enda kjappere algoritme. En måte å oppnå nødvendig antall punkter er å legge til nuller på enden av signalet, etter at signalet er behandlet med en vindusfunksjon. Alternativt må deler av signalet kuttes ut [34]. FFT er mest aktuelt for analyser i sanntid og der regnekapasiteten er en begrensende faktor. I denne oppgaven var det ikke nødvendig med sanntidsanalyser, og en moderne datamaskin har rikelig med regnekraft. Antall punkter ble derfor ikke aktivt tilpasset en FFT-algoritme.

Ved å bruke kallet «fft(x)» i MATLAB returneres DFTen til  $x$ . Brukes kallet «fft(x,n)» vil MATLAB legge til nuller slik at  $x$  blir like lang som  $n$ , eventuelt trunkere  $x$  om den er lengre enn  $n$ .

### 5.2 Vindusfunksjoner

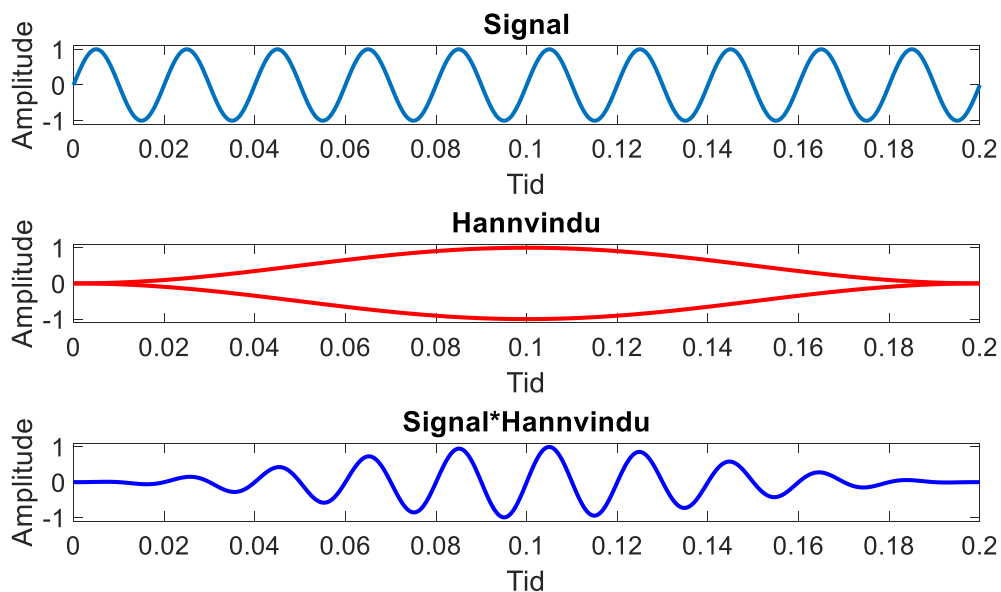
Bare en bit av et signal kan i praksis måles. Denne biten er et vindu av et uendelig signal. En DFT-analyse tar utgangspunkt i at kopier av denne biten kan legges etter hverandre og danne et uendelig stasjonært signal. Dette representerer dog ikke virkeligheten, slik at signalet allerede er «manipulert» ved at det måles over et bestemt tidsrom. Det, i teorien, uendelige signalet er dermed behandlet med et rektangulært vindu. Om det rektangulære vinduet ikke inneholder et helt antall perioder av den frekvensen som skal undersøkes, vil det oppstå diskontinuiteter. I figur 5.1 er den blå sinuskurven det opprinnelige signalet. Opptaket av signalet starter med første punktprøve ved den sorte linjen (0.02), og avsluttes i den røde linjen (0.0668). En DFT-analyse vi ta utgangspunkt i denne biten i den tro at det er uendelig langt, slik som den sorte «sinus»-kurven nederst i figur 5.1.

## 5-Spektralanalyse



**Figur 5.1:** Øverst: En bit av et sinussignal blir tatt opp, men det inneholder ikke et helt antall perioder. Nederst: DFT-analysen vil tolke signalet slik.

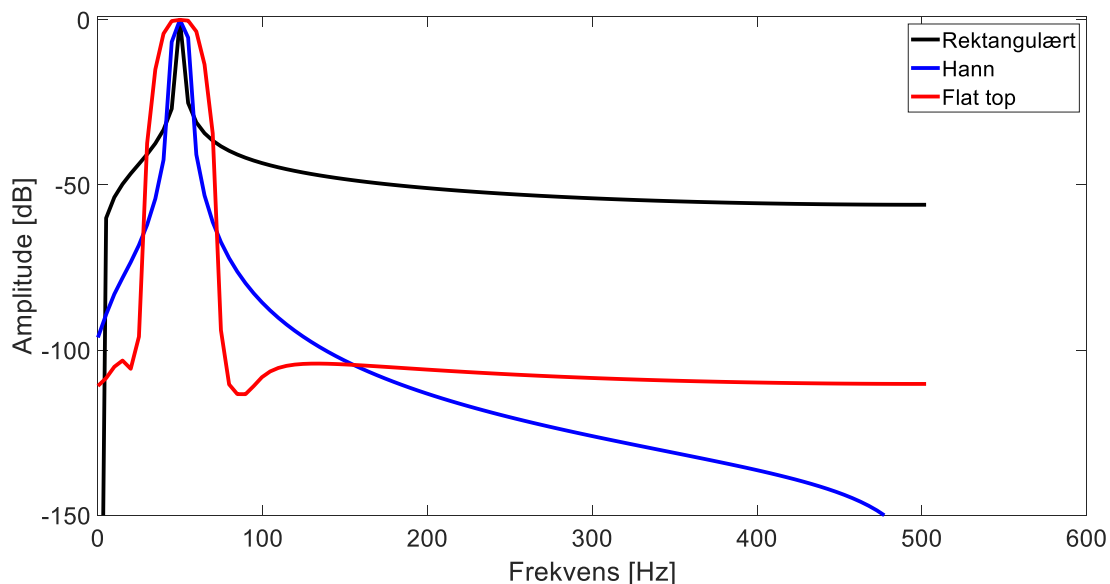
For å hindre lekkasje mellom frekvenskomponentene kan signalet behandles med spesielle vindusfunksjoner før signalet analyseres med DFT. Disse vindusfunksjonene manipulerer det originale signalet utover det å skjære ut en bit, se figur 5.2. Vindusfunksjonen har dog den ulempen at frekvensoppløsningen reduseres [35]. Det finnes ingen enkel fremgangsmåte for å velge det riktige vinduet, men det finnes forslag og retningslinjer for å finne passende vindu [33].



**Figur 5.2** Øverst: signal. Midten: vindusfunksjon (Hann). Nederst: signal behandlet med vindusfunksjon. Illustrasjon inspirert av [36].

## 5-Spektralanalyse

For å beskrive vinduenes egenskaper i frekvensplanet brukes begreper som hovedlobe og sidelobe. Hovedloben er der mesteparten av energien til en frekvens befinner seg, mens noe av energien også er fordelt på sidelobene [37]. En distinkt frekvens har selvsagt all energien samlet nettopp i sin frekvens, men signalbehandlingen og DFT-analysen er ikke en ideell operasjon slik at lobefenomenet i praksis er uunngåelig. Hovedlobens og sidelobenes utforming er av stor betydning når frekvenser skal skilles fra hverandre. Hvis hovedloben er bred kan det være vanskelig å finne den nøyaktige frekvensen. To nærliggende frekvenser kan også bli tolket som én frekvens. Hvis amplituden til sidelobene er stor kan dette skygge for en nærliggende frekvens. Hvorvidt en frekvens ligger nært en annen er relatert til frekvensoppløsningen til DFT-analysen, med andre ord lengden på det analyserte signalet, som er gitt av (5.1).



Figur 5.3: Rektangulært, Hann og Flat-top-vindu i frekvensplanet. Signalet er en ren 50 Hz sinus med en samplingsfrekvens på 1000 Hz.

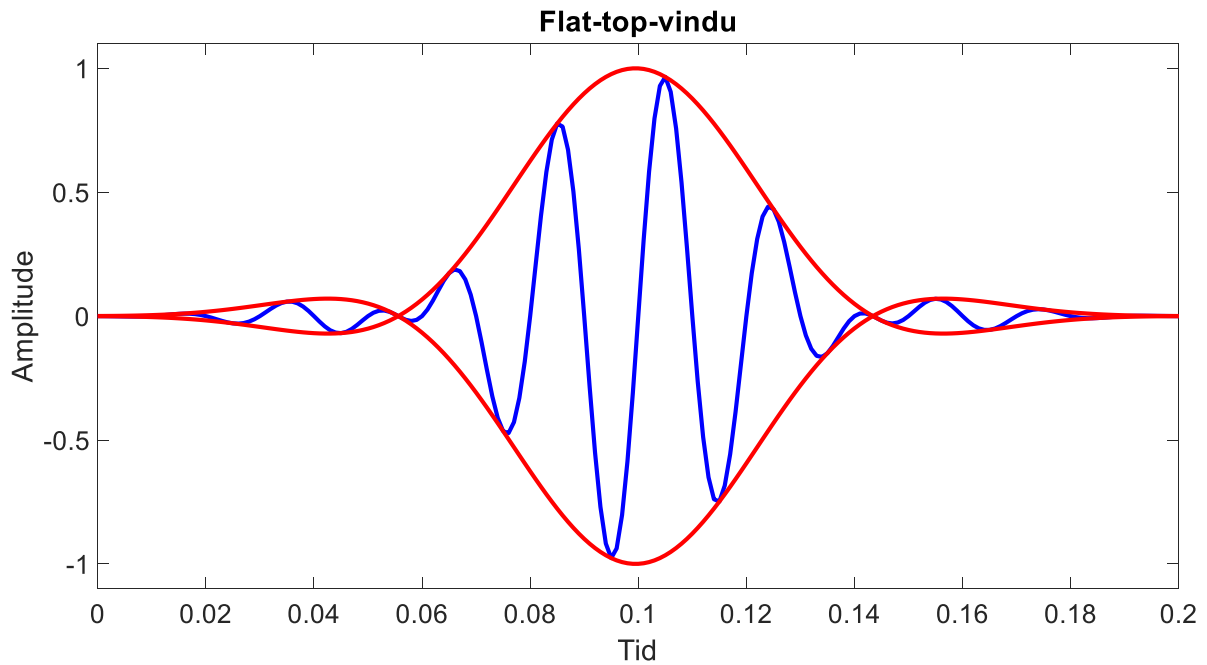
### 5.2.1 Hann

Hannvinduet, eller Hanning som det ofte (feilaktig) kalles, er den vanligste vindusfunksjonen og egner seg til de aller fleste signaler [38]. Vinduet presser endene av signalet til 0, slik at det ikke oppstår diskontinuiteter. Figur 5.3 viser at Hannvinduet har en moderat demping av sidelobene og en moderat bredde på hovedloben, noe som gjør dette vinduet til en «potet» som kan brukes til mye.



### 5.2.2 Flat top

Dette vinduet har en bred hovedlobe, det vil si at den ikke klarer å skille nærliggende frekvenser, noe som synes godt i figur 5.3. Derimot får den godt frem amplitudeverdien. Sidelobene er sterkt dempet. Flat-top-vinduet i tidsplanet sees i figur 5.4.



Figur 5.4: Flat-top-vinduet i tidsplanet.

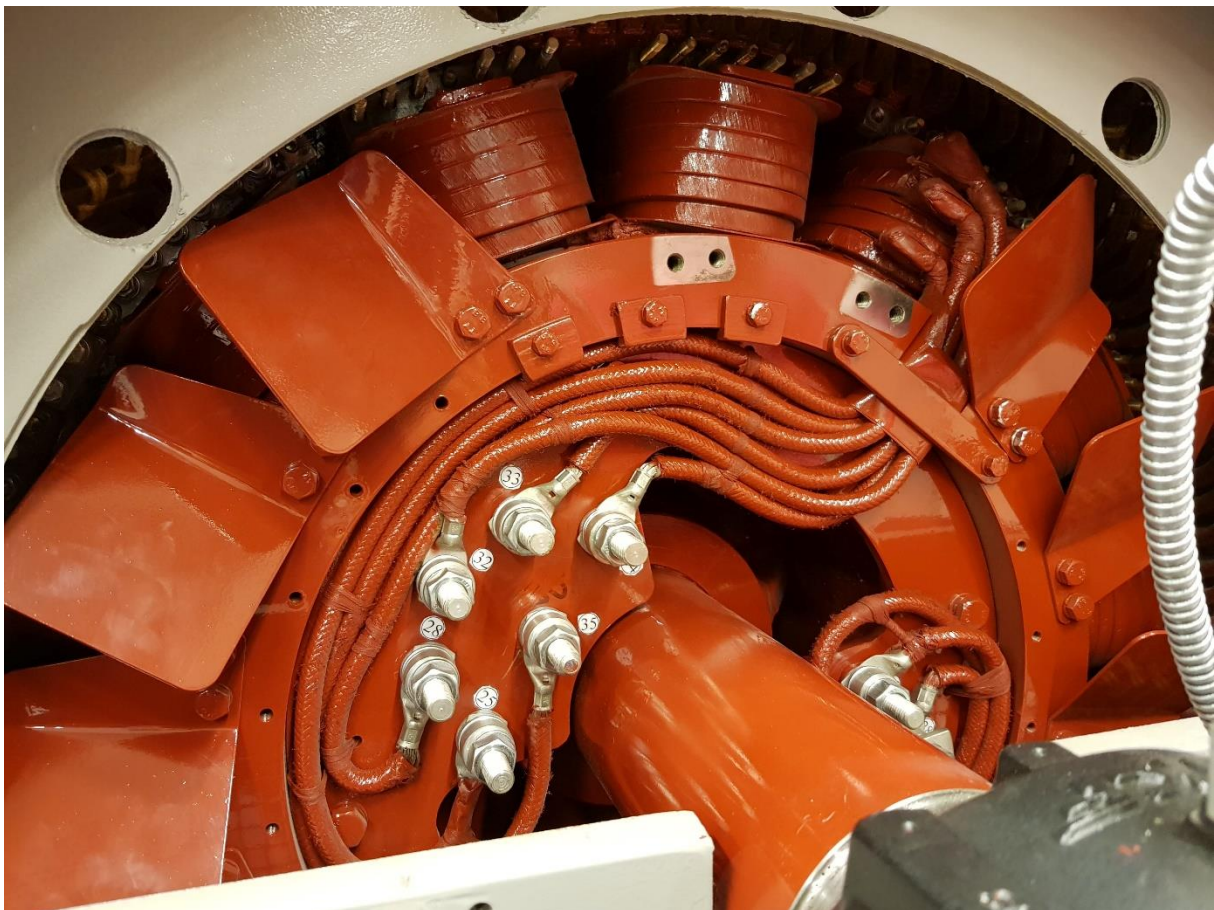


## 6 Maskinene

Det ble i alt tatt prøver fra tre synkronmaskiner: laboratoriegeneratoren Brutus og vannkraftgeneratorene Ulefoss og Liafoss. Det var vanskelig å finne dokumentasjon på de to sistnevnte. Det har derfor blitt gjort kvalifiserte gjetninger der det har vært nødvendig.

I kapittel 3 ble en numerisk modell av generatoren i Kalvedalen kraftverk brukt for å verifisere AM. Fullstendig forklaring av Kalvedalen og modellen av den finnes i [1, 2], men en kort oppsummering vil bli gitt i dette kapitlet.

### 6.1 Brutus



**Figur 6.1: Rotor til Brutus. Koblingsstavlens for å kortslutte polen vises tydelig. To av viftebladene er tatt av. Kortslutningsringen til dempestavene er også delvis demontert.**

Brutus er en 100kVA laboratoriegenerator med 14 poler og laget slik at den skal minne mest mulig en vanlig vannkraftgenerator. 114 spor gjør at den har brudde vikling, med et

## 6-Maskinene

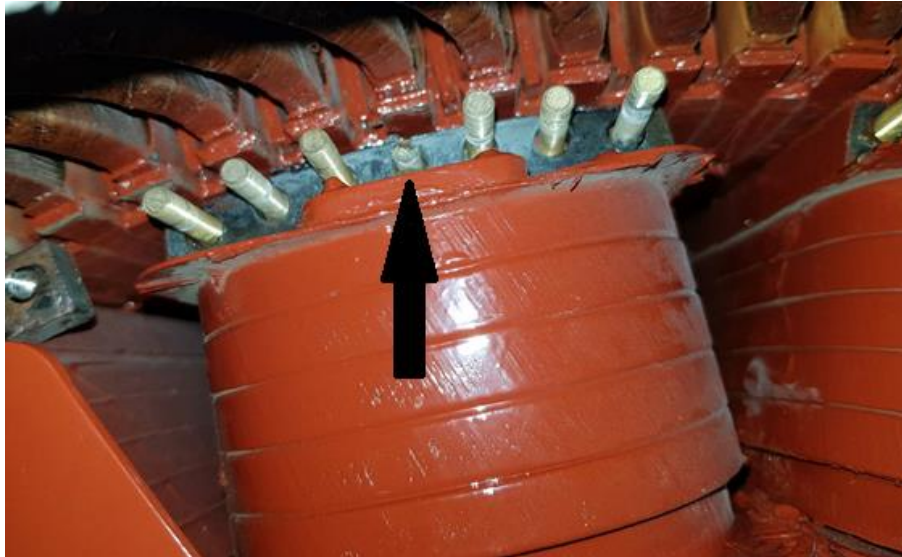
viklingsskritt på 7. Feltviklingen er trådviklet, hvorav det er mulig å kortslutte vinding 35 med 34 (2.85 %), 33 (5.71 %), 32 (8.57 %), 28 (20 %) og 25 (28.57 %) på to poler, pol 1 og pol 8. Ankerviklingen består av to like deler som kan kobles enten parallelt eller i serie. Under alle forsøkene var den koblet i serie og derfor vil alle verdier være oppgitt som serieverdier. Merk at de metoder og teorier som ble testet i denne oppgaven tar utgangspunkt i seriekobling av spolene i ankerviklingen.

### BRUTUS

<b>PRODUSENT</b>	Electroputere
<b>S</b>	200 kVA
<b>P</b>	90 kW
<b>PF</b>	0.9
<b><math>U_{fase}</math></b>	230 V
<b>I</b>	144.3 A
<b><math>U_e</math></b>	20 V
<b><math>I_e</math></b>	103 A
<b><math>n</math></b>	428.57 opm
<b>POLER</b>	14
<b>SPOR</b>	114
<b>VIKLINGSSKRITT</b>	7

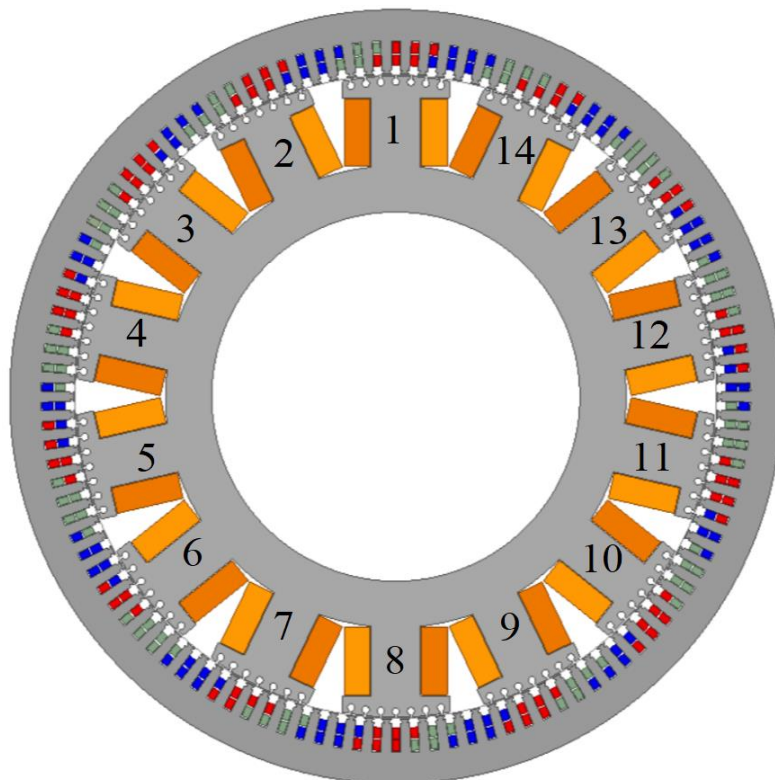
Generatoren hadde et kulelager på hver side av statorhuset. Lagrene var produsert av SKF og var av typen 2218 C3, «self-aligning ball bearing». Klareringen til lagrene var minimum 42  $\mu\text{m}$  og maksimum 70  $\mu\text{m}$  [39]. Se Appendiks A for mer informasjon om lagrene.

Generatoren var koblet til en asynkron motor via et gir av typen Siemens NFJ H1SH, altså **H**elixtannhjul, **1** gir, massiv aksling (**S**olid) og **H**orizontalt [40]. På akslingen mellom giret og generatoren var det koblet på en roterende momentmåler, men den ble ikke benyttet. Asynkronmaskinen var på 90 kW og ble styrt av en vekselretter på 60 kW. Laboratorieoppsettet beskrives i detalj i kapittel 10.



**Figur 6.2: Skadet dempestav**

En av dempestavene var skadet da Brutus ble levert. Skaden er på den midterste dempestaven på pol 3. Staven var betydelig kortere enn de andre stavene, som man kan se på figur 6.2. Det var dermed ikke mulig å skru den ordentlig fast. Nummereringen av polene vises i figur 6.3. Pol 1 og pol 8 kunne kortsluttes.



**Figur 6.3: Nummerering av polene**

## 6.2 Ulefoss



Figur 6.4: Generator på Ulefoss kraftstasjon. Foto: arkiv FAC [9]

### ULEFOSS

<b>FABRIKAT</b>	Siemens-Schuckert
<b>S</b>	2100/2660 kVA
<b>P</b>	2100 MW
<b>PF</b>	0.8
<b><math>U_{fase-fase}</math></b>	3300
<b>I</b>	465 A
<b><math>U_e</math></b>	115
<b><math>I_e</math></b>	170/219
<b><math>n</math></b>	375/375+80%
<b>P</b>	16
<b>SPOR</b>	180
<b>VIKLINGSSKRITT</b>	10

Kraftstasjonen ble satt i drift i 1930. I 1967 ble statoren viklet og blikket om, og i 2011 ble hele maskinen rengjort og omlakkert. Feltviklingen var trolig den originale fra 1930 [9]. Feltviklingene hadde antagelig 56 vindinger [41]. Dempeviklinger så ut til å være skråstilte, med tre staver per pol.

## 6.3 Liafoss



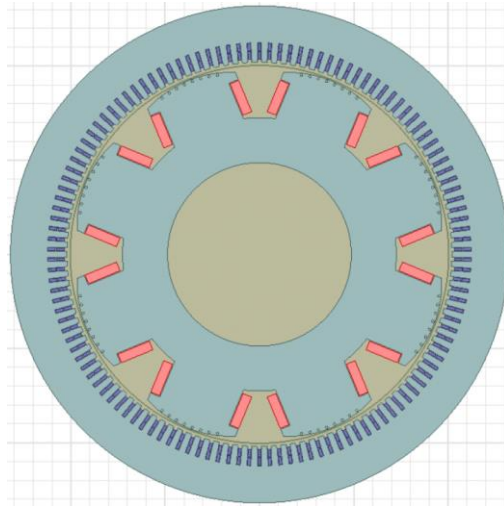
Figur 6.5: Generator på Liafoss kraftstasjon. Foto: arkiv FAC

### LIAFOSS

<b>FABRIKAT</b>	GEC
<b>S</b>	3500 kVA
<b>P</b>	2.9 MW
<b>PF</b>	0.8
<b><math>U_{fase-fase}</math></b>	5250 V
<b><math>I</math></b>	385 A
<b><math>U_e</math></b>	138/190 V
<b><math>I_e</math></b>	230/85 A
<b>N</b>	500 opm
<b>P</b>	12
<b>SPOR</b>	117
<b>VIKLINGSSKRITT</b>	8?

Kraftstasjonen ble satt i drift i 1947. Apparatet ble revidert i 1990, og en børstebrann i 2010 førte til revisjon av rotor. I 2019 ble viklinger og blikk i stator skiftet ut [9]. Polene har et ukjent antall vindinger og fem dempestaver per pol. Viklingskrittet ble estimert ut ifra bilder fra [9].

## 6.4 Kalvedalen – numerisk modell



Figur 6.6: Kalvdalen [1]

I kapittel 3 ble den analytiske modellen verifisert ved å sammenligne resultatene opp mot simuleringer gjort av [1] og [2] gjort av Kalvedalen kraftverk. Begge brukte FEM-programvaren ANSYS Maxwell. [1] simulerte bare KF for én maskintopologi (maskin 1). [2] simulerte fire maskintopologier med både KF, DE, SE og en blanding av disse. Maskin 1 var den originale generatoren i Kalvedalen kraftverk, Maskin 2 var en generator med 120 spor og hadde et viklingskritt på 13. Maskin 3 og 4 hadde henholdsvis 126 og 123 spor og viklingskritt på 10 og 8.

### KALVEDALEN (MASKIN 1)

<b>FABRIKAT</b>	?
<b>S</b>	22 MVA
<b><math>U_{fase-fase}</math></b>	7700 V
<b>I</b>	1650 A
<b><math>U_e</math></b>	
<b><math>I_e</math></b>	
<b>N</b>	750 opm
<b>P</b>	8
<b>SPOR</b>	126
<b>VIKLINGSSKRITT</b>	13



## 7 Analytisk modell (AM)

Hvordan et sykt felt påvirker strøm og spenning i ankerviklingen ble gjennomgått i kapittel 3. Analytiske modeller ble også utviklet her og verifisert mot tidligere eksperimenter. Dette kapittelet vil gjennomgå hvordan den analytiske modellen er brukt for de aktuelle maskinene i denne oppgaven. Den viktigste funksjonen til AM var å finne de frekvensene som kunne dukke opp i spenningspekteret på klemmene og forholdet mellom amplituden til frekvensene. Til dette trengtes det ingen reluktansmodell. Det ble likevel utviklet en enkel reluktansmodell slik at AM kunne si noe om alvorlighetsgraden til feilen. Modellen tar inn luftgapet og en korreksjonsfaktor som skal ta med effekten av mellomrommet mellom hver pol og sporbredde. Oppbygningen til Ulefoss og Liafoss var mangelfullt dokumentert. Det er altså mulig at viklingene er koblet sammen på en annen måte enn den som ble brukt i AM.

Den ideelle polen dekker et areal som er på:

$$A_{g,ideell} = \frac{D\pi}{P}l \quad (7.1)$$

$l$  – den effektive jernlengden til stator

$D$  – gjennomsnittlig diameter til rotor og stator

Det effektive arealet er omtrent:

$$A_{g,effektiv} = (\text{polskobredde} - \text{antall spor over pol} * \text{sporbredde}) * l \quad (7.2)$$

Luftgapsfaktoren i modellen blir dermed:

$$\text{luftgapsfaktor} = \frac{A_{g,ideell}}{A_{g,effektiv}} \quad (7.3)$$

Modellen krevde en matrise med oversikt over hvordan fasene var fordelt i stator. Matrisene ble hentet fra «WLP», kapittel 3.1. Modellen analyserte bare én fase, slik at de fasene som ikke ble brukt ble satt til verdi null. Den fasen som ble brukt fikk verdi etter hvor mange vindinger som lå i hvert spor. Eksempel på MATLAB-kode følger:

## 7-Analytisk modell (AM)

A = 4 %fase A

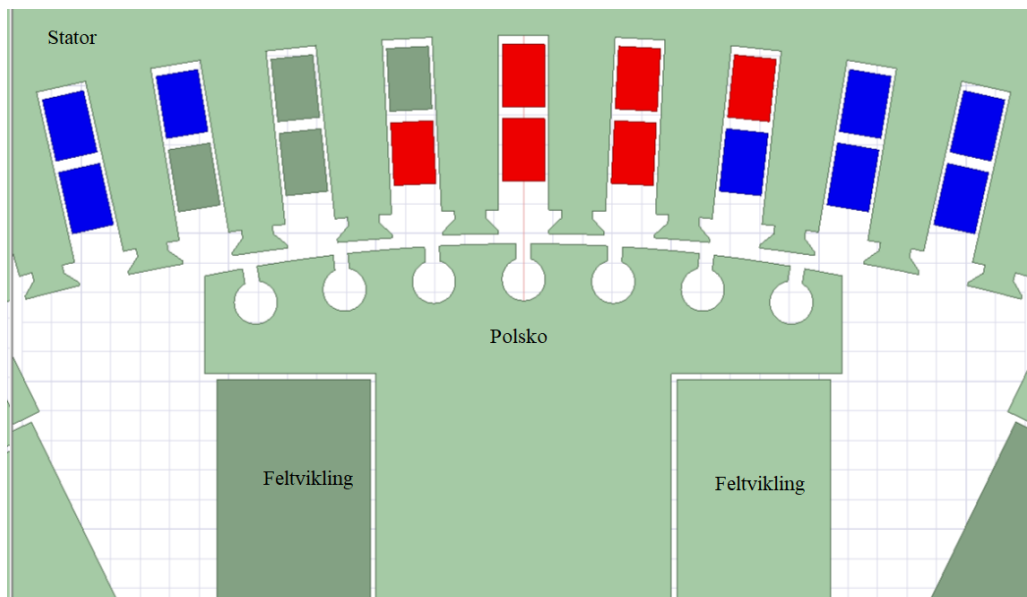
B = 0 %fase B

C = 0 %fase C

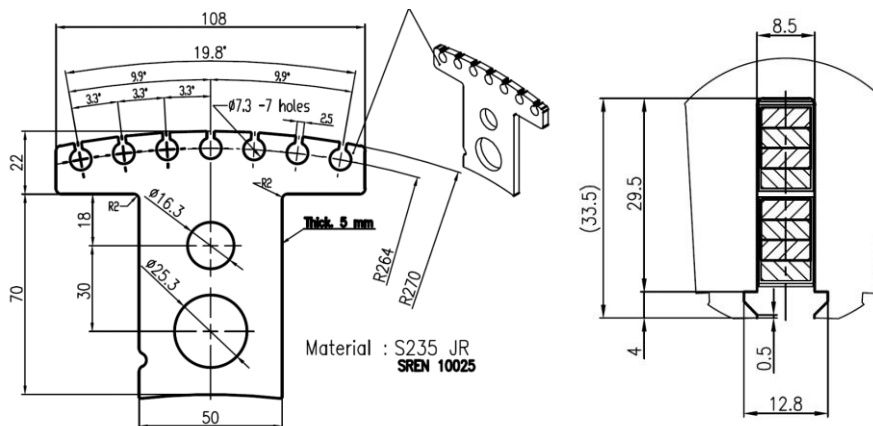
vikling\_bunn = [A A -T -T C C C ...] %nederst i statorsporet

vikling\_topp = [A A A -T -T -T C ...] %øverst i sporet

### 7.1 Analytisk modell, Brutus



Figur 7.1: Nærbilde av luftgap tegnet i ANSYS Maxwell



Figur 7.2: Tegningene av Brutus fra produsenten [42, 43].

Den ideelle polen dekker et areal som er på:

## 7-Analytisk modell (AM)

$$A_{g,ideell} = \frac{D\pi}{P} l = \frac{0.6465\pi}{14} 0.208 = 0.0302 \text{ m}^2$$

På grunn av avstand mellom polene, statorsporene og krumming av polskoen vil det effektive arealet være mindre. Hvis vi ser bort fra krummingen av polskoen og gapene til dempeviklingene, blir omtrentlig effektivt areal til Brutus:

$$A_{g,effektiv} = (0.108 - 6 * 0.0085) * 0.208 = 0.0119 \text{ m}^2$$

$$\text{luftgapsfaktor} = \frac{A_{g,ideell}}{A_{g,effektiv}} = 2.55$$

### INPUT AM BRUTUS

<b>POLER</b>	14
<b>SPOR</b>	114
<b>SKRITT</b>	7
<b>VINDINGER PR STAV, <math>N_s</math></b>	2
<b>LUFTGAP</b>	1.75 mm
<b>LUFGAPSAKTOR</b>	2.55
<b>EFFEKTIV JERNLENGDE</b>	0.208 m

## 7.2 Analytisk modell, Ulefoss



Figur 7.3: Nærbilde av en pol på Ulefoss.

På grunn av alderen på maskinen var det ikke mulig å finne dokumentasjon på dimensjonene. Poltall, sportall og skritt var kjent. De andre verdiene ble estimert ut ifra enkle målinger og bilder.

Tabell 7.1: Input-verdier til analytisk modell av Ulefoss

### INPUT AM ULEFOSS, SIKRE VERDIER

<b>POLER</b>	16
<b>SPOR</b>	180
<b>SKRITT</b>	10
<b>MAGNETISERINGSSTRØM UNDER TOMGANG (150 kW OG 130 kVAr)</b>	70 A

### INPUT AM ULEFOSS, USIKRE VERDIER

<b>ANTALL VINDINGER PER STAV, <math>N_s</math></b>	3
<b>DIAMETER, ROTOR</b>	2.4 meter
<b>LUFTGAP</b>	15 mm
<b>LUFGAPSAKTOR</b>	2
<b>EFFEKTIV JERNLENGDE</b>	0.3 meter

## 7-Analytisk modell (AM)

For å få en pekepinn på hvor gode estimeringene var ble det regnet omtrent hvilken spenning dette ville resultere i én fase. Nominell amplitude på spenningen følger (7.4), som er en videre utledning av (3.20).

$$e = v * l * B_g * \text{antall staver} * N_a * \text{vindingsfaktoren} \quad (7.4)$$

Fluksmålingene av maskinen ga omtrent en snittverdi på 0.52 T [3]. Viklingsfaktoren kan regnes ut ved hjelp av (2.9) og (2.10):

$$k_{sk} = \sin\left(\frac{\pi}{2} * \frac{16}{180} * 10\right) = 0.9848$$

$$k_f = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{6}\right)}{\frac{180}{16 * 3} * \sin\left(\frac{16\pi}{180 * 2}\right)} = 0.9580$$

$$k_w = k_{sk} k_f = 0.9435$$

Den omtrentlige spenningen induisert i Ulefoss:

$$e = 2\pi * 1.2 * \frac{50}{8} * 0.3 * 0.95 * \frac{180 * 2}{3} * 3 * 0.94 = 2487 \text{ V}$$

Som ikke er så langt unna spenningen på merkeskiltet:

$$3300 * \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 2694 \text{ V}$$

## 7.3 Analytisk modell, Liafoss

TABELL 7.2: INPUT-VERDIER TIL ANALYTISK MODELL AV LIAFOSS

### INPUT AM ULEFOSS, SIKRE VERDIER

<b>P</b>	12
<b>SPOR</b>	117
<b>DIAMETER STATOR</b>	1450 mm
<b>LUFTGAP</b>	15mm
<b>LENGDE</b>	754mm

### INPUT AM ULEFOSS, USIKRE VERDIER

<b>ANTALL VINDINGER</b>	3
<b>LUFTGAPSAKTOR</b>	2
<b>SKRITT</b>	8

$$k_{sk} = \sin\left(\frac{\pi}{2} * \frac{12}{117} * 8\right) = 0.9605$$

$$k_f = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{6}\right)}{\frac{117}{12 * 3} * \sin\left(\frac{12\pi}{117 * 2}\right)} = 0.9591$$

$$k_w = k_{sk} k_f = 0.9212$$

$$e = 2\pi * \frac{1.45}{2} * \frac{50}{6} * 0.52 * \frac{117 * 2}{3} * 3 * 0.92 = 4250 \text{ V}$$

Som ikke er så langt unna merkeskiltverdien:

$$5250 * \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 4287 \text{ V}$$

## 8 FEM – Finite element method

Alt fra neste avsnitt og frem til delkapittel 8.2 er i sin helhet tatt fra forfatterens tidligere arbeid [4], siden samme FEM-modell ble brukt i begge prosjekter. Noen modifikasjoner og presiseringer er gjort.

Endelig elementmodellering (FEM) tar utgangspunkt i at modellen består av et endelig antall punkter som skal løses med hensyn på hverandre. Denne metoden brukes innen flere fagfelt og av flere programvarer. Modellen ble designet i ANSYS Electronic desktop 2017.2, men simuleringene er kjørt i 2018.2 versjonen. ANSYS inneholder flere funksjonaliteter, hvorav det bare var Maxwell 2D og Maxwell Circuit som ble benyttet. Maxwell er lagd for lavfrekvent modellering. I [4] ble det lagd FEM-modell av Brutus, og det ble ikke laget noen FEM-modeller av de andre generatorene. Hele dette kapittelet kommer derfor til å dreie seg om Brutus.

### 8.1 Oppbygning av FEM-modellen av Brutus

Modellen av maskinen skal ideelt sett være så nært den virkelige maskinen som mulig, men for å spare konstruksjons- og simuleringstid ble det gjort en rekke forenklinger. Modellen må være tilpasset det fenomenet som skal undersøkes.

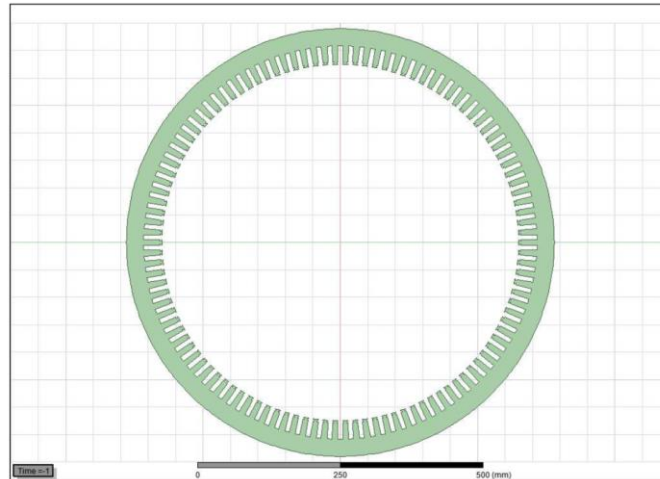
- Modellen var i 2D. Z-aksen var inn i «papiret».
- Virvelstrømtap (eddy current loss) ble ikke tatt med.
- Alt utenfor statorblikket ble ikke tatt med.
- Rotor aksling, nav og eiker ble ikke tatt med. Indre del av rotoren ble modellert som luft.

Det er vanlig å bare modellere en liten bit av maskinen, siden maskinen er symmetrisk om én eller flere akser, slik at man sparer simuleringstid. Feiltilstandene som skal modelleres gjør at vår maskin ikke blir symmetrisk om noen akse. Hele maskinen måtte derfor modelleres. Appendix B gir en fullstendig beskrivelse av modellen.

#### 8.1.1 Stator

Stator ble laget fra bunnen av, og ikke ved hjelp av de predefinerte modellene i Maxwell. En stor sirkel ble fratrukket en liten sirkel, og dannet dermed basisen for statoren. Sporene ble

«skåret ut» ved å lage en geometri som liknet sporet for så å duplisere denne om z-aksen. I ytterkant av stator ble det laget en grense (Boundarie) som magnetfeltet ikke kunne passere. Alt innenfor denne grensen ble også satt til å modelleres som vakuum, med mindre noe annet var spesifisert. Stator ble laget av laminater av ståltypen M400-50A, som ble laget manuelt i Maxwell ved å importere en H-B-kurve fått av [44].



Figur 8.1: Stator

Lengden på modellen er satt som den effektive statorjernelengden (8.1) [5].

$$L_{eff} = (L - N_v * B_v) * F_s \quad (8.1)$$

$L$  – Brutto lengden på statorblikket

$N_v$  – Antall ventilasjonskanaler

$B_v$  – Bredden på ventilasjonskanalene

$F_s$  – fyllfaktor, antatt å ligge rundt 0.94.

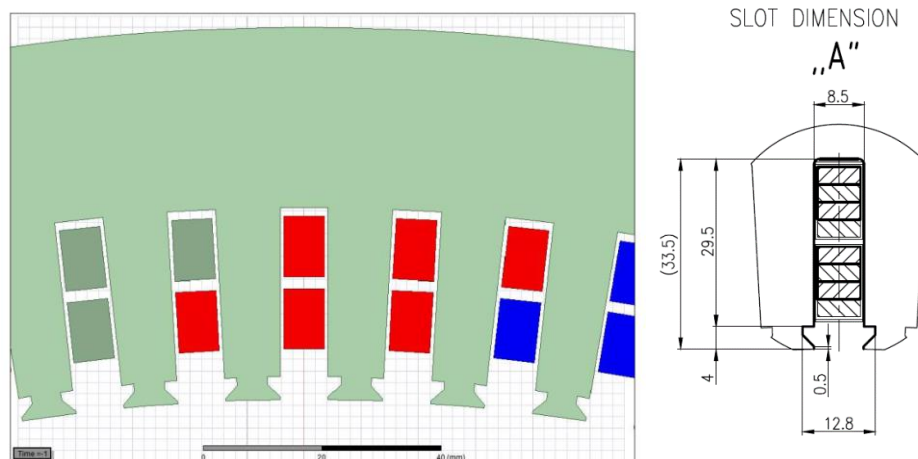
$$L_{eff} = (240 - 3 * 6) * 0.94 = 208.68 \approx 208 \text{ mm} \quad [45]$$

### 8.1.2 Viklinger

Tverrsnittet på en enkelt kobbertråd er 2.26 x 7.1 mm. Hver vikling hadde 4 av dem i høyden, som gir totalt tverrsnitt på 9.04 x 7.1 mm, som er dimensjonen til de fargede rektanglene, se figur 8.2. De er gitt materialegenskapene til kobber, samt at de er modulert som «stranded». Det vil si at det ikke er noen virvelstrømstap eller strømfortrengning, som vil si lik



strømfordeling over tverrsnittet. I tillegg ble det spesifisert at hvert rektangel inneholder to vindinger. Isolasjonen ble ikke modellert. Plasseringen av rektanglene i sporet er noe vilkårlig da deres nøyaktige plassering ikke er kjent, men det hadde trolig ingen betydning for resultatet. Rektanglene er tilordnet farger etter hvilken fase de tilhører.



Figur 8.2: Venstre: modellert i ANSYS Maxwell. Høyre: tegninger av virkelig maskin.

### 8.1.3 Rotor

Siden fronten på polskoen har en annen bueform enn radiusen til rotor er polskobuen og dempeviklingsporene til dels laget etter et sekundært koordinatsystem, «Relative CS1». Dette er igjen duplisert rundt z-aksen til hovedkoordinatsystemet. Feltviklingene er modellert som et rektangel med lik strømfordeling over hele tverrsnittet. Dimensjonene på tverrsnittet til feltviklingen kommer ikke eksplisitt frem i tegningen, men det er ikke viktig for simuleringen og er derfor satt innenfor rimelighetens grenser.

Dempeviklingene ble ikke modulert. Grunnen til dette var først og fremst at simuleringen måtte ha tatt hensyn til virvelstrømmer, noe som ville ha økt simuleringstiden. Dempeviklingene er av liten betydning under stasjonære forhold.

En sirkel kalt «Band» med radius noe større enn rotor, men mindre enn den indre statordiameteren, fikk egenskapene til vakuum. Alt innenfor denne sirkelen ble satt til å rotere om sirkelens senter med en hastighet på 3000/7 opm om z-aksen til det globale koordinatsystemet.

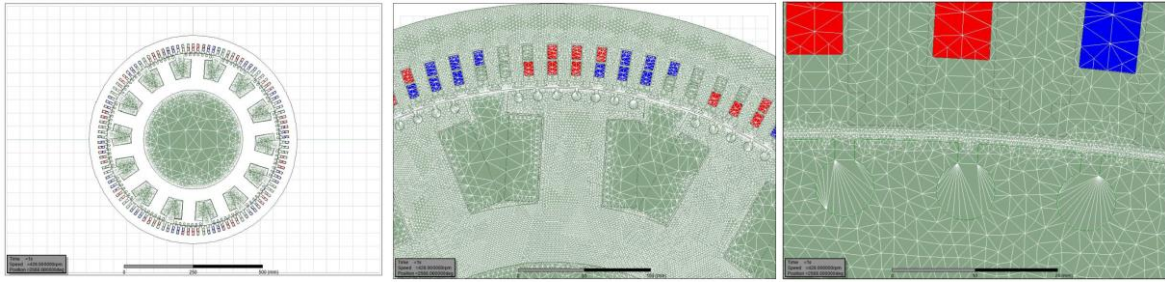
### 8.1.4 Masker «mesh»

I FEM deles modellen inn i et nett. Maskevidden bestemmer hvor mange punkter modellen får, og hvor lang beregningstiden blir. En finmasket modell gir høy oppløsning og nøyaktighet, men tar tilsvarende lang tid å simulere. Antall punkter må veies opp mot hvor lang tid det tar å simulere og hvor høy oppløsning man trenger. Noen områder trenger finere masker enn andre. Typiske steder der feltet må være ekstra finmasket er i luftgapet, som både er grensesnittet mellom det roterende og ikke-roterende, polfelt og ankervikling, og mellom områder med forskjellige magnetiske egenskaper. Feilen som skal studeres ligger i rotor, men skal detekteres i stator, slik at det er viktig at mest mulig informasjon passerer luftgapet.

Det er definert «maskeoperasjoner» for de kritiske områdene i modellen. Maskeoperasjonene setter en maksimal avstand som kan være mellom to punkter, se tabell 8.1. Det er mulig å både bruke maskeoperasjoner inne i et objekt («in-selection») og på kantene på objektet («on-selection»), se tabell V. Modellen har over 240 000 punkter, som er over minimumskravet på 200 000 punkter satt av [44]. Luftgapet har minimum 4 lag, det vil si at det ikke går an å passere luftgapet uten å ha vært innom minimum 4 punkter [44].

Tabell 8.1: Maskevidde

<i>Område</i>	<i>Maskeavstand</i>
Luftgap (on-selection)	0.5 mm
Rotorkontur (on-selection)	2 mm
Rotorjern (in- selection)	3 mm
Statorkontur (in-selection)	2 mm
Statorjern (in-selection)	3 mm
Ankerviklingene (in-selection)	10 mm



Figur 8.3: Maskenett

Fra venstre: hele modellen, som viser langt mer finmasket nett i jerndelene; nærbilde av maskinen, med jevn maskevidde i stator og rotor; finmasket luftgap.

## 8.2 FEM-modell av AM med KF

AM ble initielt validert ved å se på tidligere FEM-simuleringer av andre maskiner. For å kunne teste AM for Brutus ble det laget en FEM modell av AM. Bare en av polene i feltviklingen ble strømførende. De resterende polene i feltviklingen ble koblet fra kretsen slik at det ikke gikk noen strøm gjennom dem. Antall vindinger i den gjenværende polen ble satt til 10, med en nominell magnetiseringsstrøm på 53.2 A. Ankerviklingen var ikke koblet til noen ekstern krets.

## 8.3 FEM Tomgang (T) med KF

Ingen ekstern krets var tilkoblet og strømmen til ankerviklingen ble satt til null. Nominell magnetiseringsstrøm på 53.2 A ble brukt. Pol 1 fikk redusert antall vindinger med 1, 2, 3, 7 og 10. Simuleringen ble kjørt i 1 sekund. Det var likegyldig hvilken fase som ble brukt. Merk at dette gjaldt kun KF og DE.

$$I_e = 53.2$$

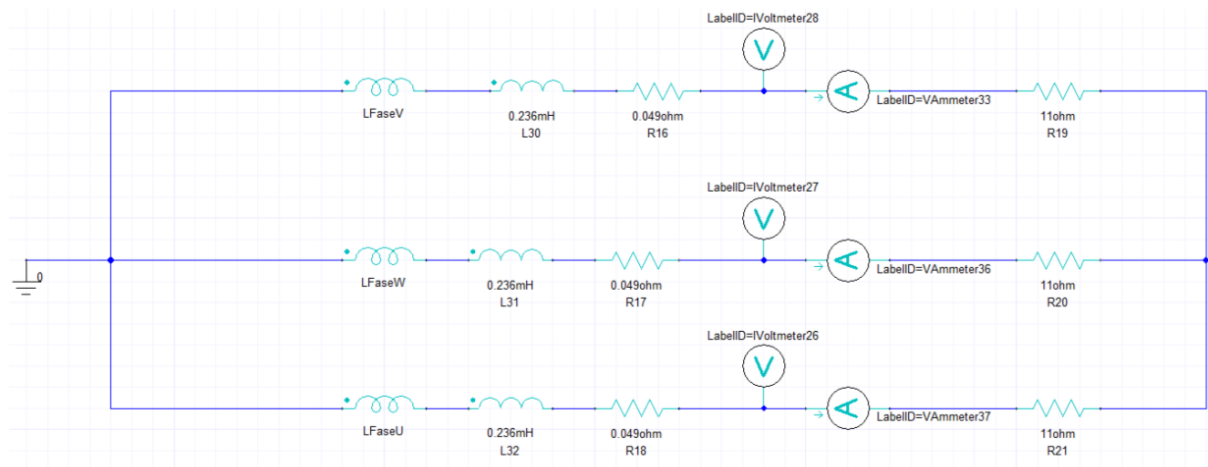
## 8.4 FEM Resistiv last (R) med KF

Samme prosedyre som ved tomgang, men den eksterne kretsen (under) ble tilkoblet. Strøm og spenning ble hentet fra «voltmeter28» og «amperemeter33» som vises i kretsen. Magnetiseringsstrømmen er den samme som ble målt under tilsvarende forsøk på den ekte generatoren, se 10.1.

$$I_e = 60 \text{ A}$$

$$R_p = 11 \Omega$$

Krets 8.1: FEM R-last simuleringer



## 8.5 FEM RL-last med KF

Lasten i det fysiske forsøket var koblet i parallell, men det fungerte dårlig i ANSYS Maxwell. Lasten ble istedenfor modellert som en seriekobling. Konverteringen av den originale parallellkoblingen til seriekobling vises i (8.2), (8.3) og (8.4). Effektfaktoren var på 0.51. Voltmeter 28 og amperemeter 33 ble brukt. 1.3 sekunder ble simulert, hvorav 0.2 sekunder ble kuttet fra starten.

$$I_e = 77 \text{ A}$$

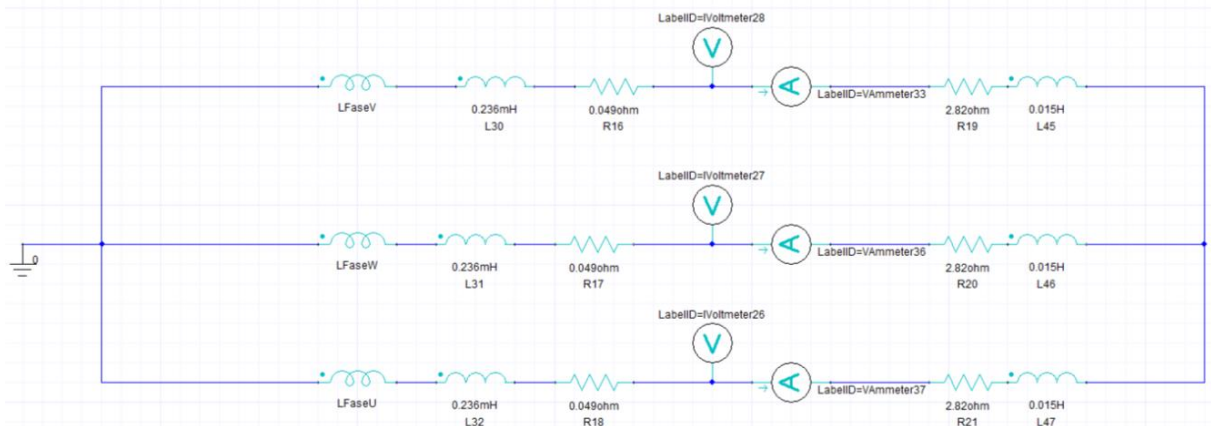
$$R_p = 11 \Omega \quad L_p = 20.56 \text{ mH} \rightarrow X_s = 6.46 \Omega$$

$$R_s = \frac{R_p X_p^2}{R_p^2 + X_p^2} = 2.82 \Omega \quad (8.2)$$

$$X_s = \frac{X_p R_p^2}{R_p^2 + X_p^2} = 4.8 \Omega \rightarrow L_s = 0.015 \quad (8.3)$$

$$Z = 5.57 \angle 59.6^\circ \quad (8.4)$$

Krets 8.2: FEM RL-last



## 8.6 FEM fullast(FL) KF

Denne modellen kalles fullast fordi det var den høyeste lasten det var mulig å kjøre Brutus på i laboratoriet på grunn av flaskehalsen i vekselretteren. Effektfaktoren var omtrent 0.9. «Voltmeter28» og «amperemeter33» ble brukt. 1.3 sekunder ble simulert, hvorav 0.2 sekunder ble kuttet fra starten.

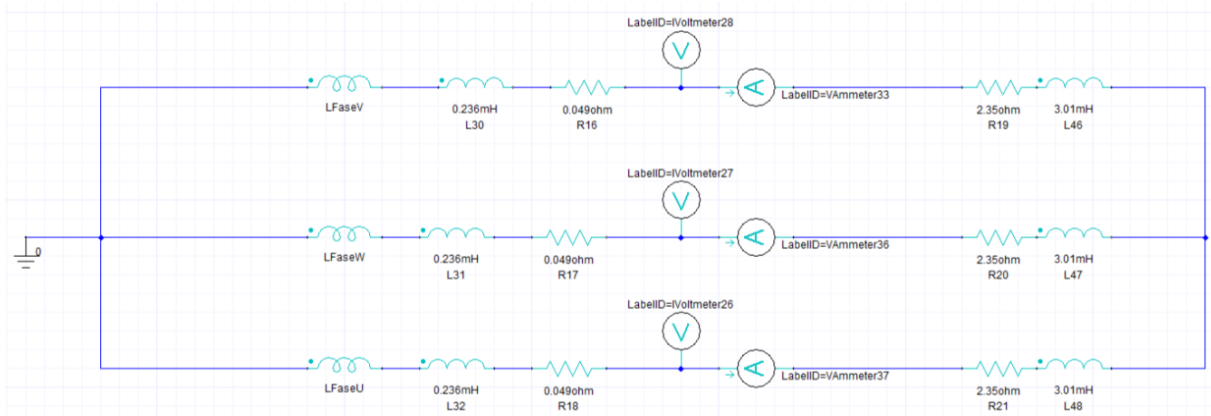
$$I_e = 83 A$$

$$R_p = 2.73 \Omega \quad L_p = 21.85 mH \rightarrow X_s = 6.78 \Omega$$

$$R_s = \frac{R_p X_p^2}{R_p^2 + X_p^2} = 2.35 \Omega \quad (8.5)$$

$$X_s = \frac{X_p R_p^2}{R_p^2 + X_p^2} = 0.95 \Omega \rightarrow L_s = 3.01 * 10^{-3} \quad (8.6)$$

Krets 8.3: FEM full last



## 8.7 FEM Statisk eksentrisitet, tomgang

For å kunne flytte hele rotor til siden ble det lagd et nytt koordinatsystem, «RelativeCS2», som alle rotordelene og «Band» ble orientert etter. Rotoren ble også satt til å rotere rundt z-aksen til det nye koordinatsystemet. «RelativeCS2» ble forskjøvet i positiv retning langs x-aksen til det globale koordinatsystemet, se tabell 8.2.

Tabell 8.2: Forskyvning av «RelativeCS2»

Forskyvning langs x-akse [%]	Forskyvning langs x-akse [mm]
5%	0.0875
10%	0.175
20%	0.35

## 8.8 Dynamisk eksentrisitet fullast og tomgang

Akkurat som i SE-modellen ble alle rotordeler orientert etter et nytt koordinatsystem, «RelativeCS2», bortsett fra «Bande» som ble orientert etter det globale koordinatsystemet. Hvilken retning DE var i spilte ingen rolle. «Voltmeter28» og «amperemeter33» ble brukt. Simuleringen varte i 1.3 sekunder. 0.04 sekunder av starten ble kuttet bort i tomgangsresultatet, og 0.2 sekunder med last.

Tabell 8.3: Forskyvning av «RelativeCS2»

Forskyvning langs x-akse [%]	Forskyvning langs x-akse [mm]
5%	0.0875
10%	0.175
20%	0.35

## 8.9 FEM, Blandet eksentrisitet, tomgang

Tomgang DESE 5 %: «RelativeCS2» satt 10 % i positiv x-retning, «RelativeCS3» satt 5 % i positiv x-retning. Det ga en SE på 5 % og DE på 5 %, siden DE måles i forhold til rotasjonssenteret «Band» («RelativeCS3») og rotorsenteret («RelativeCS2»).

## 8.10 Blanding av DE og KF tomgang

5 % DE i motsatt retning av KF, det vil si kortslutning i pol 1 og at denne polen til enhver tid hadde størst luftgap. Fasespenningen ble hentet fra fase U. Simuleringen varte i 1.3 sekunder. 0.04 sekunder av starten ble kuttet bort.

## 9 Instrumentering

Det ble brukt to typer oscilloskop: Tektronix MSO 3014 og ROHDE & SCHWARTZ ROT 2044. De ble ikke brukt samtidig. MSO 3014 ble brukt i de første forsøkene, mens ROT ble brukt i de siste. Dette vil komme frem i beskrivelsen av forsøkene. Begge var 8-bit oscilloskop, men med mulighet for å høyne oppløsningen ved hjelp av programvare. MSO 3014 hevder å kunne levere 11-bit, mens ROT 2044 hevder å kunne levere hele 16-bit. Dette går på bekostning av andre egenskaper, slik som båndbredde og tasterate. Valg av instrumentering er viktig, men på grunn av temaets størrelse vil det ikke bli behandlet i dybden i denne oppgaven.

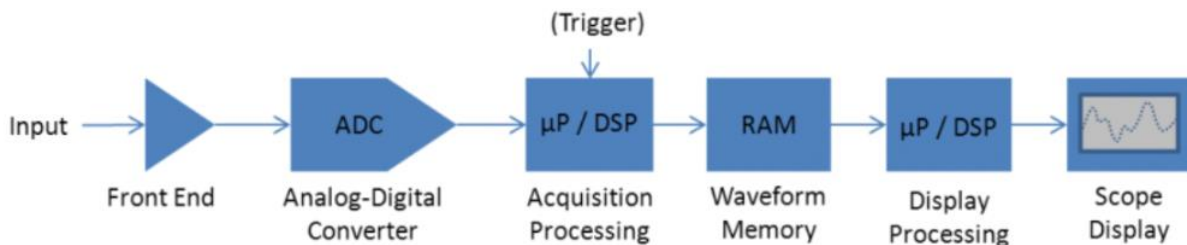
Den vertikale oppløsningen er gitt av hvor stort målevinduet er og hvor mange bit dette skal fordeles på. Båndbredden er den maksimale bredden på frekvensområdet oscilloskopet kan operere på og kan avhenge av både maskin- og programvare. Tasteraten er hvor ofte det kontinuerlige analoge signalet blir gjort om til en diskret digital verdi.

For at det ikke skal oppstå aliasing må tasteraten være minimum dobbelt så stor som den minste frekvensen til stede i signalet. For å være sikker på å få den korrekte amplituden til signalet som skal studeres, må tasteraten være langt høyere enn 2 ganger frekvensen. Nøyaktig hvor stor tasteraten bør være finnes det ikke noe fasit på, men en tommelfingerregel er at den bør være 10 ganger høyere enn frekvensen som studeres [46]. Eksempelvis: for å kunne gjengi et 100 Hz signal bør tasterate være minimum 1000 Hz. Frekvenser over 500 Hz vil da kunne gi aliasing.

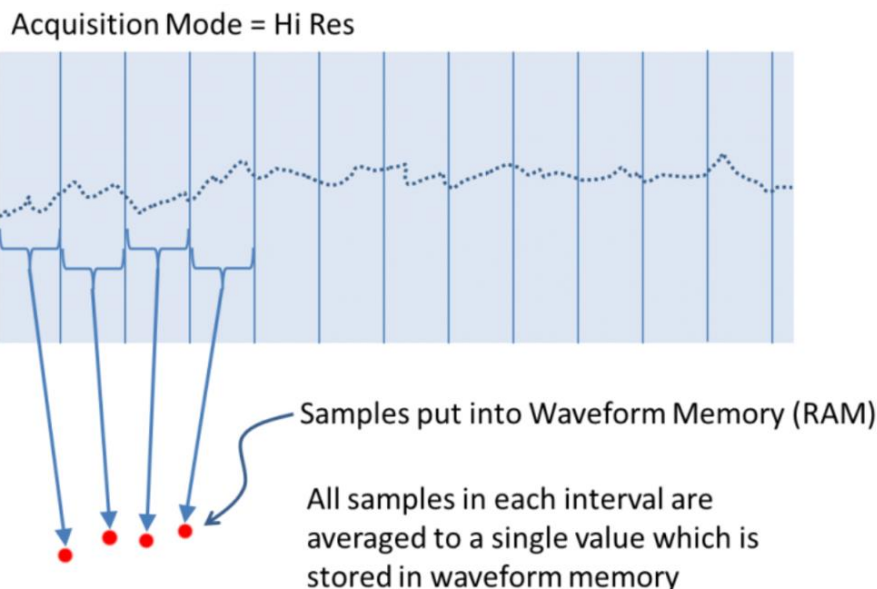
Det ble brukt samme innstilling på begge oscilloskop under alle forsøkene; 100 000 punktprøver fordelt på 10 sekunder, med andre ord en tastefrekvens på 10 kHz. Dette gjør at frekvenser opp til 1000 Hz kan analyseres, noe som er vesentlig høyere enn det frekvensspekteret som faktisk ble undersøkt. En tastefrekvens på 10 kHz betyr ikke nødvendigvis at tasteraten til oscilloskopet var 10 kS/s. Analog til digital-omformerer kan ha en tasterate som er høyere enn tastefrekvensen, slik at antall punkter som lagres i minnet reduseres av programvaren. Aliasing avhenger av tasteraten, og ikke tastefrekvensen. Oscilloskopprodusentene kan dermed hevde at det ikke oppstår aliasing selv om det skulle være frekvenser på over 2 ganger tastefrekvensen tilstede i signalet.

## 9.1 Tektronix MSO 3014

Oscilloskopet hadde en båndbredde på 100 MHz, tasterate på 2.5 GS/s og 4 kanaler. Tastefrekvensen kunne endres i bestemte intervaller, og var funksjon av to innstillinger; tidsvinduet og hvor mange punktprøver dette bestod av. Oscilloskopet hadde også flere datainnsamlingsinnstillinger («acquisition mode»). Her ble «Hi Res» (forkortelse for «high resolution») valgt slik at oppløsningen økte fra opprinnelige 8 bit til 11 bit. Dette betyr at datapunktene som ble lagret er et gjennomsnitt av flere punktprøver, se figur 9.2. Ifølge produsenten skal dette fungere som et aliasfilter. Det å øke oppløsningen med 3 bit går på bekostning av tasteraten, som halveres for hver halve bit. Dette gir en 64-del av opprinnelig tasterate, som blir 39 MS/s. Figur 9.1 viser den skjematiske oppbygningen av et Tektronix oscilloskop. Andre oscilloskop vil ha lignende oppbygning [47].



Figur 9.1 - Oscilloskopets behandling av signalet, Tektronix [47].



Figur 9.2 - Forklaring av "Hig Res" fra Tektronix's hjemmeside [47].

Spenningsvinduet var på 800 V under målingene på Brutus, slik at oppløsningen ble på 0.3906 V. Spenningsverdiene ble oppgitt med 3 desimalers nøyaktighet.



$$\Delta U = \frac{\text{spenningsvindu}}{2^{\text{bit}}} = \frac{800 \text{ V}}{2048} = 0.3906 \text{ V} \quad (9.1)$$

Oppløsningen for strømmen ved måling på laboratoriemaskin:

$$\Delta I = \frac{400 \text{ A}}{2048} = 0.1953 \text{ A} \quad (9.2)$$

Når det ble målt på 5 A kontrollanlegg, så var oppløsningen:

$$\Delta I = \frac{16 \text{ A}}{2048} = 7.8125 \text{ mA} \quad (9.3)$$

## 9.2 ROHDE & SCHWARZ, ROT 2044

Dette oscilloskopet har en oppløsning på 8-bit, men kunne oppnå en oppløsning på 16-bit ved å bruke «high res» funksjonen. Det har en båndbredde på 4 GHz, tasterate på 20GS/s og 4 kanaler. ROT 2044 var langt mer avansert enn MSO 3014, men de samme innstillingene ble brukt for at måleresultatene skulle være mest mulig sammenlignbare. Denne produsenten hevdet også at det ikke ville være fare for aliasing ved bruk av 16-bit oppløsning. Båndbredden skal kunne stilles inn fra 50 MHz og 10 kHz ved bruk av 16-bit oppløsning [48]. En konkurrent stiller seg dog kritisk til ROT 2044's påståtte yteevne [49]. Uansett så ble ikke frekvenser over 500 Hz undersøkt i denne oppgaven, slik at begrensninger i båndbredden ikke var noen bekymring.

$$\Delta V = \frac{1000 \text{ V}}{65536} = 0.0153 \text{ V} \quad (9.4)$$

$$\Delta A = \frac{400}{65536} = 6.101 \text{ mA} \quad (9.5)$$

I metafilene til prøvene fra ROT 2044 ble det oppgitt at «NofQuantisationLevels», altså den vertikale oppløsningen, var på 64768, som er 15.98 bit.

## 9.3 Differensialprobe

For å beskytte oscilloskopet ble det benyttet en differensialprobe av typen Metrix MX9002. Båndbredden var på fra 0 Hz til 25MHz, men en garantert nøyaktighet på  $\pm 2\%$ . Den hadde to måleområder, ett på  $\pm 140 \text{ V}$  og ett på  $\pm 1400 \text{ V}$ , begge verdier betegnet maksimal amplitude. Skaleringen fra input til output var henholdsvis 1:20 og 1:200 [50].

## **9.4 Strømtang**

Strømtangen var av typen Fluke 80i-1000s. Den har tre måleområder: 100 mA til 10 A, 500 mA til 100 A og 5 A til 1000 A, med en måleusikkerhet på henholdsvis 3 %, 2 % og 2 %. Båndbredden var fra 5 Hz til 100 kHz [51].

## 10 Gjennomføring og oppsett av forsøk Brutus

Den opprinnelige planen var å ha en 16-polet generator, men en 14-polet ble funnet mer hensiktsmessig. Denne endringen kom så sent at gir og motor, som driver generatoren, allerede var på plass og tilpasset en 16-polet generator. Av praktiske og økonomiske årsaker valgte man å beholde dette.



