

Lavfrekvente elkvalitetsproblemer i
fordelingsnett forårsaket av
høyspennings asynkronmaskiner i
pumpestasjon

Jens Sørmealand

Master i energibruk og energiplanlegging
Innlevert: mai 2016
Hovedveileder: Trond Toftevaag, ELKRAFT

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for elkraftteknikk

Abstract

A Norwegian grid company received customer complaints about visible flicker at 2 Hz in lighting equipment behind electronic dimmers. Measurements reveals that especially 5th and 7th harmonic components contains a distinct amplitude variation of 2 Hz, and that the problem correspond to the operation of a pumping station nearby. Three induction motors with associated capacitors for reactive compensation, power the pump station. The 2 Hz variation turns out to increase with the number of motors in operation, and by disconnecting the capacitor banks, the amplitude of the 2 Hz variation is greatly reduced, though still not completely gone.

Initial studies and analyzes indicate that the flicker occurs due to a beat-phenomenon, created by the interaction between an interharmonic component generated in accordance with the machine slip, and a close harmonic component. The issue is hereby primarily to investigate whether induction machines can create two adjacent frequency components that interfere with a beat frequency of 2 Hz, and the work primarily consists of modeling and simulation of an induction motor in COMSOL, and FFT analysis of COMSOL results in MATLAB.

Initially it is created an induction machine comparable to machines mentioned in previous studies. The comparison consists of a machine rated 30 kW, 50 Hz, 4 poles, 48/36 slots in respectively stator / rotor and slip of 3 %. A thorough comparison is presented, and the strengths and weaknesses is used in further analysis. The current induction motor model is rated 1.75 MW, 50 Hz, 8 poles, 72/54 slots in respectively stator / rotor and slip of 0.9 %.

Detailed specifications of geometric dimensioning and windings design are studied for the induction motor model. The simulations are comprised of supply consisting respectively ideal sine waves, injection of harmonic components, injection of unbalanced amplitude, alternatives according the number of rotor slots, respectively with the injection of current and voltage. It is also justified the choosing of mesh and presenting methods of results in COMSOL. The results represents measurements for current or voltage in the stator windings, and flux density in the air gap.

The results contains some noise due to compromise between simulation time and resolution, but some frequency components proves matter to be prominent consistently in all frequency analyzes. These prominent frequency components correspond to the machine space harmonics, but appears to have a lower frequency, corresponding to the slip frequency. One of these interharmonic frequency components should have a close frequency component to interfere

with, for a low frequency beat component to arise, so necessarily it should also be a harmonic component in the supply.

It emphasized therefore that it probably occurs a low frequency beat component in the induction machine if there is a harmonic component in the machine supply. Velocity and amplitude of the beat component depends on the machine slip, the machine space harmonics and the supply harmonics. According to this work, a visible beat component of 2 Hz most likely occur by the existence of a 5th harmonic component in the supply with an amplitude of at least 1 % of the fundamental component, given that the machine has a winding design generating a 5th space harmonic component, and operates with a slip of around 0.9 %.

Sammendrag

Et norsk nettselskap har mottatt kundeklager om synlig flimmer med hastighet på 2 Hz i belyningsutstyr bak elektroniske dimmere. Målinger avslører at spesielt 5.- og 7. harmoniske komponent inneholder en tydelig amplitudevariasjon på 2 Hz, og at problemet samsvarer med driften av en pumpestasjon i nærheten. Pumpestasjonen er drevet av tre asynkronmotorer med tilhørende kondensatorbatteri for reaktiv kompensering, og 2 Hz variasjonen viser seg å øke med antall motorer som er i drift. Ved utkobling av kondensatorbatteriene er amplituden på 2 Hz-variasjonen betraktelig redusert, men dog ikke helt borte.

Innledende studier og analyser indikerer at flimmeret skyldes et beatfenomen grunnet interaksjon mellom en interharmonisk komponent generert i henhold til maskinens sakkingsfrekvens, og en nærliggende harmonisk komponent. Problemstillingen er herved primært å undersøke om asynkronmaskiner kan skape to nærliggende frekvenskomponenter som interfererer med en beatfrekvens på 2 Hz, og arbeidet består primært av modellering og simulering av asynkronmaskin i programmet COMSOL, samt FFT-analyse av COMSOL-resultat i MATLAB.

Innledningsvis er det laget en asynkronmaskinmodell som er sammenlignbar med tidligere studier. Sammenligningen består av en maskin med merkedata 30 kW, 50 Hz, 4 poler, 48/36 spor i henholdsvis stator/rotor og sakkingsfrekvens på 3 %. En grundig sammenligning er presentert, og styrker og svakheter er følgelig brukt i videre analyser. Den aktuelle asynkronmaskinmodellen har merkedata 1,75 MW, 50 Hz, 8 poler, 72/54 spor i henholdsvis stator/rotor og sakkingsfrekvens på 0,9 %.

For asynkronmaskinmodellene er det utredet detaljerte spesifikasjoner for geometriske mål og viklingsdesign. Simuleringene er utført med forsyning bestående respektivt av ideelt sinuspåtrykk, påtrykk av harmoniske komponenter, påtrykk av ubalansert amplitudeverdi, alternative valg av antall spor i rotor, henholdsvis både for påtrykk av strøm og spenning. Det er også begrunnet valgt av maskenett og visningsmetode av resultat i COMSOL. Resultatene representerer målinger utført for strøm eller spenning i statorviklingene, og for flukstetthet i luftgapet.

Resultatene inneholder noe støy grunnet kompromiss mellom simuleringstid og oppløsning, men enkelte frekvenskomponenter viser seg uansett å være framtreddende konsekvent i samtlige frekvensanalyser. Disse framtreddende frekvenskomponentene svarer til maskinens romharmoniske produksjon, men har tilsynelatende en lavere frekvens, tilsvarende

sakkingsfrekvensen. For at en av disse interharmoniske frekvenskomponentene skal ha en nærliggende frekvenskomponent å interferere med, så tyder det på at det nødvendigvis også må finnes en harmonisk komponent i forsyningen.

Det poengteres altså at det sannsynligvis oppstår en lavfrekvent beatkomponent i asynkronmaskinen hvis det finnes en harmonisk komponent i maskinens forsyning. Hastighet og amplitude på beatkomponenten avhenger av maskinens sakkingsfrekvens, maskinens romharmoniske produksjon, og forsyningens harmoniske innhold. Ifølge dette arbeidet vil en synlig beatkomponent på 2 Hz mest sannsynlig oppstå ved at det finnes en 5. harmonisk komponent i forsyningen med amplitude på minst 1 % av den fundamentale komponenten, gitt at maskinen har et viklingsdesign som genererer 5. romharmoniske komponent, og har en sakkingsfrekvens på rundt 0,9 %.

Forord

Masteroppgaven er gitt av NTNU ved førstelektor Trond Toftevaag, og er et videre arbeid av en spesialiseringsoppgave med samme tittel, skrevet av undertegnede høsten 2015. Masteroppgaven «*High voltage wound-rotor induction machines - harmonic field effects and power quality issues*» skrevet av Torstein Kastet i 2015 omhandler også samme tema. Både NTE og SINTEF Research har tidligere arbeidet med problemstillingen, og de har vært behjelpelige med måledata fra det aktuelle området. Jeg vil gjerne takke prof. Robert Nilsen og vit.ass. Christian Svihus for faglig støtte, og veileder Trond Toftevaag for engasjement og bistand.

Innhold

Figurliste.....	ix
Tabelliste	xiii
1 Introduksjon	1
1.1 Bakgrunn og motivasjon.....	1
1.2 Problembeskrivelse.....	1
1.3 Problemstilling og tilnærming	2
1.4 Generelt om asynkronmaskiner	2
1.5 Generelt om harmoniske- og interharmoniske komponenter	3
1.6 Kort om beatfrekvens	3
2 Teori og tidligere studier	5
2.1 Asynkronmaskiners produksjon av interharmoniske komponenter	5
2.1.1 Harmoniske komponenter i påtrykt spenning	5
2.1.2 Ubalanse i påtrykt spenning	7
3 Sammenligning av 4-polet asynkronmaskinmodell og tidligere studier	9
3.1 Referansemodell	9
3.2 FFT-analyser ved spenningspåtrykk.....	10
3.2.1 Målinger av statorstrøm	10
3.2.2 Målinger av flukstetthet i luftgapet	11
3.3 FFT-analyser ved strømpåtrykk.....	12
3.3.1 Målinger av statorspenning	12
3.3.2 Målinger av flukstetthet i luftgapet	14
3.4 Diskusjon av sammenligning.....	15
3.5 Drøfting av litteraturstudier og sammenligning	16
4 Asynkronmaskinmodellen.....	17
4.1 Introduksjon til COMSOL.....	17
4.2 Beskrivelse av maskinene i den aktuelle pumpestasjonen	18

4.3	Modellbeskrivelse.....	18
4.3.1	Geometri.....	19
4.3.2	Spesifikasjoner og design.....	19
4.3.3	Maskenett	23
4.3.4	Simulering og -resultat	23
4.3.5	Interharmoniske komponenter.....	25
4.3.6	Romharmoniske komponenter	26
5	Resultat (8-polet asynkronmaskinmodell)	29
5.1	FFT-analyser av flukstetthet i luftgapet ved strømpåtrykk	29
5.1.1	Ideelt sinuspåtrykk	29
5.1.2	Harmoniske komponenter i påtrykk.....	30
5.1.3	Ubalanse i påtrykk.....	31
5.1.4	Endret spor-tall i rotor	32
5.2	Analyser av resultat	33
5.3	Drøfting av resultat.....	36
5.4	Forslag til videre arbeid.....	37
6	Konklusjon	39
	Referanser.....	40

Vedlegg A: FFT-analyser av 8-polet asynkronmaskinmodell

Vedlegg B: Beregning av ny sakkingsfrekvens

Vedlegg C: MATLAB-script for FFT-analyse

Vedlegg D: Spesifikasjoner for 4-polet asynkronmaskinmodell

Figurliste

Figur 1: Harmonisk-induserte frekvenskomponenter [11].....	6
Figur 2: Beregnet frekvensrespons referansemodell [10]	9
Figur 3: Målt frekvensrespons referansemodell [10]	9
Figur 4: FFT-analyse av statorstrøm for 4-polet asynkronmaskinmodell.....	10
Figur 5: FFT-analyse av statorstrøm for 4-polet asynkronmaskinmodell med tekstpiler	10
Figur 6: FFT-analyse av statorstrøm for 4-polet asynkronmaskinmodell innzoomet på grunnharmonisk.....	10
Figur 7: FFT-analyse av statorstrøm for 4-polet asynkronmaskinmodell innzoomet på 7.harm	10
Figur 8: FFT-analyse av flukstetthet i luftgapet ved spenningspåtrykk for 4-polet asynkronmaskinmodell.....	12
Figur 9: FFT-analyse av flukstetthet i luftgapet ved spenningspåtrykk for 4-polet asynkronmaskinmodell innzoomet på grunnharmonisk.....	12
Figur 10: FFT-analyse av statorspenning for 4-polet asynkronmaskinmodell med tekstpiler.	12
Figur 11: FFT-analyse av statorspenning for 4-polet asynkronmaskinmodell innzoomet på grunnharmonisk.....	13
Figur 12: FFT-analyse av statorspenning for 4-polet asynkronmaskinmodell innzoomet på 7.harm.....	13
Figur 13: FFT-analyse av flukstetthet i luftgapet ved strømpåtrykk for 4-polet asynkronmaskinmodell.....	14
Figur 14: FFT-analyse av flukstetthet i luftgapet ved strømpåtrykk for 4-polet asynkronmaskinmodell innzoomet på 7. harm.....	14
Figur 15: Romharmoniske komponenter for statorvikling i 4-polet asynkronmaskinmodell [16]	15
Figur 16: Romharmoniske komponenter for rotorvikling i 4-polet asynkronmaskinmodell [16]	15
Figur 17: Maskenett for asynkronmaskinmodellen i COMSOL.....	17
Figur 18: Geometri for asynkronmaskinmodellen	19

Figur 19: Zoomet geometri for asynkronmaskinmodellen.....	19
Figur 20: Viklingsdistribusjon av fase a	20
Figur 21: Elektrisk krets koblet til rotorviklingene	22
Figur 22: Illustrasjon av rotor i COMSOL.....	23
Figur 23: Kontinuitetsbetingelse ved luftgapsgrensesnitt	23
Figur 24: Statorspenning i fase a.....	24
Figur 25: Zoom statorspenning i fase a.....	24
Figur 26: Magnetisk flukstetthet for punkt i luftgapet	24
Figur 27: Zoom magnetisk flukstetthet for punkt i luftgapet	24
Figur 28: Magnetisk vektorpotensial i z-retning	25
Figur 29: Strøm-tetthet i z-retning	25
Figur 30: Romharmoniske komponenter per fase for statorviklinger i asynkronmaskinmodellen [16]	26
Figur 31: Romharmoniske komponenter per fase for rotorviklinger i asynkronmaskinmodellen [16]	26
Figur 32: Total romharmonisk produksjon for statorvikling	27
Figur 33: Total romharmonisk produksjon for rotorvikling.....	27
Figur 34: FFT-analyse av flukstetthet i luftgapet ved strømpåtrykk.....	29
Figur 35: FFT-analyse av flukstetthet i luftgapet ved strømpåtrykk innzoomet på 7. harm....	29
Figur 36: FFT-analyse av flukstetthet i luftgapet ved 1 % strømpåtrykk av 5. harm	30
Figur 37: FFT-analyse av flukstetthet i luftgapet ved 1 % strømpåtrykk av 5. harm innzoomet på 5.harm.....	30
Figur 38: FFT-analyse av flukstetthet i luftgapet ved 1 % strømpåtrykk av 7. harm	31
Figur 39: FFT-analyse av flukstetthet i luftgapet ved 1 % strømpåtrykk av 7. harm innzoomet på 7.harm.....	31
Figur 40: FFT-analyse av flukstetthet i luftgapet ved 5 % ubalanse i strømpåtrykk	32
Figur 41: FFT-analyse av flukstetthet i luftgapet ved 5 % ubalanse i strømpåtrykk innzoomet på 7. harm.....	32

Figur 42: FFT-analyse av flukstetthet i luftgapet ved strømpåtrykk - 60 spor i rotor.....	32
Figur 43: FFT-analyse av flukstetthet i luftgapet ved strømpåtrykk - 84 spor i rotor.....	32
Figur 44: FFT-analyse av statorstrøm ved spenningspåtrykk	A-1
Figur 45: FFT-analyse av statorstrøm ved spenningspåtrykk med tekstpiler	A-1
Figur 46: FFT-analyse av statorstrøm ved spenningspåtrykk innzoomet på grunnharmonisk	A-1
1	
Figur 47: FFT-analyse av statorstrøm ved spenningspåtrykk innzoomet på 7. harm	A-1
Figur 48: FFT-analyse av statorstrøm ved 1 % spenningspåtrykk av 7. harm.....	A-2
Figur 49: FFT-analyse av statorstrøm ved 1 % spenningspåtrykk av 7. harm innzoomet på 7. harm.....	A-2
Figur 50: FFT-analyse av flukstetthet i luftgapet ved spenningspåtrykk.....	A-2
Figur 51: FFT-analyse av flukstetthet i luftgapet ved spenningspåtrykk innzoomet på 7. harm	A-2
Figur 52: FFT-analyse av flukstetthet i luftgapet ved 1 % spenningspåtrykk av 7. harm	A-3
Figur 53: FFT-analyse av flukstetthet i luftgapet ved 1 % spenningspåtrykk av 7. harm innzoomet på 7.harm	A-3
Figur 54: FFT-analyse av statorspenning ved strømpåtrykk.....	A-4
Figur 55: FFT-analyse av statorspenning ved strømpåtrykk med tekstpiler	A-4
Figur 56: FFT-analyse av statorspenning ved strømpåtrykk innzoomet på grunnharmonisk	A-4
Figur 57: FFT-analyse av statorspenning ved strømpåtrykk innzoomet på 7. harm.....	A-4
Figur 58: FFT-analyse av statorspenning ved 1 % strømpåtrykk av 5. harm	A-5
Figur 59: FFT-analyse av statorspenning ved 1 % strømpåtrykk av 5. harm innzoomet på 7.harm	A-5
Figur 60: FFT-analyse av statorspenning ved 1 % strømpåtrykk av 7. harm	A-5
Figur 61: FFT-analyse av statorspenning ved 1 % strømpåtrykk av 7. harm innzoomet på 7. harm.....	A-5
Figur 62: FFT-analyse av statorspenning ved 5 % ubalanse i strømpåtrykk	A-5
Figur 63: Zoomet FFT-analyse av statorspenning ved 5 % ubalanse i strømpåtrykk innzoomet på 7. harm.....	A-5

Figur 64: Utsnitt av inngangseffekt på motor ved den aktuelle pumpestasjonen (måling utført 26.10.12 av NTE i samarbeid med SINTEF)	B-2
Figur 65: Romharmoniske komponenter for statorviklingene i 4-polet asynkronmaskinmodell [16]	D-2
Figur 66: Romharmoniske komponenter for rotorviklingene i 4-polet asynkronmaskinmodell [16]	D-2
Figur 67: Total romharmonisk produksjon for statorvikling (4-polet asynkronmaskinmodell)	D-2
Figur 68: Total romharmonisk produksjon for rotorvikling (4-polet asynkronmaskinmodell)D-	

2

Tabelliste

Tabell 1: Fundamental-induserte frekvenskomponenter i statorstrøm ved sakkingsfrekvens lik 0,7 %.....	5
Tabell 2: Harmonisk-induserte frekvenskomponenter i statorstrøm ved sakkingsfrekvens lik 0,7 %.....	7
Tabell 3: Fundamentalinduserte frekvenskomponenter ved $s=3$ %	9
Tabell 4: Harmoniske komponenter i henhold til den grunnharmoniske rotorfrekvensen	11
Tabell 5: Frekvenskomponenter for FFT-analyse sortert etter amplitude.....	13
Tabell 6: Kjente merkedata for asynkronmaskinene i den aktuelle pumpestasjonen	18
Tabell 7: Merkedata for asynkronmaskinmodellen.....	19
Tabell 8: Dimensjoneringskriterier for asynkronmaskinmodellen ved rotordiameter på 0,4 m	20
Tabell 9: Dimensjoner for asynkronmaskinmodellen	21
Tabell 10: Fundamentalinduserte frekvenskomponenter ved sakkingsfrekvens lik 0,9 %	25
Tabell 11: Harmoniskinduserte frekvenskomponenter ved sakkingsfrekvens lik 0,9 %	25
Tabell 12: Merkedata for asynkronmaskinene i den aktuelle pumpestasjonen.....	B-1

1 Introduksjon

1.1 Bakgrunn og motivasjon

Masteroppgaven er gitt av NTNU ved førstelektor Trond Toftevaag, og er et videre arbeid av en spesialiseringsoppgave [1] med samme tittel, skrevet av undertegnede høsten 2015. Masteroppgaven «*High voltage wound-rotor induction machines - harmonic field effects and power quality issues*» [2] skrevet av Torstein Kastet i 2015 omhandler også samme tema. Både NTE og SINTEF Research har tidligere arbeidet med problemstillingen, og de har vært hjelpelige med måledata fra det aktuelle området. Oppgaven ble sett på som interessant på grunn av at problemstillingen er et eksisterende problem, samt at arbeidet ville gi erfaring innen FEM-program.

1.2 Problembeskrivelse

Denne rapporten omhandler et problem [3] som oppsto da det kom kundeklager til et norsk nettselskap om synlige lysforstyrrelser i belysningsutstyr bak elektroniske dimmere. Lysforstyrrelsene viste seg ved varierende tidspunkt på døgnet, og ble beskrevet som synlig flimmer på ca. 2 Hz. Målinger ble utført med Elspec-instrument både hos sluttbruker og i overliggende nett, og målingene avslørte at både 5.- og 7. harmoniske komponent i spenningen hadde en tydelig amplitudevariasjon med hastighet på 2 Hz ved samme tidspunkt som det synlige flimmeret var til stedet.

