

Anvendelse av elektriske maskiner for økt kortslutningsytelse og redusert utløsningstid av vern i lavspent fordelingsnett

Martin Hantveit

Master of Science in Electric Power Engineering
Innlevert: juni 2018
Hovedveileder: Trond Toftevaag, IEL

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for elkraftteknikk

Problembeskrivelse

Et lavspent fordelingsnett med lang utstrekning kan ha høy impedans mellom innmatingspunkt og lastene. Som en konsekvens av dette kan det bli lav kortslutningsstrøm ved feil i nettet. Det er nødvendig at kortslutningsstrømmen er så høy at alle nødvendige vern løses ut dersom en feil oppstår. Samtidig skal forbrukere kunne trekke den lasten det er dimensjonert for uten at vern løses ut. I denne oppgaven analyseres virkningen av å tilknytte elektriske maskiner til nettet for å øke korslytningsytelsen i svake nett. Arbeidspunkter i denne oppgaven blir:

- Transient modell for aktuelle maskiner
- Innhente data for, og modellere lavspennings fordelingsnett med lav kortslutningsytelse, inkludert aktuelle vern
- Vurdere plassering av maskinene
- Simulere svakt nett med elektriske maskiner for økt kortslutningseffekt
- Å analysere effekter maskinene har i nettet, med hovedvekt på utløsning av vern
- Anbefalinger og konklusjon

Simuleringene utføres ved hjelp av PowerFactory 2018 produsert av DIGSILENT, eller tilsvarende program.

Sammendrag

Flere nett i Norge har lav kortslutningsytelse. Dette kan føre til treg utløsning av vern. Oppgaven ser på muligheten til å koble elektriske maskiner til lavspentnettet for å øke kortslutningsstrømmen og redusere utløsningstiden for vern. Det er blitt laget en modell i PowerFactory 2018 som brukes for å studere nettet. Denne tar utgangspunkt i et virkelig nett med lav kortslutningsytelse, levert av NTE Nett AS. Videre blir det utført RMS simuleringer for å studere effekten elektriske maskiner kan ha på utløsningstiden til vern, tilkoblet lavspent fordelingsnett.

I oppgaven blir funksjonen til smeltesikringer testet sammen med flere forskjellige typer maskiner. I nettet er det ved topolet kortslutning i lastpunktene de minste kortslutningsstrømmene oppstår, så det er ved feil i disse punktene hovedvekten av oppgaven er lagt på. Det blir testet å bruke en asynkronmaskin tilkoblet samme punkt som lavspentsiden av transformatoren i nettet. Ved feil i lastpunktene i nettet oppstår det i dette tilfellet for lite spenningsfall i maskinen til at den gir bidrag til feilstedet. Maskinen må tilkobles punkter i nettet som er nær lastpunktene dersom den skal bidra til redusert utløsningstid. Videre tyder resultatene på at både synkronmaskin og asynkronmaskin vil kunne redusere utløsningstiden for vern betraktelig. Basert på simuleringene vil begge maskintypene gi et stasjonært bidrag til feilstedet ved topolet kortslutning. Det er en stor fordel ettersom det er den feilen som gir lengst utløsningstid i utgangspunktet. Det blir vist i oppgaven at parametriseringen av maskinene har stor betydning for utløsningstiden til sikringene. Asynkronmaskin med høy startstrøm er testet, og den tyder på å føre til bedre effekt på vernene enn asynkronmaskin med lav startstrøm. Synkronmaskinen har vist bedre effekt ved bruk av AVR i de fleste tilfellene. En økning av ytelsen til maskinene har blitt vist å kunne føre til enda raskere utløsning av vern på grunn av det økte bidraget fra maskinen. Samtidig får strømmen kraftigere svingninger som en følge av dette, og kan

i enkelte tilfeller føre til tregere utløsning av vern. Med unntak av synkronmaskin med økt ytelse ser alle maskinløsningene ut til å føre til redusert utløsningstid for vern uavhengig av hvilke lastpunkt feilen oppstår i. Maskinene ser ut til å være en gunstig løsning for å forbedre vernenes funksjon, men valg av maskinløsning er avhengig av løsningens kostnad, og nettets utforming og behov.

Abstract

Several distribution networks in Norway have low short-circuit currents during two-phase faults. This can cause a slow triggering of the protection system in the network. This master's thesis will investigate the possibility to utilize electrical machines to increase fault current, to reduce the time between the fault and the disconnection of fuses. The thesis will be based on a grid delivered from NTE. Other grid companies have also stated that they have grids with similar problems. The grid has been reconstructed using PowerFactory 2018. The program has been used to perform RMS simulations to study the consequence of an electrical machine connected to the grid.

The time for disconnection of fuses will be tested with several types of machines. Two-phase faults near the load will give the lowest fault currents in the network, so these will be given the main focus in the task. A connection of an induction machine on the same bus as the low voltage side of the transformer has proven to be of no use when a fault happens at the loads. The machine needs to be placed closed to the loads, where the lowest fault currents appear. Furthermore, it is found that both synchronous machines and induction machines can reduce the time fuses use to disconnect faults by increasing the fault current. Both machines will cause a stationary contribution to the faulted location during two-phase faults, which is the fault in focus. It is shown in the thesis that the parametrization of the machines is of major importance to reduce the release time of fuses. The induction machine with high start current also contributes with a higher fault current which further reduces the release time. AVR has proved to increase the performance of synchronous machines in regard to increased fault contribution. By increasing the rated power of the machine, the fuses disconnected the fault faster in several cases. It can, however, cause larger oscillations of the current, which can increase the release time in

some cases. Except for synchronous machines with increased rated power, all the machine solutions seem to reduce the time for the fuses to disconnect the fault regardless of which load the fault occurs close to. All solutions can be beneficial, so the choice of solution depends of the cost and the grid design and needs.

Forord

Denne masteroppgaven er skrevet våren 2018 og er ikke basert på tidligere forprosjekt. Masteroppgaven teller 30 studiepoeng og er den avsluttende delen av det toårige masterprogrammet Electric Power Engineering ved NTNU. Oppgaven er startet etter at flere nettselskap har rapportert om lav kortslutningsytelse i lengre radialer langt fra nærmeste innmatingspunkt.

Jeg ønsker å takke veilederen min, Trond Toftevaag for mange innspill og gode råd gjennom hele semesteret. Videre vil jeg takke Razieh Nejati Fard for bidrag med PowerFactory. Jeg ønsker også å takke Rune Paulsen for informasjon om NTE sitt nett og veiledere som blir brukt av NTE. For korrekturlesing ønsker jeg å takke Lars Erik Pettersen, Tore Eirik Havnen Johansen, Lisbeth Hantveit og min samboer Ann Kristin Sjøflot.

Innholdsfortegnelse

Problembeskrivelse.....	i
Sammendrag	iii
Abstract.....	v
Forord	vii
Figurliste.....	xiii
Tabelliste	xvii
Ord- og symbolforklaring.....	xxi
1 Introduksjon	1
1.1 Bakgrunn.....	1
1.2 Mål med oppgaven.....	2
1.3 Arbeidsomfang.....	2
1.4 Begrensninger	2
1.5 Programvare.....	3
2 Teori.....	5
2.1 Nettsystem	5
2.1.1 Kobling av last	5
2.1.2 Feil i nettet.....	6
2.2 Krav til lavspennnett.....	7
2.3 Vern i lavspennnett	7
2.4 Elektriske maskiner.....	10
2.4.1 Synkronmaskin.....	11
2.4.2 Asynkronmaskin.....	14
2.5 Per unit system.....	20
3 Systembeskrivelse.....	21
3.1 Nettverket.....	21

3.2 Valg av simuleringsmetode.....	22
3.3 Modelling av stivt nett	26
3.4 Modelling av transformatoren	26
3.5 Modelling av linjene	27
3.6 Modelling av lastene.....	27
3.7 Modelling av feil.....	29
3.8 Modelling av asynkronmaskin.....	29
3.8.1 Valg av parameterverdi	30
3.9 Modelling av synkronmaskin	31
3.9.1 Valg av parameterverdi	31
3.9.2 AVR	32
3.10 Vern – beskrivelse og modell	34
3.10.1 Eksisterende vern	35
3.10.2 Nye sikringer	37
4 Resultater og analyser	41
4.1 Utgangspunktet	41
4.2 Bruk av asynkronmaskin AS1 tilkoblet nær trafo.....	44
4.3 AS1 koblet til B1	48
4.3.1 Maskinens bidrag til topolet kortslutning i lastpunkt.....	48
4.3.2 Topolet kortslutning i maskinens tilkobling B1	50
4.3.3 Samlet resultat ved topolet kortslutning.....	52
4.3.4 Resultat ved trepolet kortslutning i B1	53
4.4 AS1 koblet til andre radialer	54
4.4.1 Tilkobling av AS1 til radial C	54
4.4.2 Tilkobling av AS1 til radial A.....	55
4.4.3 Tilkobling av kondensatorbank sammen med AS1 i A4	57
4.5 AS1 koblet til A4, B1 og C3	58
4.6 Asynkronmaskin med større startstrøm	59
4.6.1 AS2 koblet til B1	60
4.6.2 AS2 koblet til hver radial	62
4.7 Bruk av synkronmaskin	63
4.7.1 Synkronmaskin (SM1) med konstant magnetisering	63
4.7.2 Synkronmaskin (SM1) med statisk magnetisering og AVR	70
4.7.3 Synkronmaskin (SM1) med børsteløs magnetisering og AVR.....	72
4.7.4 Synkronmaskin med høyere ytelse (SM2) uten AVR.....	73

5 Sammenligning og diskusjon.....	77
5.1 Maskiner tilkoblet én eller flere radialer.....	77
5.2 Sammenligning av ulike karakteristikk for asynkronmaskinene.....	78
5.3 Synkronmaskin eller asynkronmaskin	79
5.4 Sammenligning av testene med synkronmaskin	80
5.5 Sammenligning av alle maskinløsningene.....	82
6 Konklusjon.....	85
7 Videre arbeid	89
Bibliografi.....	91
Vedlegg A - Informasjon om nettet.....	94
Vedlegg B – Stivt nett	96
Vedlegg C – Transformatordata	97
Vedlegg D – Linje- og kabelparametere.....	98
Vedlegg E – Koblingen til maskinen.....	100
Vedlegg F – Data for maskiner.....	103
Vedlegg G – Sikringskarakteristikk	105
Vedlegg H – Kortslutningsstrøm i hele nettet basert på IEC 60909	107
Vedlegg I – AVR.....	109
Vedlegg J – Valg av sikringer	112

Figurliste

Figur 1: D-koblet last hvor én fase er koblet ut.....	6
Figur 2: P-Q diagram for synkronmaskin.....	12
Figur 3: Ekvivalentskjerma for asynkronmaskin med kortslutningsrotor i stasjonær tilstand.	14
Figur 4: P-Q karakteristikk for asynkronmaskin. Figuren er laget basert på figur for en spesifikk asynkronmaskin på 1MW fra [16].	15
Figur 5: Forenklet transient ekvivalent modell av asynkronmaskin.....	17
Figur 6: Modell for beregning av tidskonstant for asynkronmaskin. Figur til venstre viser beregning av tidskonstant ved åpen klemme. Til høyre viser kortslutning på klemmene.	18
Figur 7: Enlinjeskjema av nettet som blir modellert.	22
Figur 8: IEC 60909 beregning av kortslutningsstrømmer i alle nodene i nettet.	24
Figur 9: Illustrasjon av last ved lastflyt. Til venstre, deltakoblet. Til høyre, stjernekoblet med jordet nøytralepunkt [29].....	28
Figur 10: Kortslutningsstrøm fra maskinen AS1 ved trepolet kortslutning på klemmene.	30
Figur 11: Kortslutningsstrøm fra maskinen AS2 ved trepolet kortslutning på klemmene.	31
Figur 12: Sikringskarakteristikk basert på eksempelverdier. Rød linje gir smelting av sikring og grønn linje gir utløsning er vernet.	35
Figur 13: Strøm inn til feilen ved topolet kortslutning i L6. Grønn graf viser strøm gjennom vernet til radialen og rød graf viser strøm gjennom hengekabelen mellom B1 og B2 som fører til feilstedet.	37

Figur 14: Utløsning ved kortslutning etter inntakssikring.....	39
Figur 15: Enlinjediagram av nettet med sikringenes størrelse og posisjon.	40
Figur 16: Spenning på T(LS) ved topolet kortslutning i L1. Figuren til venstre viser spenningen uten maskin koblet til, og figuren til høyre viser spenningen med maskin koblet til i T(LS).	46
Figur 17: Aktiv og reaktiv effekt i maskinen AS1 ved tilkobling til T(LS) ved feil i L1.	47
Figur 18: Strøm gjennom hovedvern og lokalt vern ved topolet kortslutning mellom fase A og B i last L6. Strømmen gjennom fase A og fase B er tilnærmet likt gjennom det lokale vernet. Det går ingen strøm i fase C gjennom det lokale vernet.	49
Figur 19: Strøm i maskinen under topolet kortslutning i L6.	49
Figur 20: Aktiv og reaktiv effekt i asynkronmaskinen AS1 ved tilkobling i B1 og topolet kortslutning i L6.	50
Figur 21: Strøm gjennom radialens sikring ved topolet kortslutning i B1 med AS1 tilkoblet samme punkt.	51
Figur 22: Feilstrøm ved topolet kortslutning i B1 med AS1 tilkoblet samme punkt.	51
Figur 23: Kortslutningsstrømmen i feilstedet ved trepolet kortslutning i B1 med AS1 tilkoblet samme punkt.	53
Figur 24: Strøm gjennom sikringer ved topolet kortslutning i L6 og AS2 tilkoblet B1.	61
Figur 25: Strøm gjennom alle fasene i synkronmaskin SM1 uten AVR ved topolet kortslutning i L6. Maskinen er tilkoblet B1.	63
Figur 26: Aktiv og reaktiv effekt i maskinen ved topolet kortslutning i L6. Den øverste delen av figuren viser aktiv effekt og den nederste viser reaktiv effekt. Ved positiv verdi leverer maskinen effekt og med negativ vil maskinen trekke.	64
Figur 27: Strøm gjennom sikringer ved trepolet feil i L6. Den blå grafen viser strømmen gjennom sikringen til feilstedet, mens den røde grafen viser strømmen gjennom sikringen til radialen.	65
Figur 28: Polhjulsvinkelen til maskinen i feilsituasjon.	66
Figur 29: Strøm i nettet ved trepolet kortslutning i maskinens tilkobling. Øverste grafen viser total strøm til feilstedet. Grafene under viser bidrag fra nettet og bidrag fra maskinen med henholdsvis rød og grønn farge.	68
Figur 30: Hastigheten til maskinen ved feilsituasjon.	68
Figur 31: Aktiv og reaktiv effekt i maskinen ved topolet kortslutning i L6 ved statisk magnetisering. Øverste delen av figuren viser aktiv effekt og den nederste viser reaktiv	

effekt. Ved positiv verdi leverer maskinen effekt og med negativ vil den trekke effekt.	70
Figur 32: Strøm gjennom sikringene mot L8 etter en feil i L8, med statisk magnetisert SM1 med AVR EXAC4 tilkoblet hver radial.....	71
Figur 33: Aktiv og reaktiv effekt i maskinen ved topolet kortslutning i L6 ved børsteløs magnetisering. Øverste delen av figuren viser aktiv effekt og nederste viser reaktiv effekt. Ved positiv verdi leverer maskinen effekt og ved negativ trekker maskinen effekt.	72
Figur 34: Strøm gjennom alle fasene i synkronmaskin SM2 uten AVR ved topolet kortslutning i L6. Maskinen er tilkoblet B1.	74
Figur 35: Strøm gjennom sikringer og polhjulsinkelen til maskinen under feilsituasjon.	75
Figur 36: Data for fordelingstransformatorer [10].	97
Figur 37: Strøm gjennom motorklemme til D-koblet AS1.	100
Figur 38: Strøm gjennom motorklemme til Y-koblet AS1.	101
Figur 39: Strøm gjennom motorklemmene til D-koblet AS1 ved kortslutning på fase A og B.	101
Figur 40: Strøm gjennom motorklemmene til Y-koblet AS1 ved kortslutning på fase A og B.	102
Figur 41: Sikringskarakteristikk for simens sikring AK_3NA_1_690_GG_200A i PowerFactory.....	105
Figur 42: Sikringskarakteristikk for simens sikring AK_3NA_1_690_GG_125A i PowerFactory.....	106
Figur 43: Sikringskarakteristikk for simens sikring AK_3NA_1_690_GG_80A i PowerFactory.....	106
Figur 44: Blokkdiagram for EXAC4	109
Figur 45: Blokkdiagram for AVR AC8B uten PID begrensninger.	110

Tabelliste

Tabell 1: Minste kortslutningsstrøm [A] i forskjellige lastpunkter med forskjellige simuleringsmetoder.	25
Tabell 2: Liste med eksempelverdier for tid-strøm karakteristikk for eksempelsikring. 35	
Tabell 3: Utgangspunkt for sikringsstørrelser i nettet.	36
Tabell 4: Nye sikringer som blir brukt i nettet.	39
Tabell 5: Oversikt over brukte sikringsstørrelser med posisjon.	40
Tabell 6: Resultat av topolet feil i lastpunkt i nettet, uten maskiner tilkoblet.	42
Tabell 7: Resultat av topolet feil i A4, B1 og C3 uten maskiner tilkoblet.	42
Tabell 8: Resultat av trepolet feil i laster og i A4, B1 og C3 uten maskiner tilkoblet. ..	43
Tabell 9: Resultat av topolet kortslutning i lastene med maskin AS1 koblet til lavspentsiden av transformatoren.	45
Tabell 10: Resultat av topolet kortslutning i A4, B1 og C3 med maskin AS1 tilkoblet lavspentsiden av transformatoren.	45
Tabell 11: Resultat av feil i alle lastpunkter i nettet med AS1 tilkoblet B1.	52
Tabell 12: Resultat av feil i A4, B1 og C3 med AS1 tilkoblet B1.	52
Tabell 13: Resultat ved tilkobling av AS1 til C3, med feil i L1 og på laster i radial C. 54	
Tabell 14: Resultat ved tilkobling av AS1 til C3 med feil i A4, B1 og C3.	55
Tabell 15: Resultat av topolet kortslutning i lastpunkter på radial A, med AS1 tilkoblet A4,	56
Tabell 16: Resultat av feil på A4, ved maskinen AS1 tilkoblet feilstedet.	56
Tabell 17: Resultat av feil i hvert lastpunkt, ved AS1 koblet til hver radial.	58
Tabell 18: Resultat av feil i A4, B1 og C3, ved AS1 koblet til hver radial i feilstedet. .	59
Tabell 19: Resultat av topolet kortslutning i lastpunkt på radial B, med AS2 tilkoblet B1.	60

Tabell 20: Resultat av feil i B1, med AS2 tilkoblet feilstedet.....	60
Tabell 21: Resultat av feil ved hvert lastpunkt med AS2 tilkoblet hver radial.	62
Tabell 22: Resultat ved feil i A4, B1 og C3, med tilkobling av AS2 i hver radial.....	62
Tabell 23: Strøm gjennom vern nærmest feilen og utløsningstid til første vern som kobler ut. Det er ikke oppgitt strøm i tilfellene strømmen svinger for mye til å sette én verdi. 65	
Tabell 24: Tabell for strøm gjennom vern og utløsningstid ved topolet kortslutning i alle lastpunkt, med synkronmaskin med statisk magnetisering koblet til hver radial.....	71
Tabell 25: Tabell for strøm gjennom vern og utløsningstid ved topolet kortslutning i hvert lastpunkt, med synkronmaskin SM1 med børsteløs magnetisering koblet til hver radial.	73
Tabell 26: Tabell for strøm gjennom vern og utløsningstid ved topolet kortslutning i hvert lastpunkt, med synkronmaskin SM2 uten AVR koblet til hver radial.	74
Tabell 27: Sammenligning av utløsningstid avhengig av antall maskiner.	77
Tabell 28: Sammenligning av utløsningstid mellom AS1 og AS2 ved feil i laster.....	78
Tabell 29: Sammenligning av utløsningstid mellom AS1 og AS2 ved feil i tilkoblingspunkt.	79
Tabell 30: Utløsningstid avhengig av magnetisering av synkronmaskin, ved topolet kortslutning i lastpunkt.	80
Tabell 31: Strøm og utløsningstid for 80A smeltesikring ved forskjellige maskinløsninger ved topolet feil.	86
Tabell 32: Data for laster i nettet og flyt gjennom transformatoren, levert av nettselskap.	94
Tabell 33: Data om transformator levert av nettselskap.....	94
Tabell 34: Lastflyt i nettet og kabeltype med lengde og belastning, levert av nettselskap.	95
Tabell 35: Sikringsstørrelsene i nettet er levert av nettselskap.	95
Tabell 36: Verdier for stivt nett.	96
Tabell 37: Data for valg av luftledning for 230V. Kapasitanser er basert på vertikaloppheng uten jordline [10].	98
Tabell 38: Data for valg av hengeledning opptil 1kV [10].	99
Tabell 39: Data for PFSP-kabler med forskjellig tverrsnitt. Tåler opptil 1kV [10].	99
Tabell 40: Data for TFXP-kabler med forskjellig tverrsnitt. Tåler opptil 1kV [10].	99
Tabell 41: Maskindata for asynkronmaskinene brukt i oppgaven.....	103
Tabell 42: Maskindata for synkronmaskinene brukt i oppgaven.	104

Tabell 43: Kortslutningsstrøm ved største og minste feil i hver node på radial A, utregnet med IEC 60909.....	107
Tabell 44: Kortslutningsstrøm ved største og minste feil i hver node på radial B, utregnet med IEC 60909.....	108
Tabell 45: Kortslutningsstrøm ved største og minste feil i hver node på radial B, utregnet med IEC 60909.....	108
Tabell 46: Parameterverdier for AVR EXAC4.	110
Tabell 47: Parameterverdier for AVR AC8B.	111

Ord- og symbolforklaring

NTE	Nord-Trøndelag Elektrisitetsverk
AVR	Automatisk spenningsregulator
PSS	Kraftsystemstabilisator
Tran	Transient
Trafo	Transformator
AS	Asynkronmaskin
SM	Synkronmaskin
I_2	Største prøvestrøm ved beregning av vern
I_b	Belastningsstrøm for beregning av vern
I_z	Termisk grenselast for leder
I_N	Merkestrøm
V_N	Merkespenning
V_{as}	RMS fasespenning i stator, fase a
I_{as}	RMS strøm i stator, fase a
E_m	RMS for indre spenning. Representerer luftgap-fluksen
r_s	Statorresistans per fase
r_r	Rotorresistans per fase
X_{ls}	Lekkreaktansen for rotorviklingene per fase
X_{lr}	Lekkreaktansen for rotorviklingene per fase
X_m	Magnetiseringsreaktansen på statorsiden, per fase
s	Slip i per unit
H	Tregghetskonstant
T_M	Mekanisk starttid
$T_{M(P)}$	Mekanisk starttid referert til P
S	Tilsynelatende effekt

P	Aktiv effekt
Q	Reaktiv effekt
$\cos \varphi$	Effektfaktor
φ	Vinkel mellom strøm og spenning
δ	Polhjulsinkel

1 | Introduksjon

1.1 Bakgrunn

Dersom det elektriske nettet strekker seg langt fra nærmeste innmatingspunkt vil det typisk bli høy impedans i linjen til ytterpunktene i nettet og det vil oppstå lav strøm ved kortslutning i disse punktene. Det kan også oppstå store spenningsforskjeller utover i linjen ved lastendringer eller oppstart av elektriske motorer. Disse nettene blir omtalt som svake nett [1]. Når kortslutningsytelsen er lav kan det føre til treg utløsning, eller i noen tilfeller ingen utløsning av vern ved de laveste kortslutningsstrømmene som kan oppstå i nettet. Ved å benytte vern som bryter kretsen ved en lavere strøm kan vernet løse ut raskere laveste kortslutning, men det kan da oppstå tilfeller hvor vernet også løses ut ved høy belastningsstrøm. Dette gjør det nødvendig med en oppgradering av nettet. Linjer og kabler kan byttes ut til å få større tverrsnitt eller det kan bli lagt linjer og kabler parallelt med de eksisterende. Det vil føre til at strømmen har et større område å fordele seg på og motstanden vil bli mindre. Mindre motstand fører til at kortslutningsstrømmen blir større og spenningsvariasjonene vil bli mindre ved lastendringer. Å oppgradere linjer og kabler kan føre til store kostnader og omfattende arbeid for netteier.

Dette studiet skal se på muligheten for å bruke en elektrisk maskin som kjører kontinuerlig uten last, koblet til lavspentnett med lav kortslutningsytelse. Ved en feil skal maskinen levere en kortslutningsstrøm som skal føre til raskere utløsning av nødvendige vern. Strømmen som blir levert fra maskinen kommer fra den kinetiske energien i rotasjonen til maskinen. Dette må samtidig ikke føre til høye strømmer over så lang tid at linjer og annet utstyr blir ødelagt. Det må heller ikke ødelegge selektiviteten i nettet.

1.2 Mål med oppgaven

Målet med denne oppgaven er å evaluere om elektriske maskiner kan bli brukt til å bidra til raskere utløsning av vern i utkanten av svake nett. Dette må ikke gå på bekostning av selektivitet eller føre til ødeleggelse av linjer eller annet utstyr.

1.3 Arbeidsomfang

Arbeidsomfanget inkluderer følgende:

- Simulere et svakt nettverk hvor det er et problem at ikke laveste kortslutning slår ut nødvendige vern eller at vern kobler ut tregt.
- Vurdere plassering av elektriske maskiner
- Simulere effekten synkronmaskiner og asynkronmaskiner kan ha på utløsningstid tilkoblet lavspentnettet.
- Simulere effekten av en asynkronmaskin med høy startstrøm koblet til lavspentnettet.
- Simulere effekten av å bruke AVR til synkronmaskin.
- Simulere effekten av å øke ytelsen til en maskin
- Konkludere og anbefale maskinløsninger

1.4 Begrensninger

I dette prosjektet er følgende begrensninger gjort:

- Kostnad ved forskjellige alternativ er ikke betraktet i oppgaven.
- Oppgaven tar bare for seg feil i IT-nett.
- Maskinenes parameterverdier ble valgt for å gi økt kortslutningsytelse, men de er ikke blitt optimalisert.
- Oppgaven tar bare for seg kortslutninger uten motstand i feilen.

1.5 Programvare

DIgSILENT PowerFactory 2018 er blitt brukt til å modellere et svakt nett og for å foreta simuleringer av systemet med forskjellige løsninger. Nettet er basert på et svakt nett som er levert av NTE Nett AS.

Inkscape er blitt brukt til å tegne figurer. Alle figurer som ikke har referanse er hentet fra PowerFactory eller er laget i Inkscape.

2 | Teori

2.1 Nettsystem

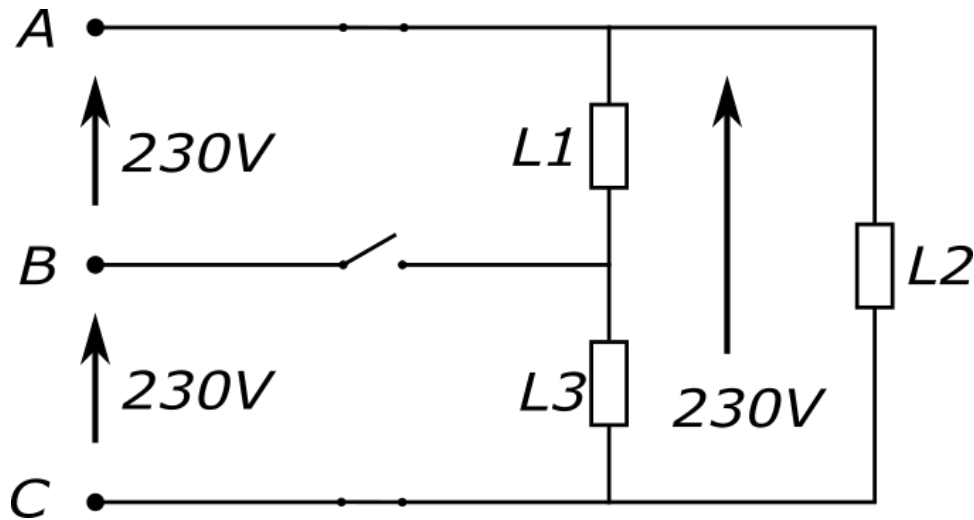
IT-system er det som er mest vanlig i Norge i dag, men ved nye utbygginger blir gjerne TN brukt. TT-nett er nett som har direkte jordet nøytralepunkt til transformatoren. Disse nettene oppstår når overspenningsvernet mellom nøytralepunkt til transformatoren i IT-nett blir ødelagt. Nettypen går da fra IT-nett til TT-nett, og siden TT-nett i utgangspunktet ikke er ønsket vil det ikke bli videre behandlet i oppgaven. IT-nett har 230V mellom de forskjellige fasene. I denne nettypen er alle spenningsførende deler isolert fra jord. Nøytralepunktet i transformatoren er ikke direkte koblet til jord, og det er heller ikke lastene i nettet. Den eneste veien for feilstrømmen er gjennom kapasitansen til nettet dersom en fase er kortsluttet mot jord (enpolet jordslutning). Dette fører til at en enpolet jordslutning gir svært lav feilstrøm i IT-nett. Nettet kan derfor driftes selv med en feil hvor en fase ligger mot jord dersom det er nødvendig [2].

I denne oppgaven blir IT-nett brukt. Dette blir gjort fordi lav kortslutningsytelse er vanligere i IT-nett enn i TN-nett [3], og fordi nettet som er levert av NTE er IT-nett.

2.1.1 Kobling av last

I IT-nett skal det ikke oppstå stor feilstrøm ved enpolet jordslutning. De fleste lastene skal ha 230V og det er derfor vanlig å koble lastene D-koblet i IT-nett. Det kan i enkelte tilfeller utføres Y-koblinger dersom det skal være koblet inn en 3-fase maskin som skal ha 133V over vindingene. Uansett må ikke nøytralepunktet i maskinen kobles til jord [4]. På grunn av dette vil alle lastene i nettet ha D-kobling.

Det kan oppstå spenningsproblemer dersom bare én fase kobles ut til en D-koblet last. I Figur 1 er det vist en D-koblet last hvor én fase er koblet ut.



Figur 1: D-koblet last hvor én fase er koblet ut.

Som vist i Figur 1 vil det være 230V mellom hver fase på venstre side, før bryterne. Før fase B bryter ligger det 230V over hver av lastene L1, L2 og L3. Etter fase B inn til lasten bryter, ligger det fortsatt 230V over L2. Det ligger imidlertid 230V fordelt over L1 og L3. Dersom disse lastene er lik, vil spenningen fordele seg likt over dem. Det oppstår da 115V over hver av de to lastene. Dette er ikke problem for glødelamper som bare vil avgi svakere lys, men det kan være et problem for elektronikk i for eksempel en datamaskin.