Figur 10.1: Fra venstre: Motor, gir og Brutus

Induksjonsmotoren, som skulle simulere en turbin i et vannkraftverk, ble styrt av en vekselretter bygget av SINTEF med en effekt på 60 kW, kun 2/3 av den nominelle effekten til Brutus. Farten på motoren kunne settes til et heltall omdreininger pr minutt, noe som ikke korresponderte til 50 Hz i generatoren. Vekselretteren var ikke i stand til å holde et konstant turtall. Disse frekvensvariasjonene måtte derfor tas høyde for i analysen av indusert spenning og strøm.

$$n_1 - \text{motorturtall}$$

$$n_2 - \text{generatorturtall}$$

$$\text{girets utvekslingsforhold} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{1485}{375.95}$$

$$n_1 = \frac{3000}{7} * \frac{1485}{375.95} = 1692.85429 \approx 1693 \text{ opm}$$

## 10-Gjennomføring og oppsett av forsøk Brutus

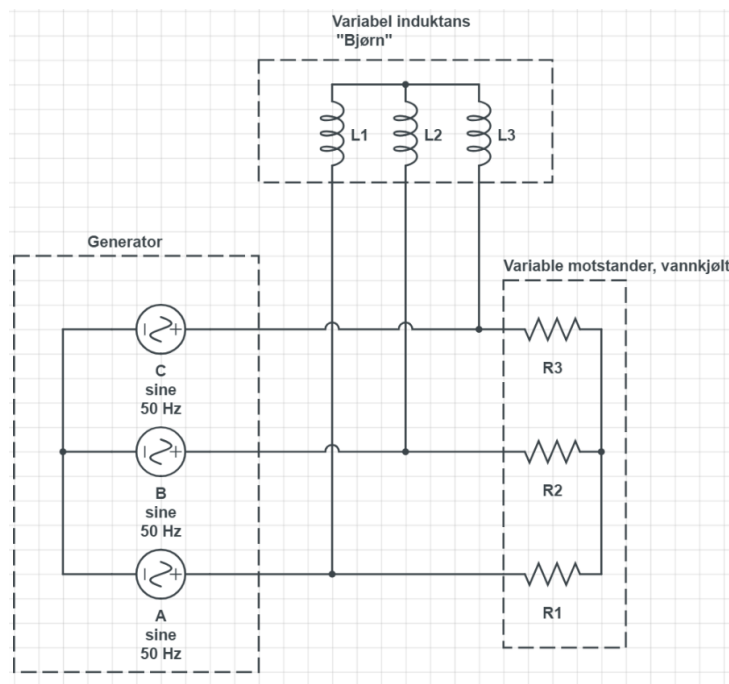
$$f = \frac{14 * 1693 * \frac{n_2}{n_1}}{120} = 50.0043 \text{ Hz}$$

### 10.1 Forsøk 1: Kortslutning i feltvikling(KF). T1, R og RL.

15.03.2019. MSO 3014

Ti feiltilstander ble kjørt på tre forskjellige kretser: tomgang, ren resistiv krets og en blanding av resistiv og induktiv last. Strøm og spenning til fase U ble målt. Spenningen ble målt mellom fase og nullpunktet. Hverken nullpunktet til generatoren eller lastene var jordet. Krets 10.1 viser laboratorieoppsettet med alle komponenter tilkoblet. Detaljert informasjon om de enkelte komponenter finnes i Appendiks A.

Krets 10.1: Laboratorieoppsett



Tabell 10.1: Metadata, T1

Antall kortslutninger	$I_e$	$U_e$
0	55	10.45
1	56	10.53
2	56	10.52
3	56	10.63
7	56	10.38

## 10-Gjennomføring og oppsett av forsøk Brutus

10	56	10.53
----	----	-------

Tabell 10.2: Metadata, R-last,  $R = 11 \Omega$

Antall kortslutninger	$I_e$	$U_e$	$I_R$
0	60	11.08	43.3
1	60	11.11	42.7
2	60	11.06	42.7
3	60	11.12	42.7
7	60	11.15	42.7
10	61	11.08	42.5

Tabell 10.3: Metadata, RL-last,  $R = 11 \Omega$ ,  $L = 20.56 \text{ mH}$

Antall kortslutninger	$I_e$	$U_e$	$I_R$	$I_L$
0	77	13.63	43.0	35.7
1	77	13.82	42.9	35.4
2	77	13.83	42.9	35.4
3	77	13.93	42.6	35.4
7	77	13.92	42.6	35.6
10	77	13.90	42.7	35.6

## 10.2 Forsøk 2: KF. FL1. 27.03.19 MSO 3014

Forsøket ble gjennomført med høyest mulig tilgjengelige last, med et mål om å komme nært en effektfaktor på 0.9, som er driftspunktet for en ordinær vannkraftgenerator. Induktansen lot seg ikke stille høyere enn at effektfaktoren endte på 0.93.  $R=2.73$  ble brukt i ANSYS Maxwell.

$$I_e = 83 \text{ A}, \quad U_e = 14.83 \text{ V}$$

$$I_L = 33.5 \text{ A}$$

$$I_R = 84.4 \text{ A}$$

$$I = 84.4 + 33.5j = 90.8 \angle 21.65^\circ$$

$$PF = \cos(\phi) = 0.93$$

## 10-Gjennomføring og oppsett av forsøk Brutus

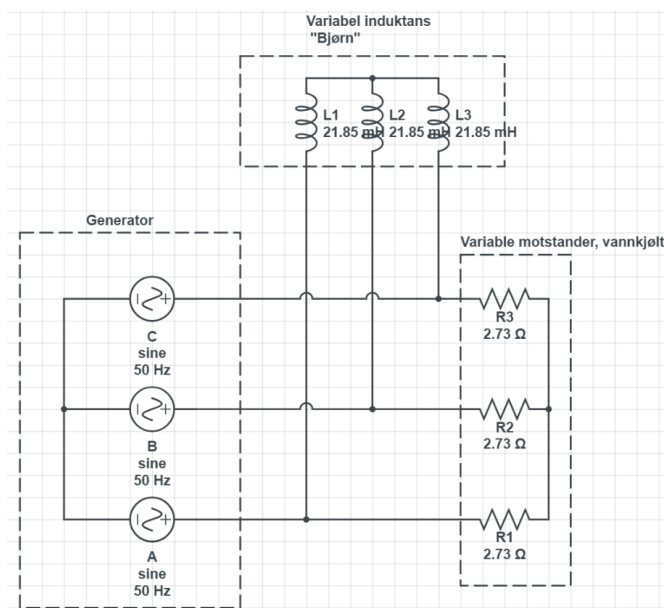
$$R_{teoretisk} = 2.78 \Omega$$

$$R_{beregnet} = \frac{230}{84.4} = 2.73 \Omega$$

$$X = \frac{230}{33.5} = 6.87$$

$$L = \frac{X}{\omega} = \frac{6.87}{100 \pi} = 21.85 \text{ mH}$$

Krets 10.2: Forsøk 2, PF=0.93



## 10.3 Forsøk 3: KF. T2 og FL2. 02.05.19. ROT 2044

Det ble gjennomført tomgangsprøve og fullastprøve i parallell, som startet med frisk maskin og avsluttet med maksimal kortslutning i feltviklingen. 16-bit oscilloskopet ROT 2044 ble brukt. Fullastprøven hadde samme oppsett som de andre fullastprøvene.

## 10.4 Forsøk 4: KF. T3 og FL3. 15.05.19. ROT 2044

Likt forsøk 3, med følgende forandringer:

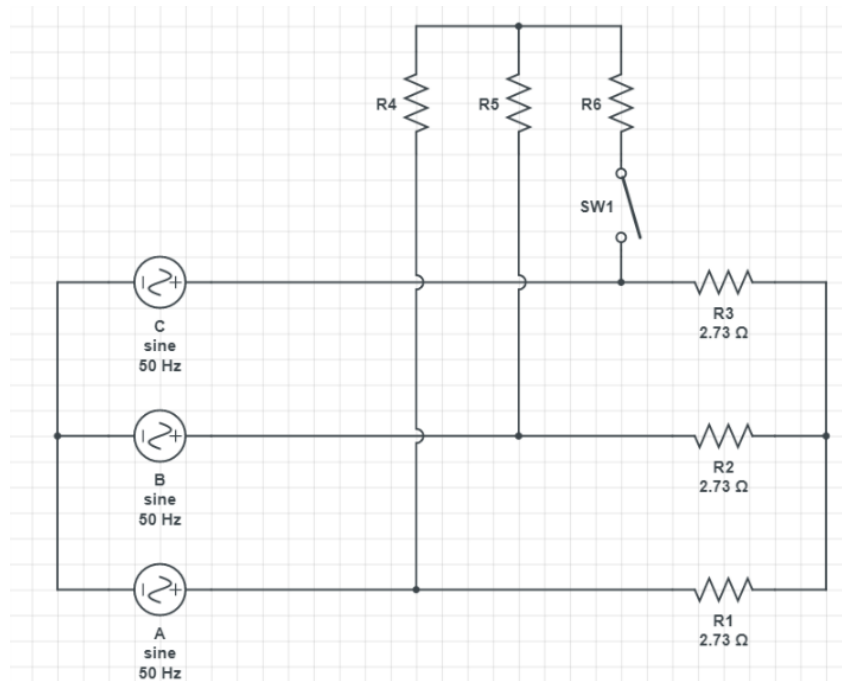
- Kortslutningsfeilen ble satt på motsatt pol (pol nummer 8)

## 10-Gjennomføring og oppsett av forsøk Brutus

- Forsøket startet med ingen kortslutningsfeil, for deretter å ta maksimal kortslutningsfeil og synkende kortslutningsfeil før det på ny ble tatt prøve av frisk maskin. Hensikten var å sjekke om temperaturforandring var av betydning.
- Deretter ble det kjørt flere tester med både pol 1 og pol 8 kortsluttet.
- Helt på slutten ble det kjørt flere tester uten kortslutning, men én serie med motsatt rotasjon på rotor, og én serie med skiftet polaritet (endret strømretning i feltvikling).

## 10.5 Forsøk 5: Dempeviklinger. 04.04.19. MSO 3014

Krets 10.3: Skjevlast



Alle faser ble belastet med en ren resistiv vannkjølt last, lik den brukt i andre forsøk, med en merkeskiltverdi på  $2.78 \Omega$ , som ga en strøm på 83 A. En annen vannkjølt motstand ble koblet i parallell og fungerte som skjevlast. En av fasene var koblet ut (L3), slikt at to av fasene (L1 og L2) fikk en énfaselast (to trefaselaster koblet i serie). Størrelsen på skjevlasten ble variert fra ingen skjevlast til 18.6 A ( $22 \Omega$ ), som er godt innenfor det maskinen er designet for å tåle, se utregninger nedenfor.  $X_1$  og  $X_2$  er den medroterende og motroterende impedansen til generatoren [52].

$$I_b = \frac{\sqrt{3}E}{Z_1 + Z_2 + Z_F}$$

## 10-Gjennomføring og oppsett av forsøk Brutus

$$Z_F = 22 \angle 0^\circ$$

$$X_2 = 0.49 \Omega$$

$$X_1 = 2.04 \Omega$$

$$I_b = -I_c = \frac{400}{22.15 \angle 6.6} = 18.06 A$$

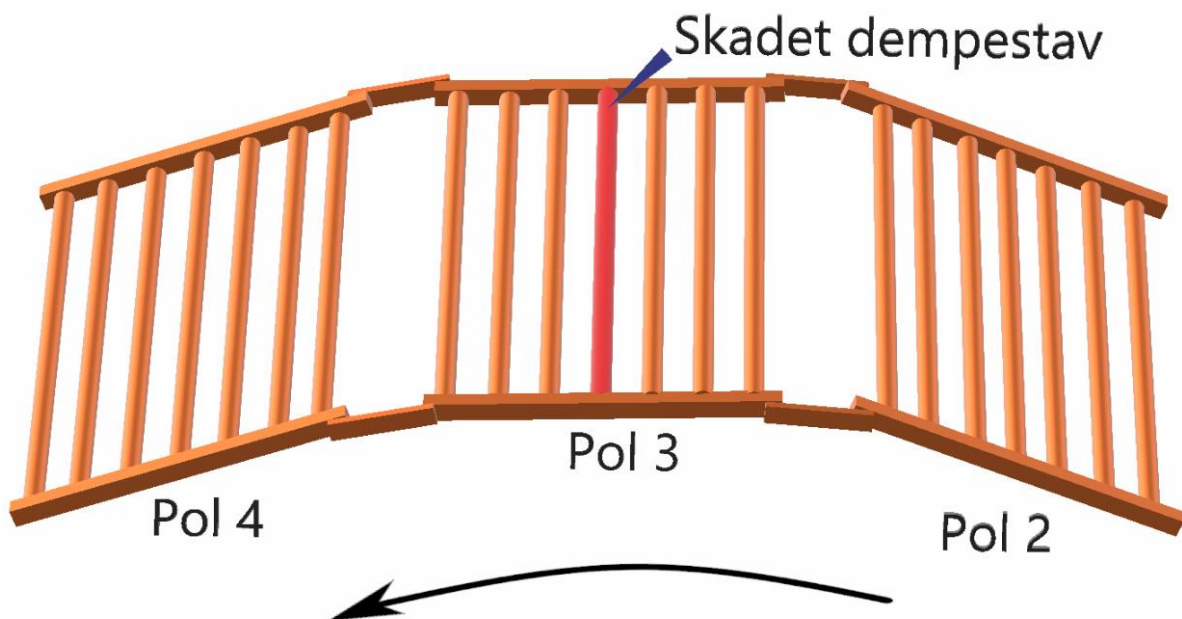
$$I_{b012} = A^{-1}I_b = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{3}(\alpha - \alpha^2)I_b \\ \frac{1}{3}(\alpha^2 - \alpha)I_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{18\sqrt{3}}{3} \angle 270^\circ \\ \frac{18\sqrt{3}}{3} \angle 270^\circ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -10.4 \angle -90^\circ \\ 10.4 \angle -90^\circ \end{bmatrix}$$

$I_{2n}$  – Maksimal motroterende strøm

$$I_n = 144.3 A$$

$$I_{2n} = 0.2I_n = 28.86 A$$

Frisk maskin og to feiltilstander ble testet med forskjellig grad av skjevlast. Maskinen hadde fra fabrikk en skadet dempevikling, der den midterste staven i en av polene var litt for kort slik at det ble dårlig kontakt med kortslutningsringen. Dette kan ha påvirket de friske målingene.

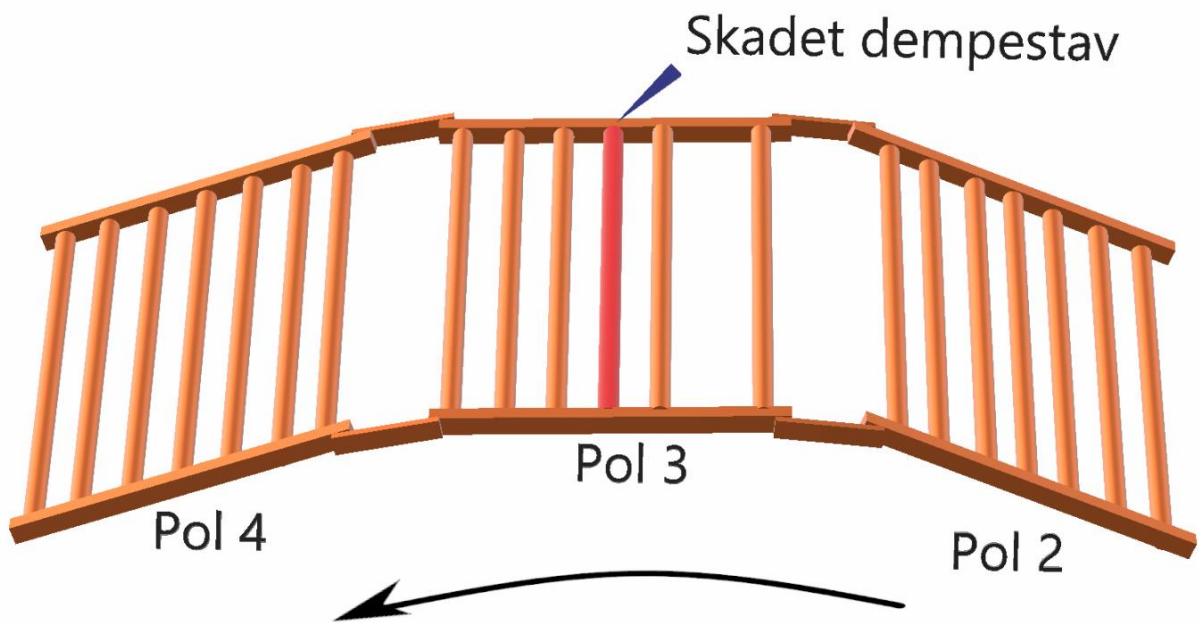


Figur 10.2: Skisse av frisk dempevikling. Den røde staven har en produksjonsskade. Pilen viser dreieretningen på rotor.



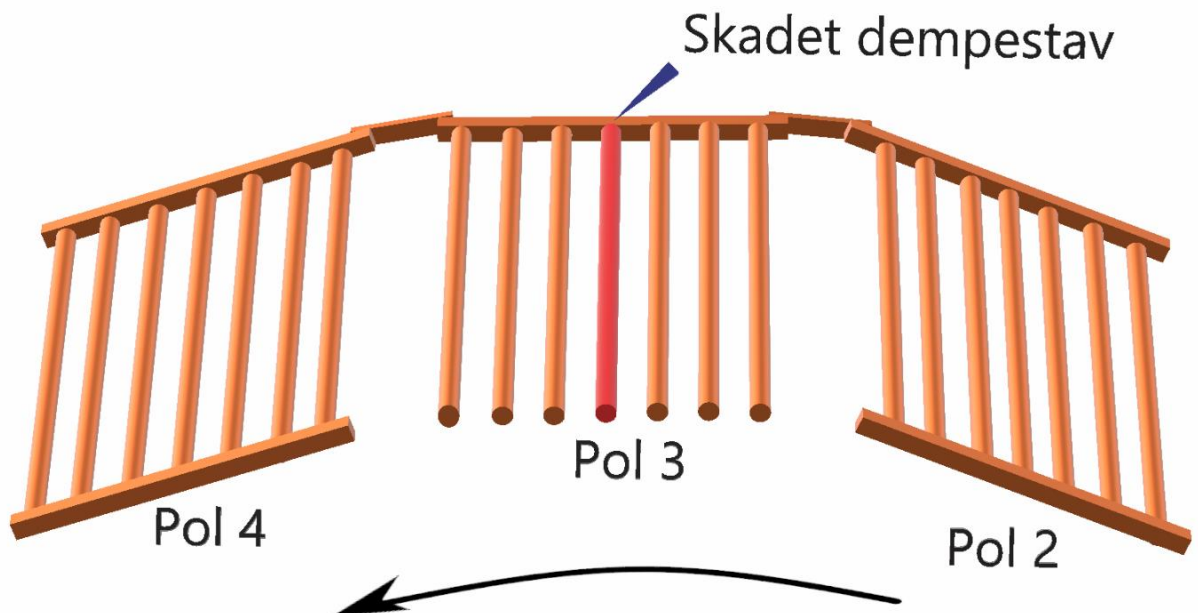
## 10-Gjennomføring og oppsett av forsøk Brutus

**Feiltilstand 1:** Den nest ytterste staven, på den samme polen som den skadde, ble fjernet. Se figur 10.3.



Figur 10.3: Feiltilstand 1: Nest ytterste stav i pol 2 er tatt bort. Den røde staven har en produksjonsskade. Pilen viser dreieretningen på rotor.

**Feiltilstand 2:** Et helt segment av kortslutningsringen på samme pol ble fjernet, slik at ingen av staven på polen var kortsluttet, se figur 10.4



Figur 10.4: Feiltilstand 2: Hele segmentet til pol 3 er tatt bort. Den røde staven har en produksjonsskade. Pilen viser dreieretningen på rotor

## 10-Gjennomføring og oppsett av forsøk Brutus

Tabell 10.4: metadata forsøk med skjevlast og feil på dempeviklingen.

$R_{skjevlast} [\Omega]$	Uten feil		Feiltilstand 1 (fig)		Feiltilstand 2	
	$I$	$I_2$	$I$	$I_2$	$I$	$I_2$
$\infty$	0	0	0	0	0	0
160	2.5	1.4	2.4	1.4	2.5	1.4
80	4.7	2.7	4.7	2.7	4.7	2.7
44	9.3	5.4	9.2	5.3	9.3	5.4
22	18.5	10.7	18.5	10.7	18.6	10.7

## 10.6 Salsbruket 25.03.19 MSO 3014

Det ble gjort tester på to vannkraftgeneratorer på Salsbruket i Opløvassdraget. Det var totalt fire kraftstasjoner i serie i Opløvassdraget, hvorav de to som ble testet, Liafoss og Ulefoss, lå henholdsvis som kraftstasjon nummer 2. og 3. sett oppstrøms fra. Begge aggregatene var horisontale med francisturbin.

### 10.6.1 Ulefoss

De tilgjengelige målepunktene til strøm og spenning var så langt unna hverandre at strøm og spenning ikke kunne tas opp simultant. Istedenfor ble testene kjørt to ganger, én for spenning og én for strøm. Fire tester ble kjørt: tomgang (50 kW), 1000 kW, økt pådrag fra 1000 kW til 2100 kW, 2100 kW. Alle prøver har en varighet på 10 sekunder. Pådragsøkningen hadde en varighet på totalt 25-30 sekunder, slik at bare deler av pådragsøkningen er tatt opp.

Spenningstrafoen var av merket Artech, med en spenning på 110 V på sekundærsiden. Strømtrafoen satt i nullpunktet og var av ukjent fabrikat. Målesignalet på 5 A ble målt med strømtang.

## 10-Gjennomføring og oppsett av forsøk Brutus



Figur 10.5:Måletrafo Ulefoss: Spenningstransformator

«CL: 0.5/3P» angir presisjonsklassen til måletrafoen i henhold til IEC 60044-2. «0.5» refererer til at målenøyaktigheten er innenfor 0.5 % i måleområdet 80-120 % av nominell spenning. Dette er standarden for måletrafoer som brukes til å beregne fortjeneste. «3P» er klassifisering for bruk av måletrafoen til vern. Den har da en garantert nøyaktighet på 3 % på spenninger mellom 5 % og 190 % (RVF) av nominell spenning [53]. Se Appendiks A for fullstendig tabell over klassifiseringer.

### 10.6.2 Liafoss

Målepunktene for strøm og spenning lå like ved hverandre slik at begge ble tatt opp simultant. Tre tester ble kjørt: 2900 kW, redusert pådrag 2900 – 1500 kW, og 1500 kW. Den totale tiden det tok å redusere pådraget ble ikke målt av praktiske årsaker, men var i samme størrelsesorden som Ulefoss.

Spenningstrafo og strømtrafo var av ukjent fabrikat, men signalene var i samme størrelsesorden om på Ulefoss, det vil si 110 V og 5 A. De var trolig i samme presisjonsklasse som på Ulefoss.

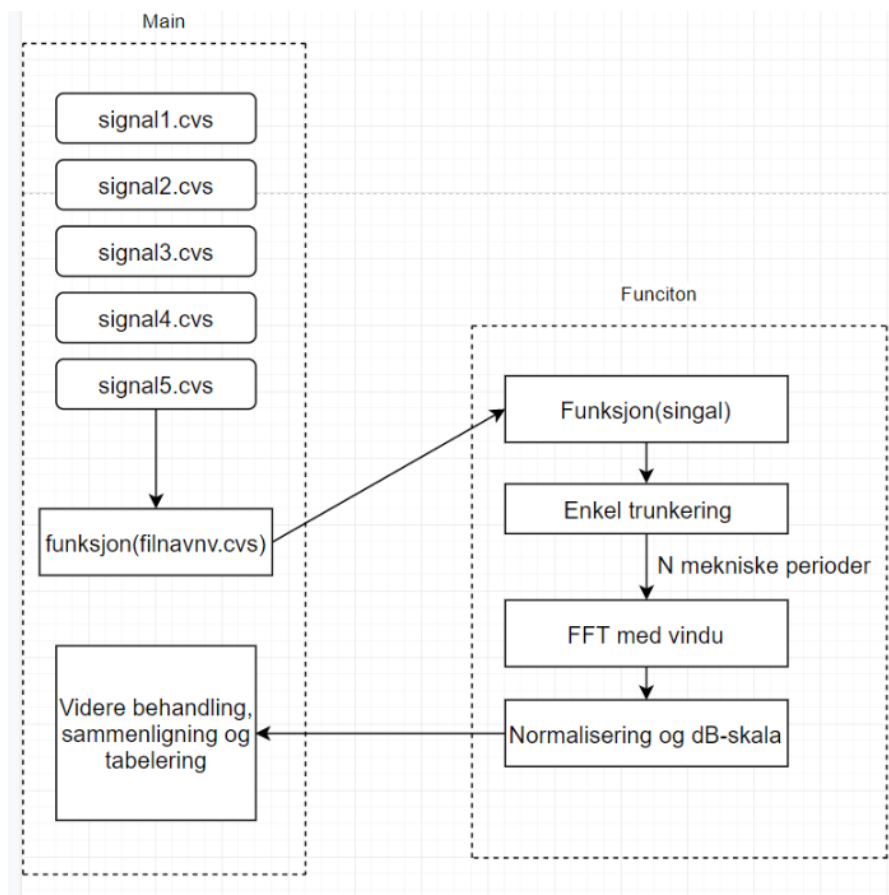
## 10-Gjennomføring og oppsett av forsøk Brutus

# 11 Program og Algoritmer

Det ble brukt tre forskjellige programmer for å analysere resultatene. Begge var basert på FFT, men de brukte forskjellige vindu og signallengde i analysen.

## 11.1 Program 1: DFT med vindusfunksjoner og 10 sekunder av signalet.

Programmet tok inn hele signalet på 10 sekunder. Enden av signalet ble trunkert for å få et helt antall mekaniske perioder. Trunkeringen ble følgelig ikke perfekt siden tastetiden og signalfrekvensen ikke korresponderte. Dette problemet ble løst i program 2 ved å foreta en «omtasting». Uansett, vinduene som ble brukt i program 1 bøtet i stor grad på dette problemet. Vinduer som ble prøvd ut var Hann og Flat-top. De teoretiske feilfrekvensene ble regnet ut fra (3.1). Bare amplitudeverdiene til feilfrekvensene ble vurdert av programmet.



Figur 11.1: Program 1, flytskjema

## 11-Program og Algoritmer

Differansen mellom de syke og det friske signalet var utgangspunktet for vurderingen av egnetheten til de forskjellige frekvenskomponentene. Frekvensene ble rangert og tabellert etter deres evne til å oppdage kortslutningsfeil fra første, andre, tredje, syvende og tiende kortsluttede vinding. To typer tabeller ble brukt, type A og type B. I type A ble frekvensene organisert i 5 kolonner. Hvis en frekvens havnet i kolonne/kategori «1» betød dette at med den aktuelle frekvensen kunne feilen oppdages fra første kortslutning. Kolonne/kategori «5» betød at feilen kunne oppdages fra og med tiende kortslutning. I tabell type B ble frekvensene organisert radvis og amplituden til feilgradene kolonnevis. Frekvensen som havnet i første rad var den laveste frekvensen i beste kategori fra tabell type A. Tabell type A listet opp de frekvensene som var best egnet på en kompakt måte, mens tabell type B ga et mer nyansert bilde av amplitudeverdiene og tok derfor mer plass.

$$dB_{frisk} - dB \text{ verdien av frisk frekvenskomponent}$$

$$dB_{syk} - dB \text{ verdien av syk frekvenskomponent}$$

# – antall kortslutninger

$$df_{f\#} = dB_{syk} - dB_{frisk}$$

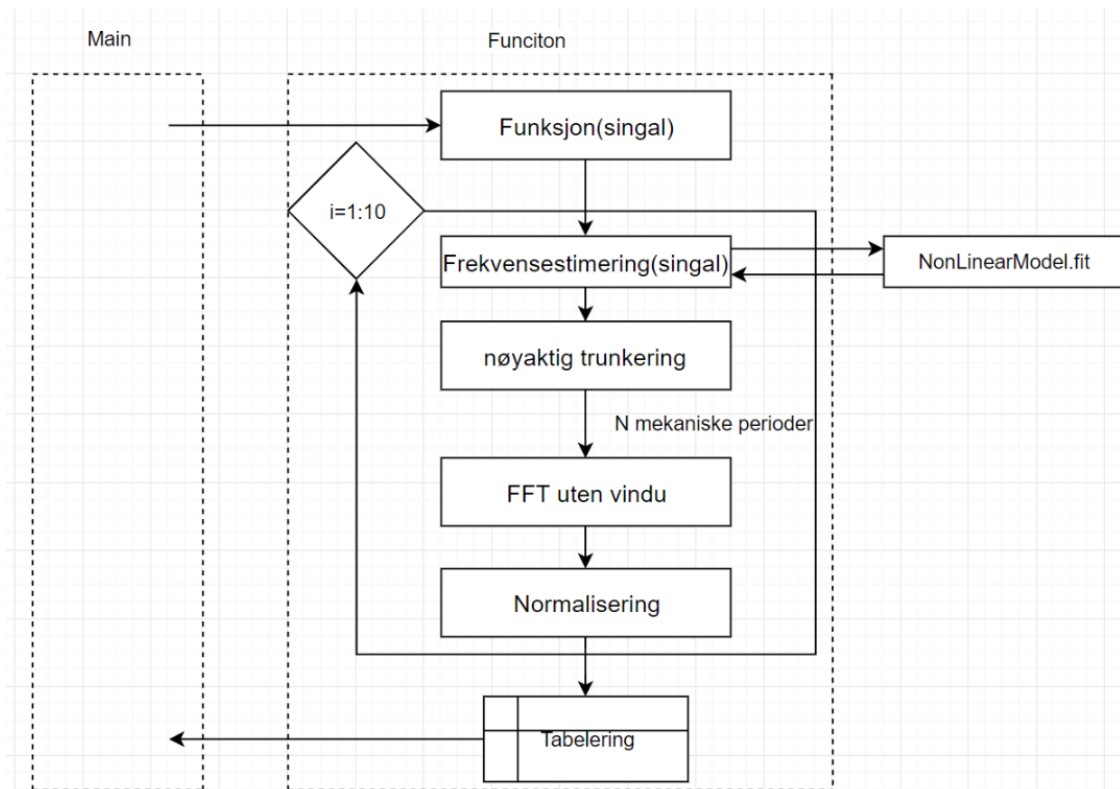
**Tabell 11.1: Kategorisering av egnethet**

Kolonne	Krav
Fra 10 (Kat 5)	$df_{f_{10}} > df_{f_7}, df_{f_3}, df_{f_2}, df_{f_1} \text{ og } 0$
Fra 7 (Kat4)	I tillegg til den over: $df_{f_7} > df_{f_3}, df_{f_2}, df_{f_1} \text{ og } 0$
Fra 3 (Kat 3)	I tillegg til de over: $df_{f_3} > df_{f_2}, df_{f_1} \text{ og } 0$
Fra 2 (Kat 2)	I tillegg til de over: $df_{f_2} > df_{f_1} \text{ og } 0$
Fra 1 (Kat 1)	I tillegg til de over: $df_{f_1} > 0$

Det er verdt å bemerke at verdien man får ved å trekke fra hverandre to dB-verdier ikke gir fysisk mening da logaritmiske verdier må gjøres om til «magnitudo» for å ta differansen mellom dem. Algoritmens oppgave var derimot å kategorisere frekvensene etter kriteriene i tabell 11.1 slik at den strengt tatt umatematiske måten å gjøre det på ikke var av betydning.

## 11.2 Program 2a: DFT med rektangulært vindu på 1 sekunders biter av signalet.

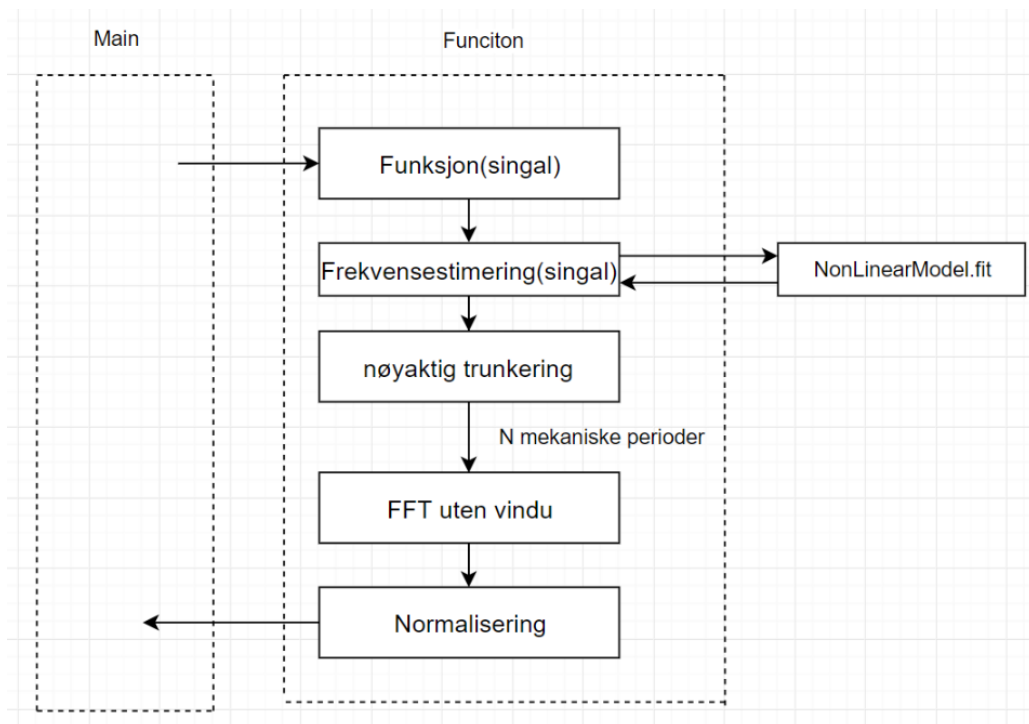
På grunn av varierende turtall på motoren som drev generatoren, samt måleunøyaktigheter, ble det interessant å se på mindre biter av signalet og sammenligne disse. Program 2 tok inn hele signalet på 10 sekunder og delte dette opp i biter på 1 sekund, som ble analysert hver for seg. Ved hjelp av regresjon ble den grunnharmoniske frekvensen til det aktuelle sekundet funnet. Algoritmen for å estimere frekvensen ble hentet fra [54], Appendiks A. Deretter ble signalet «omtastet» ved hjelp av «spline interpolation». Hensikten med dette var å få frekvensintervallet i DFT-analysen slik at de predikerte feilfrekvensene ble nøyaktig evaluert. Den nye tastefrekvensen ble derfor satt til en brøk av den mekaniske frekvensen. Deretter ble ett-sekunders signalet trunkert slik at det bestod tilnærmet av et nøyaktig antall mekaniske perioder. Den resterende delen var utgangspunktet for DFT-analysen, som ble gjort «uten» vindu (rektangulært vindu). Programmet minnet om «short time fourier transform» (stft), som er en metode der overlappende biter av et signal blir analysert for å lage et 3D-plot som inneholder både tid, frekvens og amplitude. Det brukes gjerne på transiente forløp. Funksjonen, som er innebygd i MATLAB, ble prøvd og ikke funnet hensiktsmessig til dette prosjektet.



Figur 11.2: Program 2a, flytskjema. «Main» er lik den i figur 11.1

## 11.3 Program 2b

Program 2a var tungt kodet, krevde stor datakraft og DFTen hadde lav oppløsning, men til gjengjeld ga den informasjon i tidsdomenet, synliggjorde variasjonen i signalet og måleusikkerhet. Program 2b delte ikke signalet inn i biter, men det estimerte frekvensen, omtastet og trunkerte på samme måte som program 2a. Dette gjorde program 2b sensitiv for variasjoner i frekvensen som gjorde at den av og til ga ut helt ubrukelige resultater (dog ikke ugyldige).



Figur 11.3: Program 2b. «Main» er lik den i figur 11.1

Programmet ble spesifikt laget for å kunne kategorisere feil. Den laget et stolpediagram med amplituden i prosent av merkespenning til de forskjellige frekvenskomponentene jamfør (3.1). Stolpediagrammene ble sammenlignet med tilsvarende stolpediagram fra den fundamentale analysen for å gjøre det mulig å skille mellom kortslutning og eksentrisitet.

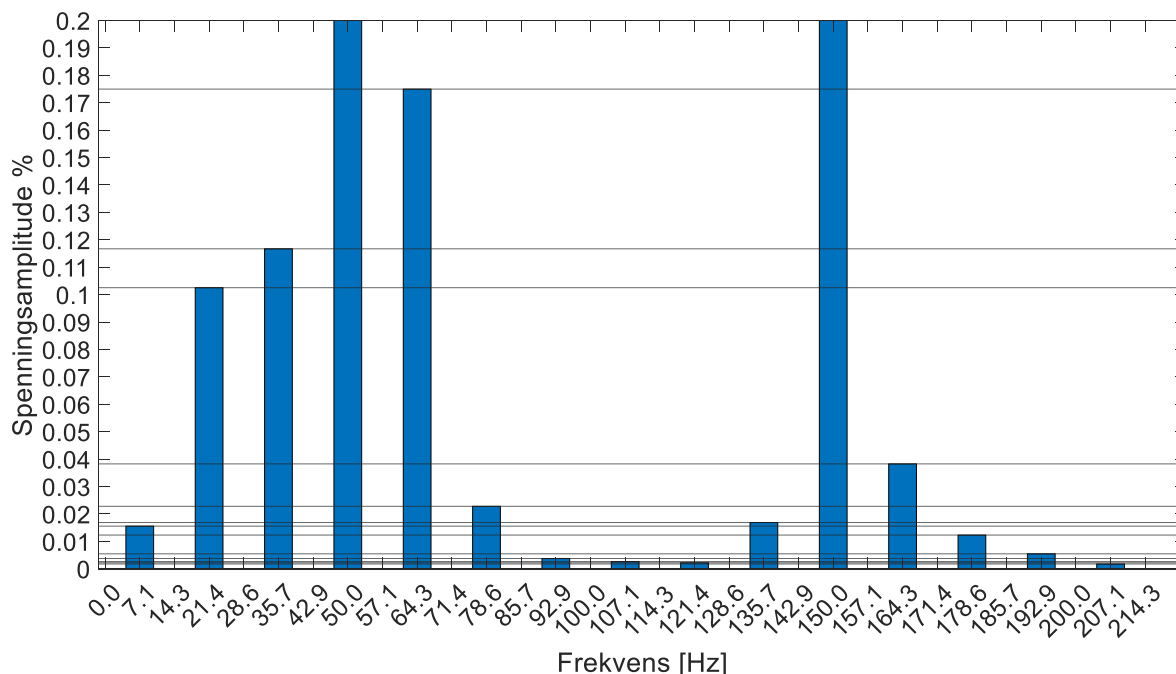


## 12 Hovedresultater, Brutus

Dette kapitlet inneholder de viktigste resultatene. Alle resultatene i dette kapitlet er fra laboratoriegeneratoren Brutus. Første delkapittel vil ta for seg resultatene fra den analytiske modellen (AM), det andre kapitlet vil gjennomgå resultatene fra de numeriske FEM simuleringene i ANSYS Maxwell. De siste delkapitlene viser resultatene fra den ekte Brutus, der alle målingene ble analysert med program 2b. Deler av målingene ble også analysert med program 1 og program 2a, og er presentert i kapittel 13 og 14. Kapittel 15 presenterer resultatene fra skjevlastprøvene med Brutus, der dempeviklingen ble påført forskjellige typer feil. Kapittel 16 presenterer fenomener i frekvensspekteret som trolig ikke har noe å gjøre med de undersøkte feiltypene, men som likevel er interessante. Målingene fra vannkraftgeneratorene presenteres i kapittel 17, og ble analysert med både program 1, 2a og 2b.

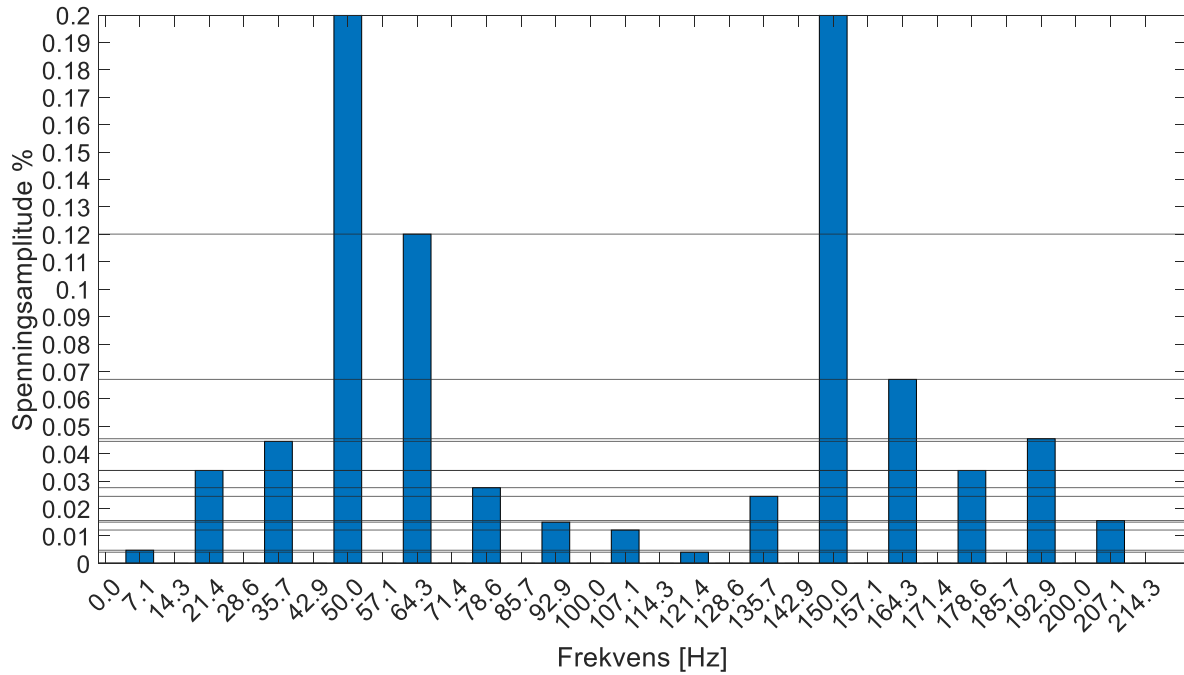
### 12.1 Resultater Analytisk Modell

#### 12.1.1 Analytisk modell, Brutus



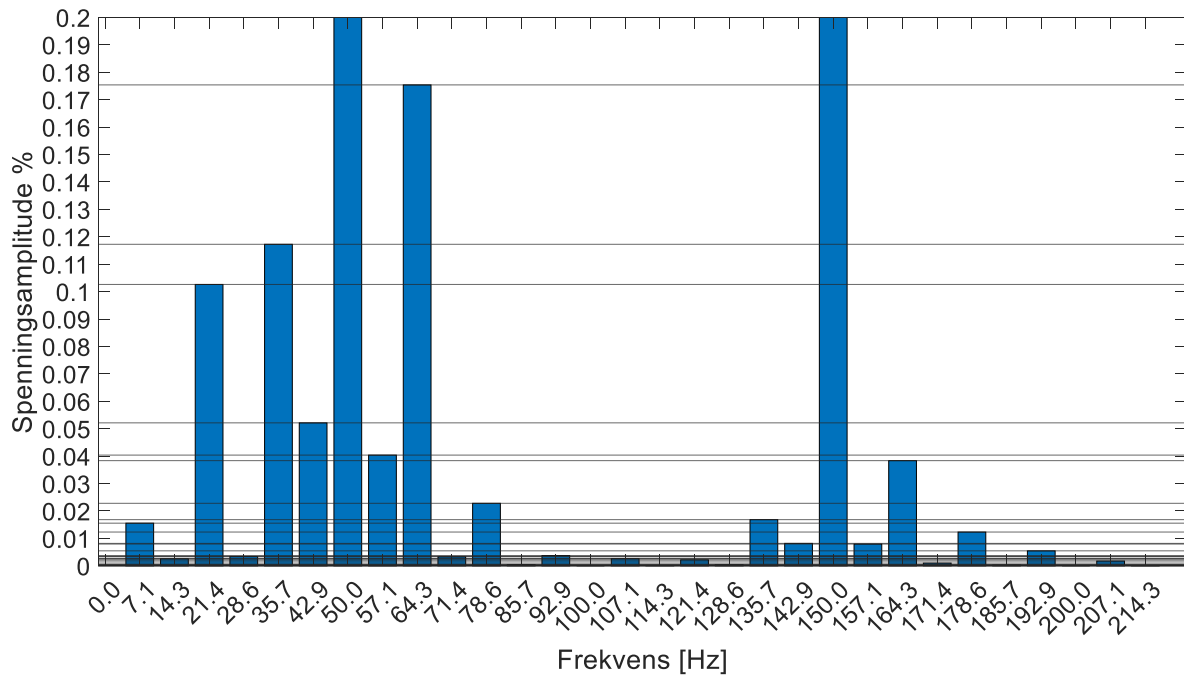
Figur 12.1:AM, KF 10, Brutus

## 12-Hovedresultater, Brutus



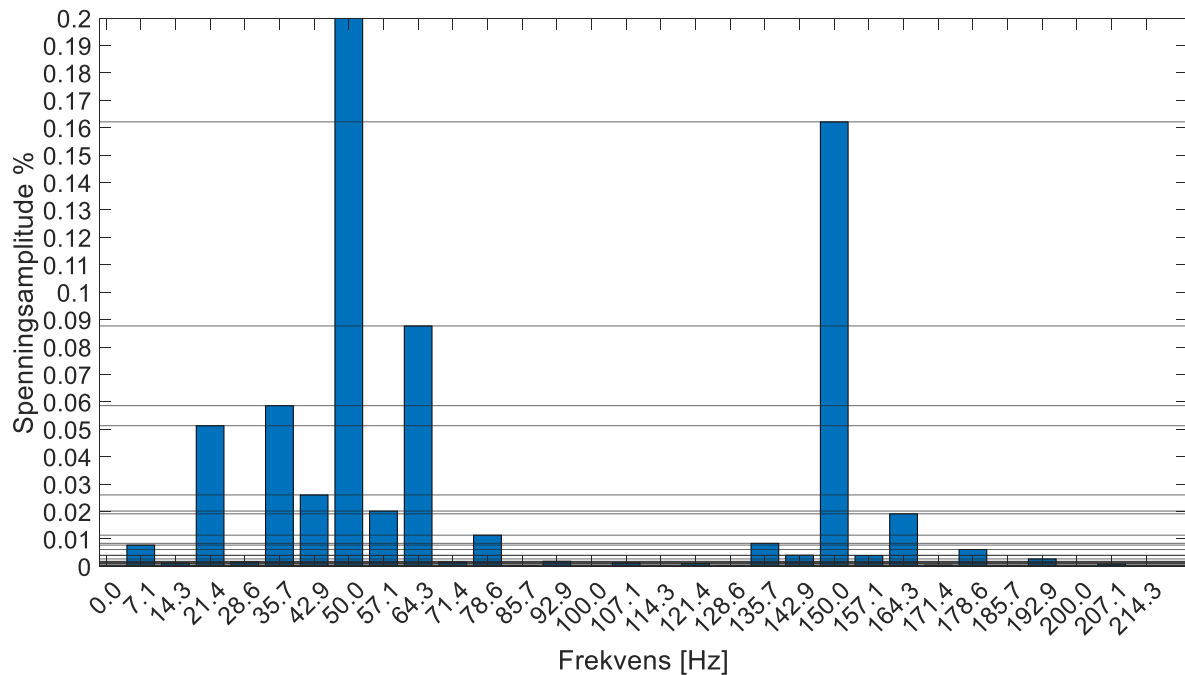
Figur 12.2:AM, DE 2.5%, Brutus

Alle harmoniske til både kortslutning i feltvikling (KF) og dynamisk eksentrisitet (DE) var oddetalls multiplum av  $f_{mek}$ . 35.7 Hz hadde ca 1/3 av amplituden til 64.3 Hz for DE, og 2/3 for SE. Frekvensene over 64.3 Hz var generelt høyere relativt til 64.3 Hz for DE sammenlignet med SE. 21.4 Hz og 178.6 Hz, samt 35.7 Hz og 192.9 Hz hadde omtrent lik amplitude ved DE.

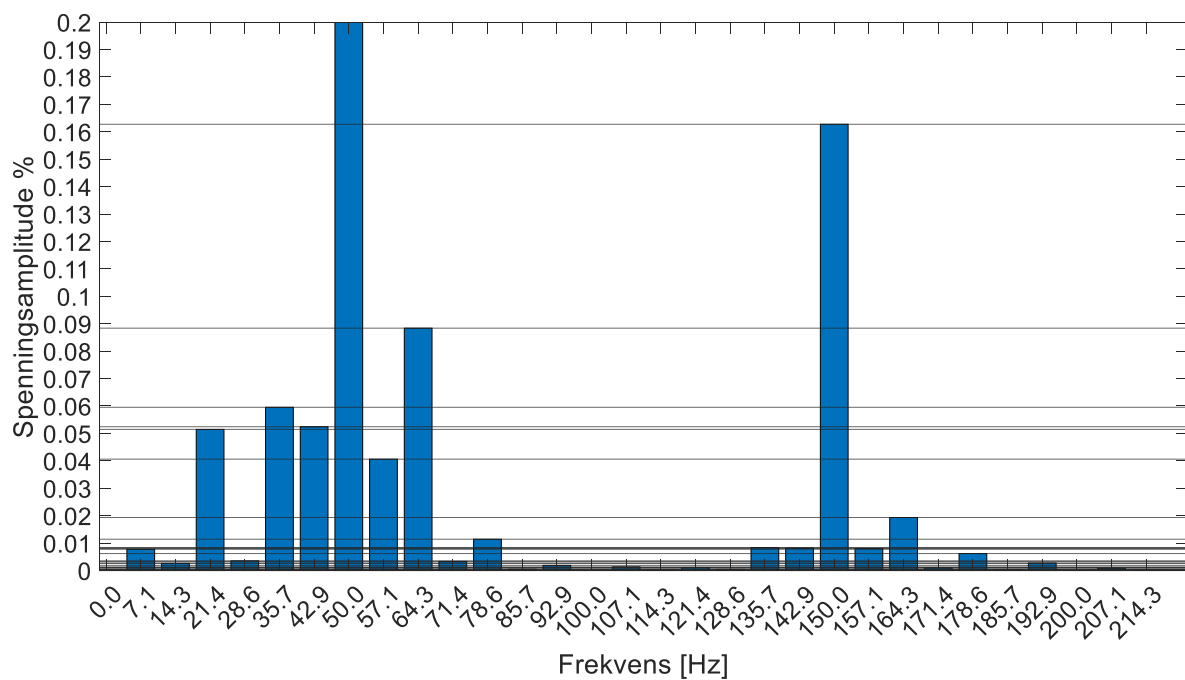


Figur 12.3: AM, SE 5%, KF 10, Brutus

## 12-Hovedresultater, Brutus



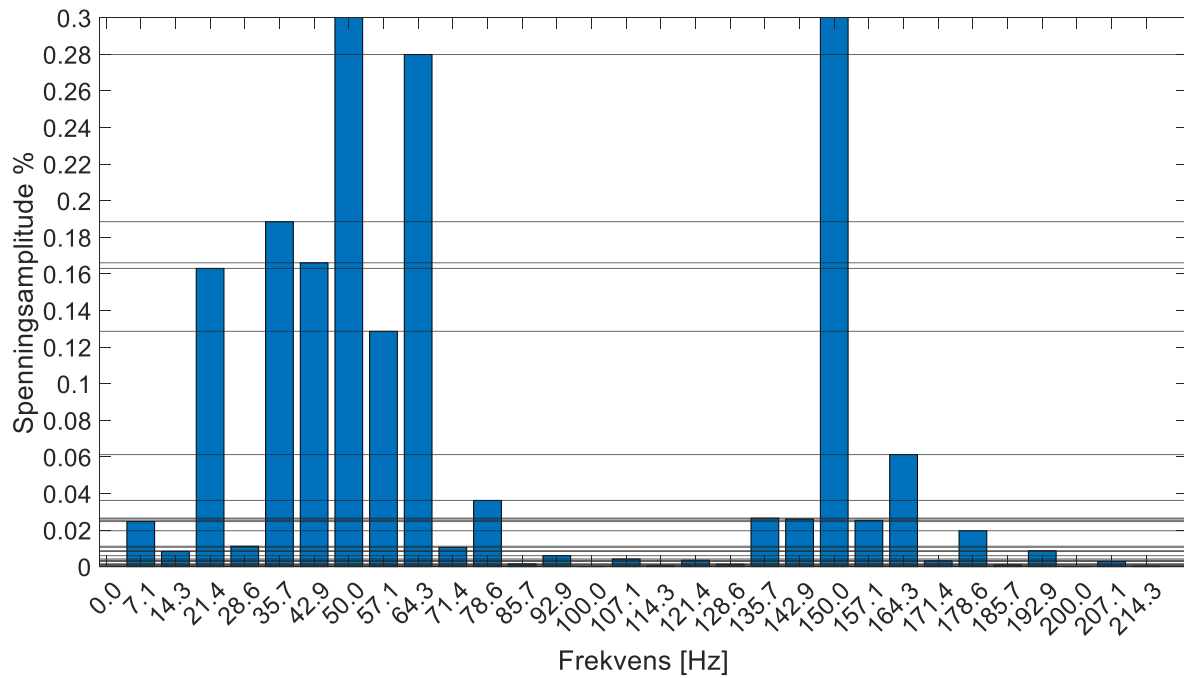
Figur 12.4:AM, SE 5%, KF 5, Brutus



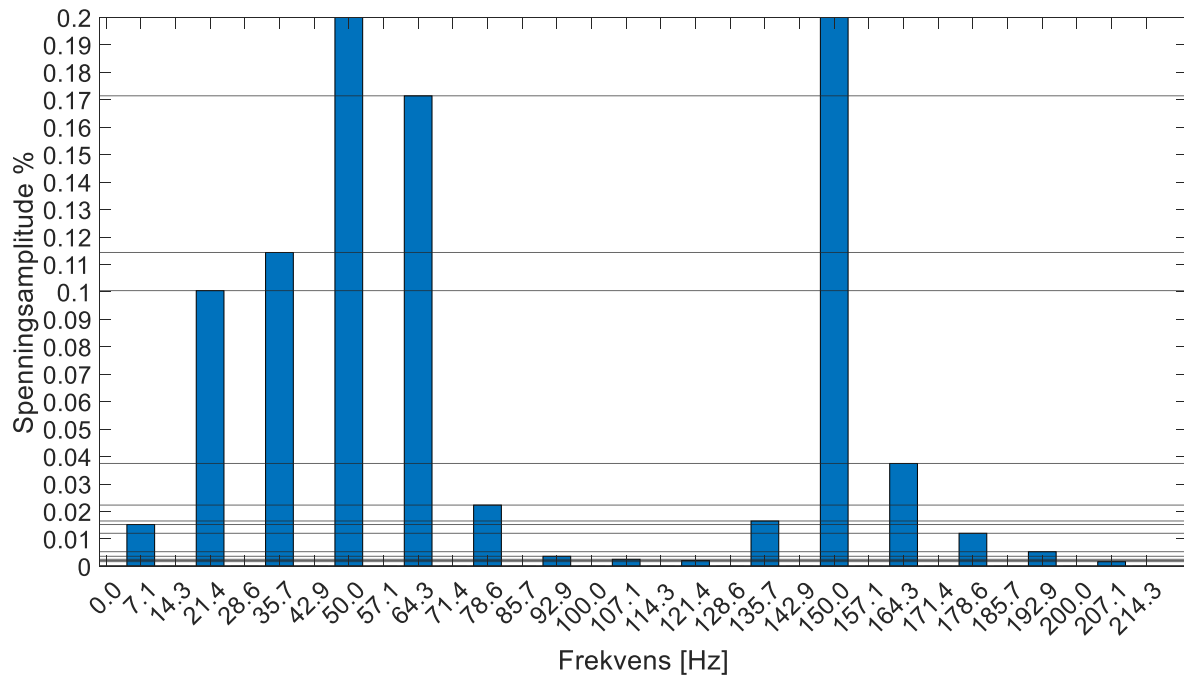
Figur 12.5: AM, SE 10%, KF 5, Brutus

SE danner harmoniske ved partalls multiplum av  $f_{mek}$ , særlig 42.9 Hz og 57.1 Hz var tydelige. Disse vil bli omtalt som SE-frekvenser/-harmoniske. De er proporsjonale med KF. KF-frekvensene påvirkes ikke av SE. SE-frekvensene er proporsjonale med graden av SE. Det er ikke likegyldig hvilken retning den SE er i fordi viklingen ikke er likt fordelt. Forskjellene var dog små.

### 12.1.2 Komplekse feil, Brutus

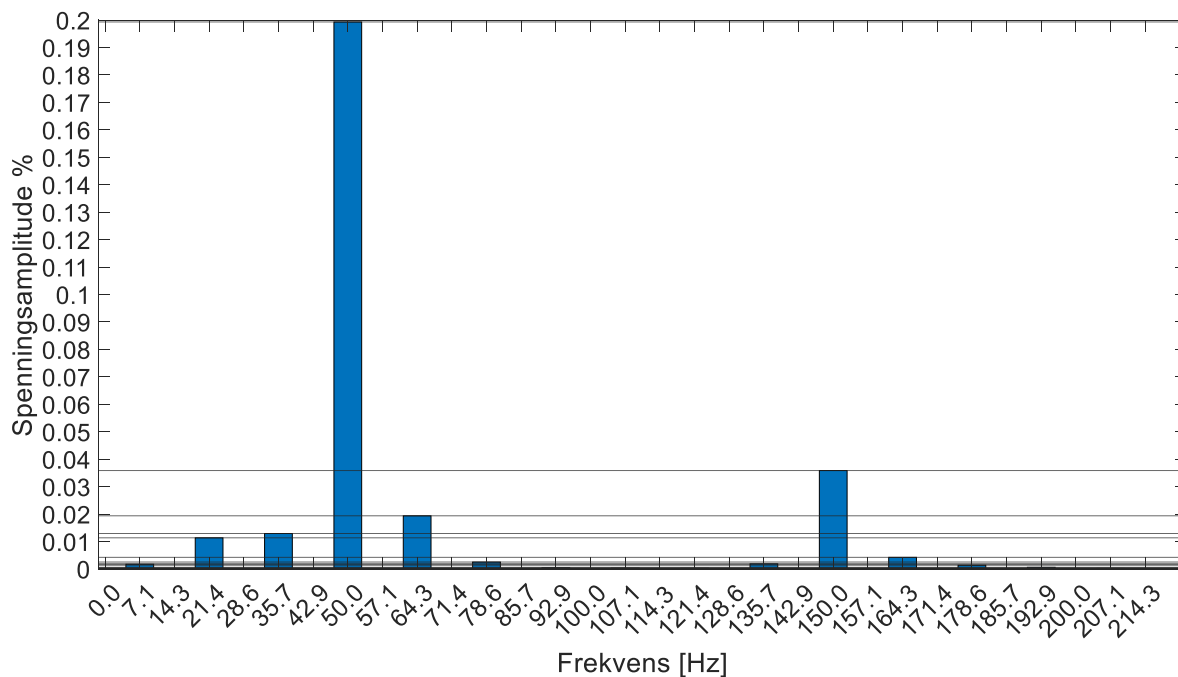


Figur 12.6:AM, SE10%, Pol1 KF 10, Pol2 KF10, Brutus



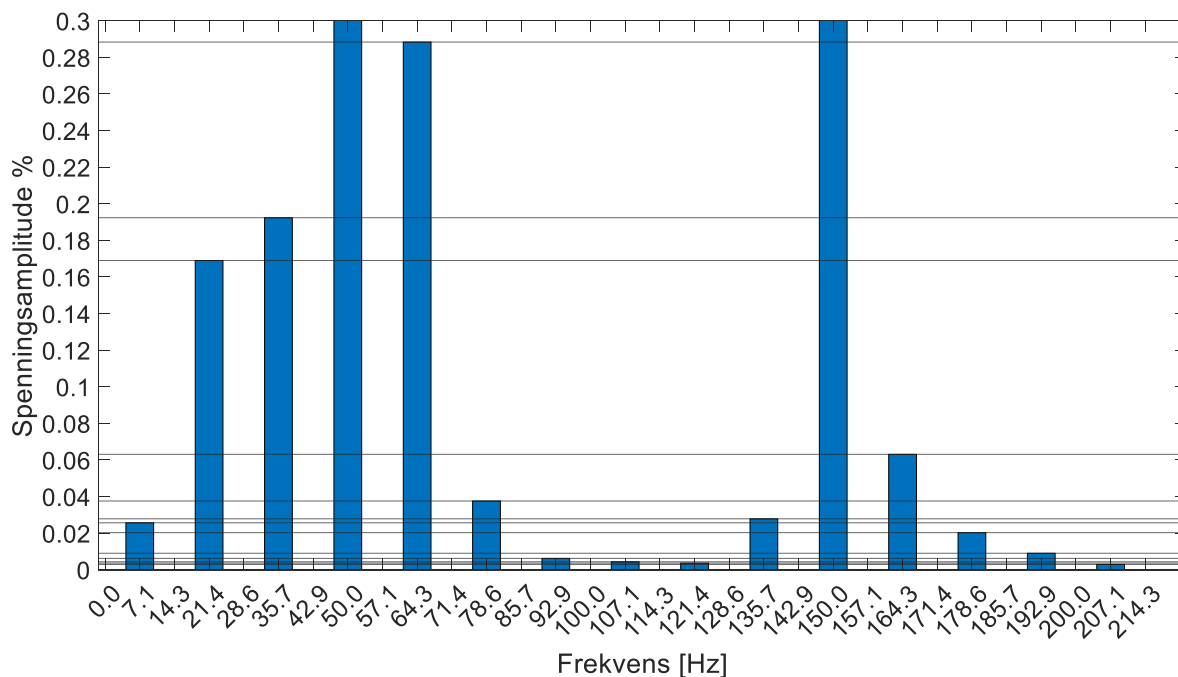
Figur 12.7: SE 0%, Pol1 KF10, Pol8 KF10

## 12-Hovedresultater, Brutus



Figur 12.8: AM SE 0%, Pol1 KF 10, Pol7 KF 10, Brutus

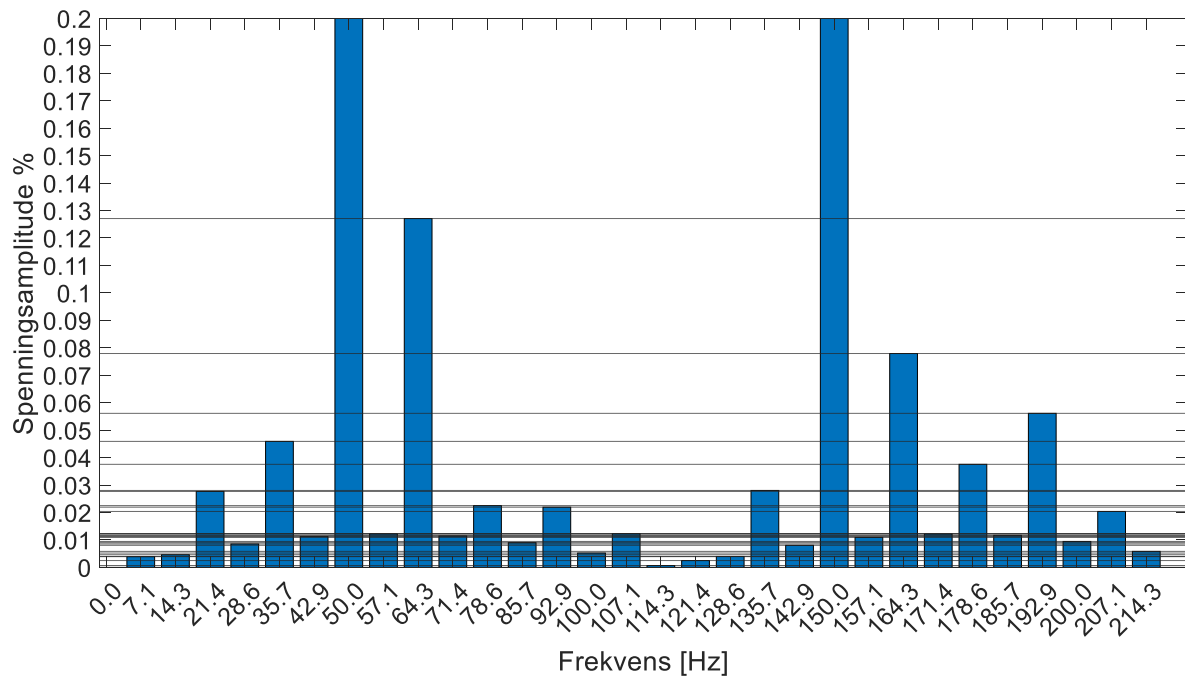
Ved kortslutning i pol 1 og pol 7 forsvinner nesten hele signaturen. Tilsvarende skjer for ikke for 9, selv om den polen er like langt unna pol 1 som pol 7. Tvert imot blir utslaget ved å kombinere pol 1 og 9 veldig stort. Ved å kombinere pol 1 og 10 blir det enda større.



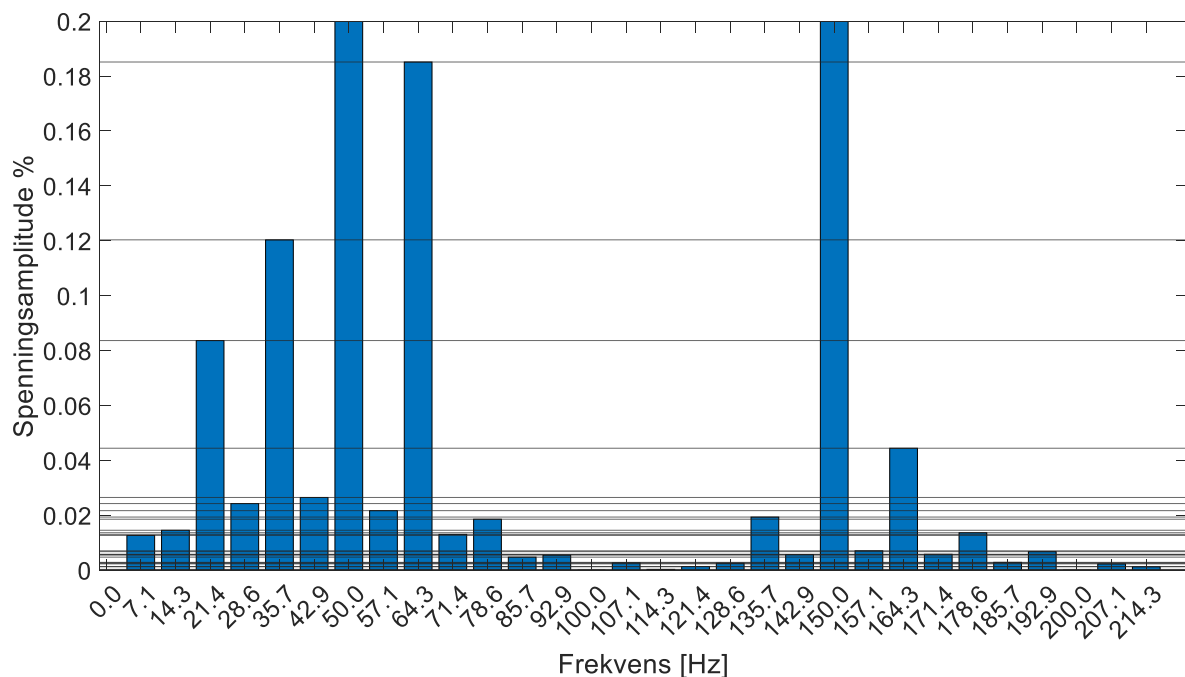
Figur 12.9: SE 0%, Pol 1 KF 10, Pol 9 KF 10

### 12.1.3 Vindingskortslutning i ankerviklingen, Brutus

De neste modellene kombineres rotorfeil med kortslutning i spolen i ankerviklingen som går fra øverst i spor 3 til nederst i spor 10. Antall vindinger ble redusert fra 2 til 1 i disse to stavene.