Etter hvert oppdaget nettselskapet at flimmeret samsvarte med driften av en pumpestasjon i samme nettområde. Pumpestasjonen ble drevet av tre asynkronmotorer med hvert sitt tilhørende kondensatorbatteri for reaktiv kompensering. Den 7. harmoniske komponenten viste seg å øke med antall motorer som var i drift. På lik linje økte også amplituden på 2 Hz-komponenten fra 1 % ved én motor innkoblet, via 3 % med to motorer innkoblet, til 7 % med alle tre motorene innkoblet. For hver motor som ble innkoblet, ble også tilhørende kondensatorbatteri innkoblet. Den 7. harmoniske komponenten var markant i både spenning og strøm i pumpestasjonen. 2 Hz variasjonen var markant i den 7. harmoniske komponenten, samt synlig i momentanverdien for den grunnharmoniske spenningen.

Overslagsberegninger som ble utført [3] ga at resonansfrekvensen i nettet varierte fra 481 Hz med ett kondensatorbatteri innkoblet, via 340 Hz med to kondensatorbatteri innkoblet, til 278 Hz med tre kondensatorbatteri innkoblet. Disse utregningene indikerte at høyeste verdi for den 7. harmoniske komponenten (350 Hz) burde ha vært med to kondensatorbatteri innkoblet.

Målingene som ble utført viste derimot at den 7. harmoniske komponenten hadde høyest verdi ved drift av tre motorer og tilhørende kondensatorbatteri innkoblet.

Kondensatorbatteriene ble så frakoblet, noe som resulterte i at den 7. harmoniske komponenten ble redusert med en faktor på 8 i forhold til når alle tre kondensatorbatteriene var innkoblet. Den problematiske 2 Hz-komponenten var dog fremdeles til stede, og flimmeret var fremdeles synlig hos sluttbrukerne. Forholdene var imidlertid blitt betydelig bedre, og flimmeret var hovedsakelig synlig ved at de aktuelle lyskildene hadde dimmer innstilt på en lav verdi, og at det samtidig var mørke omgivelser.

Videre arbeid [3] indikerte at denne 2 Hz-komponenten kunne skyldes et beat-fenomen, bestående av to nærliggende frekvenskomponenter generert av asynkronmaskinene i pumpe-stasjonen. Denne teorien ble derimot aldri bevist, og det ble herved laget en masteroppgave ved NTNU med hensikt å utforske dette nærmere.

1.3 Problemstilling og tilnærming

Problemstillingen er primært å undersøke om asynkronmaskiner kan skape to nærliggende frekvenskomponenter som interfererer med en beat-frekvens på 2 Hz.

Problemstillingen blir primært behandlet gjennom modellering og simulering av asynkronmaskin i programmet COMSOL, samt FFT-analyse av COMSOL-resultat i MATLAB. I tillegg er det utført relevant litteraturstudie.

1.4 Generelt om asynkronmaskiner

Asynkronmaskinen [4] [5] er en trefaset vekselstrømmaskin som kan brukes både som motor og generator. Statorviklingene er konstruert slik at det blir skapt et roterende magnetfelt ved påtrykk av vekselspanning. Ved motordrift vil det roterende statorfeltet indukere vekselspanning i rotorviklingene, slik at det da skapes et dreiemoment som får rotoren til å rotere med statorfeltet. For at det skal indukeres strømmer i rotorviklingene (og derav moment), må det nødvendigvis være en differanse mellom statorfeltets- og rotorens rotasjonshastighet, og rotorens rotasjonshastighet vil derav alltid være *asynkron* med statorfeltets rotasjonshastighet. Ved generatordrift vil effekt bli generert ved at rotoren roterer fortere enn statorfeltets rotasjonshastighet.

Asynkronmaskinen er dagens mest brukte elektriske motor i industrien. Den har en enkel og robust konstruksjon, noe som gjør den billig både i kjøp og vedlikehold. Motoren egner seg

best i situasjoner hvor det er konstant turtall, som for eksempel ved drift av pumper, vifter, boremaskiner og transportbånd. Den er også mye brukt som generator i vindkraftverk.

1.5 Generelt om harmoniske- og interharmoniske komponenter

Harmoniske komponenter [6] er frekvenskomponenter med frekvens lik den fundamentale frekvensen multiplisert med et heltall. En harmonisk frekvens i det norske distribueringsnettets kan eksempelvis være $50 \text{ Hz} * 7 = 350 \text{ Hz}$ (herved omtalt som 7. harmoniske komponent). Harmoniske komponenter er uønsket blant annet fordi de forårsaker økt effekttap og oppheting av strømledere, motorer/generatorer og transformatorer, samt at de forstyrrer og havarerer elektronisk utstyr som husapparat og vern. Kilder til harmoniske komponenter er i hovedsak ulineære laster. Dette kan være likestrømutstyr med behov for omformer (Tv-er, datamaskiner, kopimaskiner), belysningsutstyr med elektronisk- eller konvensjonell forkobling, utstyr med magnetisk kjerne (transformatorer, elektriske motorer/generatorer), UPS-systemer og industrielle laster slik som sveiseapparater, lysbueovner og induksjonsovner.

Interharmoniske komponenter [7] er frekvenskomponenter med frekvens *ulik* den fundamentale frekvensen multiplisert med et heltall. En interharmonisk frekvens i det norske distribueringsnettets kan eksempelvis være $50 \text{ Hz} * 6,84 = 342 \text{ Hz}$. Interharmoniske komponenter er uønsket av samme årsaker som de harmoniske komponentene, men i tillegg kan de også føre til flimrer og interferens i rippelkontrollsystemer. Kilder til interharmoniske komponenter kan være statiske frekvensomformere (frekvensstyrte motordrifter), syklokonvertere, sveiseapparat, lysbueovner og asynkronmaskiner [8].

1.6 Kort om beatfrekvens

Fenomenet Beatfrekvens [9] tilsier at to nærliggende frekvenskomponenter som interferer, skaper en oscillasjon med en hastighet som tilsvarer differansen mellom de to respektive frekvensene. Hvis asynkronmotorene i pumpestasjonen genererer en interharmonisk frekvenskomponent på 348 Hz, kan den da typisk interferere med en harmonisk komponent på 350 Hz, og skape en oscillasjon på nettopp 2 Hz. Et slikt beatfrekvensfenomen er antatt å være årsaken til 2 Hz-flimmet omtalt i problembeskrivelsen, og rapporten vil bli skrevet med utgangspunkt i at leseren er kjent med dette fenomenet. Beatfrekvensformelen er for ordens skyld oppgitt i Formel (1):

$$f_{beat} = |f_1 - f_2| \quad \text{Formel (1)}$$

Amplituden til beatfrekvensoscillasjonen tilsvareer gjennomsnittet av frekvenskomponentenes respektive amplitude, og kan følgelig regnes ut i henhold til Formel (2), der frekvenskomponentene er gitt i formen $A \cdot \sin(\omega t)$:

$$A_{beat} = \frac{A_1 + A_2}{2} \quad \text{Formel (2)}$$

2 Teori og tidligere studier

2.1 Asynkronmaskiners produksjon av interharmoniske komponenter

Tidligere studier [10] viser at asynkronmaskiner skaper interharmoniske komponenter på grunn av strøm som blir induert i rotorviklingene. Siden rotoren går med en hvis sakkingsfrekvens, vil strømmen som blir induert i rotor slå tilbake til stator med en lavere hastighet enn påtrykt frekvens. En asynkronmaskin som har ideell påtrykt spenning, vil induere frekvenskomponenter i statorstrømmen i henhold til Formel (3): [10]

$$f_{ind}^k = |6k(1 - s) \pm 1|f_s, \quad k = 0, 1, 2, 3 \dots \quad \text{Formel (3)}$$

Hvor k er et heltall som samsvarer med luftgapfeltets polparnummer, s er maskinens sakkingsfrekvens i prosent, og f_s er den fundamentale påtrykte frekvensen i Hz.

Hvis sakkingsfrekvensen, s , er 0,7 %, vil da asynkronmaskinen induere frekvenskomponenter i statorstrømmen i henhold til Tabell 1:

Tabell 1: Fundamental-induserte frekvenskomponenter i statorstrøm ved sakkingsfrekvens lik 0,7 %

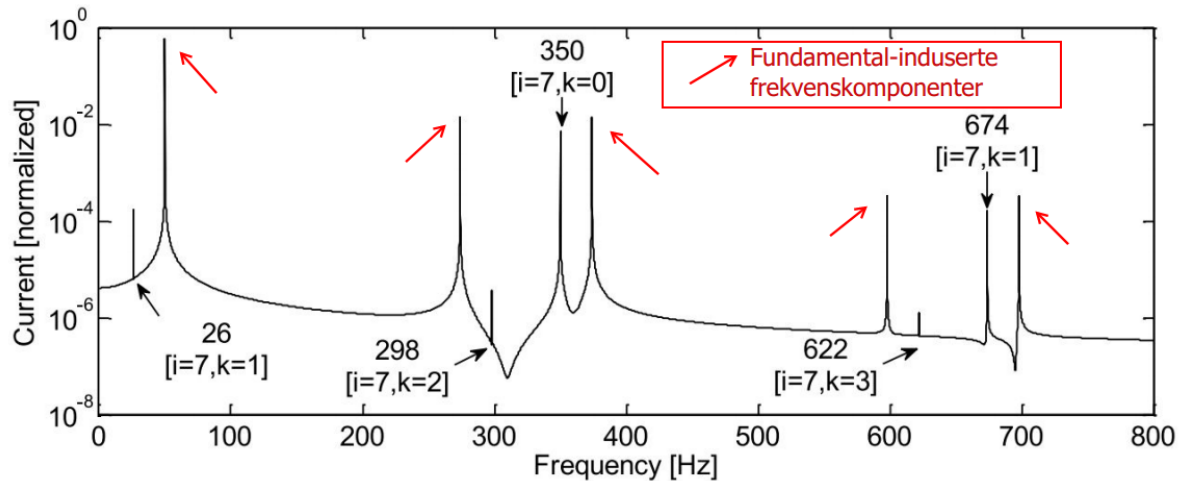
Fundamental-induserte frekvenskomponenter, f_{ind}^k								
k	0		1		2		3	
	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)
[Hz]	50	50	247,9	347,9	545,8	645,8	843,7	943,7

Tabellen viser at ved bruk av $k=1$ og addisjon i Formel (3), vil asynkronmaskinen induere en interharmonisk komponent på 347,9 Hz, gitt at sakkingsfrekvensen er 0,7 %. De interharmoniske komponentene avhenger av sakkingsfrekvensen, og det kan vises at ved økende sakkingsfrekvens, øker også differansen mellom interharmonisk komponent og nærmeste harmoniske komponent. Eksempelvis vil samme komponent ($k=1$ og addisjon), men med sakkingsfrekvens på 1,0 %, gi en induert frekvenskomponent på 347,0 Hz. Nærmeste harmoniske komponent i gitte eksempler er da den 7. harmoniske (350 Hz). For at den uthevede komponenten i Figur 1 (347,9 Hz) skal være kilde til en 2 Hz oscillasjon, må altså maskinen gå med en sakkingsfrekvens på ca. 0,7 %, beatfrekvens tatt i betraktning.

2.1.1 Harmoniske komponenter i påtrykt spenning

Hvis påtrykt spenning inneholder harmoniske komponenter, vil induerte frekvenskomponenter i asynkronmaskinen bli tydelig påvirket [10]. De harmoniske komponentene i forsyningen induerer henholdsvis nye tilføyende harmoniske- og interharmoniske komponenter i

statorstrømmen, hvorav de mest dominerende er for $k=0$ og $k=1$ (se Tabell 2). Andre interharmoniske komponenter som blir generert i det aktuelle frekvensområdet, har vesentlig lavere amplitude. Nedenfor følger et eksempel for å klargjøre ytterligere.



Figur 1: Harmonisk-induserte frekvenskomponenter [11]

Figur 1 viser en frekvensanalyse av statorstrømmen i en 4-polet 30 kW asynkrongenerator ved 1620 rpm (sakkingsfrekvens lik 8 %), med 5 % av 7. harmoniske komponent i forsyningen. De røde pilene indikerer frekvenskomponenter induisert av den fundamentale komponenten (50 Hz), mens de svarte pilene indikerer frekvenskomponenter induisert av den påtrykte 7. harmoniske komponenten. De mest dominerende induserte frekvenskomponentene er de som er generert av den fundamentale komponenten (røde piler), fulgt av den påtrykte harmoniske komponenten på 350 Hz ($k=0$), og frekvenskomponentene på 26 Hz og 674 Hz ($k=1$). Resten av de harmonisk-induserte interharmoniske komponentene ($k>1$) har betraktelig lavere amplitude.

Interharmoniske komponenter som blir generert av harmoniske komponenter i forsyningen, kan kalkuleres med Formel (4): [11]

$$f_{ind}^{h,k} = |h \pm 6k(1 - s)|f_s \quad \text{Formel (4)}$$

Der h er den påtrykte harmoniske ordenen, k er et heltall som samsvarer med luftgapfeltets polparnummer, s er sakkingsfrekvensen i prosent, og f_s er den fundamentale påtrykte frekvensen i Hz.

Med sakkingsfrekvens, s , på 0,7 %, og med harmonisk komponent, h , i påtrykt spenning, vil da asynkronmaskinen indusere frekvenskomponenter i statorstrømmen i henhold til Tabell 2:

Tabell 2: Harmonisk-induserte frekvenskomponenter i statorstrøm ved sakkingsfrekvens lik 0,7 %

Harmonisk-induserte frekvenskomponenter, $f_{ind}^{h,k}$ [Hz]								
k	0		1		2		3	
h	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)
2	100	100	197,9	397,9	495,8	695,8	793,7	993,7
3	150	150	147,9	447,9	445,8	745,8	743,7	1043,7
4	200	200	97,9	497,9	395,8	795,8	693,7	1093,7
5	250	250	47,9	547,9	345,8	845,8	643,7	1143,7
6	300	300	2,1	597,9	295,8	895,8	593,7	1193,7
7	350	350	52,1	647,9	245,8	945,8	543,7	1243,7
11	550	550	252,4	847	45,2	1145,2	342,8	1442,8
13	650	650	352,4	947,6	54,8	1245,2	242,8	1542,8

Tabell 2 viser at verdien som er nærmest den aktuelle 7. harmoniske forstyrrelsen, er frekvenskomponenten på 352,4 Hz ($h=13$, $k=1$ og subtraksjon i Formel (4)). Denne kan interferere direkte med den 7. harmoniske komponenten, med en differanse på 2,4 Hz. En annen interessant frekvenskomponent er 345,8 Hz ($h=5$, $k=2$ og subtraksjon i Formel (4)). Denne kan interferere med den fundamental-induserte frekvenskomponenten på 347,9 Hz (se Tabell 1), da disse har en differanse på 2,1 Hz. Interaksjonen av slike interharmoniske frekvenskomponenter, kan vise seg som oscillasjon i den 7. harmoniske komponenten ved for lav oppløsning i måledataene [2]. Det blir også lagt merke til at både 5. harmonisk og 7. harmoniske komponent i påtrykt spenning induserer en frekvenskomponent som har 2,1 Hz i differanse med den fundamentale frekvenskomponenten (50 Hz). Frekvenskomponenten på 342,8 Hz ($h=11$, $k=3$ og subtraksjon i Formel (4)) er også i nærheten av det interessante frekvensområdet, men blir vurdert som mindre kritisk siden $k>1$, og nærmeste frekvenskomponent har en litt stor differanse (3 Hz). Aktuelle frekvenskomponenter i Tabell 2 er uthevet med fet skrift.

2.1.2 Ubalanse i påtrykt spenning

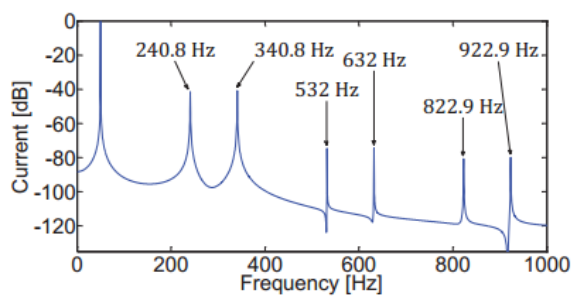
Ubalanse i påtrykt spenning kan være for eksempel at fase 1 har høyere spenningsamplitude enn fase 2 og 3. Forsøk som ble gjort med en spenningsubalanse på 3 % [10], ga tilnærmet like frekvenskomponenter som ved påtrykk av ideell sinusformet spenning.

3 Sammenligning av 4-polet asynkronmaskinmodell og tidligere studier

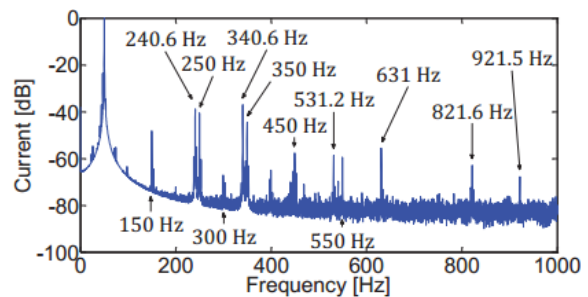
Det lyktes ikke i å finne tidligere studier med analyse av maskiner på størrrelse med de som er i den aktuelle pumpestasjonen, og innledningsvis er det derfor laget en 4-polet asynkronmaskinmodell som er sammenlignbar med maskiner omtalt i tidligere studier. Flere spesifikasjoner for referansemodellen er ukjente, og den 4-polte asynkronmaskinmodellen er på mange områder beregnet med samme framgangsmåte som beskrevet i Modellbeskrivelse. Spesifikasjoner for den 4-polte asynkronmaskinmodellen er presentert i Vedlegg D.

3.1 Referansemodell

Det er tatt utgangspunkt i en maskin [10] med merkedata 30 kW, 50 Hz, 4 poler, 48/36 spor i henholdsvis stator/rotor og sakkingsfrekvens på 3 %. Maskinen var koblet opp i en testrigg på et laboratorium, hvor påtrykt spenning var direkte fra det lokale nettet (målt til å inneholde typisk 3 % ubalanse i fasespenningens amplitude), og en 40 Watts dc-motor ble brukt som last. Målinger ble utført i strømmen i statorkretsen, og videre prosessert i MATLAB ved bruk av FFT-funksjonen med en oppløsning på ca. 0,122 Hz. Forhåndsberegnet frekvensrespons for referansemodellen ble som vist i Figur 2, mens målinger som ble utført i testriggen ga frekvensrespons i henhold til Figur 3.



Figur 2: Beregnet frekvensrespons referansemodell [10]



Figur 3: Målt frekvensrespons referansemodell [10]

Tabell 3: Fundamentalinduserte frekvenskomponenter ved $s=3\%$

Forventede fundamental-induserte frekvenskomponenter ved $s = 3\%$								
k	0		1		2		3	
	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)
[Hz]	50		241	341	532	632	823	923

De forhåndsberegnede frekvenskomponentene (Figur 2) samsvarer med de fundamentalinduserte frekvenskomponentene (Tabell 3) gitt av Formel (3). De målte verdiene

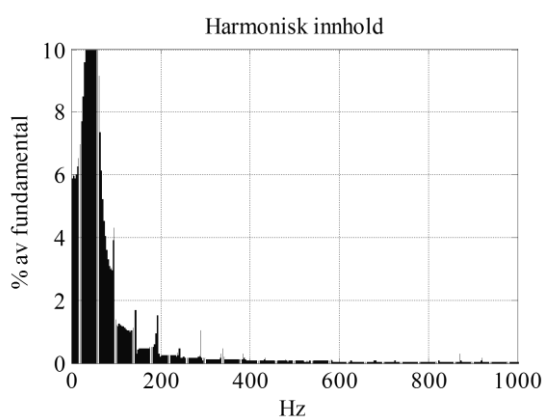
av testtriggen hadde naturligvis noe mer støy, men i tillegg viste det seg at de helharmoniske komponentene hadde markante verdier. I [10] ble det skrevet følgende om avviket mellom beregnede- og målte verdier angående referansemodellen: «*The measured data are seen to be noisier than the model predictions and contain the supply harmonic induced spectral effects that are not considered in the model analysis in this research*». Det ble altså antydnet at de helharmoniske komponentene kan skyldes harmoniske komponenter i forsyningen, men at det ikke ble utført videre analyser på dette.