2.1.2 Feil i nettet

Siden nettet i oppgaven er IT-nett, og oppgaven fokuserer på vern mot kortslutninger, blir ikke jordfeil vurdert. Dersom det oppstår en feil hvor en fase ligger mot jord vil strømmen som går til dette feilstedet være minimal, som nevnt tidligere. Det er ikke krav til at denne type feil skal kobles ut ved første jordfeil i IT-nett, men tiltak må være iverksatt for å avdekke og fjerne slike feil innen rimelig tid [5]. Dette er det ikke smeltesikringen som skal ta seg av og det er derfor ikke et fokus i oppgaven. Det fokuseres på topolet kortslutning og trepolet kortslutning. Ved topolet kortslutning oppstår det forbindelse mellom to forskjellige faser. Denne feiltypen omtales som en usymmetrisk feil fordi fasene belastes forskjellig. Dette kan forårsake usymmetriske strømmer og spenninger i hele nettet. Trepolet feil er en forbindelse mellom alle tre fasene. Denne feiltypen omtales som en symmetrisk feil fordi alle fasene belastes likt [6].

2.2 Krav til lavspentnett

Forskrift om leveringskvalitet, FoL, fastsetter krav til nettselskapene/nettkonsesjonærene i Norge. Kravene gjelder alle som eier, drifter og bruker elektriske anlegg eller elektrisk utstyr tilknyttet det norske kraftsystemet [7]. Kravet til maksimalt avvik fra nominell spenning er 10% og står beskrevet i §3-3 i FoL [7]. Dette kravet kan nettselskapet overskride dersom det inngås en skriftlig avtale om det, og nettselskapet redegjør for hvilke konsekvenser dette vil føre til for kunden, ifølge FoL §1-3 [7]. Det er derfor mulig å ha mer enn 10% avvik i spenningen i lavspentnettet i enkelte tilfeller hvor det vil være store kostnader for nettselskapet å utbedre. Dette er gjerne tilfelle hvor lastene er langt fra nærmeste innmatingspunkt og hvor det er veldig få kunder spredd over et større område. Dersom spenningen hos kunden kan bli enda mindre enn 207V vil det kunne bli mer motstand mellom generator og last, og kortslutningsytelsen vil bli enda dårligere. Dette vil gjøre det enda mer aktuelt med en løsning for å få økt kortslutningsytelsen i nettet. I denne oppgaven blir det brukt 230V som nominell spenning på lavspentsiden, og kravet i FoL om maksimalt tillatt avvik fra nominell spenning på 10% er gjeldende. I oppgaven må spenningen hos forbrukere være minimum 207V og maksimalt 253V.

Det stilles ikke krav til utløsningstid i distribusjonsnettet i dag. Det stilles krav til maksimal gjennomsluppet energi som kan finnes i REN blad 9115 [8], men dette kravet er ikke et problem i nettet når kortslutningsstrømmen er så lav som de er. Ettersom kortslutningsstrømmen ved feil i lastpunktene er så lav vil vernet bruke lang tid på å koble ut feilstedet. Det blir derfor ikke vurdert maksimal gjennomsluppet energi i oppgaven, men hovedvekten blir lagt på reduksjon av utløsningstid. Sweco har gjort en samfunnsøkonomisk vurdering om det er lønnsomt å innføre krav for grenseverdier til kortslutningsstrøm. Konklusjonen ble at det ikke vil være samfunnsøkonomisk gunstig å stille slike krav om minste kortslutningsstrøm [3].

2.3 Vern i lavspentnett

For valg av vern i lavspentnett bruker NTE en veileder de selv har laget. Denne omhandler hvilke størrelser som skal brukes på sikringer, basert på hvilke kortslutningsstrømmer som kan oppstå i nettet. Dersom minste kortslutningsstrøm i nettet er mindre enn 500A

skal REN-blad 9115 bli brukt [9]. REN-blad 9115 omhandler vern i lavspentnett og gir to valg for vern i distribusjonsnettet, sikringer eller effektbryter [8]. Videre viser bladet til at det er viktig å bruke sikringstype gG, og at sikringer fra samme fabrikat blir brukt innenfor samme lavspentanlegg. I denne oppgaven er det valgt at sikringer fra Siemens skal bli brukt. Når det gjelder sikring av overlast er det to formler som skal overholdes. Den første er formel 2.1 [8].

$$I_b \leq I_n \leq I_z \quad (2.1)$$

Hvor I_b er belastningsstrømmen, I_n er vernets merkestrøm og I_z er den termiske grenselasten for ledningen. I_z er avhengig av ledertype, isolasjonstype, tverrsnitt på leder, forlegningsmåte og temperatur til omgivelser. Grense for temperatur og maksimal laststrøm er oppgitt av produsent, og i denne oppgaven er Sintef sin planleggingsbok for kraftnett [10] brukt for å finne denne dataen. Forlegningsmåte og temperatur til omgivelser har innvirkning på makslast for leder og må bli tatt hensyn til i virkeligheten. Ved å bruke korreksjonsfaktorer fra REN-blad 9115 kan en korrigere for dette. I denne oppgaven vil ikke dette bli gjort ettersom disse faktorene er uvisst.

Det er også et krav om at formel 2.2 blir overhold ved prosjektering av linjer [8].

$$I_2 \leq 1,45 \cdot I_z \quad (2.2)$$

Hvor I_2 er største prøvestrøm. Dette er strømmen som 100% sikkert skal slå ut sikringen innen en time. For smeltesikringer er I_2 lik $1,6 \cdot I_n$ [8]. Formel 2.2 kan derfor skrives om for smeltesikringer som vist i formel 2.3.

$$I_n \cdot 1,6 \leq 1,45 \cdot I_z \quad (2.3)$$

Disse formlene blir brukt ved dimensjonering av vern for å koble ut før ledningen blir ødelagt av overlast.

Alle linjer skal ha beskyttelse mot både kortslutningsstrømmer og overbelastning hvor en last kan ha mulighet til å dra mer strøm enn linjen tåler. I praksis er det vanlig at det blir benyttet et nytt vern i hvert punkt en linje endrer tverrsnitt, type leder eller isolasjonsmateriale [4]. Det skal også være selektivitet i nettet, slik at vernet som kobler ut feilen kobler ut minst mulig av resten av nettet. Dersom avgreining B skal sikres før hver ny leder vil hele avgreiningen trenge 11 sikringer fra transformatoren til og med

inntaket. Og dette er for bare tre laster. Det er ønskelig sikringen nærmest feilen kobler ut før andre sikringer begynner å smelte. For å unngå dette må det være forskjell i størrelsen på vernene, hvor vernene nærmest lasten er minst. Det vil bli vanskelig å oppnå selektivitet i dette nettet dersom det skal være en ny sikringsstørrelse for hvert bytte av kabel- og linjestørrelse. Så lenge alle deler av linjen blir sikret mot overlast og kortslutning er det innenfor kravene. Nettet er konstruert i PowerFactory slik at et nytt vern blir dimensjonert for hver linje eller kabel som ikke blir dekket av et overliggende vern. Det vil også i noen tilfeller bli satt inn en sikring for hver avgreining for at ikke en feil skal koble ut mange flere laster enn nødvendig. Det vil si at for avgreining B vil det være nødvendig med sikring mellom transformator og linjen til radialen, og sikring for begge avgreininger ut fra punkt B1. På denne måten blir alle linjer og kabler frem til inntakene sikret av smeltesikringer. Oversikt over nettets struktur med navn på alle punktene i nettet er vist i Figur 7.

Maks strøm hver last i nettet kan trekke er ikke oppgitt, men det er oppgitt størrelsen på inntakssikringen til flere av lastene. Det blir antatt at hver last kan trekke det inntakssikringen til lasten tillater. Linjene og kablene i dette lavspentnettet tåler alle en konstant last på med 95A eller mer. For avgreining B blir den delen som blir mest belastet (% i forhold maksimal kapasitet) linjen mellom B og B1 som tåler en laststrøm på maksimalt 220A. Ved maks last fra alle lastene i B samtidig, vil det gå 150A gjennom denne linjen. Sikringen som skal håndtere overlast og kortslutning for avgreining B må derfor tåle en belastningsstrøm, I_b , på 150A uten å løse ut. Vernets størrelse blir valgt ved å bruke formel 2.1 og formel 2.3.

$$150A \leq I_n \leq 220A$$

$$I_n \cdot 1,6 \leq 1,45 \cdot 220A$$

Dette gir følgende krav til I_n basert på formel 2.3:

$$I_n \leq 220A \cdot \frac{1,45}{1,6} = 199,4A$$

I_n lik 199,4A overholder også kravet i formel 2.1. Det nærmeste vernet som passer ifølge tabell 8 i REN-blad 9115 [8] og av Siemens utvalg i PowerFactory 2018 er 160A sikring.

Dette vernet klarer å koble ut overlast før linjen blir skadet. Det må fortsatt være sikring mot overlast for videre forgreninger som nevnt tidligere. Dette er nødvendig fordi andre ledninger nærmere lasten er dimensjonert for lavere strøm og tåler mindre. Det er også krav til vernet i forhold til kortslutningsstrømmer. Vernet skal tåle den maksimale kortslutningen på stedet og den skal bryte kortslutningen før etterfølgende vern og utstyr blir skadet [8].

2.4 Elektriske maskiner

Forskjellen på spenningen over klemmene til den elektriske maskinen V_{as} og den indre induerte spenningen E er gitt av strømmen som flyter inn til motoren og motstanden strømmen flyter gjennom. Dette gjør at den indre spenningen er lavere enn den på klemmene når den kjører som motor. Ved kortslutning i lavspentnett nær maskinen, vil spenningen i området falle. Rett etter feilen kan klemmespenningen på maskinen være lavere enn den indre spenningen produsert av bevegelsen til rotor i maskinen. Når feilen oppstår og spenningen på klemmene blir lavere enn den induerte spenningen vil den kinetiske energien i bevegelsen til rotor sørge for at maskinen generer strøm til nettet. Maskinen vil gå som generator i en periode. Bidraget fra maskinen er avhengig av type maskin og av parameterverdiene til maskinene [11].

Treghetsmomentet til en maskin avgjør hvor lang tid den bruker på å akselerere og retardere. En maskin sitt treghetsmoment er avhengig av størrelsen og vekten til rotor, og av eventuell last. En maskin med større treghetsmoment kan generere en jevnere kortslutningsstrøm når den leverer strøm i en feilsituasjon. Spenningen vil også bruke lengre tid på å stabilisere seg etter en feil dersom treghetsmomentet er større, og maskinen vil trenge lengre tid på å starte opp igjen dersom maskinen kobles ut. Dersom treghetsmomentet er for stort kan det føre til at oppstart av maskinen fører til utløsning av vern dersom startstrømmen er stor. Derfor må det gjøres en avveining av fordeler og ulemper når dette skal bestemmes for maskinen. Dersom det er ønskelig med et stort treghetsmoment og det fører til store kostnader å øke treghetsmomentet i maskinen, kan en koble til en last som et svinghjul med høyt treghetsmoment.

Det er vanlig å omtale treghetskonstanten (H-konstant) i sammenheng med treghetsmoment. Denne verdien beskriver hvor mye kinetisk energi maskinen har i rotasjonen ved nominell hastighet delt på nominell tilsynelatende effekt. H-konstanten kan regnes ut med følgende formel 2.4 [12].

$$H = \frac{0,5 \cdot J \cdot \omega_N^2}{S_N} \quad (2.4)$$

H-konstanten i formel 2.4 er relatert til S_N . I PowerFactory er det brukt mekanisk starttid relatert til P, $T_{M(P)}$. Formelen for konstanten er vist i formel 2.5 [12].

$$T_M = 2H \quad (2.5)$$

Fordi den er relatert til P_N er denne H-konstanten noe annerledes ettersom P_N erstatter S_N i formel 2.4. Tilsynelatende effekt kan regnes ut med formel 2.6 [13].

$$S_N = \frac{P_N}{\cos(\varphi_N)} \quad (2.6)$$

Hvor $\cos(\varphi_N)$ er effektfaktoren. Ettersom H-konstanten brukt i oppgaven er relatert til tilsynelatende effekt og PowerFactory bruker mekanisk starttid relatert til aktiv effekt, må formel 2.6 brukes sammen med formel 2.4 og formel 2.5. Dette gir formel 2.7 som brukes for å få T_M relatert til aktiv effekt.

$$T_{M(P)} = \frac{T_M}{\cos(\varphi_N)} = \frac{2H}{\cos(\varphi_N)} \quad (2.7)$$

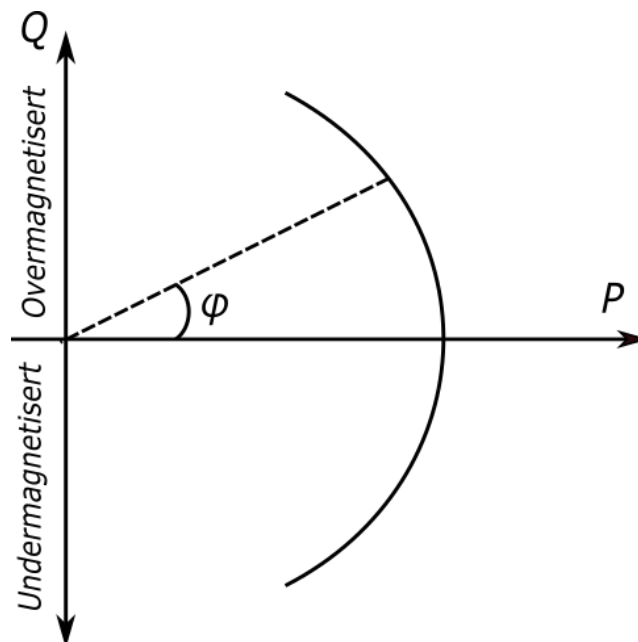
Formelen 2.7 kan brukes til å regne mekanisk starttid i PowerFactory fra H-konstanten.

2.4.1 Synkronmaskin

En synkronmaskin er en elektrisk maskin som er beregnet å gå synkront. Det vil si at rotor dreier like raskt som magnetfeltet i statorviklingene. Synkronmaskinen har et magnetfelt i den roterende delen (rotor), og viklinger som fører vekselstrøm i stator [13]. Rotoren kan være utstyrt med permanentmagnet eller elektromagnet. Permanentmagneter gir et konstant magnetfelt ut fra rotor, avhengig av lengden på magnetene og hvilken type metall som er brukt. Med elektromagnet blir rotor magnetisert ved at ledere er viklet flere runder rundt rotor og blir tilført likestrøm. Strømmen gjennom viklingene gjør at de produserer et magnetfelt. Retningen på magnetfeltet er bestemt av retningen på strømmen

og derfor også av hvordan lederne i rotor er viklet. Magnetiseringsstrømmen kan justeres automatisk avhengig av målte verdier med en automatisk spenningsregulator (AVR).

Synkronmaskinen kan levere og produsere reaktiv effekt når den er tilkoblet nettet, noe som kan gjøre synkronmaskinen gunstig i nettet av andre grunner enn økt kortslutningsytelse. Magnetiseringsstrømmen kan endres for maskinen slik at maskinen er undermagnetisert eller overmagnetisert. Dersom den er overmagnetisert vil den produsere reaktiv effekt, og dersom den er undermagnetisert vil den konsumere reaktiv effekt [12].



Figur 2: P-Q diagram for synkronmaskin.

Figur 2 viser hvordan effektfaktoren bestemmer reaktiv effekt i maskinen. Halvsirkelen viser begrensningen av tilsynelatende effekt, S_N i maskinen. Dersom maskinen for eksempel produserer mye reaktiv effekt kan den ikke levere maksimal aktiv effekt samtidig på grunn av begrensningen av tilsynelatende effekt. En AVR styrer magnetiseringen av maskinen og kan bestemme hvor mye reaktiv effekt maskinen skal produsere eller konsumere.

2.4.1.1 AVR

Synkronmaskinen kan ha en varierende magnetisering av rotor ved bruk av en AVR. De mest brukte regulatorne for nye anlegg er statisk magnetisering og børsteløs magnetisering. Ved børsteløs magnetisering vil magnetiseringen komme fra en mindre maskin på rotorakslingen. Denne kan bli forklart som en «vrent synkronmaskin». Maskinen som leverer magnetisering har feltviklingene sine i stator og armaturviklingene på rotorakslingen. Det trengs ikke børster fordi armaturvindingene som leverer magnetiseringsstrøm roterer på samme aksling som maskinen den magnetiserer. Den tilfører magnetisering gjennom en likeretter som også befinner seg på akslingen. Magnetiseringsbidraget fra denne maskinen kan justeres ved at en AVR endrer på magnetiseringen til magnetiseringsmaskinen. Siden den har feltviklingene i stator, trengs det ikke børster og sleperinger for å magnetisere den. Det vil i dette tilfellet introduseres en ny tidskonstant og denne metoden vil derfor kunne føre til tregere reaksjon av magnetisering [14]. Ved statisk magnetisering leveres magnetiseringsstrøm fra en statisk kilde. Denne kan styres med en AVR og magnetiseringsstrømmen må overføres med børster og sleperinger. En ulempe med denne magnetiseringstypen er at børster og sleperinger fører til mer vedlikehold ettersom disse delene blir slitt raskere enn andre deler i maskinen [12].

En fordel med AVR er at den kan styre hvor mye reaktiv effekt maskinen forbruker eller leverer til nettet. Dette kan være en fordel i nett hvor det er mangel på eller overskudd av reaktiv effekt, men det er ikke hovedfokus i oppgaven. Den kan også brukes til å øke korslutningsbidraget fra maskinen, noe som vil være veldig aktuelt i denne oppgaven. Dersom det skjer en feil nær maskinen vil spenningen på klemmene falle. Regulatoren måler denne spenningen kontinuerlig og dersom spenningen går utenfor en gitt verdi vil den endre magnetiseringen av maskinen slik at spenningen øker. Dette kan føre til at strømmen fra maskinen øker. En annen konsekvens av AVR kan være at ved en rask og stor endring i nettet kan den påvirke dempingen av strømmen negativt. Magnetiseringsstrømmen som regulatoren leverer kan føre til at strømmen svinger med en frekvens på typisk 0,1Hz til 3Hz. Dette kan begrenses eller kanskje elimineres med en kraftsystemstabilisator (PSS) [15].

2.4.1.2 Synkronmaskinens reaktans

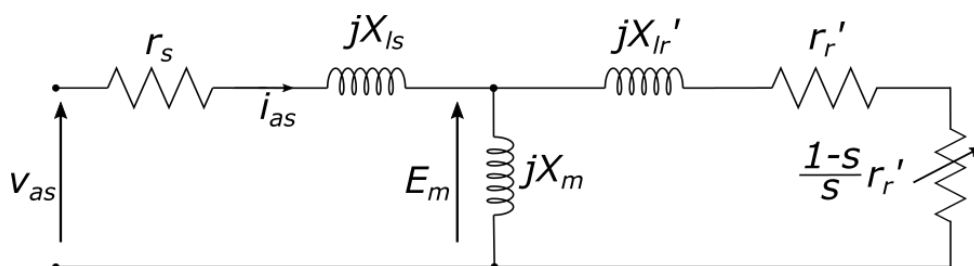
Synkronmaskinen sitt subtransiente, transiente og stasjonære bidrag er avhengig av henholdsvis subtransient, transient og stasjonær reaktans for maskinen. Disse verdiene endrer seg fordi veien til statorfluksen forandrer seg med tiden ved en endring i maskinen. Verdien for subtransient reaktans er den minste av de tre og stasjonær reaktans er den største [11]. Dette fører til at maskinen leverer høyeste strøm i subtransient tilfelle hvor impedansen mellom induisert spenning og klemmene er lavest. Viser til Machowski [11] for figurer og videre forklaring av reaktansene i synkronmaskinen.

2.4.1.3 Polhjulsstabilitet

Dersom det oppstår en stor endring i nettet vil polhjulsvinkelen til synkronmaskinen forandre seg. Dette kan innebære endring av store laster, for eksempel utkobling av linjer eller kortslutninger. Polhjulsvinkelen vil svinge seg inn mot en ny vinkel hvor den vil stabilisere seg dersom en stor endring i nettet oppstår, så lenge maskinen kjører stabilt. Dersom endringen er for stor kan maskinen komme ut av fase, og polhjulsvinkelen vil da ikke stabilisere seg på et nytt punkt. En kortslutning i nettet kan få maskinen til å gå ut av fase, og strømmen fra maskinen kan i dette tilfelle oscillere sammen med polhjulsvinkelen [12].

2.4.2 Asynkronmaskin

Det blir ofte brukt et ekvivalentskjema som vist i Figur 3 for å representere en trefase asynkronmaskin med kortslutningsrotor i stasjonær tilstand. I denne modellen for asynkronmaskiner er resistensen som representerer tap ved magnetisering neglisjert.

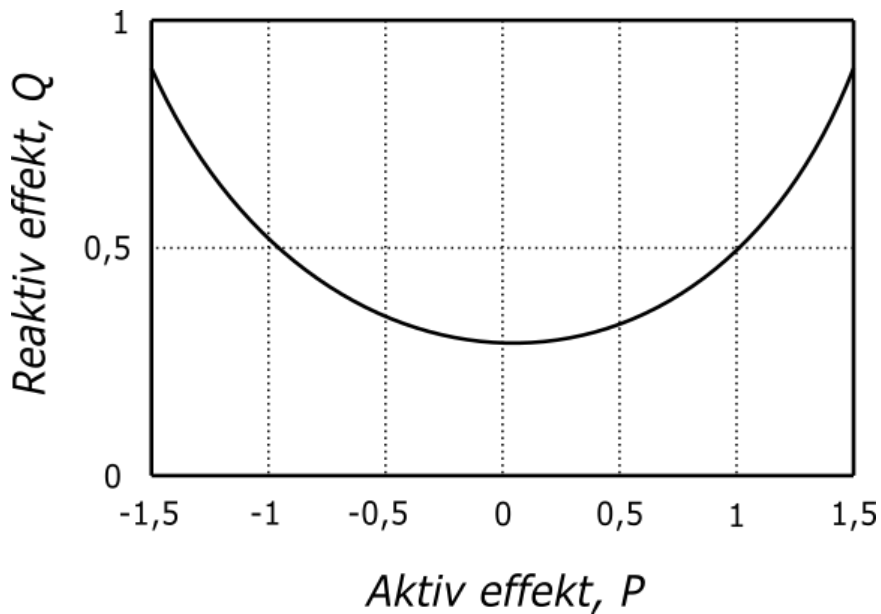


Figur 3: Ekvivalentskjema for asynkronmaskin med kortslutningsrotor i stasjonær tilstand.

Symbolene er forklart i «Ord- og Symbolforklaring» i starten av oppgaven. Merkingen «'» viser til at verdien er referert til statorsiden. Her er «slip» definert i formel 2.8.

$$s = \frac{\omega_e - \omega_r}{\omega_e} \quad (2.8)$$

Hvor ω_r er vinkelhastigheten til rotoren i radianer per sekund. Og ω_e er vinkelhastigheten til statoren sin mmf i elektriske radianer per sekund ($\omega_e = 2\pi f_e$). f_e er frekvensen til nettet som er koblet til maskinen. Dette blir da frekvensen av feltet som roterer i stator til maskinen.



Figur 4: P-Q karakteristik for asynkronmaskin. Figuren er laget basert på figur for en spesifikk asynkronmaskin på 1MW fra [16].

I denne oppgaven skal maskinen bare kjøre på tomgang i normal drift. Figur 4 viser P-Q diagrammet for en spesifikk asynkronmaskin på 1MW. Forholdet mellom aktiv og reaktiv effekt vil ikke være helt likt for asynkronmaskinene i denne oppgaven, men det viser hvordan størrelsen på den reaktive effekten endrer seg med effekten maskinen forbruker eller genererer. I denne oppgaven skal maskinen bli brukt som motor uten last i normale tilfeller, men Figur 4 viser hvordan maskinen fortsatt trekker reaktiv effekt uten last.

2.4.2.1 Forenklet transient modell

Det som er av størst interesse er når det oppstår en kortslutning i nettet og maskinen får lavere spenning på klemmene. Dette vil vare i en kort, transient periode. Det skal derfor bli laget en forenklet transient modell. Ved å lage denne forenklete modellen blir et antatt at rotorviklingenes fluks linkage holder seg konstant i en kort periode når det oppstår en transient hendelse. Dette er en grei antakelse å gjøre for raske forløp, fordi tidskonstanten for rotorviklingenes fluks linkage ofte er høy.

I utledningen antas det at asynkronmaskinen er en ideell maskin med symmetrisk luftgap. Ligningene er utledet i synkront roterende qd0 referanseramme med rotasjonshastighet lik ω_e . q-aksen er antatt å være 90 grader foran d-aksen, så ligningene for fluks linkage for stator og rotor kan bli skrevet på følgende måte:

$$\lambda_{qs}^e = L_s i_{qs}^e + L_m i_{qr}'^e \quad (2.9)$$

$$\lambda_{ds}^e = L_s i_{ds}^e + L_m i_{dr}'^e \quad (2.10)$$

$$\lambda_{qr}'^e = L_r' i_{qr}'^e + L_m i_{qs}^e \quad (2.11)$$

$$\lambda_{dr}'^e = L_r' i_{dr}'^e + L_m i_{ds}^e \quad (2.12)$$

Med:

$$L_s = L_{ls} + L_m \quad (2.13)$$

$$L_r' = L_{lr}' + L_m \quad (2.14)$$

Hvor:

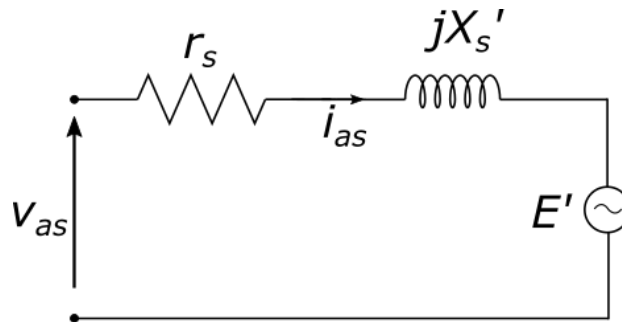
L_{ls} er lekkinduktansen for statorviklingene per fase.

L_{lr}' er lekkinduktansen for rotorviklingene per fase.

L_m er magnetiseringsinduktansen på statorsiden.

Basert på utledninger fra Ong [17], Kundur [12] og Pavella [18] kan dette forenkles til en transient modell for asynkronmaskiner. Dette er gjort i notatet «Induction machine – transient model» [19]. I forenklingen er DC-komponenten til statorens transiente strømmer neglisjert. Dette er vanlig å gjøre i system stabilitetsstudier [12], og kan gjøres

i dette tilfellet fordi det er RMS strøm ute i nettet som er av interesse for dimensjonering av vern. Ved å utføre disse forenklingene kan det bli brukt en forenklet modell for transient forløp i asynkronmaskinen som vist av Figur 5:



Figur 5: Forenklet transient ekvivalent modell av asynkronmaskin.

Hvor jX_s' er transient induktanse til stator og blir beskrevet som

$$jX_s' = \omega_e \cdot L_s' \quad (2.15)$$

Og hvor

$$L_s' = L_s - \frac{L_m^2}{L_{lr}'} = L_{ls} + \frac{L_m L_{lr}'}{L_m + L_{lr}'} \quad (2.16)$$

Formen 2.15 og formel 2.16 fører til følgende formel som også kan finnes i Ong [17]:

$$X_s' = X_{ls} + X_m - \frac{X_m^2}{X_{lr}' + X_m} = X_{ls} + \frac{X_{lr}' X_m}{X_{lr}' + X_m} \quad (2.17)$$

E' er spenningen bak stator transient induktanse og kan regnes ut basert på:

$$\bar{E}' = \bar{V}_{as0} - (r_s + jX_s')\bar{I}_{as0} \quad (2.18)$$

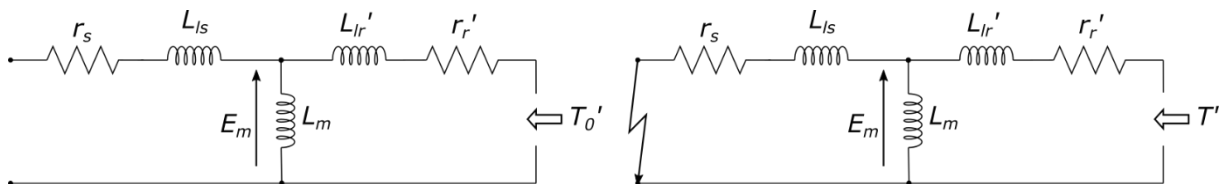
Hvor \bar{V}_{as0} og \bar{I}_{as0} er henholdsvis spenningen og strømmen rett før feilen. Det vil si at når det oppstår en feil, vil spenningen som er kilden til feilstømmen fra maskinen være mindre enn klemmespenningen på maskinen før feilen. Hvor mye mindre spenningen blir er avhengig av hvor stor tomgangsstrøm som går i maskinen ved vanlig situasjon. En asynkronmaskin vil trekke strøm fordi den trekker reaktiv effekt magnetisering, selv i tomgang. Dette er vist i Figur 4.

Før feilen, kjører motoren vanlig. Ved feil faller spenningen på bussene i nettet og spenningen på motorklemmene vil derfor også falle. Før feilen har strømmen i stator induisert en fluks i rotor, som skaper et moment i rotor. Basert på loven om konstant fluks linkage og basert på prinsippet om bevaring av energi kan ikke fluks i en lukket vikling endre seg momentant [11]. Det vil dermed bli låst en fluks i rotor når spenningen på motorklemmene forsvinner. Dersom klemmespenningen går til null, vil strømbidraget fra maskinen gå mot null [20]. Etter feilen vil fluksen som er låst til rotor forsvinne med en tidskonstant som er avhengig av impedansen i maskinen og til feilen. Når tiden etter feilen er lik tidskonstanten vil fluksen være redusert til 37% av fluksen før feilen [21]. Fluksen i rotor, sammen med rotor som fortsatt beveger seg like raskt som rett før feilen, vil induisere en spenning i statorleddene. Det er nå asynkronmaskinen vil fungere som generator i en kort periode mens den har fluks i rotor, og vil mate strøm til feilstedet. Indusert spenning fra rotor vil ved åpen klemme ha en funksjon lik den i formel 2.19.

$$\bar{E}'(t) = \bar{E}'(0)e^{-\frac{t}{T_0'}} \quad (2.19)$$

Hvor feilen skjer ved $t=0$ og T_0' er tidskonstanten for åpen motorkrets. Ved kortslutning av klemmene brukes tidskonstanten for kortslutning isteden.

Basert på modellen for asynkronmaskin i stasjonær tilstand kan tidskonstanten til maskinen beregnes. Tidskonstant for åpen motorkrets (T_0') kan beregnes ved å bruke modellen med åpen klemme. Tidskonstanten for kortslutning på klemmene, T' , beregnes fra samme krets, hvor det oppstår kortslutning på klemmene. Figur 6 viser kretsen som blir brukt for å beregne tidskonstanten.