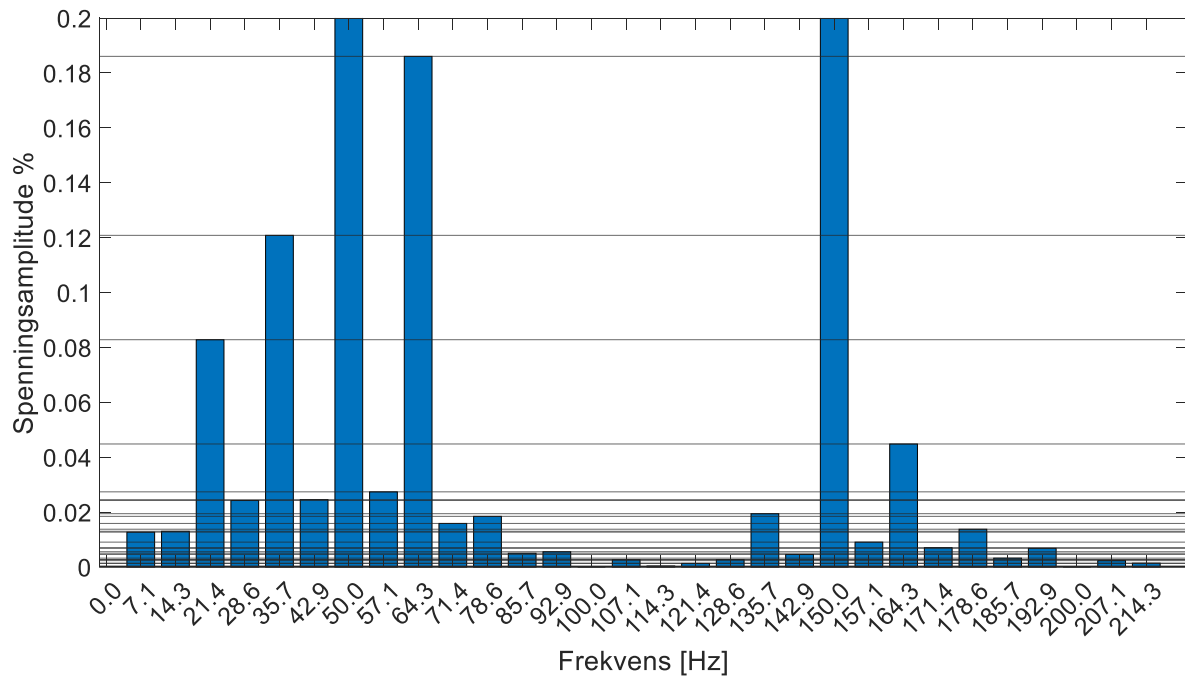


Figur 12.10: AM, DE 2.5%, Kortslutning i statorvikling nr 3 topp, og nr 10 bunn, Brutus

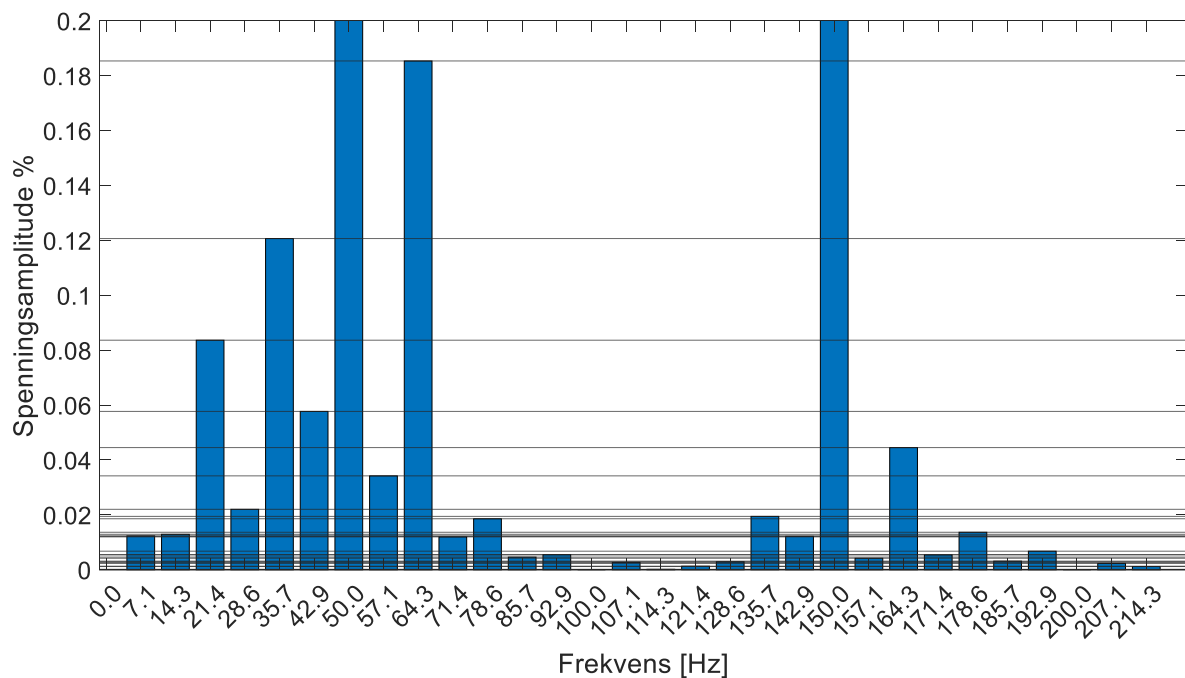


Figur 12.11: AM, KF 10, Kortslutning i statorvikling nr 3 topp, og nr 10 bunn, Brutus

## 12-Hovedresultater, Brutus



Figur 12.12: AM, SE 5%, KF 10, Kortslutning i statorvikling nr 3 topp, og nr 10 bunn, Brutus



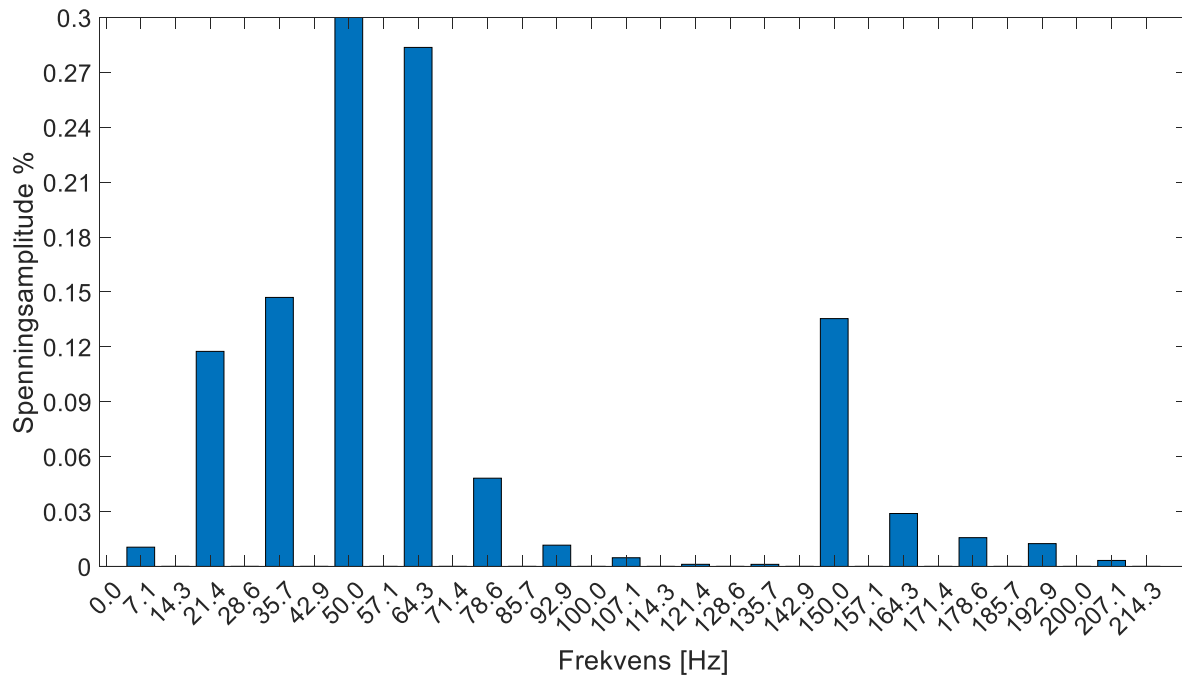
Figur 12.13: AM, SE 5% forskjøvet  $\frac{\pi}{2}$  (en kvart omdreining) i forhold til referansestav. KF 10, Kortslutning i statorvikling nr 3 topp, og nr 10 bunn, Brutus

Kortslutning i én statorspole gir utslag over et bred frekvensspekter. Det ble kommentert i delkapittel 13.1 at forskjellen på retningen på den statiske eksentrisiteten var av liten betydning, men i tilfellet med kortslutning i statorviklingen gir det betydelig utslag å flytte retningen til SE.

## 12.2 Resultater FEM: ANSYS Maxwell av Brutus

### 12.2.1 FEM-modell av AM, Kortslutning i feltvikling

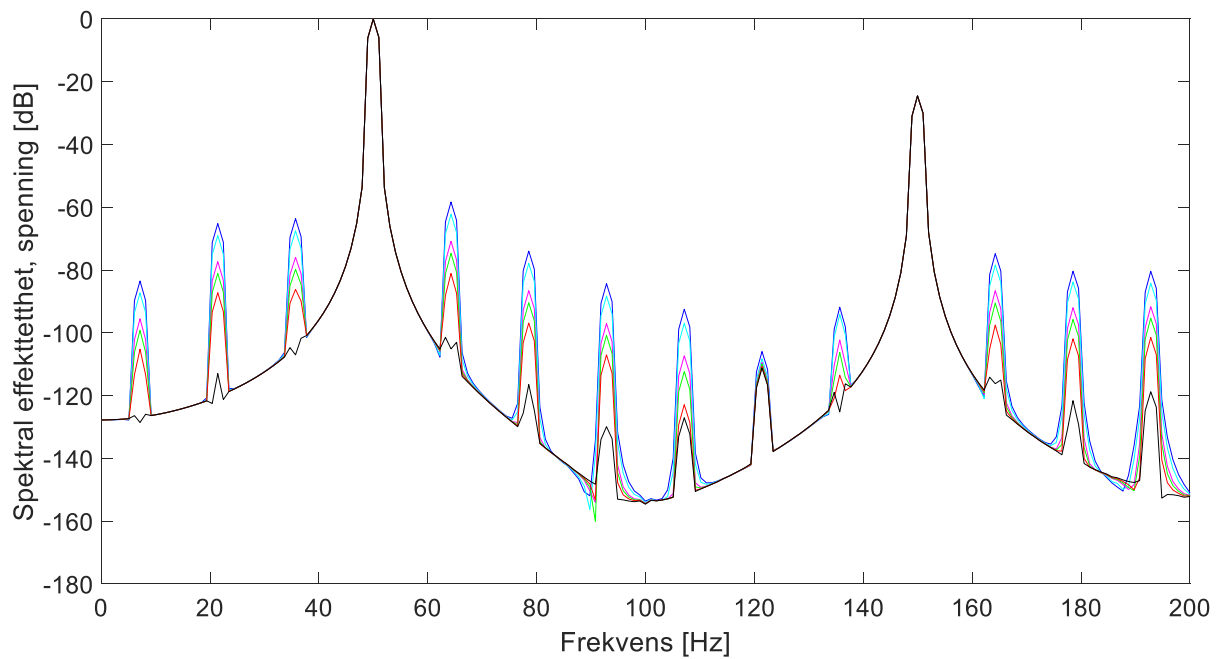
Det ble laget en FEM-modell av den analytiske modellen til kortslutning i feltvikling. Amplituden til 35.7 Hz er omtrent  $\frac{1}{2}$  av amplituden til 64.3 Hz, se figur 14.2.



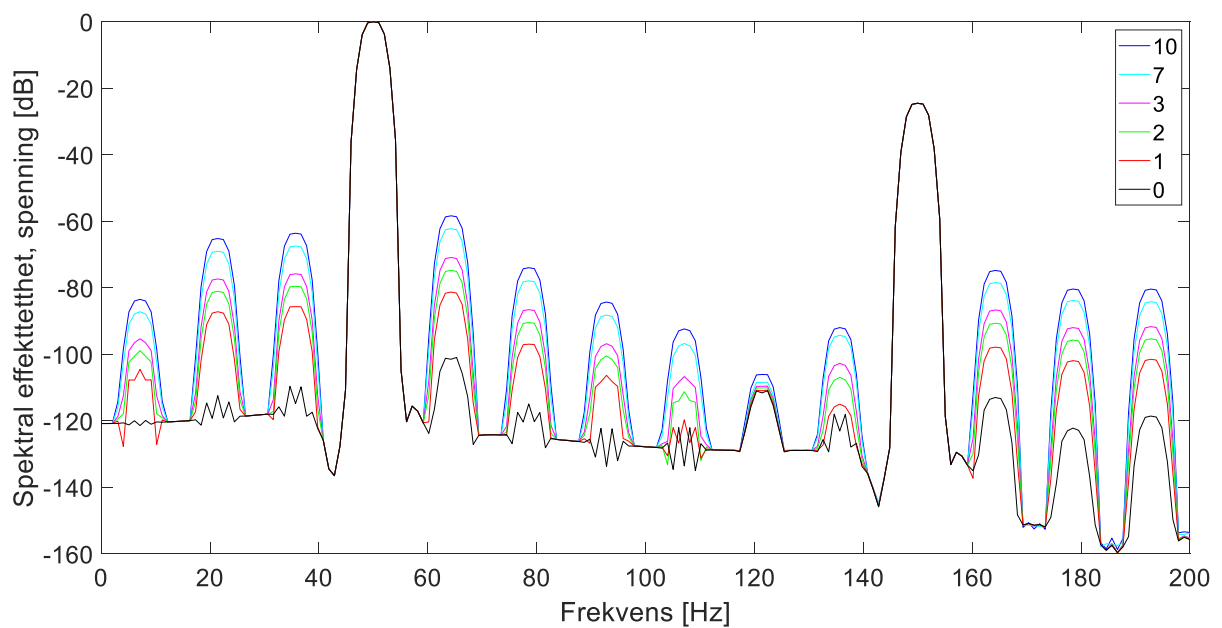
Figur 12.14: Simulering av Analytiske modellen i ANSYS Maxwell, KF 10



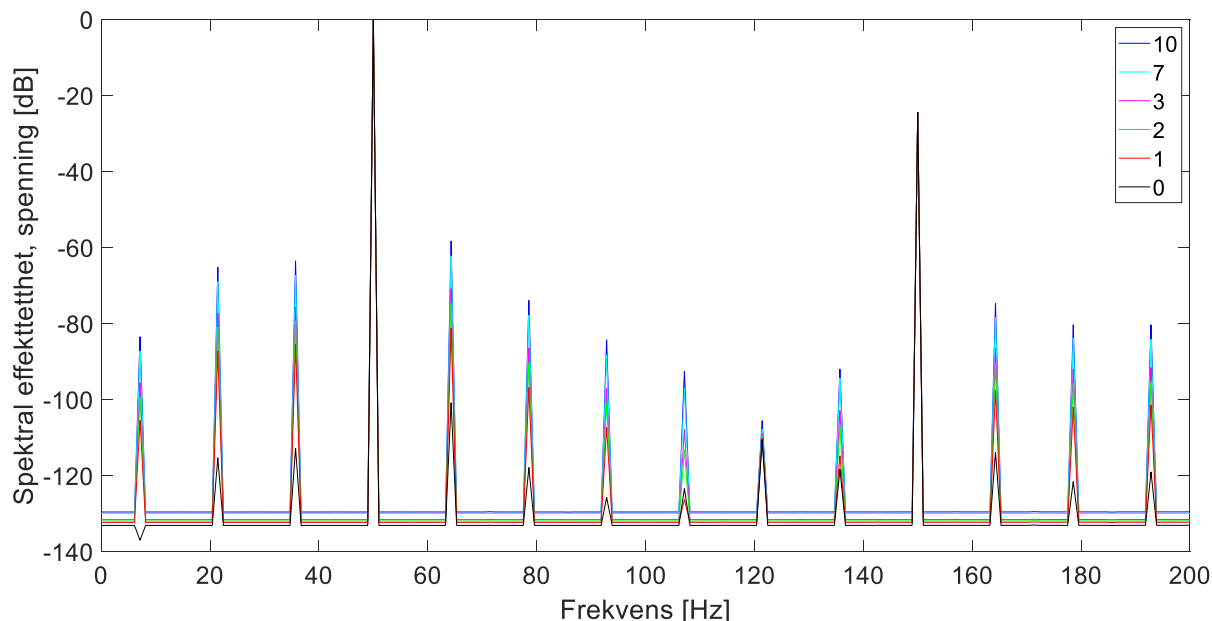
### 12.2.2 FEM, Kortslutning i feltviklingen



Figur 12.15: Tomgang med Hann-vindu med trunkering, ANSYS Maxwell, program 1



Figur 12.16: Tomgang med flat-top-vindu uten trunkering, ANSYS Maxwell, program 1

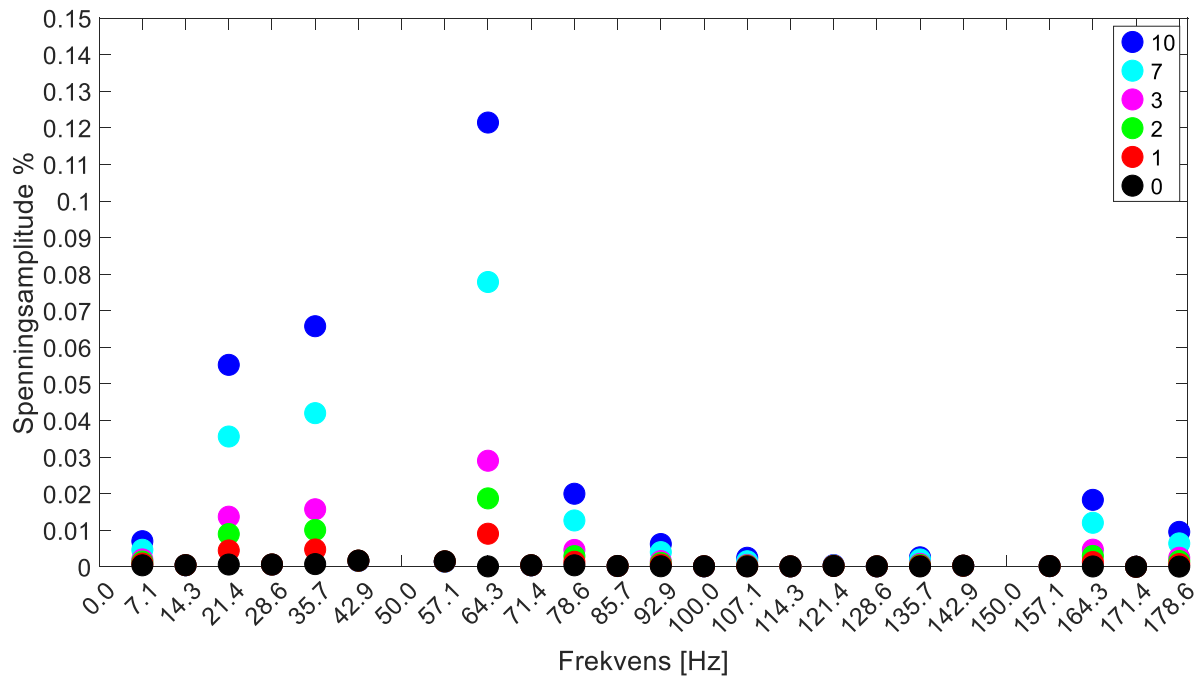


Figur 12.17: Tomgang rektangulært vindu med omtasting og trunkering, ANSYS Maxwell, program 2b

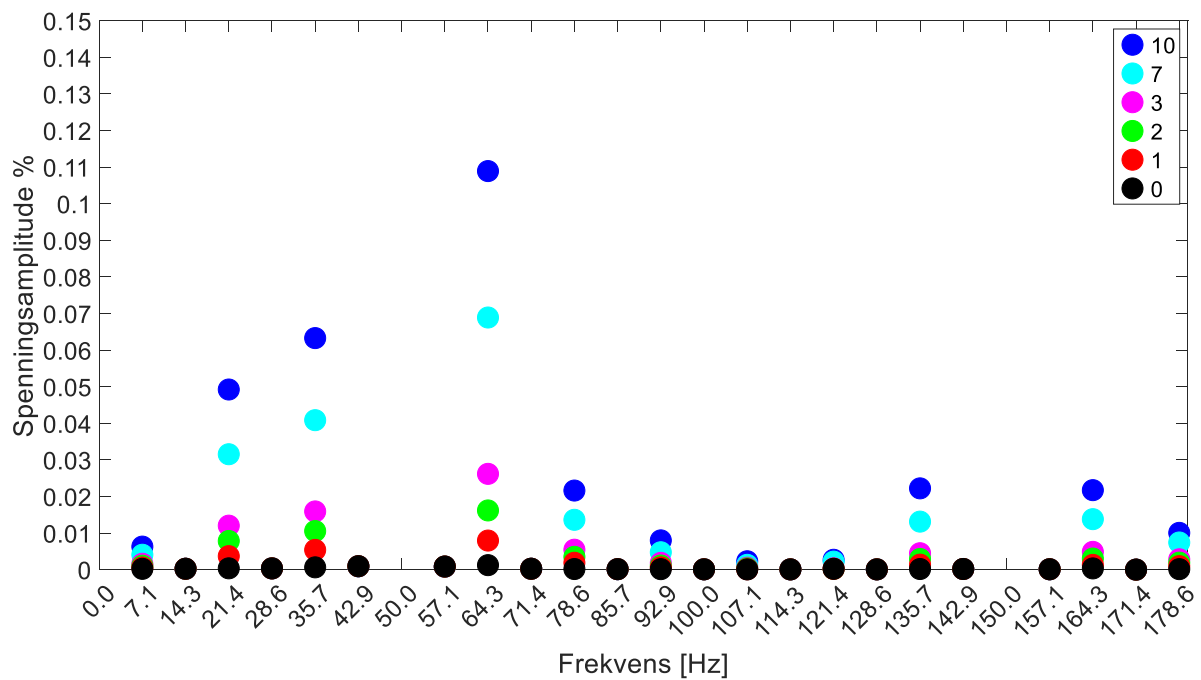
Figurene 14.3, 14.4 og 14.5 illustrerer meget godt forskjellen på vindusfunksjonene. Hann-vinduet har bra frekvenspresisjon med en smal hovedlobe, mens flat-top har en bred hovedlobe med godt dempede sidelover. Det er viktig å presisere at ingen av vinduene er mer korrekt enn de andre, de er bare forskjellige fremstillinger av virkeligheten. Selv og Hann og flat-top rent visuelt fremstår som veldig forskjellige, så var amplitudene på feilfrekvensene (på «toppene») veldig like. Flat-top har den fordelen at man ikke trenger å treffe frekvensen nøyaktig siden den har en bred hovedlobe, men dette forutsetter at frekvensoppløsningen er god nok, altså at signalet er tilstrekkelig langt, slik at frekvensene ikke flyter sammen. Da kan nærliggende frekvenser havne i samme hovedlobe. Det er derfor viktig å ha en formening om hvilke frekvenser som kan dukke opp, hvilke av dem er relevante, og nødvendig frekvens og amplitudepresisjon.

Det rektangulære vinduet ga en fenomenal presisjon og avslørte også at signalet som ble analysert var syntetisk. Det var ikke overaskende at det var lite støy, -145 dB, i den numeriske modellen. Amplituden til feilfrekvensene var dog tilnærmet like i alle vinduene til tross for deres vidt forskjellige grafiske uttrykk. Hvilket vindu som benyttes på et syntetisk signal fremstod derfor som likegyldig. Det var ikke tilfellet med ekte signaler fra den virkelige verden, som de neste kapitlene viser.

## 12-Hovedresultater, Brutus

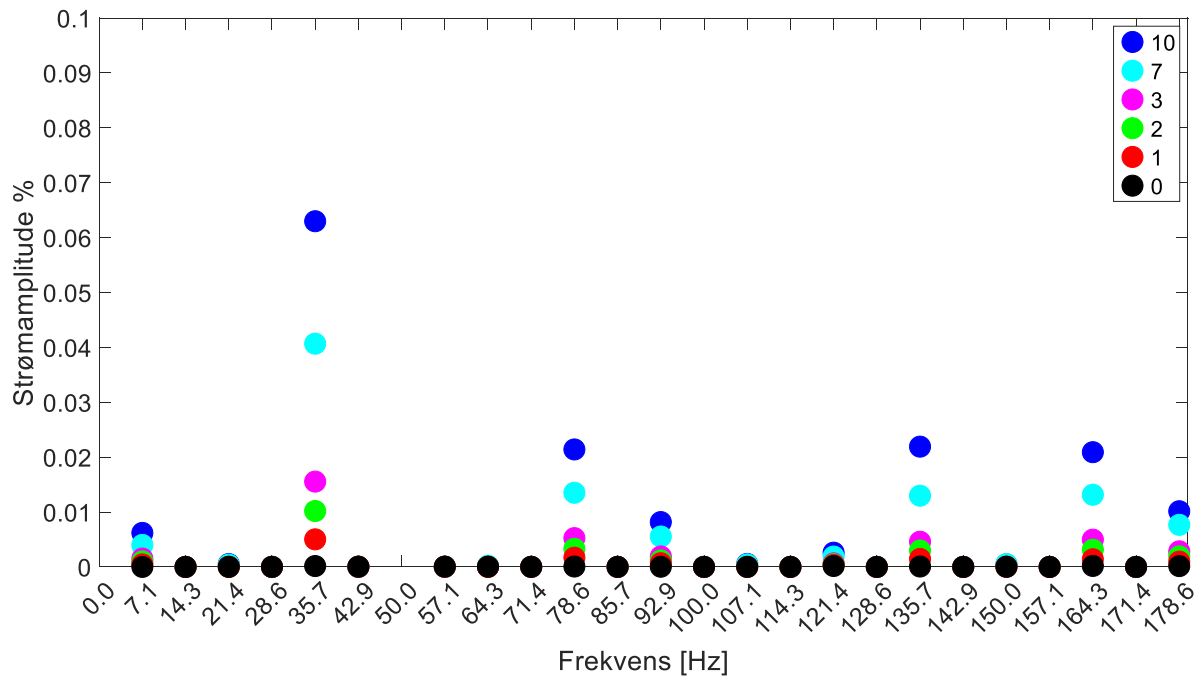


Figur 12.18: Spenning, Tomgang, Brutus, KF, ANSYS Maxwell, Rektangulært vindu, program 2b

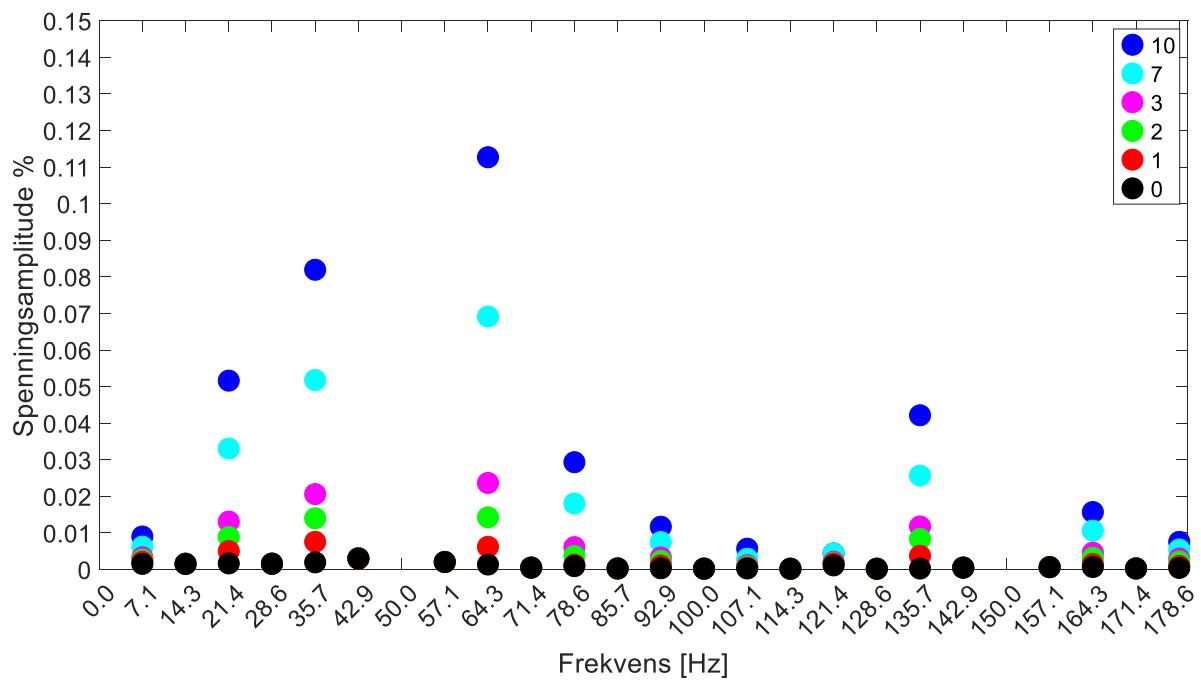


Figur 12.19: Spenning, R-last, Brutus, KF, ANSYS Maxwell, Rektangulært vindu, program 2b

## 12-Hovedresultater, Brutus

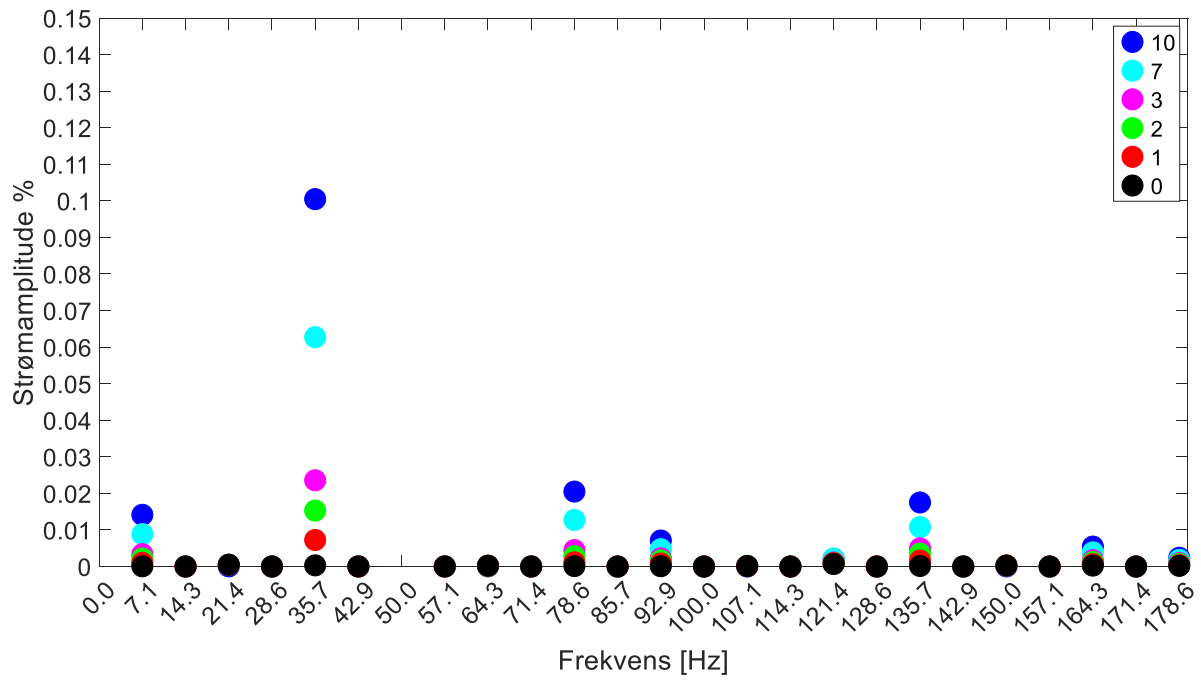


Figur 12.20: Strøm, R-last, Brutus, KF, ANSYS Maxwell, Rektangulært vindu, program 2b

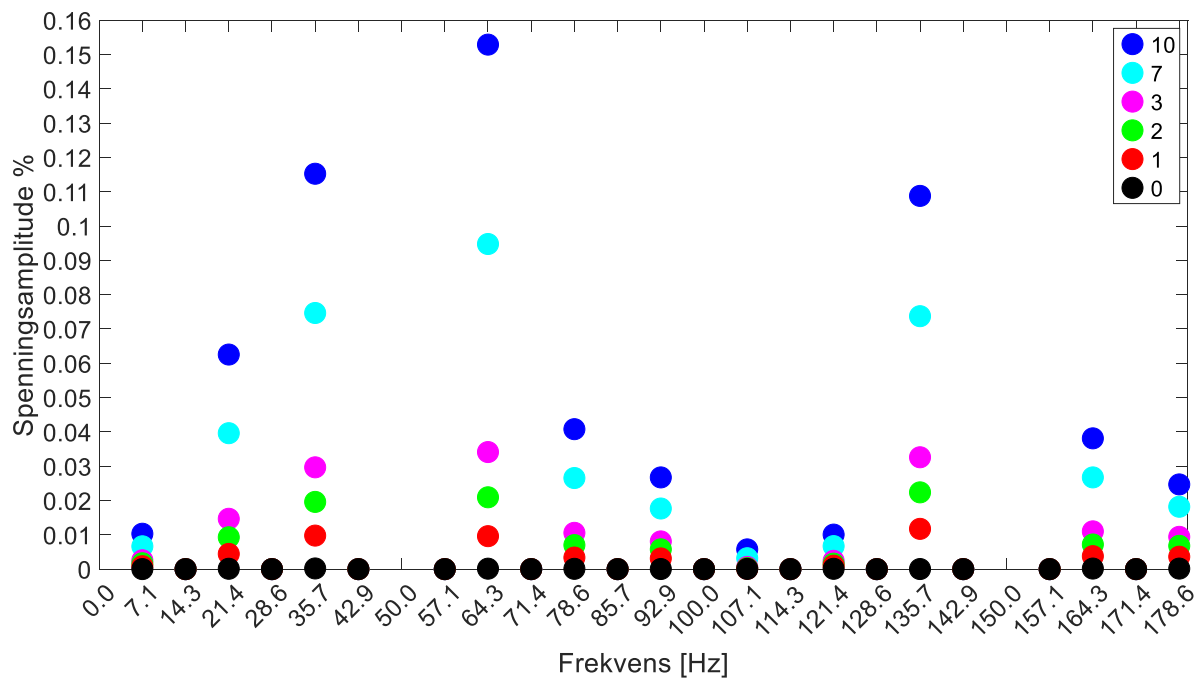


Figur 12.21: Spenning, RL-last, Brutus, KF, ANSYS Maxwell, Rektangulært vindu, program 2b

## 12-Hovedresultater, Brutus

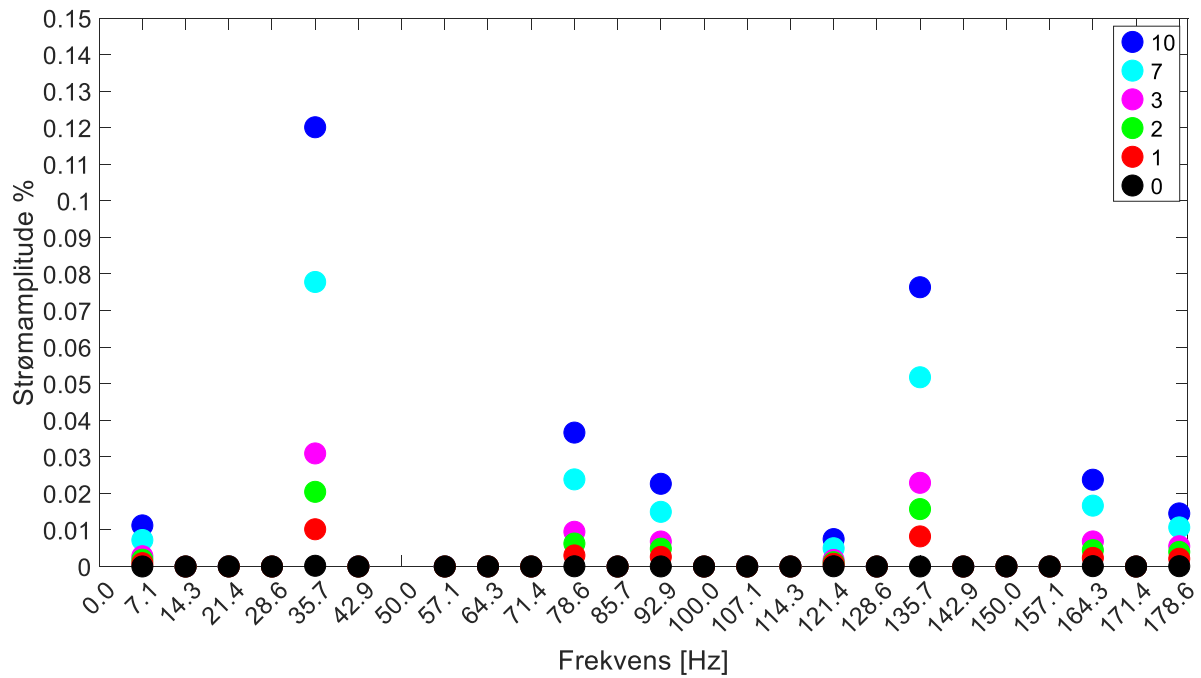


Figur 12.22: Strøm, RL-last, Brutus, KF, ANSYS Maxwell, Rektangulært vindu, program 2b



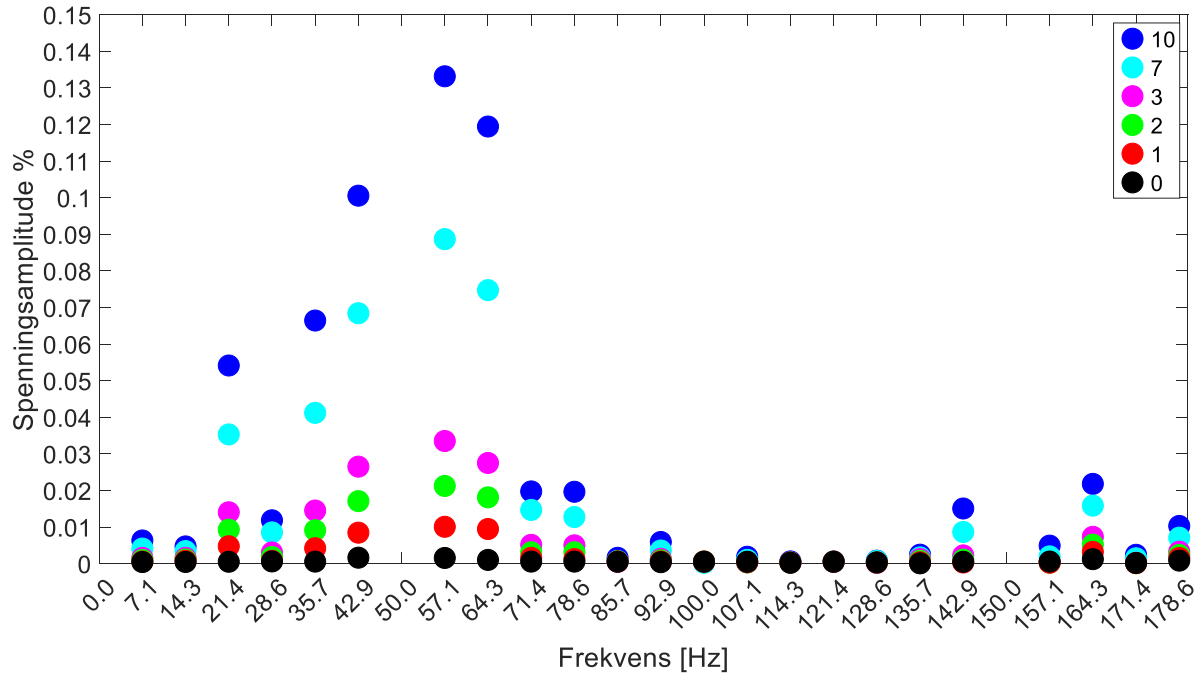
Figur 12.23: Spenning, FL-last, Brutus, KF, ANSYS Maxwell, Rektangulært vindu, program 2b

## 12-Hovedresultater, Brutus



Figur 12.24: Strøm, FL-last, Brutus, KF, ANSYS Maxwell, Rektangulært vindu, program 2b

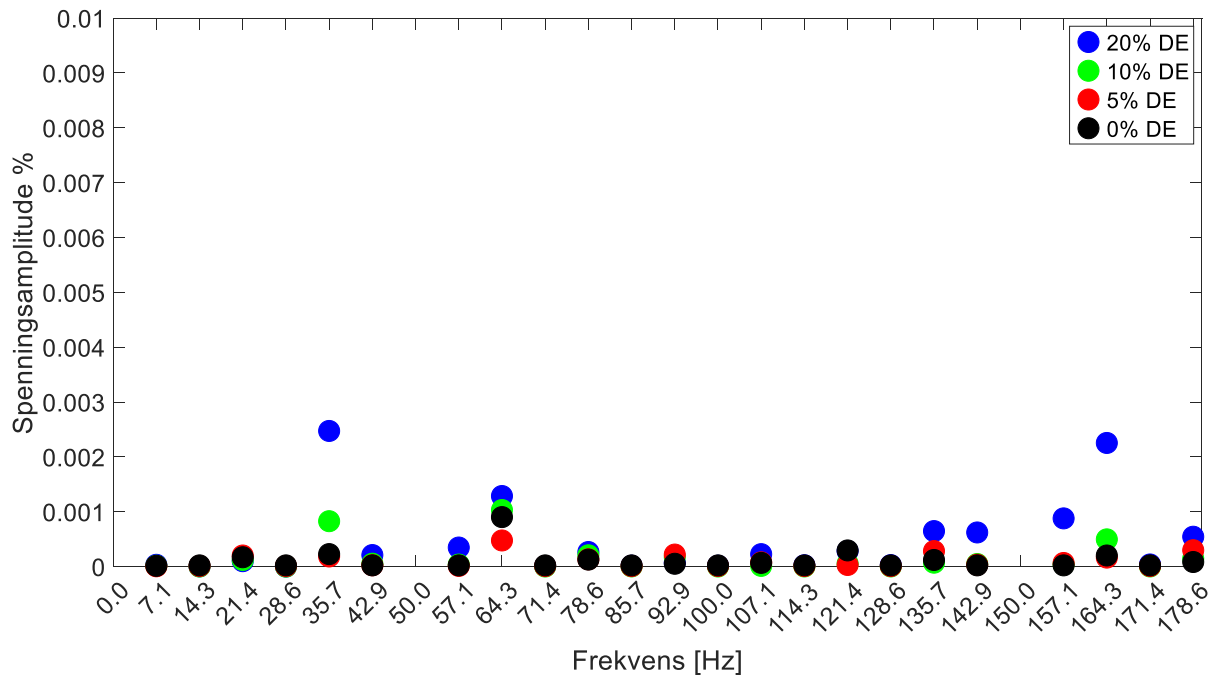
### 12.2.3 FEM Statisk eksentrisitet og kortslutning



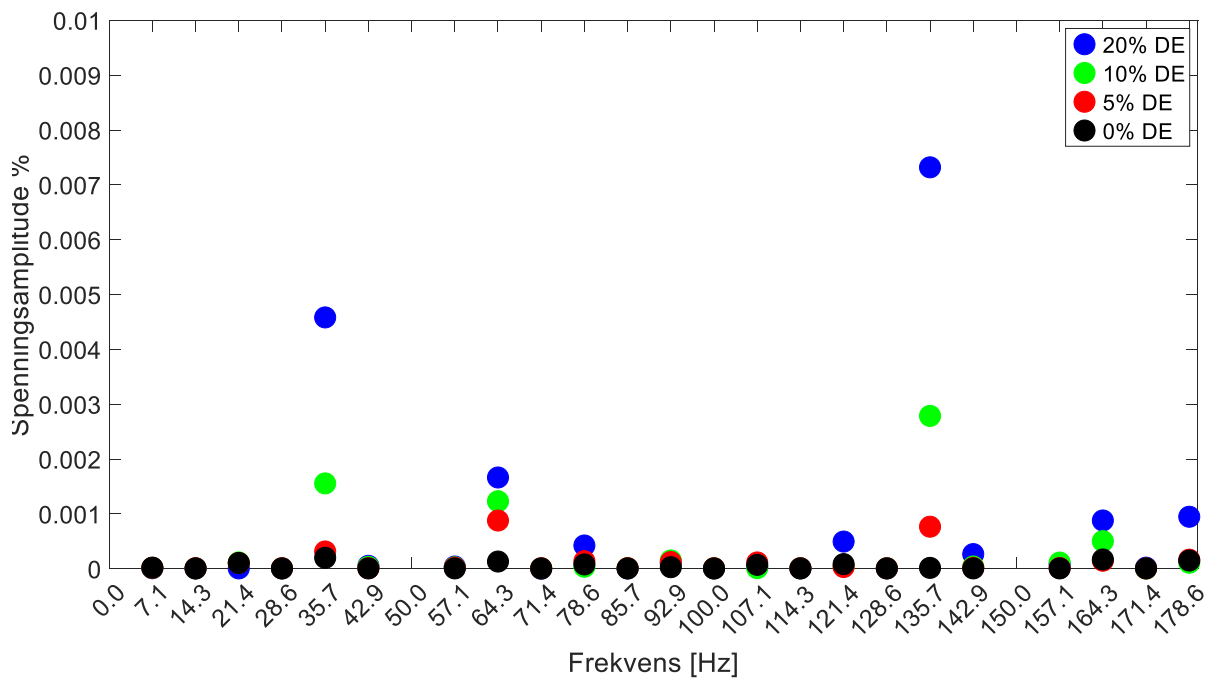
Figur 12.25: Spenning, R-last, Brutus, SE 5mm/28.6%, KF, ANSYS Maxwell, Rektangulært vindu, program 2b

### 12.2.4 FEM Dynamisk eksentrisitet

Legg merke til at y-aksen går til 0.01% og ikke 0.1% som ved KF og SE.

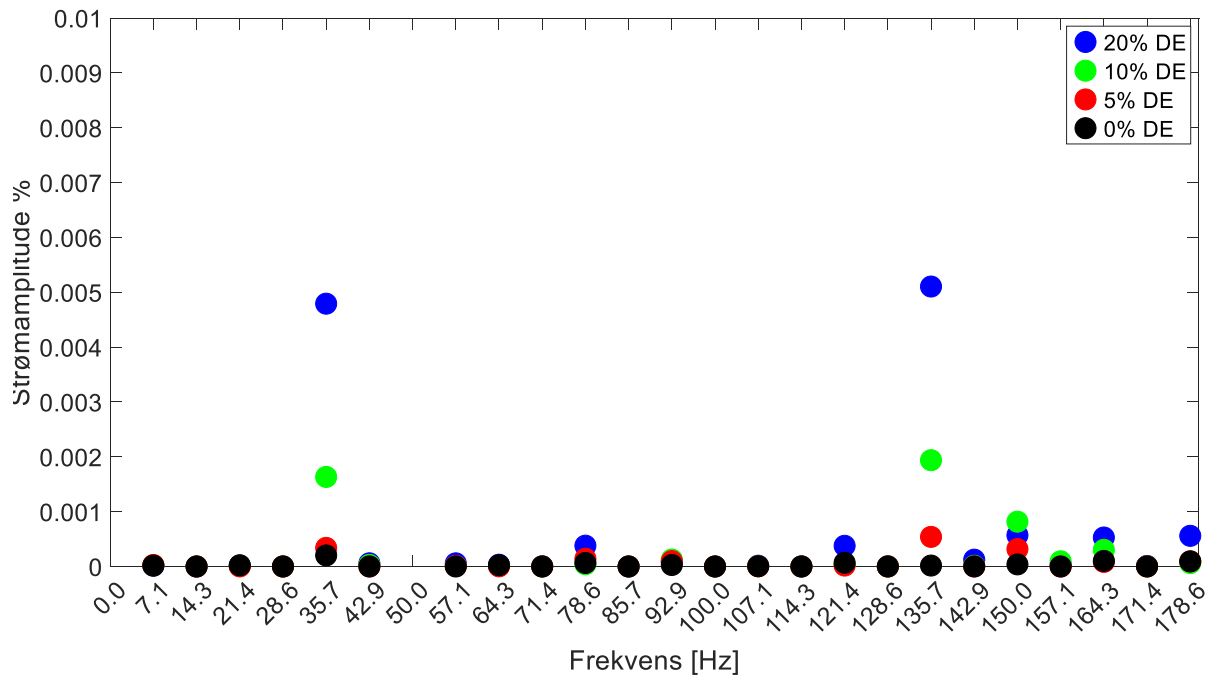


Figur 12.26: Spenning, DE tomgang, Brutus, ANSYS Maxwell, Rektangulært vindu, program 2b



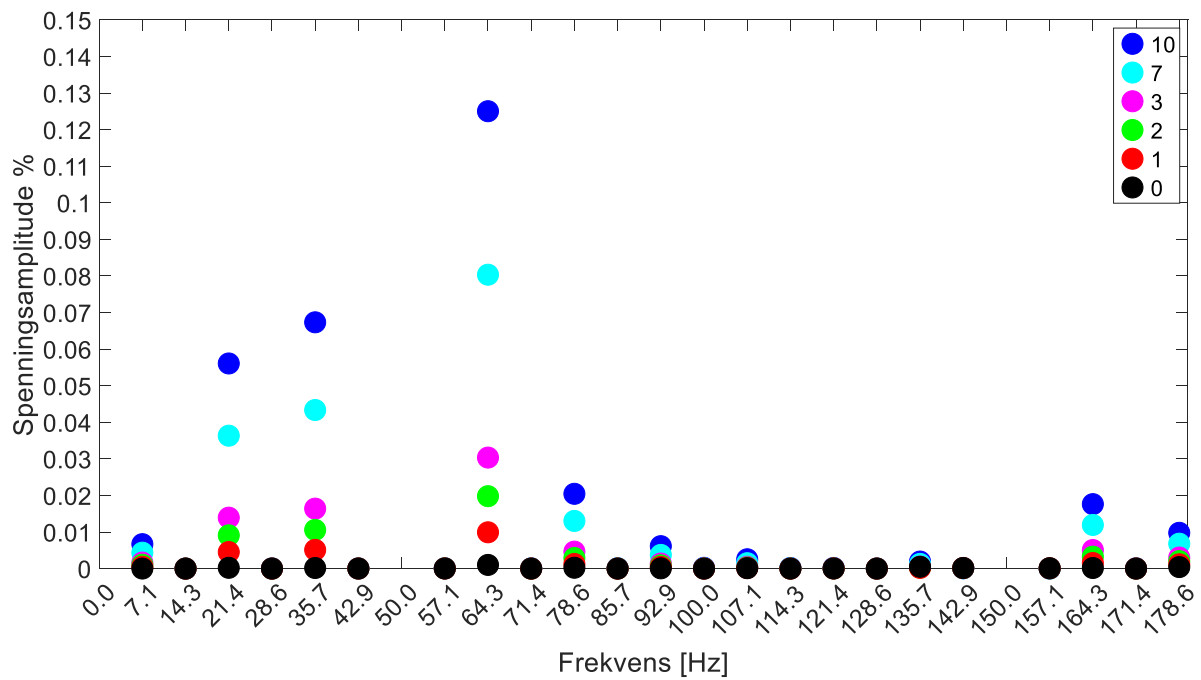
Figur 12.27: Spenning, DE FL, Brutus, ANSYS Maxwell, Rektangulært vindu, program 2b

## 12-Hovedresultater, Brutus



Figur 12.28: Strøm, DE FL, Brutus, ANSYS Maxwell, Rektangulært vindu, program 2b

### 12.2.5 FEM DE og KF

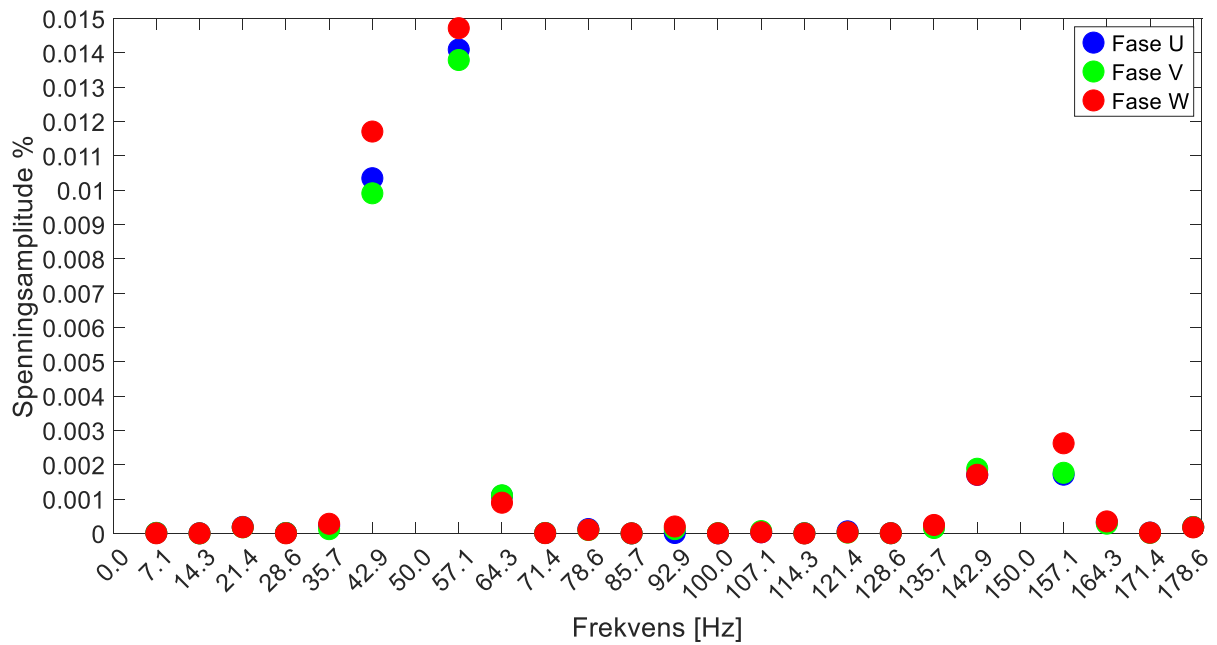


Figur 12.29: Spenning, Tomgang, KF, DE 10% , Brutus, ANSYS Maxwell, Rektangulært vindu, program 2b



## 12.2.6 SE og DE

Legg merke til at y-aksen går til 0.015% i figur 12.30. Fasene opplevde den statiske eksentrisiteten forskjellig.

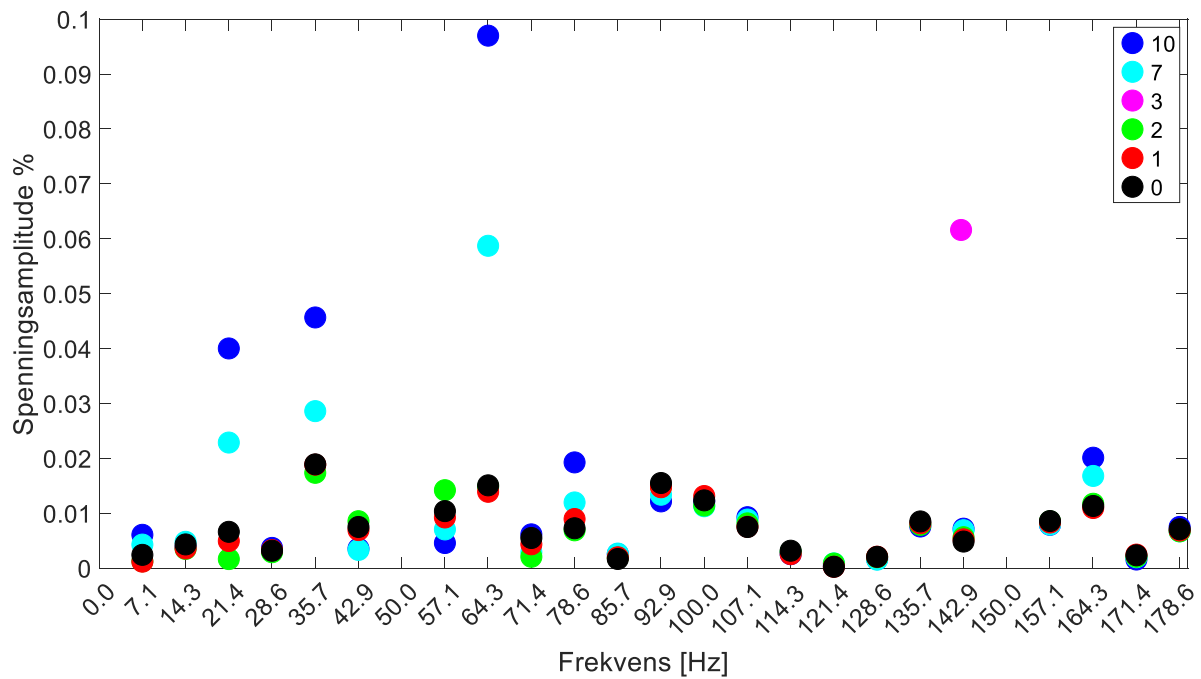


Figur 12.30: Spenning, SE 5%, DE 5%, tomgang, Brutus, ANSYS Maxwell, Rektangulært vindu, program 2b

## 12.3 Resultater Brutus T1, R og RL

## Program 2b

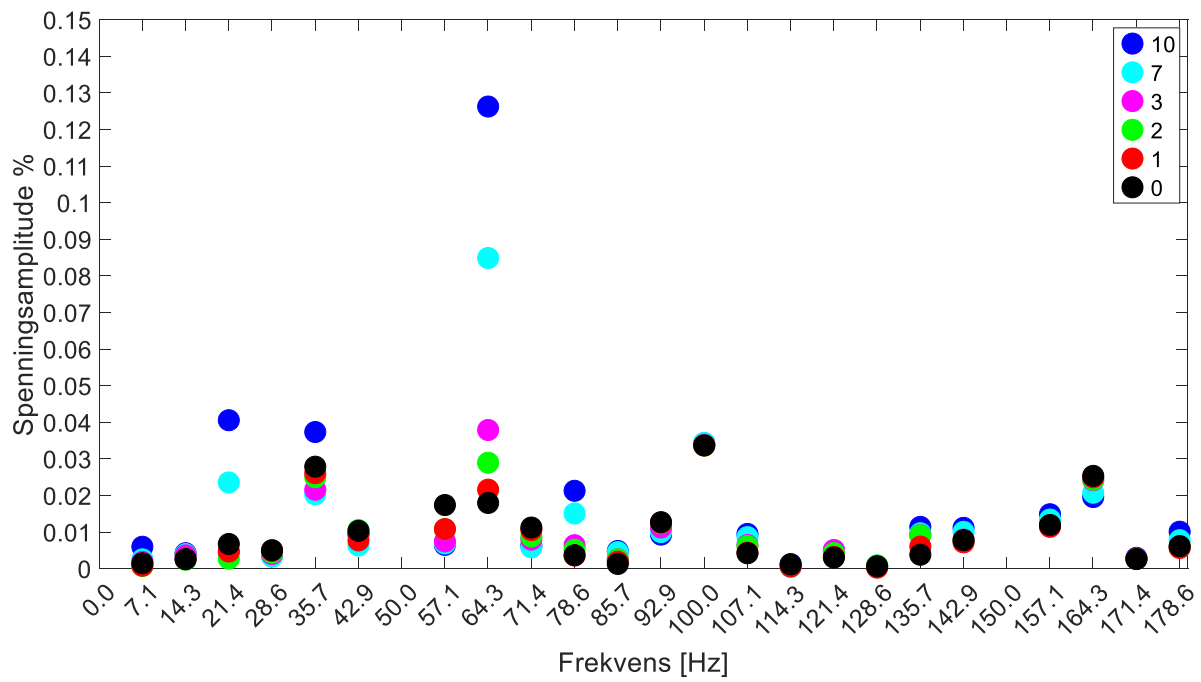
### 12.3.1 Tomgang 1



Figur 12.31: Spenning, T1, Brutus, KF, Rektangulært vindu, program 2b

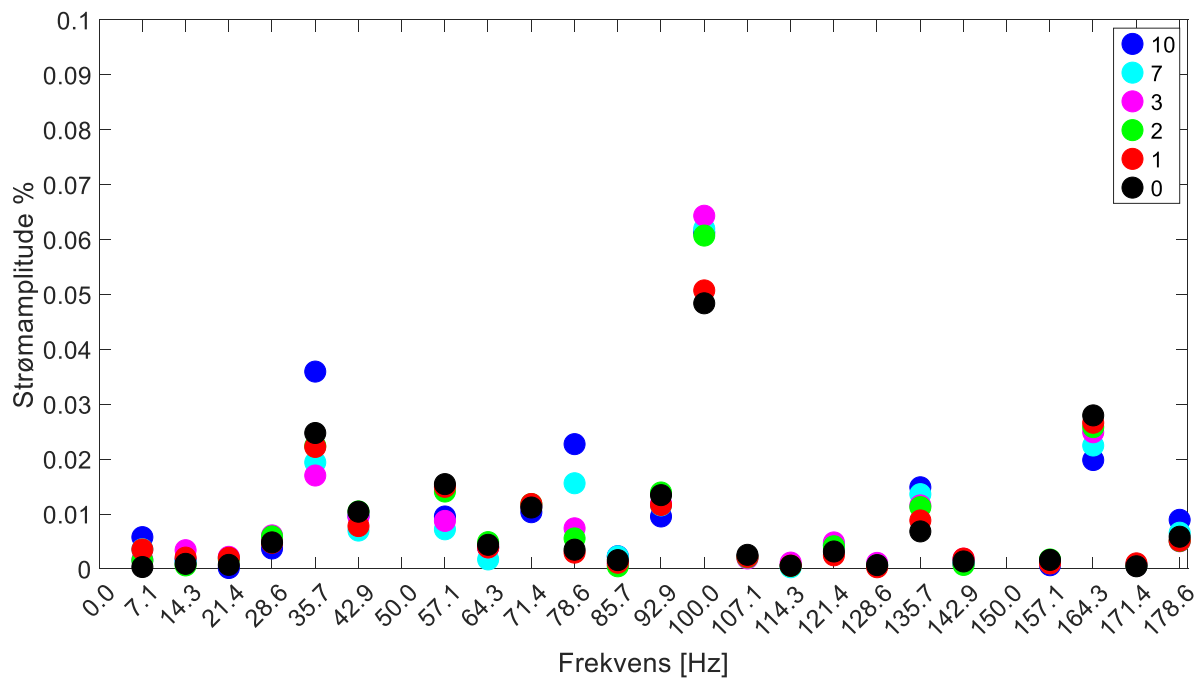
Legg merke til at resultatene for 3 kortslutninger ikke synes, bortsett fra én ved 142.9 Hz. Små forstyrrelser i signalet kunne skape diskontinuiteter, slik at analysen ikke fungerer som den skal. De andre programmene hadde ikke samme problemet med denne prøven.

### 12.3.2 R-last



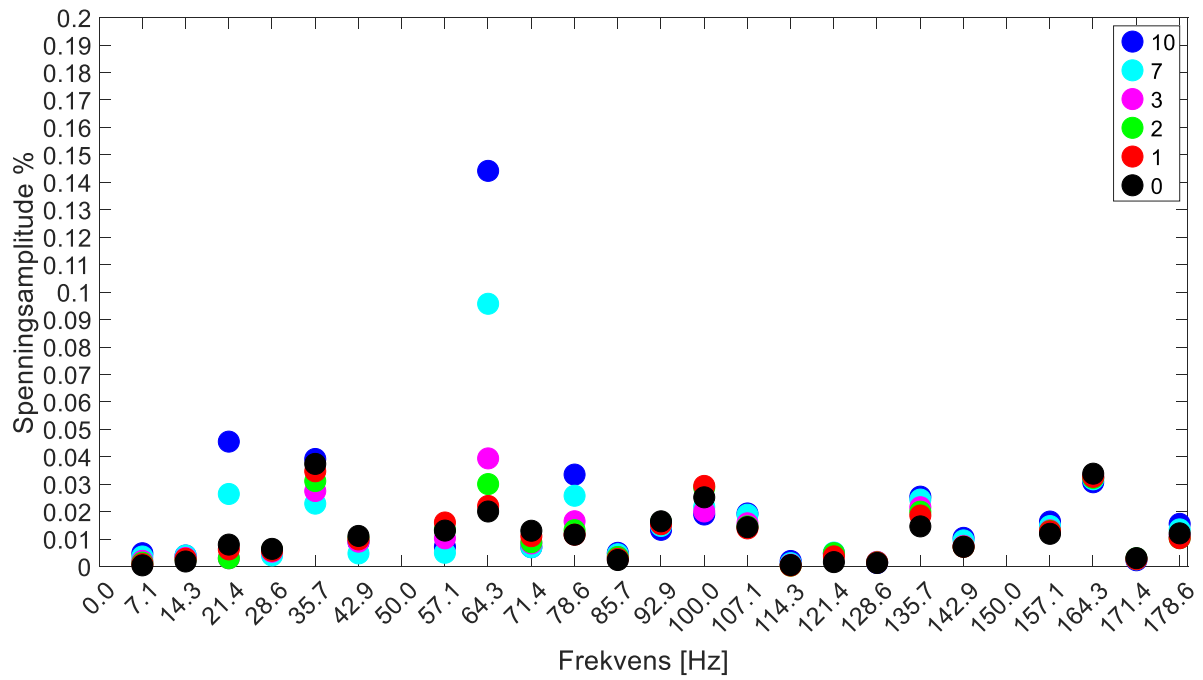
Figur 12.32: Spenning, R-last, Brutus, KF, Rektangulært vindu, program 2b

Legg merke til 35.7 Hz som har et annet mønster enn i T1.

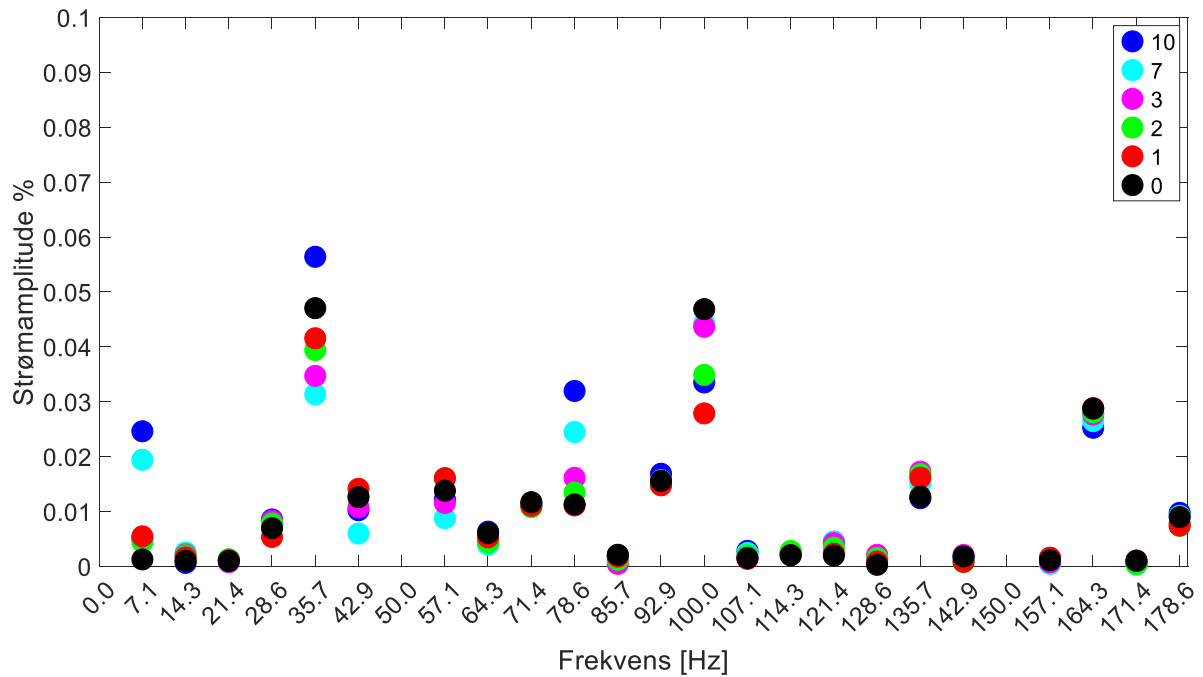


Figur 12.33: Strøm, R-last, Brutus, KF, Rektangulært vindu, program 2b.

### 12.3.3 RL-last



Figur 12.34: Spenning, RL-last, Brutus, KF, Rektangulært vindu, program 2b.