3.2 FFT-analyser ved spenningspåtrykk

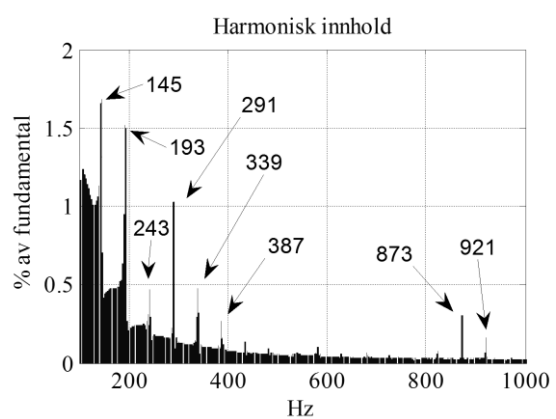
FFT-analysene av den 4-polte asynkronmaskinmodellen ved spenningspåtrykk viste seg å bli dominert av frekvenskomponenter «sett fra rotoren».

3.2.1 Målinger av statorstrøm

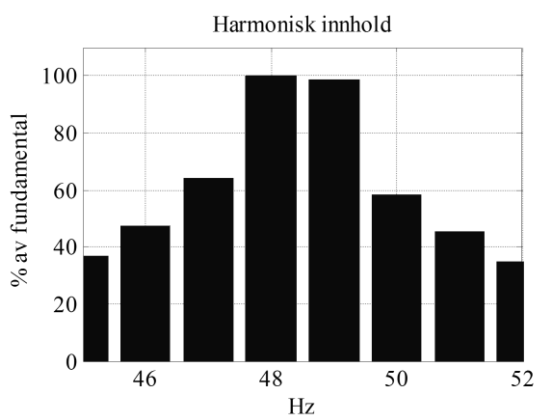
Følgende figurer viser FFT-analyse av statorstrømmen ved spenningspåtrykk i den 4-polte asynkronmaskinmodellen.



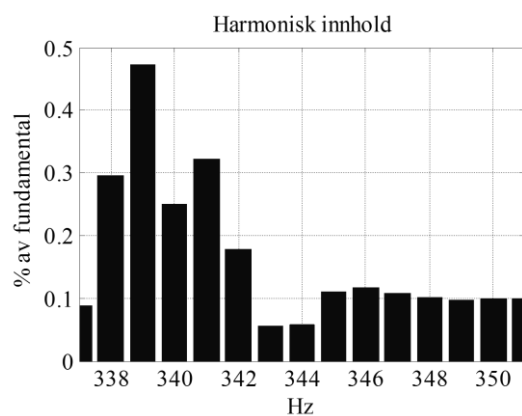
Figur 4: FFT-analyse av statorstrøm for 4-polet asynkronmaskinmodell



Figur 5: FFT-analyse av statorstrøm for 4-polet asynkronmaskinmodell med tekstpiler



Figur 6: FFT-analyse av statorstrøm for 4-polet asynkronmaskinmodell innzoomet på grunnharmonisk



Figur 7: FFT-analyse av statorstrøm for 4-polet asynkronmaskinmodell innzoomet på 7.harm

FFT-analysen inneholder mye støy opp til 150 Hz (Figur 4). I Figur 5 er det markert de mest markante frekvenskomponentene, og selv om for eksempel 243 Hz, 339 Hz og 921 Hz er i nærheten av forventede frekvenskomponenter i henhold til Formel (3), så er det ingen av dem som treffer akkurat på forventet frekvens.

Av Figur 6 kan man se at den grunnharmoniske komponenten hadde 48 Hz i stedet for 50 Hz. Dette kan tyde på at rotoren dominerer frekvensresponsen, da rotoren vil ha en rotasjonshastighet på 48,5 Hz ved den respektive sakkingsfrekvensen på 3 %. Denne påstanden kan støttes opp ved å se på de harmoniske komponentene generert av rotorfrekvensen, altså et heltall multiplisert med 48,5 Hz. Ved å multiplisere 48,5 med respektive heltall fra 1 til 7, blir resultatet som vist i Tabell 4:

Tabell 4: Harmoniske komponenter i henhold til den grunnharmoniske rotorfrekvensen

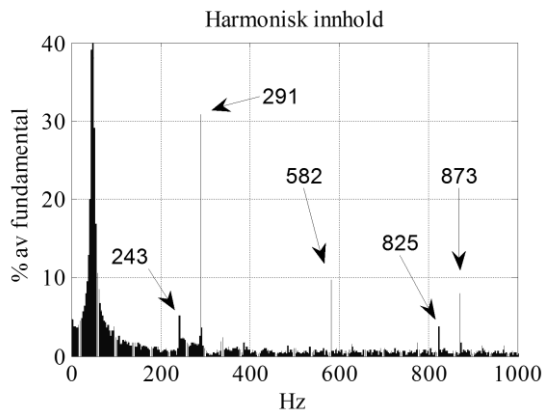
Heltall	1	2	3	4	5	6	7
[Hz]	48,5	97	145,5	194	242,5	291	339,5

Frekvenskomponentene i Tabell 4 samsvarer så å si 100 % med de markerte verdiene i Figur 5. En interessant observasjon er at den 4. harmoniske komponenten (193 Hz) har høyest verdi i den utvalgte figuren. Dette kan forklares ved å se på frekvensresponsen sett fra rotorens side, altså den relative hastighetsforskjellen mellom rotoren og statorfeltet. Når rotoren roterer, vil rotoren se den grunnharmoniske frekvensen i statorfeltet som 2,5 Hz, og ikke 50 Hz. På tilsvarende måte vil den 5. harmoniske komponenten (241 Hz) i statorfeltet bli sett på som en 4. harmonisk komponent (194 Hz) i rotoren. En markant verdi av 5. harmoniske komponent er forventet både i henhold til den romharmoniske produksjonen (se Vedlegg D) og de forventete frekvenskomponentene i henhold til Formel (3), og kan altså være medvirkende årsak til den høye verdien for frekvenskomponenten på 194 Hz.

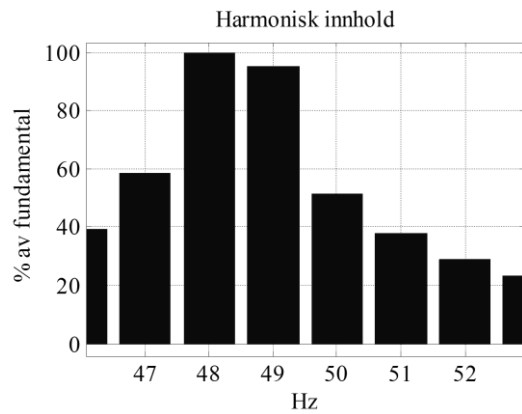
I Figur 7 vises det at frekvenskomponentene på 339 Hz og 341 Hz har markante verdier, to komponenter som altså har 2 Hz i differanse. Amplituden på de to komponentene er fremdeles dog lav iht. å skape en synlig beatkomponent. I tillegg vises ikke disse komponentene i analyse av flukstettheten i luftgapet ved strømpåtrykk, og nevnte tilfelle er sannsynligvis tilfeldig.

3.2.2 Målinger av flukstetthet i luftgapet

Følgende figurer viser FFT-analysen av flukstettheten i luftgapet for den 4-polte asynkronmaskinmodellen ved spenningspåtrykk.



Figur 8: FFT-analyse av flukstetthet i luftgapet ved spenningspåtrykk for 4-polet asynkronmaskinmodell



Figur 9: FFT-analyse av flukstetthet i luftgapet ved spenningspåtrykk for 4-polet asynkronmaskinmodell innzoomet på grunnharmonisk

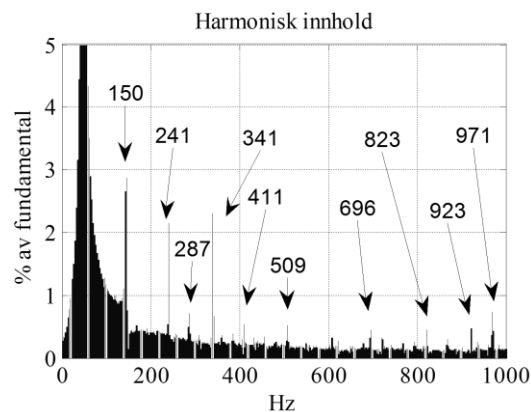
Også i luftgapet er det frekvenskomponenter sett fra rotoren som dominerer, da særlig den 7. harmoniske komponenten, vist i Figur 8 (291 Hz). FFT-analysen viser at nevnte frekvenskomponent har en verdi på 30 % av den grunnharmoniske komponenten, noe som er en veldig høy verdi. Det er generelt lite samsvar mellom flukstettheten i luftgapet ved spenningspåtrykk, og forventede frekvenskomponenter.

3.3 FFT-analyser ved strømpåtrykk

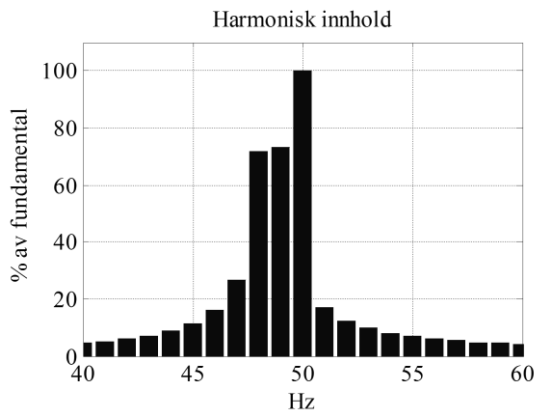
FFT-analysene av den 4-polte asynkronmaskinmodellen ved strømpåtrykk samsvarer derimot godt med forventede frekvenskomponenter.

3.3.1 Målinger av statorspenning

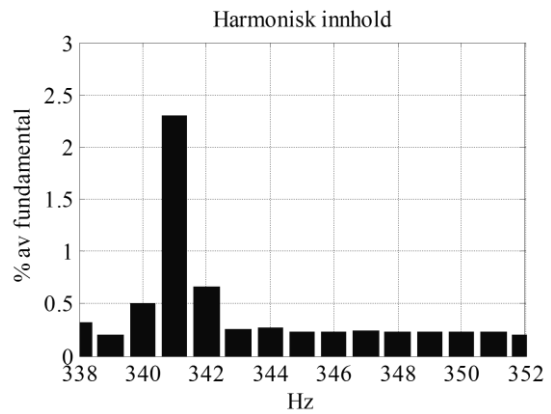
Følgende figurer viser FFT-analyse av statorspenningen ved strømpåtrykk i den 4-polte asynkronmaskinmodellen.



Figur 10: FFT-analyse av statorspenning for 4-polet asynkronmaskinmodell med tekstpiler



Figur 11: FFT-analyse av statorspenning for 4-polet asynkronmaskinmodell innzoomet på grunnharmonisk



Figur 12: FFT-analyse av statorspenning for 4-polet asynkronmaskinmodell innzoomet på 7.harm

Toppene for FFT-analyse av statorspenningen i den 4-polte asynkronmaskinmodellen (Figur 10) er listet opp etter amplitude i Tabell 5.

Tabell 5: Frekvenskomponenter for FFT-analyse sortert etter amplitude

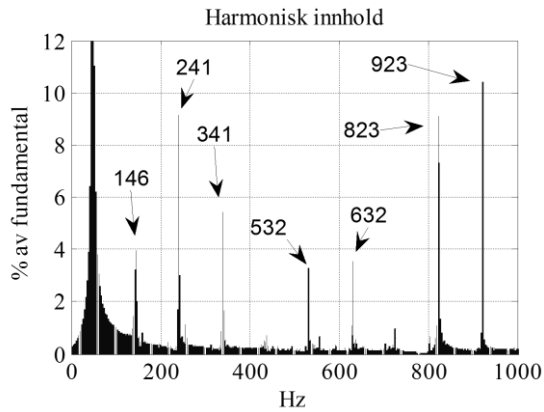
Frekvens for toppverdier i 4-polet asynkronmaskinmodell ved $s = 3\%$			
	$f_k \geq 1\%$	$0,5\% \leq f_k < 1\%$	$f_k \leq 0,5\%$
[Hz]	50, 150, 241, 341	287, 411, 509, 971	696, 823, 923

Som påpekt i kapittelet Asynkronmaskiners produksjon av interharmoniske komponenter, er det igjen verdiene for $k=1$ (241 Hz og 341 Hz) som har høyest amplitude av de fundamentalinduserte frekvenskomponentene (se Formel (3)). I tillegg er den tredjeharmoniske komponenten (150 Hz) veldig markant. Dette kan skyldes den romharmoniske produksjonen per fase, vist i Figur 65 og Figur 66 i Vedlegg D for henholdsvis stator- og rotorviklingene. Den tredjeharmoniske komponenten har høy verdi per fase, men vil ideelt sett bli eliminert på grunn av symmetrien i trefasesystemet. Antydninger til dette vist i luftgapet (se Figur 13), hvor den tredjeharmoniske komponenten er betraktelig lavere sammenlignet med de andre frekvenskomponentene.

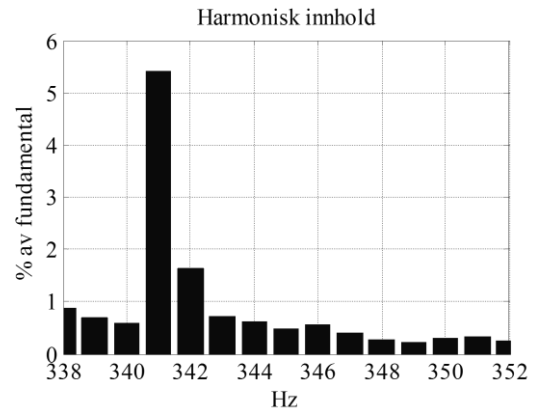
Komponentene for $k=2$ vises derimot ikke i FFT-analysen av statorspenningen for asynkronmaskinmodellen, men i stedet dukker det opp flere uventede frekvenskomponenter på respektive 287 Hz, 411 Hz, 509 Hz, 696 Hz og 971 Hz. Disse uventede komponentene er ikke framtrede i andre simuleringresultat, og antas dermed å være støy. De fundamentalinduserte frekvenskomponentene for $k=3$ er tydelige i frekvensresponsen av asynkronmaskinmodellen, men dog med tilnærmet 1/5 av amplitudeverdien, sammenlignet med komponentene for $k=1$.

3.3.2 Målinger av flukstetthet i luftgapet

Figur 13 og Figur 14 viser FFT-analysen av flukstettheten i luftgapet for den 4-polte asynkronmaskinmodellen ved strømpåtrykk.



Figur 13: FFT-analyse av flukstetthet i luftgapet ved strømpåtrykk for 4-polelet asynkronmaskinmodell

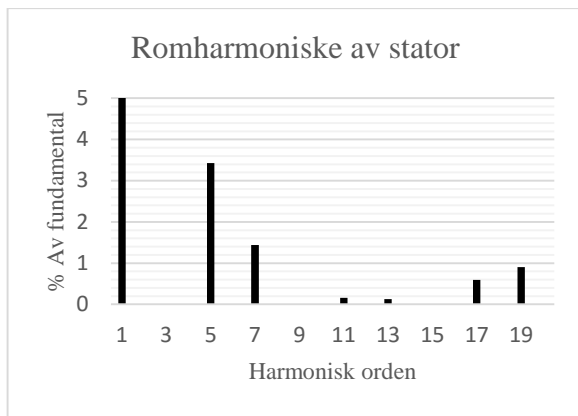


Figur 14: FFT-analyse av flukstetthet i luftgapet ved strømpåtrykk for 4-polelet asynkronmaskinmodell innzoomet på 7. harm

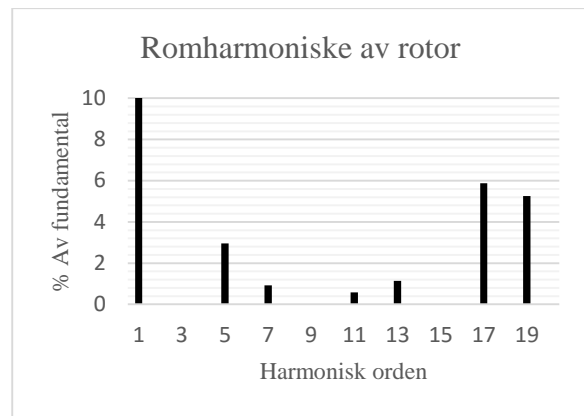
Figur 13 har den frekvensresponsen som samsvarer mest med de forventede frekvenskomponentene i henhold til Formel (3) (se Tabell 3). I tillegg har den 3. harmoniske komponenten en markant verdi, trolig på grunn av den romharmoniske produksjonen.

Det bemerkes at frekvenskomponenter forventet i forhold til Formel (3)), er tydelige i FFT-analysen av flukstettheten i luftgapet, men at komponentene har noe variabel amplitudeverdi sammenlignet med de i referansemodellen. Tatt i betraktning at spesifikk viklingsdesign i referansemodell ikke er kjent, og at oppløsning på asynkronmaskinmodellen er lavere (0,1 Hz per stolpe i referansemodell kontra 1 Hz per stolpe i asynkronmaskinmodell), så er det godt samsvar i frekvensresponsen mellom asynkronmaskinmodellens flukstetthet i luftgapet ved strømpåtrykk, sammenlignet med referansemodellen.

Figur 15 og Figur 16 viser den romharmoniske produksjonen til henholdsvis stator- og rotorviklingene, beregnet i program beskrevet i kapittel Romharmoniske komponenter.



Figur 15: Romharmoniske komponenter for statorvikling i 4-polet asynkronmaskinmodell [12]



Figur 16: Romharmoniske komponenter for rotorvikling i 4-polet asynkronmaskinmodell [12]

Det er tydelig samsvar i både amplitudeverdier og frekvenser i sammenligningen mellom de beregnede romharmoniske komponentene (Figur 15 og Figur 16), og den simulerte flukstettheten i luftgapet (Figur 13). Størst forskjell er tilstedeværelsen av den tredjeharmoniske komponenten (146 Hz) i flukstettheten i luftgapet, vist i Figur 13. Denne komponenten ville ha blitt eliminert på grunn av trefasesystemets symmetri hvis alle forhold hadde vært ideelle, men for eksempel ulineære egenskaper slik som materialer i metning kan være årsak til dens eksistens i simuleringresultatene.

3.4 Diskusjon av sammenligning

Ved påtrykk av spenning i asynkronmaskinmodellen, viser det seg at strømmen i stator går mot en lav verdi (noen få ampere, kontra 200 A referert merkedata). Dette kan være grunnen til at frekvenskomponentene ikke ble som forventet. Årsak til den lave strømmen i stator er ikke undersøkt videre, da påtrykk av strøm ikke har samme problem.