Figur 6: Modell for beregning av tidskonstant for asynkronmaskin. Figur til venstre viser beregning av tidskonstant ved åpen klemme. Til høyre viser kortslutning på klemmene.

Fluksen i rotoren vil avta med en tidskonstant som er avhengig av forholdet L/R sett fra rotor [17]. Tidskonstanten kan derfor regnes ut basert på Figur 6. Formel 2.20 viser tidskonstant for åpen klemme på maskinen.

$$T'_0 = \frac{L'_{lr} + L_m}{r'_r} \quad (2.20)$$

Tidskonstanten for kortsluttet krets blir gitt av formel 2.21.

$$T' = \left(L'_{lr} + \frac{L_{ls}L_m}{L_{ls} + L_m} \right) \frac{1}{r'_r} \quad (2.21)$$

Oppgaven baserer seg på at det oppstår feil i lavspentnettet og det vil derfor være motstand i kabler eller linjer som tidskonstanten blir avhengig av ved feil ute i nettet. Tidskonstantene som blir beregnet i formel 2.20 og formel 2.21 kan brukes sammen med formel 2.19 for å finne ut hvor lenge maskinen beholder spenningen dersom den blir koblet fra nettet, eller dersom det oppstår kortslutning på motorklemmene.

En asynkronmaskin som kjører uten last vil forbruke reaktiv effekt. Dette fører til en økt strøm som går i nettet dersom det er et nett som i utgangspunktet ikke har overskudd av reaktiv effekt. Det vil derfor bli mye ekstra tap som følge av økt strøm i nettet i normal lastsituasjon dersom en asynkronmaskin blir satt inn. For å kompensere for den reaktive effekten som skal leveres til asynkronmaskinen kan det bli benyttet kondensatorbanker i nettet. Disse vil kunne levere reaktiv effekt til asynkronmaskinen og det vil derfor bli trukket en lavere strøm fra nettet.

2.4.2.2 Kondensatorbank

En kondensatorbank vil kunne levere reaktiv effekt dersom det er behov for det i nettet. Ettersom asynkronmaskinen trekker reaktiv effekt, kan det være ønskelig at kondensatorer leverer den reaktive effekten så strømmen maskinen trekker fra nettet blir redusert. I oppgaven blir shunt kondensatorer presentert som et alternativ for å levere reaktiv effekt til maskinen. Under oppstart vil asynkronmaskinen trekke betydelig mye mer reaktiv effekt enn når den går uten last. Dette kan også leveres av en kondensatorbank. I dette tilfellet må kondensatorbanken kobles helt eller delvis ut etter oppstart for å unngå å levere mer reaktiv effekt enn maskinen trenger. En mulighet kan være å koble ut deler av kondensatorbanken etter maskinen har startet opp for å begrense strømmen fra nettet under oppstart og for å fortsatt kompensere for den reaktive effekten til maskinen i tomgang [12].

2.5 Per unit system

For å forenkle beregningene i et stort system kan det være gunstig å bruke per unit. Ved å bruke dette prinsippet kan en transformere alle verdier til en felles benevning, slik at en ikke trenger å ta hensyn til de forskjellige spenningsnivåene i nettet til enhver tid. Det er også vanlig at flere parameterverdier for elektriske maskiner er oppgitt i per unit. Siden oppgaven ser på lavspentnett med maskiner tilkoblet blir det brukt per unit verdier. Per unit verdier blir regnet ut som vist i formel 2.22 [12].

$$\text{Per unit verdi} = \frac{\text{Faktisk verdi}}{\text{Baseverdi}} \quad (2.22)$$

For elektriske maskiner er det vanlig å bruke den nominelle spenningen og effekten til maskinen som baseverdi. Andre baseverdier regnes ut basert på baseverdien for effekt og spenning. Baseverdien for strøm i en trefasemaskin regnes ut med formel 2.23.

$$I_{base} = \frac{S_{base}}{\sqrt{3} \cdot V_{base}} \quad (2.23)$$

Det blir tatt med et eksempel med utgangspunkt i den transiente modellen for asynkronmaskin. Dersom $S_{base} = 40\text{kVA}$ og $V_{base} = 230\text{V}$ kan baseverdien til maskinen blir regnet ut med formel 2.23 for en trefasemaskin.

$$I_{base} = \frac{40\text{kVA}}{\sqrt{3} \cdot 230\text{V}} = 100,4\text{A}$$

Dersom det oppstår en kortslutning på motorklemmene når indre spenning $E' = 0,95\text{pu}$ og subtransient reaktanse er oppgitt som $X'_s = 0,1\text{pu}$ er det enkelt å regne transient strøm i per unit. Resistansen er neglisjert i eksempelet.

$$I_{pu} = \frac{E'}{X'_s} = \frac{0,95}{0,1} = 9,5\text{pu}$$

Strømmen blir 9,5pu og er 9,5 ganger nominell strøm i maskinen. Den virkelige strømmen i maskinen kan enkelt regnes ut med formel 2.22.

$$I = I_{pu} \cdot I_{base} = 9,5 \cdot 100,4\text{A} = 935,8\text{A}$$

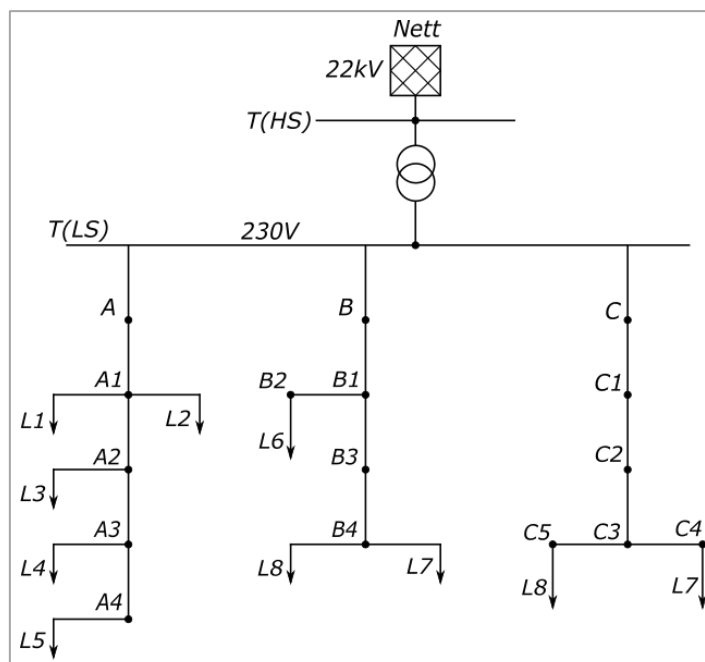
Alle resistanser og reaktanser til maskiner blir oppgitt i per unit i oppgaven.

3 | Systembeskrivelse

Dette kapitlet beskriver hvordan systemet er bygget opp i PowerFactory, og hva som er gjort for å komme frem til de forskjellige parameterverdiene og resultatene. Kapitlet tar også for seg de forskjellige metodene for beregning av kortslutning i PowerFactory. Linje- og kabeltype er valgt basert på informasjon levert av NTE, og ved valg av parameterverdier til linjene og transformatoren er «Planleggingsbok for kraftnett, Bind III – teknisk data» av Sintef [10] brukt.

3.1 Nettverket

Systemet bygger på et svakt lavspentnett levert av NTE. Valg av kabler, lengder på kabler og kortslutningsytelsen inn i området er valgt direkte basert på dette nettet. Verdiene som er brukt i oppgaven er anonymisert og lagt ved i Vedlegg A som viser data levert av NTE. Linje- og kabeltype og lengden på disse er gjengitt i Tabell 34. Største og minste kortslutningsstrøm ved feil i de forskjellige lastpunktene er gjengitt i Tabell 32. Figur 7 er et enlinjeskjema som skal representere nettet.



Figur 7: Enlinjeskjema av nettet som blir modellert.

Systemet blir bygget i PowerFactory basert på Figur 7 og data i Vedlegg A. Plasseringen av maskiner blir vurdert basert på kortslutningsstrømmen i de forskjellige lastpunktene i nettet som er vist i neste delkapittel.

3.2 Valg av simuleringsmetode

I PowerFactory finnes det flere ulike metoder for å simulere feilstrømmer i systemer. IEC 60909 og ANSI er forskjellige metoder for å beregne feilstrømmer på en enkel måte. En svakhet med disse er at de ikke tar hensyn til dynamiske situasjoner i nettet. For eksempel blir forandring av maskiners bidrag ved endringer av magnetiseringen i rotoren ikke tatt hensyn til med IEC 60909 og ANSI. Metodene krever mindre informasjon enn de dynamiske metodene RMS og EMT. IEC 60909 og ANSI kan derfor bli brukt til å gjøre et enkelt anslag av ved planlegging av nett. I denne oppgaven skal kortslutningsbidraget fra elektriske maskiner bli analysert, og dynamisk simulering blir derfor nødvendig.

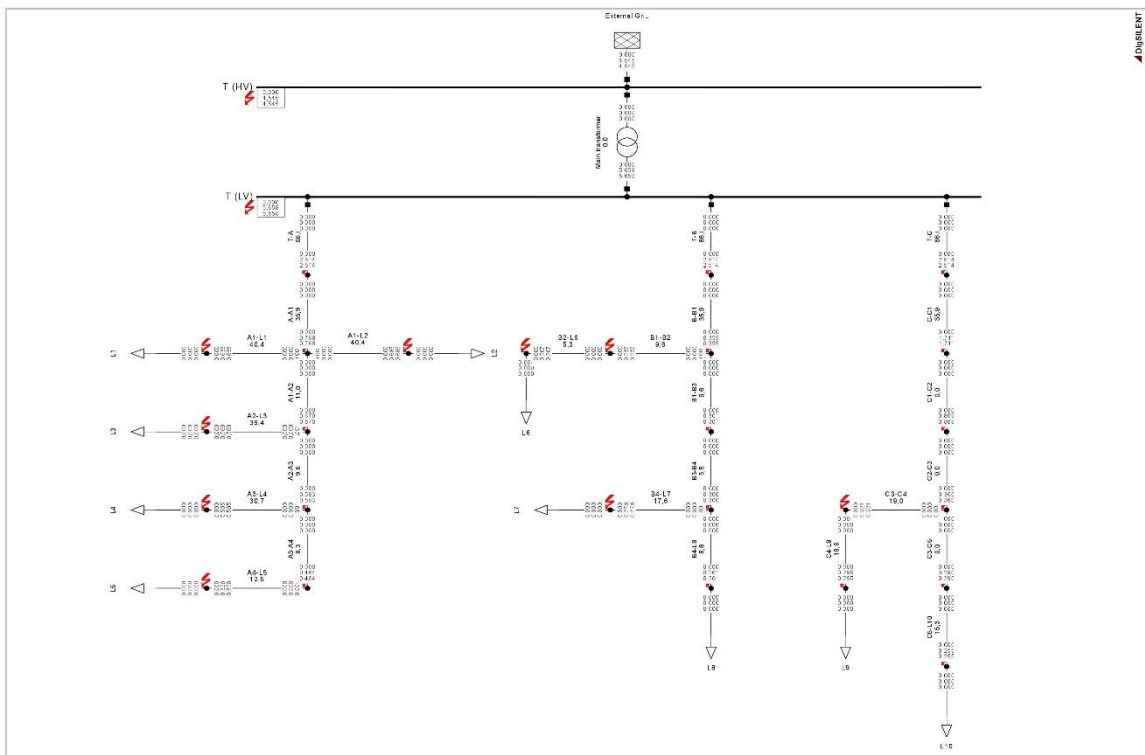
RMS studiet gir en RMS verdi av resultatet for analysering av dynamisk adferd etter symmetrisk eller usymmetrisk feil. Om den skal vurdere symmetrisk eller usymmetrisk feil er avhengig av om det blir kjørt en enkel symmetrisk modell eller en trefase funksjon

for usymmetrisk feil for de initiale betingelsene. Siden oppgaven tar for seg topolet kortslutning må programmet vurdere asymmetri i nettet.

EMT studiet gir en dynamisk nettverksmodell basert på elektromagnetiske og elektromekaniske transiente forløp under både balanserte og ubalanserte betingelser. Denne kan bli brukt for å finne den høyeste strømmen gjennom linjer og kabler basert på strømmen fra nettet og strømmen fra motorer. Metoden bruker lengre tid og passer best for å analysere korte hendelsesforløp.

Det er RMS verdien til strømmen i nettet som gjengir produksjonen av varme som blir utslagsgivende faktor for smeltesikringene i nettet. I tillegg vil simuleringene ta kortere tid med denne metoden. Det vil derfor bli foretatt simuleringer med RMS-metoden i oppgaven med mindre noe annet blir nødvendig i enkelte tilfeller. En forenklet metode blir brukt innledningsvis for å finne punktene med lavest kortslutningsstrøm.

IEC 60909 kortslutningsberegning i PowerFactory er en av to forenklede metoder som blir brukt til å beregne minimum kortslutningsstrøm ved feil på alle noder og busser i systemet samtidig. Denne metoden bruker færre parametere for å beregne enn RMS- eller EMT-analysen. Dette fører til at verdiene ikke blir helt korrekt, men det er en analyse som raskt og enkelt beskriver hvilken størrelse kortslutningsstrømmene vil ligge på i nettet ved feil i forskjellige punkter. IEC 60909 tester for feil ved de verste forholdene nettet kan ha. Nominell spenning i nodene blir multiplisert med en spenningsfaktor. Denne faktoren kan brukeren bestemme og den blir satt til maksimal lovlig spenning i nodene ved beregning av maksimal kortslutningsstrøm. På samme måte blir den satt til minimal lovlig spenning i aktuelle noder før feil ved beregning av minste kortslutningsstrømmer [22] [23]. Som beskrevet i 2.2 Krav til lavspentnett, er maksimalt avvik fra nominell spenning i lastpunktene lik 10%, og spenningen i nodene før feil blir derfor satt til $\pm 10\%$ i forhold til 230V ved IEC 60909 simulering i denne oppgaven. Metoden brukes i oppgaven for å finne punktet som gir lavest kortslutningsstrøm i systemet. Resultatet fra en slik analyse på det originale nettet er vist i Figur 8.



Figur 8: IEC 60909 beregning av kortslutningsstrømmer i alle nodene i nettet.

Figur 8 viser simulering av feil i alle nodene og på alle bussene i nettet. Verdiene er vanskelig å lese av så de blir gjengitt i Vedlegg H. Tabell 1 gjengir laveste kortslutningsstrøm i hvert lastpunkt basert på forskjellige metoder.

For ANSI, som er den andre forenklede metoden, må brukeren selv angi spenningen i nodene før feilen oppstår. ANSI legger til laststrømmen i nettet i tillegg til feilstrømmen, noe som kan være et viktig bidrag i svake nett som har lave kortslutningsstrømmer. Nettet som blir modellert i denne oppgaven er svakt, og en laststrøm kan gi et stort bidrag til den totale feilstrømmen. Dette kan gjengi et mer riktig bilde av hvilke kortslutningsstrømmer som oppstår i nettet. Dette betyr at ANSI kan gi en mer riktig verdi for svake nett og at IEC 60909 viser verdier basert på ytterpunktene, maksimal og minimal kortslutningsstrøm. Det siste kan være viktig ved beregning av vern som skal koble ut på minste kortslutning og for å sørge for at alt utstyr tåler de største strømmene som kan oppstå [22] [23].

Både ANSI og IEC 60909 er brukt for å finne punktene med lavest kortslutningsytelse og blir sammenlignet med en RMS simulering i hvert punkt og med verdier levert fra NTE

som er gitt av programmet NETBAS. Alle verdiene i tabellen er for minimum kortslutningsstrøm, som innebærer topolet feil. For IEC 60909 er nodespenningene i dette tilfellet 10 % under 230V. I tabellen er alle lastpunktene sin kortslutningsstrøm oppgitt fordi det er disse punktene som er lengst unna transformatoren og gir lavest kortslutningsstrøm.

Tabell 1: Minste kortslutningsstrøm [A] i forskjellige lastpunkter med forskjellige simuleringsmetoder.

	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10
NETBAS	586	632	522	-	303	198	263	-	281	244
IEC 60909	597	646	529	477	303	196	261	247	279	241
ANSI	805	868	714	645	411	267	355	336	370	320
RMS	801	865	708	638	407	263	355	336	370	318

Det observeres at kortslutningsstrømmene i lastene L4 og L8 ikke er oppgitt fra NTE. Dette er fordi lastene er koblet fra nettet til NTE. Verdiene er likevel tatt med fra PowerFactory fordi nettet til NTE fortsatt strekker seg bort til punktet.

Verdiene i Tabell 1 viser at IEC 60909 beregningene er veldig lik verdiene fra NETBAS som er levert av NTE. ANSI verdiene er veldig lik verdiene ved RMS simulering. Dette passer beskrivelsene av de forskjellige metodene godt med tanke på at ANSI beregner kortslutning basert på lastverdiene. Det ser ut som NETBAS bruker samme metode for utregning som IEC 60909. Det er noe forskjell mellom NETBAS og IEC 60909 og mellom ANSI og RMS. Forskjellen mellom NETBAS og IEC 60909 oppstår sannsynligvis fordi NTE har en annen modell en den som er reproduisert med PowerFactory. Det kan være noe forskjell i verdiene for kablene som er brukt. Det er heller ikke sikkert at det stive nettet som er laget i PowerFactory representerer godt nok det foranliggende nettet til NTE. Likevel er forskjellene så små at det er blir antatt at nettet som er produsert i PowerFactory er godt nok for å foreta representative simuleringer. Den største forskjellen mellom kortslutningsstrømmen med NETBAS og IEC er i lasten L2 og er på 2,2%.

Forskjellene mellom ANSI og RMS oppstår sannsynligvis fordi RMS simuleringen tar hensyn til at spenningen i nodene er noe lavere på grunn av lasten i nettet. Spenningen ved L6 i normal situasjon er målt til å være 0,966p.u. før feilen. Dette fører til at ANSI,

som antar I_{pu} før feilen blir noe høyere. Dersom lastene blir koblet ut slik at spenningen ved L6 er lik I_{pu} blir feilstrømmen lik 267 for RMS metoden også. RMS verdiene i tabellen er oppgitt for fase A ettersom strømmen i fase A og B er lik uten maskin tilkoblet og fordi feilen oppstår mellom fase A og Fase B.

Videre i oppgaven vil det bare bli brukt RMS simuleringer med 0,01 sekunder mellom hvert steg. Det er systemet laget i PowerFactory som vil være representativ for resten av oppgaven, så forskjeller mellom denne modellen og NETBAS blir ikke tatt hensyn til videre.

3.3 Modellering av stivt nett

Det stive nettet er kilden til all aktiv og reaktiv effekt i normal lastsituasjon for nettet. Den representerer generatorer, linjer og transformatorer frem til systemet som blir studert i oppgaven. Verdiene til det stive nettet er valgt slik at kortslutningsstrøm i lastpunktene skal være så lik som mulig til nettet levert fra NTE. «Bus type» er satt til PV slik at det stive nettet opprettholder riktig spenning (22kV) på høyspentsiden av transformatoren. Verdiene som er gitt til det stive nettet i PowerFactory er gjengitt i Vedlegg B. I PowerFactory er det stive nettet modellert som en spenningskilde med impedans i serie ved forenklete kortslutningsberegninger. Ved RMS og EMT simulering blir nettet modellert som en synkronmaskin som genererer og som leverer kortslutningsstrøm basert på de verdiene som blir valgt at den skal kunne levere. De mekaniske ligningene er lik som for synkronmaskiner [24] [25].

3.4 Modellering av transformatoren

I PowerFactory er det brukt en trefase 2-winding transformator mellom høyspentsiden og lavspentsiden i nettet. Transformatoren er modellert basert på informasjonen som er gitt av NTE. Informasjonen NTE har levert om transformatoren er gitt av Tabell 33 i Vedlegg A i tillegg er det bekreftet i samtale med NTE at det er en Yyn0 transformator [26]. Dette vil si at høyspentsiden og lavspentsiden er stjernekoblet, og at lavspentsiden har en kobling til nøytralpunktet. Det er heller ingen faseskift i transformatoren. Siden

transformatoren leverer til et IT-nett må nøytralpunktet være isolert fra jord. Dette gjøres med et gjennomslagsvern mellom nøytralpunktet til transformatoren og jord [2]. Det kan derfor ikke oppstå store strømmer ved jordslutning som nevnt i kapittel 2.1 Nettsystem. Basert på informasjonen gitt av NTE er det valgt en transformator med lik ytelse fra planleggingsboken til Sintef som er brukt i oppgaven. Tabell med oversikt over fordelingstransformatorer fra planleggingsboken til Sintef er gjengitt i Vedlegg C.

De matematiske ligningene som gjengir modellen i PowerFactory er oppgitt i teknisk referansedokumentasjon om trefase 2-winding transformator [27].

3.5 Modellering av linjene

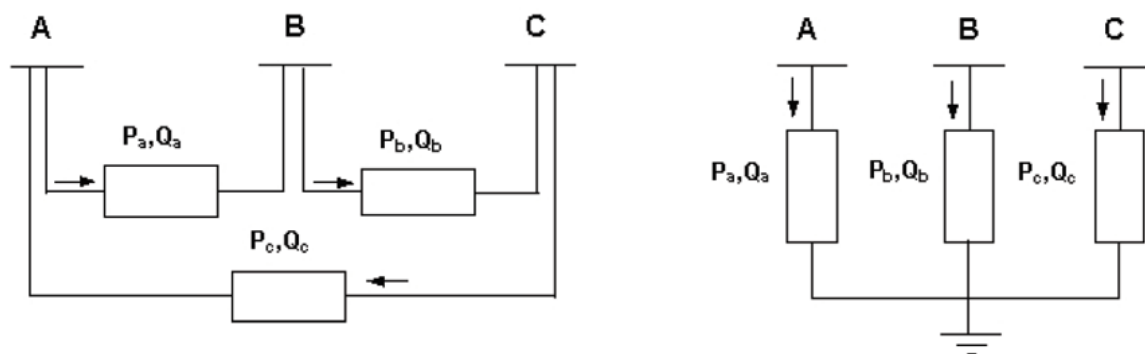
Linjene i modellen skal gjenskape NTE sitt nett så godt der lar seg gjøre. Tabell 34 i Vedlegg A viser lengden på og type linje og kabel oppgitt av NTE. Verdiene for linjene og kablene som er brukt er funnet i Sintef sin Planleggingsbok for kraftnett. Tabeller med parameterverdier som er hentet fra det planleggingsboken og brukt i modellen er gjengitt i Vedlegg D. Ved simulering med ubalansert last vil programmet anta at positiv- og negativ sekvens impedanser er lik for linjene. Null-sekvens impedanser må legges inn i modellen når parameterverdiene for linjene skal velges. Dersom ikke null-sekvens impedanser blir valgt vil PowerFactory anta at også de er lik positiv sekvens impedanser [28]. Alle linjer og kabler i modellen er modellert som line type (TypLne) og de er modellert som PI-modell. Hver linje og kabel mellom transformatoren og inntaket til hvert hus har tre faser.

3.6 Modellering av lastene

«General Load» er brukt som last i PowerFactory. Det blir antatt at alle lastene er balansert for alle tre fasene. Dette vil ikke være mulig i praksis fordi de fleste lastene i husene er koblet mellom to faser og dette vil ikke være mulig å balansere fullstendig til enhver tid. Det blir likevel antatt at lastene er helt balansert for normal lastsituasjon.

Under «Input Mode» blir det valgt «P,Q» ettersom aktiv og reaktiv effekt til hver last som er oppgitt fra NTE i Tabell 32. Den samme effekten som er oppgitt av NTE blir brukt i modellen. Hvordan lasten blir modellert i PowerFactory er avhengig av hvilken type last

som blir brukt. Balanserte lastkoblinger som kan bli valgt i PowerFactory uten å bruke nøytralpunkt er 3PH-‘D’, som innebærer deltakobling av last og 3PH-PH-E, som er stjernekoblet last med jordet midtpunkt. Dette er illustrert i Figur 9.



Figur 9: Illustrasjon av last ved lastflyt. Til venstre, deltakoblet. Til høyre, stjernekoblet med jordet nøytralpunkt [29].

Ettersom nettet er modellert som et IT-nett, kan ikke nøytralpunktet bli jordet. Dette ville ført til at enpolet jordslutning kunne oppstått. Det kan bli brukt stjernekobling av last i IT-nett dersom det blir brukt en trefase synkronmaskin, men nøytralpunktet kan uansett ikke bli jordet. I oppgaven er alle laster modellert med deltakobling (3PH-‘D’).

Figur 9 viser hvordan lasten blir modellert ved lastflyt. Som nevnt tidligere tar ikke IEC 60909 hensyn til laststrømmen ved kortslutningsberegninger. ANSI beregner total strøm til feilstedet som er laststrømmen summert med kortslutningsstrømmen.

Ved kortslutningsberegninger med RMS-metoden kan lasten bli modellert som en kombinasjon av statisk og dynamisk last. Den statiske delen blir modellert som en konstant impedans, og den dynamiske blir modellert som en lineær eller en ikke-lineær last. Det blir antatt at lastene i området oppfører seg som konstante motstander, derfor brukes kun den statiske delen som modell. Det vil si at dersom spenningen ved lasten halverer seg vil også strømmen halvere seg som følge av Ohm’s lov [29]. I PowerFactory fungerer lastene slik at lasten blir satt til å trekke en gitt aktiv og reaktiv effekt ved lastflyt. Basert på denne effekten blir lastene definert som impedanser.

Hvordan lasten er koblet har derfor mye å si ved usymmetrisk feil. Dersom lastene er deltakoblet og det oppstår en jordslutning i nettet går det minimalt med ekstra strøm i fasen med feil. Strømmen som går gjennom feilen fra fasen til jord må ha en returvei opp

til kresen igjen. Den eneste returveien denne strømmen kan ta er gjennom kapasitansene i nettet [2]. Dersom lasten er stjernekoblet med nøytralpunktet jordet, har strømmen en ny returvei ved jordslutning. Det vil gå større strøm i alle fasene, hvor fasen med feil har størst strøm.

3.7 Modellering av feil

Ettersom det er topolet kortslutning som gir den laveste kortslutningsstrømmen i IT-nett, blir hovedvekten i oppgaven på topolet kortslutning. For feilsituasjoner i nettet defineres feil i ett punkt av gangen. Det blir definert både topolet og trepolet kortslutning basert på hva som er av interesse i den aktuelle deloppgaven. Alle feil blir i utgangspunktet lagt inn etter 2 sekunder med mindre noe annet er nevnt.

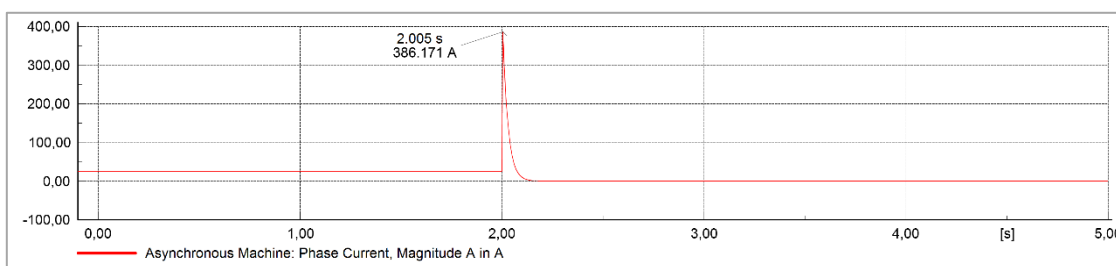
3.8 Modellering av asynkronmaskin

Asynkronmaskinen som blir valgt er asynkronmaskin med kortslutningsrotor. Det blir valgt to forskjellige maskiner som skal bli testet i nettet. Én maskin som skal være parametrisert «normalt» og en annen som skal bli parametrisert slik at låst rotor strøm blir høy. Dette vil føre til en stor startstrøm for maskinen, i tillegg til en høy kortslutningsstrøm.

D-koblet maskin blir brukt i simuleringen. Det er for mange lavspentmaskiner vanlig å ha 230V D-koblet og 400V Y-koblet som alternativer. Siden maskinene blir koblet til et IT-nett vil disse måtte være koblet i delta for å kunne kjøre med nominell spenning uten bruk av transformator. I tillegg blir det ingen forskjell i simuleringen om det blir brukt D-kobling eller Y-kobling. Det vil bli en forskjell i strømmer og spenninger på viklingene inne i maskinen, men i dette tilfellet er det bare nødvendig å vite strømmen inn og ut av maskinen. Strøm inn og ut av maskinen ved normal driftsituasjon og ved usymmetrisk feil er testet i PowerFactory og grafer som viser dette er lagt til i Vedlegg E. Det blir antatt at maskinen er dimensjonert for å tåle strømmen som vil gå i maskinen uavhengig av kobling. Basert på dette blir det valgt D-kobling på alle maskinene i oppgaven. Dette inkluderer synkronmaskinen.

3.8.1 Valg av parameterverdi

Resistansene og reaktansene til maskinen blir basert på «typiske» verdier og oppgitt i per unit. Verdiene for AS1 er basert på data for asynkronmaskiner i «Three-Phase Electrical Machine Systems: Computer Simulations» [30]. I boken er det brukt maskiner med en høyere ytelse enn det som er naturlig å bruke i denne sammenhengen, men det blir antatt at per unit verdiene ikke endrer seg drastisk for en mindre maskin. Kortslutningsstrømmen i per unit kan beregnes basert på resistansen, reaktansen og induisert spenning i maskinen før feilen, ved bruk av transient modell for asynkronmaskin (se Figur 5). Nominell spenning for maskinen er 230V ettersom den skal plasseres i et IT-nett. Effekten til maskinen har mye å si for hvor stor kortslutningsstrømmen blir. Dette blir observert i formel 2.23 hvor spenningen vil være 230V uavhengig av ytelsen. Samtidig kan ikke nominell effekt for maskinen være for stor ettersom den vil dra en reaktiv strøm på tomgang. På grunn av dette vil en høy ytelse føre til økt tap i nettet. Det kan også føre til at vern kobler ut på grunn av overbelastning ved høy last fra hus kombinert med mye strøm til maskinen, eller ved oppstart av maskiner. Utløsning på grunn av overbelastning av vern skal unngås i oppgaven og det fører til at 40kW blir satt som nominell ytelse for maskinene. En trepolet kortslutning på motorklemmene, når maskinen er koblet til lavspentsiden til transformatoren, gir en kortslutningsstrøm på 386A i hver fase som vist i Figur 10.

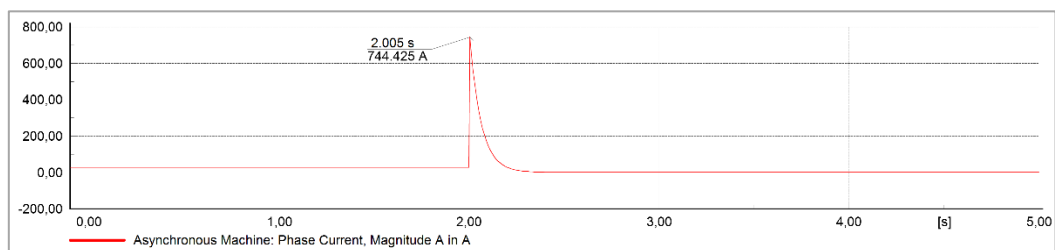


Figur 10: Kortslutningsstrøm fra maskinen AS1 ved trepolet kortslutning på klemmene.