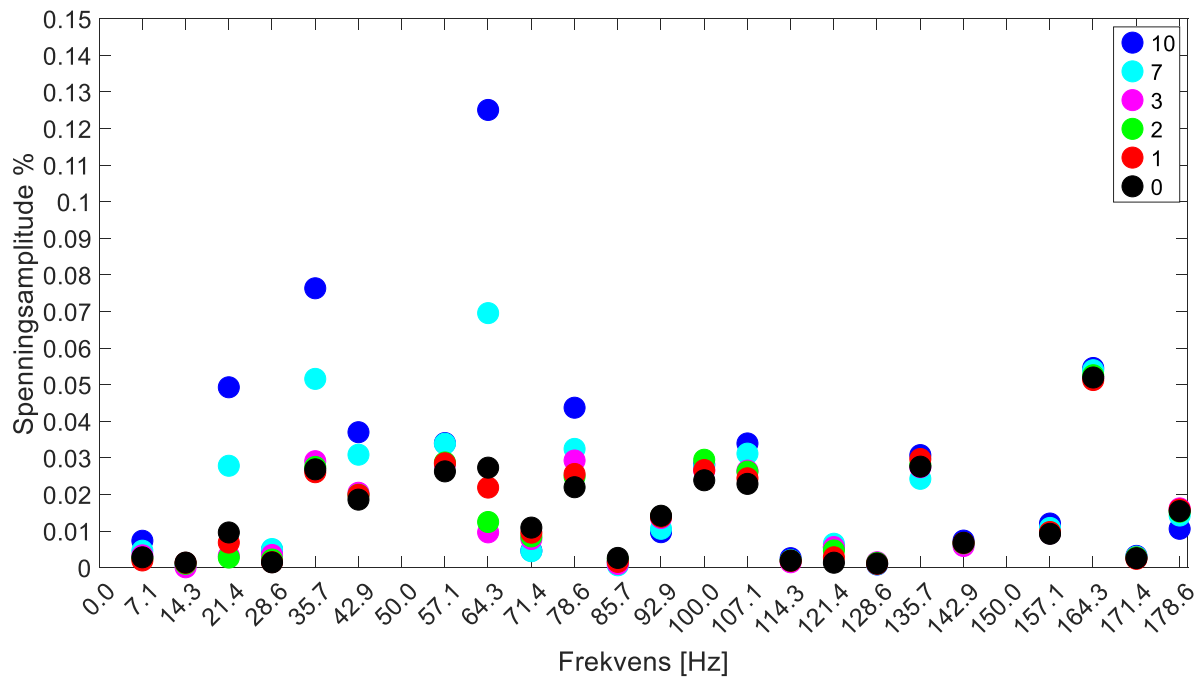


Figur 12.35: Strøm, RL-last, Brutus, KF, Rektangulært vindu, program 2b.

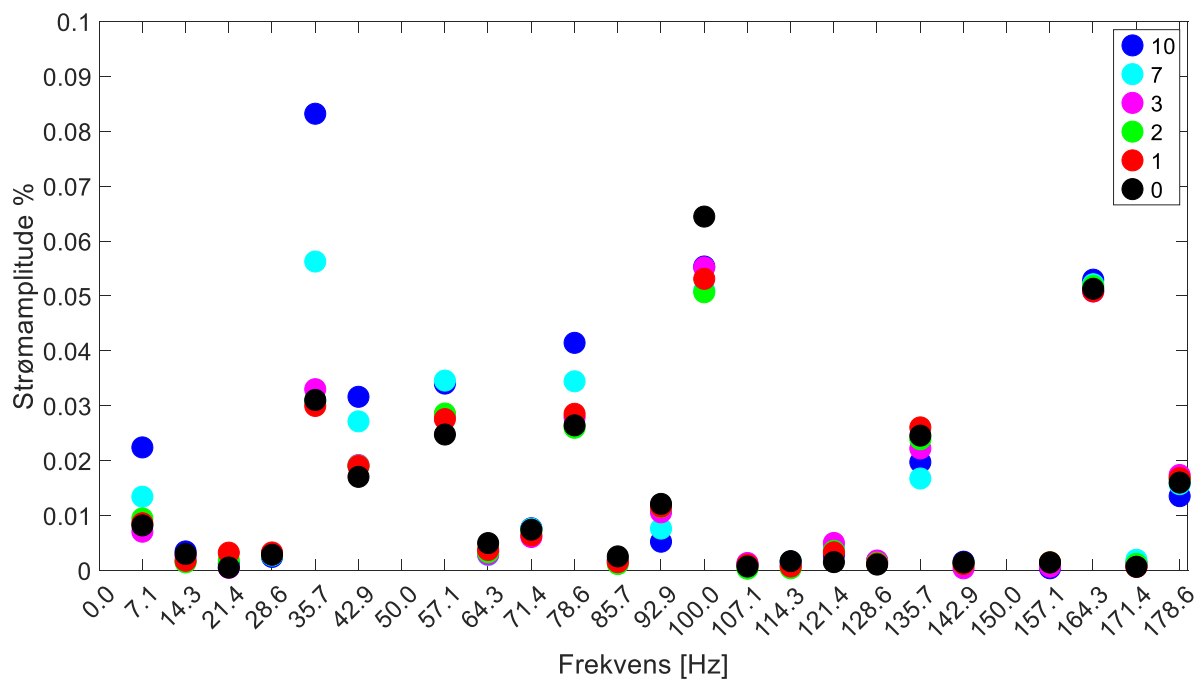
## 12.4 Resultat Brutus FL1, T2, FL2, T3 og FL3 Program 2b

Alle prøvene bortsett fra FL1 er gjort med 16-bit

### 12.4.1 FL1

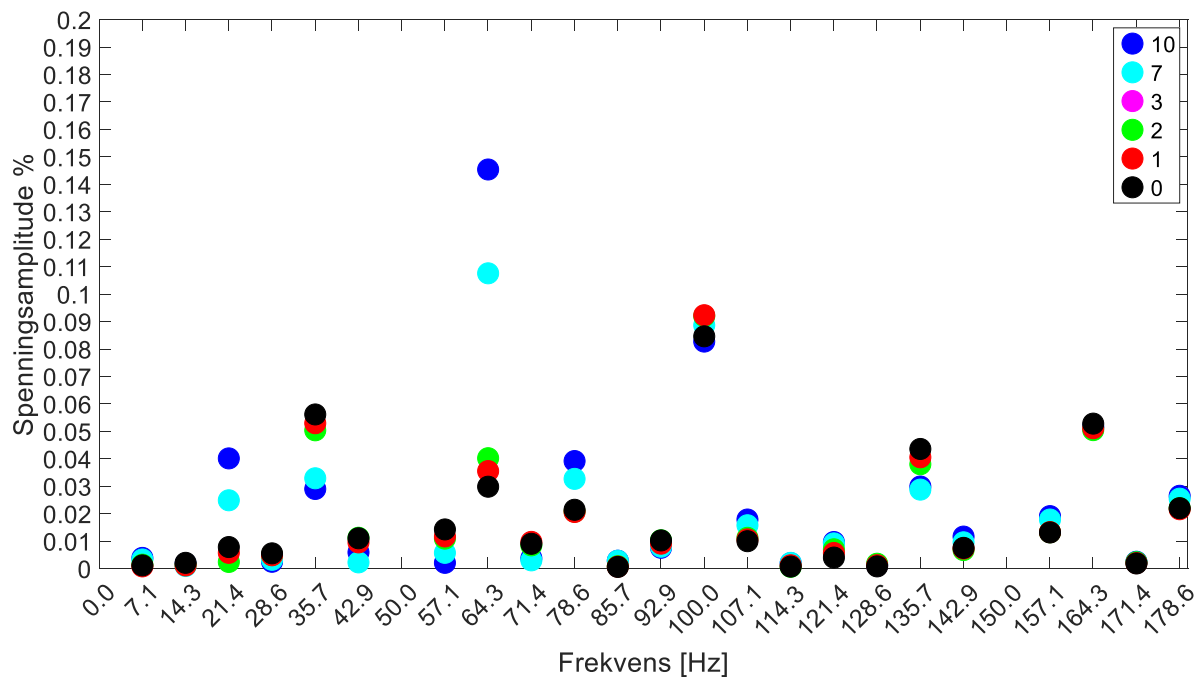


Figur 12.36: Spenning, FL1, Brutus, KF, Rektangulært vindu, program 2b.

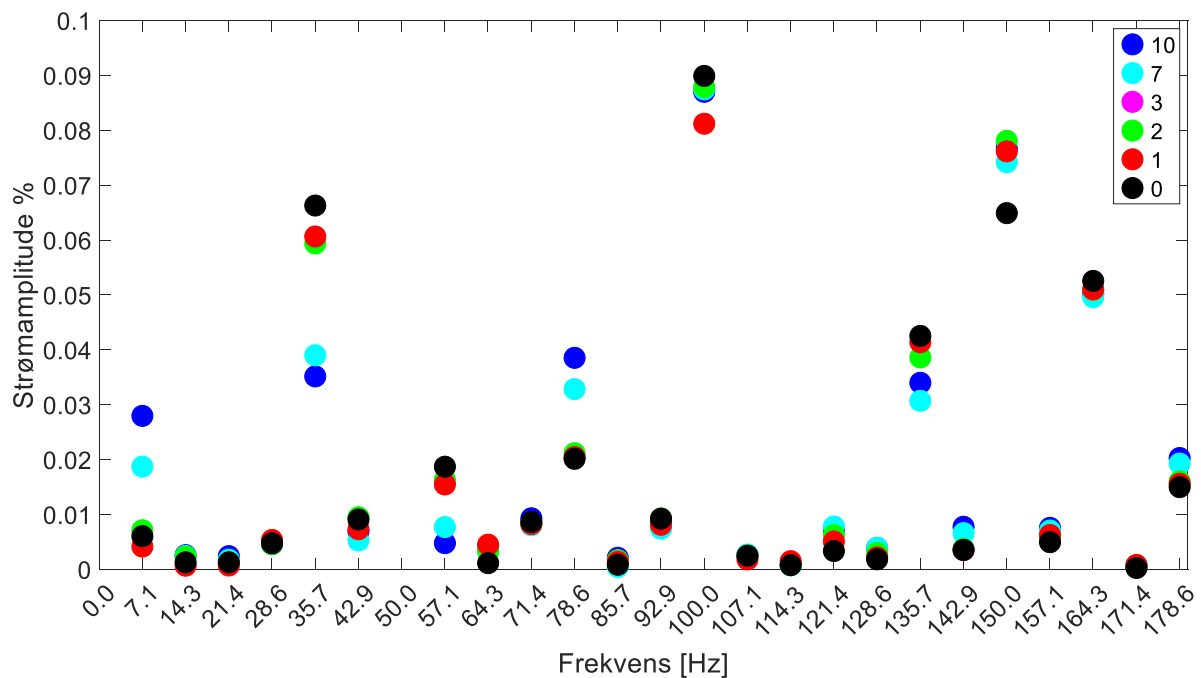


Figur 12.37: Strøm, FL1, Brutus, KF, Rektangulært vindu, program 2b.

## 12.4.2 FL2



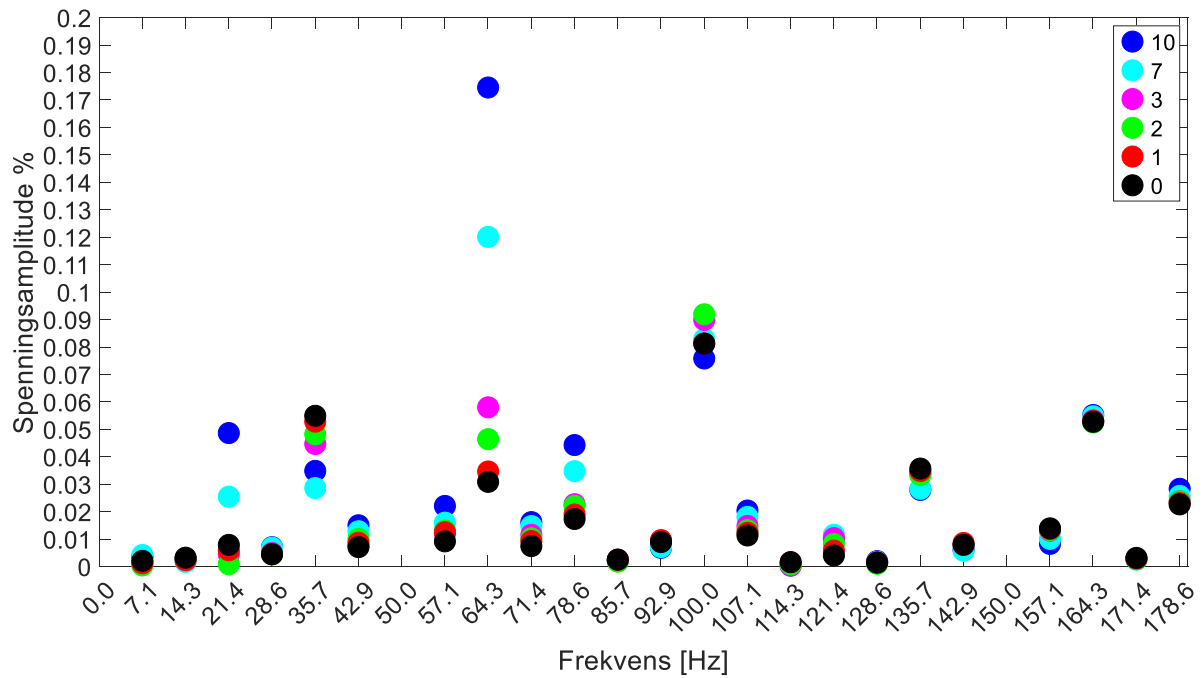
Figur 12.38: Spenning, FL2, Brutus, KF, Rektangulært vindu, program 2b.



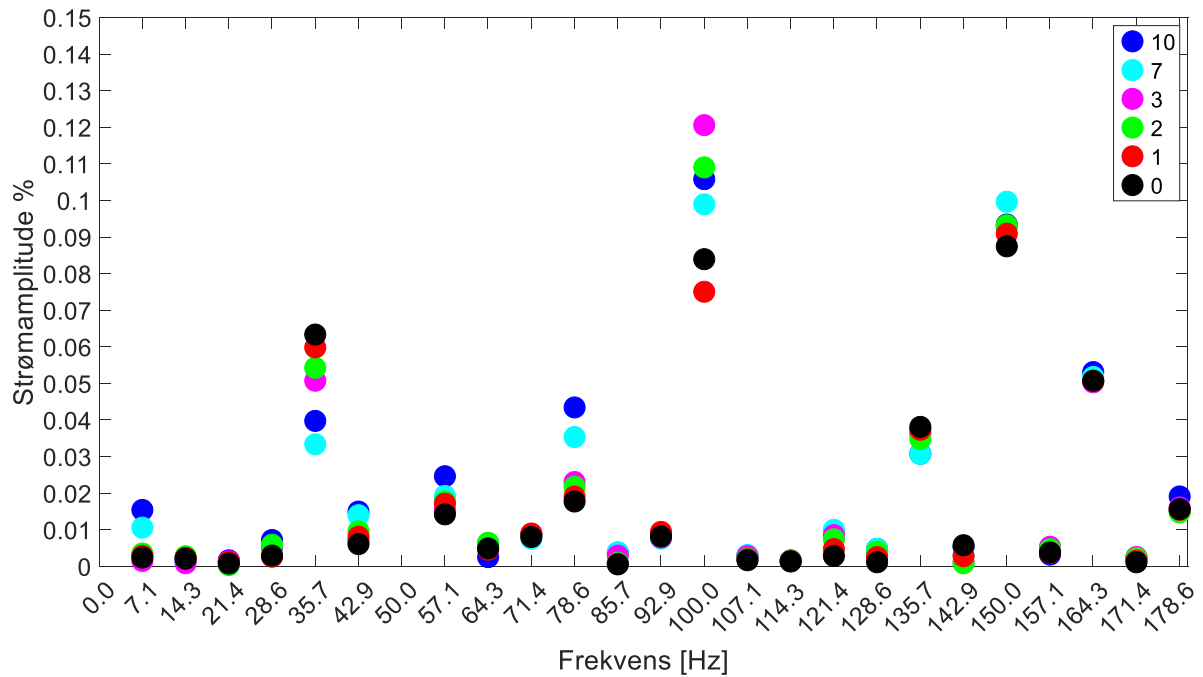
Figur 12.39: Strøm, FL2, Brutus, KF, Rektangulært vindu.

Legg merke til at prøven med 3 kortslutninger ikke synes på figurene over. Dette skyldtes trolig at program2b ikke klarte å estimere «rett» frekvens på grunn av frekvensvariasjoner og/eller transienter i prøven med 3 kortslutninger, program 2b.

### 12.4.3 FL3

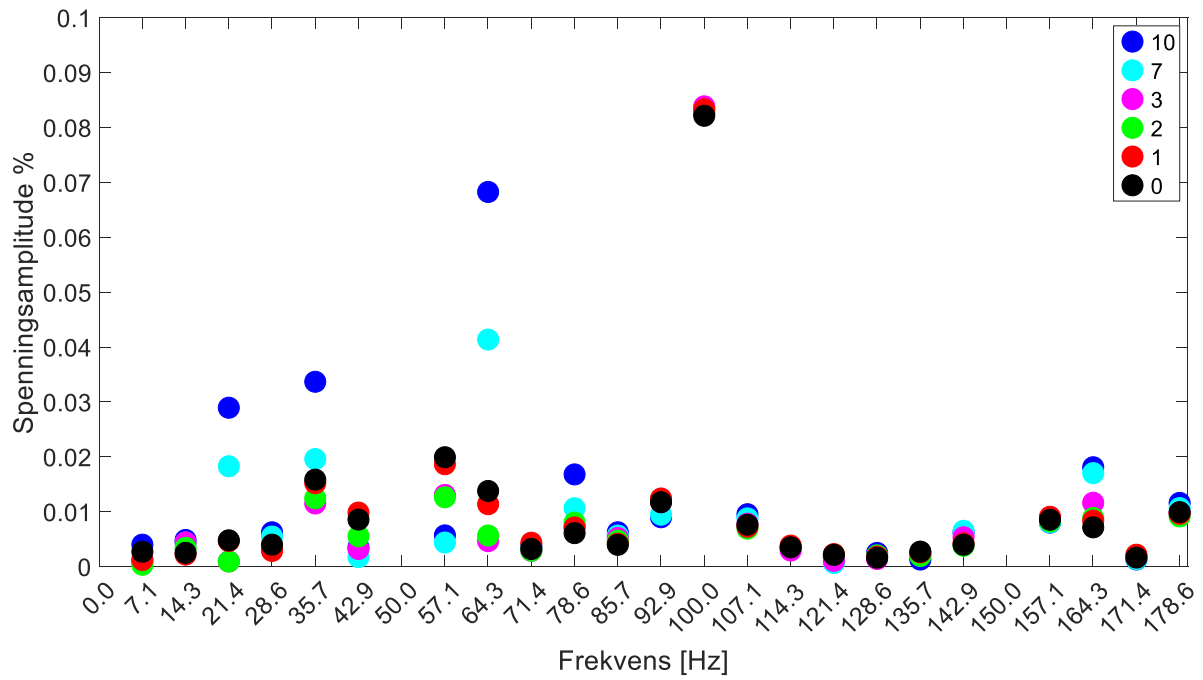


Figur 12.40: Spenning, FL3, Brutus, KF, Rektangulært vindu, program 2b.



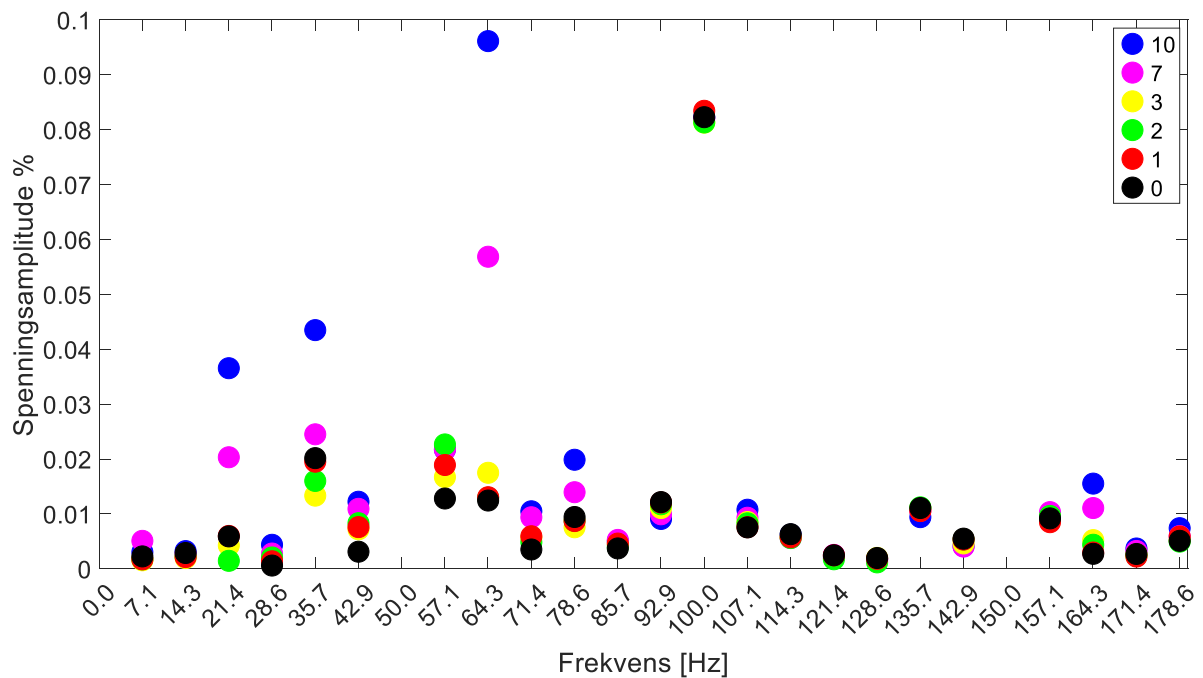
Figur 12.41: Strøm, FL3, Brutus, KF, Rektangulært vindu, program 2b.

### 12.4.4 T2



Figur 12.42: Spenning, T2, Brutus, KF, Rektangulært vindu, program 2b.

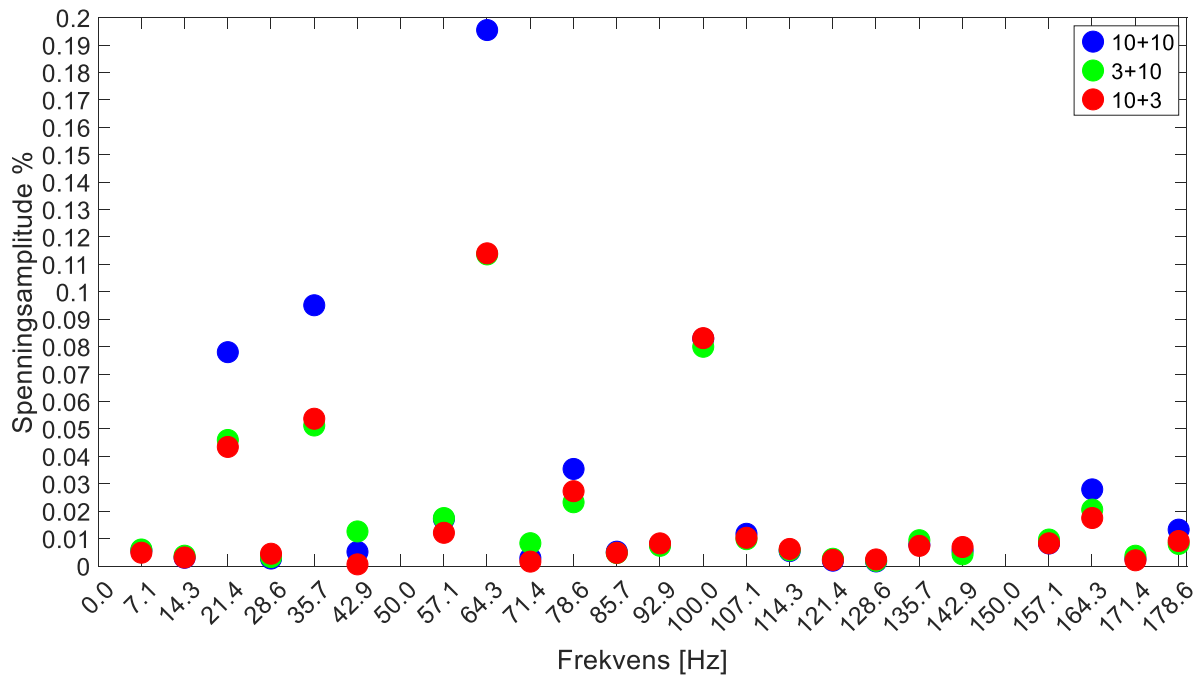
### 12.4.5 T3



Figur 12.43: Spenning, T3, Brutus, KF, Rektangulært vindu, program 2b.

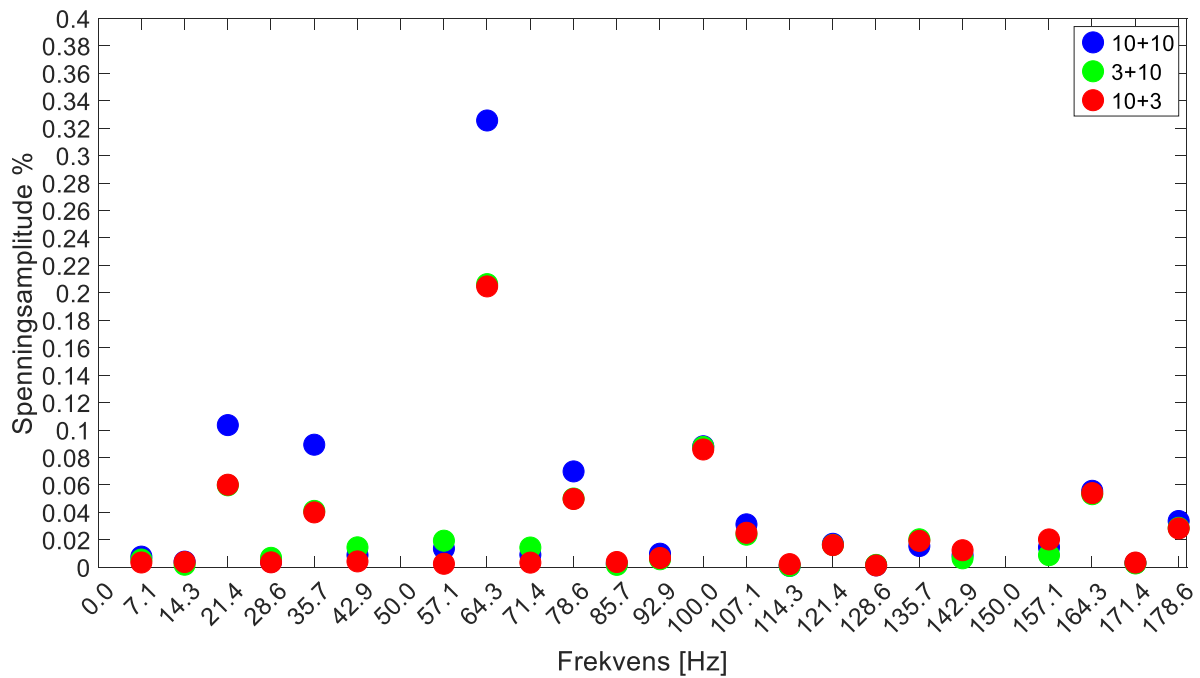


### 12.4.6 KF i to poler



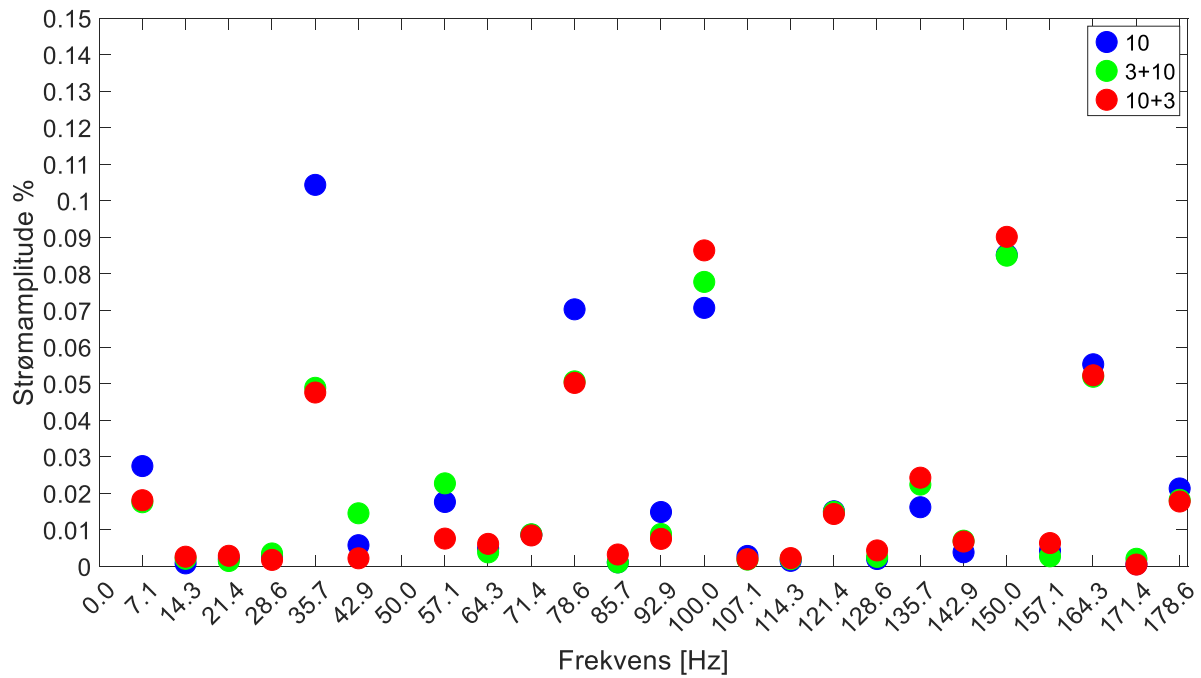
Figur 12.44: Spenning, T3. Blå: pol1 10 KF, pol8 10 KF. Grønn: Pol1 3 KF, pol8 10 KF. Rød: Pol1 10 KF, pol8 3 KF, program 2b

På grunn av en teknisk feil var det ikke mulig å lese filen den ordinære tomgangsprøven med Pol1 10 KF og Pol8 3 KF, rød i figur over. En reserveprøve på 2 sekunder med en tastefrekvens på 50 kHz ble brukt istedenfor.



Figur 12.45: Spenning FL3. Blå: pol1 10 KF, pol8 10 KF. Lilla: Pol1 3 KF, pol8 10 KF. Rød: Pol1 10 KF, pol8 3 KF, program 2b

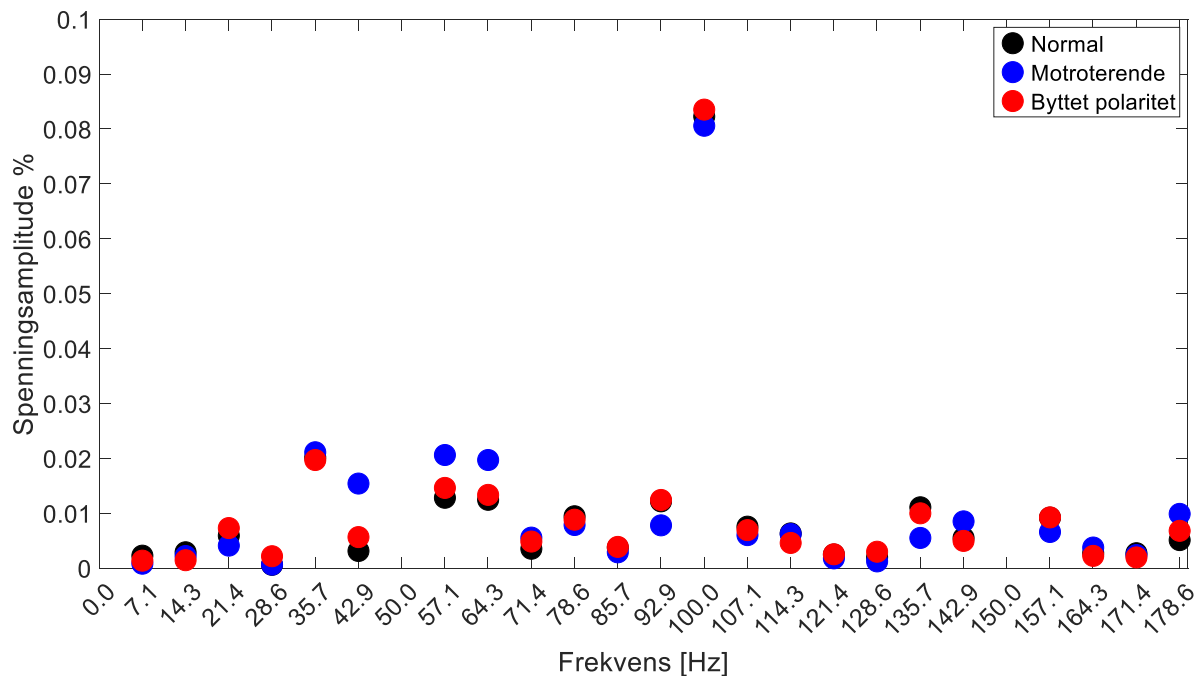
## 12-Hovedresultater, Brutus



Figur 12.46: Strøm FL3. Blå: pol1 10 KF, pol8 10 KF. Lilla: Pol1 3 KF, pol8 10 KF. Rød: Pol1 10 KF, pol8 3 KF, program 2b

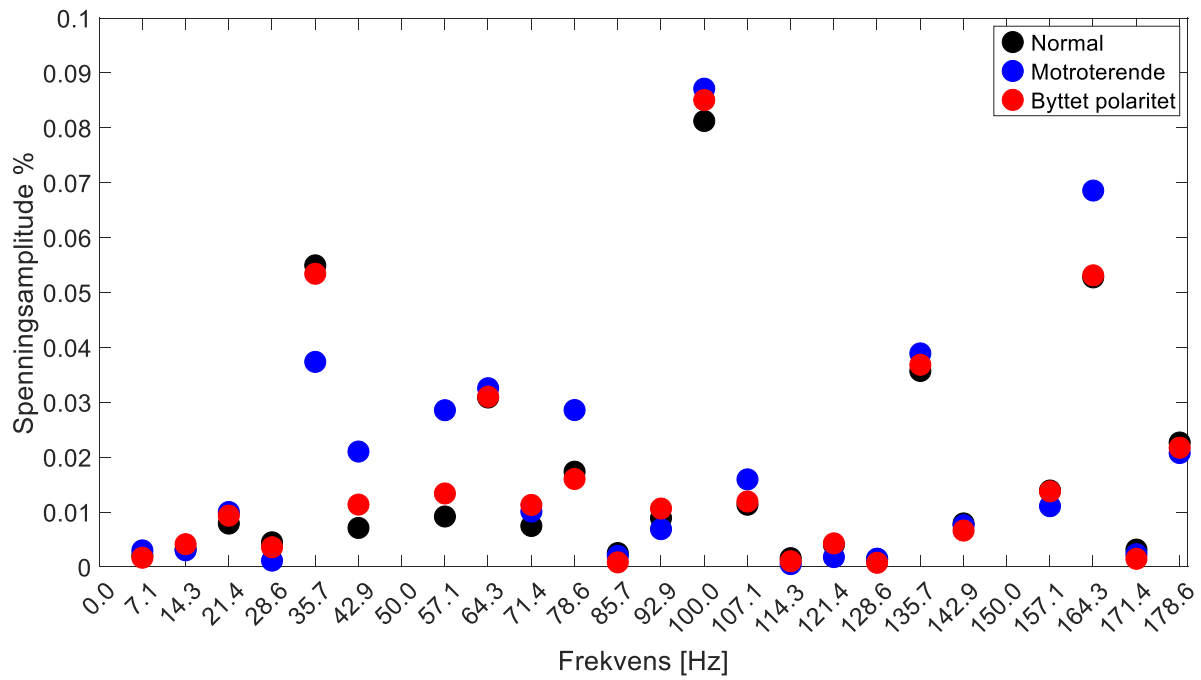
## 12.5 Sammenligning av resultater på tvers. Program 2b

### 12.5.1 Byttet polaritet, serie 3

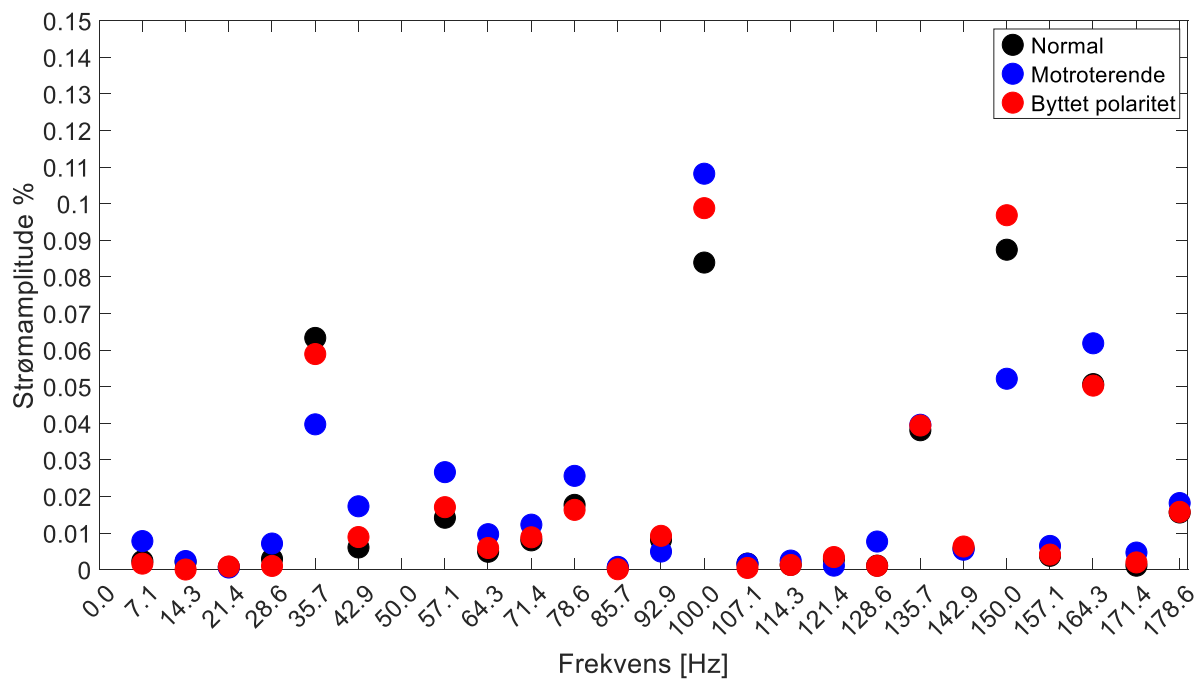


Figur 12.47: Spenning, T3, Brutus, KF, Rektangulært vindu, program 2b

## 12-Hovedresultater, Brutus

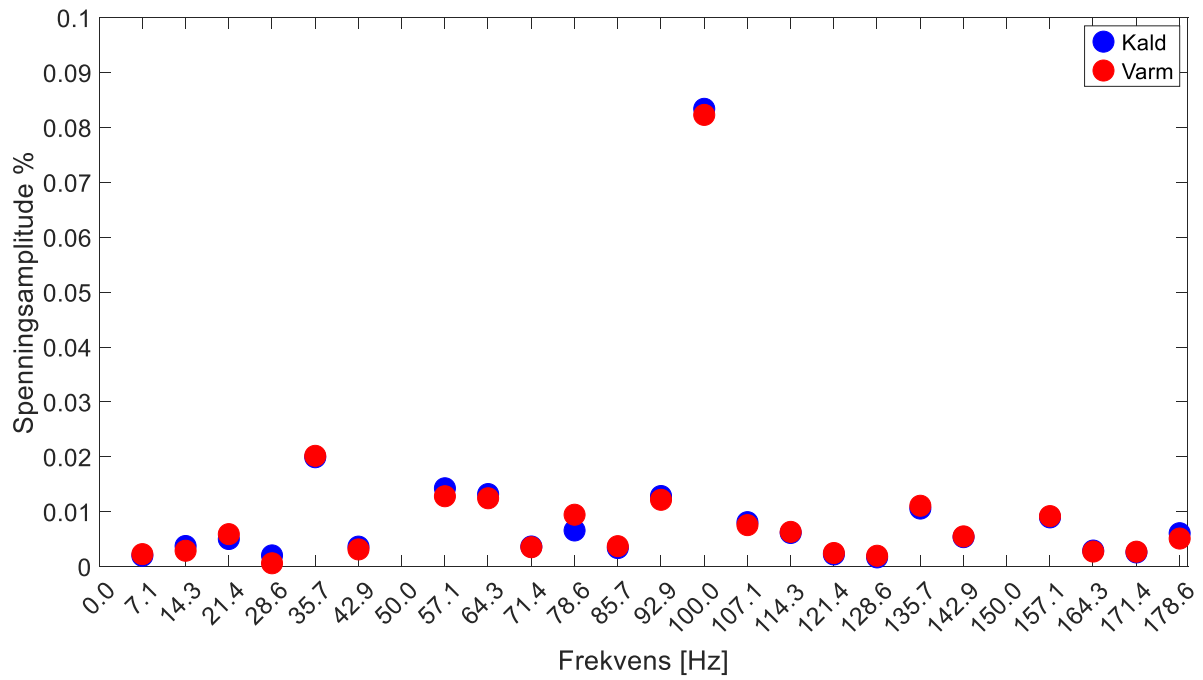


Figur 12.48: Spenning, FL3, Brutus, KF, Rektangulært vindu, program 2b.

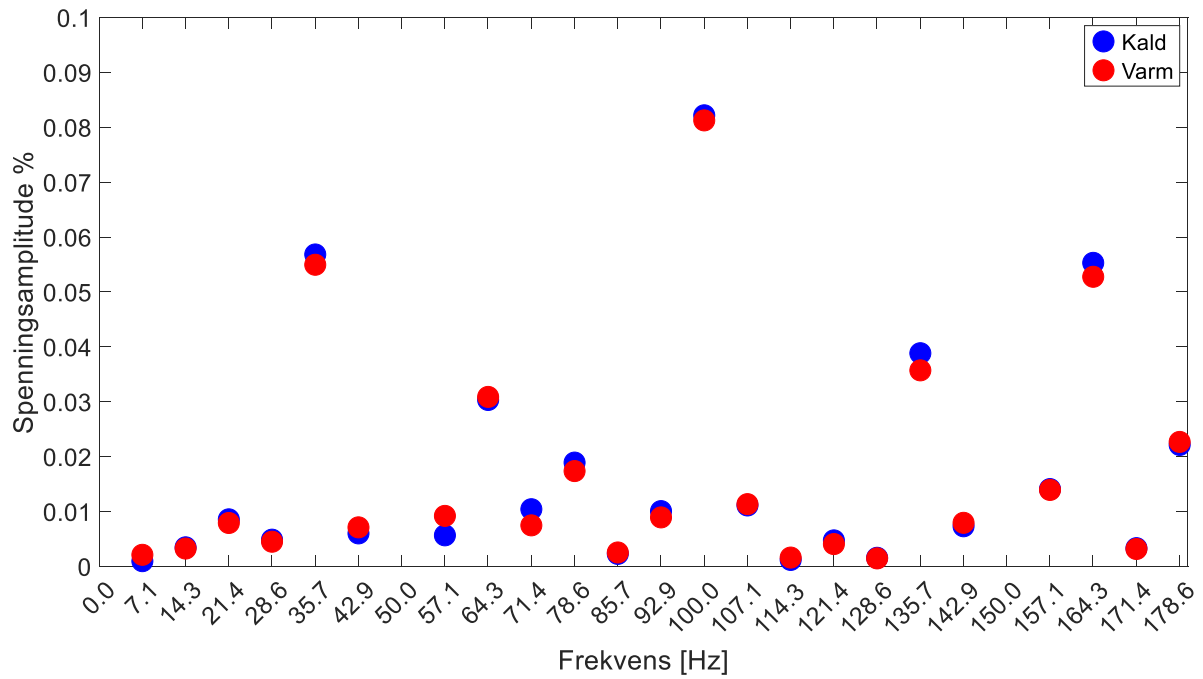


Figur 12.49: Spenning, FL3, Brutus, KF, Rektangulært vindu, program 2b.

### 12.5.2 Varm vs kald, frisk maskin

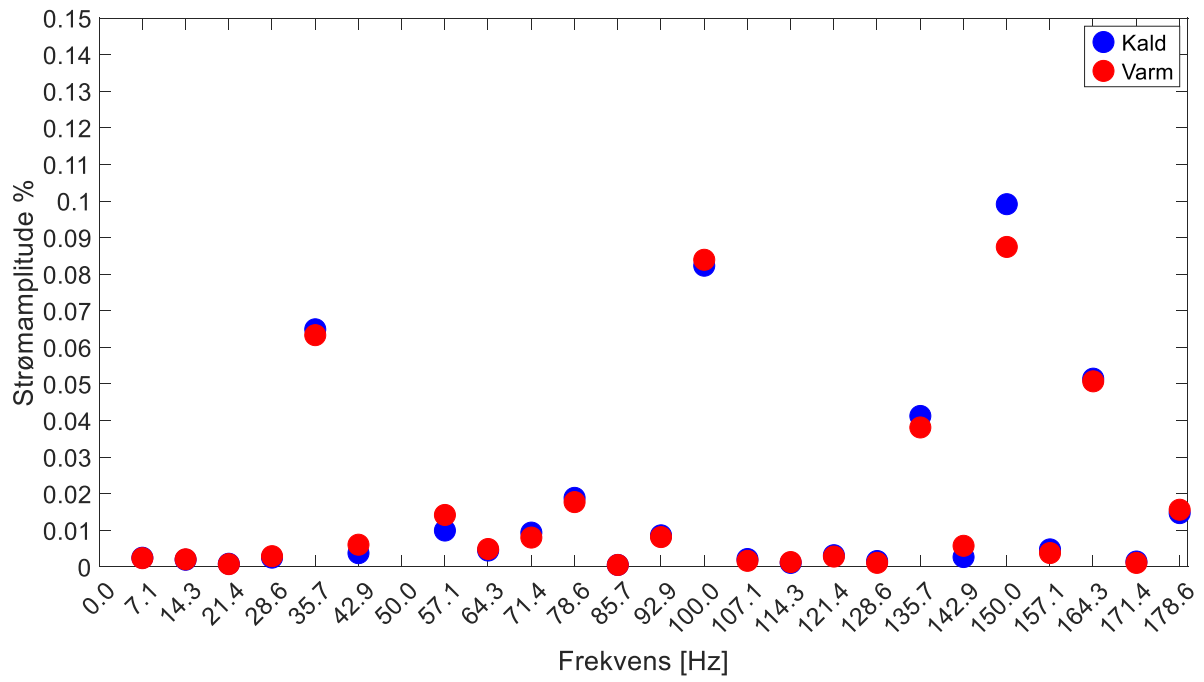


Figur 12.50 Spenning, T3, Brutus, KF, Rektangulært vindu, program 2b.



Figur 12.51: Spenning, FL3, Brutus, KF, Rektangulært vindu, program 2b.

## 12-Hovedresultater, Brutus



Figur 12.52: Strøm, FL3, Brutus, KF, Rektangulært vindu, program 2b.



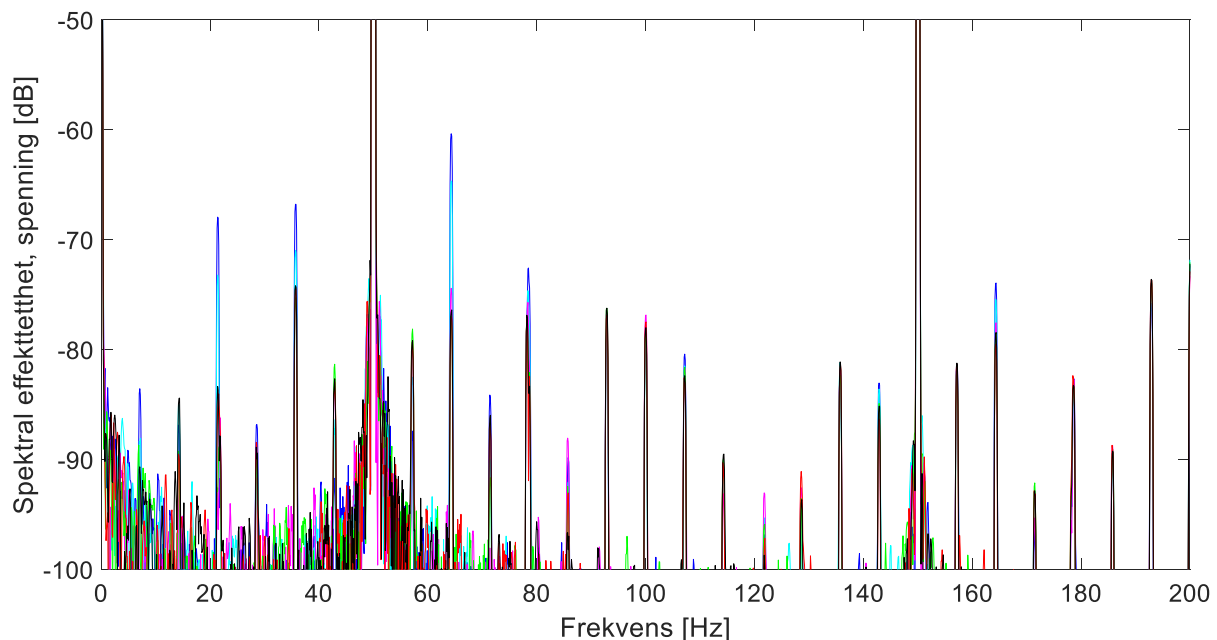
## 13 Resultater, Brutus, Program 1

Hensikten med program 1 og 2a var å se på hvordan DFT-analysen forandret seg med varierende manipulasjon av signalet. Det var viktig å få evaluert hvilke vinduer som kunne egne seg, signallengdens betydning og om hvilken usikkerhet det var forbundet med manipulasjonsmetodene. Begge programmene tar utgangspunkt i dB-skalaen, som tillater å se på et bredt spekter av frekvenser med store forskjeller i amplitude. Prosentkala ble funnet som mer egnet for å vurdere feiltilstandene i maskinen og ble derfor brukt i program 2b.

Flere resultater fra program 1 og 2a finnes i Appendiks A.

### 13.1 Program 1 T1

#### 13.1.1 Vurdering av vindu, signallengde og frekvensestimering

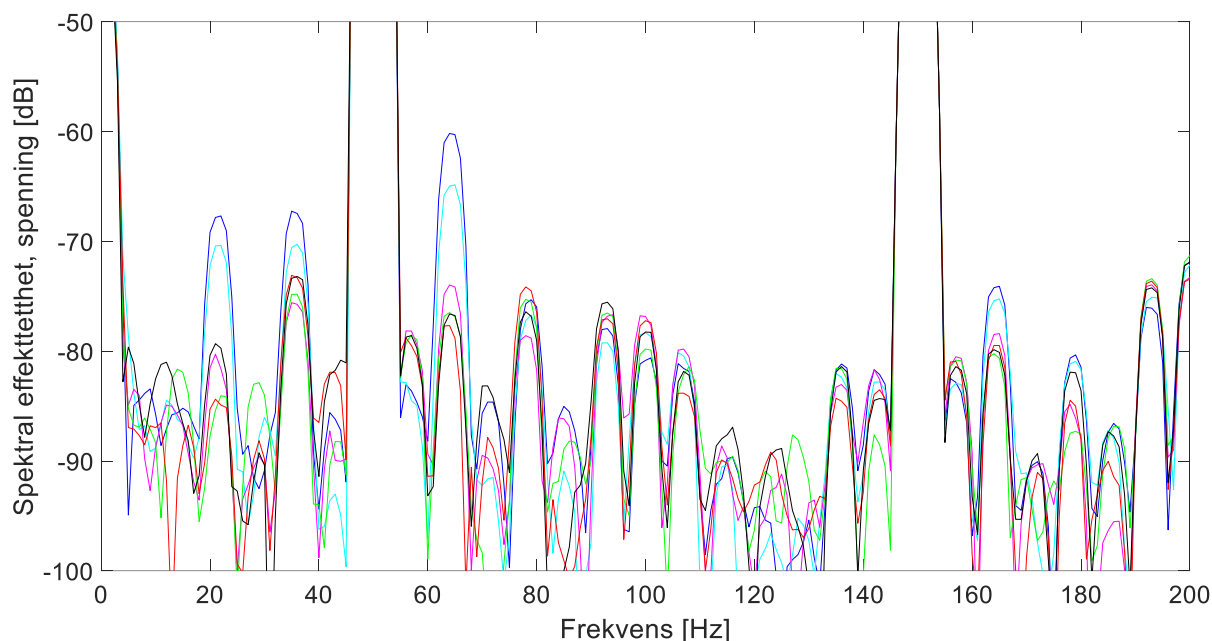


Figur 13.1: Spenning, T1, Brutus, Program 1, Flat-top-vindu. 0-200 Hz, 10 sekunder

Et signal på 10 sekunder ga en veldig liten  $\Delta f_{DFT}$ , jamført (5.1). Den brede hovedloben til flat-top-vinduet kom godt frem når bare 1 sekund av signalet ble benyttet, se figur 19.2. 71 mekaniske perioder var det maksimale som kunne utnyttes ved bruk av trunkering i et 10

### 13-Resultater, Brutus, Program 1

sekunders signal, men som tabell under viser er det ubetydelige forskjeller mellom et signal som har varighet på  $71 T_{mek}$  og 10 sekunder. Om synkronfrekvensen estimeres, eller settes til 50 Hz, hadde liten betydning, 19.3.



Figur 13.2: Spenning, T1, Brutus, Program 1, Flat-top-vindu. 0-200 Hz, 1 sekunder

Spenning, T1, Program 1, Flat-top-vindu, 1 sekunder						
	<b>10</b>	<b>7</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
<b>21.44</b>	-67.82	-70.42	-80.27	-85.37	-84.37	-79.31
<b>25.73</b>	-67.45	-70.28	-75.72	-74.81	-73.31	-73.20
<b>64.31</b>	-60.17	-64.97	-73.97	-76.48	-77.66	-76.61

Spenning, T1, Program 1, Flat-top-vindu, 10 sekunder						
	<b>10</b>	<b>7</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
<b>21.44</b>	-67.95	-73.22	-92.57	-92.90	-85.35	-83.36
<b>25.73</b>	-66.78	-70.98	-76.59	-75.32	-74.31	-74.19
<b>64.31</b>	-60.37	-64.65	-79.03	-76.96	-77.04	-76.59

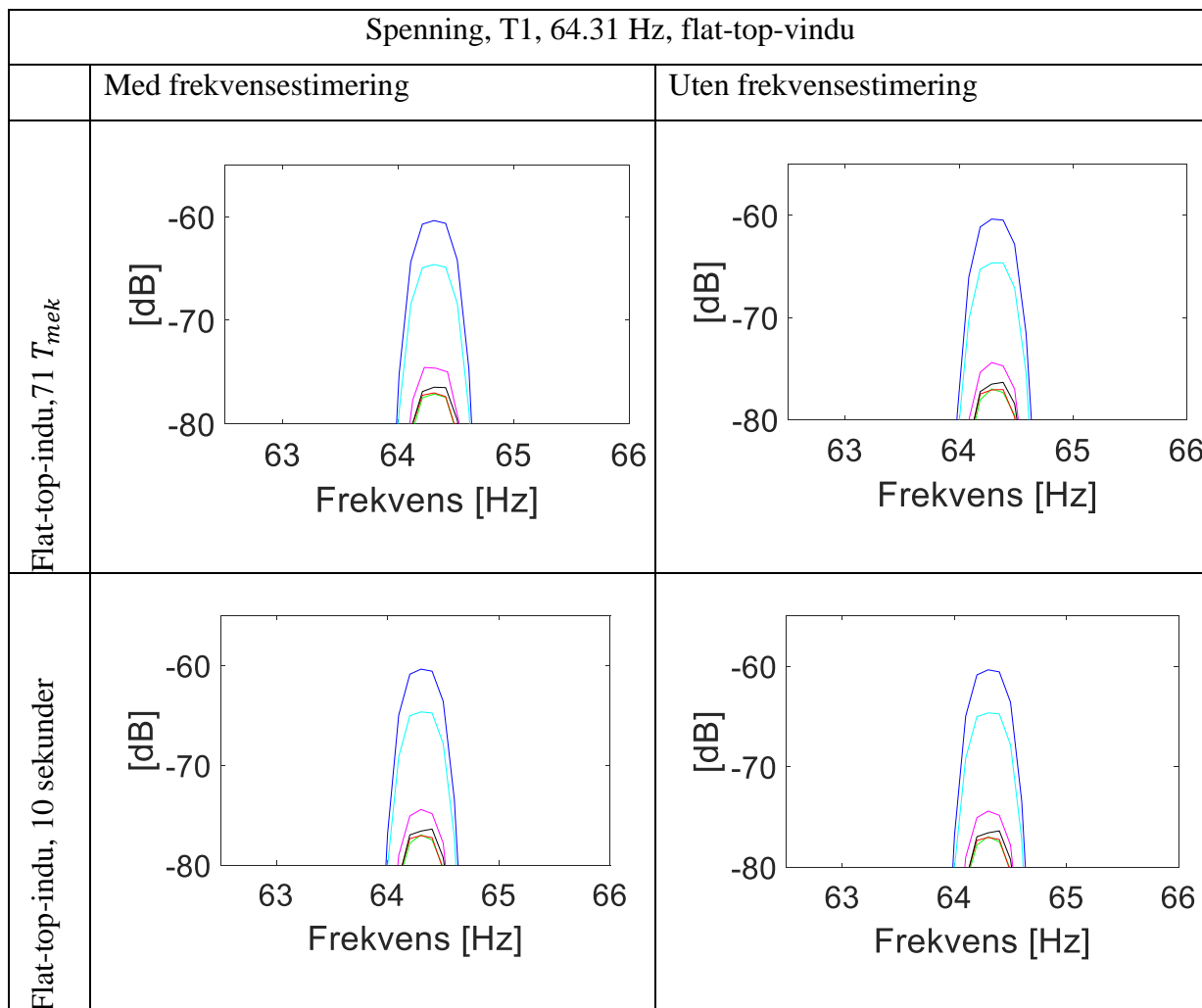
Spenning, T1, Program 1, Flat-top-vindu, $71 T_{mek}$						
---	--	--	--	--	--	--

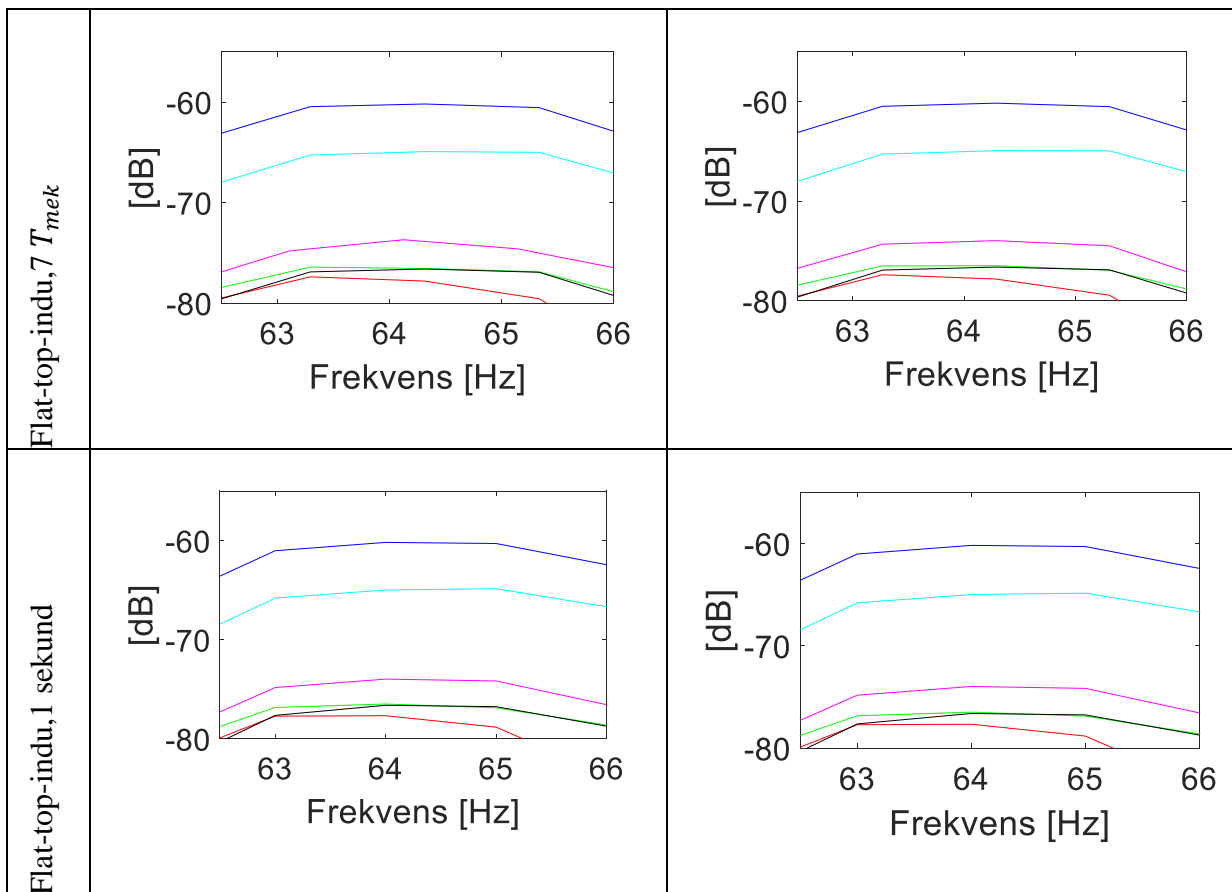


13-Resultater, Brutus, Program 1

	<b>10</b>	<b>7</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
<b>21.44</b>	-67.93	-73.29	-91.93	-92.78	-85.11	-83.33
<b>25.73</b>	-66.75	-71.02	-76.02	-75.35	-74.35	-74.15
<b>64.31</b>	-60.38	-64.62	-77.69	-77.12	-77.02	-76.47

Tabell 13.1: Sammenligning av detaljer i algoritmen, , Brutus Program 1, Flat-top-vindu.

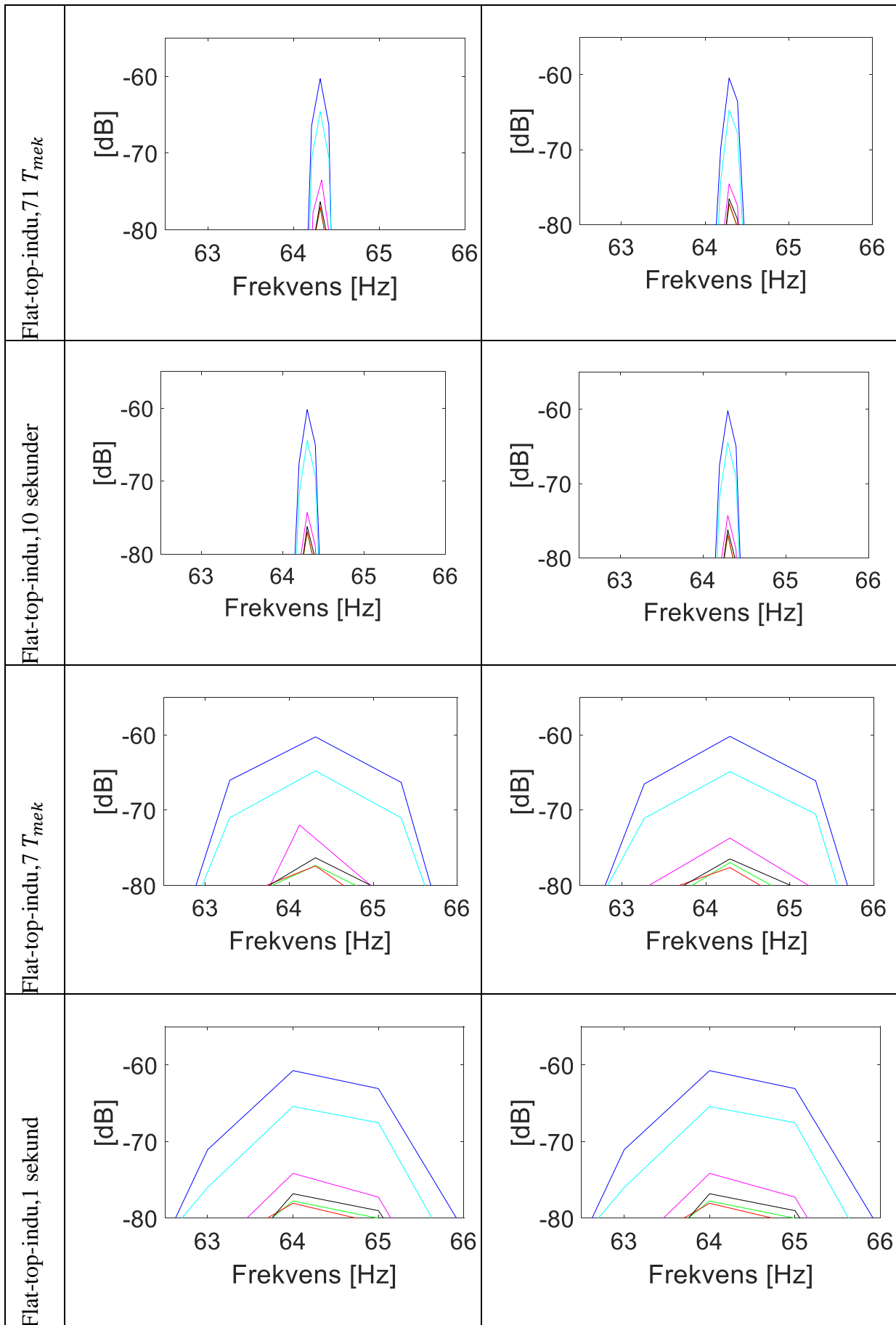




Flat-top og Hann-vinduet kan sammenlignes ved å se på tabellene 19.3 og 19.4. Frekvensestimeringen var av varierende betydning for Hann-vinduet, både mellom vinduene og mellom lengdene på signalene. Betydningen av å ha et helt antall mekaniske perioder var liten for flat-top-vinduet, men for Hann-vinduet fikk dette betydning når en liten del av signalet ble brukt.

Tabell 13.2: Sammenligning av detaljer i algoritmen, Brutus, Program 1, Hann.

Spenning, T1, 64.31 Hz, Hann	
Med frekvensestimering	Uten frekvensestimering



### 13.1.2 Vurdering av KF

Viser kun Flat-top-vindu, 10 sekunder uten frekvensestimering.