FFT-analysen av statorspenningen ved strømpåtrykk inneholder noe mer støy fra 0 Hz – 150 Hz, og har flere markante frekvenskomponenter med ukjent opphav mellom 200 Hz - 1000 Hz, sammenlignet med referansemodellen. Støyen kan komme av lav tetthet på maskenettet (se kapittel Maskenett). Spenningen i viklingene blir beregnet via integrasjon av det elektromagnetiske feltet over viklingsarealet, og det er derfor viktig at integrasjonslengden er kortere enn de respektive bølgelengdene i det elektromagnetiske feltet. Størrelse på viklingene kan altså dermed ha innvirkning på nøyaktigheten for den aktuelle frekvensresponsen, men dette ble ikke undersøkt ytterligere i dette arbeidet.

Referansemodellen har tydelige verdier for de helharmoniske komponentene, da særlig 5.- og 7. harmoniske komponent, noe som ikke er tilfellet i asynkronmaskinmodellen. Det ble nevnt at dette kan komme av harmoniske komponenter i forsyningen (se kapittel Referansemodell). I

den 4-polte asynkronmaskinmodellen er det kun påtrykt ideelle grunnharmoniske sinusfunksjoner, og i så tilfellet stemmer det bra at de samme komponentene ikke vises i simuleringresultatene.

Tatt i betraktning at spesifikk viklingsdesign i referansemodell ikke er kjent, og at oppløsning på asynkronmaskinmodellen er lavere (0,1 Hz per stolpe i referansemodell kontra 1 Hz per stolpe i asynkronmaskinmodell), så er det meget godt samsvar mellom FFT-analysen av flukstettheten i luftgapet for den 4-polte asynkronmaskinmodellen ved strømpåtrykk, sammenlignet med de fundamentalinduserte frekvenskomponentene beregnet ved hjelp av Formel (3), samt med de beregnede romharmoniske komponentene i luftgapet (Figur 15 og Figur 16). På bakgrunn av dette tyder det på at analyse av flukstetthet i luftgapet ved strømpåtrykk gir det mest «korrekte» resultatet, og følgelig er dette den primære analysemetoden videre i rapporten.

Det ble også undersøkt om *harmonisk-induserte* frekvenskomponenter ved sakkingsfrekvens lik 3 %, er i nærheten av toppene for FFT-analysen til asynkronmaskinmodellen. Det var lite samsvar i den sammenligningen, og det ble derfor valgt å utelate aktuell tabell med verdier for harmoniske-induserte frekvenskomponenter i dette arbeidet. Dette er også som forventet, da det heller ikke er påtrykt noen harmoniske komponenter i dette forsøket.

3.5 Drøfting av litteraturstudier og sammenligning

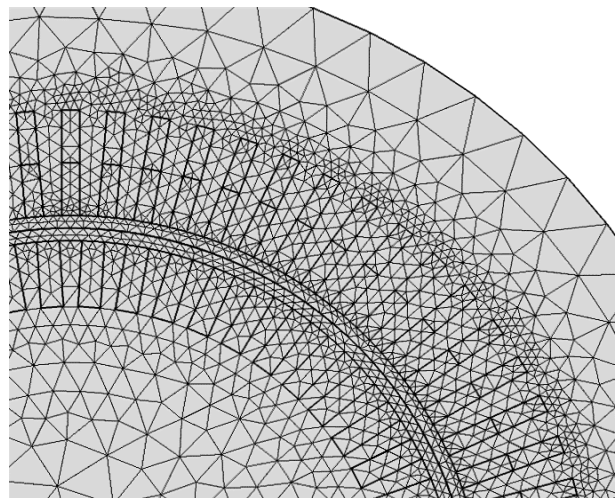
Tidligere studier er basert på både teori og fysiske forsøk, og det er god troverdigheten til figurene som er brukt. Amplitude på de interharmoniske komponentene ser derimot ut til å ha sammenheng med maskinens romharmoniske produksjon, som igjen avhenger av maskinens viklingsdesign. Viklingsdesignet i referansemodellen er ukjent, og amplituden på de interharmoniske komponentene vil derfor ikke kunne sammenlignes direkte med asynkronmaskinmodellen.

4 Asynkronmaskinmodellen

4.1 Introduksjon til COMSOL

For å utforske oppgavens problematikk ytterligere, ble det valgt å modellere en asynkronmaskinmodell i programmet COMSOL [13]. COMSOL er et program som bruker elementmetoden (ofte omtalt med den engelske forkortelsen FEM – «*Finite Element Method*» eller FEA – «*Finite Element Analysis*»), og har mulighet til å ta høyde for materialegenskaper og fysiske lover.

Elementmetoden [14] deler objekt inn i små elementer, ofte trekantformede, og elementenes knutepunkt får da tildelt sine respektive formfunksjoner, bestemt av fysikk- og materialegenskaper. Differensialligningene blir konstruert slik at både knutepunkt og langsider i trekantene blir tatt i betraktning, og kalkulasjonen ender i lineære ligninger som må løses med hensyn på knutepunktsforskyvningene. Dersom man øker antall elementer og noder, vil løsningen gå mot den endelige virkelige situasjonen, teoretisk. Figur 17 viser et eksempel på elementmetodens maskenett generert for asynkronmaskinmodellen i forbindelse med arbeidet av denne rapporten.



Figur 17: Maskenett for asynkronmaskinmodellen i COMSOL

Framgangsmåten i COMSOL er å først bygge en geometri, deretter tildele de forskjellige domene et materiale (luft, stål, kobber), definere start- og grensebetingelser (påtrykt spenning, magnetisk felt), generere maskenett (definere tetthet for elementmetoden), og til slutt definere type simuleringer (egenverdianalyse, tidsanalyse, frekvensanalyse m.m.). Etter simulering kan man så presentere ønskede verdier med for eksempel tabell, linjeplot eller 3d-modell iført fargespekter for ønskede betingelser.

COMSOL har en egen modul for elektromagnetisk modellering. I denne modulen finnes typiske komponenter som kondensator, spole, isolator, vikling og sensorer. Materialer har innlagt standardiserte verdier på egenskaper som permeabilitet, konduktivitet og B-H-kurve. I tillegg kan de forskjellige domeneene tildeles individuelle egenskaper ved for eksempel matematiske ligninger eller en elektrisk krets. Modulen bruker så Maxwells ligninger samt materialegenskaper og start- og grensebetingelser for å løse oppgaven.

4.2 Beskrivelse av maskinene i den aktuelle pumpestasjonen

Flere detaljerte spesifikasjoner for maskinene i den aktuelle pumpestasjonen er ukjente, slik som sportall, vinklingsdistribusjon, og lengde på luftgapet. Det er derfor brukt standardiserte retningslinjer for asynkronmaskindesign i arbeidet med asynkronmaskinmodellen [15] [16]. Kjente merkedata for asynkronmaskinene i den aktuelle pumpestasjonen er oppgitt i Tabell 6:

Tabell 6: Kjente merkedata for asynkronmaskinene i den aktuelle pumpestasjonen

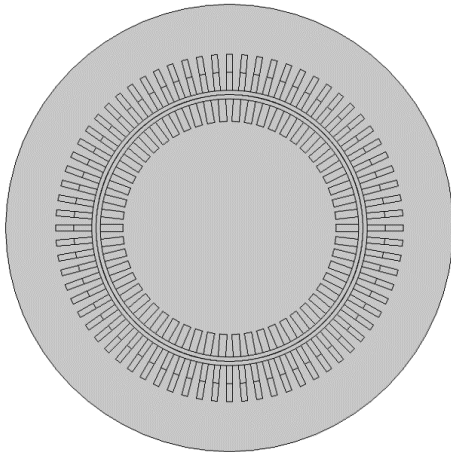
f_s	50 Hz	Påtrykt frekvens i stator
m	3	Antall faser
P_{ut}	1750 kW	Effekt ut av maskinen
$n_{r,N}$	742 r/min	Nominell rotorhastighet
s_N	1,067 %	Nominell sakkingsfrekvens
V_{prim} (stjernekoblet)	6600 V	Fasespenning på primærsiden
V_{sek} (stjernekoblet)	1695 V	Fasespenning på sekundærsiden
I_{prim}	200 A	Strøm på primærsiden
I_{sek}	623 A	Strøm på sekundærsiden
$\cos \varphi$	0,79	Fasevinkel mellom strøm og spenning

Målinger utført ved pumpestasjonen (se Figur 64, Vedlegg B) viser at inngangseffekten på de respektive maskinene er tilnærmet 1,6 MW, altså 0,15 kW lavere enn nominell utgangseffekt. Det er derfor gjort et overslag for å korrigere driftsverdiene i henhold til antatt tilsvarende lavere inngangseffekt. Korrigert sakkingsfrekvens er beregnet til å være **0,945 %**. Se Vedlegg B for detaljer i forbindelse med utregningen av korrigerte driftsverdier på maskinene.

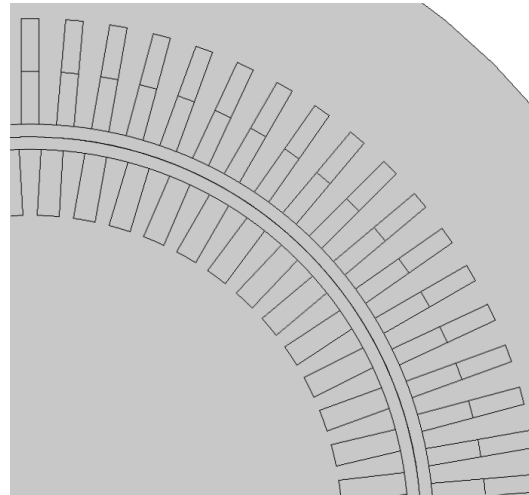
4.3 Modellbeskrivelse

Modellen er kontinuerlig modifisert under arbeidet med denne rapporten, og det tas forbehold om at ikke alle figurene stammer fra den endelige modellen, og at bildene hovedsakelig har som hensikt å komplimentere forklaringene illustrativt.

4.3.1 Geometri



Figur 18: Geometri for asynkronmaskinmodellen



Figur 19: Zoomet geometri for asynkronmaskinmodellen

Geometrien for asynkronmaskinmodellen er illustrert i Figur 18 og Figur 19. Viklingene er valgt å dekke hele sine respektive spor, slik at overflatene mot luftgapet blir glatte. Denne forenklingen er utført for å gjøre simuleringene mindre krevende i henhold til prosessorkraft, og med bakgrunn i at en slik forenkling kun vil gjøre moderate utslag i de aktuelle analysene.

4.3.2 Spesifikasjoner og design

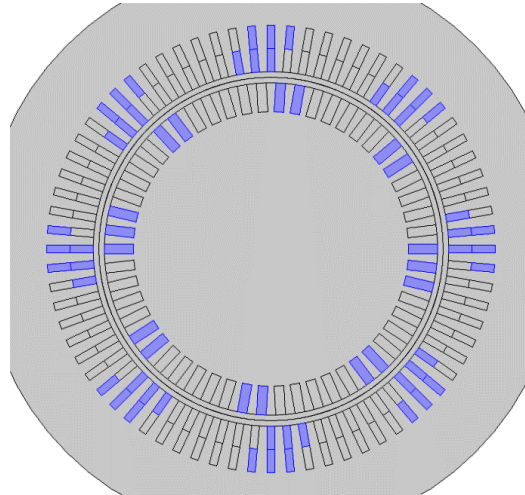
Detaljerte spesifikasjoner for asynkronmaskinmodellen er presentert i Tabell 7.

Tabell 7: Merkedata for asynkronmaskinmodellen

P	1750 kW	Utgangseffekt
f_s	50 Hz	Påtrykt frekvens i stator
m	3	Antall faser
n_s	750 rpm	Synkron hastighet
s	0,9 %	Sakkingsfrekvens
p	4	Antall polpar
E_{ind}	6600 kV	Indusert spenning (tilnærmet lik V_{prim})
$\cos \varphi$	0,79	Fasevinkel mellom spenning og strøm
Q_s, Q_r	72, 54	Antall spor i stator/rotor
q_s, q_r	3, 9/4	Antall spor per pol per fase i stator/rotor
k_w	0.955	Viklingsfaktor

Det bemerkes at sakkingsfrekvensen ble rundet av fra 0,945 % til 0,9 % i simuleringene, og at dette kun var en forenkling som skjedde under prosessen, uten spesielle hensikter. Avviket er følgelig tatt i betraktning under arbeidet med resultatene.

Viklingene i stator er distribuert som to-lagsvikling med $q=3$ og skrittforkortning på 1 over 72 spor. Viklingene i rotor er distribuert som en-lagsvikling med $q=9/4$ over 54 spor. Viklingsdistribusjonen er illustrert ved fase a (blå) i Figur 20. Antall spor samt distribusjon av viklinger er valgt ut fra anbefalte verdier for asynkronmotor med viklet rotor [15].



Figur 20: Viklingsdistribusjon av fase a

Alle spor har bredde/lengde-forhold på $1/3$, og alle sporene er jevnt fordelt utover periferien. Statorens ytre diameter tilsvarer statorens indre diameter pluss 2 ganger dybden på statorspor. Statorens pol-lengde mot luftgapet, τ_{ss} , er anbefalt å være mellom 1,5 og 2,5 cm [15]. Ved å velge rotordiameter, D , på 0,4 m vil kravet være innfridd i henhold til Formel (5), og dette ble brukt som dimensjonerende faktor for videre dimensjonering.

$$\tau_{ss} = \frac{\pi D}{Q_s} = \frac{\pi * 40 \text{ cm}}{72} = 1,75 \text{ cm} \quad \text{Formel (5)}$$

Tabell på side 4 i [16] anbefaler da dimensjonerende kriterier i henhold til Tabell 8:

Tabell 8: Dimensjoneringskriterier for asynkronmaskinmodellen ved rotordiameter på 0,4 m

B_{av}	0,45 T	Gjennomsnittlig flukstetthet i luftgapet
ac	21 500 amp-cond/m	Spesifikk elektrisk last
δ	3,2 A/mm ²	Strøm-tetthet
L/D	0,62	Forholdet mellom rotorlengde og -diameter

Lengde på rotoren kan så regnes ut i henhold til Formel (6):

$$L = D * 0,62 = 0,4 \text{ m} * 0,62 \approx 0,25 \text{ m} \quad \text{Formel (6)}$$

Fluks per pol kan regnes ut ved hjelp av Formel (7):

$$\Phi = B_{av} * \frac{\pi DL}{2p} = 0,45 T * \frac{\pi * 0,4 m * 0,25 m}{2 * 4} = 0,0177 T \quad \text{Formel (7)}$$

Antall viklinger per fase i stator kan regnes ut ved hjelp av Formel (8):

$$N_s = \frac{E_s}{4,44 * f * \Phi * k_w} = \frac{6600 V}{4,44 * 50 Hz * 0,0177 T * 0,955} \sim 1760 \quad \text{Formel (8)}$$

Antall viklinger per fase i rotor kan finnes ved spenningsforholdet mellom stator og rotor, i henhold til Formel (9):

$$N_r = N_s * \frac{V_{sek}}{V_{prim}} = 1760 * \frac{1695 V}{6600 V} = 452 \quad \text{Formel (9)}$$

Tverrsnitt på viklingene i stator og rotor kan regnes ut ved henholdsvis Formel (10) og Formel (11):

$$a_s = \frac{I_s}{\delta} = \frac{200 A}{3,2 A/mm^2} = 62,5 mm^2 \quad \text{Formel (10)}$$

$$a_r = \frac{I_r}{\delta} = \frac{623 A}{3,2 A/mm^2} = 195 mm^2 \quad \text{Formel (11)}$$

For ordens skyld er de utregnede verdiene listet opp i Tabell 9:

Tabell 9: Dimensjoner for asynkronmaskinmodellen

D	0,4 m	Rotordiameter
L	0,25 m	Lengde på rotor
N_s, N_r	1760, 452	Viklinger per fase i stator/rotor
a_s, a_r	62,5 mm ² , 195 mm ²	Tverrsnitt på viklinger i stator/rotor

Statorviklingene er påtrykt tidsvarierende strøm i henhold til Formel (12), påtrykk av harmoniske komponenter er utført i henhold til Formel (13), og ubalansert påtrykk er utført i henhold til Formel (14). Påtrykk av spenning er gjort på samme måte, bortsett fra at amplitude i stedet er satt lik 6600 V.

$$i_a = \sqrt{2} * 200 * \sin(2\pi * 50 * t) \quad \text{Formel (12)}$$

$$i_b = \sqrt{2} * 200 * \sin\left(2\pi * 50 * t - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$i_c = \sqrt{2} * 200 * \sin\left(2\pi * 50 * t + \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$i_{ah} = i_a + 0.01 * \sqrt{2} * 200 * \sin(h * 2\pi * 50 * t)$$

$$i_{bh} = i_b + 0.01 * \sqrt{2} * 200 * \sin\left(h * 2\pi * 50 * t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad \text{Formel (13)}$$

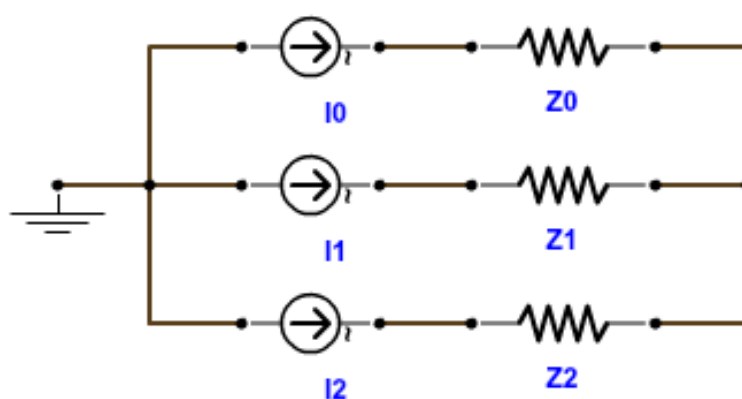
$$i_{ch} = i_c + 0.01 * \sqrt{2} * 200 * \sin\left(h * 2\pi * 50 * t + \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$i_a = i_a$$

$$i_b = 0.95 * i_b \quad \text{Formel (14)}$$

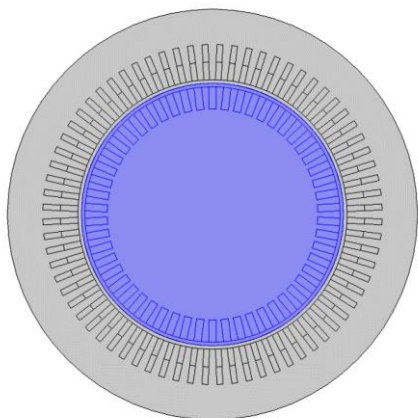
$$i_c = 1.05 * i_c$$

Rotorviklingene er koblet opp mot en elektrisk krets (se enlinjeskjema Figur 21), hvor komponenter nummerert 0 viser til fase *a*, komponenter nummerert 1 viser til fase *b*, og komponenter nummerert 2 viser til fase *c*. Strømkildene er satt opp til å bruke materialegenskaper (Z-komponent, Figur 21) og induisert spenning i den respektive viklingen som grunnlag for påtrykk. Ved nominell drift er sleperingene kortsluttet, og det er derfor ikke lagt inn annen impedans enn viklingenes respektive materialegenskaper.

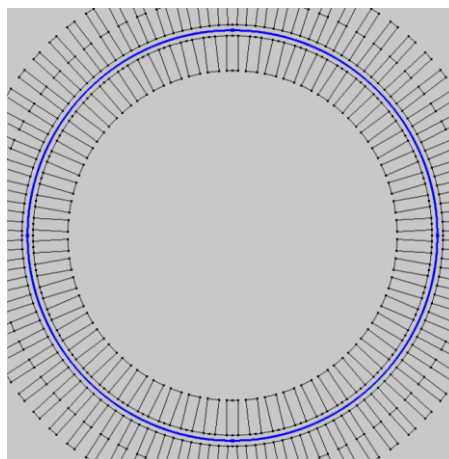


Figur 21: Elektrisk krets koblet til rotorviklingene

Rotoren er definert i COMSOL i henhold til Figur 22 (blått), og det er definert en kontinuitetsbetingelse i grensesnittet mellom roterende luftgap og stillestående luftgap (se Figur 23). Dette er nødvendig for at COMSOL skal se på luftgapet som kontinuerlig. Rotasjonshastighet på rotor er lagt inn manuelt, på følgende 643,5 r/min, tilsvarende sakkingsfrekvens på 0,9 % i henhold til merke-data presentert i Tabell 12.