Kortslutningsstrømmen ligger på 3,267 pu i dette tilfellet. Dette er en noe lavere verdi enn låst rotor strøm, men det er som forventet ettersom den induerte spenningen vil være lavere enn klemmespenningen før feilen.

Ved valg av parameterverdier for den andre asynkronmaskinen, AS2, fokuseres det på å øke lås rotor strøm. Ved å studere Figur 5 kan det observeres at dersom kortslutningsstrømmen skal bli større må den transiente reaktansen bli lavere. Formel

2.17 viser at $X'_s = X_{ls} + \frac{X'_{lr}X_m}{X'_{lr}+X_m}$. Fra ligningen observeres det at en lavere magnetiserings reaktans ikke vil endre transient reaktans like mye som en lavere lekkreaktans i stator eller rotor, ettersom magnetiseringsreaktansen i utgangspunktet er mye større. Det blir derfor fokusert på å gjøre lekkreaktansen for stator og rotor mindre. Maskinen får en låst rotor strøm på 7,71. Dette er 88% høyere enn for AS1. En test av maskinen ved kortslutning av motorklemmene er utført på AS2 også. Dette fører til en kortslutningsstrøm på 744A i hver fase som vist i Figur 11. Dette er 93% mer enn for AS1. Hvilken effekt dette har på nettet ved feil i andre punkter enn på motorklemmene blir det sett nærmere på senere i oppgaven.



Figur 11: Kortslutningsstrøm fra maskinen AS2 ved trepolet kortslutning på klemmene.

I dette tilfellet ligger kortslutningsstrømmen på 6,817pu. Også her kan det observeres at kortslutningsbidraget er noe mindre enn låst rotor strømmen til maskinen.

De valgte verdiene for både AS1 og AS2 ligger i Vedlegg F.

3.9 Modellering av synkronmaskin

Som for asynkronmaskinen er også synkronmaskinen D-koblet. Det blir modellert én synkronmaskin (SM1) i oppgaven med omtrent lik ytelse som asynkronmaskinene. Det blir også modellert en synkronmaskin (SM2) som har dobbelt så høy ytelse som den første.

3.9.1 Valg av parameterverdi

Ettersom AS1 og AS2 har en nominell tilsynelatende effekt, S_N , på henholdsvis 47,1kVA og 43,5kVA blir en synkronmaskin valgt med samme størrelse for å kunne sammenligne resultatene med asynkronmaskinene. Nominell tilsynelatende effekt blir bestemt til å være 45kVA for synkronmaskinen.

Både transient bidrag og stasjonært bidrag fra maskinen er viktig for å løse ut vernene raskere. Fordelen med synkronmaskinen ved trepolet kortslutning nær en last er at maskinen leverer stasjonært bidrag til feilen. For å gjøre det stasjonære bidraget høyest mulig må synkronreaktansen være så lav som mulig, som nevnt i delkapittel 2.4.1.2. Synkronreaktansen kan minimeres ved produksjonen av maskinen, men det vil øke kostnaden av maskinen ved å gjøre den så lav som mulig. Ved parameterisering bør det velges verdier som fører til at maskinen har god demping. Det vil si at ikke polhjulsvinkelen svinger veldig mye over lang tid etter en endring i systemet. En av valgene som påvirker dette mye er forholdet mellom subtransient d-akse reaktans (X_d'') og subtransient q-akse reaktans (X_q''). Ved valg av parameterverdier gir forholdet $\frac{X_q''}{X_d''}$ følgende [31]:

$$\frac{X_q''}{X_d''} \rightarrow \begin{cases} \sim 1,0 = \text{god demping} \\ \sim 1,5 - 2,5 = \text{svakere demping} \\ \sim > 3,0 = \text{dårlig demping} \end{cases}$$

Forholdet blir satt til 1,0 i oppgaven for å gi en god demping. Disse tallene er basert på hvordan en synkronmaskin oppfører seg i nett med høyere spenningsnivå.

Et alternativ til å minimere synkronreaktansen kan være å installere en automatisk spenningsregulator (AVR) som kan øke magnetiseringsstrømmen ved en feilsituasjon for å øke bidraget fra maskinen. Det vil derfor benyttes synkronmaskin med og uten AVR for å kunne sammenligne effekten. Dersom maskinen kan levere mye høyere strøm med AVR vil det kanskje føre til lavere kostnader å benytte seg av denne muligheten sammen med en normalt dimensjonert synkronmaskin. Det vil bli testet AVR med magnetisering via børste og en med børsteløs magnetisering. Ved børsteløs magnetisering introduseres det en ny tidskonstant, noe som kan føre til at denne metoden blir for treg. Tiden for utløsning uten maskin ligger på mer enn ett sekund, så maskinen må kunne levere et høyt bidrag raskt og levere et høyt bidrag over tid.

3.9.2 AVR

I oppgaven blir det sett på synkronmaskin med og uten AVR. Det blir brukt en maskin med konstant magnetisering av rotor, en maskin med AVR med statisk magnetisering og en maskin med AVR med børsteløs magnetisering. Å minimere synkronreaktansen for

synkronmaskinen kan føre til store kostnader. Det kan føre til lavere kostnader å bruke mer «normal» synkronreaktans, og heller investere i en AVR dersom denne løsningen kan gi like høy strøm. Forholdet mellom resistans og reaktans er veldig forskjellig i lavspentnettet sammenlignet med høyspentnettet. Maskinene opererer typisk i et nett med et høyere spenningsnivå, så det kan være grunnen til at standardverdiene til AVR i PowerFactory ikke fører til god kontrollering av magnetiseringen til synkronmaskinen. Det må bli gjort noen endringer for parameterverdiene til AVR.

«EXAC4» er brukt som AVR ved statisk magnetisering. Ved å endre T_b fra 12s til 1s regulerer den raskere magnetiseringsspenningen tilbake til utgangspunktet etter feilen er koblet ut. K_a blir regulert fra 200 til 50 for at ikke reguleringen skal bli for voldsom. K_c endres fra 0,2 til 0,6 for at ikke magnetiseringsspenningen skal bli for høy når magnetiseringsstrømmen er høy. V_r er satt til ± 2 fra ± 4 for å begrense den totale magnetiseringen av maskinen. Dette fører til en mer stabil magnetisering ved feil.

«IEEE AC8B» uten PID-begrensninger er brukt som AVR ved børsteløs magnetisering. Det oppleves at også denne gir for mye og for rask magnetisering ved feil. V_{fmax} endres derfor fra 6 til 3,4. Dette fører til at strømbidraget fra maskinen svinger mindre. Etter feilen er koblet ut faller ikke magnetiseringen tilbake til utgangspunktet, noe som fører til stor produksjon av reaktiv effekt. For å få regulatoren til å justere ned magnetiseringen raskere endres K_{ir} fra 10 til 0,1. Dette fører til at magnetiseringen stabiliserer seg på samme nivå som før feilen og at maskinen ikke produserer store mengder reaktiv effekt. Forslag til valg av parameterverdier for AC8B finnes i IEEE standard 421.5 [32] og er brukt som utgangspunkt sammen med verdiene i PowerFactory ved testing av AVR.

Hovedfokuset i oppgaven er ikke knyttet til detaljmodellering av AVR for synkronmaskin. Det blir derfor tatt utgangspunkt i «typiske» verdier og endret ved prøving og feiling. Parameterverdier blir bare valgt basert på synkronmaskinen plassert i B1 og ved trepolet kortslutning ved L6. Videre informasjon om brukte spenningsregulatorer finnes i Vedlegg I.

3.10 Vern – beskrivelse og modell

Som nevnt tidligere blir det brukt smeltesikringer av typen gG i nettet. Smeltesikringen fungerer slik at det ligger en sikring i hver fase. All strøm som går gjennom hver fase i dette punktet går gjennom sikringen også. Dersom det går en høyere strøm gjennom vernet enn den er dimensjonert for vil sikringen begynne å smelte etter en gitt tid. Hvor høy strøm som må gå gjennom vernet, og hvor langt tidsforløpet må være er forskjellig for sikringene brukt i denne oppgaven, og er gitt av karakteristikken som ligger i Vedlegg G. Den røde linjen i grafen gir tid multiplisert med strøm som må til for at sikringen skal starte å smelte. Den grønne linjen gir tid multiplisert med strøm for utløsning. Ved utløsning er det sikringen i fasene som har nådd grønn linje som bryter. Dette betyr at for en topolet feil kan gjerne sikringen bryte kretsen i de to fasene med feil, mens sikringen i den siste fasen fortsatt ligger inne.

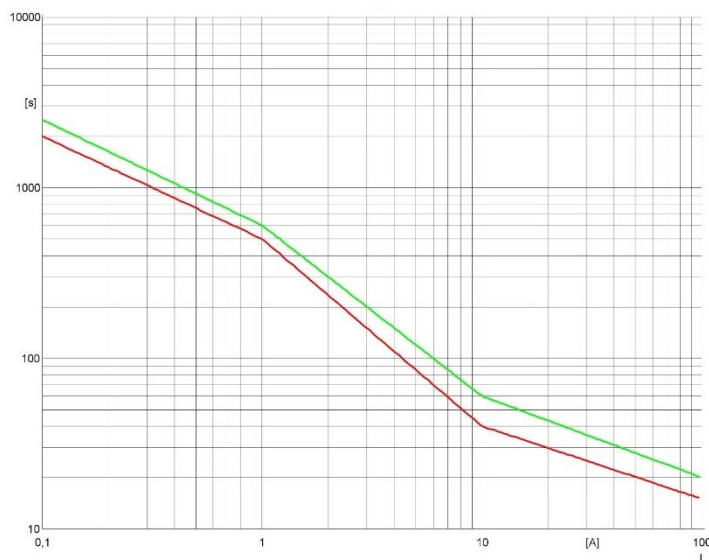
Dersom det ikke er en maskin tilkoblet nettet vil det gå en konstant strøm fra nettet til feilstedet. Sikringene har en tid-strøm kurve hvor utløsningstiden er gitt for en konstant strøm. Når en maskin er tilkoblet nettet oppstår det svingninger i strømmen som går til feilstedet. For en trepolet kortslutning er det et transient forløp i starten etterfulgt av et stasjonært forløp. En smeltesikring vil bryte kretsen dersom det oppstår nok varme som er produsert av strømmen gjennom sikringen. Dersom det går en høy strøm i det transiente forløpet som ikke kobler ut vernet, og stasjonær strøm gjennom vernet er like stor med maskinen koblet inn som uten maskinen, vil vernet koble ut raskere med maskinen tilkoblet. Dette blir tilfellet fordi det blir en større varmeutvikling i det transiente forløpet hvor det er høy strøm. Sikringen er da nærmere smeltepunktet, og når den stasjonære strømmen er lik i begge tilfellene vil vernet oppnå høyere temperatur raskere på grunn av det transiente forløpet.

Tid-strøm karakteristikken til sikringen baserer seg på tall i enkelte punkter som er gitt av produsenten. Dette betyr at når smeltekarakteristikken skal plottes er det gitt punkter for hvilken strøm gjennom sikringen som fører til smelting eller utløsning etter en gitt tid. Sikringene i PowerFactory bruker lineær tilnærming mellom punktene for Siemens sine sikringer. Det vil si at det trekkes en lineær strek mellom punktene som er oppgitt. I eksempelet er det brukt få punkter for å tydeligere vise lineær tilnærming [33]. Punktene er gitt i Tabell 2.

Tabell 2: Liste med eksempelverdier for tid-strøm karakteristikk for eksempelsikring.

Strøm [A]	Smeltetid [s]	Utløsningstid [s]
0,1	2000	2500
1	500	600
10	40	60
100	15	20

i Figur 12 blir det observert hvordan smeltesikringens karakteristikk ser ut basert på enkelte oppgitte punkter fra leverandøren, ved bruk av lineær tilnærming.



Figur 12: Sikringskarakteristikk basert på eksempelverdier. Rød linje gir smelting av sikring og grønn linje gir utløsning er vernet.

3.10.1 Eksisterende vern

Av vern på lavspentsiden av nettet finnes det foreløpig vern for hver radial ut fra transformatoren, ut fra fordelingsskapet i B3, linjen til lastene L1, L2 og L3, og for inntaket til de andre lastene. Det vil si at dersom det skjer en feil på enden av kablen til L6, er det vernet ut fra transformatoren til radialen som skal koble ut.

Det er antatt en størrelse på inntakssikring til L1, L2 og L3 på 50A basert på oppgitt last i Vedlegg A og på andre inntakssikringer i nettet. Størrelsen på alle vernene i nettet basert på informasjon fra NTE er vist i Tabell 3.

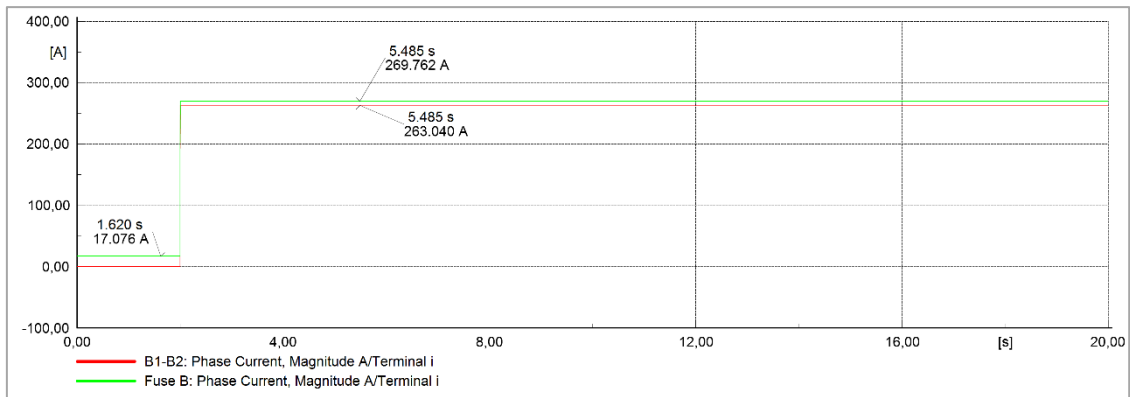
Tabell 3: Utgangspunkt for sikringsstørrelser i nettet.

Fra	Til	Størrelse [A]
T	A	200
A1	L1	125
L1	hus	63
A1	L2	125
L2	hus	63
A2	L3	80
L3	hus	50
L5	hus	63
T	B	200
B3	B4	80
L7	hus	50
T	C	200
L9	hus	50
L10	hus	50

I Tabell 3 viser «fra», punktet vernet er plassert i, og «til» viser hvilket punkt linjen vernet dekker går mot. For eksempel dekker sikringen «Fra T til A» linjen som går fra punktet T til A og sikringen er plassert i punktet T. Last 4, last 6 og last 8 har ingen vern fordi kunden er frakoblet nettet. Lavspenningsnettet er fortsatt spenningssett frem til lastpunktet. Alle sikringene er produsert av Siba.

Som nevnt tidligere er det ved kortslutning av to faser i lasten L6 laveste kortslutning oppstår. Dette er basert på målingene i Vedlegg H. Dersom det blir kjørt en RMS analyse ved feil i punktet blir kortslutning beregnet med den faktiske spenningen før feil. Denne spenningen baserer seg på at lastene trekker en gjennomsnittlig last ved tidspunkt for feil.

Strømmen øker fra 0A til 263 A for hengekabelen fra B1 til B2. Linjen fra transformatoren til radial B får en strømoeking fra 17,1 A til 269,8 A. Tallene gjelder for fase A og fase B da feilen er mellom fase A og B. Strømmen før og etter feil er vist i Figur 13.



Figur 13: Strøm inn til feilen ved topolet kortslutning i L6. Grønn graf viser strøm gjennom vernet til radialen og rød graf viser strøm gjennom hengekabelen mellom B1 og B2 som fører til feilstedet.

Vernet som skal løse ut for denne feilen er en 200A smeltesikring, ettersom dette vernet er nærmest feilen sett fra transformatoren. Karakteristikken til vernet ligger i Vedlegg G og den viser at sikringen ikke starter å smelte før strømmen er omtrent 280A, selv etter 10000 sekunder. For at sikringen skal kunne løse ved denne feilen må sikringen byttes til en som løses ut ved lavere strøm, eller en elektrisk maskin må inn i nettet for å øke kortslutningsytelsen. En kombinasjon av dette blir gjort i denne oppgaven. Smeltesikringen til hver radial fra transformatoren endres til en lavere størrelse dersom det passer med lastene. Senere blir nettet supplert med elektriske maskiner som skal få vernene til å koble ut raskere.

Siden lastene L4, L6 og L8 er koblet ut fra nettet ville det være naturlig i dette tilfellet å koble ut linjen fra A3 til L4, linjen fra B1 til B2 og linjen fra B4 til L8. Siden denne oppgaven skal være en generell løsning for problemet med lav kortslutningsytelse, blir det antatt videre at det fortsatt ligger en last koblet til i punktene. Det blir derfor antatt sikringer til disse punktene også. Laveste kortslutning oppstår derfor fortsatt ved lasten L6. Det blir videre antatt at L4, L6 og L8 har en inntakssikring på 50 A med tilsvarende maksimal belastning.

3.10.2 Nye sikringer

Laststrømmene er oppgitt i Vedlegg A. Disse lastene er oppgitt av NTE Nett som et snitt basert på totalt årsforbruk fordelt på et gitt antall brukstimer per år. For å ikke underdimensjonere sikringen, blir det antatt at hver last kan forbruke det de maksimalt kan trekke uten at inntakssikringen løses ut. Dette kan multiplisert med en samtidighetsfaktor ettersom det ikke er vanlig at alle lastene trekker maksimal strøm

samtidig [34]. Denne blir antatt å være på 0,6 ved dimensjonering av vernene fordi lastene sin gjennomsnittlige strøm er så mye lavere enn den strømmen det er antatt at de kan trekke. Det kunne vært naturlig å bruke en lavere samtidighet for radial A fordi den har flere laster enn de andre. Det blir for enkelthetens skyld brukt lik samtidighet for alle radialene. Dette vil gi en høyere belastningsstrøm enn lastene tilsynelatende bruker nå ifølge lastflyten gitt av NTE. Total last I_b per radial blir beregnet med samtidighetsfaktor på 0,6.

$$I_b(A) = (63 + 50 + 50 + 50 + 50)A \cdot 0,6 = 158A$$

$$I_b(B) = (50 + 50 + 50)A \cdot 0,6 = 90A$$

$$I_b(C) = (50 + 50)A \cdot 0,6 = 60A$$

160 A sikring blir valgt for radial B og C for enkelthetens skyld og for å ha muligheten til å koble til flere laster senere. Radial A kan ikke ha lavere enn 160A sikring, og radialen kan ikke tilknyttes flere laster med denne sikringsstørrelsen. Sikringsstørrelsene må passe med formel 2.1 og formel 2.3. Hengekabelen mellom A4 og L5 dekkes kun av vernet til radialen. Termisk grenselast for den kabelen er 140A, så radialens sikring på 160A dekker ikke denne kabelen. Det må derfor suppleres med nye smeltesikringer i nettet. Alle linjer skal være tilstrekkelig dekket av et vern i henhold til formel 2.1 og formel 2.3. Dersom 160A sikring skal bli brukt for hver radial, vil den ikke dekke linjer som har en termisk grenselast på mindre enn 176,6A basert på formel 2.3.

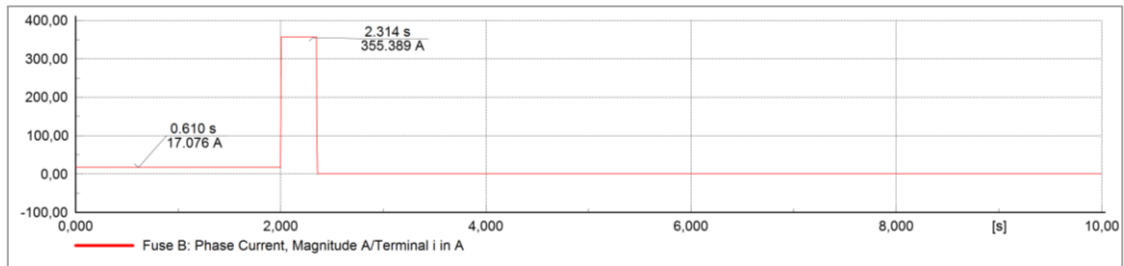
$$I_z \geq 160A \cdot \frac{1,6}{1,45} = 176,6A$$

Det vil si at sikringen på 160A dekker linjen fra T(LS) til A4 på radial A, og ikke avgreiningene. På radial B dekkes linjen fra T(LS) til B1 og på radial C dekkes linjen fra T(LS) til C3. Den laveste strømmen linjene som blir dekket kan tåle over lang tid er 192A og er for AL 1x25 luftlinje mellom C2 og C3. Dette samsvarer med formel 2.3. Vernet må også være innenfor kravene i formel 2.1.

$$158A \leq 160A \leq 192A$$

Hvor 158A er maksimal laststrøm linjene er beregnet for (radial A), 160A er sikringsstørrelsen og 192A er maksimal termisk belastning for linjene som dekkes av sikringen. Sikringen med 160A kan derfor brukes for alle radialene. Radial B og C kunne brukt en mindre sikring dersom det ikke er planlagt noe videre utbygging.

Ingen av inntakssikringene i nettet er større enn 63A sikringer. Disse er dimensjonert for å ta kortslutninger som oppstår inne i huset. Dette kan illustreres raskt ved å sette en topolet kortslutning rett etter inntakssikringen på L7, som også har en lav kortslutningsstrøm. Resultatet blir vist i Figur 14.



Figur 14: Utløsning ved kortslutning etter inntakssikring.

Sikringen bryter feilstrømmen etter 0,35 sekunder. Det vil ikke bli tatt hensyn til disse sikringene videre i oppgaven, fordi en feil inne i huset vil bli raskt utkoblet. Feilene som kan oppstå i oppgaven er alle typer feil mellom transformatoren og inntaket til hvert hus. Når det videre i oppgaven blir referert til feil i et lastpunkt, innebærer dette at feilen oppstår slik at inntakssikringen til huset ikke får økt strømgjennomgang.

Som tidligere nevnt må det legges inn flere sikringer i nettet for at alle linjene skal bli dekket. Basert på formel 2.1 og formel 2.3 blir nye sikringer regnet ut, og vist i Tabell 4.

Tabell 4: Nye sikringer som blir brukt i nettet.

Fra	Til	Størrelse [A]
A3	L4	80
A4	L5	80
B1	B2	80
B1	B3	80
C3	C4	80
C3	C5	80

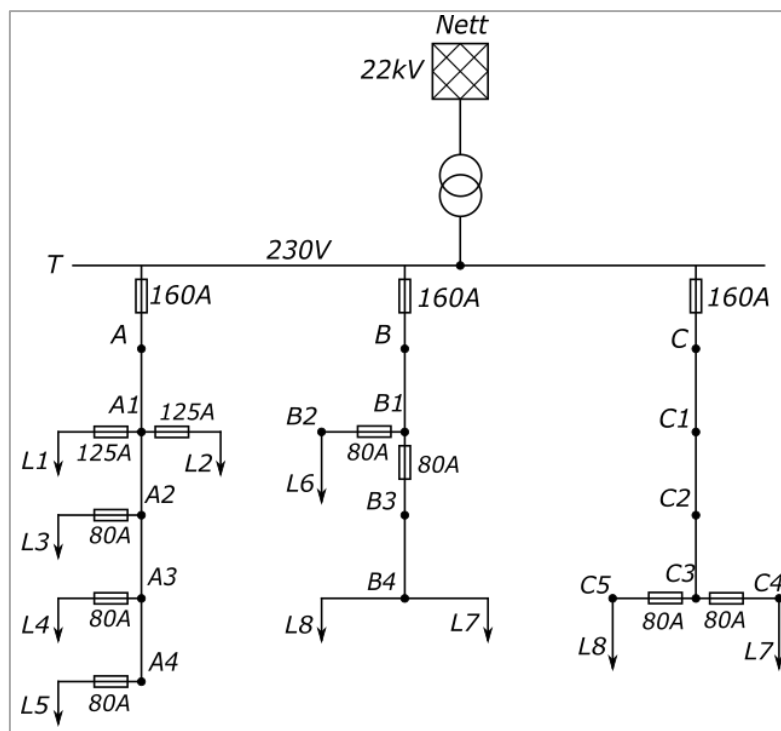
Det er også nødvendig at sikringen for linjen fra B3 til B4 blir flyttet slik at den også dekker linjen fra B1 til B3 slik at også denne linjen blir sikret for overbelastning. Sikringen på 80A før B3-B4 blir derfor fjernet. Utrekninger for de nye sikringene er tatt med i Vedlegg J.

Endelig resultat for sikringsstørrelser blir, uten inntakssikringer, som vist i Tabell 5.

Tabell 5: Oversikt over brukte sikringsstørrelser med posisjon.

FRA	TIL	STØRRELSE [A]
T	A	160
A1	L1	125
A1	L2	125
A2	L3	80
A3	L4	80
A4	L5	80
T	B	160
B1	B2	80
B1	B3	80
T	C	160
C3	C4	80
C3	C5	80

Med sikringene gitt av Tabell 5 kan ny simulering starte uten en elektrisk maskin i kretsen.



Figur 15: Enlinjediagram av nettet med sikringenes størrelse og posisjon.

Figur 15 gir en oversikt over nettets struktur med sikringene som blir brukt i simuleringene.

4 | Resultater og analyser

I dette kapitlet vil resultatene fra de ulike løsningene bli presentert. Forskjellige scenarioer som er vurdert vil bli presentert og analysert. Sammenligning av resultatene vil foregå i neste kapittel. For størrelse og plassering av vern, se Figur 15 i forrige kapittel. Det vil ikke bli gjort et skille mellom subtransient og transient forløp videre i oppgaven, ettersom det er vanskelig å skille mellom dem i grafene og fordi subtransient forløp er så kortvarig. Transient forløp vil være det tidlige forløpet hvor maskinen leverer en høy strøm, og stasjonært forløp vil være etter strømmen har stabilisert seg.

4.1 Utgangspunktet

Dette delkapitlet blir utgangspunktet for simuleringene. Tabell 6 - Tabell 8 viser utløsningstidene til vernene uten maskiner koblet til, slik vernene er dimensjonert i oppgaven. Sikringene i nettet vil være de gitt av Tabell 5. Alle resultatene av utløsningstider med maskiner i nettet blir sammenlignet med tidene i dette delkapitlet.

Som funnet ved tidligere simuleringer, og som vist i Tabell 1, er stedet med lavest kortslutningsytelse i lastpunktet L6. Ved en feil i dette punktet går det en høyere strøm gjennom vernet til radialen, enn gjennom det lokale vernet mot L6. Det er fordi andre laster på radialen fortsetter å trekke en laststrøm ved feil i L6. Likevel vil sikringen mellom B1 og B2 bryte kretsen fordi denne sikringen er dimensjonert for lavere strøm. Det er viktig for selektiviteten at dette vernet er dimensjonert lavere slik at minst mulig av nettet kobles ut ved feilsituasjon. Etter vernet har koblet ut feilstedet, kan resten av radial B belastes som vanlig.

Ved topolet kortslutning går det lik strøm som før, men sikringen vil i dette tilfellet koble ut feilen etter 10,05s. Med 160A sikring til radial B, og uten den nye sikringen til radial B1-B2, tar det 842s før sikringen løses ut. Det er derfor nødvendig med den nye sikringen på radial B1-B2.

Det ble utført en RMS simulering av topolet feil i hver last etter at de nye sikringene ble satt inn. Det ble simulert for én feil om gangen, Tabell 6 viser feilstrøm og utløsningstider for hver enkelt feil.

Tabell 6: Resultat av topolet feil i lastpunkt i nettet, uten maskiner tilkoblet.

Feilsted	I _{lokal} [A]	I _{radial} [A]	Tid [s]
L1	800,8	807,4	0,805
L2	865,1	870,3	0,608
L3	707,6	717,4	0,231
L4	638,0	648,8	0,331
L5	407,2	418,7	1,725
L6	263,0	269,8	10,046
L7	355,4	355,4	2,982
L8	336,2	336,2	3,728
L9	370,0	370,1	2,534
L10	318,0	329,2	4,680

I_{lokal} er strømmen gjennom lokal (nærmeste) sikring, I_{radial} er strømmen gjennom sikringen til radialen og Tid er tiden før feilstedet er koblet ut. Minste kortslutningsstrøm som vernet for radial A, B og C skal dekke vil bli topolet kortslutning i henholdsvis A4, B1 og C3. Dette er fordi de er lengst fra transformatoren uten at feilstrømmen passerer de lokale vernene. Tabell 7 viser resultatene ved disse feilene.

Tabell 7: Resultat av topolet feil i A4, B1 og C3 uten maskiner tilkoblet.

Feilsted	I _{radial} [A]	Tid [s]
A4	596,4	7,254
B1	454,0	28,953
C3	445,2	32,434

Trepolet kortslutning i de samme punktene ble også tatt med ettersom det vil være av interesse for et sammenligningsgrunnlag med elektrisk maskin. Resultatene ved trepolet kortslutning er vist i Tabell 8.

Tabell 8: Resultat av trepolet feil i laster og i A4, B1 og C3 uten maskiner tilkoblet.

Feilsted	I _{lokal} [A]	I _{radial} [A]	Tid [s]
L1	923,9	929,1	0,480
L2	998,1	1001,2	0,364
L3	817,0	825,4	0,141
L4	736,7	746,3	0,201
L5	469,4	481,6	0,979
L6	303,7	310,9	5,617
L7	409,5	409,5	1,685
L8	387,5	387,5	2,106
L9	426,4	426,5	1,433
L10	368,8	367,1	2,616
A4	-	685,4	4,399
B1	-	522,9	12,752
C3	-	512,9	14,275

Som antatt fører trepolet kortslutning til raskere utløsningstid enn topolet kortslutning. Fra Tabell 6, Tabell 7 og Tabell 8 blir det observert at sikringene for radial B og C har betydelig lengre utløsningstid enn radial A. Det blir derfor viktigere med en maskin i disse radialene. Utløsningstiden som skiller seg ut for radial A er vernet til L5, som har utløsningstid på 1,725s. Dersom en elektrisk maskin blir koblet til nær lastene vil det kunne øke strømmen gjennom vernet feilstedet, og redusere utløsningstiden, ved feil i lasten nær maskinen. Dersom en skal redusere utløsningstiden på radial A også, er det ønskelig at maskinen plasseres så nært L5 som mulig ettersom denne feilen fører til tregest utløsning på radial A. Ved trepolet feil må maskinen kobles til på samme side av vernet som nettet er, i forhold til feilen. Slik kan en feil ved lasten føre til at maskinen bidrar til økt strøm gjennom det lokale vernet. Topolet kortslutning vil skape asymmetri og kan føre til at maskinen bidrar til raskere utløsning selv om den ikke ligger på samme side av vernet som innmatingspunktet.