Tabell 13.3: Tabell type A, T1, Brutus, Flat-top, 10 sekunder uten frekvensestimering

<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
0.0	164.3	64.3	7.1	28.6
0.0	0.0	78.6	21.4	71.4
0.0	0.0	207.1	35.7	107.1
0.0	0.0	592.9	142.9	278.6
0.0	0.0	0.0	264.3	307.1

Tabell 13.4: Tabell type A, T1, Brutus, Flat-top, 10 sekunder uten frekvensestimering

$f_f$	<b>0</b>	<b>10</b>	<b>7</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>1</b>
<b>164.29</b>	-79.70	-74.95	-76.53	-78.71	-79.55	-80.29
<b>64.29</b>	-76.23	-60.19	-64.45	-74.29	-77.01	-76.91
<b>78.57</b>	-83.22	-73.81	-77.53	-81.48	-82.83	-82.03
<b>207.14</b>	-93.69	-90.07	-91.44	-92.40	-94.66	-94.54
<b>592.86</b>	-110.62	-107.56	-108.87	-110.47	-120.23	-112.98
<b>7.14</b>	-91.07	-84.70	-88.81	-92.89	-95.35	-100.00
<b>21.43</b>	-84.18	-68.45	-73.60	-92.35	-93.01	-85.90
<b>35.71</b>	-74.45	-66.93	-71.15	-75.85	-75.54	-74.57
<b>142.86</b>	-85.60	-82.88	-83.46	-85.28	-85.15	-85.48
<b>264.29</b>	-84.68	-83.29	-84.07	-84.64	-84.46	-84.66

## 13.2 FL1

Tabell 13.5: Senning, Tabell type A, FL, Brutus 1, Flat-top, 10 sekunder uten frekvensestimering

<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
78.6	35.7	42.9	7.1	135.7
442.9	0.0	264.3	21.4	142.9
0.0	0.0	814.3	64.3	192.9
0.0	0.0	0.0	107.1	250.0
0.0	0.0	0.0	114.3	257.1

Tabell 13.6: Strøm, Tabell type A, FL1, Brutus, Flat-top, 10 sekunder uten frekvensestimering

<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
35.7	307.1	57.1	7.1	142.9
357.1	0.0	78.6	42.9	242.9
0.0	0.0	264.3	164.3	285.7
0.0	0.0	535.7	207.1	364.3
0.0	0.0	1371.4	235.7	392.9

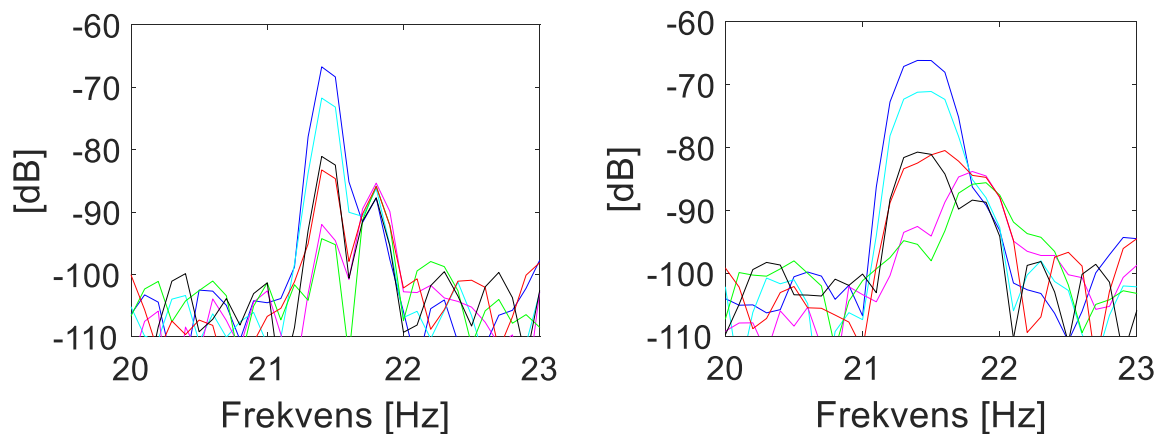
Tabell 13.7: Spenning, Tabell type B, FL1, Brutus, Flat-top, 10 sekunder uten frekvensestimering

$f_f$	<b>0</b>	<b>10</b>	<b>7</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>1</b>
<b>78.57</b>	-72.47	-67.27	-69.18	-70.89	-71.62	-71.83
<b>442.86</b>	-114.99	-105.49	-109.71	-110.02	-110.18	-110.52
<b>35.71</b>	-71.58	-62.59	-65.93	-71.03	-71.18	-71.78
<b>42.86</b>	-74.93	-68.91	-70.52	-74.06	-74.46	-74.25
<b>264.29</b>	-76.69	-75.49	-75.91	-76.15	-76.50	-76.23
<b>814.29</b>	-118.85	-115.61	-115.81	-116.00	-118.98	-118.62
<b>7.14</b>	-90.16	-82.55	-88.96	-91.15	-94.79	-97.14
<b>21.43</b>	-81.08	-66.72	-71.73	-91.99	-94.26	-83.25
<b>64.29</b>	-70.97	-57.92	-63.07	-80.23	-77.97	-73.05
<b>107.14</b>	-76.82	-73.13	-73.97	-75.42	-75.36	-75.99

Tabell 13.8: Strøm, Tabell type B, FL1, Brutus, Flat-top, 10 sekunder uten frekvensestimering

$f_f$	0	10	7	3	2	1
35.71	-70.37	-61.53	-64.95	-69.90	-70.15	-70.22
357.14	-120.50	-103.13	-105.05	-105.70	-107.06	-119.61
307.14	-86.94	-84.55	-85.81	-86.20	-86.57	-87.37
57.14	-72.57	-69.11	-69.44	-70.74	-71.05	-70.90
78.57	-71.41	-67.44	-69.40	-70.74	-71.72	-71.22
264.29	-72.87	-72.37	-72.70	-72.85	-73.13	-73.26
535.71	-114.32	-104.88	-105.92	-106.00	-112.86	-112.08
1371.43	-123.77	-107.98	-118.46	-118.89	-125.68	-124.01
7.14	-80.04	-71.03	-75.91	-96.19	-82.84	-80.51
42.86	-76.14	-69.56	-71.79	-74.32	-74.18	-75.18

### 13.3 FL2, 16-bit oscilloskop



Figur 13.3: Venstre: Hann-vindu. Høyre: Flat-top-vindu

Figur(over) viser forskjellen på Hann og Flat-top når frekvenser ligger nært hverandre. 121.4 Hz hadde en lignende nærliggende nabo som 21.4 Hz. 78.6 Hz og 178.6 Hz hadde også naboer, men med lavere frekvens.

### 13-Resultater, Brutus, Program 1

Tabell 13.9: Senning, Tabell type A, FL2, Brutus, Hann-vindu, 10 sekunder uten frekvensestimering

1	2	3	4	5
64.3	78.6	157.1	21.4	271.4
85.7	178.6	257.1	171.4	292.9
107.1	0.0	307.1	278.6	392.9
121.4	0.0	371.4	285.7	421.4
142.9	0.0	0.0	1278.6	492.9

Tabell 13.10: Senning, Tabell type A, FL2, Brutus, Flat-top, 10 sekunder uten frekvensestimering

1	2	3	4	5
78.6	35.7	42.9	21.4	7.1
407.1	0.0	264.3	64.3	135.7
0.0	0.0	300.0	107.1	142.9
0.0	0.0	442.9	114.3	164.3
0.0	0.0	971.4	157.1	171.4

Tabell 13.11: Strøm, Tabell type A, FL2, Brutus, Flat-top, 10 sekunder uten frekvensestimering

1	2	3	4	5
78.6	7.1	178.6	157.1	21.4
142.9	0.0	1214.3	164.3	71.4
1371.4	0.0	0.0	235.7	85.7
0.0	0.0	0.0	242.9	171.4
0.0	0.0	0.0	257.1	185.7

Tabell 13.12: Spenning, Tabell type B, FL2, Brutus, Hann, 10 sekunder uten frekvensestimering

$f_f$	0	10	7	3	2	1
<b>64.29</b>	-70.55	-56.86	-59.54	-65.73	-67.96	-69.15
<b>85.71</b>	-109.21	-91.04	-93.94	-96.59	-98.09	-102.40
<b>107.14</b>	-80.55	-75.74	-76.86	-79.04	-79.86	-80.25
<b>121.43</b>	-88.43	-81.27	-81.54	-82.05	-84.14	-85.93
<b>142.86</b>	-83.99	-80.01	-81.61	-82.52	-83.89	-83.89

## 13-Resultater, Brutus, Program 1

<b>235.71</b>	-90.69	-84.40	-85.71	-86.60	-87.69	-88.92
<b>792.86</b>	-126.32	-109.78	-110.03	-113.70	-116.34	-118.56
<b>78.57</b>	-74.02	-68.55	-70.13	-72.76	-73.64	-74.27
<b>178.57</b>	-75.44	-73.85	-74.28	-75.00	-75.11	-75.60
<b>157.14</b>	-79.59	-75.97	-76.70	-78.19	-79.29	-79.10

Tabell 13.13: Spenning, Tabell type B, FL2, Brutus, flat-top, 10 sekunder uten frekvensestimering

$f_f$	<b>0</b>	<b>10</b>	<b>7</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>1</b>
<b>78.57</b>	-72.42	-67.62	-69.17	-71.14	-71.54	-72.03
<b>407.14</b>	-79.16	-77.65	-77.82	-78.01	-78.38	-78.67
<b>35.71</b>	-71.37	-62.40	-65.66	-70.95	-70.95	-71.55
<b>42.86</b>	-75.09	-68.54	-70.33	-73.94	-74.23	-74.04
<b>264.29</b>	-72.66	-71.89	-72.23	-72.40	-72.74	-72.43
<b>300.00</b>	-74.75	-73.88	-73.90	-73.94	-74.24	-73.95
<b>442.86</b>	-105.90	-99.01	-101.36	-101.67	-105.42	-103.89
<b>971.43</b>	-115.20	-108.79	-109.95	-110.63	-113.67	-113.15
<b>21.43</b>	-80.72	-66.13	-71.19	-92.56	-95.41	-82.47
<b>64.29</b>	-71.19	-58.07	-63.24	-80.63	-77.91	-73.42

Tabell 13.14: Strøm, Tabell type B, FL2, Brutus, Flat-top, 10 sekunder uten frekvensestimering

$f_f$	<b>0</b>	<b>10</b>	<b>7</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>1</b>
<b>78.57</b>	-74.48	-68.72	-70.30	-73.01	-73.72	-74.35
<b>142.86</b>	-90.31	-83.48	-85.09	-86.90	-89.70	-90.00
<b>1371.43</b>	-136.49	-114.43	-116.24	-118.53	-120.79	-129.87
<b>7.14</b>	-82.60	-70.57	-74.32	-80.18	-82.58	-89.47
<b>178.57</b>	-78.65	-76.01	-76.34	-77.30	-78.60	-78.54
<b>1214.29</b>	-122.31	-115.46	-119.80	-120.70	-124.80	-122.84
<b>157.14</b>	-87.77	-84.41	-84.78	-86.73	-86.77	-85.80
<b>164.29</b>	-67.66	-67.16	-67.45	-68.56	-69.04	-68.66
<b>235.71</b>	-100.44	-94.57	-100.07	-102.31	-110.50	-101.80
<b>242.86</b>	-91.68	-83.98	-85.94	-89.43	-88.19	-90.30



# 14 Resultater, Brutus, Program 2a

## 14.1 FL1 Program 2a

Tabell 14.1: Spenning, FL1, Brutus, Program 2a

21.44 Hz							
kortslutninger	Lavest [dB]	[V]	Høyest [dB]	[V]	Snitt[dB]	Snitt[V]	$\Delta V$
0	-84.780	0.019	-76.546	0.048	-79.976	0.033	0.030
1	-90.765	0.009	-79.490	0.034	-82.384	0.025	0.025
2	-97.434	0.004	-82.590	0.024	-86.066	0.016	0.020
3	-97.631	0.004	-82.867	0.023	-86.995	0.015	0.019
7	-71.960	0.082	-69.589	0.108	-71.078	0.091	0.026
10	-66.853	0.148	-65.345	0.176	-66.119	0.161	0.028

64.31 Hz							
kortslutninger	Lavest [dB]	[V]	Høyest [dB]	[V]	Snitt[dB]	Snitt[V]	$\Delta V$
0	-71.765	0.084	-70.134	0.101	-70.866	0.093	0.017
1	-74.355	0.062	-72.539	0.077	-73.032	0.073	0.014
2	-79.515	0.034	-76.356	0.049	-77.913	0.041	0.015
3	-82.194	0.025	-77.167	0.045	-79.963	0.033	0.020
7	-63.452	0.219	-62.905	0.233	-63.143	0.227	0.014
10	-58.172	0.401	-57.962	0.411	-58.038	0.408	0.010

78.6 Hz							
kortslutninger	Lavest [dB]	[V]	Høyest [dB]	[V]	Snitt[dB]	Snitt[V]	$\Delta V$
0	-80.109	0.032	-69.080	0.114	-72.509	0.077	0.082
1	-78.074	0.041	-68.534	0.122	-71.382	0.088	0.081

## 14-Resultater, Brutus, Program 2a

2	-75.811	0.053	-68.158	0.127	-71.484	0.087	0.074
3	-74.841	0.059	-67.801	0.132	-70.221	0.100	0.074
7	-72.908	0.074	-66.889	0.147	-69.454	0.110	0.074
10	-69.617	0.107	-65.152	0.180	-66.994	0.145	0.072

**Tabell 14.2: Strøm, FL1, Brutus, Program 2a**

7.15 Hz							
kortslutninger	Lavest [dB]	[A]	Høyest [dB]	[A]	Snitt[dB]	Snitt[A]	$\Delta A$
0	-100.384	0.003	-72.608	0.076	-80.616	0.030	0.073
1	-87.589	0.014	-78.085	0.041	-80.726	0.030	0.027
2	-90.928	0.009	-71.731	0.084	-78.837	0.037	0.075
3	-92.161	0.008	-75.307	0.056	-79.993	0.033	0.048
7	-80.763	0.030	-71.326	0.088	-75.008	0.058	0.058
10	-82.022	0.026	-69.965	0.103	-72.645	0.076	0.078

35. Hz							
kortslutninger	Lavest [dB]	[A]	Høyest [dB]	[A]	Snitt[dB]	Snitt[A]	$\Delta A$
0	-71.240	0.089	-69.486	0.109	-70.205	0.100	0.020
1	-71.351	0.088	-69.865	0.104	-70.457	0.098	0.016
2	-70.939	0.092	-69.299	0.112	-70.193	0.101	0.019
3	-70.745	0.094	-68.445	0.123	-69.803	0.105	0.029
7	-65.280	0.177	-64.551	0.193	-64.903	0.185	0.016
10	-62.229	0.252	-61.058	0.288	-61.557	0.272	0.036

78.6 Hz							
kortslutninger	Lavest [dB]	[A]	Høyest [dB]	[A]	Snitt[dB]	Snitt[A]	$\Delta A$
0	-75.947	0.052	-68.734	0.119	-71.123	0.090	0.067
1	-75.261	0.056	-68.263	0.126	-70.548	0.097	0.070

## 14-Resultater, Brutus, Program 2a

2	-75.455	0.055	-68.244	0.126	-71.194	0.090	0.071
3	-76.124	0.051	-67.484	0.137	-70.851	0.093	0.087
7	-73.305	0.070	-66.595	0.152	-69.057	0.115	0.082
10	-69.909	0.104	-65.694	0.169	-67.533	0.137	0.065

## 14.2 FL2 Program 2a

Det er tydelig noe galt med prøven med 3 kortslutninger, noe som også vistes i resultatene fra program 2b.

Tabell 14.3: Spenning, FL2, Brutus, Program 2a, 16-bit

21.44 Hz							
kortslutninger	Lavest [dB]	[V]	Høyest [dB]	[V]	Snitt[dB]	Snitt[V]	$\Delta V$
0	-85.071	0.018	-76.439	0.049	-80.421	0.031	0.031
1	-88.239	0.013	-79.423	0.035	-83.649	0.021	0.022
2	-96.440	0.005	-83.706	0.021	-87.445	0.014	0.016
3	-100.964	0.003	-37.699	4.239	-57.464	0.436	4.236
7	-73.294	0.070	-70.871	0.093	-72.019	0.082	0.023
10	-69.344	0.111	-67.144	0.143	-67.982	0.130	0.032

64.31 Hz							
kortslutninger	Lavest [dB]	[V]	Høyest [dB]	[V]	Snitt[dB]	Snitt[V]	$\Delta V$
0	-71.540	0.086	-68.713	0.119	-70.266	0.100	0.033
1	-69.707	0.106	-68.131	0.128	-68.750	0.119	0.021
2	-69.488	0.109	-67.915	0.131	-68.581	0.121	0.022
3	-66.825	0.148	-7.989	129.656	-27.891	13.112	129.508
7	-59.788	0.333	-59.063	0.362	-59.413	0.348	0.029
10	-57.032	0.458	-56.410	0.492	-56.727	0.474	0.034

## 14-Resultater, Brutus, Program 2a

78.6 Hz							
kortslutninger	Lavest [dB]	[V]	Høyest [dB]	[V]	Snitt[dB]	Snitt[V]	$\Delta V$
0	-75.992	0.052	-70.887	0.093	-73.048	0.072	0.041
1	-77.197	0.045	-71.407	0.087	-73.637	0.068	0.043
2	-75.294	0.056	-71.053	0.091	-73.239	0.071	0.035
3	-75.757	0.053	-32.031	8.141	-51.331	0.882	8.088
7	-71.424	0.087	-67.868	0.131	-69.636	0.107	0.044
10	-70.794	0.094	-66.632	0.152	-68.024	0.129	0.058

Tabell 14.4: Strøm, FL2, Brutus, Program 2a, 16-bit

7.15 Hz							
kortslutninger	Lavest [dB]	[A]	Høyest [dB]	[A]	Snitt[dB]	Snitt[A]	$\Delta A$
0	-86.348	0.016	-76.460	0.049	-81.873	0.026	0.033
1	-88.240	0.013	-77.673	0.043	-83.639	0.021	0.030
2	-90.801	0.009	-76.826	0.047	-81.929	0.026	0.037
3	-87.337	0.014	-37.898	4.143	-57.322	0.443	4.129
7	-76.535	0.048	-71.845	0.083	-74.380	0.062	0.035
10	-72.657	0.076	-68.160	0.127	-70.951	0.092	0.051

35.7 Hz							
kortslutninger	Lavest [dB]	[A]	Høyest [dB]	[A]	Snitt[dB]	Snitt[A]	$\Delta A$
0	-64.556	0.193	-62.538	0.243	-63.489	0.218	0.050
1	-64.615	0.191	-63.304	0.222	-63.918	0.207	0.031
2	-65.335	0.176	-64.027	0.205	-64.703	0.189	0.029
3	-66.255	0.158	-34.617	6.045	-52.573	0.765	5.887
7	-69.380	0.110	-66.978	0.146	-68.147	0.127	0.035
10	-69.435	0.110	-67.343	0.140	-68.503	0.122	0.030

14-Resultater, Brutus, Program 2a

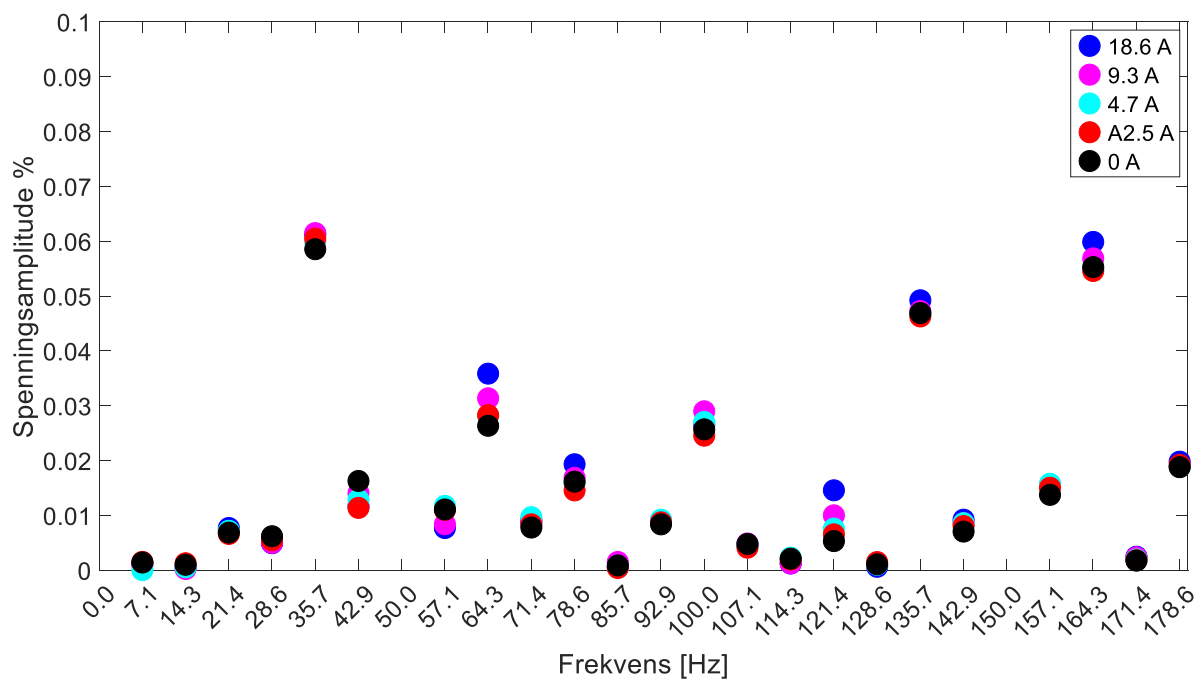
78.6 Hz							
kortslutninger	Lavest [dB]	[A]	Høyest [dB]	[A]	Snitt[dB]	Snitt[A]	$\Delta A$
0	-77.161	0.045	-70.989	0.092	-73.482	0.069	0.047
1	-77.879	0.042	-70.834	0.093	-73.591	0.068	0.052
2	-76.386	0.049	-70.412	0.098	-73.230	0.071	0.049
3	-77.300	0.044	-32.394	7.808	-51.679	0.848	7.763
7	-71.617	0.085	-67.354	0.139	-69.503	0.109	0.054
10	-70.150	0.101	-66.761	0.149	-68.151	0.127	0.048



# 15 Motroterende felt og feil i dempevikling, Brutus, program 2b

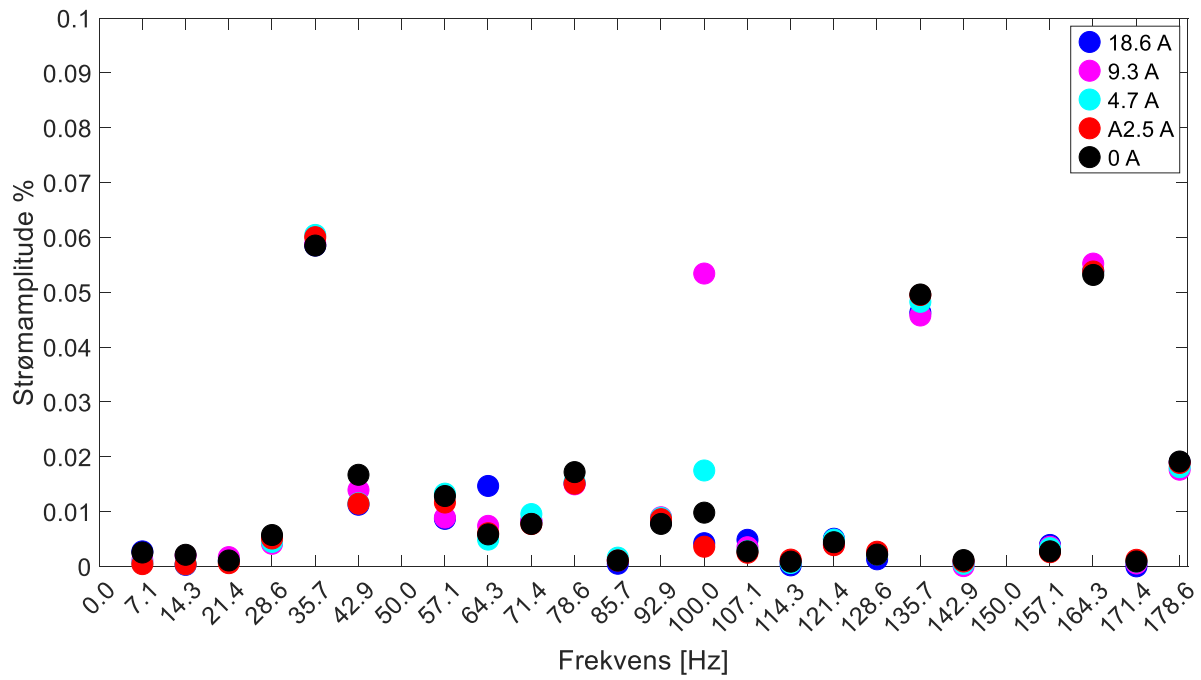
Alle prøvene ble kjørt med samme balanserte last. Fargekodene indikerer hvor stor skjevlasten var.

## 15.1 Frisk maskin



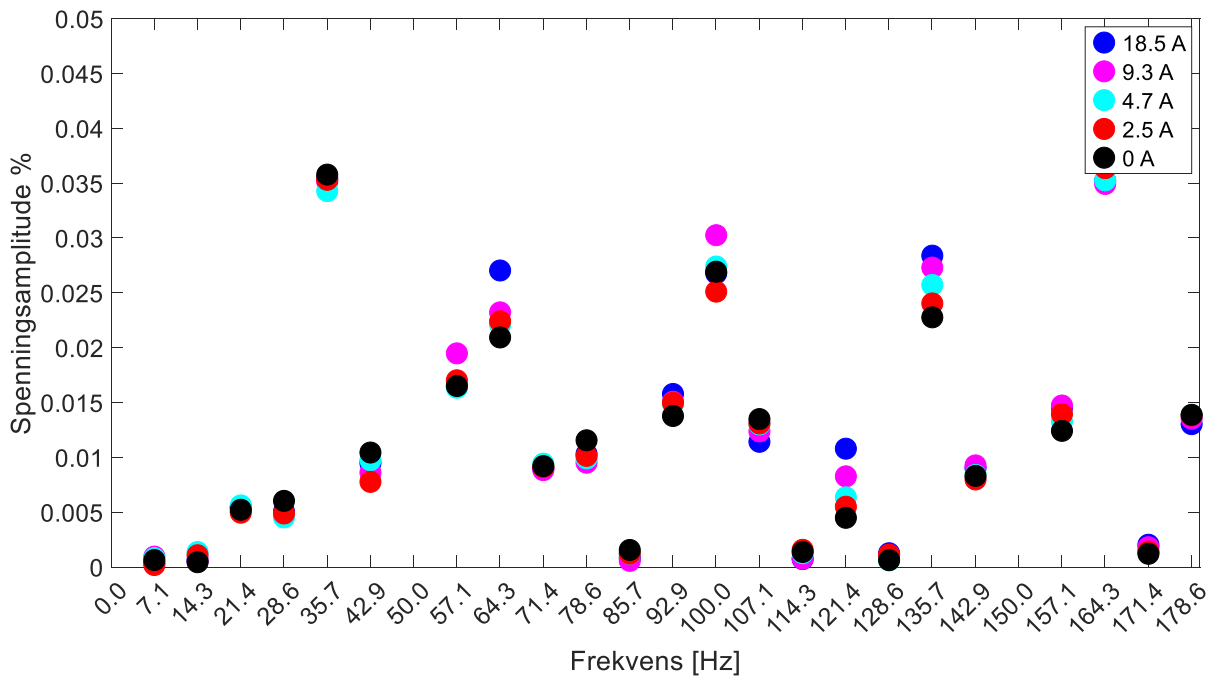
Figur 15.1: Spenning, Frisk maskin, Brutus, Program 2b

## 15-Motroterende felt og feil i dempevikling, Brutus, program 2b



Figur 15.2: Strøm, frisk maskin, Brutus, Program 2b

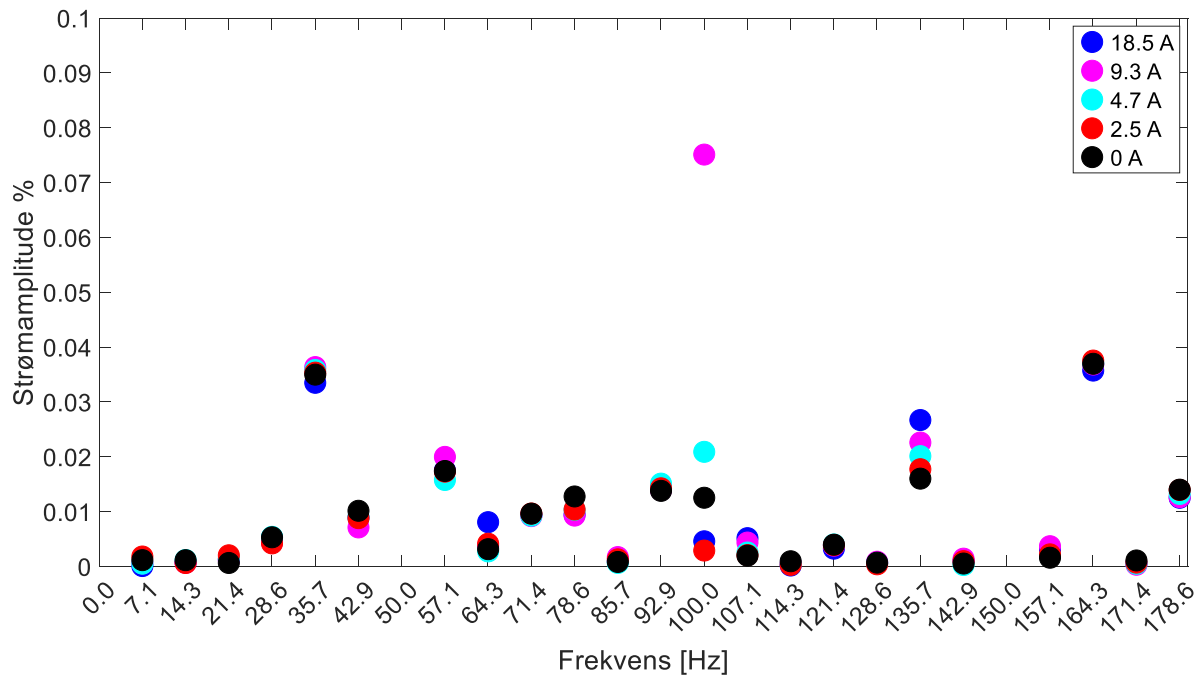
## 15.2 Feiltilsatnd 2 (Uten segment)



Figur 15.3: Spenning, uten segment, Brutus, Program 2b

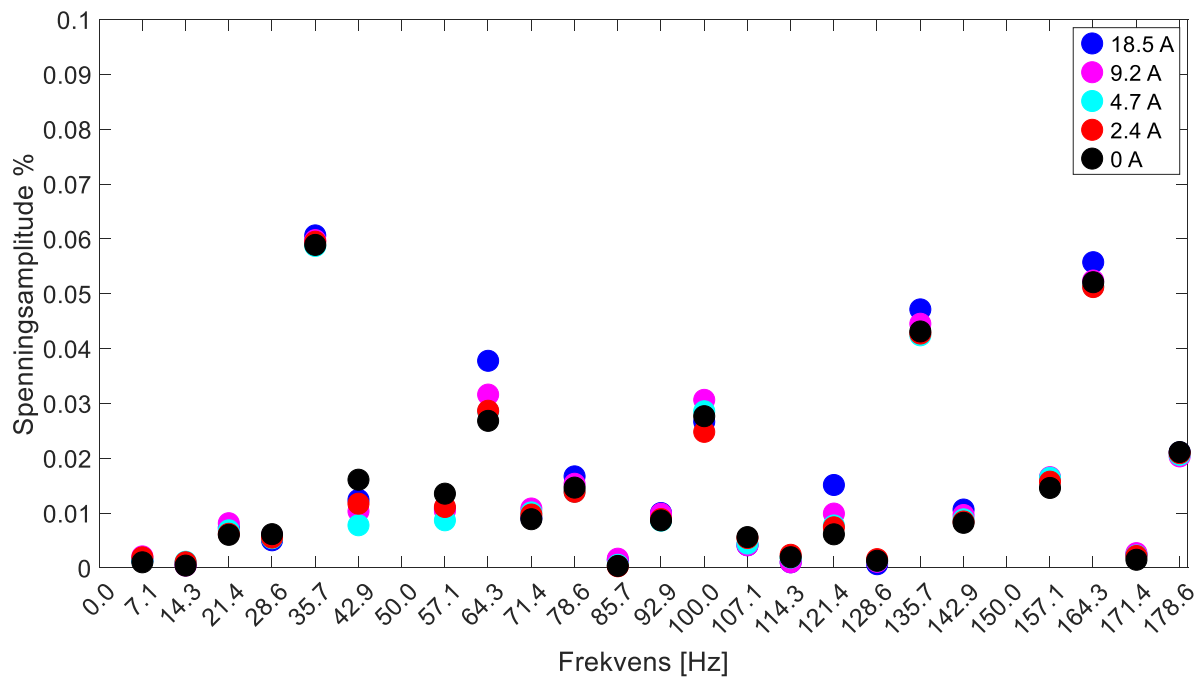


## 15-Motroterende felt og feil i dempevikling, Brutus, program 2b



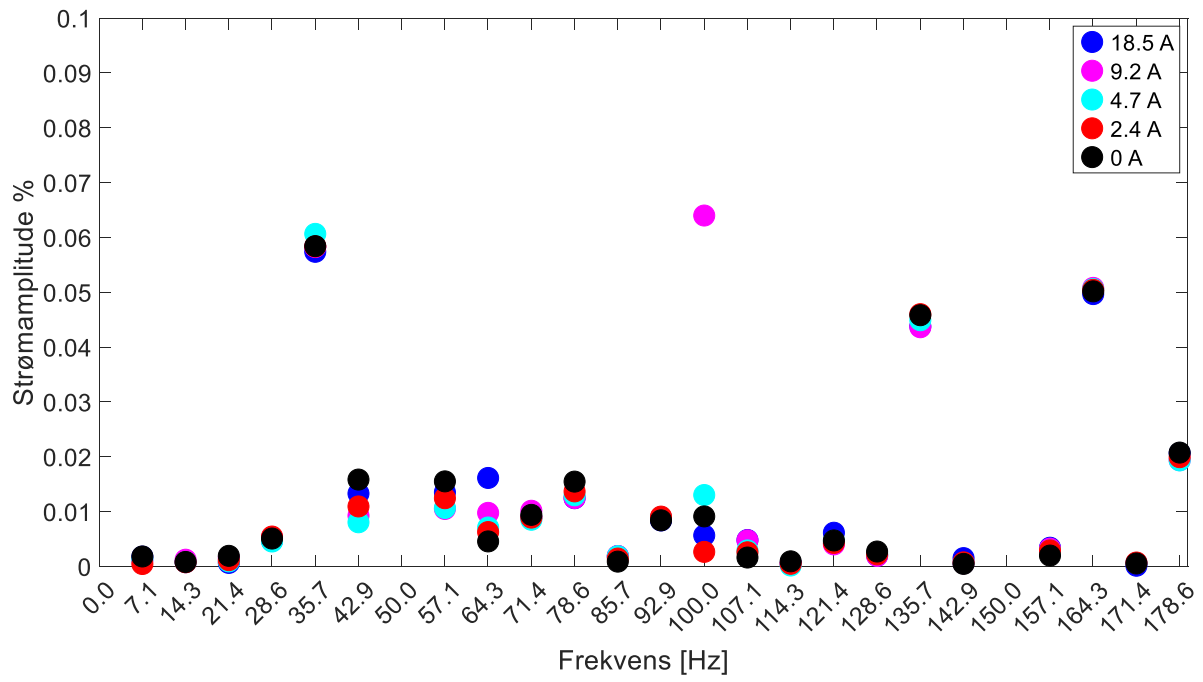
Figur 15.4: Strøm, uten segment, Brutus, Program 2b

## 15.3 Feiltilstand 1 (Uten stav)



Figur 15.5: Spenning, uten stav, Brutus, Program 2b

# 15-Motroterende felt og feil i dempevikling, Brutus, program 2b



Figur 15.6: Strøm, uten stav, Brutus, Program 2b

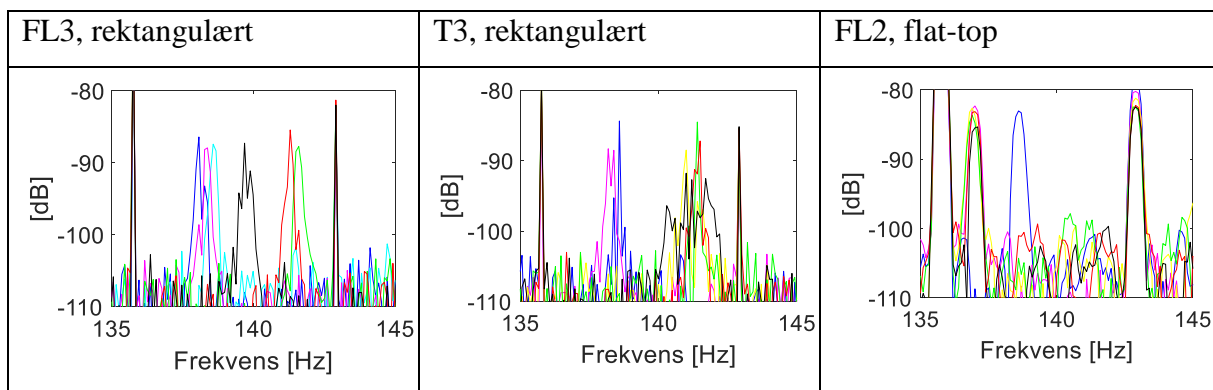
## 16 Andre frekvenser, Brutus

Det var ikke alle frekvenskomponentene i frekvensspekteret som fulgte de på forhånd utregnede mønstrene. Disse kan være resultat av indre faktorer som rotorens og statorens geometri, og/eller ytre faktorer som drivverk og den elektriske kretsen. Denne oppgaven skal ikke ta for seg alle mulige typer frekvenser og feil, men det er likevel viktig å kommentere tilstedeværelsen av både forklarlige og uforklarlig komponenter i frekvensspekteret.

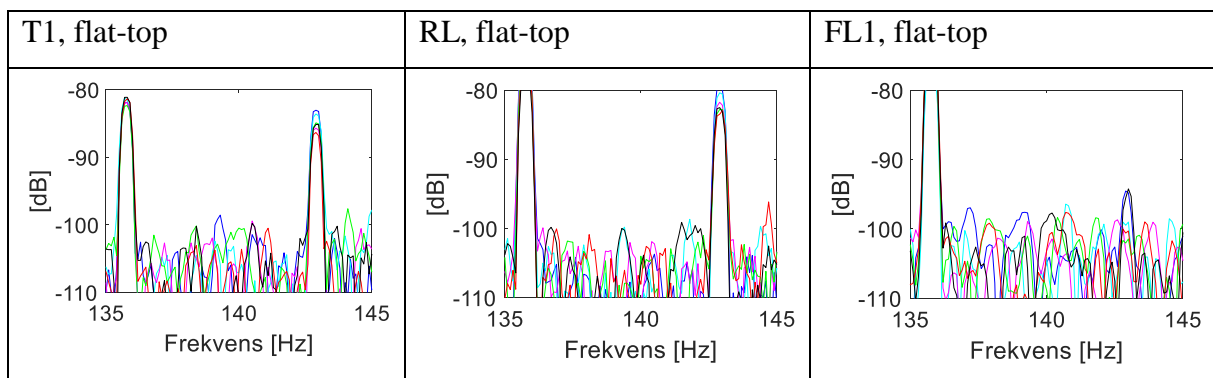
Det var et markert utslag i alle prøvene rundt 73.1 Hz, som ikke er en del av det spekteret som på forhånd kan knyttes til noen av feiltilstandene. 73.1 Hz var særlig tydelig når maskinen ble belastet.

I området 135 Hz til 145 Hz dukker det opp komponenter som varierte i frekvens og amplitude nå ROT 2044 ble brukt, både i strøm og spenning, se figur 16.1. Det samme skjedde ikke med MSO 3014, se figur 16.2

Tabell 16.1: Spenning i område 135 til 145 Hz, ROT 2044



Tabell 16.2 Spenning i området 135 Hz til 145 Hz, MSO 3014

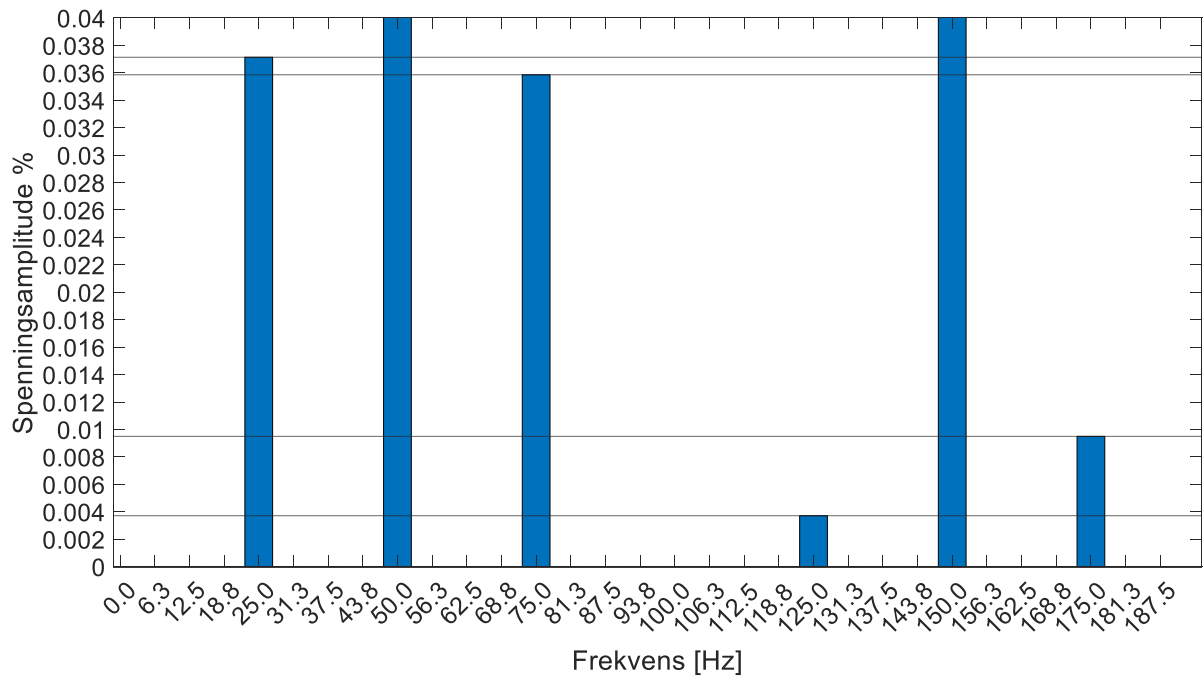




## 17 Resultat andre maskiner

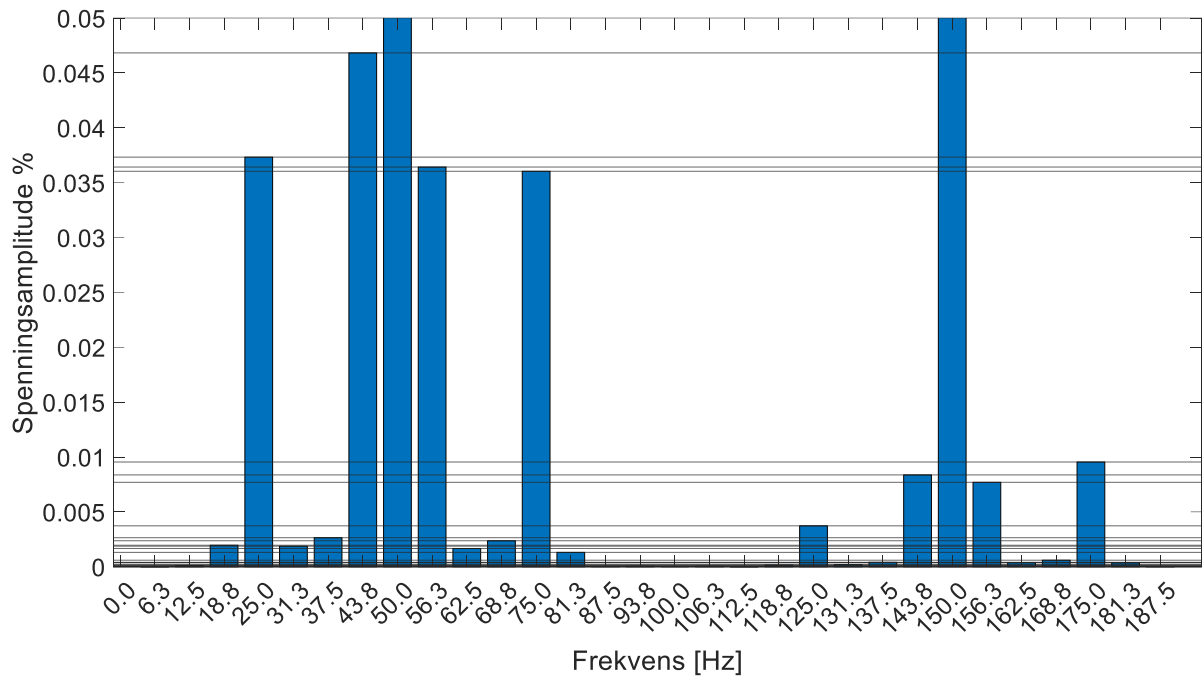
### 17.1 Ulefoss

#### 17.1.1 Analytisk modell Ulefoss

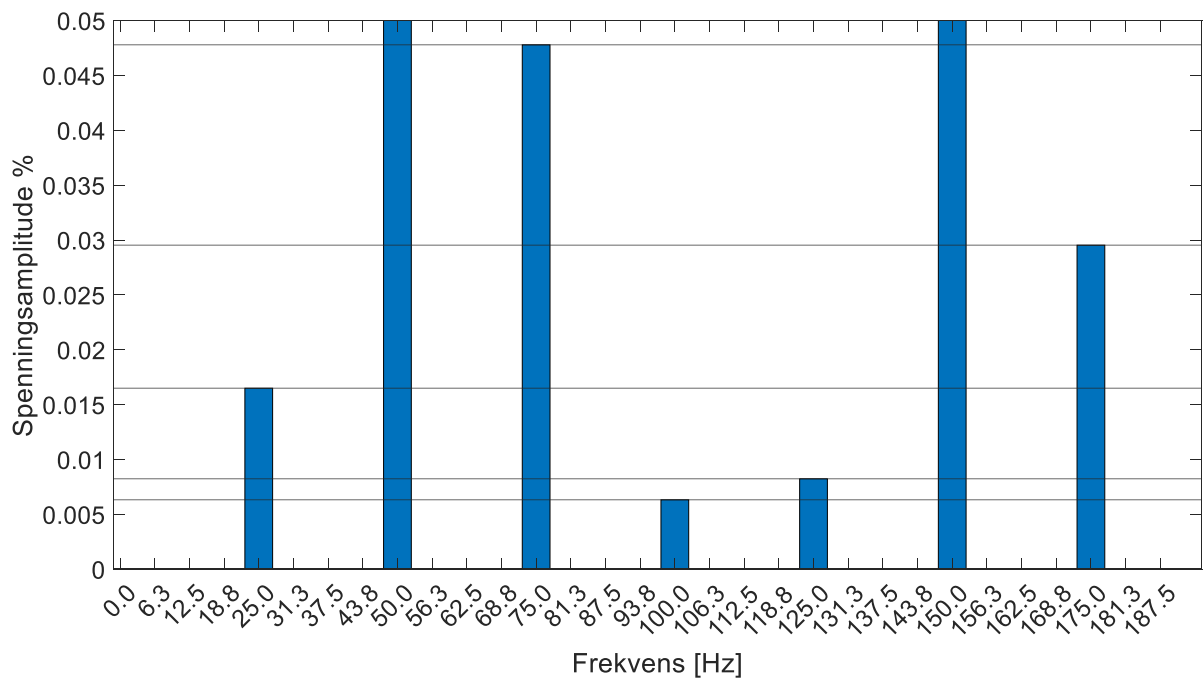


Figur 17.1: AM, KF 10 vindinger/17.9%, Ulefoss

## 17-Resultat andre maskiner



Figur 17.2: AM, SE 10%, KF 10/ 17.9%, Ulefoss



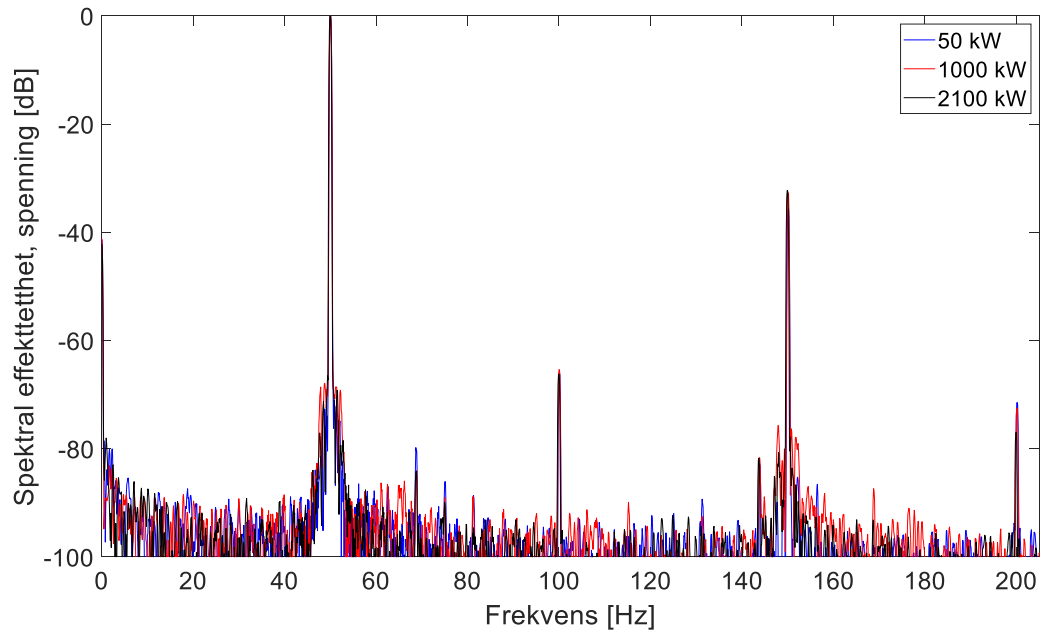
Figur 17.3: AM, DE 10%, Ulefoss

### 17.1.2 Program 1

Den estimerte frekvensen til den grunnharmoniske spenningskomponenten var 50.0474 Hz, 50.0344 Hz og 49.9816 Hz for henholdsvis 50 kW, 1000 kW og 2100 kW. Siden spennings og

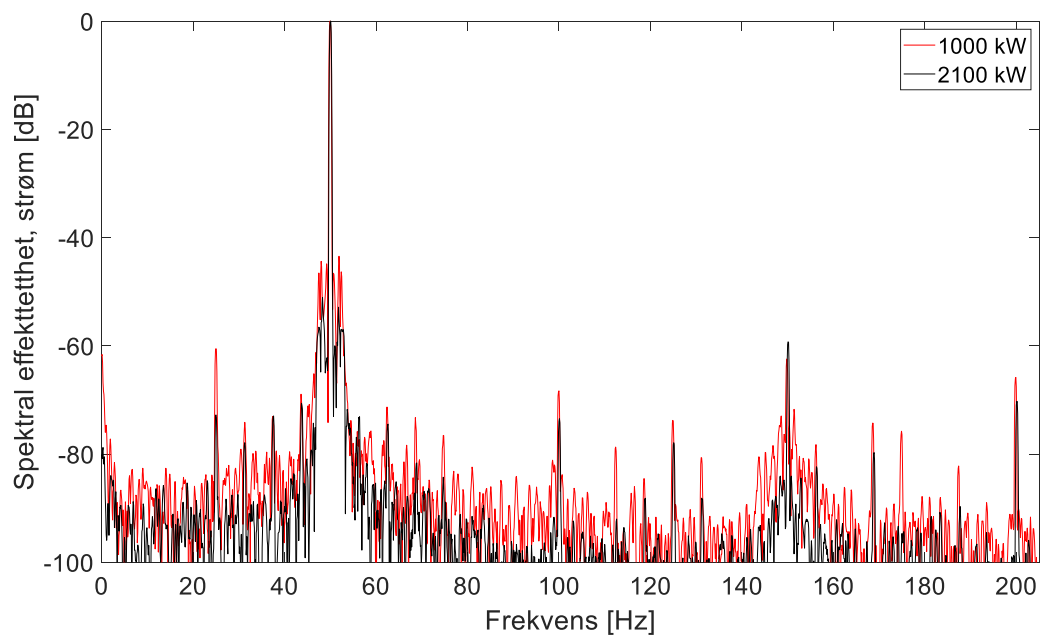
## 17-Resultat andre maskiner

strømprøvene ikke ble tatt opp samtidig vil de ha forskjellig frekvens på den grunnharmoniske. Den grunnharmoniske strømkomponenten hadde en frekvens henholdsvis på 49.9415 Hz, 49.9574 Hz og 50.0303 Hz.



Figur 17.4: Spenning Ulefoss, flat top-vindu

Sammenlignet med den fundamentale modellen av spenning så ser det ikke ut som om Ulefoss hadde en kortslutning i én pol. Det var et lite utslag på 75 Hz og 125 Hz i spenningen, som er til stede ved kortslutning i én pol, men de store 25 Hz og 75 Hz mangler.



Figur 17.5: Strøm Ulefoss, Hann-vindu

## 17-Resultat andre maskiner

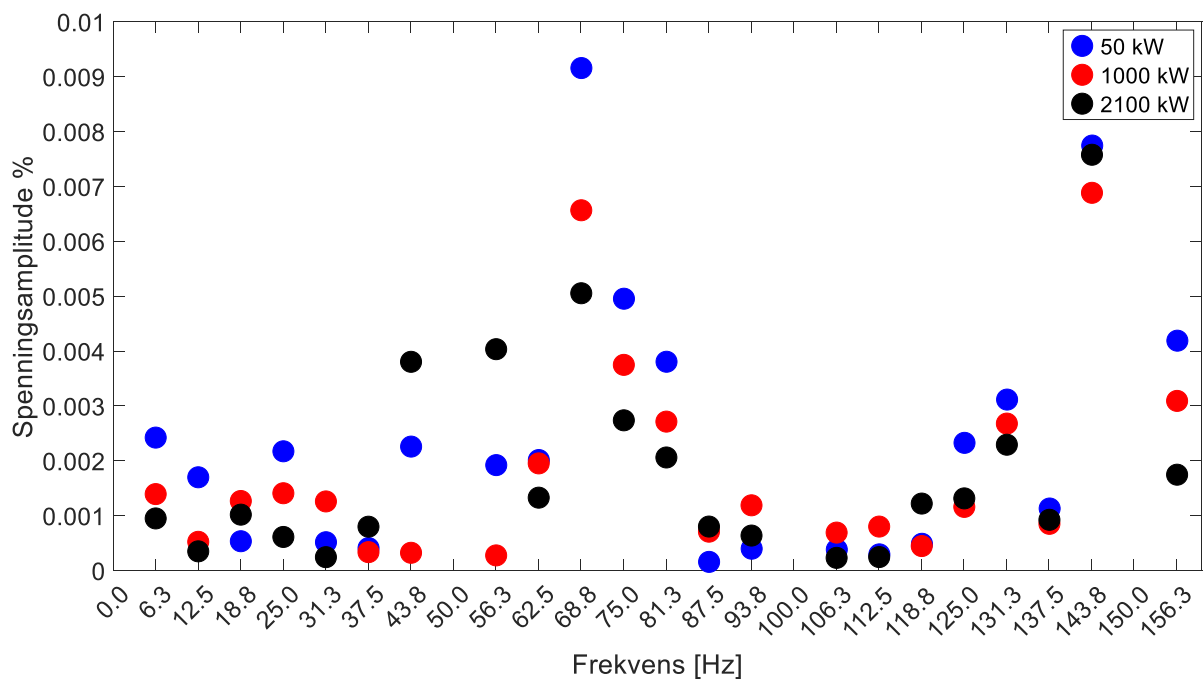
Amplituden på frekvenskomponentene var generelt høyere i forhold til den grunnharmoniske ved tomgang (50 kW) enn ved større pådrag. Med et pådrag på 50 kW var amplituden til 25 Hz på -67.6 dB, som tilsvarer 0.0038 A. Med et pådrag på 2100 kW var amplituden til 25 Hz på -71.64 dB, som tilsvarer 0.0480 A.

$$I = \frac{\sqrt{3} P}{3 U}$$

$$U = 3300 \text{ V}$$

Pådrag	Ankerstrøm
50 kW	9 A
1000 kW	175 A
2100 kW	367 A

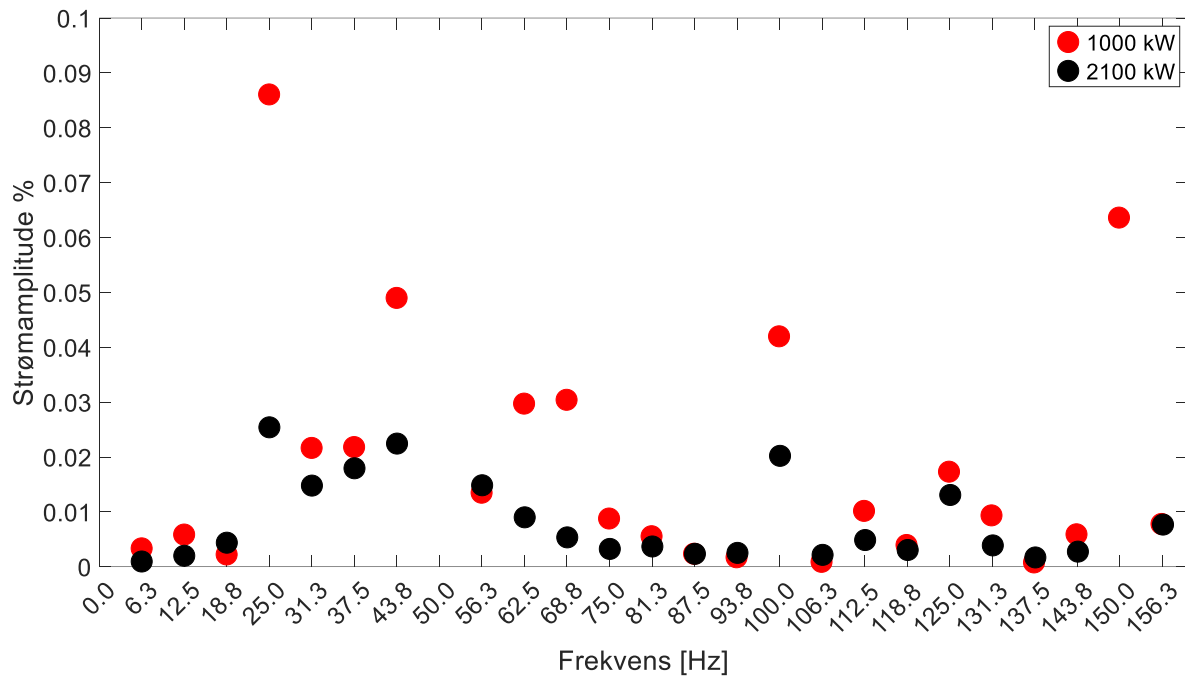
### 17.1.3 Program 2b



Figur 17.6: Spenning Ulefoss. Merk at 100 Hz har så høyt utslag at den ikke er med i figuren.



## 17-Resultat andre maskiner

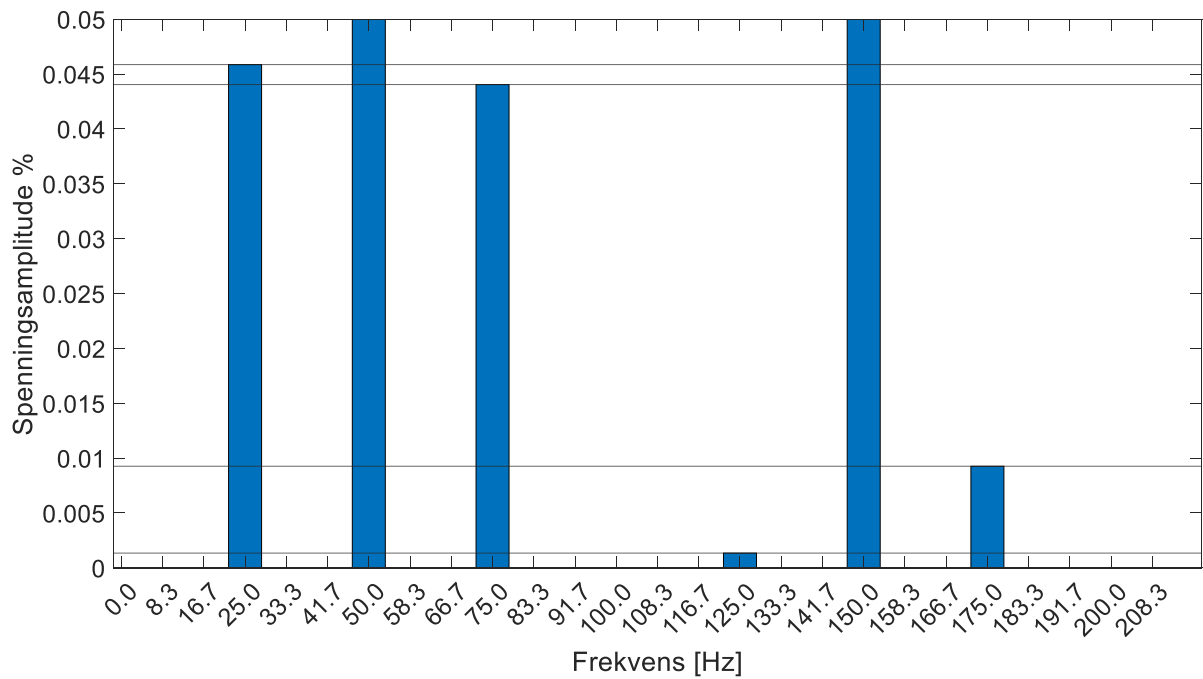


Figur 17.7:Strøm Ulefoss

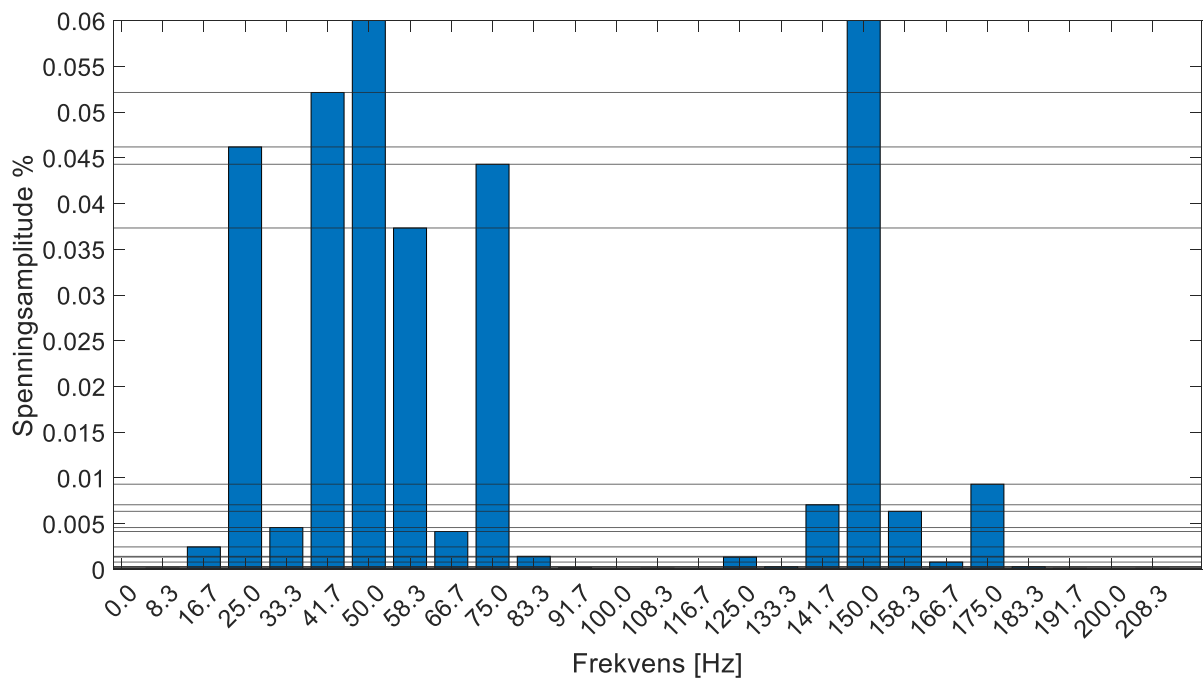
Program 2b hadde problemer med å tolke frekvensen til 1000kW spenningsprøven, slik at frekvensen ble manuelt satt til 50.0351 Hz og ikke 50.0344 Hz som det ble estimert av «frekvensfinder-algoritmen».