Figur 22: Illustrasjon av rotor i COMSOL



Figur 23: Kontinuitetsbetingelse ved luftgapsgrensesnitt

4.3.3 Maskenett

Ved for lav tetthet i maskenettet blir resultatene for «grove», og simuleringresultatene får da synlige «hakk» i grafene. Ved for høy tetthet i maskenettet øker simuleringstiden betraktelig, noe som ble tilfellet når COMSOL genererte maskenett automatisk (simuleringstid på rundt 13 timer). For å få optimalisert forholdet mellom simuleringstid og oppløsning, er derfor maskenettet definert manuelt, noe som endte opp med en simuleringstiden på rundt 3 timer.

Hvis verdien på minste elementkvalitet er mindre enn 0,1, gir COMSOL automatisk varselsmelding om dette. Maskenettet som er generert manuelt har minste elementkvalitet på tilnærmet 0,5, noe som altså er innenfor COMSOLs anbefalte verdier. I tillegg er det heller ikke observert synlige hakk i grafene, samtidig som at simuleringstiden er tilfredsstillende.

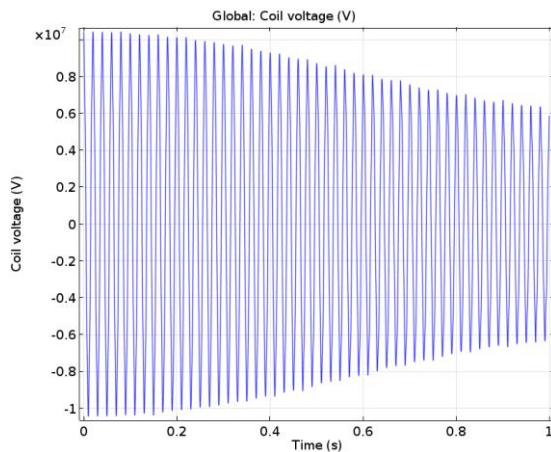
For å få maskenett-tettheten til å oppfylle ønskede kriterier, er genereringen av maskenettet oppdelt i henholdsvis følgende tre domene-grupper:

- Viklinger (firkant-elementer bygget på kart-system)
- Stator og tilhørende stillestående luftgap (trekant-elementer)
- Rotor og tilhørende roterende luftgap (trekant-elementer)

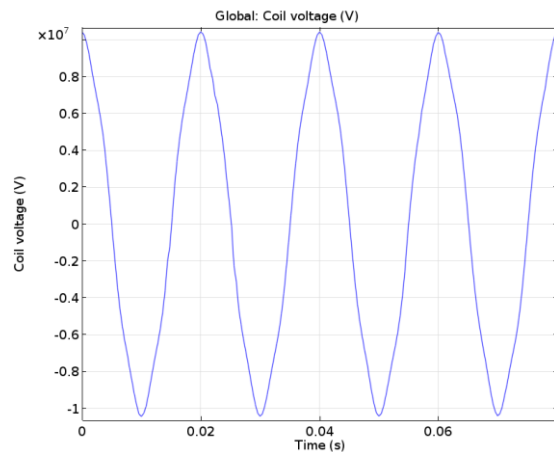
4.3.4 Simulering og -resultat

Stasjonær løsning er alltid analysert først. Resultatene av den stasjonære løsningen er så brukt som startbetingelse for variablene i tidsanalysen. Tidsanalysen har en lengde på 1,0 sek (12,5 omdreininger i statorfeltet), med oppløsning på 0,4 ms (50 skritt per sinus $v/50$ Hz). Fourier-analyse gir da frekvenser opp til 1250 Hz, med en oppløsning på 1 Hz.

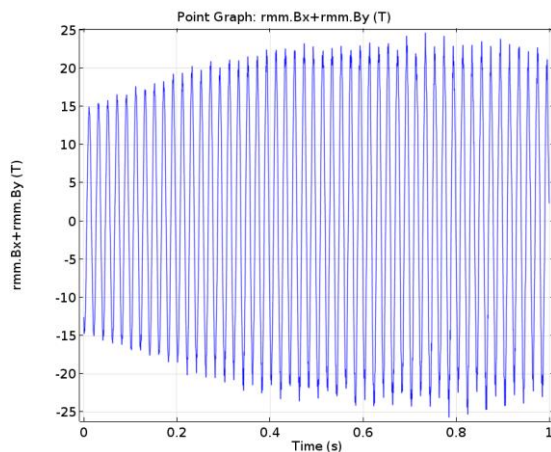
Det er primært brukt to forskjellige plot i undersøkelsen av den harmoniske produksjonen til asynkronmaskinmodellen. Disse er statorspenning/-strøm i fase *a* (se Figur 24 og Figur 25), og magnetisk flukstetthet i luftgapet (se Figur 26 og Figur 27). Sistnevnte er målt ved et fast punkt plassert midt i luftgapet. Plottene er kopiert og overført til MATLAB, hvor FFT-analyse er utført. MATLAB-scriptet som er brukt er presentert i Vedlegg C.



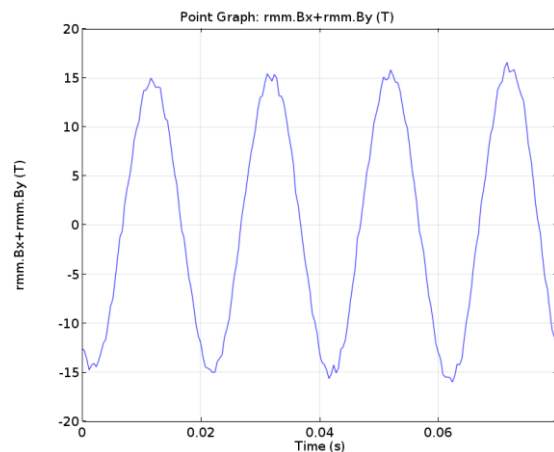
Figur 24: Statorspenning i fase *a*



Figur 25: Zoom statorspenning i fase *a*

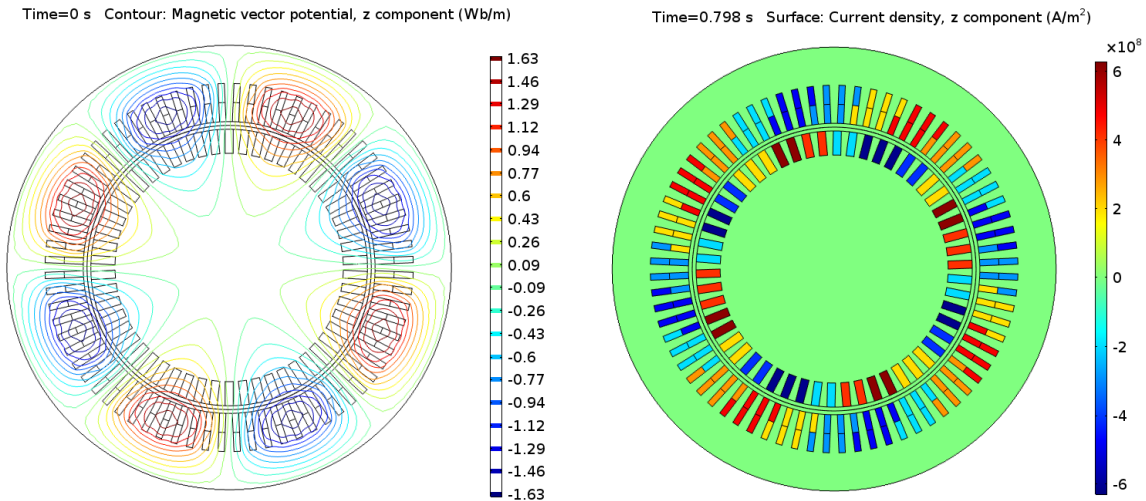


Figur 26: Magnetisk flukstetthet for punkt i luftgapet



Figur 27: Zoom magnetisk flukstetthet for punkt i luftgapet

I tillegg ble det tegnet magnetisk vektorpotensial i *z*-retning i 2d (Figur 28) og strømtetthet i 2d (Figur 29) for å kontrollere at motoren oppførte seg som forventet. Disse er dog ikke en del av resultatpresentasjonen, og er kun brukt som kontroll av modelloppførselen under arbeidet.



Figur 28: Magnetisk vektorpotensial i z-retning

Figur 29: Strøm-tetthet i z-retning

4.3.5 Interharmoniske komponenter

Sakkingsfrekvensen er satt lik 0,9 % i simuleringene av den 8-polte asynkronmaskinmodellen, i henhold til Tabell 7. Maskinen vil da produsere fundamentalinduserte frekvenskomponenter (se Formel (3)) i henhold til Tabell 10:

Tabell 10: Fundamentalinduserte frekvenskomponenter ved sakkingsfrekvens lik 0,9 %

Fundamental-induserte frekvenskomponenter ved $s = 0,009$								
k	0		1		2		3	
	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)
[Hz]	50	50	247,3	347,3	544,6	644,6	841,9	941,9

Maskinen vil på samme grunnlag produsere harmoniskinduserte frekvenskomponenter (se Formel (4)) i henhold til Tabell 11:

Tabell 11: Harmoniskinduserte frekvenskomponenter ved sakkingsfrekvens lik 0,9 %

Harmonisk-induserte frekvenskomponenter ved $s = 0,009$ [Hz]								
k	0		1		2		3	
h	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)
5	250	250	47,9	547,9	345,8	845,8	643,7	1143,7
7	350	350	52,1	647,9	245,8	945,8	543,7	1243,7

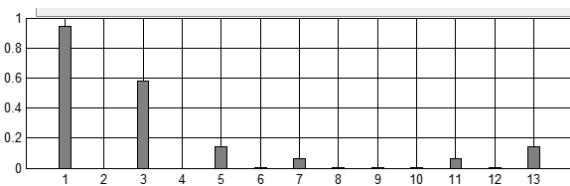
Det er kun gjort simuleringer med påtrykk av 5. harmoniske komponent og 7. harmoniske komponent i dette arbeidet (vel og merke også kun hver for seg). Verdier for resterende harmoniskinduserte komponenter er også sammenlignet med frekvensresponsresultatene, men

som forventet ga dette lite samsvar. Følgelig er kun respektive verdier for 5.- og 7. harmoniske komponent tatt med i tabellen.

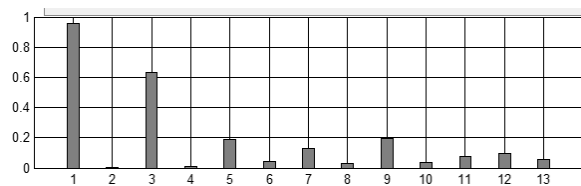
4.3.6 Romharmoniske komponenter

Maskinens produksjon av romharmoniske komponenter er utført i et program [12], utviklet av professor Robert Nilssen, og ble presentert i faget «*ELK-22 Design of electromagnetic devices*» ved NTNU. Romharmoniske komponenter forårsakes av viklingenes geometriske plassering (i rommet), og blir derfor kalt romharmoniske. Dette er grundig forklart i kapittel 2.4.3–2.4.9 i [1]. Inndata i programmet er antall spor, antall poler, antall faser, antall spor per pol (skrittforkorting), og antall lag med viklinger. Programmet er tilpasset permanentmagnetmotorer, og har kun mulighet til å legge inn *en* type viklingsdesign om gangen. De romharmoniske komponentene er dermed beregnet for statorviklingene og rotorviklingene hver for seg.

Romharmoniske komponenter *per fase* for stator- og rotorviklingene i asynkronmaskinmodellen er vist i henholdsvis Figur 30 og Figur 31:



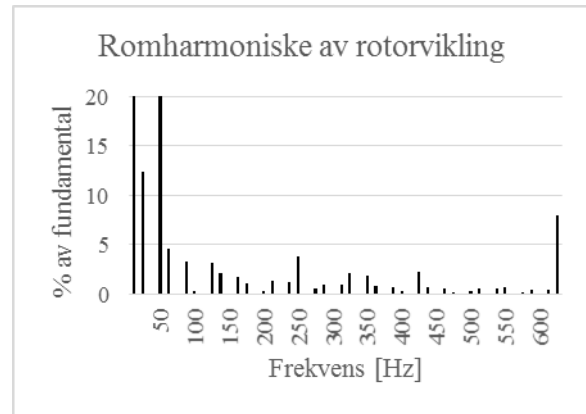
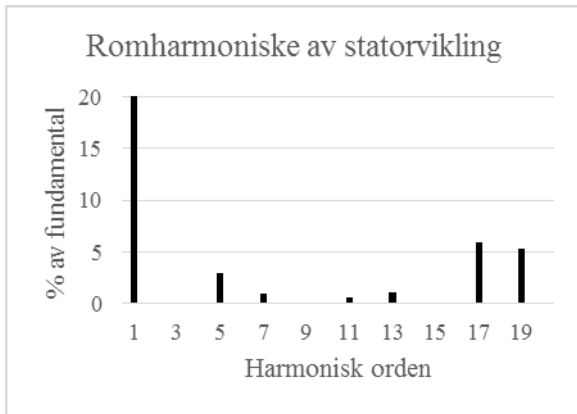
Figur 30: Romharmoniske komponenter per fase for statorviklinger i asynkronmaskinmodellen [12]



Figur 31: Romharmoniske komponenter per fase for rotorviklinger i asynkronmaskinmodellen [12]

Figurene viser verdien for den respektive harmoniske ordenen på x-aksen, og 1 på y-aksen tilsvarer 100 % av den totale magnetomotoriske kraften. Per fase er det en tydelig verdi for 3. harmoniske komponent, men denne komponenten vil ideelt sett bli eliminert grunnet symmetrien i trefasesystemet [17]. Rotorviklingen produserer mer romharmoniske komponenter enn statorviklingen, med en litt høyere verdi på nærmest samtlige frekvenskomponenter. Dette kommer av at viklingene er lagt med kun ett lag, og det er dermed ikke mulig å redusere harmoniske komponenter ved hjelp av skrittforkorting. Det bemerkes også at både 5.- og 7. harmoniske komponent er markant i både stator og rotor.

Den *totale* produksjonen av romharmoniske komponenter for stator- og rotorviklingene vises henholdsvis i Figur 32 og Figur 33.



Figur 32: Total romharmonisk produksjon for statorvikling Figur 33: Total romharmonisk produksjon for rotorvikling

Figur 32 viser verdien for den respektive harmoniske ordenen på x-aksen, og tallene på y-aksen angir prosent av den fundamentale komponenten. I Figur 33 er x-akse angitt i frekvens [Hz], og y-akse er angitt i prosent av den fundamentale komponenten.

I det totale bildet er den 3. harmoniske frekvenskomponenten nå eliminert, som nevnt ovenfor, mens 5.- og 7. harmoniske frekvenskomponent fremdeles er markante. I tillegg bemerkes det at 17.- og 19. harmoniske frekvenskomponent har høye verdier for statorviklingen (Figur 32), og frekvenskomponenten på 625 Hz har markant verdi for rotorviklingen (Figur 33).

Siden antall spor per pol per fase i rotor er $9/4$, vil rotorviklingene generere subharmoniske komponenter fra $50 \text{ Hz} / 4 = 12,5 \text{ Hz}$ [18]. Den første toppen i Figur 33 kan se ut til å være rundt 0 Hz grunnet dårlig oppløsning, men riktig frekvens er følgelig altså 12,5 Hz, mens topp nr. 2 er $12,5 \text{ Hz} * 2 = 25 \text{ Hz}$.

5 Resultat (8-polet asynkronmaskinmodell)

Forskjellige scenarioer er undersøkt, og interessante resultat fra arbeidet er listet opp i dette kapitlet. Analyser og kommentarer til resultatene er presentert i neste kapittel. Alle resultatene er eksportert fra COMSOL og kjørt gjennom MATLAB-scriptet presentert i Vedlegg C. Scriptet er delvis modifisert etter behov, men felles for alle plottene er:

- Stolpediagram hvorav oppløsningen er 1 stolpe per Hz
- Y-aksen viser størrelse i prosent av den grunnharmoniske komponenten (50 Hz)

I hovedsak er figurene i venstre kolonne presentert med et frekvensspekter fra 0 til 1000 Hz, og vindushøyde tilpasset for å tydeliggjøre interessante frekvenskomponenter. I høyre kolonne finnes tilsvarende plot, innzoomet på interessante frekvenskomponenter.

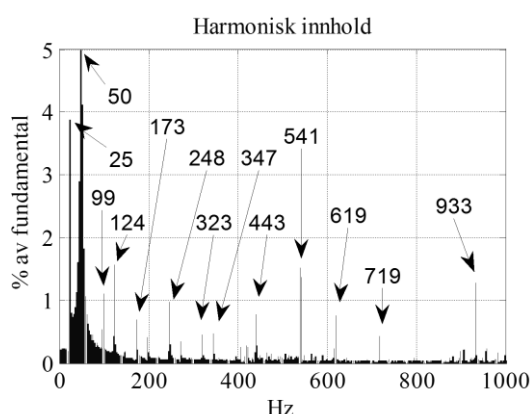
5.1 FFT-analyser av flukstetthet i luftgapet ved strømpåtrykk

Av de forskjellige analysene som er gjort, er det analyse av flukstettheten i luftgapet ved strømpåtrykk som er mest samsvarende med referansemodellen, og det er følgelig valgt å kun fokusere på nevnte analyser i framlegget av resultater. Andre analyser som er utført, er presentert i Vedlegg A.

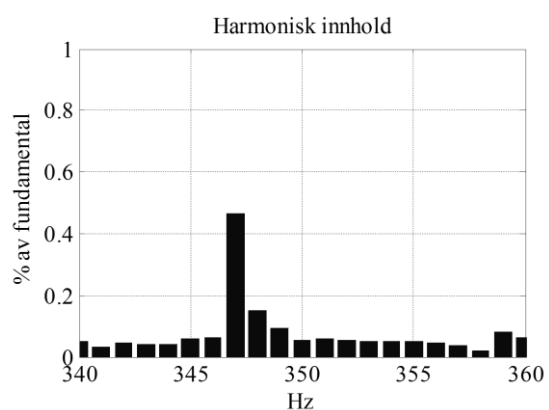
Alle målingene for flukstettheten i luftgapet er utført i et fast punkt plassert midt i luftgapet over hele tidsforløpet (beskrevet i kapitlet Simulering og -resultat).

5.1.1 Ideelt sinuspåtrykk

Figur 34 og Figur 35 viser FFT-analyse av simulering utført med ideelt strømpåtrykk, i henhold til Formel (12).