Det ble forsøkt å legge inn elektriske maskiner i nettet for å øke kortslutningsytelsen og redusere utløsningstiden til sikringene. Tidene i Tabell 6 - Tabell 8 blir brukt som utgangspunkt for utløsning av vern, og andre løsninger blir sammenlignet med dette. Dersom det skal være aktuelt å benytte elektriske maskiner er de nødt til å bidra til raskere utløsning av vern.

4.2 Bruk av asynkronmaskin AS1 tilkoblet nær trafo

Den første simuleringen undersøker bidraget til en elektrisk maskin ved plassering på lavspentsiden til transformatoren. Maskinen som kobles til nettet er asynkronmaskin AS1 på 40kW, med låst rotor strøm lik 4,06pu. Målet med dette er at maskinen skal levere kortslutningsbidrag til feil, uavhengig av hvor på lavspentsiden feilen befinner seg. Feilene som gir lengst utløsningstid for vernene er gitt av Tabell 6 og Tabell 7. Tabell 9 viser strømmen gjennom radialens hovedvern og lastens lokale vern ved topolet kortslutning i hver last med AS1 tilkoblet lavspentsiden til transformatoren. Tabellen viser også utløsningstiden for vernet nærmest feilen, og reduksjonen i utløsningstid maskinen fører til sammenlignet med å ikke bruke elektrisk maskin.

Maskinen trekker 25,4A når den kjører uten last fordi den trekker reaktiv effekt, selv i tomgang. Transformatoren opererer på 28,3% av maks belastning i normal lastsituasjon når maskinen er koblet til. Denne ekstra belastningen er ikke noe problem for transformatoren og medfører heller ikke mye tap fordi strømmen er mye lavere på høyspentsiden. Fordi maskinen er tilkoblet nær transformatoren unngår strømmen lange distanser med linjer og kabler på lavspentsiden, hvor strømmen er høyere. For å begrense strømmen gjennom transformatoren kan en kondensatorbank plasseres ved maskinen. Kondensatorbanken kan da levere den reaktive effekten maskinen trenger.

Ved feil i punktet L6 vil strømmen gjennom det lokale vernet være 800,4A rett etter feilen og 799,2A rett før vernet bryter strømmen. Det transiente bidraget vil derfor ikke bli tatt hensyn til i Tabell 9 ved denne plasseringen av maskinen, ettersom differansen er neglisjerbar. Ved beregning av tiden for utløsning av vern tar programmet hensyn til all strøm gjennom vernet. Tiden det tar fra feilen oppstår til vernet løses ut med maskinen tilkoblet, blir sammenlignet med tiden vernet bruker uten at maskinen er i kretsen.

Tabell 9: Resultat av topolet kortslutning i lastene med maskin ASI koblet til lavspentsiden av transformatoren.

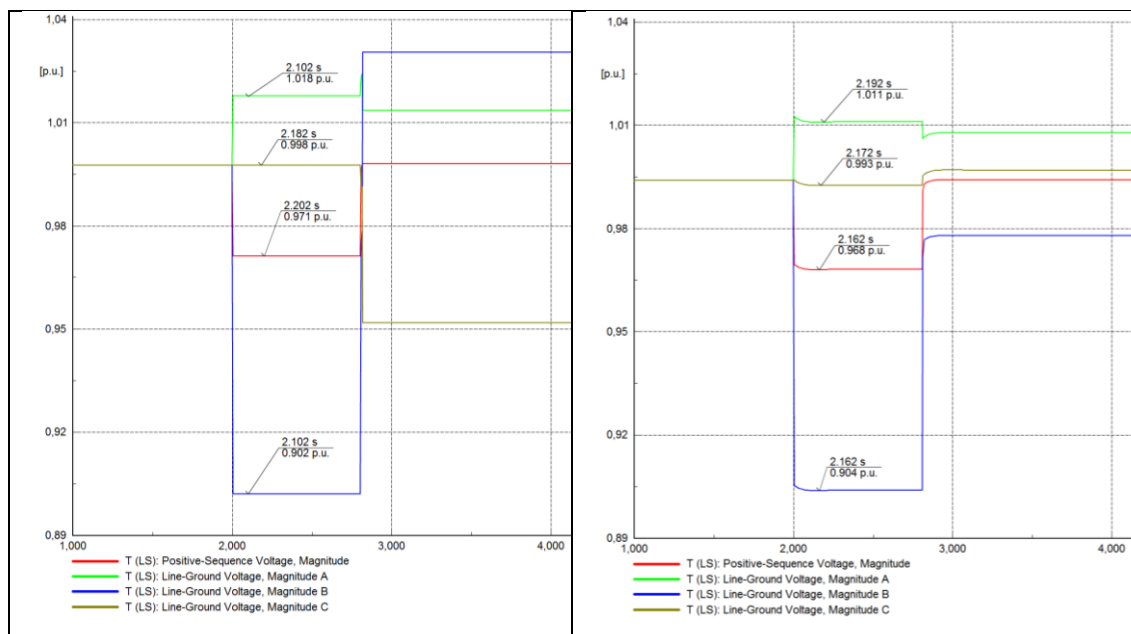
Feilsted	I _{lokal} [A]	I _{radial} [A]	Tid [s]	Endring tid [s]
L1	799,2	805,7	0,810	-0,005
L2	863,6	868,7	0,612	-0,004
L3	706,0	715,7	0,232	-0,001
L4	636,5	647,1	0,333	-0,002
L5	405,9	417,4	1,747	-0,022
L6	262,2	268,9	10,234	-0,188
L7	354,3	354,3	3,020	-0,038
L8	335,2	335,2	3,776	-0,048
L9	369,1	369,2	2,561	-0,027
L10	317,1	319,3	4,732	-0,052

«Endring i tid» er tiden vernet bruker på å løse ut uten maskinen minus tiden vernet bruker på å løse ut med maskinen. Negativ verdi for «Endring tid» betyr derfor at vernet bruker lengre tid på utløsning sammenlignet med tilfellet uten maskin. Lavere strøm og lengre utløsningstid observeres også ved kortslutning i punktet lengst fra generator, som kun kan brytes av radialenes hovedsikring. Dette blir illustrert i Tabell 10.

Tabell 10: Resultat av topolet kortslutning i A4, B1 og C3 med maskin ASI tilkoblet lavspentsiden av transformatoren.

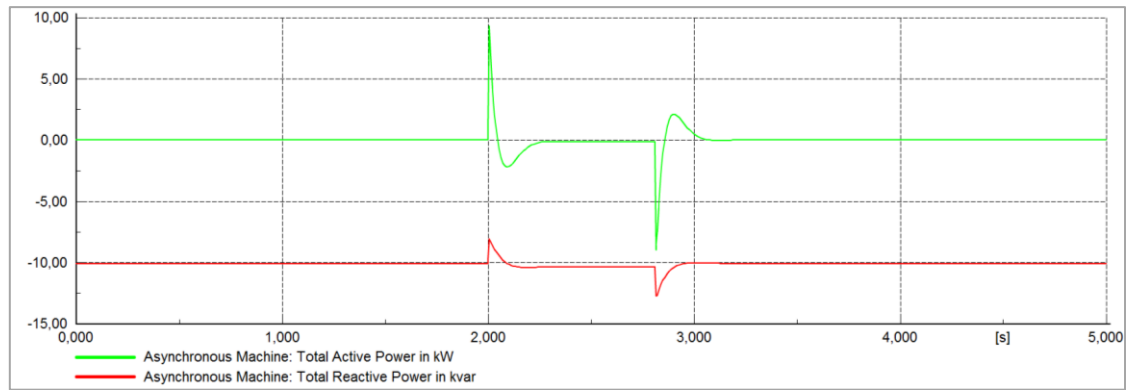
Feilsted	I _k [A]	Tid [s]	Endring tid [s]
A4	594,8	7,321	-0,067
B1	452,7	29,437	-0,484
C3	444,2	32,837	-0,403

Simuleringene viser både at utløsningstid for vern øker, og at kortslutningsstrøm synker. Grunnen til at maskinen fører til økt utløsningstid er fordi spenningen på bussen som maskinen er koblet til, ikke faller nok når det oppstår en feil lenger ute på radialen. Med en feil på L1, oppstår det et spenningsfall på lavspentsiden til transformatoren på 2,62% (fra 0,994 pu til 0,968 pu), som er for lavt til at maskinen bidrar med kortslutningsstrøm. Maskinen fortsetter å kjøre som last etter det transiente forløpet. Når maskinen trekker strøm både før og under feil, vil det gi økt strøm gjennom transformatoren, som igjen fører til større spenningsfall mellom generatoren (nettet) og tilkoblingspunktet til maskinen. Kortslutningsstrømmen blir derfor noe lavere ettersom spenningen i nettet er lavere med maskinen tilkoblet. Dette kan observeres ved simulering. Figur 16 viser spenningen på transformatoren når det oppstår topolet kortslutning i L1 etter 2 sekunder.



Figur 16: Spenning på T(LS) ved topolet kortslutning i L1. Figuren til venstre viser spenningen uten maskin koblet til, og figuren til høyre viser spenningen med maskin koblet til i T(LS).

Spenningen er lavere i transformatoren når motor er inkludert, og det fører til en lavere kortslutningsstrøm til feilen. Det samme observeres ved feil i andre områder langt fra maskinen. Figur 16 viser at det er forskjellig spenning på fasene i transformatoren, også etter feilen er klarert. Asymmetrien gjelder også for radial B og C, hvor det vil gå forskjellig strøm i fasene som en følge av dette. Situasjonen oppstår fordi sikringen ikke bryter alle fasene. Strømmen gjennom den lokale sikringen i fase A er 1,2A større enn strømmen i fase B. Dette forårsaker utløsning av vernet i fase A, slik at feilstrømmen slutter å gå. Etter dette går det ingen feilstrøm gjennom fase B, og vernet kobler derfor aldri ut denne fasen. Nettet leverer da kun strøm til lasten i fase B og C, noe som fører til asymmetri i hele nettet. I virkeligheten vil en så liten forskjell i strøm føre til at sikringen i begge fasene løses ut. Når sikringen i den ene fasen bryter, vil den andre sikringen ha smeltet så mye at den også sannsynligvis vil løse ut. Det vil da bare være spenning på fase C ved lasten, og siden lastene ikke har returvei når de andre fasene er brutt vil det ikke gå noe strøm til lasten. Sikringene bør være utstyrt med en funksjon som slår ut alle fasene i sikringen når én fase løses ut.



Figur 17: Aktiv og reaktiv effekt i maskinen ASI ved tilkobling til T(LS) ved feil i L1.

Figur 17 viser at maskinen leverer aktiv og reaktiv effekt til feilstedet når det oppstår en feil i L1. Dette er likevel ikke nok til å sørge for raskere utløsning av vernet ettersom bidraget er for lite, og maskinen fører til mindre strøm gjennom vernet i det stasjonære forløpet.

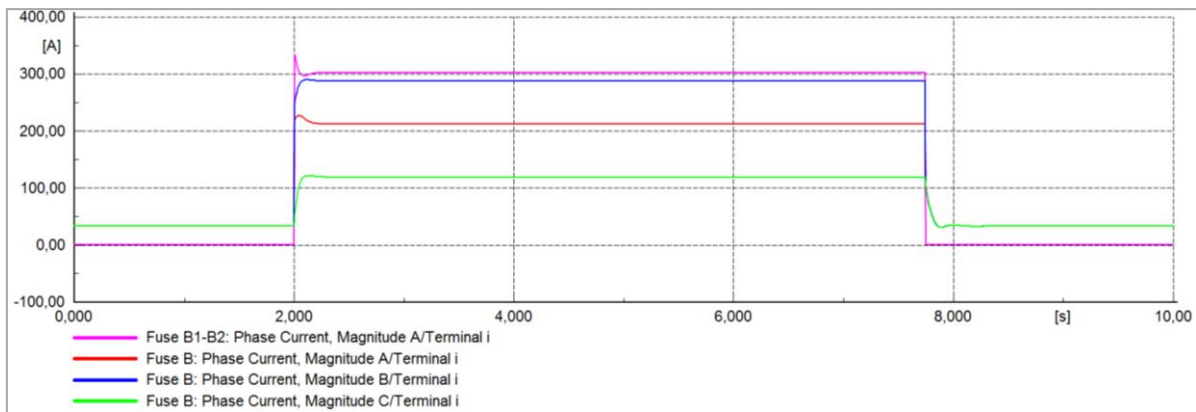
Denne løsningen fører til tregere utløsning av vern ved feil langt ute på linjen, i tillegg til at den fører til mer tap i nettet ettersom den vil trekke reaktiv effekt. Dersom det oppstår en feil nær transformatoren vil maskinen bidra med en kortslutningsstrøm. Dette er ikke vurdert i oppgaven ettersom en feil nær transformatoren allerede gir en høy kortslutningsstrøm som vist i Tabell 1 i kapittel 3.2. Maskinen må plasseres nærmere feilstedet dersom den skal være av nytte ettersom dette vil føre til et større spenningsfall på motorklemmene.

4.3 AS1 koblet til B1

Maskinen bør bli plassert nærmest mulig området med minst kortslutningsstrøm ettersom det er i dette området bidraget er viktigst. Det er ved lastene L6, L7 og L8 den laveste kortslutningsstrømmen oppstår. Plasseringen bør også være slik at maskinen fører til økt strøm gjennom samme vern som bidraget fra nettet går gjennom. Asynkronmaskinen AS1 blir derfor koblet til punktet B1, for å øke kortslutningsstrømmen gjennom sikringene til lastpunkter og derfor redusere utløsningstid ved en feil på radial B. Maskinen ligger nært alle lastene på radialen og bidraget vil gå gjennom det lokale vernet ved feil i et lastpunkt. Selektiviteten i nettet skal fortsatt opprettholdes, og derfor må sikringen som kobler ut feilstedet slå ut minst mulig av resten av nettet. For at det skal være aktuelt å benytte AS1 tilkoblet B1 må den bidra til raskere utløsning av sikringer og ikke føre til feilstrømmer som vil gjøre skade på nettet.

4.3.1 Maskinens bidrag til topolet kortslutning i lastpunkt

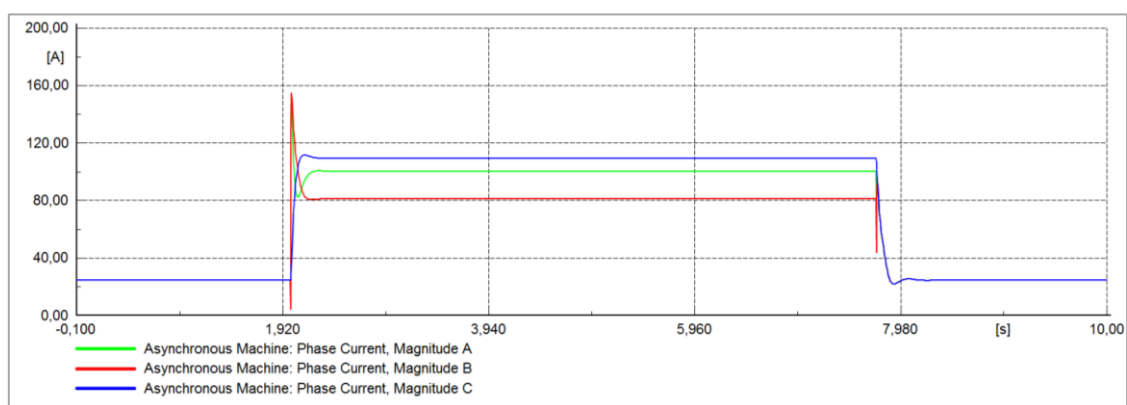
I dette eksempelet vil kortslutningsstrømmen ved feil på radialen være høyere rett etter feilen enn den er senere. Dette er på grunn av asynkronmaskinen sitt transiente forløp. Det er stor forskjell i strømmen gjennom de forskjellige fasene i sikringen for radialen med maskinen tilkoblet. Ved topolet kortslutning i L6 er strømmen gjennom hovedsikringen for radialen 270A uten maskinen koblet til. Gjennom fase B er den 287,6A med maskinen tilkoblet, mens for fase A blir den 216,9A. Den usymmetriske feilen fører til at asynkronmaskinen trekker forskjellig strøm i de forskjellige fasene. Tabell 11 og Tabell 12 viser strømmen for den fasen med høyest strøm gjennom hovedsikringen til radialen. Sikringen for den lokale lasten ligger etter maskinen i nettet, så feilstrømmen der vil være omtrent lik i begge feilfasene. Figur 18 viser strømmen gjennom den lokale sikringen og gjennom radialens sikring ved topolet kortslutning mellom fase A og B i lastpunktet L6.



Figur 18: Strøm gjennom hovedvern og lokalt vern ved topolet kortslutning mellom fase A og B i last L6. Strømmen gjennom fase A og fase B er tilnærmet likt gjennom det lokale vernet. Det går ingen strøm i fase C gjennom det lokale vernet.

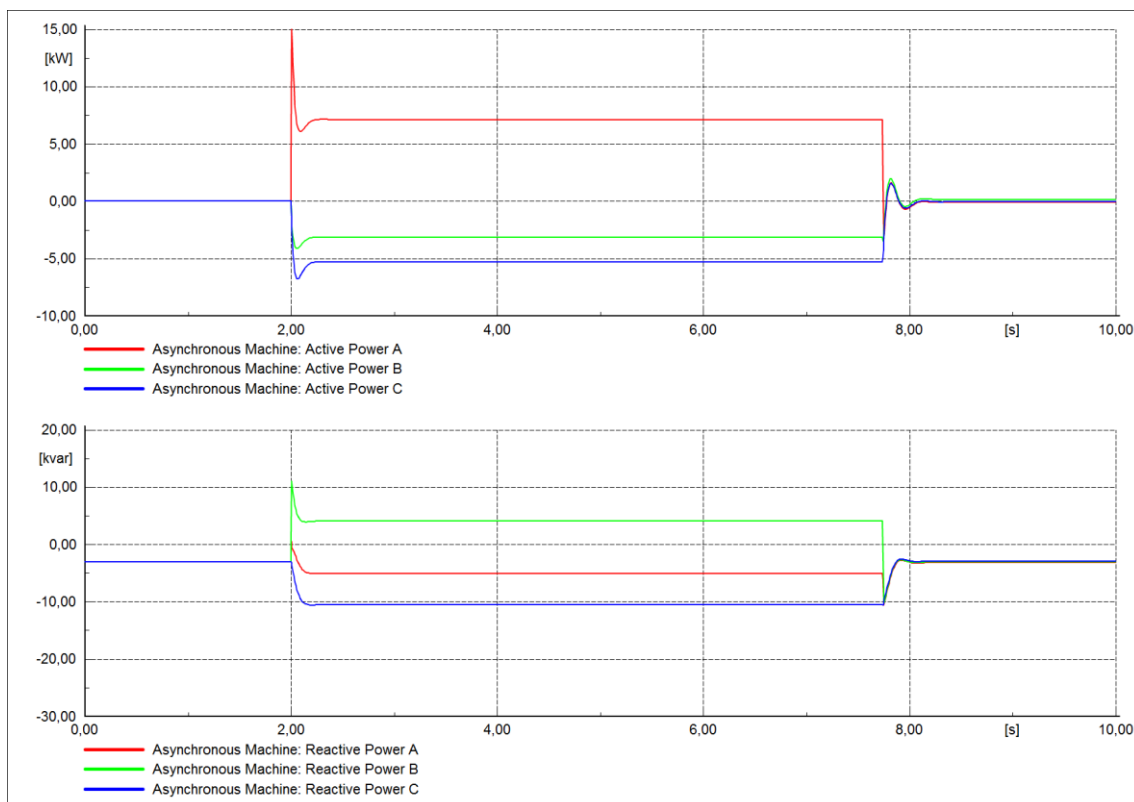
Som Figur 18 viser, er strømmen større gjennom vernet for lasten større i fase A og B enn strømmen inn på radialen. Maskinen sitt bidrag ser derfor ikke ut til å føre til problemer med selektiviteten i nettet. Strømmen fra nettet øker under feil selv om feilen ikke er på fase C, sannsynligvis fordi maskinen trekker strøm i fase C for å levere bidrag i fasene med feil. Strømmen gjennom hovedvernet svinger seg raskt tilbake til normal strøm etter feilen er klarert.

Eksempelet bygger videre på topolet kortslutning i lasten L6. Det blir fokusert på bidraget fra maskinen i feilsituasjonen. Strømmen i fase B inn til radialen er 287A og strømmen i fase B til feilstedet er 302A. Det kan derfor tenkes at det går 15A i fase B fra asynkronmaskinen til feilstedet. Grafen over strøm i alle fasene i asynkronmaskinen viser at strømmen i fase B er 81A i stasjonært tilfelle. Se Figur 19.



Figur 19: Strøm i maskinen under topolet kortslutning i L6.

Situasjonen oppstår fordi maskinen veksler mellom å trekke og levere strøm i fase B. Grafene i Figur 20 viser hvordan maskinen leverer aktiv effekt og trekker reaktiv effekt i fase A.

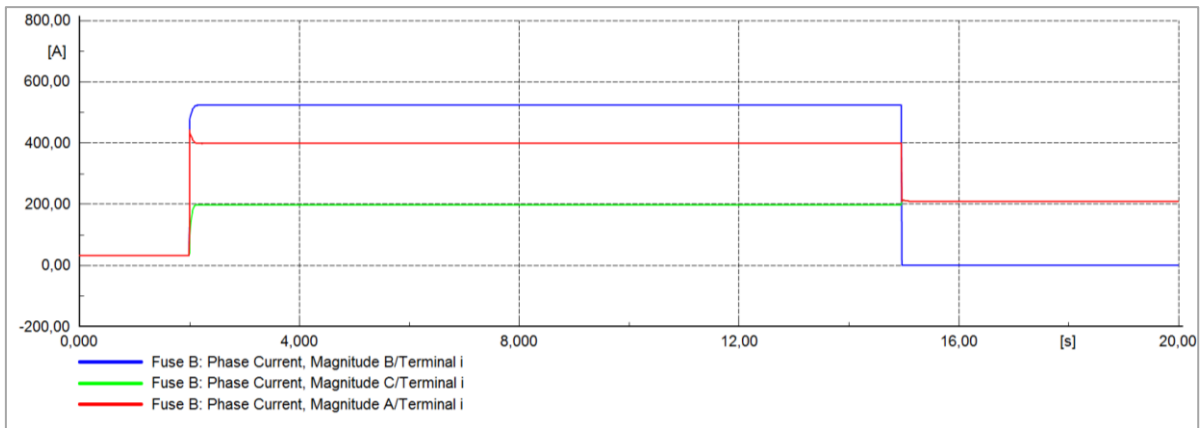


Figur 20: Aktiv og reaktiv effekt i asynkronmaskinen ASI ved tilkobling i B1 og topolet kortslutning i L6.

I fase B trekker maskinen aktiv effekt og leverer reaktiv effekt. For fase A trekker maskinen reaktiv effekt og leverer aktiv effekt. Maskinen trekker både aktiv og økt reaktiv effekt for fase C. Dette forklarer hvorfor strømmen fra nettet øker i fase C under feilsituasjonen. Maskinen er derfor i stand til å opprettholde nominell hastighet samtidig som den kan levere en konstant kortslutningsstrøm i både fase A og fase B, og reduserer utløsningstiden for det lokale vernet.

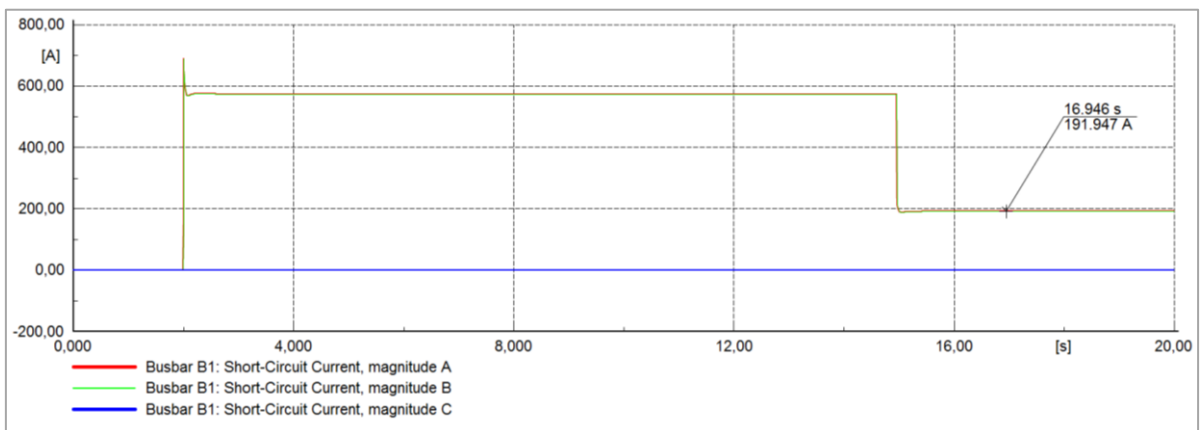
4.3.2 Topolet kortslutning i maskinens tilkobling B1

Av alle smeltesikringene som er dokumentert i nettet er det bare hovedvernet til radialen som opplever økt strøm dersom det oppstår en topolet feil i B1. Det blir antatt at det eksisterer et motorvern som beskytter maskinen mot å bli ødelagt av for høy strøm ved feil. Ved topolet kortslutning i B1 vil maskinen føre til høyere strøm i fase B gjennom radialens vern, som igjen fører til at bare fase B i sikringen løses ut.



Figur 21: Strøm gjennom radialens sikring ved topolet kortslutning i B1 med ASI tilkoblet samme punkt.

Fordi kortslutningen er mellom fase A og B, vil ikke nettet levere strøm direkte til feilen etter vernet løses ut fase B. Nettet leverer fortsatt strøm til fase A og C på radialen. Etter fase B er koblet ut vil maskinen fortsette å levere strøm til feilstedet, ettersom maskinen trekker strøm fra nettet gjennom de to fasene som ikke er koblet ut. Maskinen klarer å operere med normal hastighet ved å trekke strøm på bare to faser, og det vil derfor fortsette å gå strøm til feilstedet etter utløsning av fase B. Det antatte motorvernet må være dimensjonert for å koble ut maskinen tidsnok for å unngå kostbare skader. Samtidig bør ikke motorvernet koble ut maskinen for tidlig ettersom bidraget fra maskinen er viktig for å redusere utløsningstiden til nettets vern. Grafen i Figur 22 viser hvordan kortslutningsstrømmen til feilen endrer seg under forløpet. Det går 192A til feilen i fase A og C etter at fase B er koblet ut i radialens vern, som en følge av motorens bidrag.



Figur 22: Feilstrøm ved topolet kortslutning i B1 med ASI tilkoblet samme punkt.

Dersom motorvernet kobler ut maskinen etter fase B i sikringen er koblet ut vil strømmen i nettet returnere til normalt nivå. Det vil likevel være usymmetrisk last ettersom det bare er fase A og C i radialen som er koblet inn, og flere laster får halve spenningen de hadde

tidligere, som nevnt i kapittel 2.1.1. Det er derfor naturlig at nettselskapet bruker sikringer hvor de resterende fasene blir koblet ut dersom én fase i sikringen løses ut.

4.3.3 Samlet resultat ved topolet kortslutning

Tabell 11 viser strømmen gjennom sikring til lokal last, gjennom hovedradialen og tiden første sikring bruker på å løse ut ved feil. Strømmen gjennom radialets vern er størst for fase B, som stiger det første sekundet etter feilen oppstår. Den transiente strømmen gjennom radialets vern er derfor ikke blitt notert, ettersom det blir vanskelig å velge en verdi for transient bidrag. Transient strøm gjennom lokalt vern blir bare tatt med ved feil på maskinens radial ettersom maskinen ikke fører til transient bidrag ved feil på andre laster.

Tabell 11: Resultat av feil i alle lastpunkter i nettet med AS1 tilkoblet B1.

Feilsted	I _{lokal(trans)} [A]	I _{lokal} [A]	I _{radial} [A]	Tid [s]	Endring tid [s]
L1		797,7	804,2	0,816	-0,011
L2		861,8	866,9	0,617	-0,009
L3		705,0	714,7	0,234	-0,003
L4		635,6	646,4	0,335	-0,004
L5		405,6	417,2	1,753	-0,028
L6	332,7	302,0	387,4	5,742	4,304
L7	502,8	430,4	392,4	1,370	1,612
L8	465,5	402,7	368,0	1,794	1,934
L9		368,8	368,8	2,570	-0,036
L10		316,9	319,1	4,734	-0,054

Tabell 12 viser kortslutningsstrøm fra nettet (I_{radial}) og tid for utløsning av vern for topolet feil mellom transformatoren og vern for lastpunkt. Trepolet kortslutning i B1 er tatt med senere i kapittelet for å se på størrelsen og konsekvensen av denne feiltypen i samme punkt som maskinen er tilkoblet nettet.

Tabell 12: Resultat av feil i A4, B1 og C3 med AS1 tilkoblet B1.

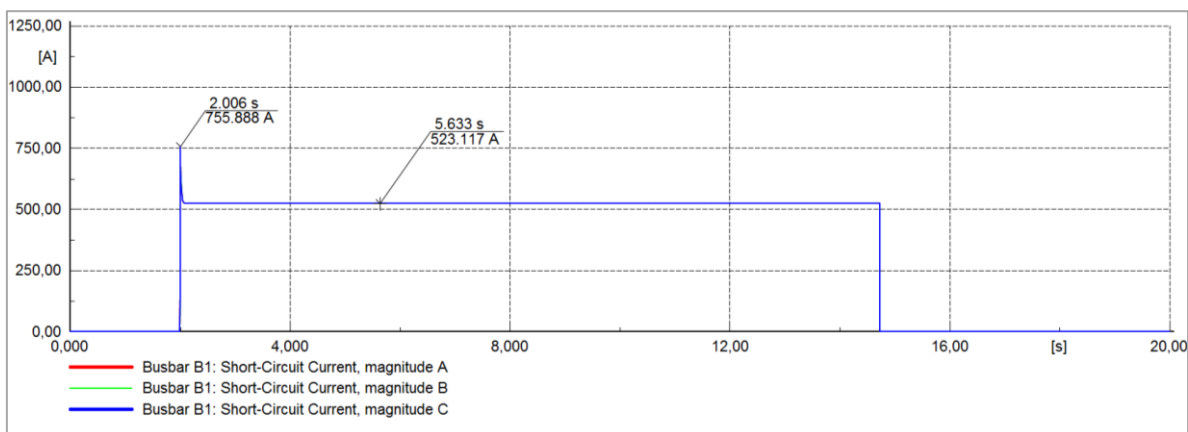
Feilsted	I _{radial} [A]	Tid [s]	Endring tid [s]
A4	594,1	7,353	-0,099
B1	521,6	12,959	15,994
C3	441,7	33,058	-0,624

Utløsningstiden blir redusert uavhengig av hvilket lastpunkt på radial B feilen oppstår i. Dersom feilen oppstår i en radial hvor maskinen ikke er tilkoblet, vil utløsningstiden bli tregere. Likevel kan det observeres av Tabell 11 at den økte utløsningstiden på radialer uten maskin er liten sammenlignet med forbedringen av utløsningstid på radial med maskin. Tabell 12 viser at maskinen vil føre til en betydelig forbedring av vernets funksjon ved topolet kortslutning i B1. Dette skyldes at maskinen trekker strøm fra nettet samtidig som den leverer til feilen. Fordi feilen er usymmetrisk vil maskinen trekke høyere strøm i fase B, og vernet kobler ut fase B raskere enn uten maskin.