## 17.2 Liafoss

### 17.2.1 Analytisk modell Liafoss

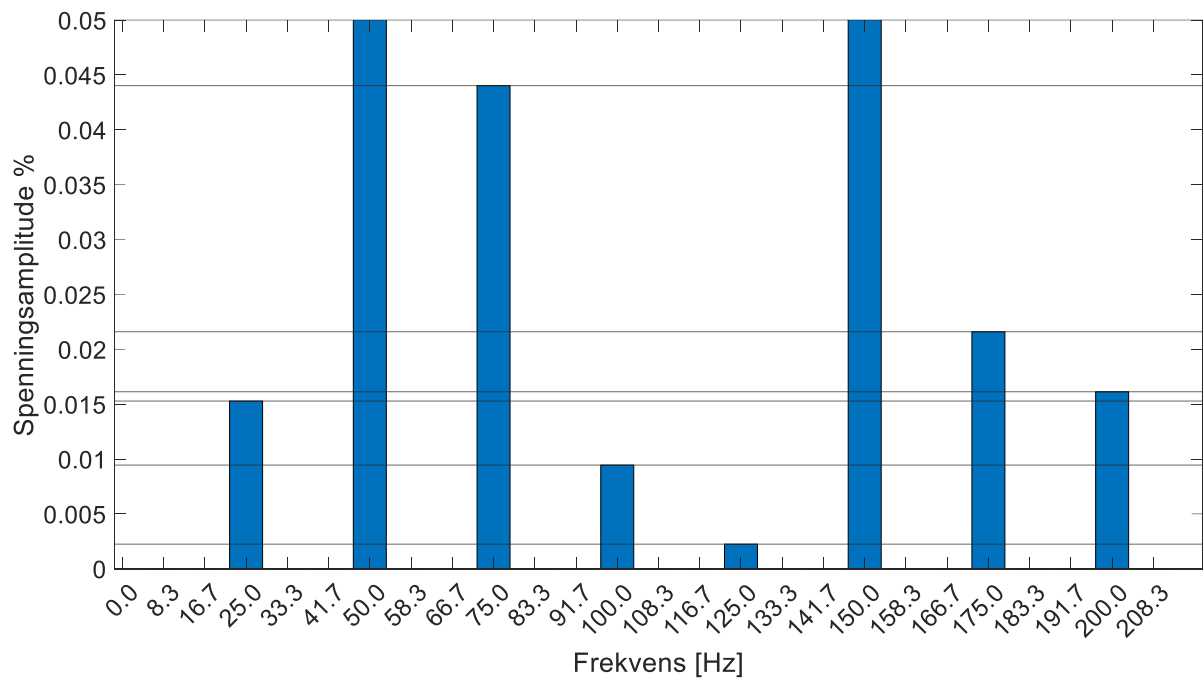


Figur 17.8: AM, KF 10, Liafoss



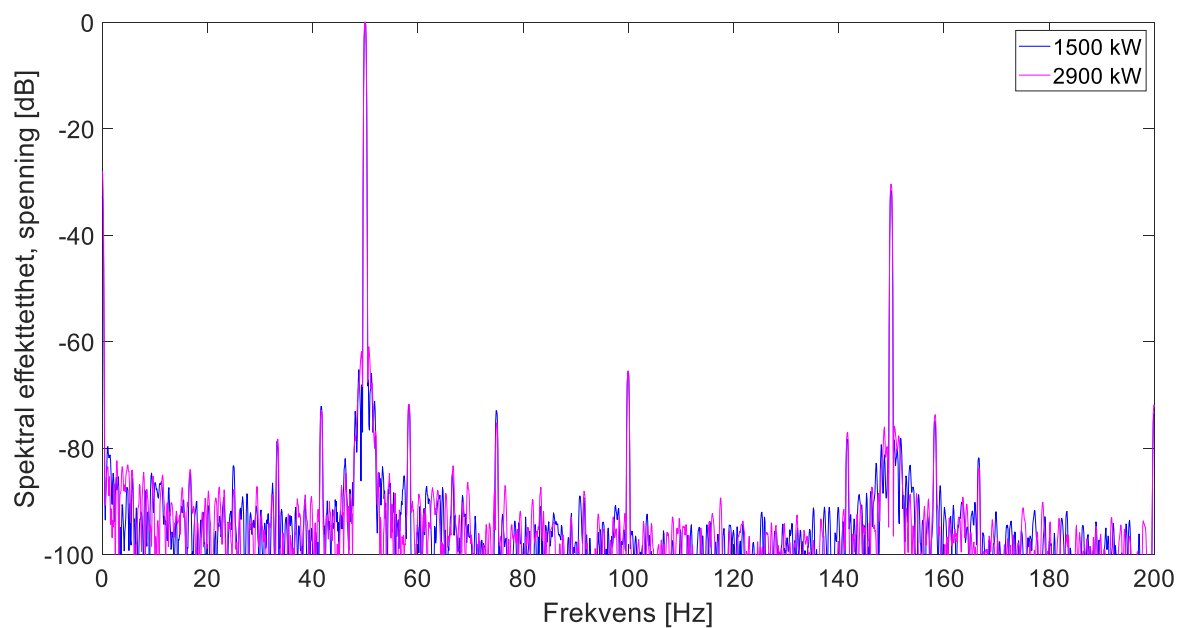
Figur 17.9: AM, SE 5%, KF 10, Liafoss

## 17-Resultat andre maskiner



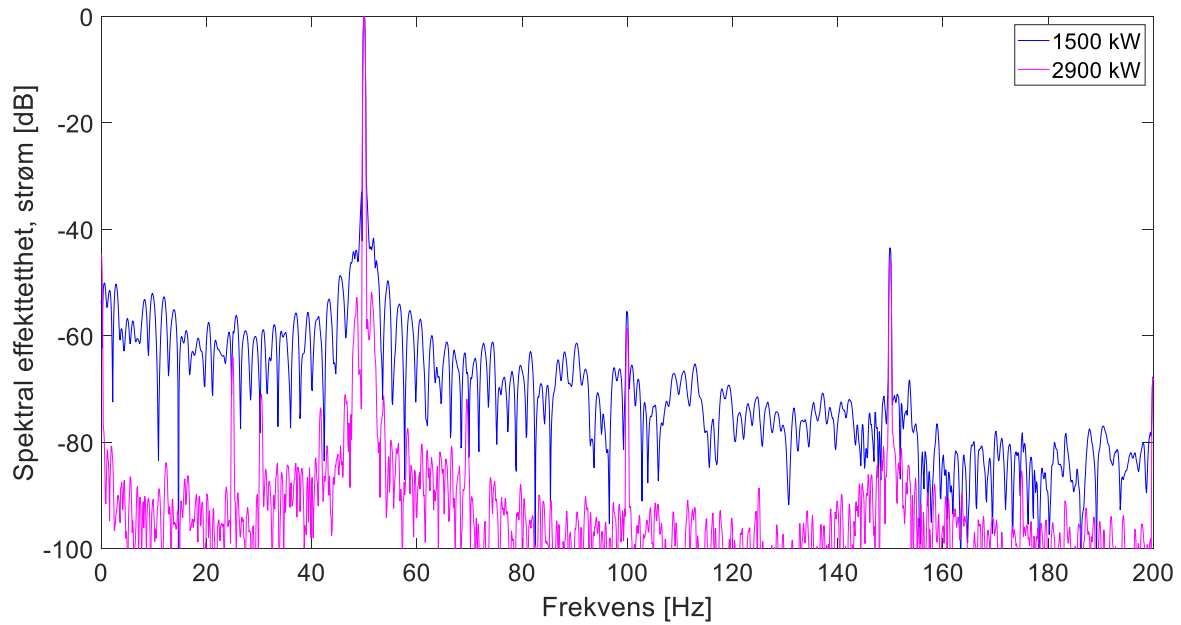
Figur 17.10: AM, DE 10%, Liafoss

### 17.2.2 Program 1

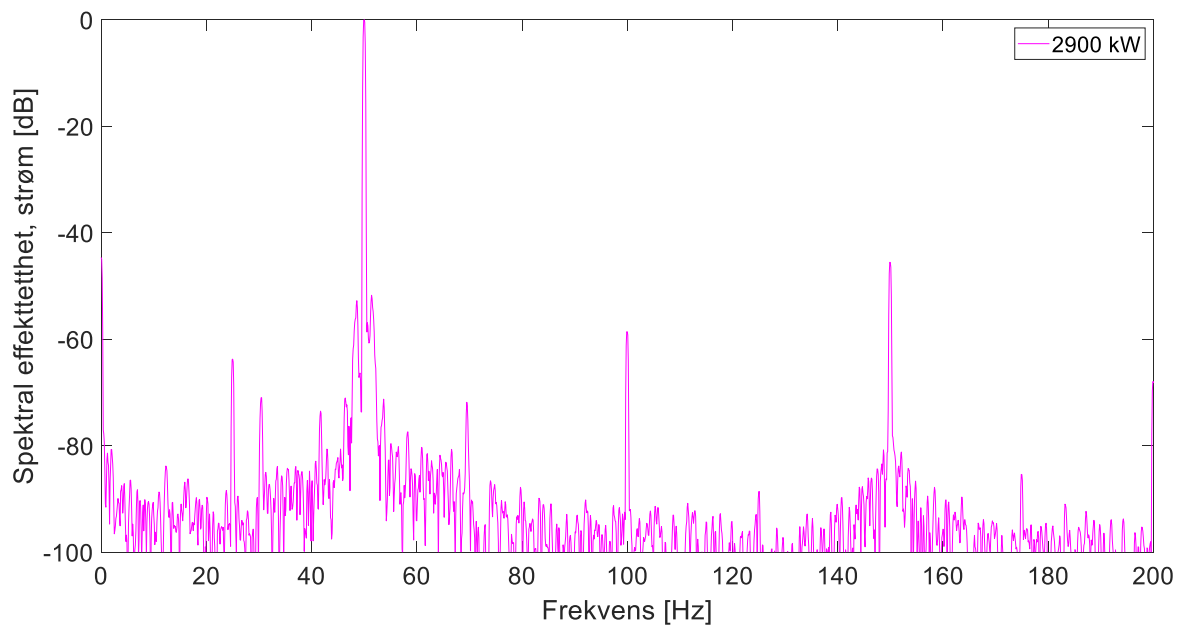


Figur 17.11: Spenning liafoss, Flat top-vindu

## 17-Resultat andre maskiner



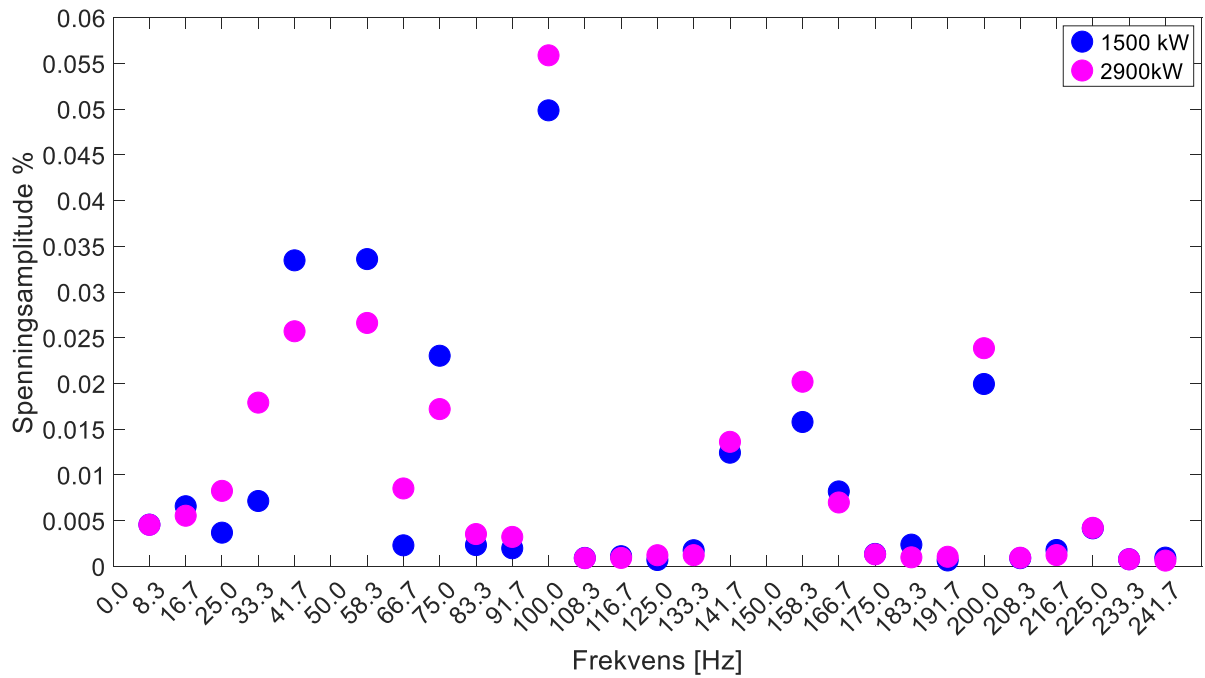
**Figur 17.12: Strøm liafoss, Flat top-vindu**



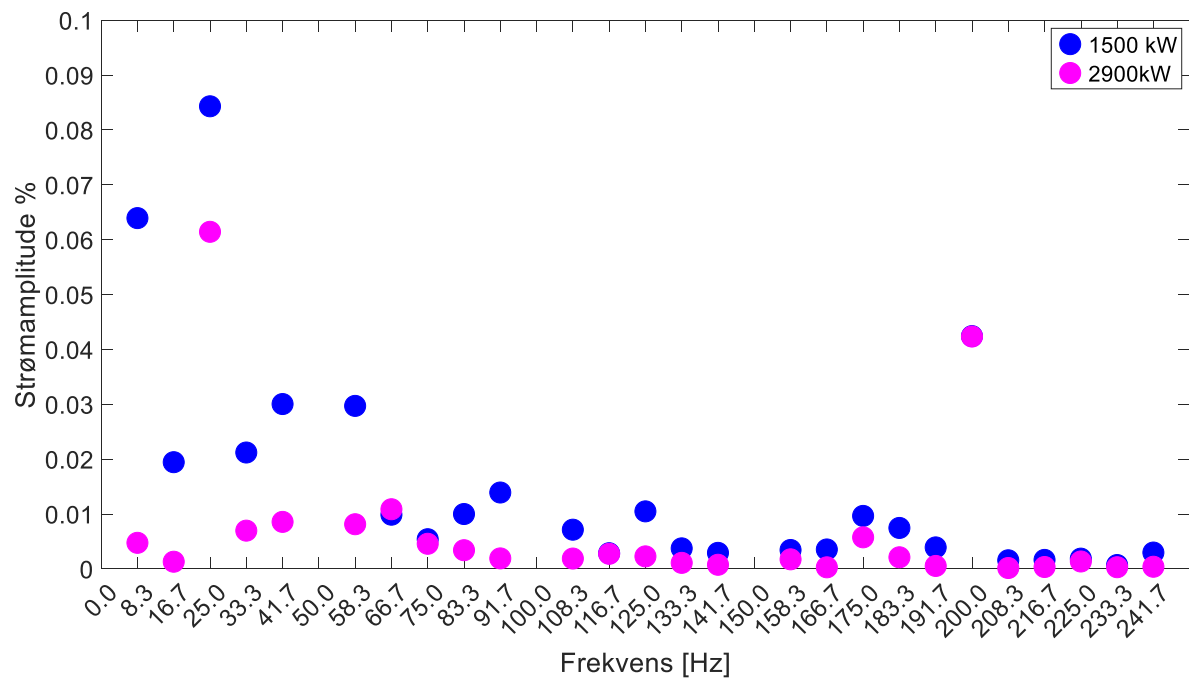
**Figur 17.13: Strøm Liafoss 2900 kW, Flat top-vindu**

Den estimerte frekvensen lå på 49.9910 Hz, slik at det ble trunkert bort 382 punktprøver av totalt 100 000. Resultatet uten frekvensestimering og trunkering ble så og si identisk, noe som tyder på at de valgte vinduene fungerte godt.

### 17.2.3 Program 2b



Figur 17.14: Spenning Liafoss



Figur 17.15: Strøm Liafoss



## 18 Diskusjon

Dette kapittelet diskuterer resultatene presentert i kapittel 12, 13, 14, 15, 16 og 17. Diskusjonen er delt inn i tematiske delkapitler. Det er så mange dimensjoner i resultatene at det ikke er lett å diskutere enkelttemaer isolert. Derfor diskuteres temaene delvis på tvers av delkapittel. Instrumentering og signalbehandling diskuteres i første delkapittel. Resultatene fra laboratoriet, de analytiske og numeriske modellene av Brutus diskuteres og sammenlignes i delkapittel 18.2. Dette delkapittelet er delt inn i seksjoner som tar for seg kortslutning i feltvikling (KF), dynamisk eksentrisitet (DE), statisk eksentrisitet (SE), lagrene og giret, frekvens 35.7 Hz, last vs. tomgang, brudd i dempevikling og skjevlast, og til slutt en kort diskusjon rund muligheten for å teste komplekse feil i de analytiske modellene. Resultatene fra vannkraftgeneratorene blir diskutert i kapittel 18.3.

### 18.1 Instrumentering og manipulering av signalet

Amplitudene på feilfrekvensene (altså frekvensene  $f_f$  gitt av (3.1)) i det syntetiske signalet fra FEM-modellen fikk lik amplitude for Flat-top-vinduet og Hann-vinduet, selv om vinduernes grafiske fremstilling av frekvensspekteret helt klart var forskjellig. For signalet fra den ekte Brutus var derimot saken en annen. Den brede hovedloben til Flat-top slo sammen ved noen tilfeller frekvenser som Hann-vinduet mente var nærliggende frekvenskomponenter. Hvis disse nærliggende frekvensene oppstod som et resultat av frekvensvariasjon og/eller transienter så kan det være ønskelig med en bred hovedlobe. Det er derimot uheldig hvis faktiske separate frekvenser blir bedømt som én. 21.4 Hz og 21.8 Hz ble skilt ut som to separate topper med Hann-vinduet, men ikke med Flat-top-vinduet. Det rektangulære vinduet i program 2a hadde så dårlig oppløsning at den nærmeste nabofrekvensen til 21.4 Hz lå godt over 22 Hz. Energien i en eventuell 21.8 Hz hadde dermed lekket ut til nabofrekvensene. Program 2b hadde tilsvarende oppløsning som program 1, og skilte derfor mellom de to frekvenskomponentene. 21.8 Hz hadde ingen økende eller minkende trend med tanke på kortslutningsfeil. Var det da et tap å ikke få med seg denne frekvensen ved bruk av en bred hovedlobe eller kort signal slik at frekvensoppløsningen ble dårlig? Siden energien i denne nabofrekvensen så ut til å være uavhengig av feilen gjorde vindusvalget og signallengden neppe noe utslag. 21.4 Hz, 78.6 Hz,

## 18-Diskusjon

121.4 Hz og 178.6 Hz hadde alle en litt mindre nabofrekvens. Det var vanskelig å anslå den nøyaktige frekvensen til denne komponenten siden den ikke var et multiplum av  $\Delta f_{DFT}$ .

Det var ikke mulig å skille de laveste feilgradene av KF (1,2,3 kortsluttede vindinger) fra frisk feltvikling. Det ble først mistenkt at det var for dårlig oppløsning på oscilloskopet som hadde skylden, eller at manipuleringen og analysen av signalet ikke var presis nok. Dette kan sikkert ha bidratt, men det er helt klart ikke hele forklaringen på hvorfor det ikke var mulig å detektere de laveste gradene av KF. Den automatiske vurderingen, det vil si tabell type A og B, ble laget med det utgangspunkt at den eneste feilen Brutus hadde var den vi påsatte, det vil si KF. Denne antagelsen viste seg å være feil. Det var trolig innslag av statisk og dynamisk eksentrisitet. Som det skal diskuteres i de neste delkapitlene, så var det trolig interaksjon mellom feiltypene samt tidsvarierende faktorer som gjorde at det ikke var mulig å bruke en enkel algoritme til å vurdere resultatene.

Både Flat-top og Hann-vinduet fungerer på råsignalet uten trunkering eller omtasting. Flat-top-vinduet var helt klart bedre enn Hannvinduet når signalet ikke ble trunkert. Den brede hovedloben til Flat-top-vinduet gjorde at selv om DFT-analysen bommet på feilfrekvensen, så ville amplituden til nabofrekvensene være omtrent like. Bieffekten av dette var, som nevnt, at nærliggende frekvenser ble slått sammen. Hann-vinduets sterke side var derfor muligheten til å finne andre frekvenskomponenter i strøm og spenning fra andre kilder enn de diskutert i denne oppgaven. Det rektangulære vinduet ble spesialdesignet for å gå etter et bestemt mønster, slik at alt som ikke følger dette frekvensmønsteret risikerer å lekke til nærliggende frekvenser.

Lengden på signalet har mye å si for oppløsningen og bredden på hovedloben til vinduene. Det ble prøvd med analyser på signaler med lengder helt nede i  $7 T_{mek}$  (i underkant av 1 sekund) og helt opp til 10 sekunder. Det er helt klart å foretrekke et langt signal slik at frekvenskomponenter som skyldes andre fenomen enn KF, DE og SE kan oppdages og skilles fra hverandre, men det var helt klart mulig å oppdage rotorfeil med signallengder på  $7 T_{mek}$ .

Program 2a delte signalet i 10 biter på 1 sekund hver. Variasjonen mellom amplituden på disse bitene hadde en tendens til å være noe mindre på de prøvene som kom fra det 16-bit oscilloskopet sammenlignet med de prøvene som var tatt med 11-bit oscilloskopet. Denne variasjonen var ikke stabil mellom prøvene, slik at det kan være andre forhold som påvirket dette vel så mye som oppløsningen på oscilloskopet. Variasjonen til én frekvens var ofte den samme, uavhengig av antall KF. 21.4 Hz i FL1 varierer jevnt over med ca. 0.03 V. 78.6 Hz fra samme prøve variere derimot med hele 0.075V. Frekvensene hadde lignende gjennomsnittlig



## 18-Diskusjon

amplitude. Det kan dermed knyttes en spesifikk usikkerhet til de forskjellige frekvensene. Er denne variasjonen alltid mindre for 16-bit oscilloskopet (ROT 2044) enn for 11-bit oscilloskopet (MSO 3014)? Nei, for eksempel så varierer 64.3 Hz mindre i prøvene fra oscilloskopet med 11-bit enn det med 16-bit. Noe av denne variasjonen kan stamme fra selve DFT analysen og manipuleringen av signalet. Program 2 klarer ikke nødvendigvis å estimere frekvensen eksakt, og det vil påvirke analysen.

De to oscilloskopene, ROT 2044 og MSO 3014, ga definitivt ikke samme svar, men det er ikke sikkert at det var den vertikale oppløsningen sin skyld. Det er mulig det var andre flaskehalsar. Oscilloskopene og måleutstyret har måleusikkerhet som ikke er knyttet til antall bit. Naturlige variasjoner i laboratoriekretsen og Brutus kan ha ført til variasjonene i amplitudene. Variasjonen i amplitudene til frekvenskomponentene var uavhengig av feilen, men siden amplitudene til den friske maskinen og de laveste feilgradene var veldig liten, ble den relative usikkerheten stor.

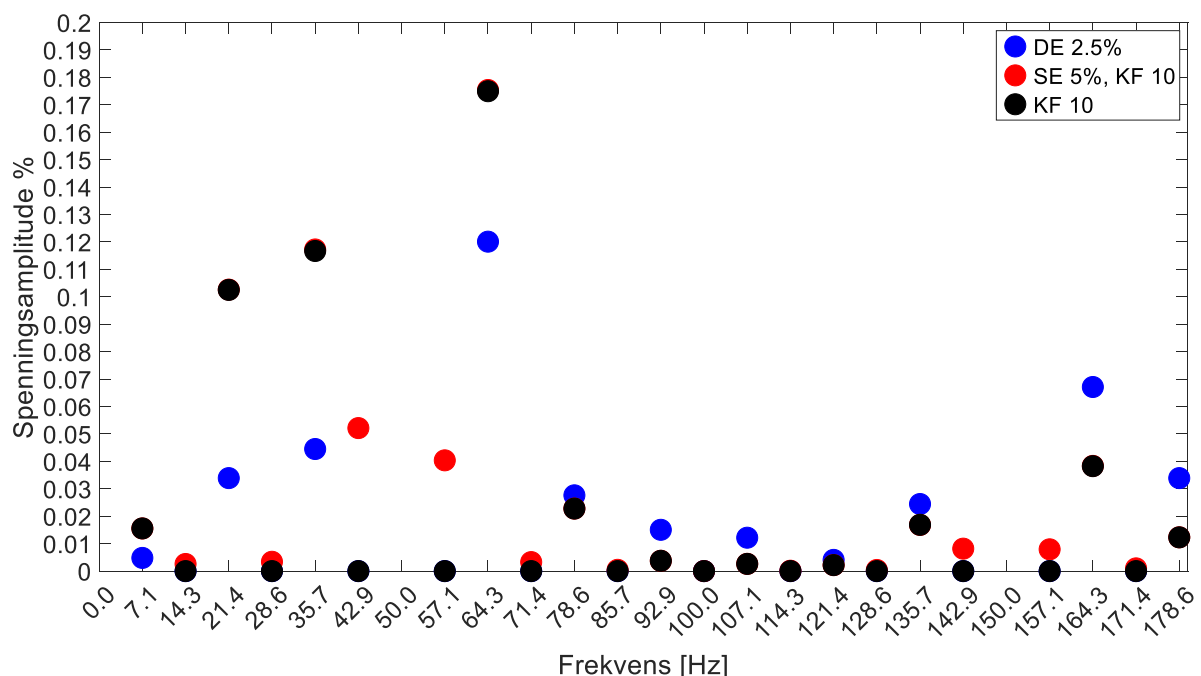
Begge oscilloskopene viste mange av de samme trendene når signalene ble sammenlignet med andre signaler fra samme oscilloskop. Når prøvene ble sammenlignet på tvers av oscilloskopene var det noen ulikheter. Enkelte frekvenser og fenomener skilte de to oscilloskopene. Amplituden til 100 Hz var langt høyere når ROT 2044 (16-bit) ble brukt, omtrent i området 0.09 %. Med MSO 3014 (11-bit) fikk 100 Hz en amplitude i området 0.02-0.04 %. Dette høres veldig lite ut, men sammenlignet med de andre frekvensene som ble undersøkt så var dette en voldsom økning. Hvorfor bytte av oscilloskop skulle påvirke nettopp denne frekvensen vites ikke.

Mellom 135 Hz og 145 Hz kunne tilsynelatende litt tilfeldige frekvenser plutselig få en stor amplitude, se kapittel 22. Årsaken til fenomenet kan være så mangt, men det er en ting som skiller seg ut. Dette fenomenet var bare til stede i ROT 2044. Enten så oppstod frekvensene bare når ROT 2044 ble brukt, eller så var det bare ROT 2044 som var sensitiv nok til å oppdage disse frekvensene. En annen mulig forklaring er at frekvensen aldri var der i utgangspunktet, men var et produkt av aliasing, altså at høye frekvenser opptrer som lav. Fenomenet kan oppstå for frekvenser som er større enn halvparten av tastefrekvensen. Begge oscilloskopene ble brukt i «hi res»-modus, som gjør at den vertikale oppløsningen øker på bekostning av horisontal oppløsning/båndbredde. I manualen til oscilloskopene ble det påstått at det var filter som skulle hindre aliasing når «hi res» ble brukt, slik som det ble beskrevet i kapittel 9. Begge oscilloskopene hadde i utgangspunktet en oppløsning 8-bit, og når dette da skal gjøres til

effektive 11- og 16-bit i henholdsvis MSO 3014 og ROT 2044, så kan det helt klart skje ting på veien.

## 18.2 Deteksjon av feil, Brutus

Resultatene til Brutus antyder at det var flere typer feil som varierte over tid. Dette gjør det ekstra krevende å diskutere resultatene siden det er så mange dimensjoner ved resultatene. Diskusjonene vil bli delt inn i delkapitler etter type feil, selv om det i utgangspunktet er vanskelig å skille disse fra hverandre. Innledningsvis vil det være en kort diskusjon om hva man kunne forvente av forskjeller på kortslutning i feltvikling (KF), dynamisk eksentrisitet (DE), og statisk eksentrisitet (SE) fra den analytiske modellen. De påfølgende avsnittene vil diskutere hver feiltipe i dybden.



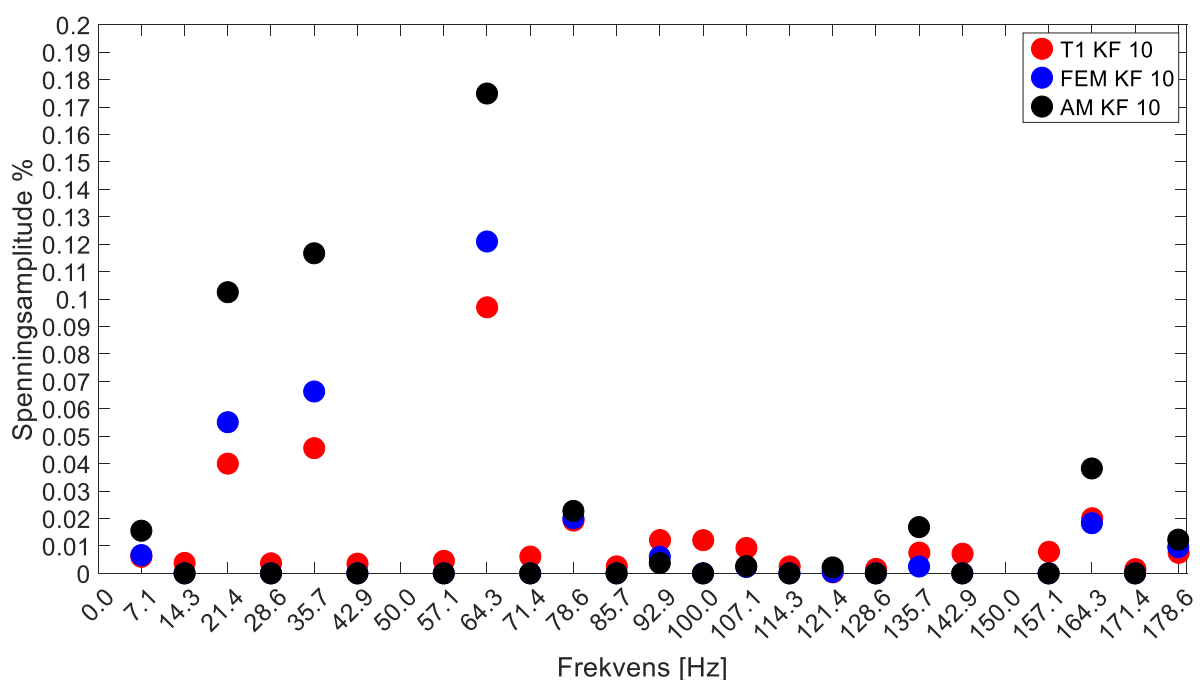
Figur 18.1: Analytisk modell. Sammenligning av KF, SE og DE.

Spektrene for kortslutning (KF), statisk eksentrisitet (SE) og dynamisk eksentrisitet (DE) lignet hverandre i AM, men de hadde sine særtrekk, se figur 18.1. KF og DE fikk i stor grad utslag på de samme frekvensene, hadde litt forskjellige forhold mellom frekvensene som ga dem hvert sitt «fingeravtrykk». 21.4 Hz, 35.7 Hz og 65.3 Hz hadde tydelig utslag på begge feiltypene. DE kunne skilles fra KF ved at amplitdeforskjellen mellom 64.3 Hz og 35.7 Hz var større ved dynamisk eksentrisitet. 21.4 Hz og 35.7 Hz fulgte hverandre og var omtrent jevn høye. KF hadde markert utslag på 21.4 Hz, 35.7 Hz og 64.3 Hz, der de to førstnevnte hadde omtrent 2/3 av utslaget til 64.3 Hz. Dynamisk eksentrisitet ga utslag på de samme frekvensene, men

amplituden til 21.4 Hz og 35.7 Hz var omtrent 1/3 av amplituden til 64.3 Hz. Frekvenser høyere oppe i spekteret, 164.3 Hz, 178.6 Hz og 192.9 Hz fikk et økt utslag og et annet forhold mellom dem ved DE sammenlignet med KF. Kombinasjonen SE og KF ga de samme utslagene som for KF, men hadde i tillegg utslag på de like (2., 4., osv.) harmoniske til  $f_{mek}$ , der det ikke hadde vært noe utslag før. 42.9 Hz og 57.1 Hz økte raskt med økende statistisk eksentrisitet. De økte også med økende kortslutning, men holdt ikke følge med kortslutningsfrekvensene. Det var med andre ord mulig å sammenligne 42.9 Hz og 57.1 Hz med 21.4 Hz, 35.7 Hz og 64.3 Hz for å avgjøre hvor mye kortslutning og statistisk eksentrisitet det var.

### 18.2.1 KF, Brutus

AM og FEM var samstemte i at KF primært kunne oppdages ved å se på 64.3 Hz, 35.7 Hz og 21.4 Hz, hvorav amplituden til førstnevnte var klart størst, mens de to andre hadde i overkant av halve amplituden til 64.3 Hz, se figur 18.2. Sekundært ga 78.6 Hz og 164.3 Hz utslag på om lag en tredel av 21.4 Hz. FEM vurderte amplitudene til å være omtrent 80% av amplitude i AM. Ved last i FEM dukket også 135.7 Hz opp i spenningen som en mulig KF-frekvens, og var på størrelse med 164.3 Hz.



Figur 18.2 T1 KF 10 vs FEM KF 10 og AM KF 10

Mønsteret fra AM og FEM stemmer i stor grad overens med mønstrene til prøvene fra den virkelige Brutus. 64.3 Hz ble vurdert til ca 0.1 % i T1, 0.07 % i T2 og 0.1 % i T3. Dette er omtrent 10 % mindre enn det FEM kom frem til. Variasjonen mellom T1, T2 og T3 mistenkes

## 18-Diskusjon

å skyldes DE, jamfør den teorien som ble presentert i forrige delkapittel. Amplituden til 64.3 Hz ved 10 KF var noe lavere ved last enn i tomgang i FEM, men det omvendte så ut til å være trenden i den virkelige Brutus. Denne «ekstra» amplituden i de virkelige prøvene kan være på grunn av økende DE ved økende KF.

Det varierer en del mellom prøvene hvorvidt det er mulig å oppdage kortslutning fra første kortsluttede vinding, altså 1 KF. Dette kan ha sammenheng med DE. Uansett så var det noen frekvenser som var mer konsekvente enn andre. 64.3 Hz var mer konsekvent enn 35.7 Hz og 21.4 Hz når det kom til å vise en økende trend ved økende KF. 35.7 Hz hadde en oppførsel som avvek såpass fra det forventede at frekvensen vurderes som uegnet til å oppdage KF isolert sett. En av de mest konsekvente frekvensene var 78.6 Hz. Det var flere av frekvensene over 78.6 Hz som også kan vurderes som konsekvente til å skille KF fra første feil, til tross de lave amplitudene.

Er det mulig å sette en terskelverdi ut fra AM eller FEM som kan brukes på den virkelige maskinen? AM og FEM setter amplitudene til alle frekvenskomponentene på en frisk maskin til tilnærmet null. I virkeligheten hadde en frisk Brutus utslag som kunne tilsi både 1,2 og 3 kortslutninger ifølge FEM. AM ga høyere verdier på første feil enn FEM, slik at AM sånn sett hadde egnet seg bedre til å regne ut en konservativ terskelverdi. Trolig ville det å sette en terskelverdi, både med FEM og AM, ført til en mengde falske positive KF-diagnoser. Det er først og fremst trender man bør se etter, og AM og FEM sier veldig mye om hvilke trender man kan forvente. FEM modellen var i så måte unødvendig komplisert for å finne en forholdsvis enkel trend. Dette klarer AM helt fint på 30 sekunder på en middelmådig datamaskin, kontra 4 dager med FEM på en ekstern server. En FEM simulering gir dog god informasjon om strømmen, som vurderes nærmere i seksjon 18.2.6.

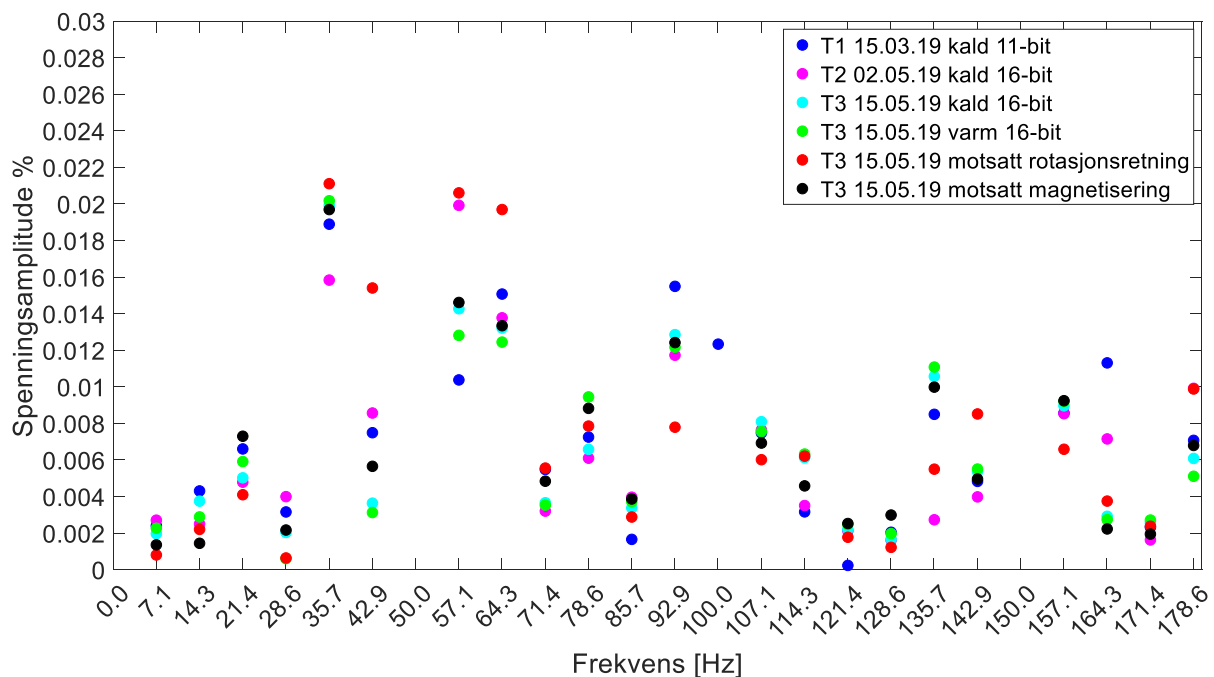
### **18.2.2 DE, Brutus**

FEM-modellen var ikke enig med AM når det kommer til DE. For det første ble utslaget veldig lite i FEM, selv med svært stor DE. Det grenser mot det som ikke er målbart, i hvert fall i tomgang. Ved FL i FEM var utslaget større og den økende trenden synlig mye tidligere, men mønsteret (forholdet mellom frekvenskomponentene) varierte med feilgraden. Ved de laveste feilgradene (opp til 5 % DE), lignet mønsteret i FEM og AM. Utslaget i FEM var omtrent hundre ganger mindre enn i AM. Når utslaget økte forandret mønsteret seg i FEM, og ble vidt forskjellig fra mønsteret i AM. Amplituden til 35.7 Hz vokste kraftig når DE økte fra 5 % til 10 % og var på linje med 64.3 Hz, som bare fikk noe høyere amplitude. 135.7 Hz vokste på samme

## 18-Diskusjon

måte som 35.7. Resten av frekvensene var på et relativt lavt nivå. Mønsteret forandret seg totalt ved hver økning av DE. Dette står i sterk kontrast til AM, der mønsteret var helt uavhengig av feilgrad. I FEM-analysen til [2] var det et mønster som i liten grad forandret seg med økende feilgrad, likt AM av Brutus. Nivået på komponentene i [2] ved DE var lave sammenlignet med KF, og dette ser vi igjen i FEM av Brutus. Mønsteret i AM av Brutus stemmer overens med FEM-modellene av Kalvedalen (som er av en helt annen generator vel å merke), men ikke amplituden på frekvenskomponentene. Omvendt er det for FEM av Brutus, der det tilsynelatende ikke eksisterte et mønster, men amplituden var på nivå med FEM-analysene i [2].

Det var ikke mulig å øke den dynamiske eksentrisiteten til Brutus i laboratoriet – trodde vi. Flukssensorene i luftgapet antyder at den dynamiske eksentrisiteten i Brutus var liten i starten av prosjektet, men har økt gradvis hver gang maskinen har blitt brukt[3]. KF vil resultere i en usymmetrisk kraft på rotor. Dette kan bøye og tøye i aksling og lager, og dermed øke DE. Det kan også hende at rotoren fra fabrikken hadde dynamisk eksentrisitet, men at denne først ga utslag etter at lagrene hadde kjørt seg inn (ut). Var det noen av frekvensene som forandret seg over tid? Kan disse knyttes opp mot DE i FEM eller AM?



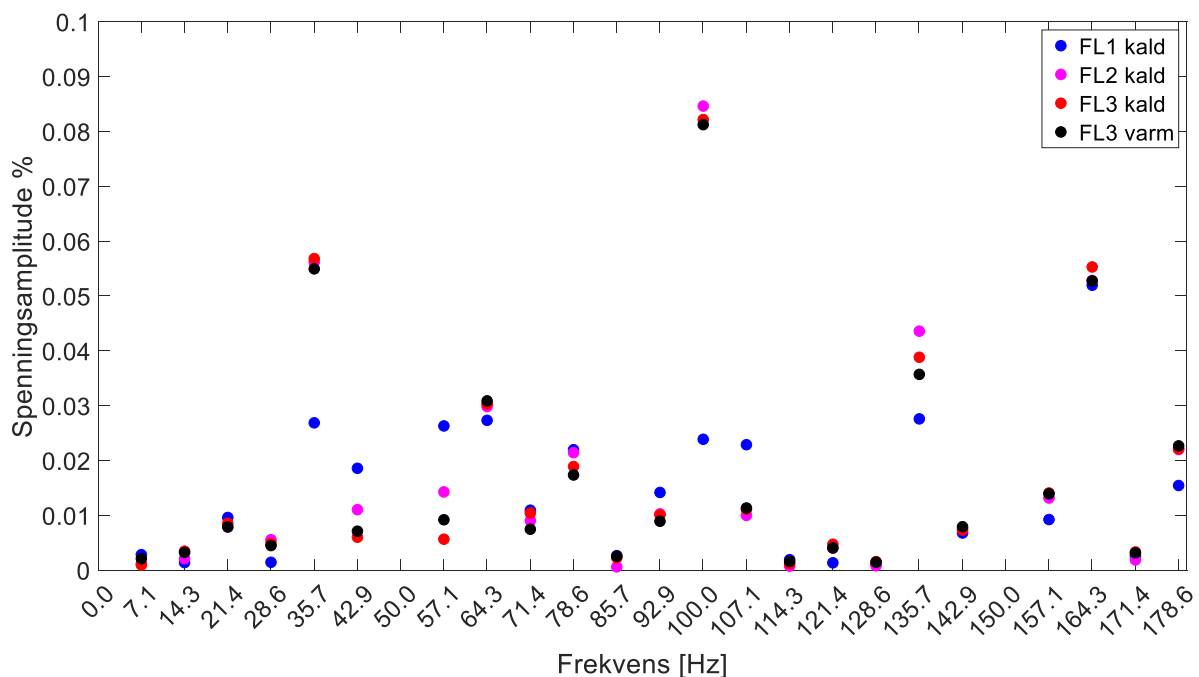
Figur 18.3: Spenning fra frisk maskin, tomgang. 100 Hz ligger på ca 0.08 % for alle andre enn T1

Hvis vi tar utgangspunkt i de tomgangsprøvene uten KF, så burde vi se et økende utslag på 35.7 Hz og 164.3 Hz. For det første kvalifiserer de verdiene i figur 18.3 til en solid DE ifølge FEM. Faktisk er størrelsen på de komponentene i figur 18.3 langt større enn FEM med 20 % DE.

## 18-Diskusjon

Sammenligner man verdiene med AM vil DE ligge på godt under 1 %. Det synes å være ingen sammenheng mellom økt kjøring av maskinen og økt DE i figur 18.3. Tver imot, 164.3 Hz var på sitt laveste på den siste prøven. Det er ikke mulig å finne en entydig trend som viser at DE har økt eller blitt mindre, i hvert fall i de friske tomgangsprøvene. Variasjonen i amplitudene kan vanskelig forklares med endring av feilgrad alene. Andre forhold, slik som instrumentering og manipulering av signalet, kan være årsaken til variasjonen.

Flere frekvenser har økt en god del fra FL1 til FL2 og FL3. For 100 Hz ble det kommentert i seksjon 18.1 at det var en sammenheng mellom den og bytte av oscilloskop. Det samme kan være tilfellet for de andre frekvensene. En annen mulighet er at det var en økt DE som førte til det økte utslaget på 35.7 Hz, 64.3 Hz og 135.7 Hz.

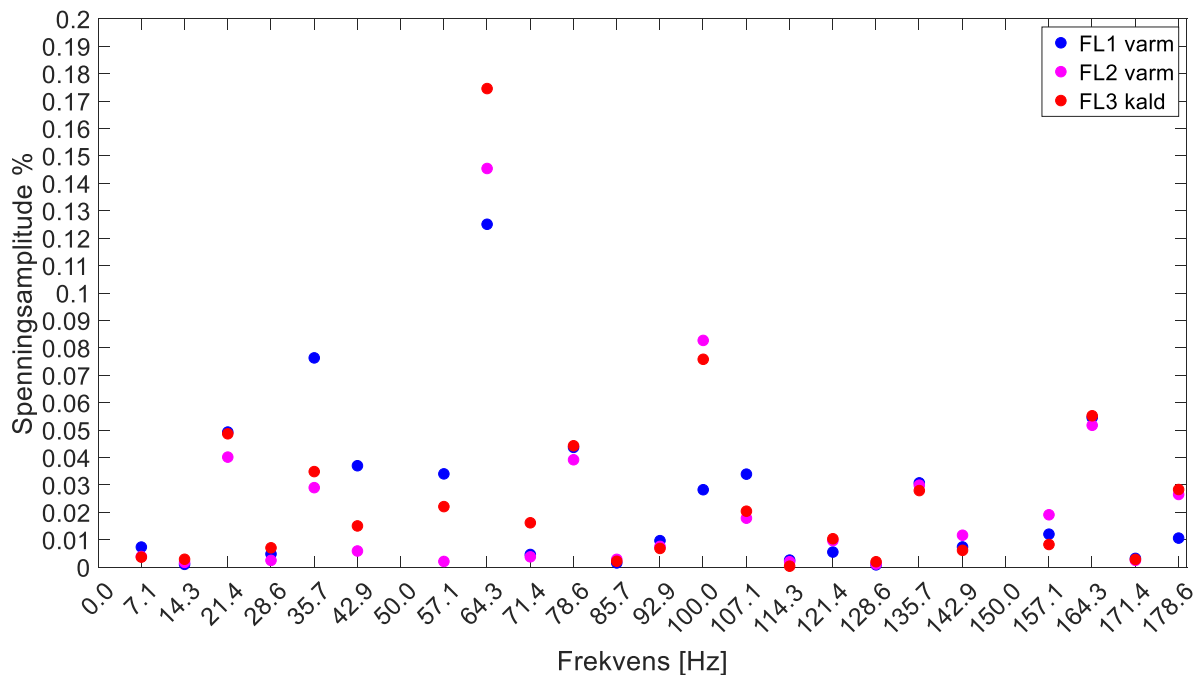


Figur 18.4: Spenning fra frisk maskin, full last.

Nivået på 64.3 Hz ved 10 KF var noe høyere på de siste FL-prøvene enn på den første, se figur 18.5. Dette samsvarer med at DE kan ha økt over tid, i hvert fall hvis AM har rett i sammenhengen mellom DE og amplituden til 64.3 Hz. Det kan derimot ikke konkluderes med at den økte amplituden til 64.3 Hz skyldes økt DE, siden det også kan skyldes bytte av oscilloskop. Ved KF vil det resulterende magnetfeltet dra i rotoren i motsatt retning av polen med KF, slik at det oppstår en dynamisk eksentrisitet, som forsterker utslaget til KF-frekvensene der disse sammenfaller med DE-frekvensene. Ved de laveste gradene av KF (1,2 og 3) minket utslaget på 21.4 Hz, 35.7 Hz og 64.3 Hz sammenlignet med frisk maskin. Grunnen kan være at rotoren opprinnelig hadde litt DE i motsatt retning av den polen som ble kortsluttet.

## 18-Diskusjon

KF kompenserte for DE slik at utslaget på de nevnte frekvensene ble mindre. Hvis dette var tilfellet skulle man tro at omvendt effekt ville oppstå når den andre polen ble kortsluttet (altså T3 og FL3), og det var faktisk delvis tilfellet. 64.3 Hz fikk en mer konsekvent økning av amplituden med økende KF i T3 og FL3. 21.4 Hz og 35.7 Hz derimot behold mønsteret der de først gikk ned i amplitude, for så å øke igjen. Det var ikke lett å lage en analytisk eller numerisk modell der graden av KF påvirket graden av DE. Det er dermed vanskelig på en enkel måte å få verifisert påstandene.



Figur 18.5: Spenning KF 10, full last.

### 18.2.3 Statisk eksentrisitet

FEM og AM var samstemte når det kom til hvilke frekvenser som egnet seg til å detektere SE. 42.9 Hz og 57.1 Hz økte med økende eksentrisitet, men var avhengig av at det var KF eller DE til stede. I AM økte 42.9 Hz og 57.1 Hz proporsjonalt med graden av SE og graden av KF. Ved å sammenligne KF-frekvensene med SE-frekvensene kan graden av SE estimeres. Graden av SE påvirker på sin side ikke amplituden til KF-frekvensene nevneverdig. FEM av 5 % SE og 5% DE ga et mye høyere utslag på SE-frekvensene enn DE-frekvensene. Med andre ord trengs det bare en liten grad av DE for at SE skal synes. Det kan faktisk være slik at det er enklere å oppdage DE indirekte ved å se på utslaget på SE-frekvensene, siden SE i utgangspunktet ikke gir utslag uten at KF eller DE er til stede. Er det ingen utslag på KF-frekvensene, men det synes fortsatt å være utslag på SE-frekvensene, så kan det være snakk om en betydelig grad av DE, selv om DE i seg selv ikke synes direkte på frekvensspekteret. Det skal sies at utslaget i FEM

## 18-Diskusjon

for blanding av SE og DE på 5% var forholdsvis lavt, selv på SE-frekvensene. Det må trolig betydelig innslag av både SE og DE for at dette skal kunne oppdages i praksis.

De første testene, T1, R, RL, T2 og FL2, hadde en trend der økende kortslutning ga lavere utslag på SE-frekvensene, altså 42.9 Hz og 57.1 Hz. Mønsteret var derimot omvendt for FL1, FL3 og T2. Resultatene fra AM og FEM tilsa at utslaget for SE-frekvensene burde økt med økende kortslutningsfeil, men dette var ikke trenden i over halvparten av tilfellene. Trenden i begge tilfellene, enten det går oppover eller nedover, er ganske tydelig. Det var helt klart «noe» som forårsaket endringen.

Som nevnt i kapittel 2.1.3 så vil lagrene utvide seg når de blir varme. Det kan tenkes at når Brutus hadde kalde lagre så lå rotor litt lavt i forhold til stator, men når temperaturen økte vil lagrene utvide seg, løfte rotor slik at den statiske eksentrisiteten forsvant. Den normale prosedyren på laboratoriet var å starte med frisk rotor, for så å teste med økende feilgrad. 10 kortsluttede vindinger ble altså testet til slutt. Lagrene kunne derfor vært varmere for testen med 10 kortsluttede vindinger enn med ingen. I tillegg kan det hende at det eksentriske feltet førte til økt belastning på lagrene, slik at det ble produsert mer varme med økende feilgrad. FL3 og tomgang 3 ble tatt i motsatt rekkefølge, det vil si først 10 kortslutninger for deretter å minke feilgraden helt til 0. Disse ble kjørt i parallell, slik at lagrene hadde god tid til å bli varme i løpet av testen. Det var ikke mulig å måle temperaturen nøyaktig, men overflaten på lagrene holdt seg lunke gjennom hele prøven. Hvis man sammenligner gjennomføringen av FL2 og FL3, så var det to forskjeller. I FL2 ble pol 1 kortsluttet fra 0 til 10, og i FL3 ble pol 8 kortsluttet fra 10 til 0. Alle frekvensene oppfører seg likt, bortsett fra 42.9 og 57.1 Hz. Dette støtter opp om varmeteorien. Det generelle nivået til frekvensene var noe høyere i FL3, men det er ikke mulig å konkludere med om dette skyldes økt eksentrisitet, skifte av pol eller små variasjoner i kretsen, måleoppsett eller analysen. Samme analysen kan gjøres med T2 og T3, som viser samme sammenheng. Det som gjør sammenligningen noe komplisert er at graden av kortslutning påvirker amplituden på SE-frekvensene.

Den ene som ikke fulgte mønsteret var FL1. Den ble tatt i den vanlige rekkefølgen 0 til 10 kortslutninger, men det var to ting som skilte den fra de andre.

- 1) det var bare den ene prøven som ble tatt den dagen, med en varighet på 52 minutter. På de andre prøvene var det alltid flere lasttilfeller i parallell, slik at det tok lang tid å komme seg fra 0 til 10 kortsluttede vindinger. Det ble blant annet brukt 1 time og



50 minutter på prøvene T1, R og RL, som innebar betydelig mer kjøring og dermed oppvarming av lagrene.

- 2) Det mistenkes med bakgrunn i fluksmålinger at generatoren ble kjørt feil vei [3]. Hvis så var tilfellet ville viftebladene på rotor miste sin funksjon slik at felt- og ankerviklingen ville få mindre kjøling. Det kan dermed hende at statorhuset utvidet seg på grunn av den høye temperaturen, slik at stator ble hevet i forhold til rotor og i så måte økte den statiske eksentrisiteten. Det kan også hende at rotasjonsretningen har en betydning, men det vil vi komme tilbake til.

Ved å sammenligne T3 kald med T3 varm uten kortslutning (figur 12.50), der den ene ble kjørt helt i starten av forsøket, og den andre på slutten, så har den varme et spekter som kan tyde på en noe mindre statisk eksentrisitet. Vel å merke er forskjellen i amplituden mellom varm og kald at dette lett kan skyldes instrumentering og signalbehandling. Resultatene er noe annerledes for kald FL3 og varm FL3, se figur 12.51. Den varme viser tegn på mer statisk eksentrisitet enn den kalde. Det er verdt å merke at begge disse signaturene er svake siden SE-komponentene i utgangspunktet er avhengig av å ha kortslutning eller dynamisk eksentrisitet for å synes. Varm FL3 viser tegn på mindre DE enn kald FL3. Heller ikke her er forskjellene i amplituden større enn at de kan skyldes instrumentering og signalbehandling.

Tyngdekraften vil gjøre at rotoren forskyves til høyre hvis rotoren roterer mot klokka, og til venstre om den roterer den med klokka, som presentert i kapittel 2.1.3. Rotoren til Brutus roterer normalt sett mot klokka sett fra NDE (den siden motoren ikke står på). Når den ble rotert med klokka ble det større utslag på 42.9 Hz og 57.1 Hz, både i tomgang (T3) og i last (FL3) uten kortslutning. I T3 er det en tilsvarende økning i 64.3 Hz, som indikerer mulig økning i dynamisk eksentrisitet, som igjen kan bidra til å løfte SE-frekvensene. Økningen i 64.3 Hz er dog lav, og det er lite sannsynlig at dynamisk eksentrisitet skal endre seg med rotasjonsretningen. Det økte utslaget ved feil rotasjonsretning antyder at rotoren ikke stod sentrert i stator når den ikke roterer, men var forskjøvet litt til venstre sett fra NDE. Dermed ville utslaget bli større når den roterte med klokka sammenlignet med når den roterer mot klokka. Undertegnede har selv rettet inn store vannkraftaggregater, og da ble det tatt hensyn til denne forskyvningseffekten ved å forskyve løpehjulet (turbinen) litt til den ene siden. Rotoren og statoren til generatorene var ferdig rettet inn fra fabrikken, så det er uvisst om de var forskjøvet på samme måte. I hvert fall så kan det virke som om produsenten av Brutus har tatt høyde for denne forskyvningen når de rettet inn rotor og stator. Det ble diskutert tidligere at temperaturen kan få rotor til å heve seg,

## 18-Diskusjon

og dermed endre graden av SE. Det kan også tenkes at utvidelser i lagrene hindrer den horisontale forskyvningseffekten og dermed reduserer utslaget på SE-frekvensene.

Det er vanskelig å bekrefte og avkrefte disse teoriene. Den ene utelukker ikke den andre. Varmeutvikling forskyver rotoren vertikalt, mens tyngdekraften skyver rotoren både horisontalt og vertikalt. Bærelagrene eller konstruksjonen for øvrig blir ikke spesielt varm. Giret blir så varmt at det ikke kan berøres. Det er med andre ord mulig at det er giret som utvider seg og forskyver rotor enten horisontalt og/eller vertikalt. For å undersøke teoriene må det måles temperaturer og forskyvninger med høy presisjon.

Ankerviklingen er ikke jevnt fordelt i stator, slik at retningen den statiske eksentrisiteten har var av betydning i AM, men ikke veldig mye, med et unntak. Hvis en av statorvindingene i to av statorstavene (en spole) ble kortsluttet endret utslaget på SE-frekvensene betydelig etter hvilken retning den statiske eksentrisiteten hadde i forhold til de kortsluttede stavene. Utslaget på SE-frekvensene ble lavere når den statiske eksentrisiteten kom nært kortslutningen i stator. Statisk eksentrisitet vil gi et ekstra bidrag til de stavene den er rettet mot, mens en kortsluttet statorstav vil gjøre at det bidraget blir mindre.

Det at de forskjellige fasene gir forskjellig utslag på SE gir en veldig interessant mulighet. Ved å bruke én fase er det vanskelig å finne retningen på SE, men ved å bruke alle tre fasene kan SE i teorien krysspeiles.

### **18.2.4 Lagrene og giret, Brutus**

Det har blitt spekulert mye i om lagrene eller giret kan være opphavet til eksentrisitetene, særlig i forhold til termisk ekspansjon. Kulelagrene hadde som nevnt en garantert minimumsklaring på  $42 \mu\text{m}$  og maksimum  $72 \mu\text{m}$ . Dette betyr at rotorakslingen minimum måtte flytte seg  $21 \mu\text{m}$  fra kaldt til varmt lager når lageret var nytt, og maksimum  $36 \mu\text{m}$ . Dette utgjør henholdsvis 1.2 % og 2 % av luftgapet. Dette vil si at et nytt lager tillot en viss eksentrisitet, og lageret er designet slik at i hvert fall noe av klaringen vil forsvinne på grunn av termiske ekspansjoner. Og hvis man snur rundt på det; termisk ekspansjon i selve lageret skal ikke forårsake en heving på mere enn 2 %. Lagerhuset og bukken kan selvsagt utvide seg utover dette, men disse står i luftinntaket til generatoren, og får dermed de en viss kjøling. Det kan med andre ord ikke være snakk om den store temperaturøkningen. Lageret har trolig blitt slitt med tiden, slik at klaringen ble større mot de siste prøvene, som både kan tillate mer eksentrisitet, både SE og DE.

Giret ble veldig varmt, og trolig var det også ekspansjoner i en eller annen retning. Rotasjonsretningen kan også påvirke hvilke krefter og retningen på disse på rotorakslingen. Girets oppbygning og oppførsel kjennes ikke i detalj, slik at det er vanskelig å vurdere hvordan det påvirket resultatene.

### **18.2.5 35.7 Hz – sier litt om alt, Brutus**

Ifølge AM og FEM skal amplituden til 35.7 Hz øke med økende KF og økende DE, men i de virkelige testene på Brutus levde 35.7 Hz sitt eget liv. I tomgangsprøvene så virker det som den følger samme mønster som 21.4 Hz og 64.3 Hz, altså at den øker med økt KF, men at DE på en eller annen måte trekker den ned. Ved last følger den SE-frekvensene 43.9 Hz og 57.1 Hz, helt til 10 KF, da den plutselig gjør et byks oppover. Den eneste gangen den ikke fulgte SE-frekvensene var i FL3, da motsatt pol ble brukt, samt at testen ble startet med 10 kortslutninger og avsluttet med 0. Dette antyder at den kan knyttes til DE. Slike resultater som peker i alle retninger er det ikke lett å tolke. Frekvensen kan trolig si noe om både KF, SE og DE.

### **18.2.6 Last vs tomgang, Brutus**

Har lastsituasjonen til generatoren noe å si på muligheten for å oppdage KF, DE og SE? Den åpenbare forskjellen mellom last og tomgang er at det går strøm i ankerviklingene, som setter opp en MMK, som beskrevet av (2.9). Dette endrer magnetfeltet i luftgapet, og kan potensielt endre mønsteret og amplituden til de frekvensene som brukes for å oppdage rotorfeil. Strømmen i feltviklingen øker og forsterker i teorien feilsignaturen. Det åpner seg også en mulighet til å bruke frekvensspekteret i ankerstrømmen for å detektere feil.

Påvirker lastsituasjonen amplituden i frekvensspekteret til klemmespenningen? I FEM så økte amplituden til 64.3 Hz ved 10 KF med omtrent 25 % ved å gå fra tomgang til FL. Last påvirket ikke alle spenningene likt. 35.7 Hz økte med 70 % i lasttilfellet. Grunnen til at noen økte mer enn andre var fordi disse var akkompagnert av en strøm med samme frekvens. Er det en 35.7 Hz spenning over lasten, så vil det også gå en 35.7 Hz strøm, men det er ikke tilfellet for 64.3 Hz siden denne er et multiplum av antall faser og  $f_{mek}$ , slik det beskrives i kapittel 2.2.1, formel (2.10). Det oppsto også et par nye frekvenser i spenningen når maskinen ble belastet i de numeriske simuleringene, for eksempel 135.7 Hz, også den i følge med en 135.7 Hz strøm. Det så ikke ut som om det spilte noen stor rolle om lasten var rent resistiv, eller induktiv og resistiv. Ser vi de samme fenomenene i laboratorieprøvene?

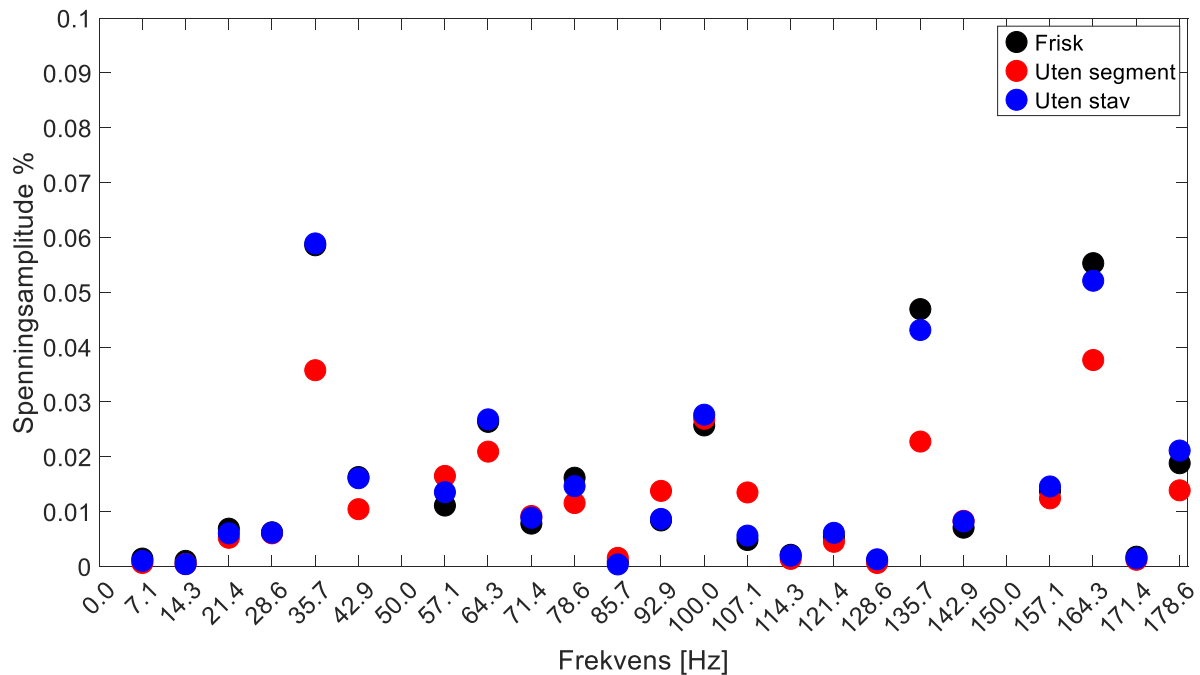
## 18-Diskusjon

I likhet med de numeriske simuleringene øker amplituden til de feilrelaterte spenningskomponentene når Brutus kobles til en last, omtrent i samme størrelsesorden som i FEM-analysen. Generelt så følger strømmen samme mønster som spenningen, bortsett fra de frekvenser som forsvinner i strømmen på grunn av (2.10). De strømmene som er til stede ser ut til å egne seg til feildeteksjon. Særlig 35.7 Hz får et stort utslag ved 10 KF, men som det ble diskutert i kapittel 24.2.5 så fremstod 35.7 Hz som litt utilregnelig. 7.1 Hz og 78.6 Hz har i stor grad en entydig trend når det kommer til KF.

Det ble ikke laget FEM-modell av SE med last, men det synes å være en tydelig sammenheng mellom SE-frekvensene i spenningen og de korresponderende frekvensene i strømmen i laboratoriet. 42.9 Hz og 57.1 Hz fulgte akkurat det samme mønsteret som spenningen, nærmest 1:1.

### **18.2.7 Brudd i dempeviklingen og skjevlast Brutus**

Teorien var at en motroterende strøm i ankerviklingen ville indusere strøm i dempeviklingene, og hvis det var brudd i en av dempestavene, så ville feltet forandre seg. Det ble ikke laget AM og FEM modell av brudd i dempestaver på grunn av problemets kompleksitet og tilgjengelig tid. Ligningene i kapittel 4.4 kan bare fortelle at det generelt kan oppstå utslag på de frekvensene som er et multiplum av  $f_{mek}$  ved motroterende 50 Hz strøm, og multiplum av 10/7 og 50/59 (en 5-del og en 7-del av  $f_{mek}$ ) for henholdsvis 5. og 7. harmoniske komponenter.



Figur 18.6: Spenning, balansert resistiv last, Brutus

Hvis man sammenligner målingene uten skjevlast, som vises i figur over, ser man at den helt friske maskinen og den uten dempestav skiller seg ut fra den uten segment. 35.7 Hz, 42.9 Hz, 64.3 Hz, 78.6 Hz, 135.7 Hz, 164.3 Hz og 178.6 Hz gikk alle ned når maskinen mangler et segment. 57.1 Hz, 92.9 Hz og 107.1 Hz gikk opp. Dette helt uten at det var en skjevlast til stede. Hva annet kan ha induisert spenning i dempeviklingene? Det påpekes i kapittel 4 at 5. og 7. harmoniske av synkronfrekvensen kan sette opp en MMK som har en relativ hastighet i forhold til dempestavene, og dermed indusere spenning i dem. I følge (4.24) kan dette føre til utslag på et vidt antall frekvenser, inkludert de som er et multiplum av  $f_{mek}$ .

I kapittel 3.6 påpekes det at både statortennene og sporene i polskoen kan forårsake variasjoner i magnetfeltet som kan gi utslag i spenningen. Brutus har et svært lite luftgap, slik at bidraget fra variasjonen i reluktansen på grunn av geometrien til statortennene og polskoen trolig ikke var ubetydelig. Frekvensene som statortennene direkte forårsaker i klemmespenningen er langt høyere enn 200 Hz ifølge (3.32). Det kan likevel tenkes at variasjonen i reluktans kunne induisert strømmer i dempeviklingen som igjen ga opphav til andre frekvenser i klemmespenningen når dempeviklingen var skadet enn de beregnet av (3.32).

Skjevlast i den «friske» Brutus økte 64.3 Hz og 121.4 Hz. Noen andre økte også, men ikke like entydig. Det er så å si ingen forskjell mellom prøven av frisk maskin og prøven der en dempestav var tatt ut. Maskinen uten segment skilte seg tydelig ut, som man kan se i figur 18.6. Dette kan skyldes feilen så vel som instrumentering eller andre forhold. I de prøvene uten

segment så økte amplituden til de samme frekvensene til den friske maskinen med økende skjevlast, men unntaket var at 135.7 Hz økte mye mer sammenlignet med ingen skjevlast. Nå var 135.7 Hz komponenten i utgangspunktet mye lavere hos Brutus uten segment enn med segment, og slik forble det selv med skjevlast. Resultatene tyder på at enkelte frekvenser får lavere amplitude ved feil i dempeviklingen, men hvordan skal man i så fall sette en terskelverdi for en «sykelig» lav amplitude? Det kan i hvert fall konkluderes med at enkelte frekvenser påvirkes av skjevlast, uavhengig av om det er feil i dempeviklingen eller ikke. Dette kan derfor påvirke analysen av KF, SE og DE.

### **18.2.8 Komplekse feil i AM**

Som det har blitt diskutert så ble det mistenkt at Brutus hadde flere typer feil. Kombinasjon av feiltyper kan gi interferens, slik at frekvensspekteret kan se helt annerledes ut enn det som er diskutert i de forrige seksjonene. Det er mulig å lage sammensatte feil i AM. KF, SE og AF (vindingskortslutning i ankeret) kan enkelt kombineres. Det er ikke like rett frem å implementere DE med de andre feiltypene uten en mer omfattende omskrivning av kodene, noe det ikke var tid til men fullt mulig å gjøre. DE kan lett kombineres med AF. Noen kombinasjoner av KF, SE og AF ga et litt uventet utslag. Ved å kortslutte for eksempel pol 1 og pol 7 med like mange vindinger, ble feilsignaturen dempet dramatisk. Kombinasjon av DE og AF ga for eksempel utslag på frekvenser som ikke hadde vært påvirket tidligere.

## **18.3 Vannkraftgeneratorene**

### **18.3.1 Ulefoss**

Målingene ble tatt med et 11-bit oscilloskop og ikke 16-bit som ble foretrukket under senere forsøk. Støyen i spenningssignalet lå på omtrent -90 dB, som ligger i området til [2] sitt anslag på -100 dB for SE og DE, og -85 dB for blanding av SE og DE. Program 2b hadde problemer med å finne rett frekvens på en av prøvene på egenhånd, noe som gjorde DFT-analysen ubrukelig. Dette ble løst ved at frekvensen ble satt manuelt for den ene prøven. Det var ikke noe tilsvarende problem med program 1 på grunn av bruken av vindusfunksjoner. Målefeilen til spenningstrafoen var garantert til å være under 0.5 %, som er mye sammenlignet med frekvenskomponenter som ligger godt under 0.05 % av nominell spenning.

## 18-Diskusjon

Amplituden til 100 Hz var på 0.05% i spenningsprøvene fra Ulefoss, og var dermed den dominerende komponenten, ti ganger større enn for eksempel 75 Hz. AM av DE var den eneste som hadde en 100 Hz komponent, men amplituden til 25 Hz, 75 Hz, 125 Hz skal ifølge AM være betydelig større enn amplituden til 100 Hz, noe som ikke var tilfellet i spenningsprøvene fra Ulefoss. Hvis vi glemmer 100 Hz et øyeblikk, og bare ser på de andre tre komponentene, 25 Hz, 75 Hz og 125 Hz, så finnes disse også i AM av KF, men høydeforskjellen mellom dem ligner mer på mønsteret til DE enn til KF; 75 Hz er høyere enn både 25 Hz og 125 Hz. Det hele peker mot en eller annen grad av DE, men ikke mer enn rundt 1 % ifølge AM om man bare ser på 75 Hz. Det ser ut til at DE synker ved økt belastning, og at den går fra 1 % ved tomgang til 0.5 % ved full last.