Figur 34: FFT-analyse av flukstetthet i luftgapet ved strømpåtrykk

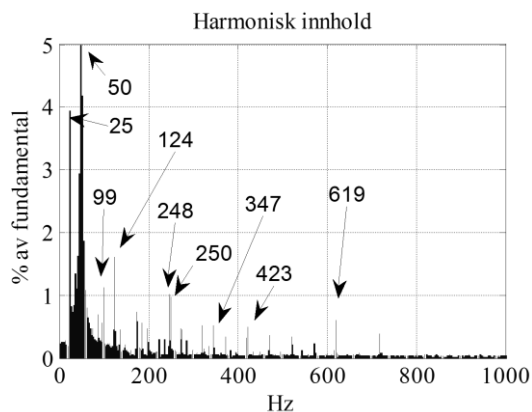


Figur 35: FFT-analyse av flukstetthet i luftgapet ved strømpåtrykk innzoomet på 7. harm

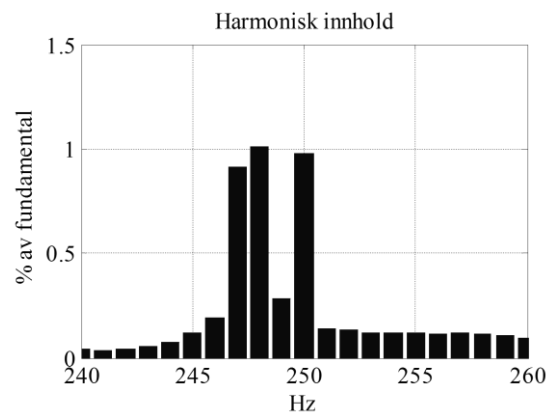
Figur 34 viser at den 8-polte asynkronmaskinmodellen produserer en tydelig subharmonisk komponent på 25 Hz. Den har trolig opphav fra rotorens romharmoniske produksjon (se Figur 33). Også frekvenskomponenten på 125 Hz (5. harmoniske av komponenten på 25 Hz) vises både i Figur 33 og Figur 34. Sammenhengen mellom den romharmoniske produksjonen og flukstettheten i luftgapet viser seg altså tydelig igjen, da disse komponentene ikke er forventet i henhold til tidligere studier eller de fundamentalinduserte frekvenskomponentene (Formel (3)). Modellen gir markant verdi for frekvenskomponenten på 99 Hz, som kan ses på som 2. harmoniske komponent med sakkingsfrekvens, da $100 \text{ Hz} * (1 - 0,009) = 99 \text{ Hz}$. Frekvenskomponenten på 124 Hz svarer til den 5. harmoniske komponenten av subharmonisk komponent på 25 Hz (vel og merke med sakkingsfrekvens), da $25 \text{ Hz} * 5 * (1 - 0,009) \approx 124 \text{ Hz}$, eventuelt kan man se på den som 5/2. harmoniske komponent. På samme vis er den 7/2. harmoniske komponenten (med sakkingsfrekvens) på 173 Hz også tydelig i frekvensresponsen. Igjen er også de fundamentalinduserte komponentene for $k=1$ i Formel (3) tydelige, henholdsvis på 248 Hz og 347 Hz, Nettopp 5.- og 7. harmoniske frekvenskomponent er også tydelige i den romharmoniske produksjonen (se Figur 32).

5.1.2 Harmoniske komponenter i påtrykk

Figur 36 og Figur 37 viser FFT-analyse av simulering utført med ideelt sinuspåtrykk samt 1 % påtrykk av 5. harmoniske komponent, i henhold til Formel (13).



Figur 36: FFT-analyse av flukstetthet i luftgapet ved 1 % strømpåtrykk av 5. harm

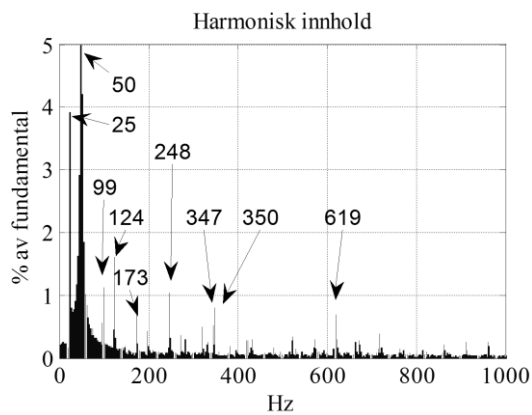


Figur 37: FFT-analyse av flukstetthet i luftgapet ved 1 % strømpåtrykk av 5. harm innzoomet på 5. harm

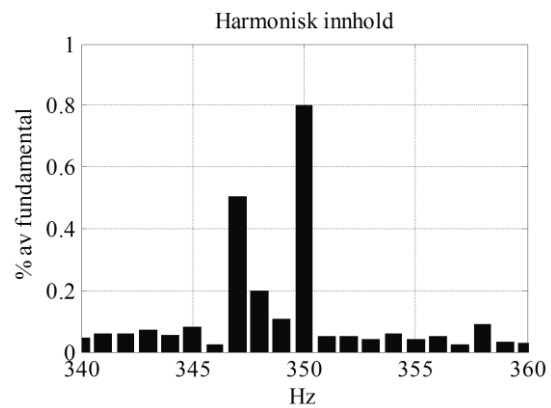
Frekvensresponsen ved 5. harmoniske komponent i påtrykk (Figur 36), er tilnærmet lik figur fra ideelt sinuspåtrykk (Figur 34). En tydelig endring er at verdien på den helharmoniske 5. harmoniske komponenten (250 Hz) gikk fra en verdi på 0,1 % til 1 % av den fundamentale komponenten, samtidig som den interharmoniske 5. harmoniske komponenten på 248 Hz forble uendret (se Figur 37).

Det bemerkes at frekvenskomponenter forventet ut fra formelen for harmoniskinduserte frekvenskomponenter (Formel (4)) er ikke framtreddende i Figur 36.

Figur 38 og Figur 39 viser FFT-analyse av simulering utført med ideelt sinuspåtrykk, samt 1 % påtrykk av 7. harmoniske komponent, i henhold til Formel (13).



Figur 38: FFT-analyse av flukstetthet i luftgapet ved 1 % strømpåtrykk av 7. harm



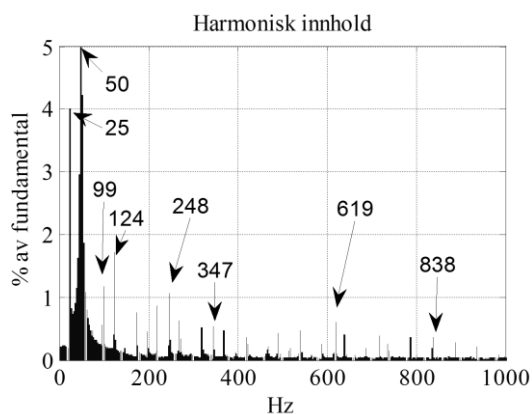
Figur 39: FFT-analyse av flukstetthet i luftgapet ved 1 % strømpåtrykk av 7. harm innzoomet på 7. harm

Frekvensresponsen ved påtrykk av 7. harmonisk komponent viser samme tendens som frekvensresponsen ved påtrykk av 5. harmonisk. I Figur 39 vises det at den interharmoniske komponenten på 347 Hz fremdeles har samme verdi som ved ideelt sinuspåtrykk. Den helharmoniske komponenten på 350 Hz derimot, gikk fra å være en neglisjerbar verdi ved ideelt sinuspåtrykk, til å bli 0,8 % av den fundamentale komponenten. De resterende frekvenskomponentene forble tilnærmet uendret fra frekvensresponsen ved ideelt sinuspåtrykk.

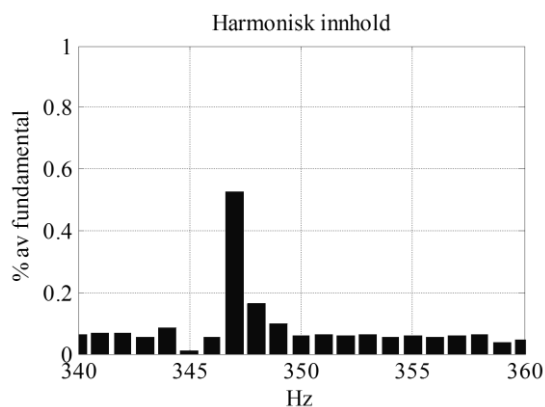
Ved begge ovennevnte tilfeller er det lite samsvar mellom verdiene beregnet med formel for harmoniskinduserte frekvenskomponenter (Formel (4)), og frekvensresponsen ved harmoniske komponenter i påtrykk. Blant annet skal det bli indusert en frekvenskomponent på 648 Hz ved bruk av addisjon, $h=7$ og $k=1$ i Formel (4), men denne frekvensen har ikke noen markant verdi i frekvensresponsen ved påtrykk av 7. harmoniske komponent (se Figur 38).

5.1.3 Ubalanse i påtrykk

Figur 40 og Figur 41 viser FFT-analyse av simulering utført med ± 5 % amplitudepåtrykk i respektive fase b og c, i henhold til Formel (14).



Figur 40: FFT-analyse av flukstetthet i luftgapet ved 5 % ubalanse i strømpåtrykk

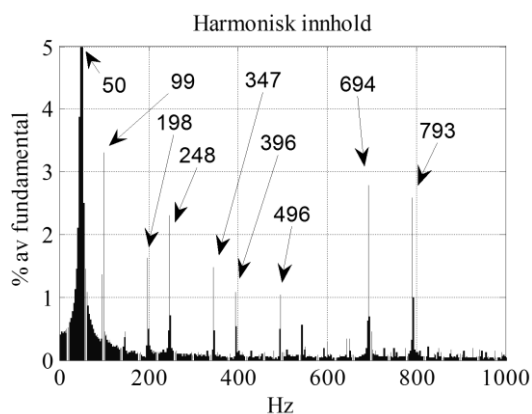


Figur 41: FFT-analyse av flukstetthet i luftgapet ved 5 % ubalanse i strømpåtrykk innzoomet på 7. harm

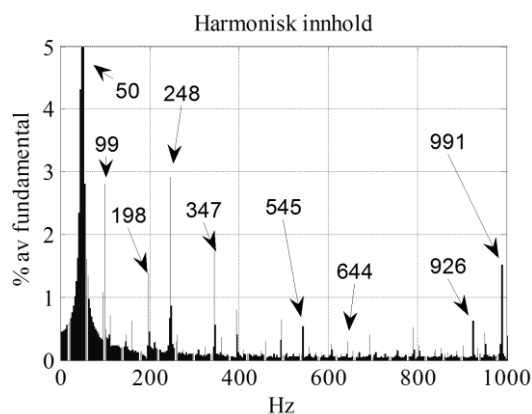
Den interharmoniske komponenten på 347 Hz øker med en verdi på ca. 0,01 % sammenlignet med ved ideelt sinuspåtrykk. Dette er i det hele en ubetydelig verdi, og generelt har ubalanse i påtrykket lav innvirkning på frekvensresponsen. Ubalanse i påtrykket er derav antatt å ikke kunne framtvinge nye frekvenskomponenter i henhold til beat-problematikk.

5.1.4 Endret spor-tall i rotor

Figur 42 og Figur 43 viser FFT-analyser av flukstettheten i luftgapet for simuleringer utført med ideelt strømpåtrykk, i henhold til Formel (12). Spesifikasjonene for følgende modeller er tilpasset i henhold til framgangsmåte beskrevet i kapittelet Modellbeskrivelse, hvor Figur 42 stammer fra modell dimensjonert med 60 spor i rotor, og Figur 43 stammer fra modell dimensjonert med 84 spor i rotor. Antall spor i stator er uendret.



Figur 42: FFT-analyse av flukstetthet i luftgapet ved strømpåtrykk - 60 spor i rotor



Figur 43: FFT-analyse av flukstetthet i luftgapet ved strømpåtrykk - 84 spor i rotor

60 spor i rotor gir antall spor per pol per fase, q_r , lik $2+1/2$, og fordel med det er blant annet at frekvenskomponenten på 25 Hz blir borte. Samme effekt har 84 spor i rotor, da antall spor per

pol per fase er $3+1/2$. Se kapittel Romharmoniske komponenter for detaljer rundt romharmonisk produksjon basert på antall spor per pol per fase.

Flere frekvenskomponenter viser seg å gå igjen, uavhengig av sporantallet i rotor. Frekvenskomponentene på 99 Hz, 198 Hz, 248 Hz, 347 Hz er alle markante ved ideelt sinuspåtrykk, og det poengteres at 99 Hz og 198 Hz ikke er forventet i henhold til teori om fundamentalinduserte frekvenskomponenter (Formel (3)), men at de vel og merke har en lav verdi i beregningen av romharmonisk produksjon i rotorviklingen (Figur 33).

5.2 Analyser av resultat

Kun noen få frekvenskomponenter vises konsekvent i flere av analysene. Disse er:

- Fundamentalinduserte frekvenskomponenter ved $k=1$ (Formel (3))
- 2. harmoniske frekvenskomponent (med sakkingsfrekvens)
- $5/2$. eller 4. harmoniske komponent avhengig av subharmonisk produksjon

Analyse av den romharmoniske produksjonen samsvarer veldig godt med frekvensresponsen av flukstettheten i luftgapet for asynkronmaskinmodellen. Fordelen med asynkronmaskinmodellen er at effekten fra både statorvikling og rotorvikling blir tatt høyde for samtidig. I tillegg tar asynkronmaskinmodellen hensyn til sakkingsfrekvensen i rotor, slik at frekvenskomponentene blir angitt med eksakt frekvens. Programmet for beregning av den romharmoniske produksjonen gir kun et helharmonisk spekter, samt harmoniske komponenter av de subharmoniske komponentene vel og merke, men sakkingsfrekvensen blir altså ikke tatt høyde for. I den romharmoniske produksjonen er det naturligvis en enkel sak å ta høyde for sakkingsfrekvensen i ettetid, men effekten av sakkingsfrekvensen vil også kunne avhenge av hvor strømmen er størst (stator eller rotor). I tillegg gir programmet kun tilgang til den romharmoniske produksjonen separat for statorvikling og rotorvikling, og det er da vanskelig å si hvordan det totale bildet vil se ut, da dette vil avhenge av både den romlige plasseringen av stator kontra rotor, samt strømmen i de respektive viklingene.

Formel for fundamentalinduserte frekvenskomponenter (Formel (3)) ser ut til å ta utgangspunkt i ideelle forhold (for eksempel eliminering av 3. harmoniske komponent), og analyse enten via romharmonisk produksjon eller en COMSOL-modell som presentert i dette arbeidet, vil med fordel gi en mer nøyaktig frekvensrespons.

Den romharmoniske produksjonen for statorviklingene (se Figur 32) viser tydelige verdier for 17.- og 19. harmoniske frekvenskomponenter, noe som ikke er tilfellet i frekvensresponsen for asynkronmaskinmodellen (Figur 34). Dermed ser det ut til at rotorviklingene har størst utslag i

frekvensresponsen, da for eksempel frekvenskomponenten på 625 Hz som har en tydelig verdi i den romharmoniske produksjonen for rotorviklingen (se Figur 33), også vises i frekvensresponsen for asynkronmaskinmodellen (625 Hz * (1-0,009) ≈ 619 Hz, se Figur 34). Dette gir også mening i henhold til merkedata for asynkronmaskinmodellen (se Tabell 6), hvor strømmen i rotor er 623 Ampere, kontra 200 Ampere i stator.

I den 8-polte asynkronmaskinmodellen ser frekvensresponsen ut til å samsvare med sakkingsfrekvensen. Med det menes at for eksempel frekvenskomponenten på 248 Hz i Figur 34, burde i stedet vært på 247,3 Hz ≈ 247 Hz (se Tabell 10), i henhold til formel for de fundamentalinduserte frekvenskomponentene (Formel (3)). Frekvenskomponenten på 248 Hz kan altså ha oppstått i henhold til følgende regnestykke: 250 Hz * (1 - 0,009) = 247,75 ≈ 248 Hz. Med hensyn til gjeldende eksempel vil altså leddet med sakkingsfrekvens bli flyttet ut av absoluttklammen, slik at Formel (3) blir endret til følgende:

$$f_{ind}^k = |6k \pm 1|f_s(1 - s), \quad k = 0, 1, 2, 3 \dots \quad \text{Formel (15)}$$

Dette er dog ikke gjeldende i frekvensresponsen til den 4-polte asynkronmaskinmodellen. Om så var tilfellet, så ville det gitt en frekvenskomponent på 350 Hz * (1 - 0,03) = 339,5 Hz, mens simuleringen tydelig gir tilsvarende komponent en frekvens på 341 Hz (se Figur 14). For å bekrefte om nevnte endring kan være aktuelt, vil det være nødvendig med høyere nøyaktighet på målingene. En endelig konklusjon kan dermed ikke vedtas på grunnlag av dette arbeidet, og gjeldende utfordring er følgelig nevnt som forslag til videre arbeid.

Frekvensresponsen endrer seg ikke betydelig ved påtrykk av harmoniske komponenter, annet enn at de respektive påtrykte frekvenskomponentene altså er større. En asynkronmaskin har høy induktans i forhold til resistans, og siden impedansen avhenger av frekvens i henhold til at $X = \omega L$, vil påtrykk av høyfrekvente komponenter øke impedansen i maskinen betraktelig. Dette gjør at små verdier av harmoniske komponenter i påtrykk, kan gi større utslag i frekvensresponsen for flukstettheten i luftgapet, avhengig av frekvensen.

I asynkronmaskinmodellen er det kun påtrykt 1 % harmonisk innhold, og de harmoniskinduserte frekvenskomponentene er ikke synlige i disse analysene. De kan dog komme til syne ved høyere innhold av harmoniske komponenter, men dette er altså ikke undersøkt i dette arbeidet.

Flimmer kan være synlig allerede ved 0,1 % variasjon i spenningen, avhengig av bl.a. lyskilde, lysstyringsutstyr og øyets sensitivitet [19]. Ved påtrykk av 5. harmoniske komponent (Figur 37) har frekvenskomponentene på 248 Hz og 250 Hz begge en verdi på 1 % av den

fundamentale komponenten, noe som gir en beatkomponent med amplitude på 0,5 % av den fundamentale komponenten, og frekvens på 2 Hz, henholdsvis i henhold til Formel (2) og Formel (1). Ved gitte betingelser kan altså en slik beatkomponent gi synlig flimmer i det «riktige» frekvensområdet, i henhold til situasjonen beskrevet i Problembeskrivelse. Det bemerkes at frekvenskomponenten på 247 Hz også har amplitude på tilnærmet 1 % av den fundamentale komponenten, noe som kan tyde på at det egentlig er snakk om en frekvenskomponent på 247,5 Hz med amplitude lik 2 % av den fundamentale komponenten. Dette da i henhold til at oppløsningen på frekvensanalysen kun er 1 Hz, og at forventet frekvens i henhold til Formel (3) er 247,3 Hz. Hvis dette er tilfellet, kan det gi en beatkomponent med amplitude på 1,5 % av den fundamentale komponenten, og frekvens på 2,5 Hz. En slik beatfrekvenskomponent vil også kunne gi synlig flimmer ved gitte forhold, men frekvensen er dog litt høyere enn for situasjonen beskrevet i Problembeskrivelse.

Lignende beatfenomen er også synlig ved påtrykk av 7. harmoniske komponent, henholdsvis ved frekvenskomponentene på 347 Hz og 350 Hz. I dette tilfellet vil beatkomponenten ha frekvens på 3 Hz, noe som er litt høyere enn ønskelige 2 Hz. Trenden i frekvensresponsene er at frekvensdifferansen fra interharmoniske komponent og nærmeste helharmoniske komponent øker med frekvensen. Eksempelvis vil 2. harmoniske komponent vise seg som en interharmonisk komponent på 99,1 Hz, i henhold til sakkingsfrekvens på 0,9 %, altså tilsvarende en differanse på 0,9 Hz til nærmeste harmoniske frekvenskomponent (100 Hz).