4.3.4 Resultat ved trepolet kortslutning i B1

Det har blitt fokusert på topolet kortslutning i denne oppgaven ettersom det er denne feilen som produserer den laveste kortslutningsstrømmen. Det er likevel interessant å studere effekten av trepolet kortslutning i B1, ettersom maskinen i dette tilfellet ikke skal føre til økt strøm gjennom radialens vern, men likevel økt kortslutningsstrøm til feilstedet.

Ved en trepolet kortslutning i B1 vil ikke bidraget fra den elektriske maskinen påvirke sikringen for radialen. All strøm gjennom sikringen vil komme fra nettet, og strømmen fra maskinen blir et bidrag til feilstedet som ikke oppdages av vernet. Figur 23 viser kortslutningsstrømmen i feilstedet.



Figur 23: Kortslutningsstrømmen i feilstedet ved trepolet kortslutning i B1 med AS1 tilkoblet samme punkt.

Motorens bidrag er differansen mellom den transiente og den stasjonære feilstrømmen. Den tilfører et kortvarig bidrag ved trepolet feil i B1. Maksimalt bidrag fra maskinen er 361A, 6ms etter feilen oppstår. I denne perioden holder strømmen gjennom sikringen på

å stige, så det stasjonære bidraget fra nettet kommer litt etter det største bidraget fra maskinen. Dette fører til at den totale strømmen til feilen ikke blir lik summen av transient bidrag fra maskinen og stasjonært bidrag fra nettet (883,7A) rett etter feilen har oppstått. Dette kan være fordi simuleringen har for grove steg mellom hver utregning. Hadde simuleringen gjennomført flere utregninger per sekund ville kanskje den totale strømmen vært noe annerledes ettersom denne hendelsen er så kortvarig. Maskinen bidrar til 44,5% høyere korslutningsstrøm i feilstedet, men i transient periode og ingen bidrag i stasjonær. Maskinen vil ikke føre til en strøm av ødeleggende størrelse ved denne plasseringen i nettet ettersom bidraget er over så raskt. Utløsningstiden er 12,752s for hovedvernet i dette tilfellet. Dersom feilen skulle oppstå lenger fra transformatoren vil det være andre vern som får feilstrømmen og maskinen vil da føre til enda raskere utløsning.

4.4 AS1 koblet til andre radialer

Dette delkapittelet omhandler tilkobling av asynkronmaskinen i radial A og i radial C separat. Det blir bestemt hvilket punkt maskinen skal være tilkoblet for hver radial.

4.4.1 Tilkobling av AS1 til radial C

De tidligere casene viser at maskinen vil bidra med å løse ut vernene raskere dersom maskinen ligger nær feilstedet. For radialen C er det naturlige tilkoblingspunktet for maskinen i C3. Dette er fordi maskinen da vil være nært det området hvor den laveste feilstrømmen oppstår. Den blir også plassert slik at bidraget fra maskinen går gjennom de lokale sikringene inn til områdene med lavest feilstrøm, og maskinen kan bidra til feil i både L9 og L10. Effekten maskinen har ved tilkobling i C3 blir vist ved RMS simuleringer, hvor resultatene er fremstilt i Tabell 13.

Tabell 13: Resultat ved tilkobling av AS1 til C3, med feil i L1 og på laster i radial C.

Feilsted	$I_{\text{lokal}}(\text{trans})$ [A]	I_{lokal} [A]	I_{radial} [A]	Tid [s]	Endring tid [s]
L1		797,8	804,4	0,815	-0,005
L9	566,5	456,6	402,5	1,049	1,512
L10	448,4	379,7	338,5	2,279	2,453

Maskin i én radial fører ikke til raskere utløsning ved feil på andre radialer, noe som også er vist i Tabell 11. Derfor er kun feil på L1 inkludert fra andre radialer for å vise at dette også er tilfellet ved maskin tilkoblet C3.

Tabell 14: Resultat ved tilkobling av AS1 til C3 med feil i A4, B1 og C3.

Feilsted	I_{radial} [A]	Tid [s]	Endring tid [s]
A4	594,2	7,349	-0,095
B1	450,3	29,557	-0,604
C3	499,8	16,632	15,802
C3 (trepolet)	513,0	14,247	-

I Tabell 14 kan det observeres at maskinen vil føre til redusert utløsningstid ved topolet kortslutning i maskinens tilkoblingspunkt, og økt utløsningstid dersom feilen oppstår på andre radialer. Forbedringen ved feil på radialen maskinen er tilkoblet er mye større enn den negative effekten maskinen har ved feil i andre radialer. Ved trepolet kortslutning i C3, vil utløsningstiden være mindre enn for topolet kortslutning, fordi nettet gir et større bidrag ved denne feiltypen. Den totale feilstrømmen for trepolet kortslutning i C3 vil være større med maskinen tilkoblet, uten at maskinen fører til raskere utløsning av nettets vern.

4.4.2 Tilkobling av AS1 til radial A

Også her skal maskinen plasseres slik at utløsningstiden reduseres seg mest mulig. Tabell 6 viser at vernet for last L5 er den med klart lengst utløsningstid. Denne bruker mer enn dobbelt så lang på å løse ut som den med nest lengst utløsningstid. Plassering av maskinen i punktet A4 vil føre til best forbedring av sikringen til L6, men også raskere utløsning for alle sikringene i radial A. I denne oppgaven blir det ikke undersøkt om en annen plassering vil føre til raskere utløsning totalt sett.

Som for tilkobling av maskin i radial C3, blir det fokusert på strøm og utløsningstid ved feil på den radialen med tilkoblet maskin ettersom det er den som får en forbedring av maskinen. Det er utført RMS simuleringer for hvert enkelt tilfelle.

Tabell 15: Resultat av topolet kortslutning i lastpunkter på radial A, med AS1 tilkoblet A4,

Feilsted	I _{lokal} (trans) [A]	I _{lokal} [A]	I _{radial} (trans) [A]	I _{radial} [A]	Tid [s]	Endring tid [s]
L1	967,8	885,4	791,4	840,6	0,555	0,250
L2	1058,7	963,2	861,3	910,7	0,408	0,200
L3	877,5	789,8	705,3	755,8	0,149	0,082
L4	818,1	726,4	642,5	694,2	0,201	0,130
L5	520,5	464,2	403,5	450,6	0,995	0,730

Plassering av maskinen AS1 i punktet A4 fører til en forbedring av alle de lokale vernene i radialen. Alle vernene løses ut på under ett sekund for laveste kortslutningsstrøm.

Tabell 16: Resultat av feil på A4, ved maskinen AS1 tilkoblet feilstedet.

Feilsted	I _{radial} [A]	Tid [s]	Endring tid [s]
A4	667,1	4,873	2,381
A4 (trepolet)	685,7	4,392	-

Maskinen fører også til raskere utløsning ved topolet kortslutning i A4, men har ikke en effekt på utløsningstiden til vernet ved trepolet kortslutning i A4.

Et problem med en maskin i denne radialen er at det oppstår for høy belastningsstrøm for vernet, som er på 160A basert på utregningene gjort ved beregning av vern. Ved dimensjonering av vernet til radial A er det tatt utgangspunkt i maks last fra lastene på radialen og en samtidighetsfaktor på 0,6. Dette gav 158A i laststrøm, og må være mindre enn vernets merkestrøm som er satt til 160A. Maskinen trekker 23,9A i normal drift i denne posisjonen og denne strømmen vil gå kontinuerlig. Med andre ord må vernet for radial A økes i størrelse dersom det skal kobles en maskin av denne størrelsen til på radialen. Total laststrøm for radialen blir regnet ut med strømmen maskinen trekker.

$$I_b(A) = (65 + 50 + 50 + 50 + 50)A \cdot 0,6 + 23,9A = 182,9A$$

Vernets størrelse må derfor økes til 200A. Videre må det sjekkes at vernet står i henhold til kravene i formel 2.1 og formen 2.3. Vernet for radial A dekker linjer som tåler maksimalt 220A kontinuerlig.

$$183A \leq 200A \leq 220A$$

Kravet i formel 2.1 er bestått. Den må også bestå kravet om impulsstrøm fra formel 2.3 må også.

$$200A \cdot 1,6 \leq 1,45 \cdot 220A \rightarrow 320A \leq 319A$$

Dette kravet er ikke bestått, da det ikke kan brukes 200A sikring for denne radialen med de kablene som er brukt. I den virkelige situasjonen er ikke last L4 tilkoblet nettet. Det ville da være mulig å legge inn maskinen med 160A sikring til radialen. I denne oppgaven er det tatt utgangspunkt i at alle lastene er tilkoblet, så AS1 kan ikke bli koblet til i radial A. Etersom total laststrøm uten maskinen er regnet til 158A kan en elektrisk maskin i radialen dra maksimalt 2A i normal lastsituasjon basert på formel 2.3. En løsning på problemet med laststrømmen til asynkronmaskinen kan være å bruke en kondensatorbank sammen med maskinen, som leverer den reaktive effekten maskinen trenger.

4.4.3 Tilkobling av kondensatorbank sammen med AS1 i A4

Problemet med å ha maskinen tilkoblet radial A er at maskinen drar for høy laststrøm i forhold til hva vernet er dimensjonert for. I normal lastsituasjon går det 38,2A gjennom vernet for radial A. Basert på hva lastene kan trekke er laststrømmen beregnet til å være 158A ved beregning av vern. Maskinen trekker 23,9A i normal lastsituasjon. Etersom laststrømmen var beregnet til 158A før maskinen ble koblet inn kan ikke strømmen gjennom sikringen, som en konsekvens av maskinen, øke mer enn 2A ved normal lastsituasjon. Ved å legge inn en kondensatorbank sammen med maskinen i A4 kan den levere reaktiv effekt til maskinen, og den økte strømmen i nettet kan bli redusert. For å få kondensatoren til å produsere den reaktive effekten som asynkronmaskinen trekker blir den satt til 11kVAr. Dette fører til strømmen gjennom sikringen blir 38,3A med maskinen tilkoblet. Dette innebærer en økning på 0,1A under normal lastsituasjon som en konsekvens av tilkobling av AS1 og kondensatorbank i A4. Maskinen kan derfor brukes i nettet sammen med sikringen på 160A, så lenge en kondensatorbank av denne størrelsen er koblet til samme punkt.

4.5 AS1 koblet til A4, B1 og C3

Resultatet ved én maskin tilkoblet et punkt i én radial er vist i tidligere eksempel. I denne delen vil det blir koblet én maskin til hvert av punktene A4, B1 og C3. Selv om AS1 ikke kan være tilkoblet radial A uten kondensator blir det testet hvordan resultatet blir dersom alle maskinene blir koblet til, hvor ingen har kondensator. Dette blir gjort fordi radialen kan ha AS1 koblet til i det virkelige tilfellet og fordi det vil være av interesse for andre lignende nett med annen lastkarakteristikk.

Tabell 17 er basert på RMS simulering av topolet kortslutning ved hver last, hvor det blir kjørt en ny simulering for hver feil. I_{lokal} viser til fasen med høyest strøm for sikringen til lastpunktet, og I_{radial} viser strømmen gjennom sikringen til radialen. «(trans)» viser til at verdien er for det transiente forløpet.

Tabell 17: Resultat av feil i hvert lastpunkt, ved AS1 koblet til hver radial.

Feilsted	$I_{\text{lokal(trans)}} [A]$	$I_{\text{lokal}} [A]$	$I_{\text{radial}} [A]$	Tid [s]	Endring tid [s]
L1	958,2	875,4	835,4	0,572	0,233
L2	1048,3	952,7	904,7	0,420	0,188
L3	868,7	783,4	751,0	0,154	0,077
L4	809,8	722,2	689,5	0,207	0,124
L5	515,5	461,9	447,2	1,027	0,698
L6	333,5	298,8	286,3	5,926	4,120
L7	498,1	426,1	390,0	1,414	1,568
L8	461,2	398,7	365,9	1,851	1,877
L9	561,7	452,9	400,2	1,080	1,454
L10	444,5	375,2	336,9	2,334	2,346

«Endring tid» er forbedringen av utløsningstid sammenlignet med tilfellet uten maskiner tilkoblet nettet. Det er ikke blitt notert den transiente strømmen gjennom radialets vern ettersom høyeste strøm er i fase B og den er stigende fra feiltidspunkt til det stasjonære forløpet.

Tabell 18: Resultat av feil i A4, B1 og C3, ved AS1 koblet til hver radial i feilstedet.

Feilsted	I_k [A]	Tid [s]	Endring tid [s]
A4	662,0	4,996	2,258
A4 (trepolet)	681,3	4,495	-
B1	518,0	13,489	15,464
B1 (trepolet)	519,7	13,223	-
C3	496,5	17,235	15,199
C3 (trepolet)	509,8	16,784	-

«Endring tid» i Tabell 18, for kortslutning av tre faser, er ikke sammenlignet med noen utløsningstid fordi maskinen ikke fører til betydelig endring ved denne feilen.

Med tre maskiner tilkoblet nettet går det også mer strøm i normal tilstand for nettet. Transformatoren går med 41,8% av maks last i dette tilfellet, når lastene trekker gjennomsnittlig last. Det er heller ingen linjer som er nær å bli overbelastet. Det er antatt at det eksisterer et transformatorvern som kobler ut transformatoren dersom den blir overbelastet. Den ekstra laststrømmen til maskinene i radial B og C vil ikke utgjøre noe problem for linjen og hovedvernet til radialene ettersom vernet er dimensjonert for at lasten skal kunne øke. Dersom maskinen skal bli koblet til radial A må det også bli koblet til en kondensatorbank for å levere den reaktive effekten til maskinen.

4.6 Asynkronmaskin med større startstrøm

For å teste hvor stor betydning asynkronmaskinen sine parameterverdier har for utløsningstiden blir det testet en asynkronmaskin med høy startstrøm. Dette blir testet fordi en asynkronmaskin med høy startstrøm også skal levere en høyere kortslutningsstrøm. Denne asynkronmaskinen, AS2, er parametrisert slik at låst rotor strøm er 7,7 pu, mot 4,1pu på AS1.

4.6.1 AS2 koblet til B1

Med AS2 tilkoblet radial B i punktet B1, blir utløsningstid målt for topolet kortslutning i alle lastpunktene i radialen. «Endring tid» viser som før forskjellen mellom utløsningstid i dette tilfellet og utløsningstid uten maskiner i kretsen. Transient strøm gjennom vernet til radialen er ikke tatt med fordi den varierer i stor grad.

Tabell 19: Resultat av topolet kortslutning i lastpunkt på radial B, med AS2 tilkoblet B1.

Feilsted	I _{lokal} (trans) [A]	I _{lokal} [A]	I _{radial} [A]	Tid [s]	Endring tid [s]
L6	408,3	322,6	285,3	4,379	5,667
L7	642,6	473,0	400,1	0,918	2,064
L8	585,0	438,5	372,7	1,236	2,492

Det observeres at det er en stor forbedring av utløsningstiden til vernet sammenlignet med utgangspunktet hvor ingen maskin var tilkoblet. Ved topolet kortslutning i L6, L7 og L8 fører maskinen til henholdsvis 56,4%, 69,2% og 66,8% raskere utløsning av vern sammenlignet med utgangspunktet.

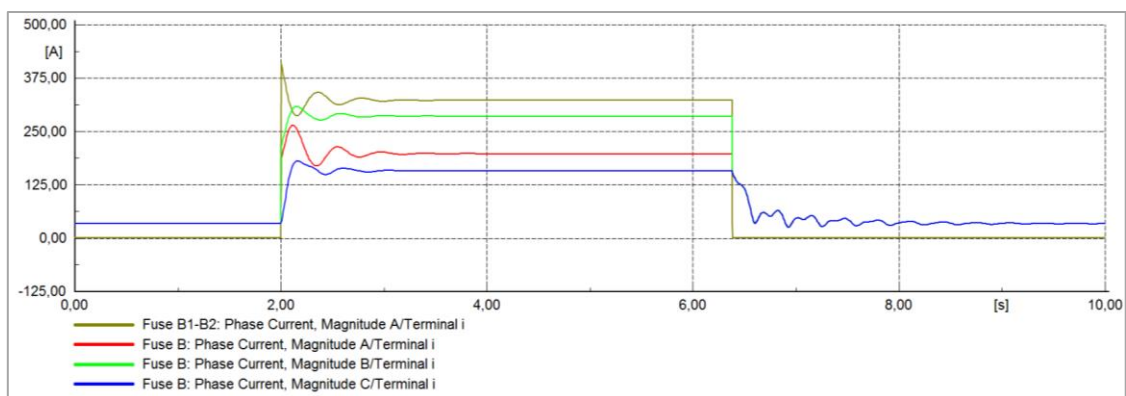
Tabell 20: Resultat av feil i B1, med AS2 tilkoblet feilstedet.

Feilsted	I _{radial} [A]	Tid [s]	Endring tid [s]
B1 (trepolet)	523,1	12,725	-
B1	548,3	9,863	19,090

Også ved topolet feil i B1 er det betydelig forbedring ved bruk av AS2 fremfor ingen maskin. Som tidligere blir ikke endring av tid tatt med for trepolet kortslutning ettersom maskinen ikke fører til forbedring av utløsningstid ved trepolet feil i B1. Likevel vil maskinen bidra med en feilstrøm som ikke oppdages av radialets vern. Det vil gå en transient strøm gjennom feilstedet på 1032A ved trepolet kortslutning i B1. Den transiente strømmen som kommer fra maskinen er på 707,3A. Den største strømmen fra nettet kommer litt etter det største bidraget fra maskinen. Den stasjonære strømmen i feilstedet er 523,1A, og det er kun nettet som leverer denne. Det blir antatt at det eksisterer et motorvern som beskytter maskinen. Maskinen må uansett tåle denne strømmen i et transient forløp ettersom startstrømmen til maskinen vil være enda større. En slik startstrøm kan også være et problem for sikringene som beskytter nettet. Det blir ikke testet i oppgaven hvordan startstrømmen vil påvirke nettet, men dersom det vil være et

problem kan maskinen startes opp med metoder som reduserer startstrøm. Dette kan gjøres med for eksempel frekvensomformer eller kondensatorbank [13].

Problemet med en trepolet kortslutning mellom maskinen og nettet, er at vernene bare får strømgjennomgang fra en av kildene. Vernet for hele radial B ser bare en strøm fra nettet, og motorvernet ser bare bidraget fra maskinen. Størrelsen på bidraget fra maskinen er fortsatt viktig ettersom det påvirker strømmen som går til feilstedet og kan være ødeleggende. Kabelen som ligger nærmest B1, mellom B1 og transformatoren, er hengekabelen EX 1x95. Denne tåler 7kA i ett sekund og 220A ved normal lastsituasjon. Ved en feil på denne kabelen vil det ikke gå mer strøm fra maskinen enn det gjør ved feil på B1. Bidraget fra maskinen til feil på B1 er maksimalt 707,3A og den er 0A etter ett sekund. Bidraget fra maskinen vil derfor ikke ødelegge kabelen. Det er viktig å passe på at kabelen som kobler maskinen til nettet tåler mer enn 707,3A i ett sekund dersom denne maskinen skal bli brukt. Ved en feil lenger nede i nettet går kortslutningsbidrag fra både maskinen og nettet gjennom sikringen og vil derfor føre til raskere utløsning. Trepolet kortslutning i punktet B1 blir punktet på radial B som gir lengst utløsningstid ved AS2 koblet til B1. Dersom feilen er nærmere transformatoren vil kortslutningsstrømmen fra transformatoren øke, og sikringen til radialen vil løse ut raskere. Strøm gjennom sikring til radialen og strøm gjennom fase A til lokalt vern, ved AS2 i B1 og topolet feil i L6 er vist i Figur 24.



Figur 24: Strøm gjennom sikringer ved topolet kortslutning i L6 og AS2 tilkoblet B1.

Det observeres at det oppstår store svingninger i strømmen når det oppstår en stor endring i nettet med AS2 tilkoblet. Dette skjer både når det oppstår feil på radialen og når sikringen kobler ut feilen.

4.6.2 AS2 koblet til hver radial

Asynkronmaskinen AS2 har vist seg å redusere utløsningstiden når maskinen er tilkoblet B1. Det er også nødvendig å teste denne maskinen tilkoblet alle radialene for å få bedre sammenligningsgrunnlag mot AS1. Med tre asynkronmaskiner av typen AS2 koblet til hver sin radial i punktene A4, B1 og C3 det simulert feil. Resultatene er gitt av Tabell 21 og Tabell 22.

Tabell 21: Resultat av feil ved hvert lastpunkt med AS2 tilkoblet hver radial.

Feilsted	Ilokal(trans) [A]	Ilokal [A]	Iradial [A]	Tid [s]	Endring tid [s]
L1	1084,7	942,5	843,2	0,473	0,332
L2	1199,4	1006,1	920,2	0,350	0,258
L3	1006,6	815,7	731,0	0,097	0,134
L4	967,2	735,7	687,9	0,133	0,198
L5	616,4	499,3	545,3	0,765	0,960
L6	404,4	319,0	283,5	4,525	5,521
L7	635,9	469,8	397,0	0,946	2,036
L8	578,9	437,5	369,7	1,276	2,452
L9	731,8	497,0	407,6	0,699	1,835
L10	546,7	406,0	338,2	1,663	3,017

Strømmen i Tabell 21 i stasjonært tilfelle kan være noe unøyaktig. Som nevnt tidligere fører AS2 til store svingninger i strømmen etter feilen oppstår. Dersom vernet kobler ut raskt rekker ikke strømmen å stabilisere seg før vernet slår ut. Strømmen er i disse tilfellene målt rett før vernet bryter strømmen. Resultatene i Tabell 21 viser en god forbedring med AS2 tilkoblet sammenlignet med tilfellet hvor det ikke er noen maskiner koblet inn.

Tabell 22: Resultat ved feil i A4, B1 og C3, med tilkobling av AS2 i hver radial.

Feilsted	Iradial [A]	Tid [s]	Endring tid [s]
A4	696,3	4,188	3,066
B1	544,2	10,168	18,785
C3	517,6	13,567	18,867

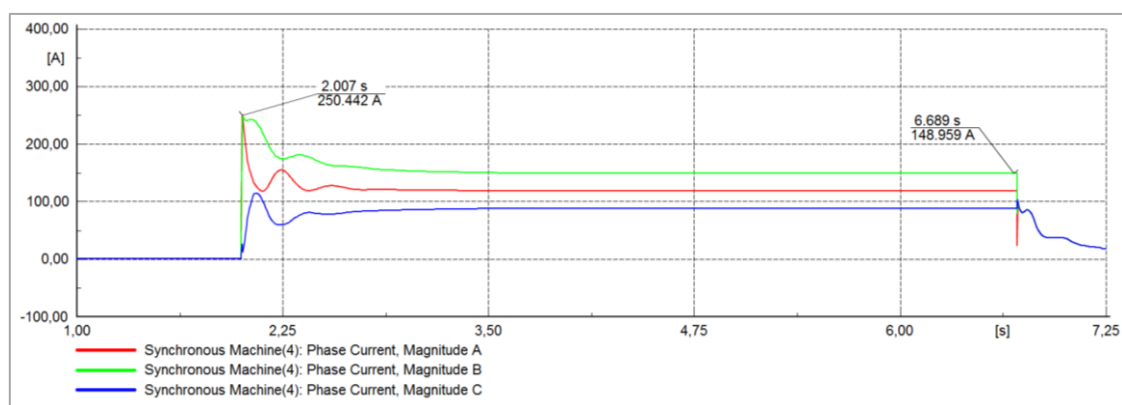
Trepolet kortslutning blir ikke tatt med i Tabell 22 ettersom maskinen ikke har betydelig påvirkning på vernet i dette tilfellet. Tabellen viser at AS2 fører til god forbedring av utløsningstid ved denne feiltypen.

4.7 Bruk av synkronmaskin

Det er av interesse å undersøke hvordan en synkronmaskin i nettet kan øke kortslutningsstrømmen og bidra til raskere utløsning av vern. Synkronmaskinen trekker nesten ingen strøm ved normal lastsituasjon. Dette vil være en stor fordel i radial A ettersom vernet er dimensjonert uten særlig mulighet for utvidelse av last på radialen. Den kan også brukes til å fasekompensere, så den kan produsere eller konsumere reaktiv effekt avhengig av behovet. I tillegg vil synkronmaskinen levere et konstant bidrag til feilstedet dersom det oppstår en trepolet kortslutning nær maskinen.

4.7.1 Synkronmaskin (SM1) med konstant magnetisering

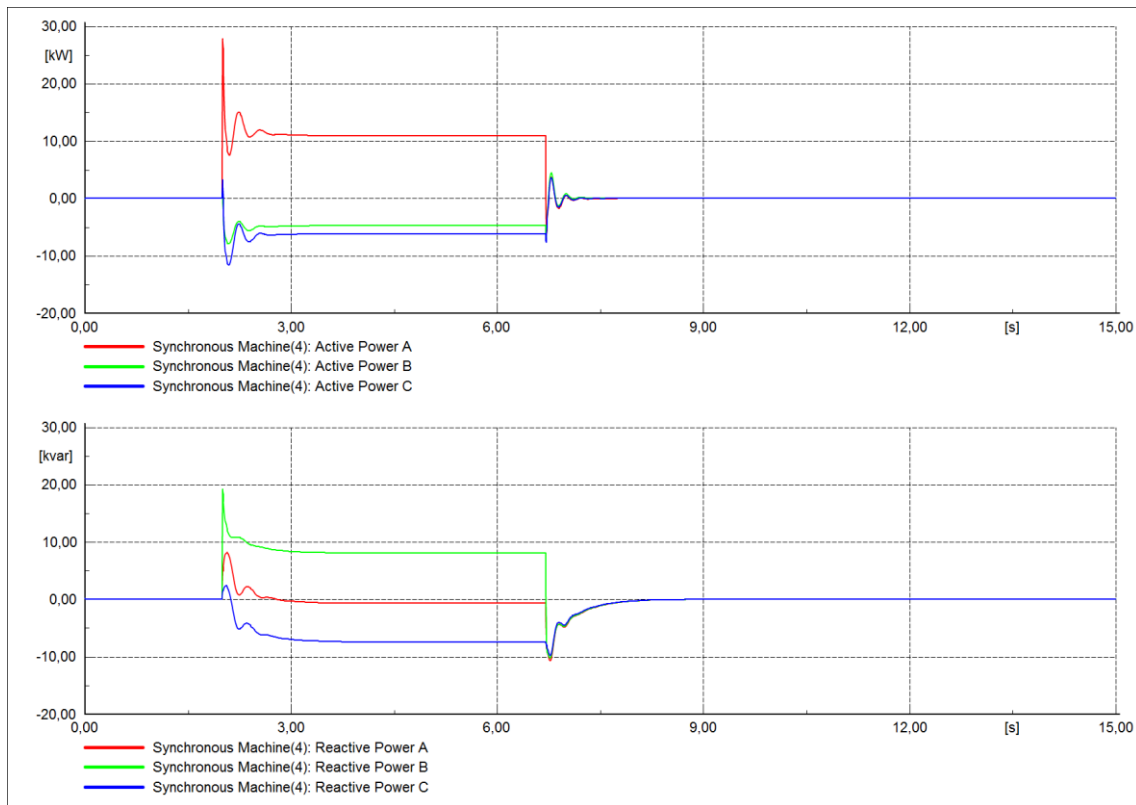
SM1 blir koblet til B1 for å studere effekten maskinen kan ha på feilen som gir lavest kortslutningsstrøm i nettet. Denne situasjonen er også brukt for asynkronmaskinen så det er mulig å sammenligne maskinene sin påvirkning. Synkronmaskinen SM1 blir brukt med konstant magnetisering i dette delkapittelet. Det blir fokusert på topolet kortslutning i lastpunktene siden dette gir den laveste kortslutningsstrømmen i nettet, i tillegg til topolet kortslutning i A4, B1 og C3 ettersom dette gir en lav kortslutningsstrøm som bare blir oppdaget av radialens hovedvern. Figur 25 viser aktiv og reaktiv effekt i maskinen ved topolet kortslutning i L6. Maskinen har ikke AVR og er tilkoblet B1. Dette fører til en utløsningstid på 4,72 sekunder for vernet til L6.



Figur 25: Strøm gjennom alle fasene i synkronmaskin SM1 uten AVR ved topolet kortslutning i L6. Maskinen er tilkoblet B1.

Grafen for strøm fra maskinen i alle fasene er gitt i Figur 25 ved topolet kortslutning i L6. Strømmen i transient forløp er 250A for både fase A og B. Den største strømmen i

stasjonært tilfelle er 149A og er for fase B i maskinen. For å se når maskinen leverer og når den trekker strøm må grafene for aktiv og reaktiv effekt i Figur 26 utforskes.



Figur 26: Aktiv og reaktiv effekt i maskinen ved topolet kortslutning i L6. Den øverste delen av figuren viser aktiv effekt og den nederste viser reaktiv effekt. Ved positiv verdi leverer maskinen effekt og med negativ vil maskinen trekke.

Figur 26 viser aktiv og reaktiv effekt i maskinen. Figuren viser at under topolet kortslutning i L6 med maskinen tilkoblet B1 vil synkronmaskinen levere aktiv effekt i fase A mens den trekker aktiv effekt i de andre to fasene. Samtidig vil den levere reaktiv effekt for alle fasene i transient forløp mens den trekker reaktiv effekt fra fase A og C og leverer i fase B i stasjonært forløp. Levert aktiv og reaktiv effekt er definert som positive verdier i oppgaven.

Det er tidligere vist at én maskin i hver hovedradial gir en raskere utløsning av vernene, uavhengig av hvilket lastpunkt feilen oppstår i. I tillegg utgjør en maskin på én radial en liten negativ effekt dersom en feil oppstår på en annen radial en den maskinen er koblet til. Det blir derfor kun tatt med tabell over strømmen og utløsningstider ved en maskin tilkoblet hver radial.