Det er tydelige tegn på SE i Ulefoss. Flere av frekvensene fra AM av SE hadde stor amplitude sammenlignet med de andre frekvensene, særlig 143.8 Hz, 43.8 Hz og 56.3 Hz, som var de største komponentene i AM av SE, varierte veldig med lasten. De var lavest ved halv last, størst ved full last, og midt imellom i tomgang. Alle SE-frekvensene varierte til en viss grad etter dette mønsteret, bortsett fra 68.8 Hz. Denne, sammen med 143.8 Hz, var for det første mye større enn 43.8 Hz og 56.3 Hz, noe AM ikke antydte. 68.8 Hz ble konsekvent mindre ved økende last, akkurat som DE-frekvensene. SE-frekvensen skulle ifølge teorien og simuleringer bli mindre med minkende KF og DE. 156.3 Hz, som også er en SE-frekvens, følger samme trenden. Det var helt klart en grad av SE, men siden det ikke er utviklet en modell som kombinerer SE og DE er det vanskelig å tolke amplitudene og dermed sette en verdi, men den var trolig i samme størrelsesorden som DE, med andre ord veldig lav. Ulefoss fremstår som en frisk maskin, i hvert fall ifølge spenningsprøvene.

18.7 Hz, 37.8, 56.3 Hz, 75 Hz, 112.5 Hz, 131.3 Hz, 150 Hz er alle et multiplum av 3 og  $f_{mek}$ , og det er derfor ikke forventet at disse skal dukke opp i strømmen som en årsak av en kortslutningsfeil i én pol, jamfør (2.10). Den virkelige verden er ikke ideell. I resultatene til Brutus går det alltid en 150 Hz strøm, selv om den i teorien ikke skulle vært der. Det går til og med en strøm for de frekvensene som er et multiplum av 3 og  $f_{mek}$ , men de var betydelig dempet sammenlignet med de som bare var et multiplum av  $f_{mek}$ . Det var en sterk kobling mellom frekvensspekteret i strøm og spenning hos Brutus, men slik var det ikke på Ulefoss. Det var langt flere fremtredende komponenter i strømmen enn i spenningen. Ulefoss var koblet på et stivt nett, slik at spenningen vil også være styrt av de andre komponentene som er tilkoblet. Strømspekteret er avhengig av hva slags laster som er koblet til nettet. Disse lastene trenger ikke nødvendigvis å dra en 50 Hz sinusformet strøm. Det var for eksempel kraftelektronikk som

stod for magnetiseringsstrømmen til feltviklingene i Ulefoss. Krafterelektronikk drar typisk en strøm som ikke er en ren sinus. Nøyaktig oppbygning av stasjonen og nettet er ikke kjent, slik at dette blir bare spekulasjoner. Strømfrekvensene var tross alt i all hovedsak et multiplum av  $f_{mek}$ , og det virker litt underlig at noe i nettet skulle bestemme seg for å trekke akkurat disse komponentene. En annen mulighet er at  $f_{mek}$  ikke var den «grunnharmoniske» komponenten for en rotorfeil. Ankerviklingen til Ulefoss bestod av 4 identiske deler. En rotorfeil, forutsatt ingen statisk eksentrisitet, ville derfor elektrisk gjenta seg likt 4 ganger i løpet av en rotorrotasjon. Denne gir en «grunnharmonisk» på 25 Hz. Dette vises i AM der det ikke er noen  $f_{mek}$ -komponent ved KF, i motsetning til AM av Brutus som har en  $f_{mek}$ -komponent og har en ankervikling som ikke kan deles inn i like deler (den består av to like deler som er speilvendt i forhold til hverandre og dermed ikke danner to elektrisk identiske like deler når den kobles i serie). Det var tegn til en viss statisk eksentrisitet i både spenning og strøm slik at det vil være en variasjon med  $f_{mek}$ , som vises i spenningen.

### 18.3.2 Liafoss

Målingene ble også her tatt med et 11-bit oscilloskop. Samtlige programmer klarte å skille ut et sett med feilrelaterte frekvenser i spenningsprøvene fra Liafoss. Støyen i signalet var omtrent -90 dB. Slik analyseresultatene fremstår så forbindes det lite måleusikkerhet til dem. Det er dog viktig å ha med at egenskapene og oppførselen til måletrafoen ikke kunne dokumenteres.

Mønsteret i spenningen til de to lastsituasjonene var forholdsvis like. Både målingen ved full last og halv last viser tendenser til DE og SE, i hvert fall hvis man tar utgangspunkt i at AM av Liafoss er riktig. 100 Hz, som bare dukket opp ved DE i AM, var den største komponenten og lå et sted mellom 0.05 % og 0.06 %. AM antyder at både 25 Hz, 75 Hz, 175 Hz og 200 Hz skal være større enn 100 Hz ved ren dynamisk eksentrisitet, men som det ble erfart fra Brutus ser ikke mønsteret til å stemme overens mellom virkeligheten og AM. AM av SE og KF har vist seg å være rimelige treffsikre på Brutus, og hvis dette også er tilfellet for Liafoss så er det sannsynlig at det er DE som har produsert de sterke 100 Hz og 200 Hz komponentene. En annen mulighet er at 100 Hz opptrer naturlig, siden både Ulefoss og Brutus hadde en stor 100 Hz komponent. 75 Hz er en fremtredende komponent, og denne kan også kobles til DE. KF gir også utslag på 75 Hz, men utslaget skulle da ifølge AM være enda større på 25 Hz, noe det ikke var. Rotoren skal ifølge eieren være i god stand, slik at KF i utgangspunktet virker usannsynlig. Ut fra verdiene i AM er det vanskelig å bedømme størrelsen på en eventuelt DE. Hvis man tar utgangspunkt i 75 Hz så vil DE ligge på om lag 2.5 %, 200 Hz tilsier ca 8 %, og hvis man bare



## 18-Diskusjon

ser på 100 Hz blir graden av DE på hele 50 %. Det var tegn til SE i Liafoss, og disse tegnene opptrer ikke uten KF eller DE ifølge modellene. FEM av Brutus viste at kombinasjonen av SE og DE ga en forholdsvis høy amplitude på SE-frekvensen og ikke på DE-frekvensen. Det var trolig en grad av DE i Liafoss, men det er ikke mulig å fastslå størrelsen.

Det var klare tegn på SE. Sammenhengen mellom DE og SE dekkes ikke av AM, men SE modellen med KF lager et mønster som ligner veldig det som ble målt i Liafoss. 33.3 Hz, 41.7 Hz, 58.3 Hz, 66.7 Hz, 141.7 Hz og 158.3 Hz var alle til stede i Liafoss. Forholdet mellom amplitudene til de nevnte komponentene var litt forskjellig mellom hel og halv last, uten at det er mulig å dra noen klar konklusjon om Liafoss blir mer eller mindre statisk eksentrisk med økende last. Som sagt kjennes ikke sammenhengen mellom SE og DE, slik at amplitudeverdiene til SE-frekvensene ikke kan tolkes direkte. Om vi istedenfor tar utgangspunkt i AM av SE og KF, og sier at det var 10 KF i en pol i rotoren, så kvalifiserer Liafoss til en SE et sted mellom 5 % og 10 %.

I likhet med Ulefoss så er vanskelig å se noen sterk sammenheng mellom strøm og spenningspekteret. Amplitudene relativt til amplituden til 50 Hz var generelt høyere ved halv last. Dette kan indikere at det var laster som dro disse strømmene uavhengig av generatoren. Det kan også hende at strømtrafoen endrer oppførsel når det går en større strøm gjennom den.



## 19 Konklusjon

Målet for denne masteroppgaven var å undersøke hvordan det i praksis lot seg gjøre å detektere rotorfeil ved å måle klemmespenning og ankerstrøm. Resultatene ble sammenlignet med analytiske og numeriske modeller. Rotorfeilene som ble undersøkt var kortslutning i feltvikling(KF), statisk eksentrisitet(SE), dynamisk eksentrisitet(DE) og en kombinasjon av disse. Det ble også undersøkt om feil i dempeviklingen kunne ha innvirkning på frekvensspekteret.

16-bit oscilloskopet (ROT 2044) ga noe høyere presisjon enn 11-bit oscilloskopet (MSO 3014), men begge oscilloskopene klarte å oppdage de svake komponentene i frekvensspekteret. Oscilloskopene viste de samme trendene, men resultatene var såpass forskjellige at sammenligning av resultater på tvers av oscilloskopene virket lite hensiktsmessig. Med andre ord er det ikke sikkert at man finner en trend hvis måleutstyret byttes mellom hver prøve. Strøm og spenningsprøvene hadde en lengde på 10 sekunder og en tastefrekvens på 10 kHz, som virket å være tilstrekkelig for å se enkelte trender. Det er vanskelig å si hvor mye av variasjon i amplitudene til flere av frekvenskomponentene skyldes endring i (feil)tilstanden hos laboratoriemaskinen og hvor mye som skyldes usikkerhet i instrumentering og signalbehandling.

Signalene ble analysert med DTF (FFT), og sluttresultatet varierte veldig med hvordan signalet ble manipulert før det ble tatt en DFT. Tre vindusfunksjoner ble prøvd ut, samt en rekke andre manipulasjoner. Rektangulært vindu, Hannvindu og flat-top-vindu gir ikke nøyaktig det samme resultatet, men trendene var jevnt over den samme. Ved å bruke Hann- og flat-top-vinduet var det ikke nødvendig med ytterligere manipulasjon. Presisjonen ble ansett som bedre ved å bruke rektangulært vindu sammen med frekvensestimering, omtasting til en tastefrekvens som var et multiplum av  $f_{mek}$  og nøyaktig trunkering av signalet slik at et helt antall  $f_{mek}$ -perioder ble analysert. Om det er bestemte frekvenser som skal undersøkes, og disse har et bestemt frekvensintervall mellom seg, anbefales sistnevnte metode. Dette var tilfellet med feilfrekvensene til KF, DE og SE. Hvis andre frekvenssignaturer av interesse kan oppstå, anbefales det å manipulere signalet med et Hannvindu eller tilsvarende.

## 19-Konklusjon

Hvilke frekvenser som dukker opp avhenger av ankerviklingens oppbygning og typen feil. Det ble laget to modeller for å analysere forskjellige feil, en analytisk modell (AM) og en numerisk modell (FEM). Feilsignaturene til kortslutning i feltviklingen (KF) og statisk eksentrisitet (SE) kunne predikeres med god presisjon i både AM og FEM. SE var avhengig av KF eller annen asymmetri for å bli oppdaget. Mønsteret var mer eller mindre proporsjonalt med feilgraden. DE i AM skilte seg fra DE i FEM. Mønsteret i AM var uavhengig av feilgrad, mens mønsteret varierte med feilgraden i FEM. Trolig er det FEM-modellen som er nærmest virkeligheten. DE, samt kombinasjonen DE og SE, var vanskelig å oppdage ifølge FEM, som stemmer overens med det [2] fant ut i sine simuleringer. Kortslutning i ankerviklingene (KA) kunne kombineres med alle feiltyper i AM. KA påvirker frekvensspekteret i AM og kan derfor muligens oppdages med samme metode som de andre feiltypene. Dette var utenfor oppgavens omfang, slik at videre undersøkelser ikke ble gjort.

Det var enkelt å oppdage store KF, det vil si der 20 % eller mer av viklingene i én pol er kortsluttet, på laboratoriemaskinen Brutus. Mindre feil, det vil si under 10 % av viklingene i én pol er kortsluttet, kan ikke identifiseres uten flere målinger som viser en trend. Brutus viste tegn på å være noe eksentrisk, både DE og SE. DE mistenkes å være i en slik retning at den motvirket signaturen til KF, som gjorde at de laveste feilgradene av KF ble maskert.

Graden av SE så ut til å variere med både temperatur og rotasjonsretning. Dette er konsistent med teorien presentert kapittel 2.1.3. En kraft som virker radielt på akslingen, som tyngdekraften i en horisontalmaskin, vil forskyve rotoren til venstre når den roterer med klokka, og til høyre når den roterer mot klokka. Dette fenomenet kan dempes ved at lagrene ekspanderer på grunn av oppvarming, slik at akslingen får mindre spillerom. Termisk ekspansjon kan også løfte hele akslingen vertikalt.

Det ble undersøkt om brudd i dempeviklingen kunne oppdages ved å påføre skjevhet i lasten. Skjevlast påvirker helt klart frekvensspekteret, men tilsynelatende uavhengig av feil som ble påført dempeviklingen til Brutus. Prøvene viste at frekvensspekteret ble endret av å fjerne kortslutningsringen på én av polene, uavhengig av skjevlasten. Amplituden til enkelte frekvenser ble lavere enn til den friske maskinen. Det vil trolig i praksis være vanskelig å definere et nivå der amplituden eventuelt skulle være for lav.

Instrumenteringen og metoden ble prøv ut i to konvensjonelle vannkraftgeneratorer, Ulefoss på 2100 kW og Liafoss på 2900 kW. Amplituden til frekvenskomponentene i spenningspekteret knyttet til KF, DE og SE var generelt lave. Det utslaget som var der fulgte ikke de mønstrene

## 19-Konklusjon

som AM foreslo. Selv om forholdet mellom komponentene ikke var helt som forventet tyder resultatene på at det var litt SE kombinert med en eller annen form for roterende asymmetri (DE eller KF) i begge generatorene. Strøm- og spenningspekteret var forskjellige. Det ble ikke funnet noen klar grunn til dette, men det indikerer at en generator koblet til et stivt nett sammen med ukjente laster vil oppføre seg forskjellig fra et isolert laboratorieoppsett med passive laster. Strømmen virket mindre egnet for feildeteksjon enn spenningen i vannkraftgeneratorene.

Metoden er etter alt å dømme industrielt anvendbar. Strøm og spennings signaler er lett tilgjengelige, noe som gjør metoden enkel å implementere. Hva som kreves av måleutstyret er enda ikke helt klart. Metoden kan med stor sikkerhet oppdage store kortslutningsfeil i feltviklingen, og til en viss grad oppdage eksentrisitetsfeil. For å kunne se trender i en generator er det viktig å måle systematisk, men det er ikke nødvendig å ha kontinuerlig overvåkning av strøm og spenning. Det kreves helt klart mer forskning, men det bør foregå i felt så vel som på laboratoriet.

### 19.1 Fremtidig arbeid

Det var flere variabler som hadde innvirkning på innholdet i det harmoniske spekteret til Brutus. I tillegg til kortslutningen, som var en nøye kontrollert variabel, var det også dynamisk eksentrisitet og statisk eksentrisitet som endret seg med driftsforhold. Ankerstrøm og klemmespenning ble målt, samt magnetfeltet på to steder i luftgapet. For at laboratorieoppsettet skal være komplett for fremtidige forsøk bør temperatur kontinuerlig måles flere steder i generatoren og drivlinjen, og bindes sammen med de andre resultatene. I tillegg bør utvidelser i konstruksjonen måles. For at Brutus skal oppnå «steady-stat» må den trolig kjøres i flere timer. Sammen med andre prøver, som lyd og moment, vil både kvantiteten og kvaliteten på dataene være så høy at muligheten for å bruke kunstig intelligens bør undersøkes nærmere. Ukjente forhold kan påvirke resultatene, og det er viktig at disse ikke undervurderes.

For at strøm og spenningsmålinger i laboratoriet skal bli mer realistiske bør generatoren kobles til et stivt nett. Måling av strøm og spenning fra et vannkraftverk var så enkelt at dette burde det gjøres langt mer av, systematisk over tid.

Muligheten for å krysspeile SE ved å måle spenningen på alle fasene bør undersøkes nærmere.

Det ble utviklet enkle analytiske modeller som kan bli langt mer brukervennlige. Disse tok inn parametere fra programmet «WLP». De analytiske modellene og WLP bør integreres i et

## 19-Konklusjon

program som tar inn enkle parametere i et grafisk grensesnitt og på egenhånd går gjennom alle mulig feilkombinasjoner av KF, SE, DE og KA. Den analytiske modellen av DE har trolig et forbedringspotensial.

For at metoden skal kunne brukes av industrien må det undersøkes nærmere hvilken ytelse som kreves av måleutstyret.

## 20 Referanser

1. Jørstad, K.G., *Modelling, Simulation, and On-line Detection of Rotor Fault in Hydrogenerators*, in *Masteroppgave*. 2017, NTNU: Trondheim.
2. Møller, A.B., *Modelling, Simulation, and On-line Detection of Rotor Eccentricity in Hydropower Generators*, in *Masteroppgave*. 2018, NTNU: Trondheim.
3. Groth, I., *On-line Magnetic Flux Monitoring and Incipient Fault Detection in Hydropower Generators*. 2019, NTNU: Trondheim.
4. Ebbing, H., *Deteksjon av rotorfeil under drift i vannkraftgeneratorer*. 2018, NTNU, unpublished: Trondheim.
5. Stone, G. and G. Stone, *Electrical insulation for rotating machines : design, evaluation, aging, testing, and repair*. 2004, IEEE ; Wiley-Interscience: Piscataway, NJ ; Hoboken, NJ.
6. Tavner, P., et al., *Condition monitoring of rotating electrical machines*. Vol. 56. 2008: IET.
7. Kothari, D.P. and I. Nagrath, *Electric machines*. 2010: McGraw-Hill Education.
8. Muszynska, A., *Rotordynamics*. 2005: CRC press.
9. Collett, F.A., *Arkiv*.
10. Westgaard, E., *Elektromaskinbygg - Grunnkurs - Del 1*. 1955, Trondheim: NTH.
11. Zafarani, M., et al., *An Investigation of Motor Topology Impacts on Magnet Defect Fault Signatures*. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017. **64**(1): p. 32-42.
12. Nilssen, R., *IEL's Winding layout program*. 2013.
13. Keller, S., et al., *Large low-speed hydro-generators—unbalanced magnetic pulls and additional damper losses in eccentricity conditions*. *IET Electric Power Applications*, 2007. **1**(5): p. 657-664.
14. Knight, A.M. and S.P. Bertani, *Mechanical fault detection in a medium-sized induction motor using stator current monitoring*. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2005. **20**(4): p. 753-760.
15. Yonggang, L., et al. *Fault identification method of rotor inter turn short-circuit using stator winding detection*. in *Sixth International Conference on Electrical Machines and Systems, 2003. ICEMS 2003*. 2003. IEEE.
16. Yucai, W., L. Yonggang, and L. Heming. *Diagnosis of turbine generator typical faults by shaft voltage*. in *2012 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*. 2012. IEEE.
17. Kreyszig, E., *Advanced Engineering Mathematics 9th Edition*. 2006: Wiley.
18. Dorrell, D.G., W.T. Thomson, and S. Roach, *Analysis of airgap flux, current, and vibration signals as a function of the combination of static and dynamic airgap eccentricity in 3-phase induction motors*. *IEEE Transactions on Industry applications*, 1997. **33**(1): p. 24-34.
19. Ebrahimi, B.M., et al., *Advanced eccentricity fault recognition in permanent magnet synchronous motors using stator current signature analysis*. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014. **61**(4): p. 2041-2052.
20. Hanselman, D.C., *Brushless permanent magnet motor design*. 2003: The Writers' Collective.
21. Csanyi, E. *What is negative sequence current and how does it affect generator work*. 2019 [cited 2019 21.03]; Available from: <https://electrical-engineering-portal.com/negative-sequence-current-generator-work>.
22. Kliman, G., et al., *Noninvasive detection of broken rotor bars in operating induction motors*. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 1988. **3**(4): p. 873-879.
23. Henao, H., et al., *Trends in fault diagnosis for electrical machines: A review of diagnostic techniques*. *IEEE industrial electronics magazine*, 2014. **8**(2): p. 31-42.

24. Antonino-Daviu, J., et al., *Transient-based analysis for the detection of broken damper bars in synchronous motors*. Mechanical Systems and Signal Processing, 2013. **34**(1-2): p. 367-377.
25. Neti, P., A.B. Dehkordi, and A. Gole. *A new robust method to detect rotor faults in salient-pole synchronous machines using structural asymmetries*. in *2008 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*. 2008. IEEE.
26. Zafarani, M., T. Goktas, and B. Akin, *A comprehensive magnet defect fault analysis of permanent-magnet synchronous motors*. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016. **52**(2): p. 1331-1339.
27. Nysveen, A., *Veiledningssamtale om brudd i dempestav*, H. Ebbing, Editor. 2019.
28. Toftevaag, T., *Sammtale om dempeviklinger i synkronmaskiner*, H. Ebbing, Editor. 2019.
29. Roeper, R., *Kurzschlußströme in Drehstromnetzen*. 1964, Berlin: Siemens.
30. Williamson, A., *The effects of system harmonics upon machines*. International Journal of Electrical Engineering Education, 1982. **19**(2): p. 145-155.
31. Glover, J.D., M.S. Sarma, and T.J. Overbye, *Power system analysis and design*. 5th ed. ed. 2012, Stamford, Conn: Cengage Learning.
32. Ranlöf, M., R. Perers, and U. Lundin, *On permeance modeling of large hydrogenerators with application to voltage harmonics prediction*. IEEE transactions on energy conversion, 2010. **25**(4): p. 1179-1186.
33. Harris, F.J., *On the use of windows for harmonic analysis with the discrete Fourier transform*. Proceedings of the IEEE, 1978. **66**(1): p. 51-83.
34. John Proakis, D.M., *Digital signal processing - Principles, Algorithms and Applications*. 2007, USA: Pearson.
35. Lyons, R., *Windowing Functions Improve FFT Results*. EDN, 1998.
36. Chioye, L. *Choose The Right FFT Window Function When Evaluating Precision ADCs*. 2013 12.11 [cited 2019 15.03]; Available from: <https://www.electronicdesign.com/analog/choose-right-fft-window-function-when-evaluating-precision-adcs>.
37. Lundheim, L. *Lobe*. 2009 14. feb. 2009 [cited 2019 7. april]; Available from: <https://snl.no/lobe>.
38. Instruments, N., *White Paper: Understanding FFTs and Windowing*. National Instruments.
39. SKF. *Self-aligning ball bearings 2218*. [cited 2019 25.05.19]; Available from: <https://www.skf.com/group/products/bearings-units-housings/ball-bearings/self-aligning-ball-bearings/self-aligning-ball-bearings/index.html?designation=2218>.
40. Siemens. *FLENDER gear units, Catalog MD 20.1 · 2009*. 2009 [cited 2019 25.05.19]; Available from: [https://w3app.siemens.com/mcms/infocenter/dokumentcenter/md/Documents/u20Catalogs/MD20.1\\_Zahnradgetriebe\\_Gr\\_3-22.pdf](https://w3app.siemens.com/mcms/infocenter/dokumentcenter/md/Documents/u20Catalogs/MD20.1_Zahnradgetriebe_Gr_3-22.pdf).
41. Voith, *Ulefoss - Opsjon Polrevisjon*. 2013.
42. BEVI, *11244 OUTLINE DRAWING OG THE ROTOR*.
43. BEVI, *11244 OUTLINE DRAWING OG THE STATOR*, in *BEVI ref. 1032553*.
44. Valavi, M., *Veiledning FEM, ANSYS Maxwell*. 2018.
45. Nysveen, A., *Sammtaler og veiledning*, H. Ebbing, Editor. 2018.
46. PJS. *Digital Signal Processing: Sampling Rates, Bandwidth, Spectral Lines, and more...* 2017 [cited 2019 05.06.2019]; Available from: <https://community.plm.automation.siemens.com/t5/Testing-Knowledge-Base/Digital-Signal-Processing-Sampling-Rates-Bandwidth-Spectral/ta-p/402991>.
47. Wolke, A. *Sample Processing in a Digital Oscilloscope*. 2013 16.07.2013 [cited 2019 19.02]; Available from: <https://www.tek.com/blog/sample-processing-digital-oscilloscope>.
48. Reitz, S., *High definition oscilloscopes: 16-bit vertical resolution for signal analysis*. ROHDE & SCHWARZ.
49. Johnson, K., *Comparing High Resolution Oscilloscope Design Approaches*. 2018, Teledune LeCroy.
50. Metrix, *MX 9002 Differential probe*. 1996.



## 20-Referanser

51. Fluke, *80i-1000s AC current probe for oscilloscopes, User manual*.
52. BEVI, *Instruction of use IME 11244*, R. 1322553, Editor. 2018, BEVI.
53. Sjøvall, K., *Instrument Transformers; Application Guide*, in *Piblication 1HSM 9543 40-002n, Edition 3*. 2009, ABB.
54. Willey, R. *How do I Regression Fit a SinWave to a dataset?* 2012 [cited 2019 14.02]; Available from: <https://se.mathworks.com/matlabcentral/answers/36999-how-do-i-regression-fit-a-sinwave-to-a-dataset>.
55. Westgaard, E., *Elkraftteknikk: Elektriske maskiner del 1*. 1973, Institut for elektriske maskiner, Norges Tekniske Høyskole
56. SKF. *Internal clearance*. [cited 2019 25.05.19]; Available from: <https://www.skf.com/group/products/bearings-units-housings/principles/general-bearing-knowledge/bearing-basics/internal-clearance/index.html>.



## 21 Appendiks A

**Vedlegg 1:** Teori om ankerviklinger fra prosjektoppgaven

**Vedlegg 2:** Resultater, diverse

**Vedlegg 3:** Resultater program 1 og 2a

**Vedlegg 4:** Metadata fra skjevlasttestene

**Vedlegg 5:** Matematikk

**Vedlegg 6:** Kretser

**Vedlegg 7:** Instrumentering

**Vedlegg 8:** Dokumentasjon, diverse

**Vedlegg 9:** Koder og algoritmer

**Appendiks B (kapittel 22):** Oppbygning av FEM-modell av Brutus fra Prosjektoppgaven.

## 21.1 Teori om ankerviklinger fra prosjektoppgaven

Dette delkapittelet er i sin helhet tatt fra forfatterens tidligere arbeid [4]. Noen endringer kan forekomme.

Deteksjonsmetoden som er undersøkt i dette spesialiseringsprosjektet bruker ankerstrøm og spenning for å oppdage kortslutning i rotor. Ankerviklingen fungerer med andre ord som vår søkespole. Det er derfor avgjørende å kjenne dens oppbygning. Den helt klart vanligste måten å bygge opp ankerviklingen på i en vannkraftgenerator er å ha en tolags brudden vikling med skrittforkorting. Slik er også vår maskin bygget opp, men den er beskrevet nærmere i kapittel 6.

En generator produserer ikke bare den grunnharmoniske spenningen på 50 Hz, men også andre harmoniske. Typiske frekvenser, på grunn av formen på magnetfeltet, er de odde-harmoniske: 3, 5, 7, 9... Ved å ha brudden vikling ( $q$  er en brøk) og skrittforkorting (skrittlengden er mindre enn  $Q$ ), vil hvilken som helst harmonisk komponent kunne dempes. Både 5. og 7. er uønskede, slik at skrittlengden og antall spor er siktet inn på å dempe en av disse helt, eller begge delevis [7].

$P$  – antall poler

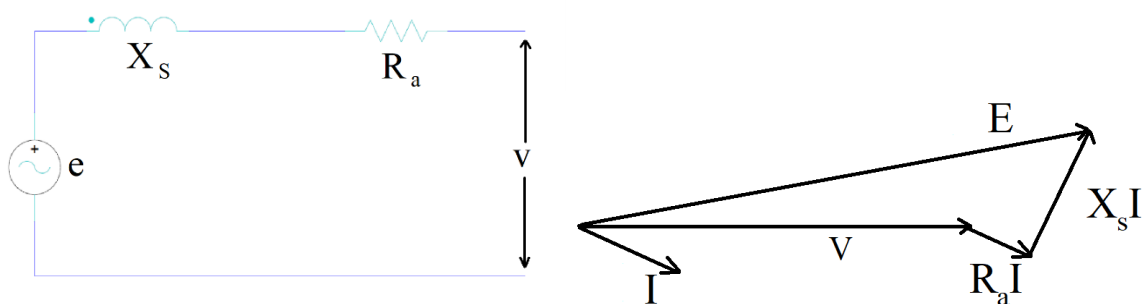
$S$  – antall statorspor

$$Q = \frac{S}{P} \quad (1)$$

$$q = \frac{Q}{\text{Antall faser}} \quad (2)$$

Klemmespenningen,  $v$ , er et resultat av den elektromotoriske spenningen,  $e$ , og synkronimpedansen,  $Z_s$ , som består av synkronreaktansen  $X_s$  og resistansen i ankeret  $R_a$  [7].

EKVIVALENTSKJEMA OG VISERDIAGRAM



Figur 21.1: Ekvivalentskjema

Feltviklingene setter opp et magnetfelt, proporsjonalt med feltstrømmen,  $I_e$ , og antall vindinger,  $N_e$ . Magnetfeltet går fra en positiv pol radielt over luftgapet, som har høy magnetisk motstand,

fortsetter gjennom statoråket, som har lav magnetisk motstand, for så å passere luftgapet igjen til de to nabopolene med omvendt polaritet. Spolene omslutter et visst område av stator/luftgapet, og magnetfeltet,  $B$ , som går igjennom spolen kalles fluks,  $\phi$ , se (3). Når rotor roterer vil fluksen endre seg, og det induseres dermed en spenning som er proporsjonal med fluksendringen og antal vindinger,  $N$ , se (4).[7]

$$\phi = \int B dA \quad (3)$$

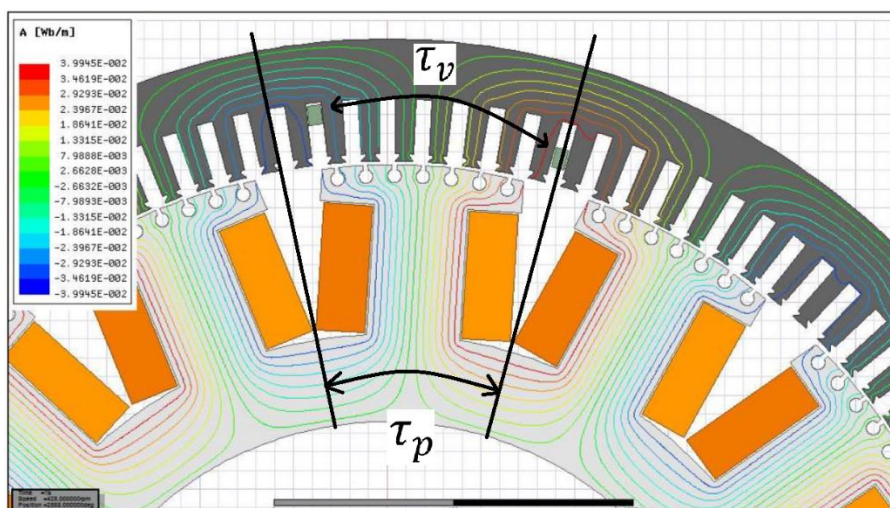
$$e(t) = -N * \frac{d\phi(t)}{dt} \quad (4)$$

Dess lengre viklingskrittet  $\tau_v$  er, dess mer fluks får man gjennom spolen, så lenge den holder seg innenfor poldelingen  $\tau_p$ . Maksimal spenning i en spole oppnås når  $\tau_v = \tau_p$ , men når  $\tau_v$  er kortere enn  $\tau_p$  kalles dette skrittforkortning. Hvilken diameter som brukes er likegyldig så lenge de er like.  $K_f$  kalles skrittforkortningsfaktoren.  $S_c$  er størrelsen på skrittet målt i antall spor. [55]

$$\tau_p = \frac{\pi * diameter}{P} \quad (5)$$

$$\tau_v = \frac{\pi * diameter}{P} * S_c \quad (6)$$

$$K_{sk} = \sin\left(\frac{\pi}{2} * \frac{\tau_v}{\tau_p}\right) = \sin\left(\frac{\pi}{2} * \frac{P}{S} S_c\right) \quad (7)$$



Figur 21.2: Poldeling og viklingskritt

Klemmespenningen er et resultat av flere spoler i serie. Siden spolene i samme fase er fordelt utover vil de ha litt forskjellige spenningsforløp, slik at summen av spenningene blir lavere enn den teoretisk maksimale spenningsamplituden. Dette beskrives med fordelingsfaktoren,  $K_f$ . [7, 55]

$$K_f = \frac{\sin\left(q * \frac{\alpha_s}{2}\right)}{q * \sin\left(\frac{\alpha_s}{2}\right)} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{6}\right)}{q * \sin\left(\frac{\alpha_s}{2}\right)} \quad (8)$$

$$\alpha_s = \frac{\pi P}{S} \quad (9)$$

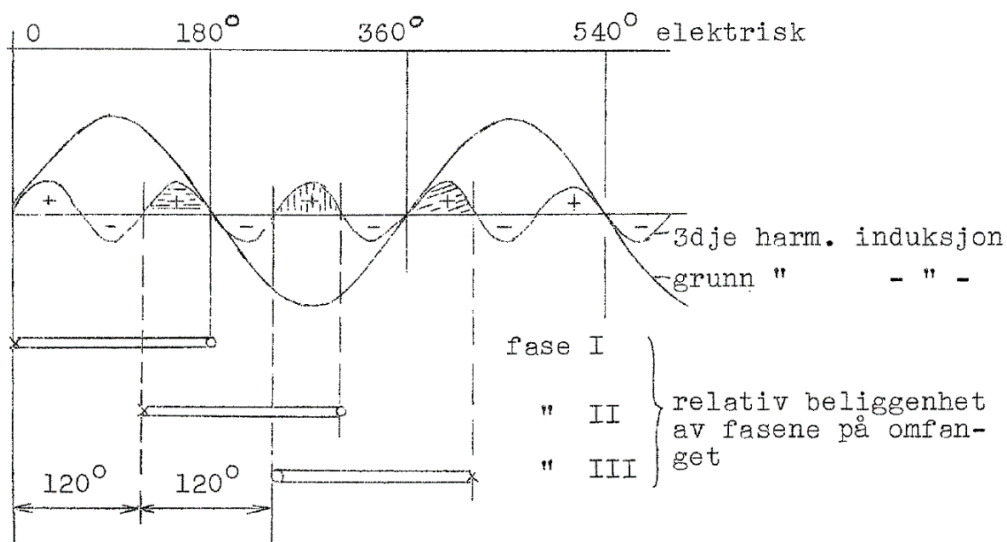
Fordelingsfaktoren og skrittforkortningsfaktoren multiplisert sammen kalles viklingsfaktoren,  $K_w$ . Denne faktoren er forskjellig fra frekvens til frekvens, og for n'te-harmoniske gjelder [55]:

$$K_{wh} = \frac{\sin\left(n \frac{\pi}{6}\right)}{q * \sin\left(n \frac{\alpha_s}{2}\right)} * \sin\left(n \frac{\pi P}{2 S} S_c\right) \quad (10)$$

I en 3-faset, stjernekoblet generator vil de 3. harmoniske spenningene (og alle frekvenser  $f_l$  som oppfyller (11)) ikke føre til tilsvarende harmoniske strømmer. Dette er fordi de 3. harmoniske spenningskomponentene i de tre fasene er i fase, og ikke gir noe spenningspotensial mellom dem, se fig. 4 [10].

$$f_l = m k f_s \quad (11)$$

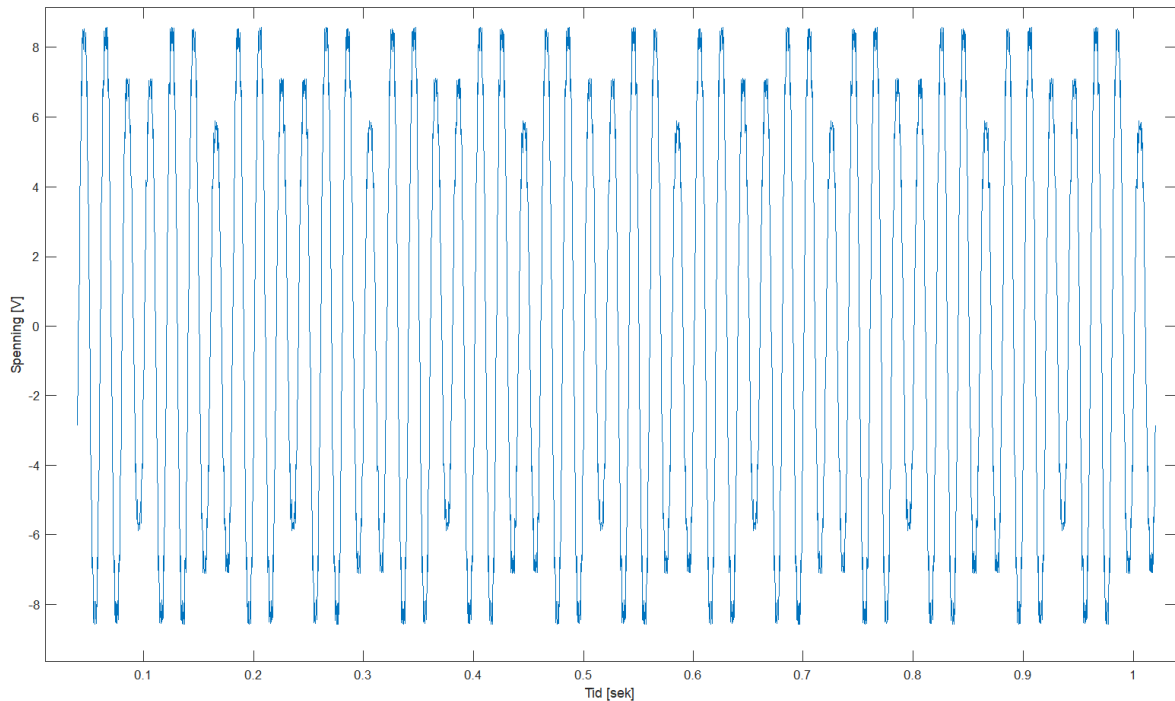
$m = \text{antall faser}$



Figur 21.3: 3. harmoniske i trefasesystem. Hentet fra [10].

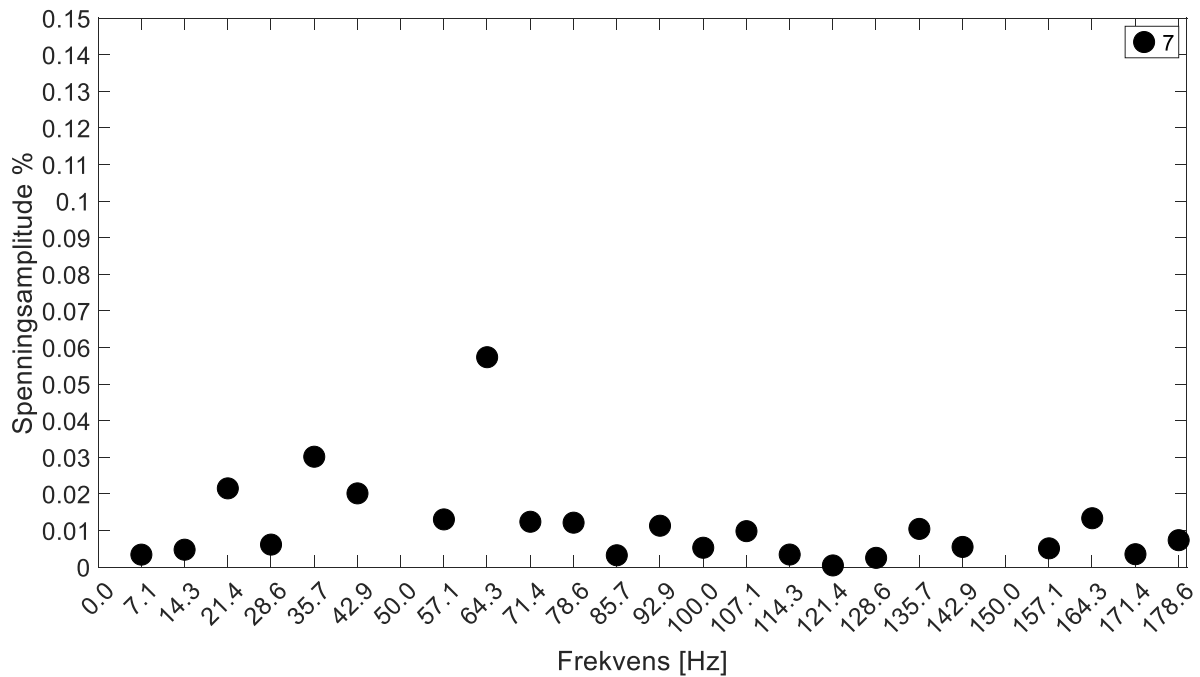
## 21.2 Resultater, diverse

### 21.2.1 FEM av AM med 10 KF



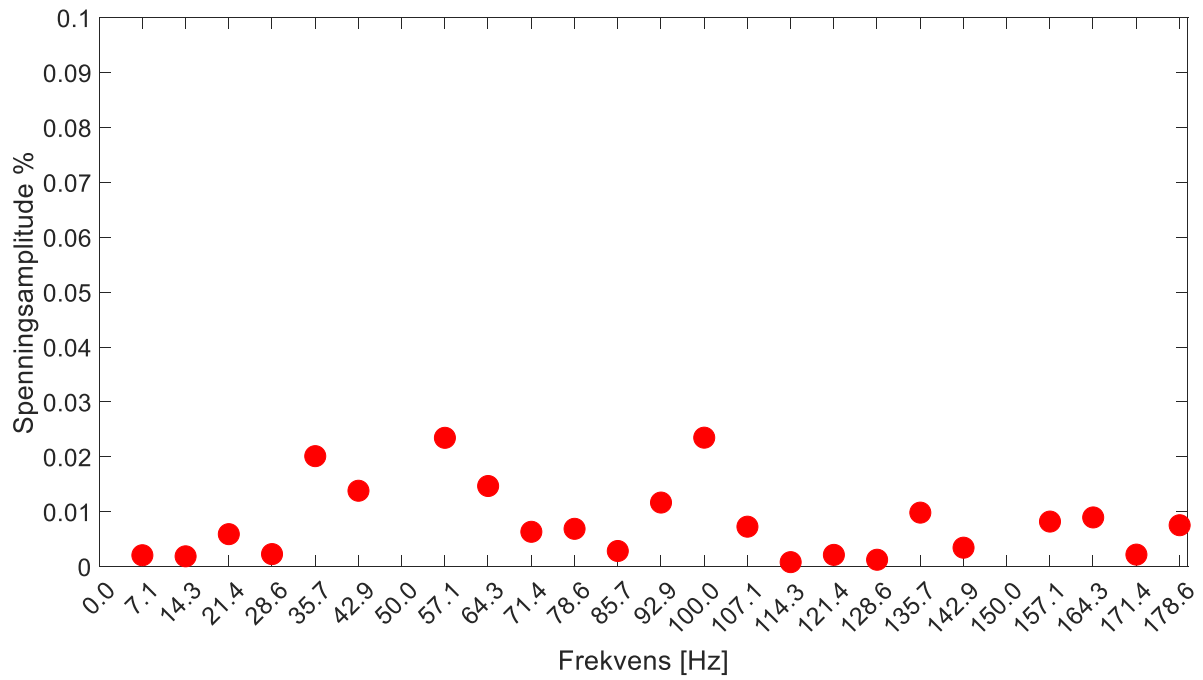
Figur 21.4: Spenningen i tidsdomenet for FEM-modellen av AM

### 21.2.2 Andre prøvekjøring av Brutus 1. februar, 7 KF

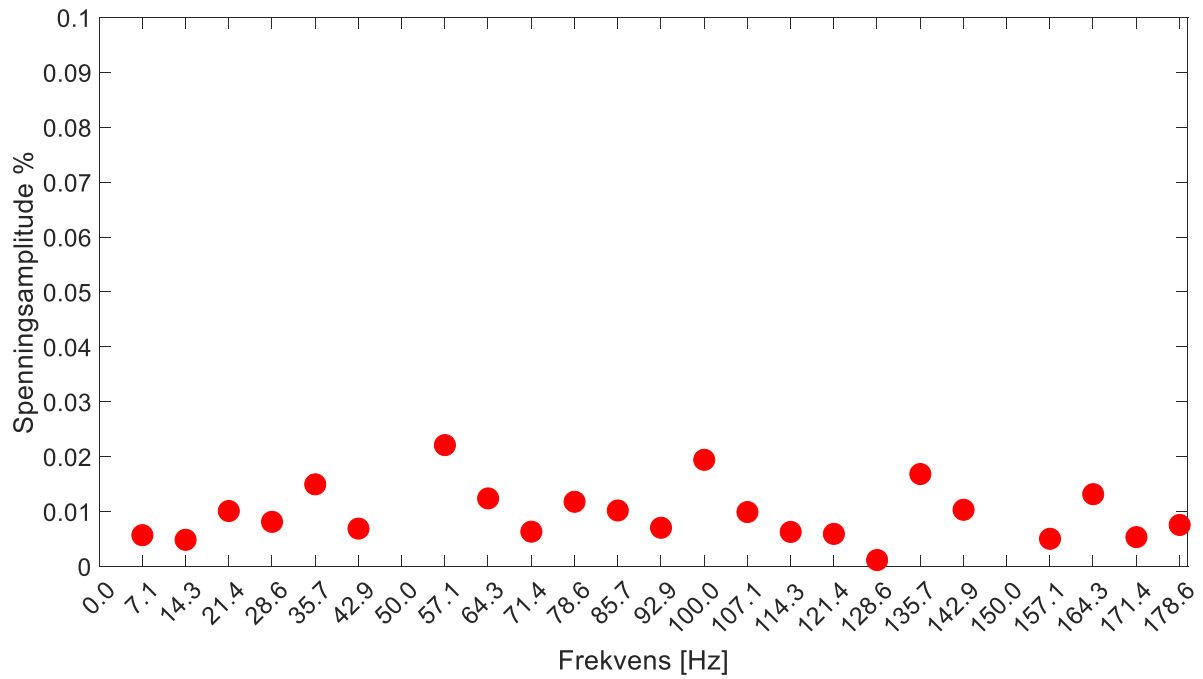


Figur 21.5: 1. Februar 2019, andre prøvekjøring, 7 KF.

### 21.2.3 Test av MSO 3014 med 11- og 8-bit



Figur 21.6: Spenning, tomgang, frisk Brutus, 11-bit MSO3014, 4 juni 2019

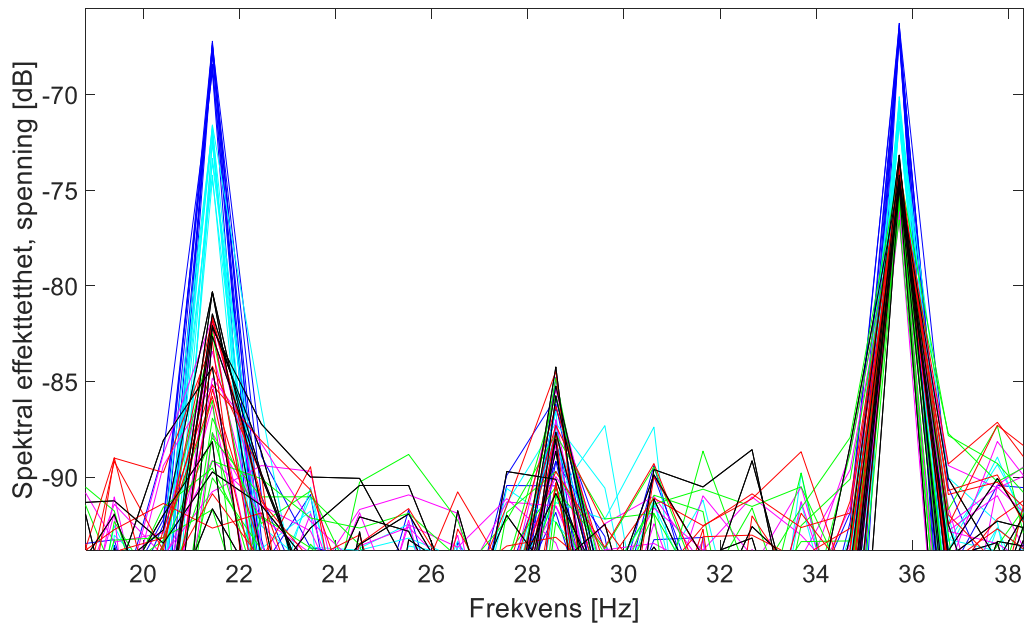


Figur 21.7: Spenning, tomgang, frisk Brutus, 8-bit MSO3014, 4 juni 2019

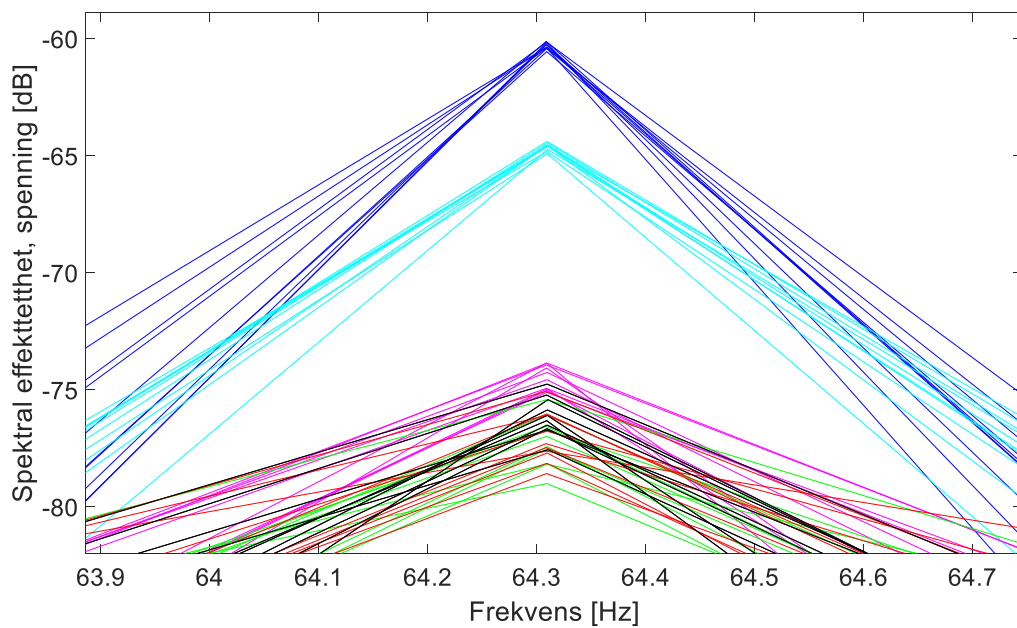


## 21.3 Resultater T1, R, RL, FL2 program 1 og 2a

### 21.3.1 T1 program 2a



Figur 21.8: Spenning, T1, program 2a nærbilde av 21.4 Hz og 35.7 Hz



Figur 21.9: Spenning, T1, program 2a nærbilde av 64.3 Hz

Tabell 21.1: Spenning, tomgang, Program 2a

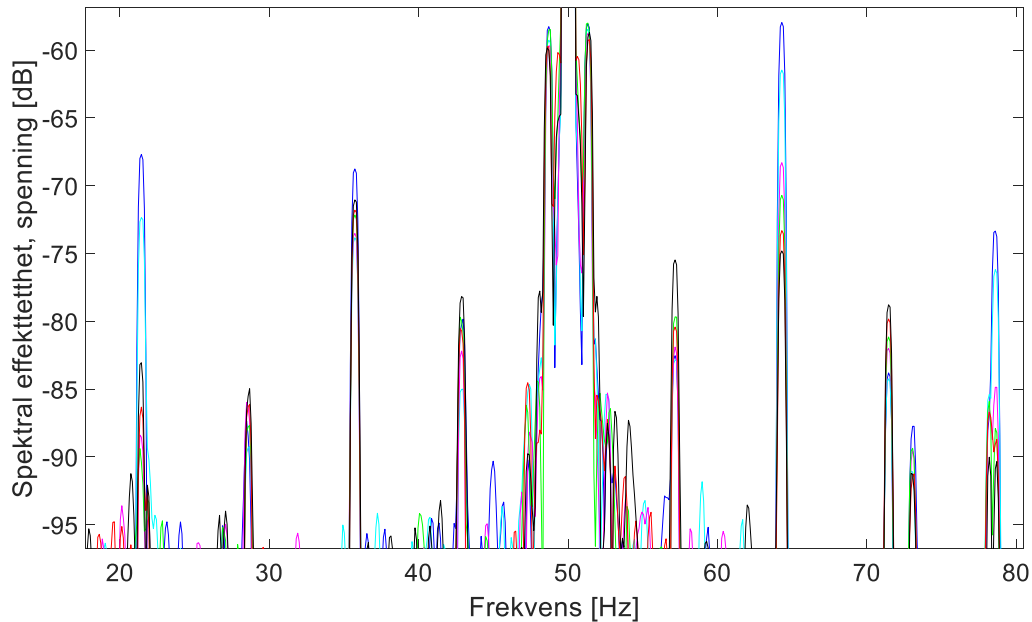
64.31 Hz							
kortslutninger	Lavest [dB]	[V]	Høyest [dB]	[V]	Snitt[dB]	Snitt[V]	$\Delta V$
0	-77.560	0.043	-74.758	0.059	-76.078	0.051	0.016
1	-78.578	0.038	-75.073	0.057	-77.017	0.046	0.019
2	-79.004	0.036	-75.421	0.055	-77.145	0.045	0.019
3	-75.110	0.057	-73.855	0.066	-74.444	0.062	0.009
7	-64.912	0.185	-64.391	0.196	-64.613	0.191	0.011
10	-60.554	0.305	-60.116	0.321	-60.302	0.314	0.016

35.73 Hz							
kortslutninger	Lavest [dB]	[V]	Høyest [dB]	[V]	Snitt[dB]	Snitt[V]	$\Delta V$
0	-74.889	0.059	-73.168	0.071	-74.323	0.063	0.013
1	-74.961	0.058	-73.568	0.068	-74.336	0.062	0.010
2	-76.555	0.048	-73.885	0.066	-75.151	0.057	0.017
3	-76.501	0.049	-75.181	0.057	-75.731	0.053	0.008
7	-71.515	0.086	-70.115	0.102	-70.860	0.093	0.015
10	-67.118	0.143	-66.277	0.158	-66.694	0.150	0.015

21.44 Hz							
kortslutninger	Lavest [dB]	[V]	Høyest [dB]	[V]	Snitt[dB]	Snitt[V]	$\Delta V$
0	-91.660	0.008	-80.313	0.031	-83.528	0.022	0.023
1	-92.667	0.008	-81.643	0.027	-84.614	0.019	0.019
2	-99.693	0.003	-82.501	0.024	-88.234	0.013	0.021
3	-97.712	0.004	-81.695	0.027	-85.872	0.017	0.023
7	-74.434	0.062	-71.588	0.086	-72.702	0.075	0.024
10	-68.816	0.118	-67.212	0.142	-67.861	0.132	0.024

Program 2a bekreftet det program 1 fant ut. Det er mulig å skille 10, 7 og frisk maskin fra hverandre, mens det ikke var mulig skille de laveste feilgradene fra frisk maskin.

### 21.3.2 R program 1



Figur 21.10: Spenning, R-last, Program 1, Flat-top-vindu, 20-80 Hz

Tabell 21.2: Spenning, R-last, Hann-vindu

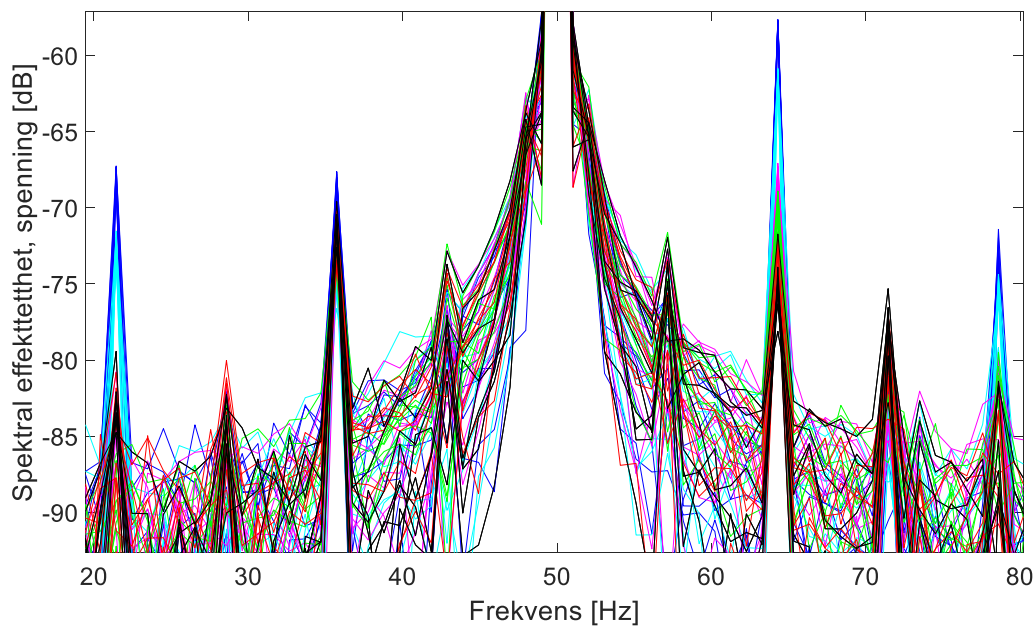
ff	0	10	7	3	2	1
64.31	-74.66	-57.97	-61.45	-68.41	-70.79	-73.18
78.60	-90.80	-73.34	-76.36	-84.42	-86.86	-88.85
121.47	-90.77	-86.09	-86.11	-86.55	-88.08	-89.82
7.15	-98.79	-85.66	-92.39	-93.37	-98.92	-101.84
21.44	-83.13	-67.84	-72.52	-87.89	-91.66	-86.36
35.73	-71.07	-68.67	-73.81	-73.50	-72.15	-71.55

Tabell 21.3: Strøm, R-last, Hann-vindu

Kategori	ff	0	10	7	3	2	1
1	443.02	-117.35	-100.64	-103.53	-103.72	-104.56	-110.72
2	78.60	-91.23	-72.36	-76.44	-82.98	-86.44	-92.91

3	350.13	-54.32	-54.04	-54.05	-54.22	-54.42	-54.28
3	757.42	-68.89	-68.23	-68.62	-68.69	-68.88	-68.77
4	7.15	-98.29	-83.68	-87.06	-103.02	-92.23	-87.84

### 21.3.3 R program 2a



Figur 21.11: Spenning, R-last, Program 2a, 20-80 Hz

Tabell 21.4: Spenning, R-last, Program 2

64.31 Hz							
kortslutninger	Lavest [dB]	[V]	Høyest [dB]	[V]	Snitt[dB]	Snitt[V]	$\Delta V$
0	-78.120	0.040	-71.729	0.084	-74.860	0.059	0.044
1	-74.713	0.060	-71.883	0.083	-73.528	0.069	0.023
2	-72.193	0.080	-68.904	0.117	-70.323	0.099	0.037
3	-69.363	0.111	-67.082	0.144	-68.157	0.127	0.033
7	-61.734	0.266	-60.855	0.295	-61.236	0.282	0.028
10	-58.068	0.406	-57.637	0.427	-57.827	0.418	0.021

## 21-Appendiks A

21.44 Hz							
kortslutninger	Lavest [dB]	[V]	Høyest [dB]	[V]	Snitt[dB]	Snitt[V]	$\Delta V$
0	-84.756	0.019	-79.435	0.035	-82.936	0.023	0.016
1	-92.593	0.008	-80.818	0.030	-85.776	0.017	0.022
2	-93.078	0.007	-84.203	0.020	-88.819	0.012	0.013
3	-93.734	0.007	-80.768	0.030	-86.551	0.015	0.023
7	-74.124	0.064	-71.531	0.086	-72.603	0.076	0.022
10	-69.112	0.114	-67.257	0.141	-67.972	0.130	0.027

78.6 Hz							
kortslutninger	Lavest [dB]	[V]	Høyest [dB]	[V]	Snitt[dB]	Snitt[V]	$\Delta V$
0	-						
	101.854	0.003	-81.381	0.028	-86.351	0.016	0.025
1	-94.619	0.006	-81.738	0.027	-86.119	0.016	0.021
2	-90.031	0.010	-79.498	0.034	-83.431	0.022	0.024
3	-96.605	0.005	-79.835	0.033	-82.738	0.024	0.028
7	-79.374	0.035	-74.380	0.062	-76.230	0.050	0.027
10	-74.776	0.059	-71.419	0.087	-73.198	0.071	0.028

Tabell 21.5: Strøm, R-last, Program 2

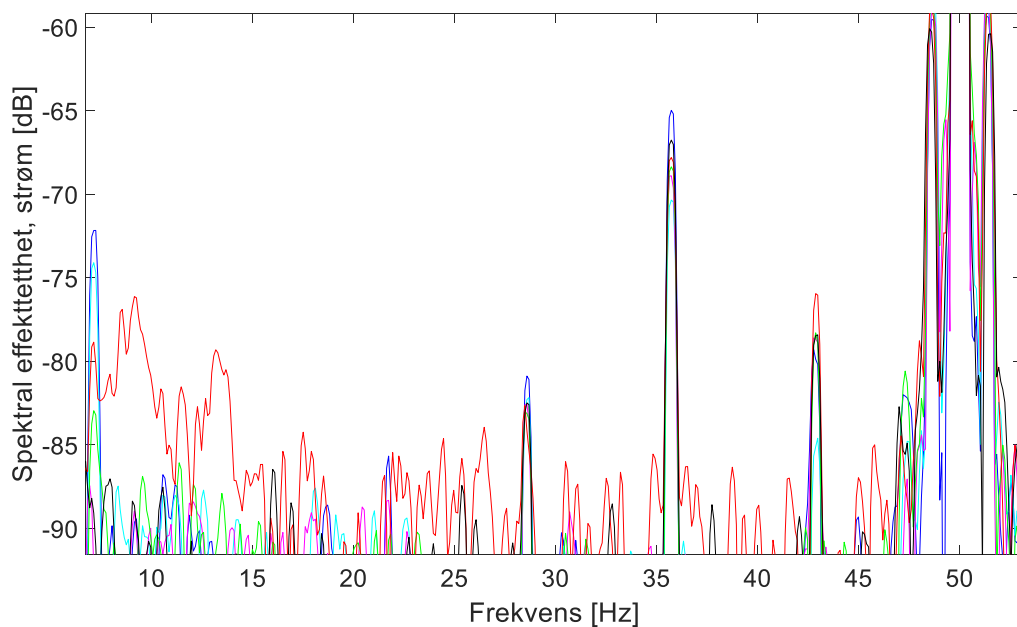
35. Hz							
kortslutninger	Lavest [dB]	[A]	Høyest [dB]	[A]	Snitt[dB]	Snitt[A]	$\Delta A$
0	-73.035	0.073	-70.723	0.095	-72.018	0.082	0.022
1	-75.591	0.054	-71.155	0.090	-73.201	0.071	0.036
2	-74.558	0.061	-70.868	0.093	-73.064	0.072	0.032
3	-77.775	0.042	-73.095	0.072	-74.704	0.060	0.030
7	-77.629	0.043	-73.251	0.071	-75.024	0.058	0.028
10	-70.049	0.102	-67.823	0.132	-68.632	0.120	0.030

78.6 Hz							
kortslutninger	Lavest [dB]	[A]	Høyest [dB]	[A]	Snitt[dB]	Snitt[A]	$\Delta A$
0	-99.912	0.003	-80.178	0.032	-85.368	0.018	0.029
1	-96.670	0.005	-77.739	0.042	-83.878	0.021	0.037
2	-94.384	0.006	-78.068	0.041	-82.283	0.025	0.034
3	-89.510	0.011	-77.317	0.044	-81.868	0.026	0.033
7	-81.033	0.029	-73.037	0.073	-75.910	0.052	0.044
10	-74.821	0.059	-70.789	0.094	-72.658	0.076	0.035

### 21.3.4 RL program 1

Tabell 21.6: Spenning, RL-last, Tybe B, Hann-vindu

ff	0	10	7	3	2	1
7.15	-113.25	-86.43	-89.87	-91.34	-97.43	-101.46
64.31	-74.14	-56.81	-60.38	-68.06	-70.43	-73.30
78.60	-78.84	-69.49	-71.88	-75.82	-77.53	-78.56
135.77	-76.72	-71.85	-72.27	-73.32	-73.99	-74.75
157.20	-78.34	-75.83	-76.53	-77.50	-77.63	-77.83
235.80	-80.07	-77.15	-77.64	-78.82	-78.92	-79.47



Figur 21.12: Strøm, RL, Program 1, Flat top-vindu, 7-55 Hz

Tabell 21.7: Strøm, RL-last, Type B, Hann-vindu

ff	0	10	7	3	2	1
78.60	-79.15	-69.94	-72.50	-76.11	-77.30	-78.82
121.47	-95.83	-86.53	-86.61	-87.83	-88.94	-95.57
214.37	-102.13	-93.46	-95.20	-95.27	-95.91	-97.31
307.26	-84.35	-82.74	-83.21	-83.87	-83.93	-84.52
664.53	-89.32	-87.10	-88.16	-88.80	-91.10	-91.61
807.44	-92.14	-90.20	-90.48	-90.69	-91.51	-91.26
7.15	-95.37	-72.56	-74.39	-86.70	-85.90	-82.26

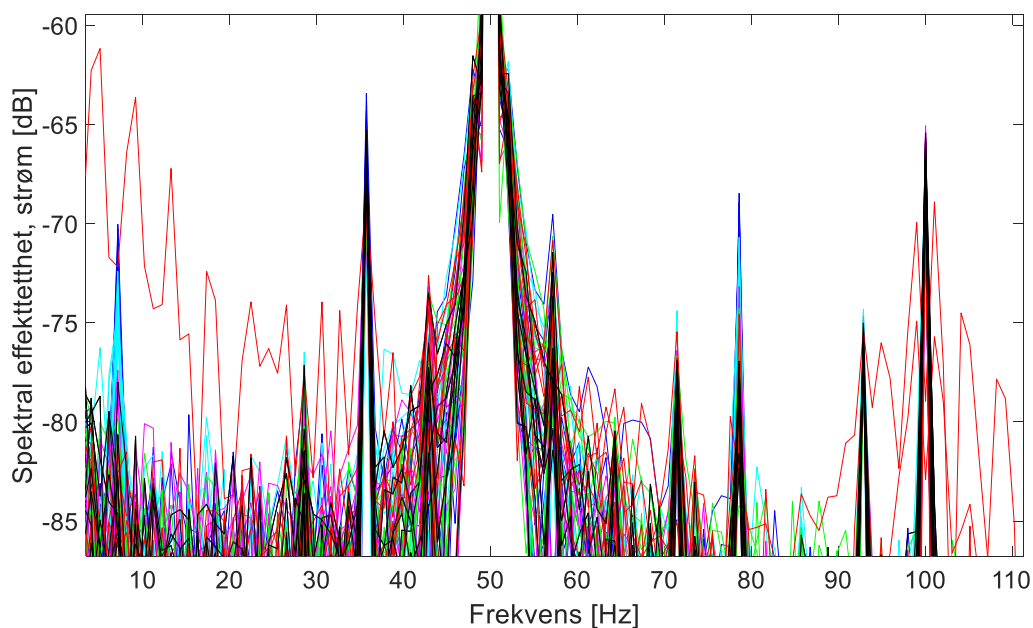
### 21.3.5 RL program 2a

Tabell 21.8: Spenning, RL-last, Program 2a

64.31 Hz							
kortslutninger	Lavest [dB]	[V]	Høyest [dB]	[V]	Snitt[dB]	Snitt[V]	$\Delta V$
0	-76.419	0.049	-72.364	0.078	-73.874	0.066	0.029
1	-74.915	0.058	-71.190	0.090	-73.285	0.070	0.031
2	-72.435	0.078	-68.803	0.118	-70.449	0.098	0.040
3	-68.914	0.117	-67.427	0.138	-67.902	0.131	0.022
7	-60.811	0.296	-60.184	0.318	-60.490	0.307	0.022
10	-57.112	0.454	-56.767	0.472	-56.903	0.465	0.018

21.44 Hz							
kortslutninger	Lavest [dB]	[V]	Høyest [dB]	[V]	Snitt[dB]	Snitt[V]	$\Delta V$
0	-83.741	0.021	-79.424	0.035	-81.406	0.028	0.014
1	-91.792	0.008	-81.234	0.028	-85.445	0.017	0.020
2	-98.930	0.004	-85.486	0.017	-89.070	0.011	0.014
3	-93.048	0.007	-85.446	0.017	-88.970	0.012	0.010
7	-71.877	0.083	-70.298	0.099	-71.286	0.089	0.017
10	-67.611	0.135	-65.826	0.166	-66.908	0.147	0.031

78.6 Hz							
kortslutninger	Lavest [dB]	[V]	Høyest [dB]	[V]	Snitt[dB]	Snitt[V]	$\Delta V$
0	-80.815	0.030	-76.615	0.048	-78.224	0.040	0.018
1	-86.628	0.015	-76.119	0.051	-79.443	0.035	0.036
2	-81.300	0.028	-74.406	0.062	-77.534	0.043	0.034
3	-78.273	0.040	-73.377	0.070	-75.325	0.056	0.030
7	-74.211	0.063	-70.440	0.098	-71.781	0.084	0.034
10	-70.474	0.097	-68.439	0.123	-69.353	0.111	0.026



Figur 21.13: Strøm, RL, Program 2a, 5-110 Hz

Tabell 21.9: Strøm, RL-last, Program 2a

7.15 Hz							
kortslutninger	Lavest [dB]	[A]	Høyest [dB]	[A]	Snitt[dB]	Snitt[A]	$\Delta A$
0	-88.943	0.012	-78.012	0.041	-83.529	0.022	0.029
1	-97.458	0.004	-72.180	0.080	-82.850	0.023	0.076
2	-89.254	0.011	-79.848	0.033	-83.926	0.021	0.022
3	-96.511	0.005	-77.404	0.044	-84.225	0.020	0.039
7	-75.430	0.055	-72.408	0.078	-74.113	0.064	0.023
10	-74.126	0.064	-70.047	0.102	-72.072	0.081	0.038



35. Hz							
kortslutninger	Lavest [dB]	[A]	Høyest [dB]	[A]	Snitt[dB]	Snitt[A]	$\Delta A$
0	-68.115	0.128	-65.316	0.176	-66.602	0.152	0.049
1	-68.711	0.119	-66.322	0.157	-67.629	0.135	0.038
2	-69.959	0.103	-66.676	0.151	-67.958	0.130	0.047
3	-70.334	0.099	-67.325	0.140	-68.802	0.118	0.041
7	-72.102	0.081	-69.185	0.113	-70.167	0.101	0.032
10	-66.168	0.160	-63.445	0.219	-64.920	0.185	0.059

78.6 Hz							
kortslutninger	Lavest [dB]	[A]	Høyest [dB]	[A]	Snitt[dB]	Snitt[A]	$\Delta A$
0	-82.320	0.025	-76.943	0.046	-78.523	0.039	0.021
1	-88.694	0.012	-74.586	0.061	-79.858	0.033	0.049
2	-84.216	0.020	-74.256	0.063	-77.538	0.043	0.043
3	-78.301	0.040	-73.188	0.071	-75.672	0.054	0.032
7	-74.282	0.063	-70.702	0.095	-72.218	0.080	0.032
10	-71.221	0.089	-68.479	0.123	-69.671	0.107	0.033

### 21.3.6 T2 program 1

Tabell 21.10: Type A, Spenning, T2, flat-top-vindu 16-bit

1	2	3	4	5
14.29	78.60	178.64	21.44	7.15
164.35	342.99	635.95	28.58	221.51
850.32	528.77	0.00	35.73	271.53
878.90	921.77	0.00	64.31	321.55
0.00	0.00	0.00	85.75	478.75

Tabell 21.11: Type B, Spenning, T2, flat-top-vindu, 16-bit

ff	0	10	7	3	2	1
----	---	----	---	---	---	---

21-Appendiks A

14.29	-91.84	-83.68	-84.41	-85.04	-89.86	-90.91
164.35	-83.54	-74.75	-75.31	-78.01	-80.86	-82.21
850.32	-45.59	-45.49	-45.50	-45.56	-45.56	-45.58
878.90	-56.68	-55.86	-55.98	-56.27	-56.33	-56.56
78.60	-81.75	-76.59	-78.45	-80.73	-81.31	-82.05
342.99	-109.66	-100.39	-102.55	-104.09	-106.68	-111.50
528.77	-102.06	-97.35	-99.67	-100.92	-101.28	-102.24
921.77	-76.33	-75.96	-76.13	-76.24	-76.28	-76.59
178.64	-80.54	-78.49	-79.52	-80.37	-80.91	-80.68
635.95	-79.68	-78.94	-79.47	-79.58	-79.77	-79.90
21.44	-85.23	-70.54	-74.42	-94.77	-95.40	-88.87
28.58	-91.19	-85.12	-86.63	-89.90	-92.98	-89.84
35.73	-76.35	-69.36	-74.00	-78.00	-77.13	-76.27
64.31	-76.85	-63.30	-67.66	-87.15	-85.12	-79.25
85.75	-85.46	-84.30	-85.09	-86.38	-85.15	-86.25

**Tabell 21.12: Type A, Spenning, T2, 16-bit**

1	2	3	4	5
78.60	14.29	107.18	21.44	7.15
164.35	0.00	528.77	28.58	221.51
878.90	0.00	635.95	35.73	342.99
1236.18	0.00	0.00	64.31	350.13
0.00	0.00	0.00	85.75	421.59

Tabell 21.13: Type B, Spenning, T2, flat-top-vindu, 16-bit

ff	0	10	7	3	2	1
78.60	-82.38	-76.20	-78.68	-81.38	-81.39	-82.24
164.35	-83.08	-74.80	-75.39	-78.39	-81.02	-81.89
878.90	-56.68	-55.90	-55.99	-56.27	-56.34	-56.57
1236.18	-85.50	-84.55	-84.73	-84.99	-85.22	-85.35
14.29	-92.70	-85.34	-86.21	-87.27	-89.84	-94.80
107.18	-82.59	-80.38	-81.27	-82.48	-83.00	-83.07
528.77	-101.63	-97.63	-99.87	-101.61	-102.28	-102.19
635.95	-79.73	-78.98	-79.43	-79.50	-79.82	-79.83
21.44	-85.48	-70.67	-74.71	-105.71	-95.38	-87.83
28.58	-89.10	-83.86	-85.95	-89.64	-90.75	-89.96
35.73	-76.11	-69.47	-74.10	-78.41	-77.40	-76.22
64.31	-77.05	-63.29	-67.63	-87.53	-85.12	-79.03
85.75	-87.09	-84.27	-85.05	-86.02	-85.59	-87.13
128.62	-94.82	-92.19	-93.72	-97.35	-94.92	-94.31
178.64	-80.36	-78.49	-79.52	-80.40	-80.81	-80.52

### 21.3.7 T2 program 2a

Figur 21.14: Spenning, T2, program 2, 16-bit, 100-190 Hz

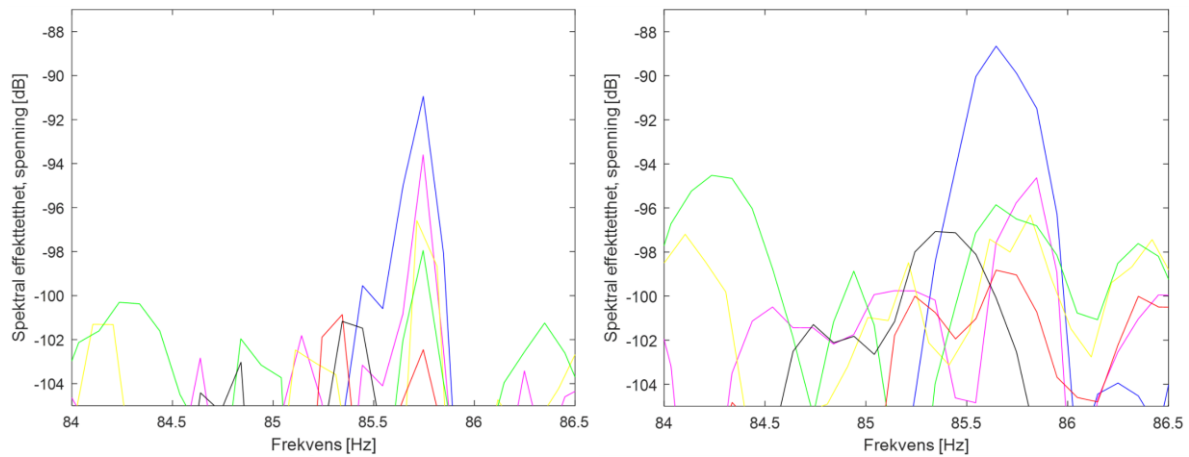
64.31 Hz							
kortslutninger	Lavest [dB]	[V]	Høyest [dB]	[V]	Snitt[dB]	Snitt[V]	$\Delta V$
0	-79.110	0.036	-76.059	0.051	-77.167	0.045	0.015
1	-80.355	0.031	-77.442	0.044	-79.071	0.036	0.012
2	-87.655	0.013	-83.084	0.023	-85.296	0.018	0.009
3	-91.942	0.008	-83.572	0.022	-86.296	0.016	0.013
7	-68.127	0.128	-67.157	0.143	-67.601	0.136	0.015
10	-63.658	0.213	-63.048	0.229	-63.309	0.222	0.016

21.44 Hz							
kortslutninger	Lavest [dB]	[V]	Høyest [dB]	[V]	Snitt[dB]	Snitt[V]	$\Delta V$
0	-90.415	0.010	-81.261	0.028	-84.555	0.019	0.018
1	-93.928	0.007	-79.813	0.033	-84.507	0.019	0.027
2	-						
	102.315	0.002	-83.912	0.021	-87.727	0.013	0.018
3	-93.359	0.007	-83.086	0.023	-87.472	0.014	0.016
7	-76.968	0.046	-72.963	0.073	-74.649	0.060	0.027
10	-71.859	0.083	-69.207	0.113	-70.602	0.096	0.030

### 21.3.8 FL2 program 1

Tabell 21.14: Strøm , FL, Hann-vindu, 16-bit

Kategori	ff	0	10	7	3	2	1
1	78.60	-74.27	-68.40	-69.97	-73.01	-73.44	-74.13
2	142.91	-88.73	-82.14	-83.52	-86.90	-88.52	-89.13
3	7.15	-82.80	-70.75	-74.50	-80.18	-82.82	-89.52
4	157.20	-85.70	-82.40	-82.96	-86.73	-84.89	-84.21
4	178.64	-76.22	-73.81	-74.16	-77.30	-76.24	-76.07
4	185.79	-95.72	-89.20	-91.69	-100.13	-92.15	-96.13
4	207.22	-77.82	-77.78	-77.79	-81.59	-78.18	-78.47



Figur 21.15: Spenning, FL, Hannvindu vs flat-top-vindu, 16-bit, 85.75 Hz.