To nærliggende frekvenskomponenter med tilstrekkelig amplitude er kun observert ved tidsharmoniske komponenter i påtrykk, som beskrevet i eksemplene ovenfor. En beatkomponent vil altså kun oppstå ved at maskinens design genererer en romharmonisk komponent, og at det i tillegg finnes en tidsharmonisk komponent i forsyningen med den samme harmoniske ordenen. Beatkomponentens frekvens vil øke med den harmoniske ordenen, og avhenge hovedsakelig av maskinens sakkingsfrekvens. Subharmoniske frekvenskomponenter samt harmoniske frekvenskomponenter av de subharmoniske frekvenskomponentene (de som altså ikke er harmoniske frekvenskomponenter av den grunnharmoniske frekvenskomponenten), er trolig ikke opphav til en lavfrekvent beatkomponent. Dette på grunn av at det normalt ikke er frekvenskomponenter på 25 Hz eller 125 Hz i nettet, og eksempelvis vil en frekvenskomponent på 124 Hz dermed ikke ha en nærliggende frekvenskomponent å interferere med.

Flimmeret var synlig i lyskilder bak elektroniske dimmere. Slike dimmere kan være bygd opp av tyristorer som dimmer lyset ved å kutte sinuskurven, og som herved også generer harmoniske

komponenter. Dette kan forsterke 2 Hz komponenten (evt. de interfererende komponentene), slik at flimmeret vises ved enda lavere amplitudeverdier enn antatt i dette arbeidet.

En måte å ytterligere redusere 2 Hz-komponenten på, kan være å implementere et filter ved maskinene som filtrer bort harmoniske komponenter fra 200 Hz og oppover, eventuelt som filtrerer bort frekvenskomponenter fra 10 Hz og nedover. utfordringen kan være at dette er frekvenser som er relativt nært opp mot den grunnharmoniske frekvenskomponenten, og det kan være økonomisk krevende å lage et filter som er sensitivt nok til at det ikke også drar med seg den grunnharmoniske komponenten i «dragsuget».

5.3 Drøfting av resultat

2 Hz-flimmeret beskrevet i Problembeskrivelse er vel og merke aktivt i overliggende nett, et godt stykke unna pumpestasjonen. Analysene i dette arbeidet representerer i hovedsak frekvensresponsen i maskinens luftgap, da det ble vist tydelig samsvar mellom asynkronmaskinens frekvensrespons for flukstettheten i luftgapet, og frekvensresponsen for statorviklingene i tidligere studier. Hvorvidt komponentene i luftgapet vil utarte seg i et overliggende «stivt» nett, er derimot ikke undersøkt.

Underveis i prosessen er det fundert på hvordan statorviklingene kan inneholde harmoniske komponenter, når påtrykket er ideelle grunnharmoniske sinusfunksjoner. Bare for klargjøre dette, kan altså magnetfeltet fra rotoren sees på som en ekstern kilde, og at statorviklingene i praksis blir påtrykt både de grunnharmoniske sinusfunksjonene, samt det forvrengte magnetfeltet drivende over luftgapet.

Av frekvenskomponenter som kun vises ved enkelttilfeller, slik som for eksempel frekvenskomponenten på 443 Hz ved ideelt sinuspåtrykk (se Figur 34), antas det at disse kan stamme fra «støy» i resultatet. Frekvensresponsen varierer noe fra gang til gang, avhengig av simuleringstid og tetthet på maskenettet. Siden simuleringstid og maskenett er egenskaper som ikke har noe med maskindesignet å gjøre, inneholder resultatene altså en del uønsket støy. Det må som alltid lages et kompromiss mellom nøyaktighet og simuleringstid, og det er følgelig nødvendig å rette fokus på de frekvenskomponentene som konsekvent har større verdi enn resten.

Normalt designes sporene i maskinen med litt vinkel for å redusere den romharmoniske produksjonen, og forhåpentligvis generer en godt dimensjonert maskin mindre romharmoniske enn de aktuelle asynkronmaskinmodellene. Resultatene gir uansett god indikasjon på hvilke frekvenskomponenter man kan være obs på.

5.4 Forslag til videre arbeid

Modellen gir ikke forventet frekvensrespons ved spenningspåtrykk, noe som burde utforskes nærmere. Målinger utført i statorviklingene inneholder en del støy, og bedre oppløsning er trolig nødvendig for å få tilstrekkelig nøyaktighet i disse analysene.

Det kan modelleres et overliggende nett tilkoblet asynkronmaskinen for å undersøke effekten av maskinens frekvensrespons i et nærliggende nettområde.

Den 8-polte asynkronmaskinmodellen gir frekvensrespons som indikerer at formel for fundamentalinduserte frekvenskomponenter (Formel (3)) med fordel kan modifiseres (se Formel (15)). For å undersøke dette nærmere er det nødvendig med bedre oppløsning på simuleringene. Dette betyr i praksis tettere maskenett og simulering over lengre tidsintervall.

Modellen kan effektiviseres ved å dele opp maskinen i «kakestykker», og bruke funksjon for symmetri. I tillegg kan modellen optimaliseres ytterligere ved blant annet å legge på viklingsisolasjon, samt runde av kanter på viklingsspor.

Målinger kan utføres i den aktuelle pumpestasjonen for å bekrefte om estimert sakkingsfrekvens er korrekt, og det kan gjøres ytterligere målinger for å undersøke tilstedeværelsen av harmoniske frekvenskomponenter i maskinenes forsyning.

6 Konklusjon

FFT-analyse av flukstettheten i luftgapet ved strømpåtrykk samsvarer godt med tidligere studier samt teori om fundamentalinduserte frekvenskomponenter i asynkronmaskiner. Resultatene inneholder noe støy grunnet kompromiss mellom simuleringstid og oppløsning, men enkelte frekvenskomponenter viser seg uansett å være framtrede konsekvant i samtlige frekvensanalyser. Disse framtrede frekvenskomponentene svarer til maskinens romharmoniske produksjon, men viser seg å ha en lavere frekvens, tilsvarende sakkingsfrekvensen. For at en av disse interharmoniske frekvenskomponentene skal ha en nærliggende frekvenskomponent å interferere med, så tyder det på at det nødvendigvis også må finnes en harmonisk komponent i forsyningen. En lavfrekvent beatkomponent kan da oppstå mellom interharmonisk frekvenskomponent og forsyningens respektive harmoniske frekvenskomponent.

Det poengteres altså at det sannsynligvis oppstår en lavfrekvent beatkomponent i asynkronmaskinen hvis det finnes en harmonisk komponent i maskinens forsyning. Hastighet og amplitude på beatkomponenten avhenger av maskinens sakkingsfrekvens, maskinens romharmoniske produksjon, og forsyningens harmoniske innhold. Ifølge dette arbeidet vil en synlig beatkomponent på 2 Hz mest sannsynlig oppstå ved at det finnes en 5. harmonisk komponent i forsyningen med amplitude på minst 1 % av den fundamentale komponenten, gitt at maskinen har et viklingsdesign som genererer 5. romharmoniske komponent, og har en sakkingsfrekvens på rundt 0,9 %.

Referanser

- [1] J. Sørmealand, «Low-frequency power quality problems in distribution grid caused by pump station equipped with high voltage wound-rotor induction machines,» NTNU, Trondheim, 2015.
- [2] T. Kastet, «High voltage wound-rotor induction machines - harmonic field effects and power quality issues,» NTNU, Trondheim, 2015.
- [3] T. Toftevaag, A. Endegnanew, H. Seljeseth og R. Paulsen, «Resonansproblem i fordelingsnettet knyttet til kondensatorer for fasekompensering - målinger, simuleringer og analyser,» NEF Teknisk Møte, Trondheim, 2014.
- [4] I. Gunvaldsen, «Store Norske Leksikon,» 14 Februar 2009. [Internett]. Available: <https://snl.no/asynkronmaskin>. [Funnet 14 April 2016].
- [5] Wikipedia, «Wikipedia,» 29 September 2015. [Internett]. Available: <https://sv.wikipedia.org/wiki/Asynkronmotor>. [Funnet 14 April 2016].
- [6] D. Mathisen, «Konsekvenser av overharmoniske strømmer og spenninger fra elektronisk utstyr i lavspenningsanlegg,» NTNU, Trondheim, 2015.
- [7] K. Sand, «Spenningskvalitet - fenomen for fenomen,» SINTEF Energiforskning AS, 2008.
- [8] H.-C. Lin, «Sources, Effects, and Modelling of Interharmonics,» Hindawi, Chin-Yi, Taiwan, 2014.
- [9] Academo, «Academo,» [Internett]. Available: <https://academo.org/demos/wave-interference-beat-frequency/>. [Funnet 1 Mars 2016].
- [10] S. Djurovic, D. S. Vilchis-Rodriguez og K. Tshiloz, «Investigation of Harmonic Emissions in Wound Rotor Induction,» ResearchGate, Manchester, 2015.

- [11] S. Djurovic, D. S. Vilchis-Rodriguez og A. C. Smith, «Supply Induced Interharmonic Effects in Wound Rotor and Doubly-Fed Induction Generators,» IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION , Manchester, 2015.
- [12] R. Nilssen, Forfatter, *ELK-22 Design of electromagnetic devices*. [Performance]. NTNU, 2015.
- [13] COMSOL, «COMSOL,» 2016. [Internett]. Available: <https://www.comsol.no/comsol-multiphysics>. [Funnet 05 April 2016].
- [14] K. Bell, «Stor Norske Leksikon,» 02 Oktober 2009. [Internett]. Available: <https://snl.no/elementmetoden>. [Funnet 05 April 2016].
- [15] V. e.-L. Centre, «VTU e-Learning Centre,» [Internett]. Available: <http://elearning.vtu.ac.in/16/ENotes/Elec%20Mac%20Des/Unit6VH.pdf>. [Funnet 22 Oktober 2015].
- [16] R. G. Harley og Y. Duan, «Georgia Institute of Technology,» November 2009. [Internett]. Available: <http://publish.illinois.edu/grainger-ceme/files/2014/06/CEME1109HarleyGeorgiaTech.pdf>. [Funnet 22 Oktober 2015].
- [17] K. Vasudevan, P. S. Rao og G. S. Rao, «Indian Institute of Technology Madras,» Web Studio IIT Madras, 2 February 2007. [Internett]. Available: http://gndec.ac.in/~librarian/web%20courses/IIT-MADRAS/Elec_Mach2/Inductionmachines.pdf. [Funnet 22 October 2015].
- [18] B. Aslan, E. Semail, J. Korecki og J. Legranger, «Slot/pole Combinations Choice for Concentrated Multiphase Machines dedicated to Mild-Hybrid Applications,» 25 April 2013. [Internett]. Available: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00817636/document>. [Funnet 3 Mai 2016].
- [19] H. Seljeseth, *Estimation of Rapid Voltage Changes - Flicker (& rapid voltage change)*, Trondheim: SINTEF, 2015.
- [20] *Trefase asynkronmaskin*, 1999.

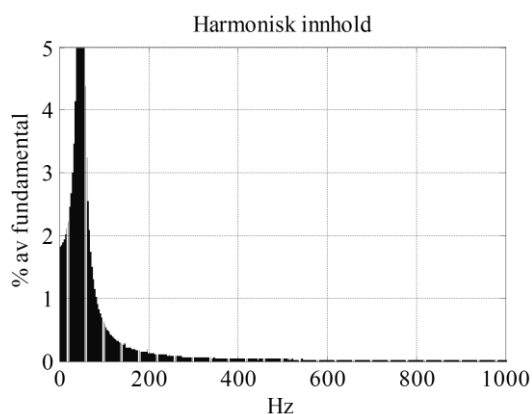
[21] R. Nilssen, *Hvordan lage strøm av vind?*, Trondheim: Robert Nilssen, 2013.

Vedlegg A: FFT-analyser av 8-polet asynkronmaskinmodell

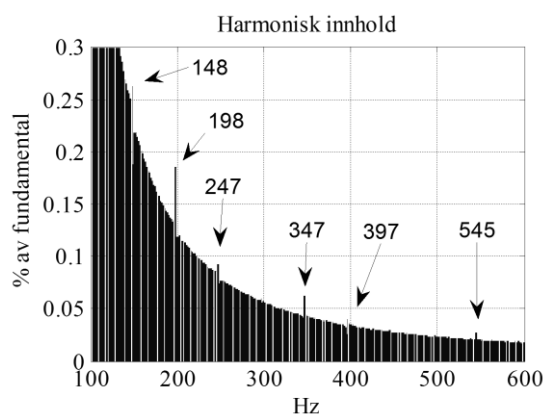
FFT-analyser ved spenningspåtrykk

Målinger av statorstrøm ved ideelt sinuspåtrykk

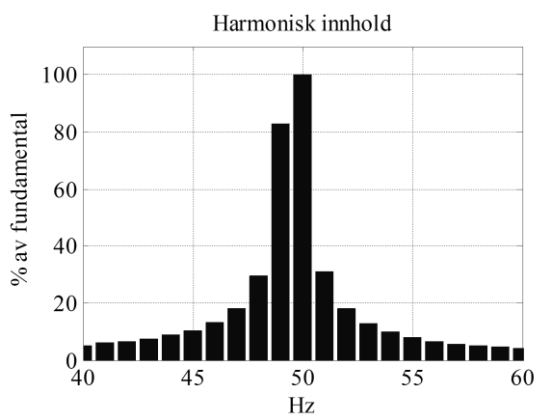
Figur 44-Figur 47 viser FFT-analyser av statorstrømmen i fase *a*. Utvalgte figurer stammer fra simulering med ideelt spenningspåtrykk, i henhold til Formel (12).



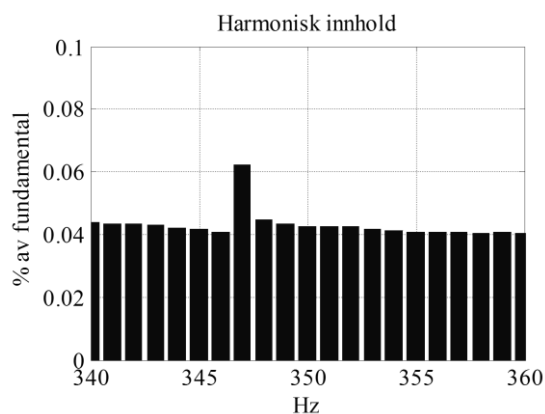
Figur 44: FFT-analyse av statorstrøm ved spenningspåtrykk



Figur 45: FFT-analyse av statorstrøm ved spenningspåtrykk med tekstpiler



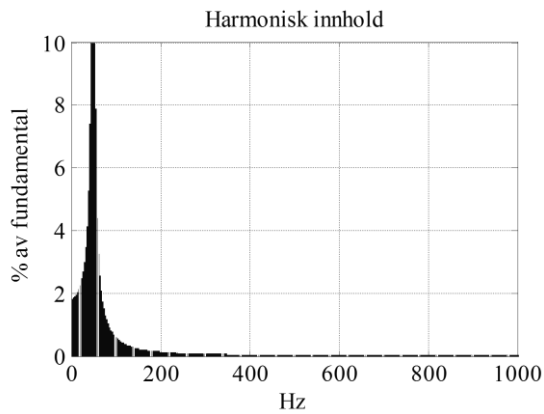
Figur 46: FFT-analyse av statorstrøm ved spenningspåtrykk innzoomet på grunnharmonisk



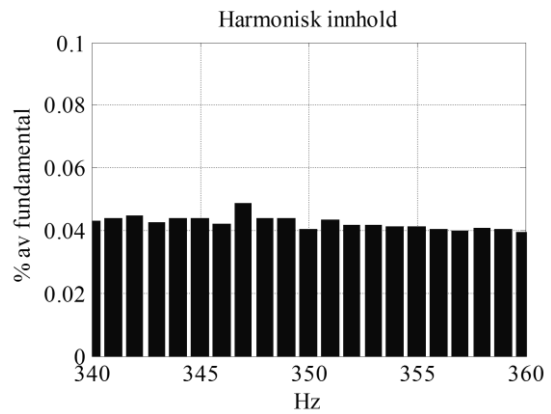
Figur 47: FFT-analyse av statorstrøm ved spenningspåtrykk innzoomet på 7. harm

Målinger av statorstrøm ved harmoniske komponenter i påtrykk

Figur 48 og Figur 49 viser FFT-analyser av statorstrømmen i fase *a*. Utvalgte figurer stammer fra simulering med spenningspåtrykk bestående av ideelt sinuspåtrykk samt 1 % 7. harmoniske komponent, i henhold til Formel (13).



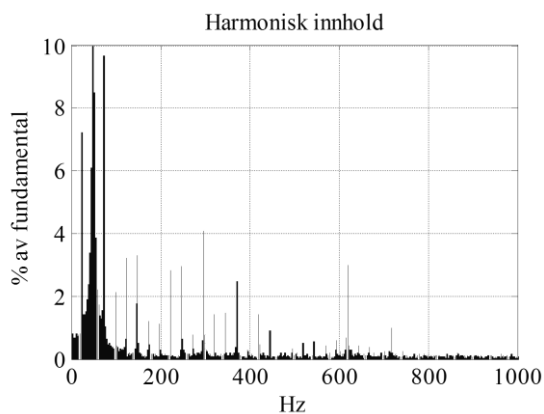
Figur 48: FFT-analyse av statorstrøm ved 1 % spenningspåtrykk av 7. harm



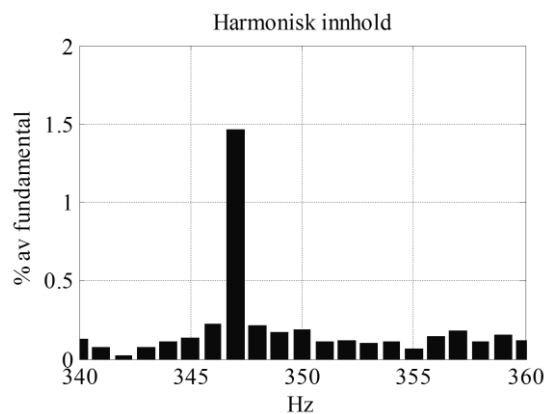
Figur 49: FFT-analyse av statorstrøm ved 1 % spenningspåtrykk av 7. harm innzoomet på 7. harm

Målinger av flukstetthet i luftgapet ved ideelt sinuspåtrykk

Figur 50 og Figur 51 viser FFT-analyser av flukstettheten i luftgapet. Utvalgte figurer stammer fra simulering med ideelt spenningspåtrykk, i henhold til Formel (12).



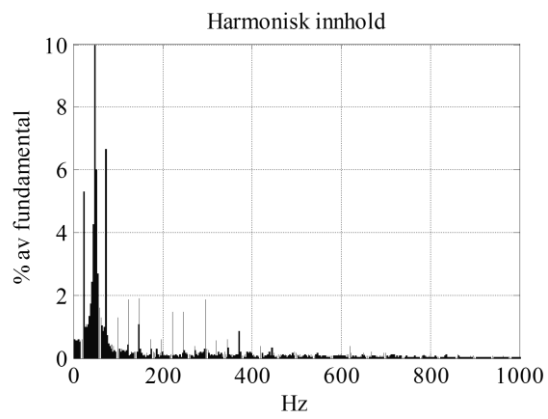
Figur 50: FFT-analyse av flukstetthet i luftgapet ved spenningspåtrykk



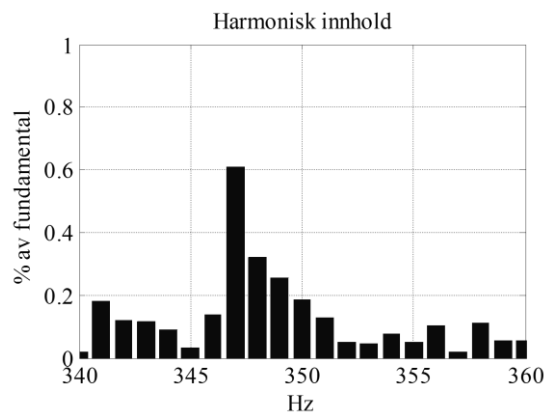
Figur 51: FFT-analyse av flukstetthet i luftgapet ved spenningspåtrykk innzoomet på 7. harm

Målinger av flukstetthet i luftgapet ved harmoniske komponenter i påtrykk

Figur 52 og Figur 53 viser FFT-analyser av flukstettheten i luftgapet. Utvalgte figurer stammer fra simulering med spenningspåtrykk bestående av ideelt sinuspåtrykk samt 1 % 7. harmoniske komponent, i henhold til Formel (13).