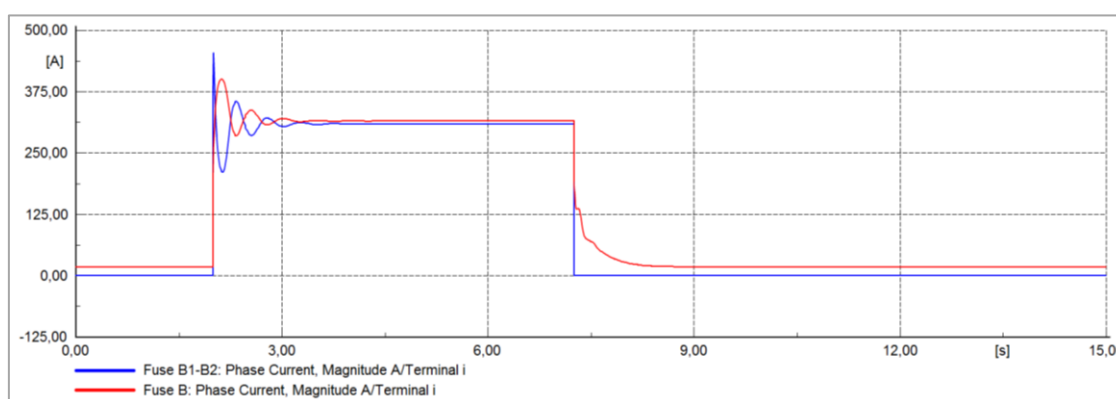
Tabell 23: Strøm gjennom vern nærmest feilen og utløsningstid til første vern som kobler ut. Det er ikke oppgitt strøm i tilfellene strømmen svinger for mye til å sette én verdi.

Feilsted	I _{lokal(trans)} [A]	I _{lokal} [A]	I _{radial} [A]	Tid [s]	Endring tid [s]
L1	1053,9	904,5	780,5	0,493	0,312
L2	1159,8	-	-	0,360	0,248
L3	968,2	-	-	0,151	0,080
L4	917,0	-	-	0,177	0,154
L5	583,3	488,0	364,1	0,822	0,903
L6	373,6	316,3	280,4	4,734	5,312
L7	587,9	461,0	383,6	0,997	1,985
L8	539,3	428,2	282,6	1,350	2,378
L9	683,2	513,4	392,1	0,662	1,872
L10	521,2	411,6	327,4	1,554	3,126

Tabell 23 viser strømmen gjennom sikringene nærmest det gjeldende feilstedet. Det blir satt mest fokus på utløsningstid ettersom strømmen varierer etter feilen på grunn av maskinen sitt bidrag. Tabellen viser at bruk av SM1 tilkoblet A4, B1 og C3 gir forbedring av utløsningstid ved feil i samtlige lastpunkt. Forbedringen varierer fra 34,6% for vernet til L3, til 73,9% for vernet til L9.

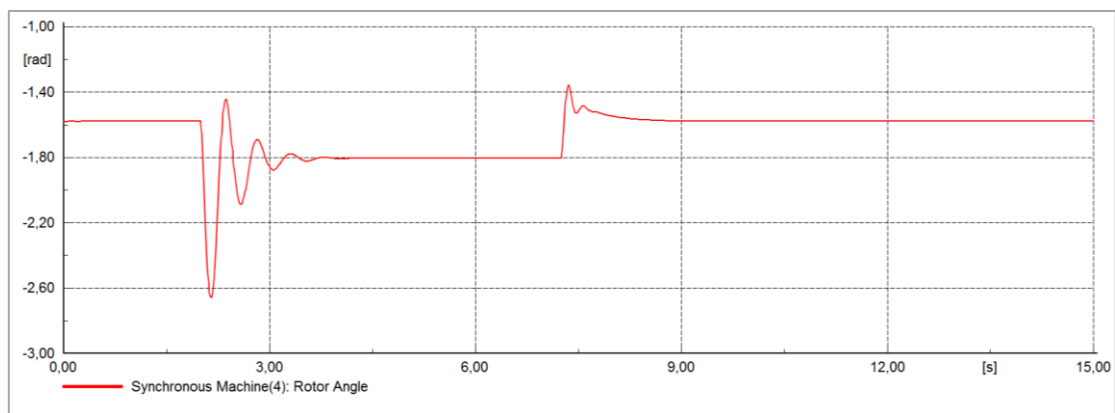
4.7.1.2 Trepolet kortslutning

Hovedfokus i oppgaven er som sagt topolet kortslutning. Hvordan maskinen oppfører seg ved og bidrar til trepolet kortslutning er likevel av interesse ettersom det kan utgjøre en forskjell fra asynkronmaskinens oppførsel.



Figur 27: Strøm gjennom sikringer ved trepolet feil i L6. Den blå grafen viser strømmen gjennom sikringen til feilstedet, mens den røde grafen viser strømmen gjennom sikringen til radialen.

Figur 27 viser hvordan strømmen endrer seg gjennom sikringen til radialen (Fuse B) og sikringen til feilen (Fuse B1-B2). Det er bare tatt med én fase i hver sikring fordi feilen og systemet er symmetrisk, og fasene derfor vil være symmetrisk. Maskinen leverer bidrag rett etter feilen oppstår. Det observeres ved å studere Figur 27 som viser at strømmen til feilstedet er betydelig større i det transiente forløpet. Etter det transiente bidraget starter maskinen å trekke strøm fra nettet i en periode, noe som fører til at strømmen til feilen blir lavere enn i det stasjonære tilfellet. Strømmen uten maskinen var målt til å være 303,7A gjennom sikringen til feilen i samme tilfelle i kapittel 4.1. Ettersom strømmen gjennom sikringen med maskinen tilkoblet blir under 250A rett etter transient bidrag tyder det på at maskinen trekker strøm i dette tilfellet. Etter dette leverer maskinen strøm igjen, denne gangen en lavere strøm før den starter å trekke igjen. Forløpet varer i en kort periode mens maskinen stabiliserer seg. Dette skjer fordi det har oppstått en stor endring i nettet og forskjellen mellom rotorfeltet og statorfeltet, polhjulsvinkelen, har endret seg som en følge av dette. Polhjulsvinkelen vil svinge etter endringen før den stabiliserer seg. Hvor lang tid den bruker på å stabilisere seg er avhengig av parametriseringen av maskinen.



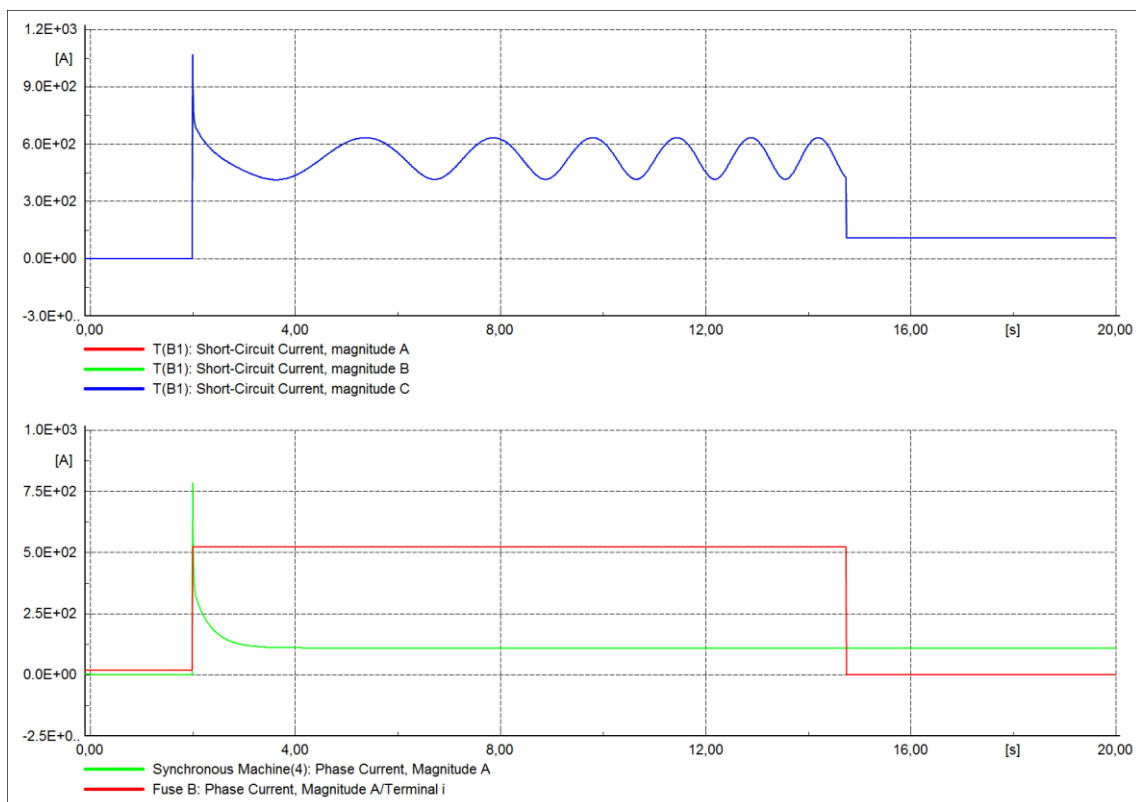
Figur 28: Polhjulsvinkelen til maskinen i feilsituasjon.

Figur 28 viser at polhjulsvinkelen stabiliserer seg på samme sted som før feilen etter at feilen er klarert. Synkronmaskinen er parametrisert med utgangspunkt i «normale» verdier, med fokus på økt kortslutningsbidrag. Ofte er maskinene parametrisert for høyspentnett hvor det er et helt annet forhold mellom resistans og reaktans enn det er i lavspennetnett. Synkronmaskinen sørger for store svingninger av strømmen gjennom vernene. Dette kan være fordi R/X forholdet er annerledes for nettet i oppgaven enn det typiske nettet synkronmaskinen vanligvis blir parametrisert for. Frekvensen på svingningene er 2,4Hz, noe som ikke er uvanlig ved stor lastendring på en

synkronmaskin. Dersom det er ønskelig, kan svingningen av strømmene dempes noe ved å endre reaktansforholdene i synkronmaskinen eller ved å bruke en kraftsystemstabilisator (PSS) [15]. Dette blir ikke videre vurdert i denne oppgaven.

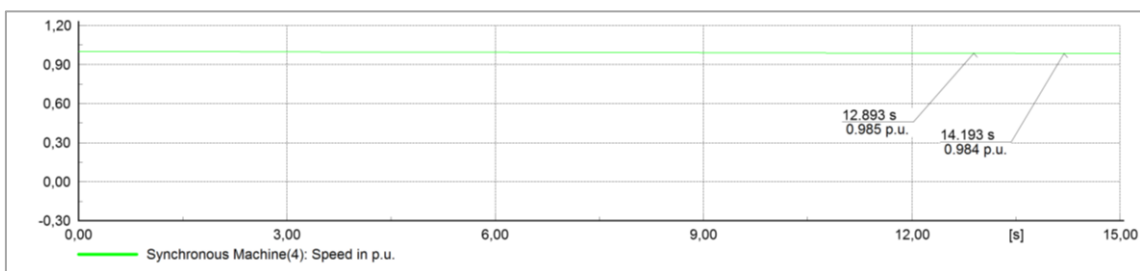
Det observeres av Figur 27 at maskinen trekker strøm fra nettet i en periode etter feilen er koblet ut. Magnetiseringsspenningen endrer seg ikke ettersom det ikke finnes AVR som styrer magnetisering i dette tilfellet. Likevel endres magnetiseringsstrømmen som en følge av lastendringen. Når magnetiseringsstrømmen synker som en følge av lastendringen vil maskinen bli undermagnetisert. Den vil derfor trekke reaktiv effekt i en periode. Den reaktive effekten må komme fra nettet, og strømmen gjennom sikringen til radialen er i denne perioden høyere enn ved normal last i en periode som en følge av dette.

Ved trepolet kortslutning i B1 vil ikke maskinen påvirke sikringene i nettet, fordi bidraget fra maskinen ikke vil gå gjennom samme sikring som bidraget fra nettet. Denne feilen fører til at spenningen på motorklemmene går til null. Maskinen opererer derfor uavhengig av nettet og begge leverer strøm til samme punkt. Den vil i denne perioden miste hastighet fordi noe av den kinetiske energien i rotasjonen går med på å generere strøm til feilstedet. Frekvensen til bidraget fra maskinen vil derfor være lavere enn frekvensen fra bidraget til nettet som holder 50Hz.



Figur 29: Strøm i nettet ved trepolet kortslutning i maskinens tilkobling. Øverste grafen viser total strøm til feilstedet. Grafene under viser bidrag fra nettet og bidrag fra maskinen med henholdsvis rød og grønn farge.

Den øverste grafen i Figur 29 viser strømmen til feilstedet og grafene under viser bidrag fra maskinen og fra nettet. Maskinen gir et stort transient bidrag etterfulgt av et stasjonært bidrag. RMS verdien til begge bidragene er stabil. Likevel svinger feilstrømmen selv om det ikke finnes andre komponenter som leverer strøm. Grunnen til at den totale feilstrømmen svinger ser ut til å være fordi frekvensen til bidraget fra maskinen er forskjellig fra frekvensen til bidraget fra nettet. Dette fører til at de sinusformede bidragene ikke går til feilen ved samme tidspunkt, og den totale strømmen vil derfor svinge, ettersom summen av feilstrømmene varierer med tiden. Svingningen på den totale strømmen til feilstedet har økende frekvens, fordi maskinens hastighet synker og forskjellen mellom bidragene øker i.



Figur 30: Hastigheten til maskinen ved feilsituasjon.

At svingningen i total strøm til feilstedet skyldes maskinens synkende hastighet og forskjellen mellom maskinfrekvensen og nettfrekvensen kan bevises ved utregning. Toppen på de siste to bølgene i total feilstrøm i Figur 29 før feilen kobles ut treffer ved henholdsvis 12,893s og 14,193s. Tiden mellom toppene blir 1,3s. I Figur 30 over hastigheten til maskinen kan det observeres at hastigheten går fra 0,985pu til 0,984pu. Frekvensen til svingningen i total strøm (f_{feil}) må være forskjellen mellom frekvens til nettet (f_{nett}) og frekvensen til synkronmaskinen (f_{maskin}) i tidsrommet. Det er kjent at periodetiden (T_{nett}) er lik invers av frekvensen, og formelen er gitt av formel 4.1.

$$T_{feil} = \frac{1}{f_{nett} - f_{maskin}} \quad (4.1)$$

Frekvensen til maskinen er 50Hz når hastighet til maskinen er 1,0pu. I tidsrommet det er snakk om er hastigheten mellom 0,985pu og 0,984pu. Basert på formel 4.1 blir periodetiden til feilen et sted mellom to verdier.

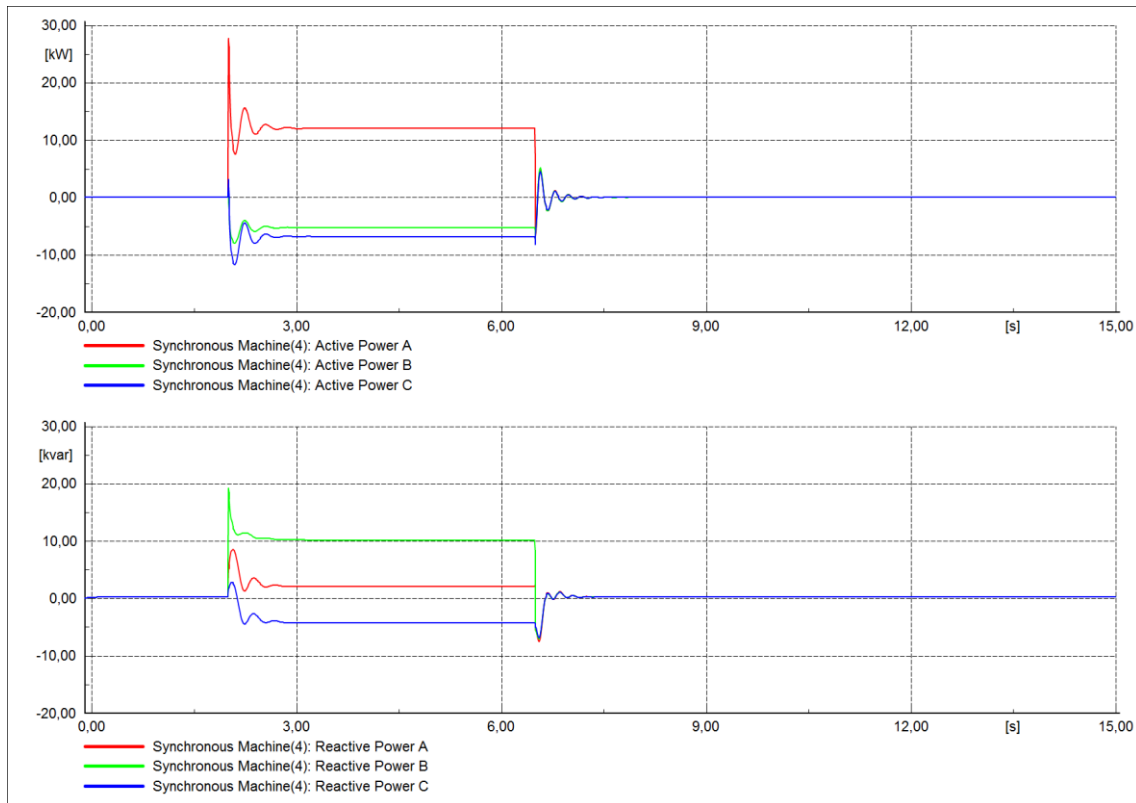
$$T_{feil} = \frac{1}{50Hz - 0,985 \cdot 50Hz} = 1,333s$$

$$T_{feil} = \frac{1}{50Hz - 0,984 \cdot 50Hz} = 1,25s$$

Ettersom periodetiden til total feilstrøm er lik 1,3 i tidsrommet, ser teorien ut til å stemme. Verdien blir unøyaktig fordi det ikke er nok desimaler i verdien for hastighet til maskinen. Bryteren kobler ut feilen etter 14,75 sekund. Etter dette leverer ikke nettet strøm til feilstedet. Maskinen er fortsatt koblet på radialen med feil, så den vil levere et bidrag til feilen også etter at nettet er koblet fra radialen. Dette kan observeres i Figur 29. Strømmen fra maskinen synker noe fordi hastigheten til maskinen synker. Den har ingen turbin, så maskinen mister fart når den leverer strøm. En slik feil vil altså føre til at maskinen må kobles fra nettet fordi den vil levere strøm til feilstedet over lang tid. Utkobling av maskinen må gjøres av et maskinvern, noe som må dimensjoneres dersom en synkronmaskin skal kunne bli tilkoblet nettet.

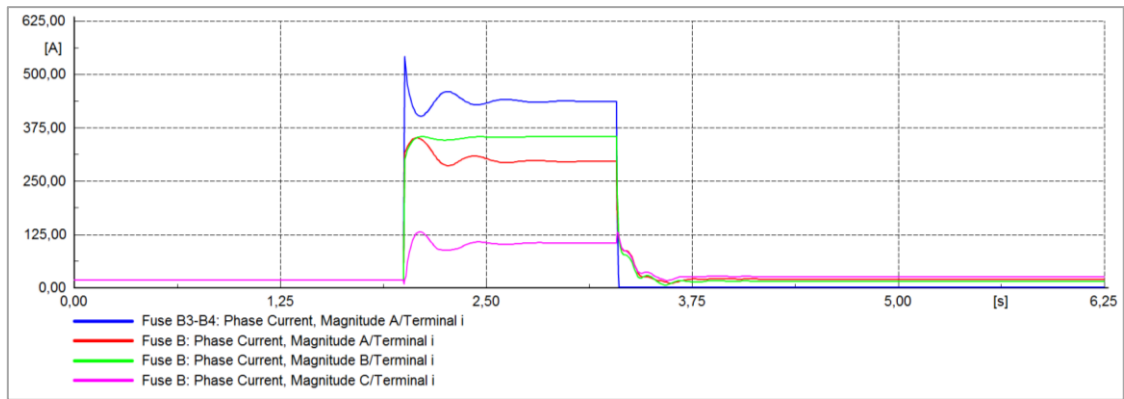
4.7.2 Synkronmaskin (SM1) med statisk magnetisering og AVR

Synkronmaskinen SM1 blir brukt med statisk magnetisering og AVR i dette delkapittelet. For statisk magnetisering brukes regulatoren EXAC4 i PowerFactory. Med maskinen SM1 tilkoblet B1 og med topolet kortslutning ved L6 blir utløsnings tiden 4,51 sekunder for denne konfigurasjonen.



Figur 31: Aktiv og reaktiv effekt i maskinen ved topolet kortslutning i L6 ved statisk magnetisering. Øverste delen av figuren viser aktiv effekt og den nederste viser reaktiv effekt. Ved positiv verdi leverer maskinen effekt og med negativ vil den trekke effekt.

Maskinen leverer aktiv effekt i fase A fra feilen oppstår til den bli koblet ut, og i fase B og C trekker den aktiv effekt. I dette tilfellet leverer maskinen reaktiv effekt i både fase A og B mens den trekker reaktiv effekt i fase C. I Figur 32 er det koblet til én maskin i hvert av punktene A4, B1 og C3. Det oppstår en topolet kortslutning i L8 etter 2 sekunder.



Figur 32: Strøm gjennom sikringene mot L8 etter en feil i L8, med statisk magnetisert SM1 med AVR EXAC4 tilkoblet hver radial.

Figur 32 viser strøm gjennom den lokale sikringens fase A og gjennom radialens sikring for alle fasene. Figuren viser hvordan strømmen endrer seg i de forskjellige fasene. For den lokale sikringen er strømmen i fase A og B lik mens fase C er minimal og derfor ikke av interesse. Det er den lokale sikringen som løses ut for feilen, så det er strømmen gjennom denne som er relevant for utløsningstiden. Det tar omtrent 0,7 sekunder fra feilen oppstår til strømmen stabiliserer seg. Dette kan påvirke utløsningstiden for vern med rask utløsning. I Tabell 24 er verdiene for strøm og utløsningstid er gitt ved topolet kortslutning i hver last. «Redusert tid (%)» er regnet som $\frac{\text{Endring tid}}{\text{Tid uten maskin}} \cdot 100$.

Tabell 24: Tabell for strøm gjennom vern og utløsningstid ved topolet kortslutning i alle lastpunkt, med synkronmaskin med statisk magnetisering koblet til hver radial.

Feilsted	Ilokal (tran) [A]	Ilokal [A]	Iradial [A]	Tid [S]	Endring tid [S]	Redusert tid (%)
L1	1055,1	908,7	822,5	0,499	0,306	38,0
L2	1161,1	1033,9	893,8	0,367	0,241	39,6
L3	969,3	779,8	729,9	0,151	0,080	34,6
L4	918,2	752,7	664,1	0,177	0,154	46,5
L5	584,2	493,9	435,6	0,801	0,924	53,6
L6	373,8	321,0	274,8	4,494	5,552	55,3
L7	588,6	468,9	378,0	0,964	2,018	67,7
L8	539,9	435,6	353,5	1,293	2,435	65,3
L9	683,5	521,2	391,4	0,646	1,888	74,5
L10	521,6	423,0	321,4	1,450	3,230	69,0

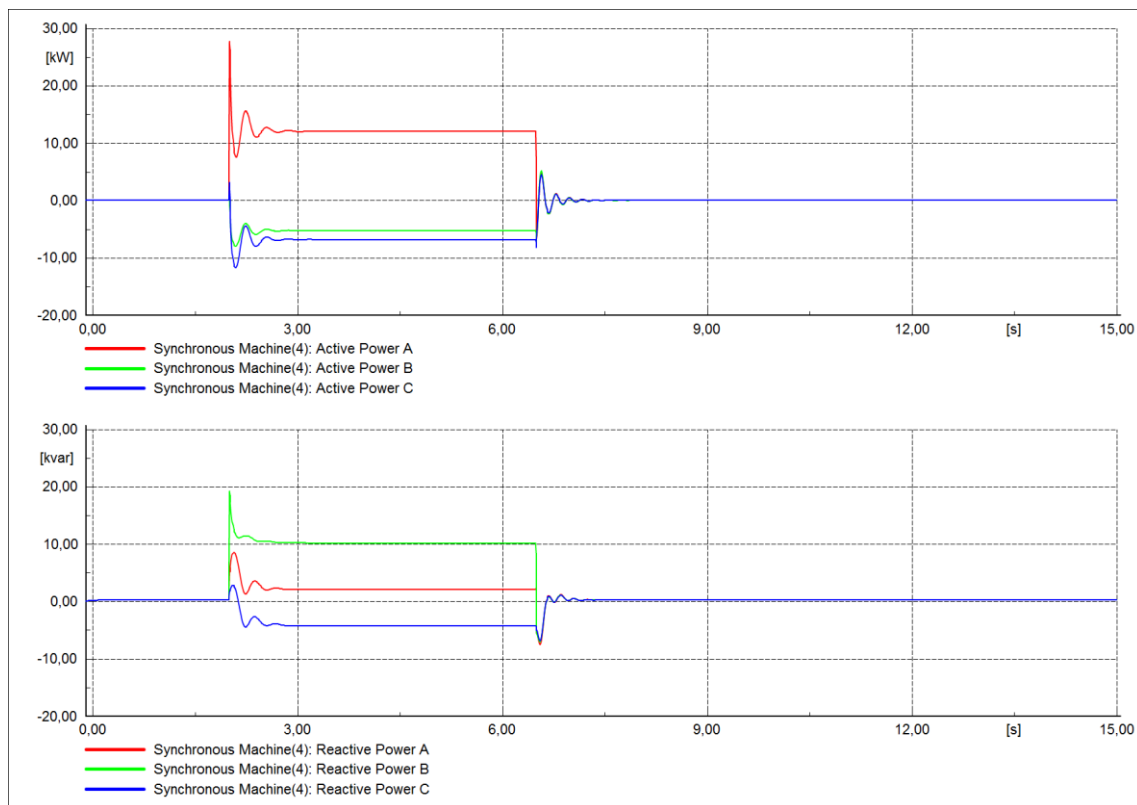
Vi ser på resultatene at denne regulatoren gir en raskere utløsning av vernet mot L6. Dette er fordi parameterverdiene til AVR-en er valg ved plassering av maskin i B1 og med trepolet kortslutning i L6. De andre lastene på radialen ligger nærmere B1 og gir derfor en høyere feilstrøm gjennom vernet. De kobler ut raskere, og strømmen fra maskinen

holder fortsatt på å stabilisere seg når vernet løses ut. Dette fører til tregere utløsning med AVR. Dette kan endres ved å endre på parameterverdiene til regulatoren, men det er ikke hovedfokus i denne oppgaven. Resultatene viser at AVR kan ved noen tilfeller føre til enda høyere kortslutningsbidrag fra maskinen.

For trepolet feil i B1 vil maskinen heller ikke føre til raskere utløsning med AVR.

4.7.3 Synkronmaskin (SM1) med børsteløs magnetisering og AVR

Synkronmaskinen SM1 blir brukt med børsteløs magnetisering og AVR i dette delkapittelet. For børsteløs magnetisering brukes regulatoren AC8B. Utløsningstiden med maskinen SM1 tilkoblet B1 og med topolet kortslutning i L6 blir 4,40 sekunder for denne konfigurasjonen. Figur 33 viser aktiv og reaktiv effekt i maskinen i dette tilfellet, hvor topolet kortslutning oppstår i L6 etter 2 sekunder.



Figur 33: Aktiv og reaktiv effekt i maskinen ved topolet kortslutning i L6 ved børsteløs magnetisering. Øverste delen av figuren viser aktiv effekt og nederste viser reaktiv effekt. Ved positiv verdi leverer maskinen effekt og ved negativ trekker maskinen effekt.

Av Figur 33 kan det observeres hvordan maskinen leverer aktiv effekt i fase A og trekker aktiv effekt i fase B og C. Samtidig leverer den reaktiv effekt i fase A og trekker reaktiv effekt i fase B og C.

reaktiv effekt i fase C. Videre blir det maskinen med AC8B koblet til A4, B1 og C3 for å teste utløsningstid for vern i dette tilfellet. Det blir testet med topolet kortslutning i hvert lastpunkt.

Tabell 25: Tabell for strøm gjennom vern og utløsningstid ved topolet kortslutning i hvert lastpunkt, med synkronmaskin SM1 med børsteløs magnetisering koblet til hver radial.

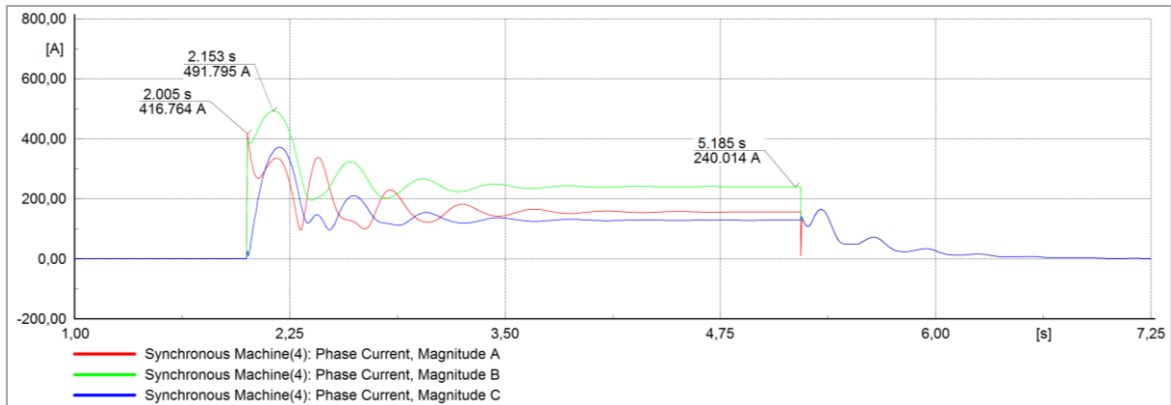
Feilsted	$I_{\text{lokal}} \text{ (tran)}$ [A]	I_{lokal} [A]	I_{radial} [A]	Tid [s]	Endring tid [s]	Redusert tid (%)
L1	1054,9	907,1	818,7	0,487	0,318	39,5
L2	1160,9	1038,1	892,4	0,356	0,252	41,4
L3	969,1	779,8	727,0	0,152	0,079	34,2
L4	918,0	755,8	655,4	0,177	0,154	46,5
L5	584,0	496,3	431,3	0,795	0,930	53,9
L6	373,8	322,7	272,2	4,410	5,636	56,1
L7	588,4	472,5	373,5	0,954	2,028	68,0
L8	539,8	438,7	349,1	1,274	2,454	65,8
L9	683,4	528,2	388,0	0,643	1,891	74,6
L10	521,5	427,9	316,5	1,395	3,285	70,2

Utløsningstidene viser bra forbedring for børsteløs magnetisert synkronmaskin med AVR. Hele radial B, radial C og vern for L5 har betydelig større forbedring i tid enn vern for lastene L1, L2, L3 og L4. Det er de samme vernene som i utgangspunktet har lengst utløsningstid, så forbedringspotensialet her var størst i utgangspunktet. Det kan derfor være aktuelt å bare koble synkronmaskin til radial B og C. Hvor mange maskiner som skal bli koblet til kommer an på kostnad og nytte. Denne vurderingen blir ikke foretatt i denne oppgaven.