## 21.4 Metadata skjevlasttester

//////// Ring-segment ute og ødelagt dempestav ute:////////

Uten skeivlast:  $I_m = 68$  A,  $V_m = 12.52$  V

R = 160ohm:  $I_m = 69$  A,  $V_m = 12.52$  V

R = 80ohm:  $I_m = 69$  A,  $V_m = 12.62$  V

R = 44ohm:  $I_m = 71$  A,  $V_m = 12.87$  V

R = 22ohm:  $I_m = 74$  A,  $V_m = 13.33$  V

////////Ring-segment på plass, dempestav ute:////////

Uten skeivlast:  $I_m = 67$  A,  $V_m = 12.44$  V

## 21-Appendiks A

R = 160ohm:  $I_m = 68$  A,  $V_m = 12.59$  V,  $V_{p1} = 230$  V,  $V_{p2} = 232$  V,  $V_{p3} = 232.5$  V

R = 80ohm:  $I_m = 69$  A,  $V_m = 12.73$  V,  $V_{p1} = 231$  V,  $V_{p2} = 233$  V,  $V_{p3} = 233.6$  V

R = 44ohm:  $I_m = 71$  A,  $V_m = 12.96$  V,  $V_{p1} = 230.7$  V,  $V_{p2} = 234.6$  V,  $V_{p3} = 235.6$  V

R = 22ohm:  $I_m = 74$  A,  $V_m = 13.46$  V,  $V_{p1} = 230.5$  V,  $V_{p2} = 238.5$  V,  $V_{p3} = 240.3$  V

////////Ring-segment på plass, dempestav på plass:////////

Uten skeivlast:  $I_m = 68$  A,  $V_m = 12.52$  V,  $V_{p1} = 231.4$  V,  $V_{p2} = 231.4$  V,  $V_{p3} = 231.5$  V

R = 160ohm:  $I_m = 68$  A,  $V_m = 12.62$  V,  $V_{p1} = 230.7$  V,  $V_{p2} = 231.8$  V,  $V_{p3} = 232.2$  V

R = 80ohm:  $I_m = 69$  A,  $V_m = 12.78$  V,  $V_{p1} = 230.6$  V,  $V_{p2} = 232.8$  V,  $V_{p3} = 233.5$  V

R = 44ohm:  $I_m = 70$  A,  $V_m = 12.81$  V,  $V_{p1} = 230.6$  V,  $V_{p2} = 234.5$  V,  $V_{p3} = 235.6$  V

R = 22ohm:  $I_m = 74$  A,  $V_m = 13.46$  V,  $V_{p1} = 230.6$  V,  $V_{p2} = 238.4$  V,  $V_{p3} = 240.1$  V

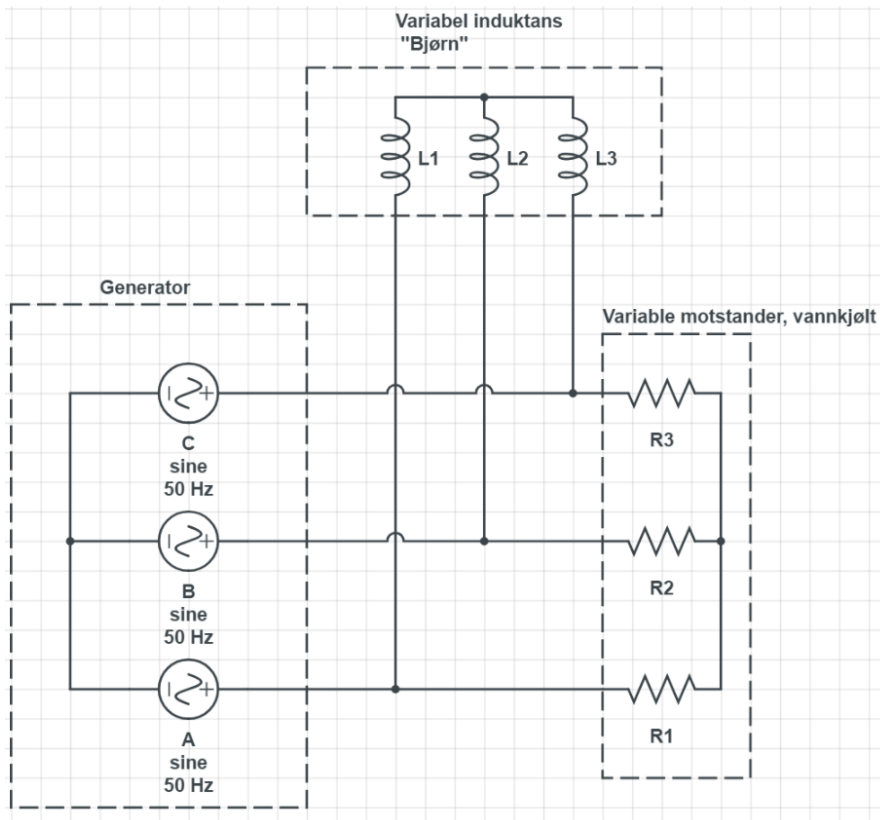
## 21.5 Matematikk

### 21.5.1 Alfa-opperatoren [31]

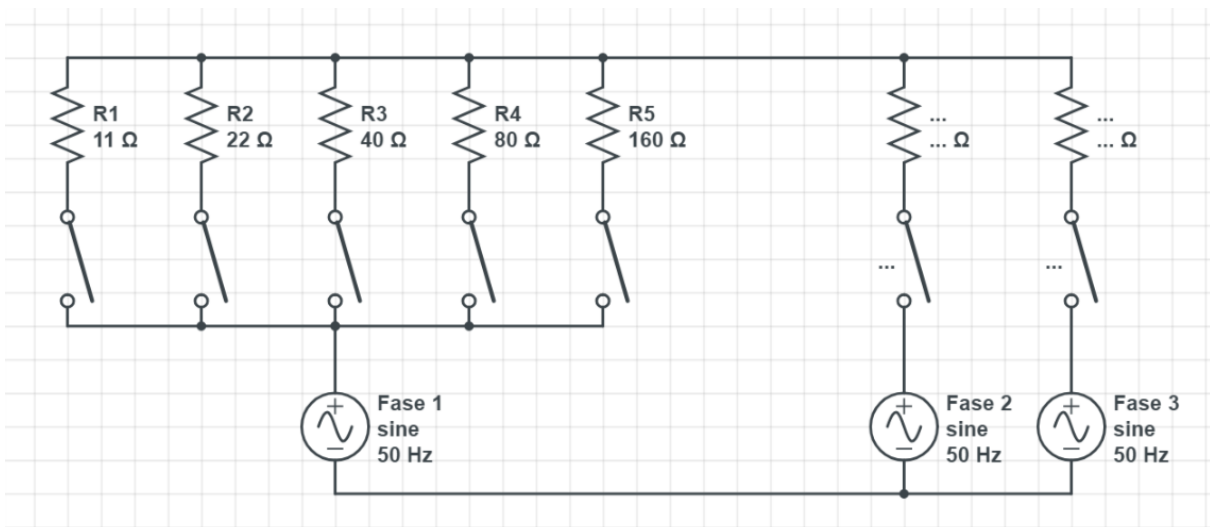
	$\alpha = 1 \angle 120^\circ$	
	$\alpha^2 = 1 \angle 240^\circ$	
	$\alpha^3 = 1 \angle 0^\circ$	
	$\alpha^4 = 1 \angle 120^\circ$	
	$1 + \alpha + \alpha^2 = 0$	
	$1 - \alpha = \sqrt{3} \angle -30^\circ$	
	$1 - \alpha^2 = \sqrt{3} \angle 30^\circ$	
	$\alpha^2 - \alpha = \sqrt{3} \angle 270^\circ$	
	$j\alpha = 1 \angle 210^\circ$	
	$1 + \alpha = -\alpha^2 = 1 \angle 60^\circ$	
	$1 + \alpha^2 = -\alpha = 1 \angle -60^\circ$	
	$\alpha + \alpha^2 = -1 = 1 \angle 180^\circ$	

## 21.6 Kretser

Krets 21.1: Generator med last



Krets 21.2: Vannkjølt motstand.





## 21.7 Utstyr og måleinstrumenter

### 21.7.1 Induktans, «Bjørn»

Serienummer	K02-0070
Fabrikat	NTH
Modell	SPOLE BJØRN 3F
Maksimal strøm	40 A

### 21.7.2 Likeretter, magnetisering

Serienummer	B02-0737
Fabrikat	DELTA ELEKTRONICA
Modell	SM500-CP90
Maksimal strøm	90 A

### 21.7.3 Vekselretter, motor

Serienummer	B03-0488
Fabrikat	SINTEF/NTNU
Effekt	60kVA

### 21.7.4 Ocsilloskop

Serienummer	G04-0365
Fabrikat	Tektronix
Modell	MSO 3014
Oppløsning	8 og 11 bit
Tasterate	2,5 GS/s

## 21-Appendiks A

Serienummer	G04-0385
Fabrikat	ROHDE & SCHWARTZ
Modell	RTO2044
Oppløsning	8 og 16 bit
Tasterate	20 GS/s

### 21.7.5 Måleprober

Serienummer	I06-0358
Fabrikat	METRIX
Type	SPENNINGSPROBE DIFF
Modell	MX9002

Serienummer	I04-0255
Fabrikat	FLUKE
Type	STRØMMÅLER TANG OSCILLOSC
Modell	80i-1000s

## 21.8 Dokumentasjon

### 21.8.1 Klassifisering av måletrafoer[53]

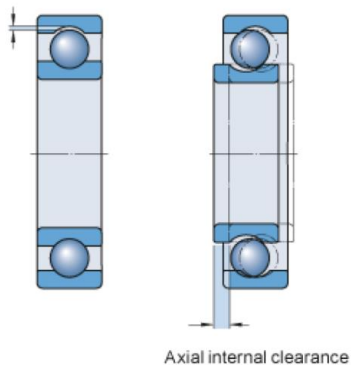
Accuracy classes according to IEC 60044-2:

Class	Range		Limits of errors		Application
	Burden %	Voltage %	Ratio %	Phase displacement Minutes	
0.1	25-100	80-120	0.1	5	Laboratory
0.2	25-100 <10VA 0-100% PF=1	80-120	0.2	10	Precision and revenue metering
0.5	25-100	80-120	0.5	20	Standard revenue metering
1.0	25-100	80-120	1.0	40	Industrial grade meters
3.0	25-100	80-120	3.0	-	Instruments
3P	25-100	5-Vf *)	3.0	120	Protection
6P	25-100	5-Vf *)	6.0	240	Protection

\*) Vf = Voltage factor

### 21.8.2 Lager

Radial internal clearance



Figur 21.16: Illustrasjon av radiell og aksial klarering i et kulelager [56].

Tabell 21.15: Klassifisering av klarering [56].

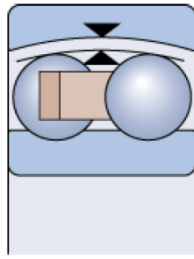
ISO clearance class	SKF designation suffix	Internal clearance

## 21-Appendiks A

-	C1	Smaller than C2
Group 2	C2	Smaller than Normal
Group N	-	Normal
Group 3	C3	Greater than Normal
Group 4	C4	Greater than C3
Group 5	C5	Greater than C4

**Tabell 21.16: Klareringsverdier[39]**

## 21-Appendiks A



Bore diameter		Radial internal clearance					
d		C2		Normal		C3	
>	≤	min.	max.	min.	max.	min.	max.
mm		μm					
<b>Bearings with a cylindrical bore</b>							
2,5	6	1	8	5	15	10	20
6	10	2	9	6	17	12	25
10	14	2	10	6	19	13	26
14	18	3	12	8	21	15	28
18	24	4	14	10	23	17	30
24	30	5	16	11	24	19	35
30	40	6	18	13	29	23	40
40	50	6	19	14	31	25	44
50	65	7	21	16	36	30	50
65	80	8	24	18	40	35	60
80	100	9	27	22	48	42	70
100	120	10	31	25	56	50	83

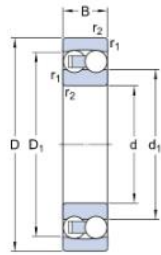
**Tabell 21.17: Dimensjoner kulelager SKF 2218[39]**

## 21-Appendiks A

### ► 2218

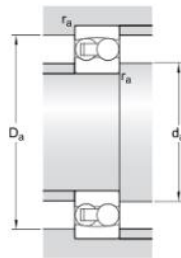
Popular item

#### Dimensions



d	90	mm
D	160	mm
B	40	mm
d <sub>1</sub>	≈ 112.6	mm
D <sub>1</sub>	≈ 139.5	mm
r <sub>1,2</sub>	min. 2	mm

#### Abutment dimensions



d <sub>a</sub>	min. 101	mm
D <sub>a</sub>	max. 149	mm
r <sub>a</sub>	max. 2	mm

#### Calculation data

Basic dynamic load rating	C	70.2	kN
Basic static load rating	C <sub>0</sub>	28.5	kN
Fatigue load limit	P <sub>u</sub>	1.32	kN
Reference speed		7500	r/min
Limiting speed		5300	r/min
Permissible angular misalignment	α	2.5	°
Calculation factor	k <sub>r</sub>	0.04	
Calculation factor	e	0.27	
Calculation factor	Y <sub>0</sub>	2.5	
Calculation factor	Y <sub>1</sub>	2.3	
Calculation factor	Y <sub>2</sub>	3.6	

#### Mass

Mass bearing		3.4	kg
--------------	--	-----	----

## 21.9 Koder og algoritmer

### 21.9.1 AM Kortsluning i feltviklingen, Brutus

```

fs =50;
spor = 114;
poler = 14;
N = 1;
I = 53.2;
luftgapsfaktor = 2.55;
l_g = 1.75*10^-3*luftgapsfaktor;
r = 325*10^-3;
f_mek = 2*fs/poler;
my = 4*pi*10^-7;
Bg = N*I*my/(l_g*(1+1/(poler-1)));
a= pi/poler;
V = 2*pi*r*f_mek;
l = 0.208;

antall_harmoniske=30;

R=2;
T=0;
S=0;

vikling_bunn = [ R    R   -T   -T   -T   S    S   -R   -R   -R   T    T
T   -S  -S  -S   R    R   -T   -T   -T   S    S   S   -R  -R   T    T
T   -S  -S  -S   R    R   R   -T   -T   S    S   S   -R  -R  -R   T
T   -S  -S  -S   R    R   R   -T   -T  -T   S    S   S   -R  -R  -R   T
T    T  -S  -S   R    R   R   -T   -T  -T   S    S   S   -R  -R  -R
T    T  -S  -S  -S   R    R   R   -T   -T  -T   S    S   S   -R  -R  -R
T    T  -S  -S  -S   R    R   R   -T   -T   S    S   S   -R  -R  -R
T    T   T  -S  -S   R] ;

vikling_topp = [ R    R    R   -T   -T   -T   S    S    S   -R  -R   T
T    T  -S  -S  -S   R    R   -T   -T  -T   S    S   S   -R  -R  -R
T    T  -S  -S  -S   R    R   R   -T  -T   S    S   S   -R  -R  -R
T    T   T  -S  -S   R    R   R   -T  -T  -T   S    S   S   -R  -R  -R
T    T   T  -S  -S  -S   R    R   R   -T  -T  -T   S    S   S   -R  -R  -R
T    T   T  -S  -S  -S   R    R   R   -T  -T   S    S   S   -R  -R  -

```

## 21-Appendiks A

```
R   T   T   -S   -S   -S   R   R   R   -T   -T   -T   S   S   -R   -R   -  
R   T   T   T   -S   -S];
```

```
L = length(vikling_bunn);
```

```
x = 1:L;
```

```
vikling = vikling_bunn + vikling_topp;
```

```
spornummer_R= zeros();
```

```
ii = 1;
```

```
for i =1:L
```

```
    if vikling(i) ~= 0
```

```
        spornummer_R(ii)= i-1;
```

```
        ii = ii+1;
```

```
    end
```

```
end
```

```
iii = 0;
```

```
for i =1:L
```

```
    if vikling(i) == 0
```

```
    else
```

```
        iii = iii +1;
```

```
        faktor(iii) = vikling(i);
```

```
    end
```

```
end
```

```
alfa_s = (2*pi)/spor;
```

```
theta = alfa_s.*spornummer_R;
```

```
%%%%%%%%%%
```

```
L_theta = length(theta);
```

```
for t_n = 1:1500
```

```
    t(t_n) = 0 + t_n/10000;
```



## 21-Appendiks A

```
for v = 1:L_theta
    for n = 1:antall_harmoniske
        a_n = 2*Bg/(n*pi) * (1-1/(1-poler))*sin(n*a);

        ft(t_n,v,n) = V*I*faktor(v)*a_n*cos(n*(theta(v) -
2*pi*f_mek*t(t_n)));
    end
end

end

for t_n = 1:length(t)

    for n = 1:antall_harmoniske
        ftsum(t_n,n) = 0;
    end

    for v = 1:L_theta
        for n = 1:antall_harmoniske
            ftsum(t_n,n) = ftsum(t_n,n) + ft(t_n,v,n);
        end
    end

end

end

%
%plot
for n = 1:antall_harmoniske
plot(t,ftsum(:,n))
hold on
end
set(gca,'XLim',[0,0.08]);
ylabel('Spenning [V]')
```

## 21-Appendiks A

```
xlabel('Tid [sek]')

%finne amplitude
for n = 1:antall_harmoniske
amplitude(1,n)= n*f_mek;
    amplitude(2,n) = max(ftsum(:,n));
    amplitude(3,n) = mag2db(amplitude(2,n)/(230*sqrt(2)));
end

set(figure, 'ToolBar', 'none');
h=axes;
set(h, 'position', [0.08 0.18 0.9 0.8])
bar(amplitude(1,:), (amplitude(2,:)/(230*sqrt(2)).*100)
set(gca, 'YLim', [0,0.2]);
set(gca, 'YTick', [0:0.01:0.3]);
set(gca, 'XTick', [0:f_mek:(f_mek*antall_harmoniske)]);
set(gca, 'xticklabel', num2str(get(gca, 'xtick'), '%.1f'))
xtickangle(45)
set(gca, 'fontsize', 24)
ylabel('Spenningsamplitude %')
xlabel('Frekvens [Hz]')
for i = 1:antall_harmoniske
yline(amplitude(2,i)/(230*sqrt(2)).*100);
hold on
end
```

### 21.9.2 AM Kortsluning i feltviklingen og statisk eksentrisitet,

#### Ulefoss

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
clear all
delta =0.1
```

## 21-Appendiks A

```
fs =50;
spor = 180;
poler = 16;
N = 10;
I = 70;
luftgapsfaktor = 2;
l_g = 15*10^-3;
r = 1.2;
f_mek = 2*fs/poler
my = 4*pi*10^-7
Bg = N*I*my/(l_g*(1+1/(poler-1)));
a= pi/poler;
V = 2*pi*r*f_mek;
l =0.3;

antall_harmoniske=30;

R=3;
T=0;
S=0;

vikling_bunn = [ R  R  R  -T  -T  -T  -T  S  S  S  -R  -R
-R  -R  T  T  T  T  -S  -S  -S  -S  R  R  R  -T  -T  -T
-T  S  S  S  S  -R  -R  -R  -R  T  T  T  -S  -S  -S  -S
R];

vikling_topp = [ R  R  R  R  -T  -T  -T  -T  S  S  S  S
-R  -R  -R  T  T  T  T  -S  -S  -S  -S  R  R  R  R  -T
-T  -T  S  S  S  S  -R  -R  -R  -R  T  T  T  T  -S  -S
-S];

vikling_bunn = [vikling_bunn  vikling_bunn  vikling_bunn
vikling_bunn];

vikling_topp = [vikling_topp  vikling_topp  vikling_topp
vikling_topp];

L = length(vikling_bunn);
x = 1:L;
```

## 21-Appendiks A

```
vikling = vikling_bunn + vikling_topp;
spornummer_R= zeros();
ii = 1;
for i =1:L
    if vikling(i) ~= 0
        spornummer_R(ii)= i-1;
        ii = ii+1;
    end
end
iii = 0;
for i =1:L
    if vikling(i) == 0

    else
        iii = iii +1;
        faktor(iii) = vikling(i);
    end
end

alfa_s = (2*pi)/spor;

theta = alfa_s.*spornummer_R;

%%%%%%%%%%%%%%
L_theta = length(theta);

for t_n = 1:1500
    t(t_n) = 0 + t_n/10000;
    for v = 1:L_theta
        for n = 1:antall_harmoniske
            Bg = N*I*my/(l_g*(1-delta*cos(theta(v))))*(1+1/(poler-
1)));
            a_n = 2*Bg/(n*pi) * (1-1/(1-poler))*sin(n*a);
```

## 21-Appendiks A

```
        ft(t_n,v,n)          =V*l*faktor(v)*a_n*cos(n*(theta(v)-
2*pi*f_mek*t(t_n)));
    end
end

end

for t_n = 1:length(t)

    for n = 1:antall_harmoniske
        ftsum(t_n,n) = 0;
    end

    for v = 1:L_theta
        for n = 1:antall_harmoniske
            ftsum(t_n,n) = ftsum(t_n,n) + ft(t_n,v,n);
        end
    end

end

end

%
%plot
....
```

### 21.9.3 AM Dynamisk eksentrisitet, Liafoss

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
clear all
delta_d =0.1
fs =50;
spor = 117;
```

## 21-Appendiks A

```
poler = 12;
N = 10
I = 70;
luftgapsfaktor = 2;
l_g = 15*10^-3;
r=1450*10^-3/2
f_mek = 2*fs/poler
my = 4*pi*10^-7
Bg = N*I*my/(l_g*(1+1/(poler-1)));
a= pi/poler;
V = 2*pi*r*f_mek;
l =754*10^-3;
antall_harmoniske=25;

R=3;
T=0;
S=0;
vikling_bunn = [ R R -T -T -T S S S -R -R -R -R T T T -S
-S -S R R R -T -T -T -T S S S -R -R -R T T T -S -S -S -S R];
vikling_topp = [ R R R R -T -T -T S S S -R -R -R T T T T -S -S
-S R R R -T -T -T S S S S -R -R -R T T T -S -S -S];
vikling_bunn = [vikling_bunn vikling_bunn vikling_bunn];
vikling_topp = [vikling_topp vikling_topp vikling_topp];
L = length(vikling_bunn);
x = 1:L;

vikling = vikling_bunn + vikling_topp;
spornummer_R= zeros();
ii = 1;
for i =1:L
    if vikling(i) ~= 0
        spornummer_R(ii)= i-1;
        ii = ii+1;
```

## 21-Appendiks A

```
        end
    end
    iii = 0;
    for i = 1:L
        if vikling(i) == 0

            else
                iii = iii + 1;
                faktor(iii) = vikling(i);
            end
        end
    end

    alfa_s = (2*pi)/spor;

    theta = alfa_s.*spornummer_R;

    %%%%%%%%%%%
L_theta = length(theta);
    Bg = delta_d*N*I*my/(2*l_g);
    for t_n = 1:2000
        t(t_n) = 0 + t_n/10000;
        for v = 1:L_theta
            for n = 1:antall_harmoniske

                ft(t_n,v,n)=
V*l*faktor(v)*Bg*cos(n*2*pi*fs*t(t_n)*2/poler-n*theta(v));
            end
        end
    end

    end

    %Bg*cos(2*pi*f_mek*t(t_n)-theta(v)*poler/2)
    for t_n = 1:length(t)
```

```

    for n = 1:antall_harmoniske
        ftsum(t_n,n) = 0;
    end

    for v = 1:L_theta
        for n = 1:antall_harmoniske
            ftsum(t_n,n) = ftsum(t_n,n) + ft(t_n,v,n);
        end
    end

    end

%finne amplitude
for n = 1:antall_harmoniske
    amplitude(1,n) = n*f_mek;
    amplitude(2,n) = max(ftsum(:,n));

    amplitude(3,n) = mag2db(amplitude(2,n) / (5250*sqrt(2)/sqrt(3)));
end

%plot
...

```

### 21.9.4 Algoritme for å finne frekvensen for den grunnharmoniske

Regresjonsalgoritmen, som ble brukt for å finne frekvensen på den grunnharmoniske, ble hentet fra Mathworks hjemmesider[54]. Ut fra de dataene den fikk presentert lagde den en sinusfunksjon, (27.1). Frekvensen ble funnet ved å dele  $b_2$ , altså  $\omega$ , på  $2\pi$ .

$$f(x) = b_0 + b_1 \sin(b_2 x + b_3) \quad (21.1)$$

Regresjonen var svært tung for datamaskinen og økte beregningstiden programmene betraktelig.



## 21-Appendiks A

```
%%Frekvensfinneren.

%hentet fra
https://se.mathworks.com/matlabcentral/answers/36999-how-do-i-
regression-fit-a-sinwave-to-a-dataset

% dato: 14.02.2019. Bare deler av scriptet er gjengitt:

% Note that we need to pass three sets of input arguments to
NonLinearModel

% # The X and Y data
% # A string describing our model
% # Starting conditions for the optimization solvers
% Generate some good starting conditions for the solvers
B0 = mean(U); % Vertical shift
B1 = (max(U) - min(U))/2; % Amplitude
B2 = f_in*2*pi; % Phase (Number of peaks)
B3 = 0; % Phase shift (eyeball the Curve)
myFit = NonLinearModel.fit(x_csv,U, 'y ~ b0 + b1*sin(b2*x1 +
b3)', [B0, B1, B2, B3]);

% Note that all the coefficient estimates are very good except
for b3 where

% any even integer is equally valid
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% slutt på Richard Willeys script

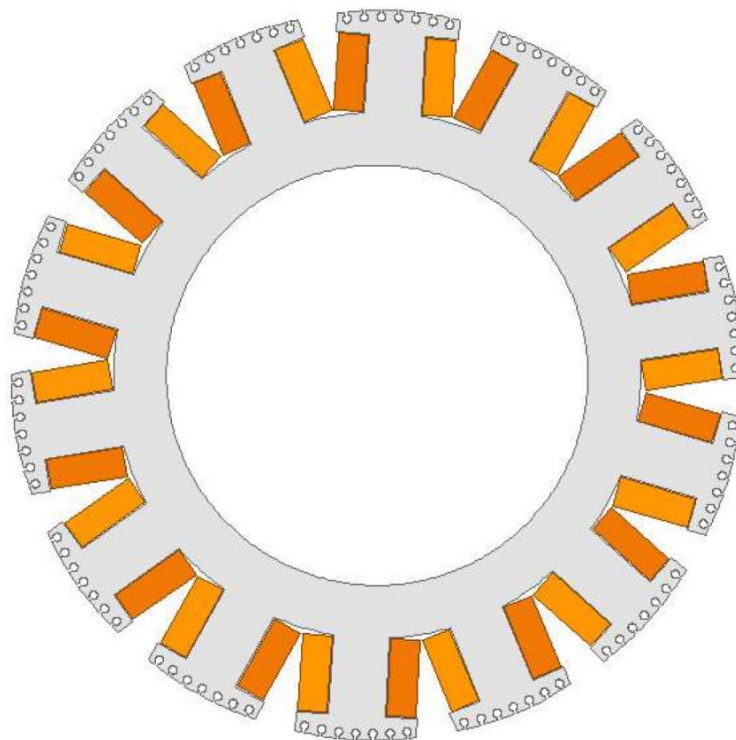
omega = myFit.Coefficients{3,1};
f = omega/(2*pi); %faktisk frekvens
f_mek = 2*f/p; %mekanisk frekvens
T_mek = 1/f_mek;
```



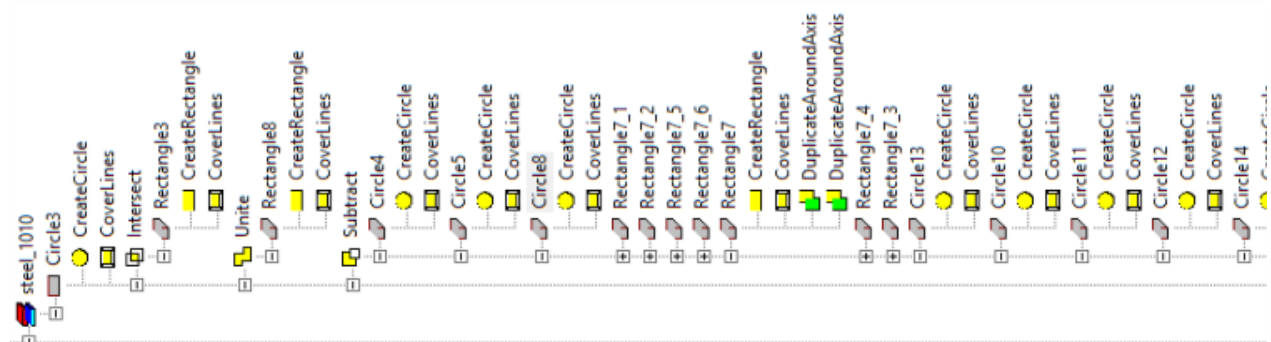
## 22 Appendiks B: Oppbygning av FEM-modell i ANSYS Maxwell av Brutus fra prosjektoppgaven.

### 22.1 Rotor

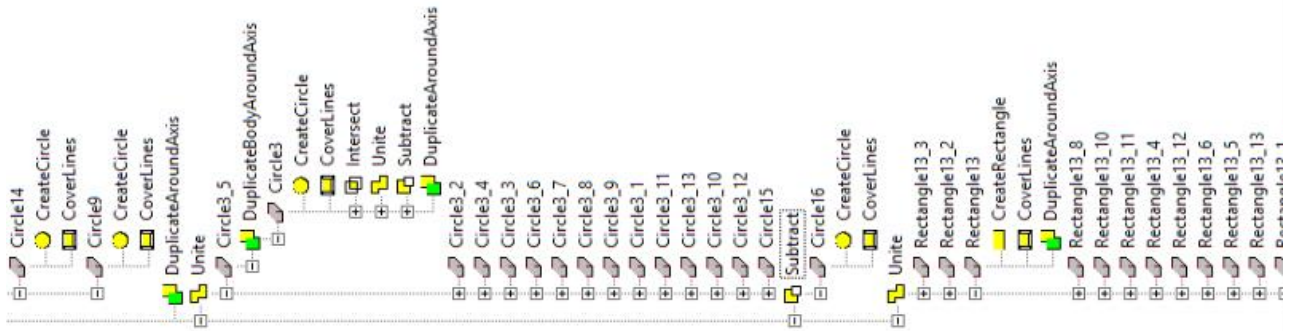
Rotoråket ser ut til å være mangelkantet i maskintegningene, men er her modellert som helt sirkulær.



#### 22.1.1 Sammensetning



22-Appendiks B: Oppbygning av FEM-modell i ANSYS Maxwell av Brutus fra prosjektoppgaven.



### 22.1.2 Polsko

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description
Command	CreateRectangle			
Coordinate Sys...	Global			
Position	-54 ,323.25 ,0	mm	-54mm , 323.25...	
Axis	Z			
XSize	108	mm	108mm	
YSize	-22	mm	-22mm	

### 22.1.3 Bue polsko

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description
Command	CreateCircle			
Coordinate Sys...	Global			
Center Position	0 ,53.25 ,0	mm	0mm , 53.25mm...	
Axis	Z			
Radius	270	mm	270mm	
Number of Seg...	0		0	

### 22.1.4 Polkjerne

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description
Command	CreateRectangle			
Coordinate Sys...	RelativeCS1			
Position	-25 ,178 ,0	mm	-25mm , 178mm...	
Axis	Z			
XSize	50	mm	50mm	
YSize	70	mm	70mm	

### 22.1.5 Hull til dempeviklinger

Hvert hull er plassert i forhold til det globale koordinatsystemet. Her kunne et relativt koordinatsystem blitt brukt isteden.

22-Appendiks B: Oppbygning av FEM-modell i ANSYS Maxwell av Brutus fra prosjektoppgaven.

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description
Command	CreateCircle			
Coordinate Sys...	Global			
Center Position	15.196903 ,264+53.25-0.4377604 ,0	mm	15.196903mm ,...	
Axis	Z			
Radius	3.65	mm	3.65mm	
Number of Seg...	0		0	

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description
Command	CreateCircle			
Coordinate Sys...	Global			
Center Position	45.38928247 ,260.0688621+53.25 ,0	mm	45.38928247m...	
Axis	Z			
Radius	3.65	mm	3.65mm	
Number of Seg...	0		0	

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description
Command	CreateCircle			
Coordinate Sys...	Global			
Center Position	30.34340773 ,262.2504101+53.25 ,0	mm	30.34340773m...	
Axis	Z			
Radius	3.65	mm	3.65mm	
Number of Seg...	0		0	

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description
Command	CreateCircle			
Coordinate Sys...	Global			
Center Position	-15.196903 ,264+53.25-0.4377604 ,0	mm	-15.196903mm ...	
Axis	Z			
Radius	3.65	mm	3.65mm	
Number of Seg...	0		0	

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description
Command	CreateCircle			
Coordinate Sys...	Global			
Center Position	-30.34340773 ,262.2504101+53.25 ,0	mm	-30.34340773m...	
Axis	Z			
Radius	3.65	mm	3.65mm	
Number of Seg...	0		0	

22-Appendiks B: Oppbygning av FEM-modell i ANSYS Maxwell av Brutus fra prosjektoppgaven.

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description
Command	CreateCircle			
Coordinate Sys...	Global			
Center Position	-45.38928247 ,260.0688621+53.25 ,0	mm	-45.38928247m...	
Axis	Z			
Radius	3.65	mm	3.65mm	
Number of Seg...	0		0	

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description
Command	CreateCircle			
Coordinate Sys...	Global			
Center Position	0 ,264+53.25 ,0	mm	0mm , 317.25m...	
Axis	Z			
Radius	3.65	mm	3.65mm	
Number of Seg...	0		0	

### 22.1.6 Utskjæring til hull til dempeviklingene

Disse er duplisert rundt et sekundært koordinatsystem.

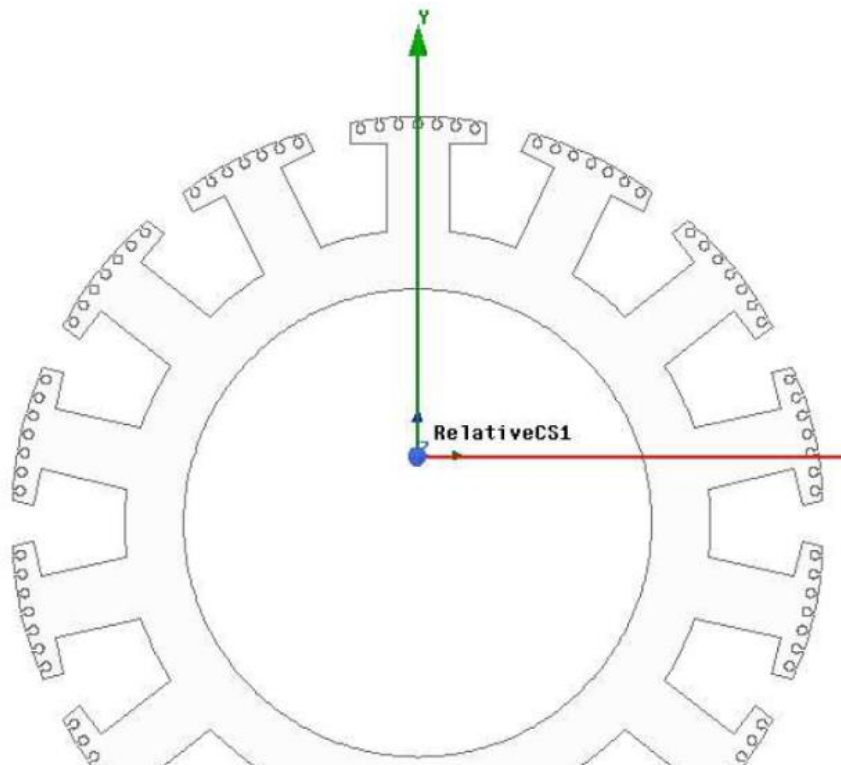
22-Appendiks B: Oppbygning av FEM-modell i ANSYS Maxwell av Brutus fra prosjektoppgaven.

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description
Command	CreateRectangle			
Coordinate Sys...	RelativeCS1			
Position	-1.25 ,264 ,0	mm	-1.25mm , 264m...	
Axis	Z			
XSize	2.5	mm	2.5mm	
YSize	7	mm	7mm	

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description
Command	DuplicateAroundAxis			
Coordinate Sys...	RelativeCS1			
Axis	Z			
Angle	3.3	deg	3.3deg	
Total Number	4		4	
Attach To Orig...	<input type="checkbox"/>			

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description
Command	DuplicateAroundAxis			
Coordinate Sys...	RelativeCS1			
Axis	Z			
Angle	-3.3	deg	-3.3deg	
Total Number	4		4	
Attach To Orig...	<input type="checkbox"/>			

### 22.1.7 Sekundært koordinatsystem



22-Appendiks B: Oppbygning av FEM-modell i ANSYS Maxwell av Brutus fra prosjektoppgaven.

### 22.1.8 Duplisering av polsko og kjerne rundt aksling

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description
Command	DuplicateAroundAxis			
Coordinate Sys...	Global			
Axis	Z			
Angle	360/14	deg	25.7142857142...	
Total Number	14		14	
Attach To Orig...	<input type="checkbox"/>			

### 22.1.9 Ytre radius rotoråk

Modellert som sirkuler og ikke mangekantet, derfor er radiusen som er brukt i modellen noe større enn den som er oppgitt i tegningene.

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description
Command	CreateCircle			
Coordinate Sys...	Global			
Center Position	0,0,0	mm	0mm, 0mm, 0mm	
Axis	Z			
Radius	232.5974258241	mm	232.597425824...	
Number of Seg...	0		0	

### 22.1.10 Indre radius

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description
Command	CreateCircle			
Coordinate Sys...	Global			
Center Position	0,0,0	mm	0mm, 0mm, 0mm	
Axis	Z			
Radius	186	mm	186mm	
Number of Seg...	0		0	

### 22.1.11 Stort og lite hull i polkjernen

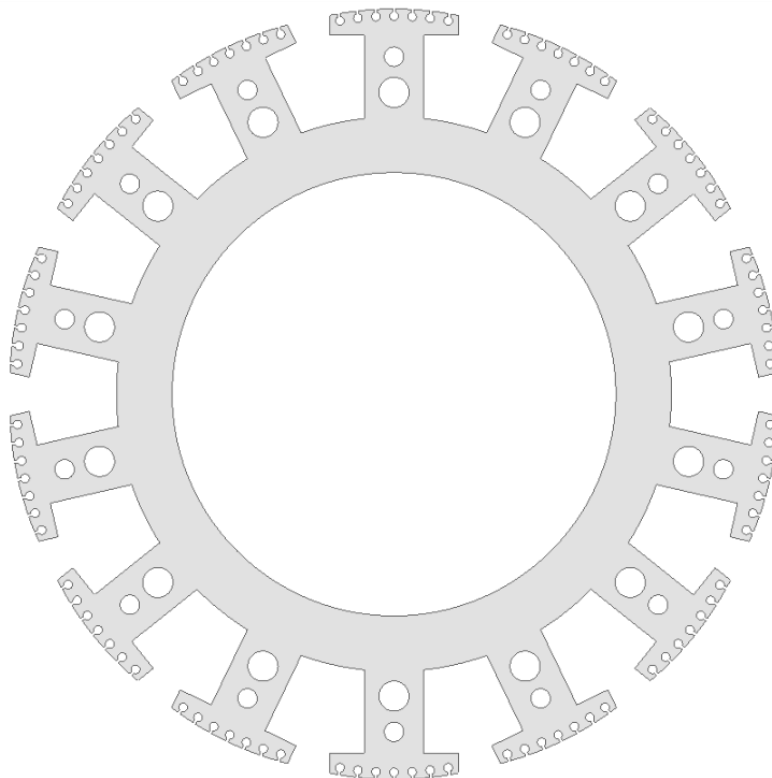
Det er hull for gjennomgående bolter i laminatet. Hullene ble senere tettet igjen fordi magnetfeltet ble for svakt.

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description
Command	CreateCircle			
Coordinate Sys...	RelativeCS1			
Center Position	0,230,0	mm	0mm, 230mm, ...	
Axis	Z			
Radius	8.15	mm	8.15mm	
Number of Seg...	0		0	

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description
Command	CreateCircle			
Coordinate Sys...	RelativeCS1			
Center Position	0,200,0	mm	0mm, 200mm, ...	
Axis	Z			
Radius	12.65	mm	12.65mm	
Number of Seg...	0		0	



22-Appendiks B: Oppbygning av FEM-modell i ANSYS Maxwell av Brutus fra prosjektoppgaven.



#### 22.1.12 Tetting av hull

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description
Command	CreateRectangle			
Coordinate Sys...	Global			
Position	-20 ,240 ,0	mm	-20mm , 240mm...	
Axis	Z			
XSize	40	mm	40mm	
YSize	60	mm	60mm	

#### 22.1.13 Feltvikling

Feltviklingens størrelse er ikke spesifisert i tegningen. Dimensjonene må ansees som innen rimelighetens grenser.

Høyre side av polen

22-Appendiks B: Oppbygning av FEM-modell i ANSYS Maxwell av Brutus fra prosjektoppgaven.

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description
Command	CreateRectangle			
Coordinate Sys...	RelativeCS1			
Position	27+25 ,247 ,0	mm	52mm , 247mm ...	
Axis	Z			
XSize	-26	mm	-26mm	
YSize	-68	mm	-68mm	

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description
Command	DuplicateAroundAxis			
Coordinate Sys...	Global			
Axis	Z			
Angle	360/14	deg	25.7142857142...	
Total Number	14		14	
Attach To Ori...	<input type="checkbox"/>			

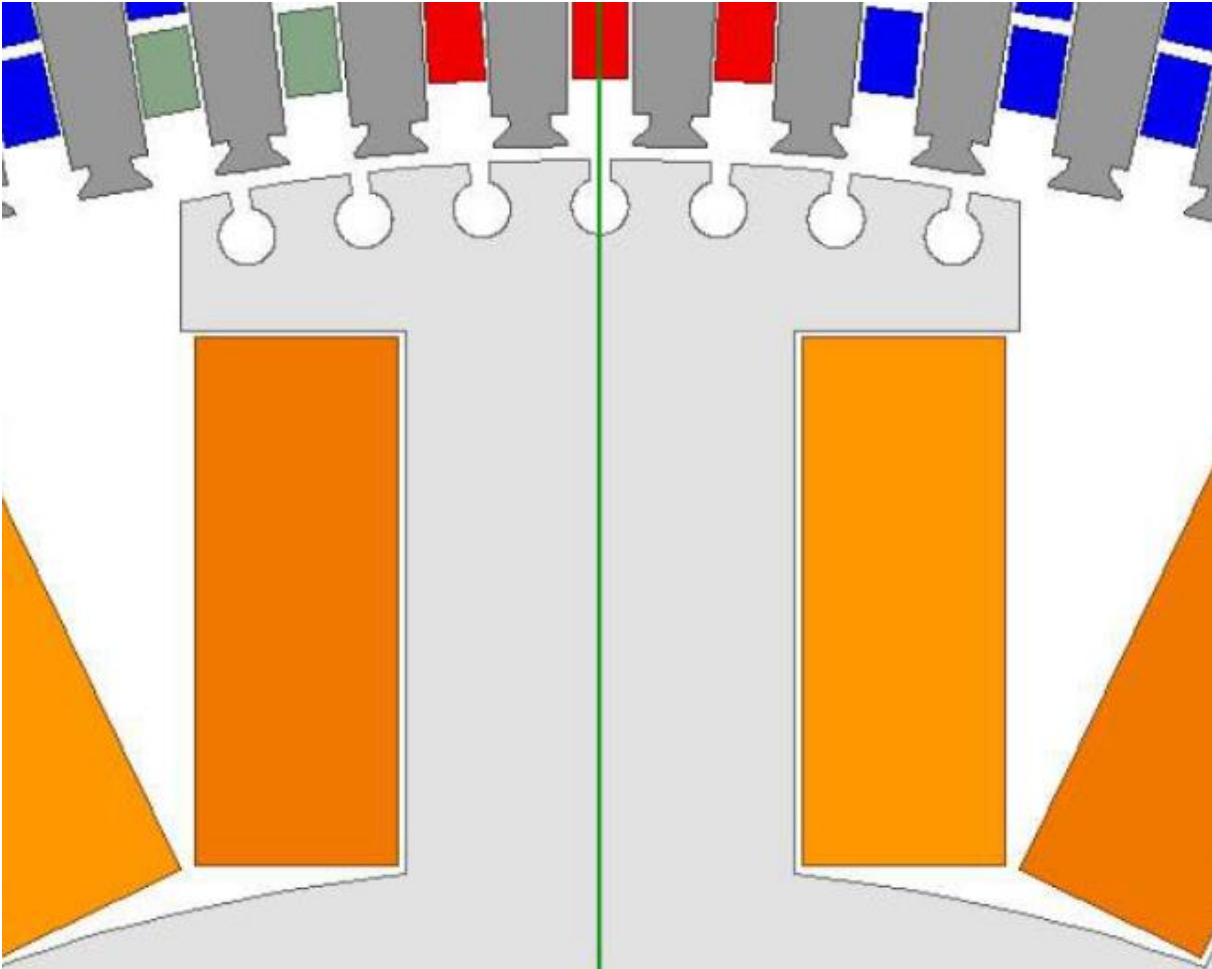
Venstre side av polen

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description
Command	CreateRectangle			
Coordinate Sys...	RelativeCS1			
Position	-(27+25) ,247 ,0	mm	-52mm , 247mm...	
Axis	Z			
XSize	26	mm	26mm	
YSize	-68	mm	-68mm	

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description
Command	DuplicateAroundAxis			
Coordinate Sys...	Global			
Axis	Z			
Angle	360/14	deg	25.7142857142...	
Total Number	14		14	
Attach To Ori...	<input type="checkbox"/>			

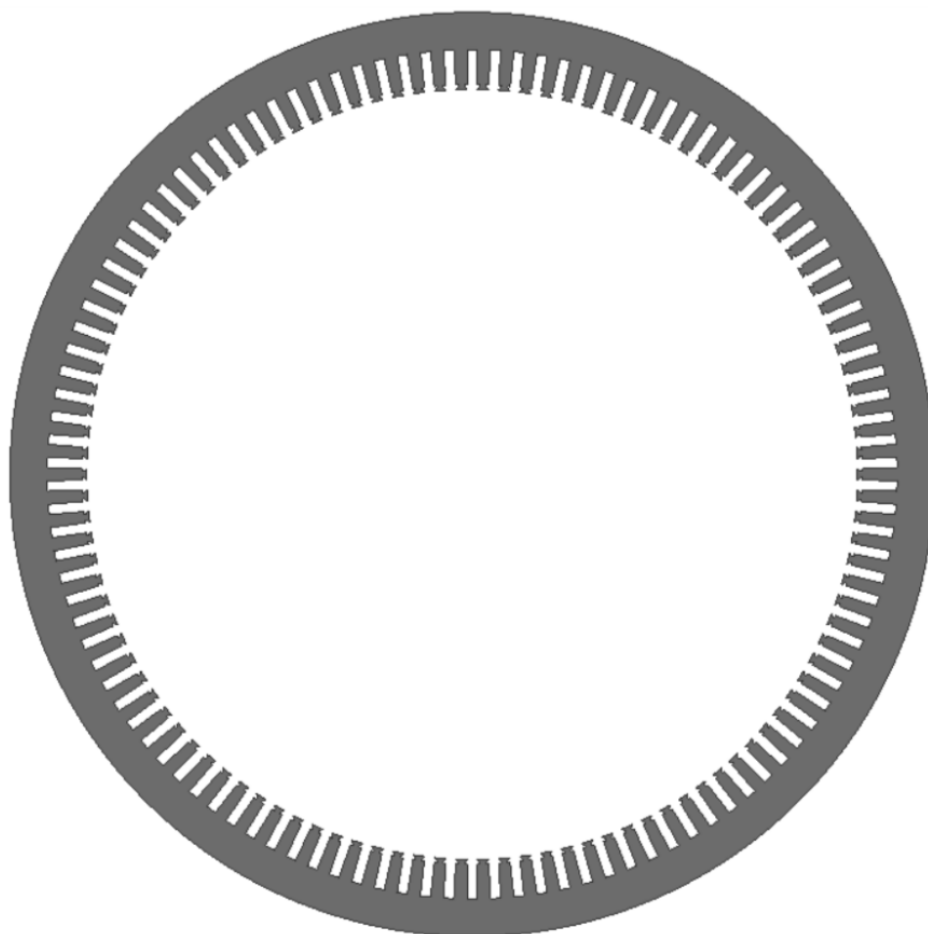
22-Appendiks B: Oppbygning av FEM-modell i ANSYS Maxwell av Brutus fra prosjektoppgaven.

**22.1.14Pol**



22-Appendiks B: Oppbygning av FEM-modell i ANSYS Maxwell av Brutus fra prosjektoppgaven.

## 22.2 Stator



### 22.2.1 Statoråk, indre og ytre radius

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description
Command	CreateCircle			
Coordinate Sys...	Global			
Center Position	0 , 0 , 0	mm	0mm , 0mm , 0mm	
Axis	Z			
Radius	325	mm	325mm	
Number of Seg...	0		0	

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description
Command	CreateCircle			
Coordinate Sys...	Global			
Center Position	0 , 0 , 0	mm	0mm , 0mm , 0mm	
Axis	Z			
Radius	390	mm	390mm	
Number of Seg...	0		0	

22-Appendiks B: Oppbygning av FEM-modell i ANSYS Maxwell av Brutus fra prosjektoppgaven.

### 22.2.2 Spor

Sporet består av fire forskjellige mangekanter (+5. som sletter en grense som skapte problemer).

De fire er slått sammen til én enhet og duplisert rundt z-aksen.



Selve sporet er skåret ut av et rektangel.

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description
Command	CreateRectangle			
Coordinate Sys...	Global			
Position	-4.25 ,325 ,0	mm	-4.25mm , 325m...	
Axis	Z			
XSize	8.5	mm	8.5mm	
YSize	33.5	mm	33.5mm	

Nisjen for låsing av viklingene består av to trekanter og en firkant. Dette er gjort delvis på øyemål da tegningene ikke gir nøyaktig utforming av nisjen.

22-Appendiks B: Oppbygning av FEM-modell i ANSYS Maxwell av Brutus fra prosjektoppgaven.

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description
Command	CreateRectangle			
Coordinate Sys...	Global			
Position	-6.4 ,329 ,0	mm	-6.4mm , 329m...	
Axis	Z			
XSize	12.8	mm	12.8mm	
YSize	-1.4	mm	-1.4mm	

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description
Command	CreateRegularPolygon			
Coordinate Sys...	Global			
Center Position	-4.71 ,327.168 ,0	mm	-4.71mm , 327....	
Start Position	-6.4 ,327.6 ,0	mm	-6.4mm , 327.6...	
Axis	Z			
Number of Seg...	3		3	

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description
Command	CreateRegularPolygon			
Coordinate Sys...	Global			
Center Position	4.71 ,327.168 ,0	mm	4.71mm , 327.1...	
Start Position	6.4 ,327.6 ,0	mm	6.4mm , 327.6m...	
Axis	Z			
Number of Seg...	3		3	

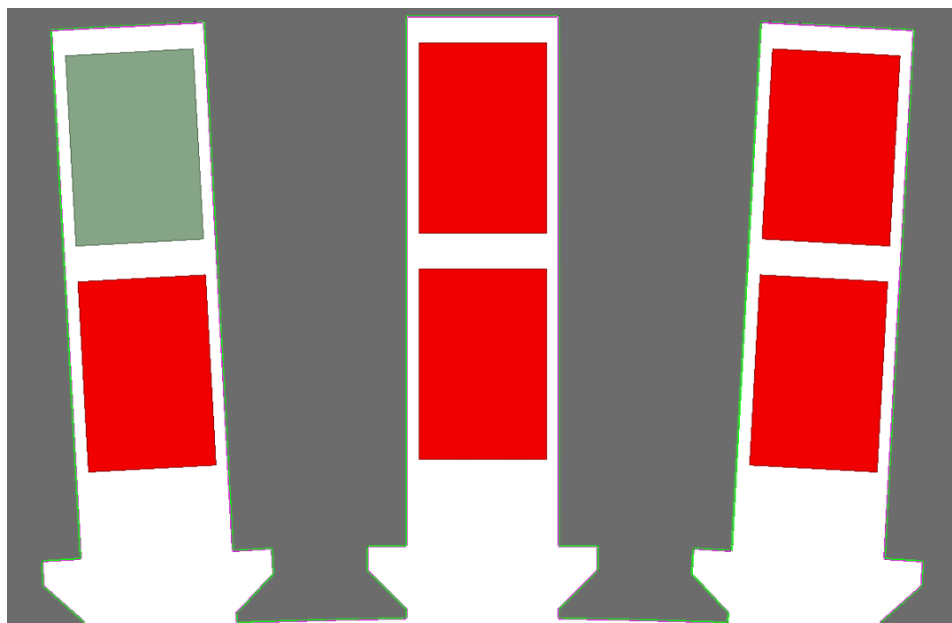
Under subtraksjonen mellom statoråket og sporene ble det igjen en liten av indre statorgrense, slik at denne måtte subtraheres i etterkant

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description
Command	CreateRectangle			
Coordinate Sys...	Global			
Position	-4.25 ,322 ,0	mm	-4.25mm , 322m...	
Axis	Z			
XSize	8.5	mm	8.5mm	
YSize	5	mm	5mm	

### 22.2.3 Ankerviklingene

Tverrsnittet av viklingen er gitt av kobberversnittet i maskintegningene. Plasseringen av viklingen i sporet er gjort omtrentlig og gjenspeiler ikke nødvendigvis virkeligheten.

22-Appendiks B: Oppbygning av FEM-modell i ANSYS Maxwell av Brutus fra prosjektoppgaven.



Bunnspor plassering (selv om den er i toppen av figuren)

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description
Command	CreateRectangle			
Coordinate Sys...	Global			
Position	-7.1/2 ,357 ,0	mm	-3.55mm , 357m...	
Axis	Z			
XSize	7.1	mm	7.1mm	
YSize	-2.65*4	mm	-10.6mm	

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description
Command	DuplicateAroundAxis			
Coordinate Sys...	Global			
Axis	Z			
Angle	360/114	deg	3.15789473684...	
Total Number	114		114	
Attach To Origi...	<input type="checkbox"/>			

Toppvikling

22-Appendiks B: Oppbygning av FEM-modell i ANSYS Maxwell av Brutus fra prosjektoppgaven.

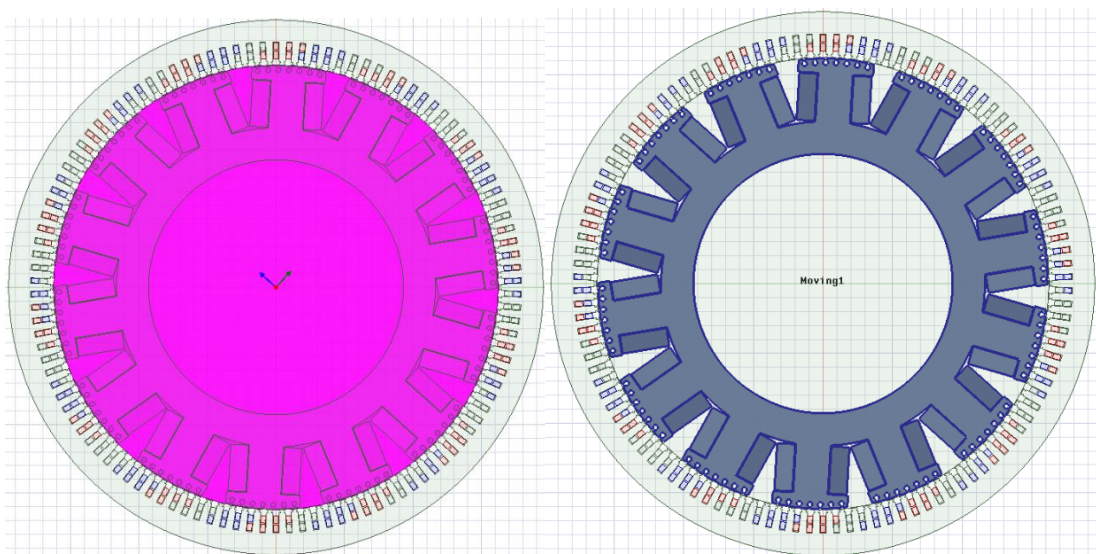
Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description
Command	CreateRectangle			
Coordinate Sys...	Global			
Position	-7.1/2 ,357-2.65*4-2 ,0	mm	-3.55mm , 344....	
Axis	Z			
XSize	7.1	mm	7.1mm	
YSize	-2.65*4	mm	-10.6mm	

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description
Command	DuplicateAroundAxis			
Coordinate Sys...	Global			
Axis	Z			
Angle	360/114	deg	3.15789473684...	
Total Number	114		114	
Attach To Origi...	<input type="checkbox"/>			

## 22.3 Deler i modellen som er definert som vakuum

### 22.3.1 Roterende deler

Alt innenfor en sirkel som er navngitt «Band»(rosa) roterer(blått) med 428 rpm. Den er litt større enn rotoren og yttergrensen er viktig for å definere maskebetingelser.



Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description
Command	CreateCircle			
Coordinate Sys...	Global			
Center Position	0 ,0 ,0	mm	0mm , 0mm , 0mm	
Axis	Z			
Radius	324	mm	324mm	
Number of Seg...	0		0	



22-Appendiks B: Oppbygning av FEM-modell i ANSYS Maxwell av Brutus fra prosjektoppgaven.

### 22.3.2 Region

«Region» er definert som en sirkel med samme diameter som ytterdiameteren til stator. Denne skal sikre at modellen har en yttergrense og at alt som ikke er definert i modellen modelleres som vakuum.

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description
Command	CreateCircle			
Coordinate Sys...	Global			
Center Position	0 , 0 , 0	mm	0mm , 0mm , 0mm	
Axis	Z			
Radius	390	mm	390mm	
Number of Seg...	0		0	