Figur 52: FFT-analyse av flukstetthet i luftgapet ved 1 % spenningspåtrykk av 7. harm

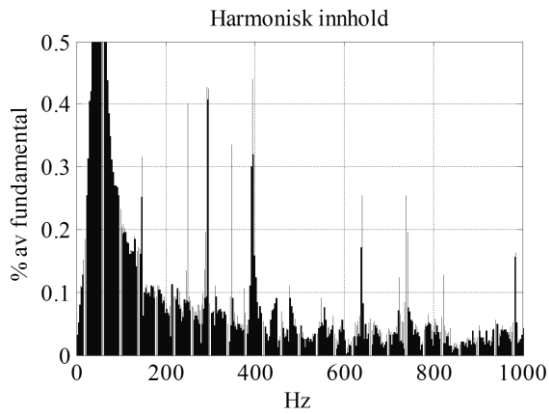


Figur 53: FFT-analyse av flukstetthet i luftgapet ved 1 % spenningspåtrykk av 7. harm innzoomet på 7.harm

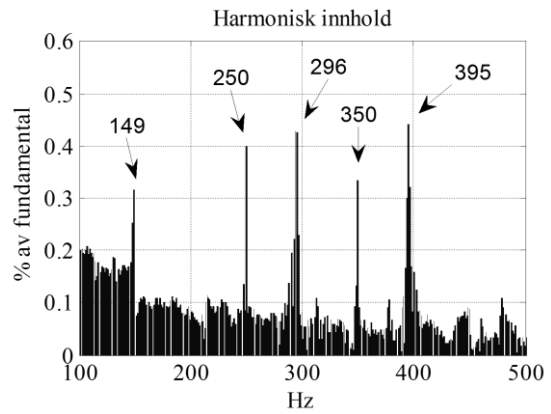
FFT-analyser ved strømpåtrykk

Målinger av statorspenning ved ideelt sinuspåtrykk

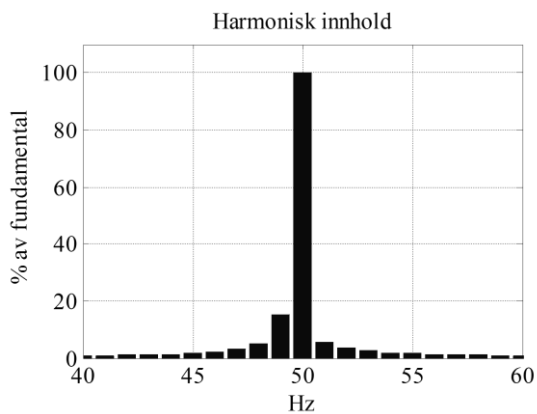
Figur 54-Figur 57 viser FFT-analyser av statorspenningen i fase *a*. Utvalgte figurer stammer fra simulering med ideelt strømpåtrykk, i henhold til Formel (12).



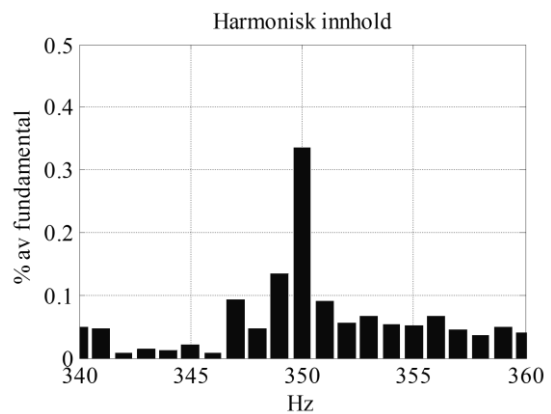
Figur 54: FFT-analyse av statorspenning ved strømpåtrykk



Figur 55: FFT-analyse av statorspenning ved strømpåtrykk med tekstpiler



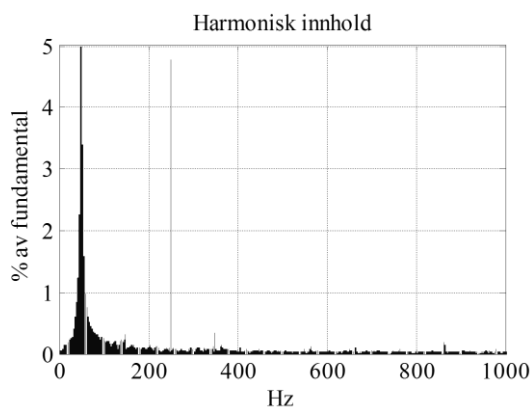
Figur 56: FFT-analyse av statorspenning ved strømpåtrykk innzoomet på grunnharmonisk



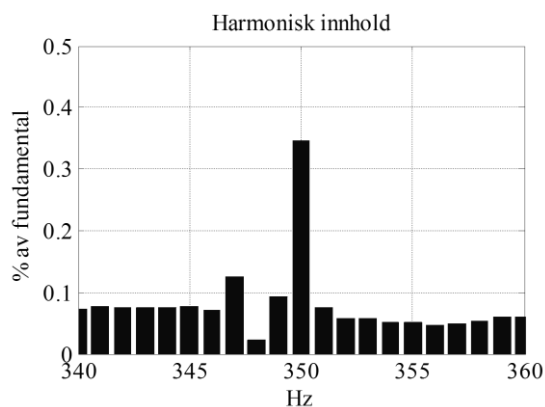
Figur 57: FFT-analyse av statorspenning ved strømpåtrykk innzoomet på 7. harm

Målinger av statorspenning ved harmoniske komponenter i påtrykk

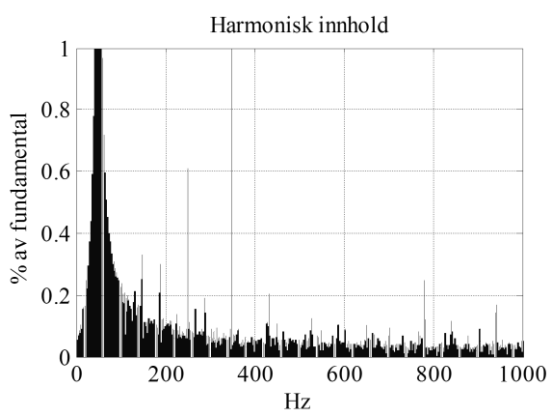
Figur 58-Figur 61 viser FFT-analyser av statorspenningen i fase *a*. Utvalgte figurer stammer fra simuleringer med ideelt sinuspåtrykk samt henholdsvis 1 % påtrykk av 5. harmoniske komponent, og 1 % påtrykk av 7. harmoniske komponent (se Formel (13)).



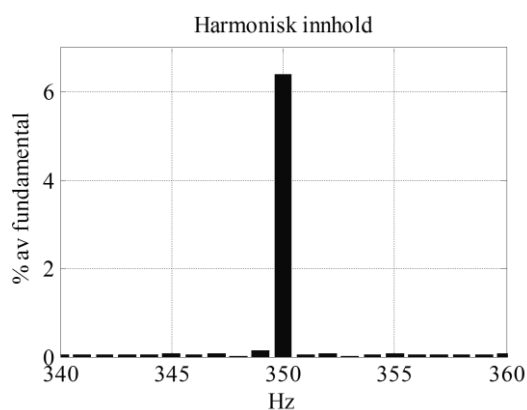
Figur 58: FFT-analyse av statorspenning ved 1 % strømpåtrykk av 5. harm



Figur 59: FFT-analyse av statorspenning ved 1 % strømpåtrykk av 5. harm innzoomet på 7.harm



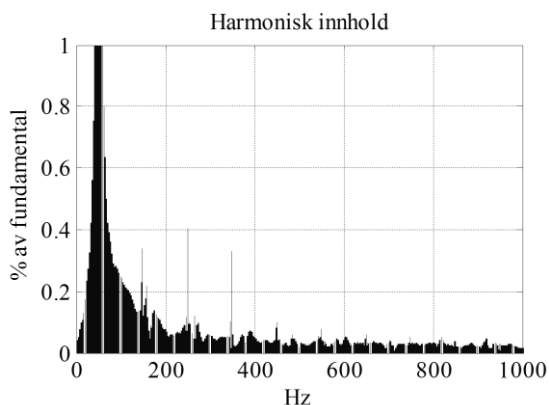
Figur 60: FFT-analyse av statorspenning ved 1 % strømpåtrykk av 7. harm



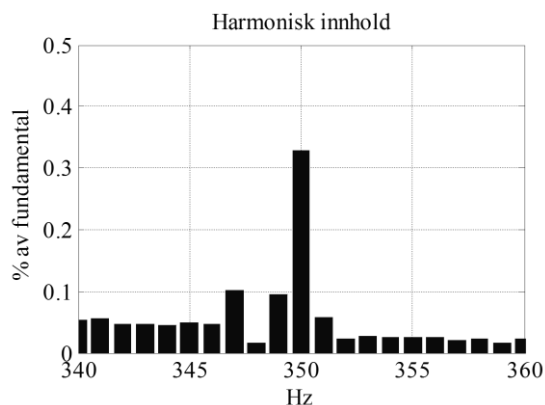
Figur 61: FFT-analyse av statorspenning ved 1 % strømpåtrykk av 7. harm innzoomet på 7. harm

Målinger av statorspenning ved ubalanse i påtrykk

Figur 62 og Figur 63 viser FFT-analyser av statorspenningen i fase *a*. Utvalgte figurer stammer fra simulering med $\pm 5\%$ amplitdepåtrykk i respektive fase *b* og *c* (se Formel (14)).



Figur 62: FFT-analyse av statorspenning ved 5 % ubalanse i strømpåtrykk



Figur 63: Zoomet FFT-analyse av statorspenning ved 5 % ubalanse i strømpåtrykk innzoomet på 7. harm

Vedlegg B: Beregning av ny sakkingsfrekvens

Målinger som er utført [3] viser at påtrykt effekt på motorene er lavere enn nominell verdi. Dette gjør at sakkingsfrekvensen også vil ha en lavere verdi enn nominell verdi. Sakkingsfrekvensen kan antas å være lineær langs stasjonært arbeidsområde, og kan regnes ut ved forholdet mellom effekt og sakkingsfrekvens. [20]

Maskinene i pumpestasjonen har følgende merkedata:

Tabell 12: Merkedata for asynkronmaskinene i den aktuelle pumpestasjonen

Put	1750 kW
n_r	742 r/min
V _{prim} (stjernekoblet)	6600 V
V _{sek} (stjernekoblet)	1695 V
I _{prim}	200 A
I _{sek}	623 A
Cos (φ)	0,79

Den nominelle inngangseffekten kan finnes med Formel (16):

$$P_{inn,N} = 3V_f I_f \cos \varphi = 3 * \frac{6600}{\sqrt{3}} * 200 * 0,79 \approx 1806 \text{ kW} \quad \text{Formel (16)}$$

Hvor $P_{inn,N}$ er nominell inngangseffekt, V_f er fasespenning i volt, I_f er fasestrøm i ampere, $\cos \varphi$ er fasevinkelen mellom spenning og strøm, og 3-tallet er for å inkludere bidraget fra alle tre fasene.

Nominell sakkingsfrekvens kan finnes ved Formel (17):

$$s_N = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{750 - 742}{750} = 1,067 \% \quad \text{Formel (17)}$$

Hvor s_N er nominell sakkingsfrekvens i prosent, n_s er statorfeltets synkron hastighet i r/min, og n_r er rotorens hastighet i r/min.

Statorfeltets hastighet kan finnes ved Formel (18):

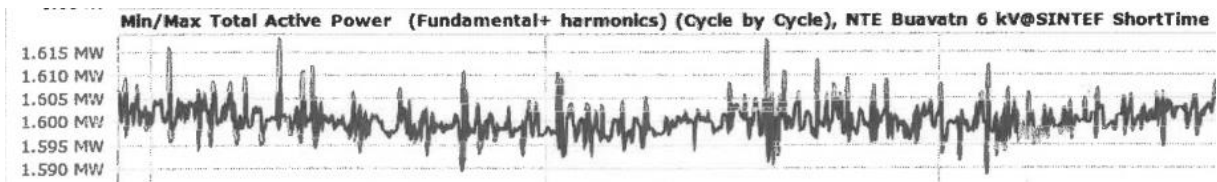
$$n_s = \frac{60f_s}{p} = \frac{60 * 50}{4} = 750 \text{ rpm} \quad \text{Formel (18)}$$

Hvor f_s er påtrykt frekvens i statorfeltet, p er antall polpar, og tallet 60 er for å gjøre frekvens om til runder per minutt.

Effekten inn på maskinen er 1600 kW (se Figur 64), ifølge målinger som er utført tidligere. Ny sakkingsfrekvens (Formel (20)) kan da regnes ut via den lineære sammenhengen i Formel (19):

$$\frac{s_{ny}}{s_N} = \frac{P_{inn,m\ddot{a}lt}}{P_{inn,N}} \quad \text{Formel (19)}$$

$$s_{ny} = \frac{P_{inn,m\ddot{a}lt}}{P_{inn,N}} * s_N = \frac{1600}{1806} * 1,067 = 0,945 \% \quad \text{Formel (20)}$$



Figur 64: Utsnitt av inngangseffekt på motor ved den aktuelle pumpestasjonen (måling utført 26.10.12 av NTE i samarbeid med SINTEF)

Vedlegg C: MATLAB-script for FFT-analyse

```
% Importere COMSOL-data
data=importdata('160408stator.txt');      % Importere COMSOL-fil
mag=data(1:length(data),2);              % Ta ut kun amplitudeverdier
%figure(); plot(mag)                      % Kontroll av plot

% Periode og antall sykluser
period=1/50;                               % Tid per periode
cycles=50;                                  % Antall rotasjonsrunder
time=period*cycles;                        % Total simuleringstid

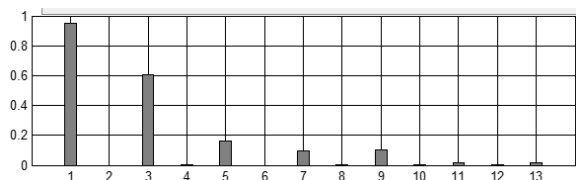
% FFT
harm=abs(fft(mag));                         % Kjør FFT, lagre absoluttverdi
harm=harm(1:length(harm)/2)*100/max(harm); % Ta ut første halvpart,
                                           % lagre verdiene som prosent
                                           % av høyeste verdi

% Tegn stolpediagram med hensyn til frekvens
hz_axis=(0:length(harm)-1)/(time);         % Gjør x-aksen til verdier i Hz
figure()                                   % Lag ny figur
bar(hz_axis, harm); grid;                  % Tegn stolpediagram
axis([0 800 0 max(harm*0.01)])            % Tilpass akser (visning)
xlabel('Hz','FontSize',12,'fontname','Times new roman')
ylabel('% av fundamental','FontSize',12,'fontname','Times new roman')
title('Harmonisk innhold','FontSize',12,'fontname','Times new roman')
set(gca,'fontsize',12,'fontname','Times new roman')
set(gcf,'position',[200 200 420 300])    % Juster vindusstørrelse
```

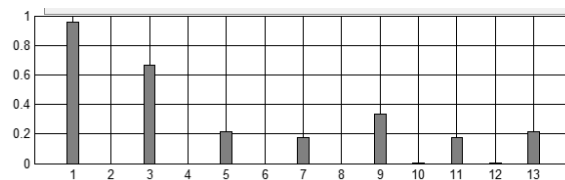

Vedlegg D: Spesifikasjoner for 4-polet asynkronmaskinmodell

f_s	50 Hz	Påtrykt frekvens i stator
m	3	Antall faser
n_s	1500 r/min	Synkron hastighet
s	3,0 %	Sakkingsfrekvens
p	2	Antall polpar
V_{prim}	400 V	Spenning på primærside
I_{prim}	50 A	Strøm på primærside
V_{sek}	133,33 V	Spenning på sekundærside
I_{sek}	150 A	Strøm på sekundærside
$\cos \varphi$	0,866	Fasevinkel mellom spenning og strøm
Q_s, Q_r	48, 36	Antall spor i stator/rotor
q_s, q_r	4, 3	Antall spor per pol per fase i stator/rotor
L_s, L_r	2, 1	Antall lag med viklinger i stator/rotor
k_s, k_r	1, 0	Antall spor skrittforkorting i stator/rotor
k_w	0.955	Viklingsfaktor
D	0,3 m	Rotordiameter
τ_{ss}	1,96	Statorens pol-lengde
L/D	0,65	Forhold mellom rotorlengde og -diameter
B_{av}	0,43 T	Gjennomsnittlig flukstetthet i luftgapet
ac	17 500 amp-cond/m	Spesifikk elektrisk last
δ	3,2 A/mm ²	Strøm-tetthet
N_s, N_r	93, 32	Viklinger per fase i stator/rotor
a_s, a_r	16 mm ² , 47 mm ²	Tverrsnitt på viklinger i stator/rotor

Viklingsdesignene for den 4-polte asynkronmaskinmodellen er kjørt gjennom program [12] for beregning av de romharmoniske komponentene, hvor resultatene ble som vist i Figur 65 for statorviklingene (per fase), og Figur 66 for rotorviklingene (per fase).



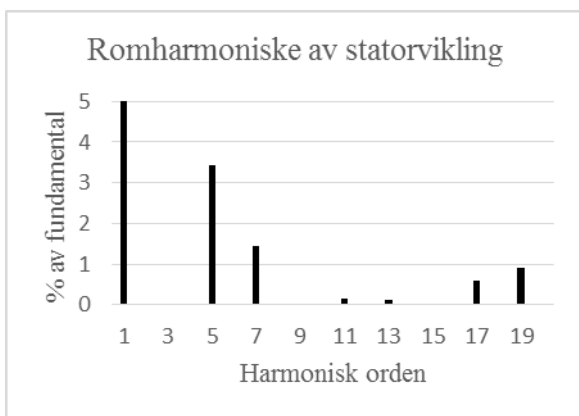
Figur 65: Romharmoniske komponenter for statorviklingene i 4-polet asynkronmaskinmodell [12]



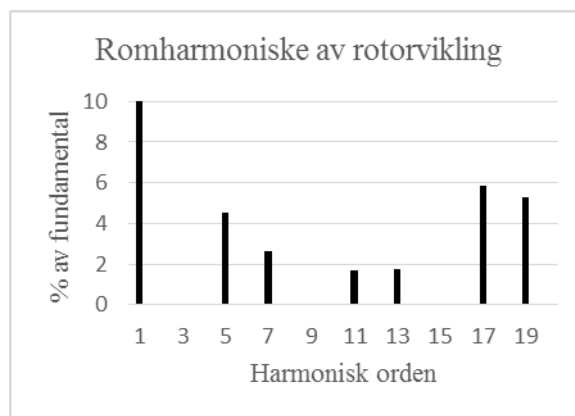
Figur 66: Romharmoniske komponenter for rotorviklingene i 4-polet asynkronmaskinmodell [12]

Figurene viser verdien for de respektive harmoniske komponentene i viklingenes magnetomotoriske kraft, hvor 1 på y-aksen tilsvarer 100 % av den totale magnetomotoriske kraften.

Den *totale* produksjonen av romharmoniske komponenter for stator- og rotorviklingene vises henholdsvis i Figur 67 og Figur 68.



Figur 67: Total romharmonisk produksjon for statorvikling (4-polet asynkronmaskinmodell)



Figur 68: Total romharmonisk produksjon for rotorvikling (4-polet asynkronmaskinmodell)

Figurene viser verdien for den respektive harmoniske ordenen på x-aksen, og tallene på y-aksen angir prosent av den fundamentale komponenten.