4.7.4 Synkronmaskin med høyere ytelse (SM2) uten AVR

En synkronmaskin som leverer mer strøm til feilstedet kan føre til enda raskere utløsning av vern. Det er vanskelig å lage en maskin med lavere reaktanser enn det som er gjort for SM1 uten at maskinen øker mye i pris og uten å gjøre maskinen større. Det skal derfor bli forsøkt å bruke en maskin med høyere ytelse enn det som tidligere er brukt for synkronmaskin. De andre parameterverdiene vil være de samme som for SM1. Det skal bli undersøkt hvordan større ytelse kan føre til høyere strøm og raskere utløsning av vern. En større maskin vil også være dyrere, men den økonomiske vurderingen blir det ikke tatt hensyn til i denne oppgaven. Denne maskinen vil ikke bli testet med AVR ettersom

effekten av AVR er blitt sett på i tidligere resultat. Tanken er at en dobling av ytelse skal gi en dobling i bidraget fra maskinen, som nevnt i kapittel 2.



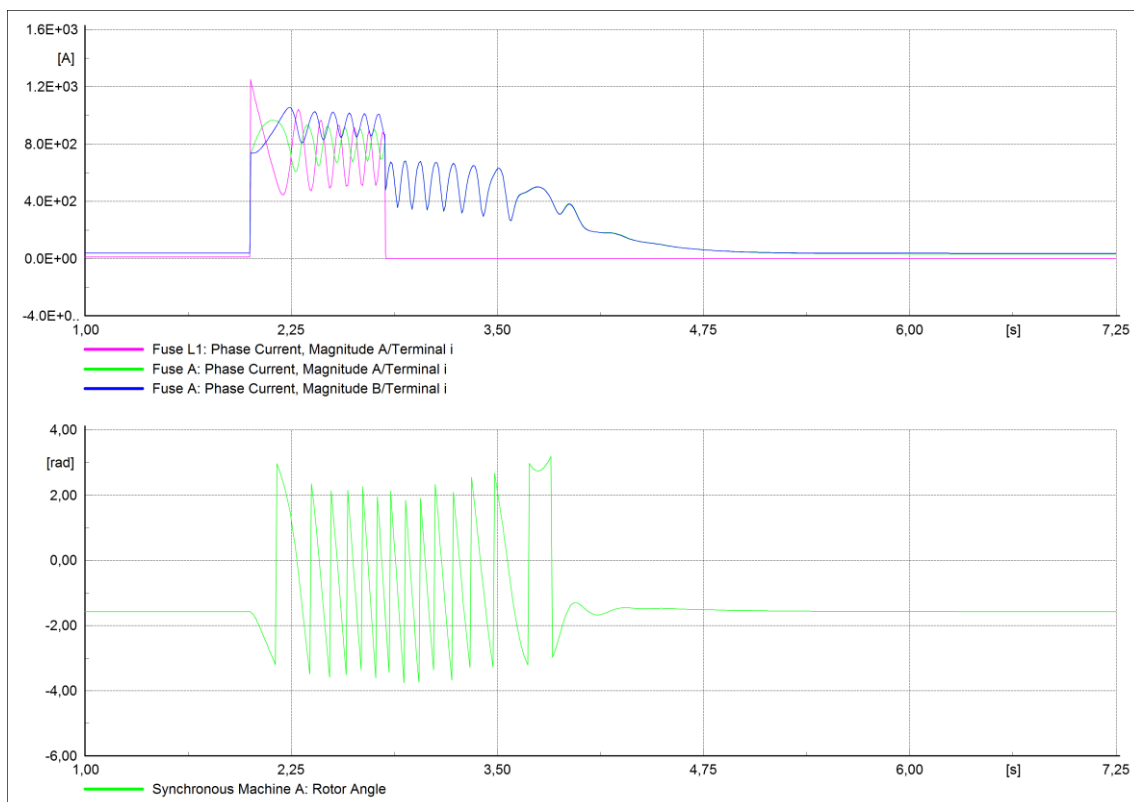
Figur 34: Strøm gjennom alle fasene i synkronmaskin SM2 uten AVR ved topolet kortslutning i L6. Maskinen er tilkoblet B1.

Strømmen i det transiente forløpet er for denne maskinen størst i fase A, men fase B blir større like etter. Når maskinen har stabilisert seg er det fase B som har den største strømmen på 240A.

Tabell 26: Tabell for strøm gjennom vern og utløsnings tid ved topolet kortslutning i hvert lastpunkt, med synkronmaskin SM2 uten AVR koblet til hver radial.

Feilsted	$I_{\text{lokal}} \text{ (trans)}$ [A]	I_{lokal} [A]	I_{radial} [A]	Tid [s]	Endring tid [s]	Redusert tid (%)
L1	1248,7	-	-	0,819	-0,014	-1,7
L2	1401,9	-	-	0,469	0,139	22,9
L3	1197,1	-	-	0,054	0,177	76,6
L4	1204,9	-	-	0,061	0,270	81,6
L5	764,2	-	449,0	0,507	1,218	70,6
L6	484,0	349,9	271,0	3,232	6,814	67,8
L7	832,2	-	381,5	0,708	2,274	76,3
L8	737,1	-	346,5	1,021	2,707	72,6
L9	981,7	-	391,6	0,549	1,985	78,3
L10	672,6	501,0	305,5	0,904	3,776	80,7

En større maskin fører til større svingninger i strømmen, og den fører i mange tilfeller til raskere utløsning. Ved rask utløsning har strømmen ikke stabilisert seg når vernet løses ut, noe som også fører til at det blir vanskelig å sette én verdi for stasjonær strøm gjennom vern. Vernet til L3 og vernet til L4 kobler ut så raskt at det ikke finnes en stasjonær verdi å bruke. Vernet til L1 løses ut tregere ved bruk av denne synkronmaskinen enn uten maskin. Grunnen til dette er at maskinen kommer ut av fase. Maskinen kommer ut av fase ved topolet kortslutning i L1 og ved topolet kortslutning i L2.



Figur 35: Strøm gjennom sikringer og polhjulsvinkelen til maskinen under feilsituasjon.

Etter feilen er koblet ut bruker maskinen flere sekunder på å stabilisere seg igjen. Dette fører til en økt strøm fra nettet perioden. Dersom maskinen kjører ute av fase kan det skade maskinen. Det er antatt at maskinen er beskyttet med et maskinvern. Det finnes forskjellige vern beregnet på å koble ut maskiner som går ut av fase kalt «out of step protection» [35] [11].

Denne maskinen gir høyere bidrag til feilstedet. Dette innebærer også at dersom det oppstår en trepolet kortslutning der maskinen er tilkoblet vil den totale strømmen til feilstedet bli høyere. Denne strømmen blir ikke tatt hensyn til av vern som kobler ut nettet, så det er viktig å dimensjonere et motorvern som kobler ut maskinen i slike tilfeller.

5 | Sammenligning og diskusjon

I dette kapitlet blir de forskjellige løsningene sammenlignet. Fordeler og ulemper knyttet til hver løsning blir diskutert. Løsningene blir ikke sammenlignet med tilfeller uten maskiner, ettersom det allerede er gjort i kapitlet om resultater.

5.1 Maskiner tilkoblet én eller flere radialer

For å sammenligne tilfellet hvor én maskin er tilkoblet én radial mot én maskin tilkoblet hver radial, brukes tilkobling av AS1 som eksempel. Maskinen blir tilkoblet B1 i det ene tilfellet og tilkoblet hvert av punktene A4, B1 og C3 i det andre tilfellet. Begge tilfellene gir stor forbedring av utløsningstid så lenge feilen skjer på en radial som har motor tilkoblet. Ved feil på en radial uten maskin tilkoblet radialen vil det føre til tregere utløsning dersom en maskin er tilkoblet en annen radial. Dersom det kobles én maskin til hver radial vil utløsningstiden være forbedret, uavhengig av hvilken radial det oppstår feil på. I Tabell 27 er utløsningstiden ved topolet feil i lastpunkter på radial B sammenlignet for de to konfigurasjonene. «Tid alt 1» er utløsningstid for alternativet med én maskin på B1, og «Tid alt 2» er utløsningstiden for alternativet med én maskin på hver radial.

Tabell 27: Sammenligning av utløsningstid avhengig av antall maskiner.

Feilsted	Tid uten maskin [s]	Tid alt 1 [s]	Tid alt 2 [s]	Endring tid [s]
L6	10,046	5,742	5,926	0,184
L7	2,982	1,370	1,414	0,044
L8	3,728	1,794	1,851	0,057

«Endring tid» er regnet som forbedringen av utløsningstid for alternativ 2 sammenlignet med alternativ 1. Vernet løses ut 184ms tregere ved maskin koblet til alle radialene

sammenlignet med bare én radial ved feil i L6. Tilkobling av AS1 på alle radialene utgjør en økning i tid på 3,2% sammenlignet med AS1 kun på B1. Det er ikke av stor betydning sammenlignet med den totale forbedringen maskinene har mot alternativet uten maskin. Asynkronmaskin tilkoblet hver radial har vist god forbedring i utløsningstid i kapittel 4 for topolet feil i alle lastpunkter, så det regnes som gunstig å ha tilkobling til hver radial sammenlignet med bare én dersom det er behov for det.

5.2 Sammenligning av ulike karakteristikk for asynkronmaskinene

Resultatene ved asynkronmaskinen AS1 tilkoblet nettet skal sammenlignes med resultatene ved AS2 tilkoblet. «Endring tid» viser forskjellen i utløsningstid med AS2 mot utløsningstiden med AS1 ved samme tilkobling og feil. I eksempelet er asynkronmaskinene tilkoblet A4, B1 og C3. Tallene som sammenligner utløsningstiden for maskinene er basert på tallene i Tabell 17, Tabell 18, Tabell 21 og Tabell 22.

Tabell 28: Sammenligning av utløsningstid mellom AS1 og AS2 ved feil i laster.

Feilsted	Tid uten maskin [s]	Tid AS1 [s]	Tid AS2 [s]	Endring tid [s]
L1	0,805	0,572	0,473	0,099
L2	0,608	0,420	0,350	0,070
L3	0,231	0,154	0,097	0,057
L4	0,331	0,207	0,133	0,074
L5	1,725	1,027	0,765	0,262
L6	10,046	5,926	4,525	1,401
L7	2,982	1,414	0,946	0,468
L8	3,728	1,851	1,276	0,575
L9	2,534	1,080	0,699	0,381
L10	4,680	2,334	1,663	0,671

Tabell 28 viser at det er stor forbedring ved å bruke AS2 fremfor å bruke AS1. For feil i lastpunktene gir AS2 mellom 16,7% og 37,0% forbedring av utløsningstid sammenlignet med AS1. Forbedringen AS2 gir sammenlignet med AS1 er avhengig av hvilke lastpunkt feilen oppstår i. Det er tydelig at bruk av AS2 gir stor reduksjon av utløsningstid ved feil på radial B og C, i tillegg til L5. Det må også nevnes at det er disse feilstedene som gir lengst utløsningstid, og dermed også har de største forbedringspotensialene. Nettselskapet

må forta en vurdering på om det er verdt å bruke mer penger på å parametrisere en asynkronmaskin med høy kortslutningsstrøm med tanke på forbedringen det fører til.

Tabell 29: Sammenligning av utløsningstid mellom AS1 og AS2 ved feil i tilkoblingspunkt.

Feilsted	Tid uten maskin [s]	Tid AS1 [s]	Tid AS2 [s]	Endring tid [s]
A4	7,254	4,996	4,188	0,808
B1	28,953	13,489	10,168	3,321
C3	32,434	17,235	13,567	3,668

Tabell 29 viser at AS2 fører til raskere utløsning av vern, også ved topolet kortslutning i tilkoblingspunktet til maskinen.

Det går 96% større strøm fra AS2 til feilen enn det går fra AS1 ved trepolet kortslutning i B1 med maskin tilkoblet samme punkt. Det er nødvendig med et motorvern som beskytter maskinen. Denne feilstrømmen vil ikke bidra til raskere utløsning, så det høye bidraget fra maskinen i dette tilfellet vil være utlukkende negativt. Samtidig er det ikke et problem at strømmen har denne størrelsen ettersom maskinen må være dimensjonert for å tåle en enda større startstrøm så lenge den ikke er beregnet på å bli brukt med metoder for redusert startstrøm. Maskinen har høy startstrøm, så det kan oppstå problemer med vern ved oppstart. Dersom sikringene i nettet kan bli løst ut ved oppstart av maskinen vil det være nødvendig med metoder som reduserer startstrømmen til maskinen. Dette vil føre til økte kostnader, noe som kan gjøre det mer aktuelt å bruke AS1 selv om maskinen har mindre kortslutningsbidrag. Dette må bli vurdert for hvert enkelt nett, men resultatene viser at parametriseringen av maskinen har mye å si for utløsningstid av vern.

5.3 Synkronmaskin eller asynkronmaskin

Synkronmaskinen oppfører seg veldig likt asynkronmaskin ved topolet kortslutning i L6 med maskin i B1. Ved sammenligning av grafene for effekt i maskinene AS1 i Figur 20, AS2 i Figur 26 og SM1 i Figur 31 kan det observeres at aktiv og reaktiv effekt er veldig lik for alle maskinene. Størrelsen på aktiv og reaktiv effekt er mye større i SM1 enn AS1, men veldig lik størrelse som AS2. Det tar også lengre tid før bidraget fra synkronmaskinen stabiliserer seg enn for asynkronmaskinene.

Synkronmaskin av samme størrelse som asynkronmaskinene gir kortere utløsningstid enn AS1, men tregere enn AS2. Ettersom prisen på maskinene ikke er vurdert blir det vanskelig å vurdere synkronmaskin mot asynkronmaskin i forhold til dette. Likevel viser Tabell 30 at også denne maskinen fører til god forbedring av vernets funksjon. Fordelen med synkronmaskin er at den ikke trenger kondensatorbank for å operere på radial A. I tillegg kan den bli brukt til fasekompensering i nettet. AVR gir enda bedre utløsningstid for synkronmaskinen, men ikke av betydelig karakter. Prisen vil øke ved bruk av AVR, men det kan tenkes at den også kan brukes i sammenheng med vern. Det er nødvendig med et maskinvern uansett, så dersom det kan skaffes en pakke med AVR og vern sammen er det ikke sikkert prisforskjellen blir stor.

5.4 Sammenligning av testene med synkronmaskin

Utgangspunktet for testing av synkronmaskinen er ved konstant magnetisering. Dersom magnetiseringsstrømmen styres av en AVR kan kortslutningsbidraget fra maskinen øke.

Tabell 30: Utløsningstid avhengig av magnetisering av synkronmaskin, ved topolet kortslutning i lastpunkt.

Feilsted	Uten maskin [s]	Uten AVR [s]	EXAC4 [s]	AC8B [s]	SM2 [s]
L1	0,805	0,493	0,499	0,487	0,819
L2	0,608	0,360	0,367	0,356	0,469
L3	0,231	0,151	0,151	0,152	0,054
L4	0,331	0,177	0,177	0,177	0,061
L5	1,725	0,822	0,801	0,795	0,507
L6	10,046	4,734	4,494	4,410	3,232
L7	2,982	0,997	0,964	0,954	0,708
L8	3,728	1,350	1,293	1,274	1,021
L9	2,534	0,662	0,646	0,643	0,549
L10	4,680	1,554	1,450	1,395	0,904

Utløsningstiden er bedre med EXAC4 enn uten AVR for feil på radial B og C, men ikke for feil på radial A med unntak av feil i L5. EXAC4 gjør strømmen mer ustabil etter feil, men fører til høyere strøm etter den har stabilisert seg. Det tar omtrent 0,7 sekunder fra feilen oppstår til strømmen stabiliserer seg med EXAC4. Lokal sikring til lastene L1, L2, L3 og L4 løses ut raskere enn 0,5 sekunder etter at feilen oppstår. Dette kan forklare hvorfor utløsningstiden er bedre for radial B, C og last L5. Det kan være en løsning å ikke

bruke AVR for synkronmaskinen på radial A. EXAC4 kan bli brukt på radial A dersom nettselskapet anser reduksjonen vernet til L5 får i utløsningstid er verdt den negative konsekvensen for L1-L4, og den ekstra kostnaden ved å benytte AVR. Med en AVR får maskinen fordel av å kunne trekke og levere reaktiv effekt avhengig av hva nettet har behov for.

Når maskinen har EXAC4 tilkoblet vil den levere reaktiv effekt i fase A og B, mens uten AVR leverer den bare reaktiv effekt i fase B. I tillegg leverer den mer reaktiv effekt i fase B og trekker mindre i fase C når EXAC4 er brukt. Ved bruk av AC8B blir den reaktive effekten levert av maskinen høyere og den reaktive effekten som blir konsumert blir lavere. Dette skyldes at begrensningen i magnetiseringsspenning er satt høyere for AC8B enn for EXAC4.

Børsteløs magnetisering (AC8B) gir raskere utløsning av vern enn statisk magnetisert maskin med AVR (EXAC4). Dette var ikke forventet ettersom det oppstår en ny tidskonstant ved børsteløs magnetisering og den vil derfor reagere tregere. Grunnen til at den børsteløse er raskere kan være fordi parameterne til begge regulatorene ikke er optimalisert. Det er ikke sikkert at en børsteløs magnetisert maskin vil være bedre dersom begge blir optimalisert for denne funksjonen, ettersom den børsteløse vil være tregere. Likevel er det naturlig å tenke at børsteløs magnetisering vil bli brukt dersom det skal bli brukt en synkronmaskin. En børsteløs magnetisert maskin krever betydelig mindre vedlikehold ettersom børstene er det som oftest må vedlikeholdes på en statisk magnetisert maskin. Det vil kunne bli en stor ekstrakostnad for nettselskap å reise ut til maskinene og føre vedlikehold. Det er derfor ønskelig å bruke en maskin som krever lite vedlikehold. Spesielt med tanke på at nett som har lav kortslutningsytelse ofte kan ligge i mindre befolkede områder, noe som kan medføre lengre reisetid.

For å vise hvilken innvirkning ytelsen til maskinen har på kortslutningsbidraget er det testet en maskin med dobbelt så stor ytelse. Figur 25 og Figur 34 viser at ved å doble ytelsen på synkronmaskinen vil det stasjonære kortslutningsbidraget fra maskinen øke med 61% ved topolet feil i L6. Forbedringen av utløsningstid øker fra 52,9% til 67,8% ved samme feil, basert på Tabell 30. En økning av ytelsen gir raskere utløsningstid, men

maskinen vil også bli dyrere. Maskinen i denne størrelsen fører også til tregere utløsning ved topolet kortslutning i L1 og L2 sammenlignet med tilfellet uten maskin. Grunnen til at utløsningen blir tregere for disse feilene er fordi maskinen går ut av fase i begge tilfellene. Dette innebærer at maskinen tilkoblet radial A fører til at topolet kortslutning i to av fem laster vil ha en betydelig tregere utløsning sammenlignet med synkronmaskinen med halvparten av ytelsen. Det er derfor ikke gunstig å bruke SM2 for radial A. For de andre radialene vil maskinen forbedre ytelsen betraktelig. Det blir vist at å øke ytelsen til maskinen kan føre til raskere utløsning, men dette er avhengig av plasseringen i nettet. En maskin av denne størrelsen kan derfor ikke bli brukt konsekvent.

5.5 Sammenligning av alle maskinløsningene

Nettet i oppgaven har lav kortslutningsytelse og lang utløsningstid i flere punkter ved både topolet og trepolet kortslutning. Ved topolet kortslutning er det observert at en asynkronmaskin i flere tilfeller fører til rask utløsning av vern fordi maskinen fortsatt kjører på to faser. Ved trepolet kortslutning leverer maskinen strøm i en transient periode. Bidraget hjelper for raskere utløsning ved feil i lastpunkt, men maskinen bidrar ikke til strøm gjennom vernet etter denne korte perioden. Fordelen med en synkronmaskin er i disse tilfellene at den leverer strøm til feilstedet i en transient og i en stasjonær periode, også ved en trepolet kortslutning. Dette fører til lavere utløsningstider for trepolet kortslutning. Det er topolet kortslutning som gir den lengste utløsningstiden, så det er for disse tilfellet at maskinen er viktigst. Synkronmaskinen sitt stasjonære bidrag blir derfor ikke av avgjørende betydning. Et problem som kan oppstå, uansett valg av maskin, er dersom det oppstår en kortslutning nært maskinen som ikke fører til strøm gjennom lokale vern. Dette fører til at bare kortslutningsstrømmen fra nettet går gjennom radialens vern. All strøm fra maskinen blir et bidrag til kortslutningsstrøm, men ikke til raskere utløsning. Dette observeres for en asynkronmaskin i kapittel 4.3, med trepolet kortslutning i B1 på asynkronmaskinen AS1 sitt tilkoblingspunkt. For en synkronmaskin vil dette bidraget vare i en mye lengre periode, og kan derfor føre til større skade. Maskinen vil ikke ta skade av den stasjonære kortslutningsstrømmen, ettersom den er mindre enn 1pu. Det må likevel dimensjoneres et motorvern som kan koble ut maskinen dersom denne hendelsen oppstår slik at radialen med feil blir spenningsløs og maskinen ikke fortsetter å levere

strøm til feilen etter radialen er koblet ut. Motorvernet kan dimensjoneres slik at en strøm i maskinen på nærmere 1pu vil koble ut maskinen etter mer enn 5 sekunder. Det vil ikke gå så høy strøm i maskinen ved normale tilfeller ettersom den ikke kjører med last, og et feil lenger nede i nettet blir koblet ut raskere enn 5 sekunder med maskinen koblet til. Oppstart av maskinen må ikke løse ut dette vernet.

6 | Konklusjon

Det er studert muligheten for å tilknytte elektriske maskiner til lavspent fordelingsnett med lav kortslutningsytelse for å redusere utløsningstiden for vern i nettet ved feil. Vurderingen blir basert på resultater utført i simuleringsprogram, og analysene gjelder for både topolet og trepolet kortslutning dersom ikke annet er spesifisert.

Kortslutningsbidraget fra både synkronmaskinen og fra asynkronmaskinen har vist seg å kunne være av stor betydning for utløsningstiden til vern dersom maskinen er plassert nær lastpunktene. Dersom maskinen er tilkoblet nettet for langt unna lastpunktene, kan det oppstå for lavt spenningsfall på motorklemmene til at den gir bidrag. En elektrisk maskin kan føre til betydelig reduksjon av utløsningstid så lenge feilen skjer i et lastpunkt på samme radial som maskinen er koblet til. I de fleste tilfeller vil en maskin føre til høyere strøm gjennom sikringen nærmest feilen, enn gjennom sikringen for radialen. Tilkobling av maskiner har derfor ikke ført til problemer med selektiviteten i nettet. Avhengig av maskinens størrelse kan den bidra til en betydelig reduksjon av utløsningstid. Økt ytelse på synkronmaskinen kan tyde på å føre til raskere utløsning av vern, men dette er avhengig av hvilket lastpunkt feilen oppstår i. I noen tilfeller kan en økt maskinytelse føre til at maskinen gir dårligere utløsningstid enn uten maskin tilkoblet, men dette er bare testet for synkronmaskin.

Tabell 31 gir et eksempel på resultater fra simuleringene. I eksempelet er det én maskin tilkoblet hver av radialene med unntak av forsøket uten maskin («Ingen»), med maskin tilkoblet nær trafo («AS1 trafo») og maskin kun tilkoblet B1 («AS1 i B1»). Tabell 31 viser kortslutningsstrøm og utløsningstid for lokalt vern ved topolet kortslutning i lastpunktet med lavest kortslutningsytelse, L6. Eksempelet gir et inntrykk av hvilke forbedringer som oppnås ved bruk av de forskjellige maskinløsningene.

Tabell 31: Strøm og utløsningstid for 80A smeltesikring ved forskjellige maskinløsninger ved topolet feil.

	Ilokal (tran) [A]	Tid [s]	Endring tid [s]	Redusert tid [%]
Ingen	263,0	10,046	-	-
AS1 trafo	262,2	10,234	-0,188	-1,9
AS1 i B1	332,7	5,742	4,304	42,8
AS1 i alle	333,5	5,926	4,120	41,0
AS2 i alle	408,3	4,379	5,667	56,4
SM1	373,6	4,734	5,312	52,9
SM1 EXAC4	373,8	4,494	5,552	55,3
SM1 AC8B	373,8	4,410	5,636	56,1
SM2	484,0	3,232	6,814	67,8

Ved feil i andre punkter i nettet vil forbedringen være forskjellig fra eksempelet. SM2¹ førte til dårligere utløsning av vern ved topolet kortslutning i L1, ettersom feilen førte til at maskinen gikk ut av fase og strømmen oscillerte mye. Likevel illustrerer eksempelet hvilken forbedring de forskjellige løsningene kan føre til. Synkronmaskinen SM1² viser bedre effekt på utløsning av vern enn asynkronmaskinen AS1³, og dårligere effekt sammenlignet med AS2⁴. Asynkronmaskinen AS2 er parametrisert med lave reaktanser som fører til at maskinen leverer et større kortslutningsbidrag. Det kan ikke konkluderes med at asynkronmaskiner gir bedre effekt enn synkronmaskiner ettersom oppgaven ikke har fokusert på å optimalisere parameterverdiene. Simuleringene tyder på at topolet feil fører til at begge maskintypene leverer et stasjonært bidrag til feilstedet.

Topolet feil fører til ubalanse i nettet og sammen med maskiner kan det føre til at det går forskjellig strøm gjennom hver fase i sikringen. Dette kan føre til at bare én fase løses ut i sikringen. Simuleringene tyder på at maskinene da, uavhengig av maskintype, leverer bidrag til feilen selv etter at én fase er koblet ut i radialens vern. Sikringene i nettet bør derfor koble ut begge de resterende fasene dersom én fase løses ut.

Bruk av AVR for synkronmaskin, kan bidra til raskere utløsning av vern. Dette gjelder både ved statisk og børsteløs magnetisering. AVR kan også føre til større oscillasjoner i kortslutningsbidraget den første tiden etter feilen oppstår. Dersom utløsning i

¹ $S_N = 90,0\text{kVA}$ for SM1. $X_d'' = 0,11\text{pu}$.

² $S_N = 45,0\text{kVA}$ for SM1. $X_d'' = 0,11\text{pu}$.

³ $S_N = 47,1\text{kVA}$ for AS1. $\frac{I_{lr}}{I_N} = 4,01\text{pu}$.

⁴ $S_N = 43,5\text{kVA}$ for AS1. $\frac{I_{lr}}{I_N} = 7,71\text{pu}$.

utgangspunktet skjer raskt kan bruk av AVR føre til noe lengre utløsningstid sammenlignet med konstant magnetisering. Fordelen med synkronmaskinen er at den kan konsumere og produsere reaktiv effekt, avhengig av behovet til nettet med bruk av AVR, men implementering av dette fører til økte kostnader. Tabell 31 viser at å implementere AVR gir en begrenset gevinst i reduksjon av utløsningstid.

Når lav kortslutningsytelse fører til at utløsningstiden for vern er for lav, vil bruk av elektriske maskiner kunne være en gunstig løsning for reduksjon av utløsningstid. Ved bruk av både asynkronmaskiner og synkronmaskiner kan det oppnås en betydelig reduksjon av utløsningstid. Valg av maskinløsning er avhengig av kostnad og netteiers behov og ønsker.

7 | Videre arbeid

Dersom det skal jobbes videre med dette konseptet er det flere aspekter som bør utforskes videre. Det kan være ønskelig å optimalisere maskinene for denne type situasjoner. Det er ønskelig med parameterverdier som gir høy startstrøm, for å få økt kortslutningsbidrag fra maskinen. Ytelsen til maskinen har også betydning for kortslutningsytelsen. Økt ytelse kan føre til mer bidrag under feil, men det kan også føre til at det går mer strøm til maskinen i tomgang. For synkronmaskinen har høy ytelse vist å kunne virke negativt i enkelte tilfeller. Dette kan også testes for asynkronmaskin. Det kan være av interesse å optimalisere AVR slik at bidraget fra synkronmaskiner blir best mulig, uavhengig av feilsted. Oppgaven har bare fokusert på å vise at AVR kan føre til forbedring av utløsningstid, ikke i hvor stor grad den kan forbedre.

Plasseringen av maskinene er viktig. Det kan være aktuelt å finne en metode for plassering av maskinene som er uavhengig av nettets utforming. Dette kan være basert på hvilke steder i nettet minste kortslutning oppstår og hvilket spenningsfall på motorklemmene som gir mest kortslutningsbidrag til flest mulig punkter. Oppgaven viser gode resultater ved å benytte maskiner i nettet. Liknende tester kan bli utført i laboratorium for å teste om resultatene er realistiske utenfor simuleringene. Det kan også være av stor interesse å teste funksjonen til maskinene ute i et virkelig nett. Oppstart av maskinene etter feilen er klarert kan også være spennende å utforske. For at ikke vern skal koble ut ved oppstart av enkelte maskiner må det kanskje tilkobles kondensatorbanker under oppstart.

Oppgaven har ikke tatt for seg vurdering av pris for forskjellige alternativer. Det kan være av stor interesse å inkludere det økonomiske aspektet i oppgaven. Hvor mange maskiner, hvor store maskiner og hvilke typer maskiner som skal bli tatt med i nettet kan bli vurdert

sammen med pris og nytte. Her kan det bli aktuelt å vurdere om det lønner seg å minimere parameterverdiene til en maskin for å forbedre utløsningstiden til vern, eller om det ikke er verdt den ekstra kostnaden. Det kan også vurderes om elektriske maskiner kan være et lønnsomt alternativ sammenlignet med utbygging av linjer og kabler i nettet.

Bibliografi

- [1] Y. Zhou, D. D. Nguyen, P. C. Kjær og S. Saylor, «Connecting wind power plant with weak grid - Challenges and solutions,» *2013 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, pp. 1-7, Vancouver, 2013.
- [2] E. H. Hansen, *Elektroinstallasjoner*, Trondheim: Classica, 2010.
- [3] Sweco Norge AS, *Vurdering av behov for å sette grenseverdi for minimum kortslutningsytelse i lavspenningsnettet*, Oslo: NVE, 2015.
- [4] E. H. Hansen, *Privat kommunikasjon*, Institutt for elkraftteknikk, NTNU, 2018-04-11.
- [5] Justis- og beredskapsdepartementet, «Lovdata,» 06 November 1998. [Internett]. Available: <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/1998-11-06-1060>. [Funnet 14 Februar 2018].
- [6] N. Tleis, *Power Systems Modelling and Fault Analysis: Theory and Practice*, Elsevier Ltd., 2008.
- [7] Olje- og energidepartementet, «Lovdata,» 2004. [Internett]. Available: <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2004-11-30-1557>. [Funnet 14 februar 2018].
- [8] REN, «LS Nett – Dimensjonering av ledning og valg av overstrømsvern,» REN, 2010.
- [9] NTE, «Veiledning: Valg av lavspenningssikringer som kortslutning- og overbelastningsvern for NTE Nett,» NTE Nett AS, 2018.
- [10] Sintef Energiforskning, *Planleggingsbok for kraftnett, Bind III - tekniske data*, Trondheim: Sintef Energiforskning, 2000.
- [11] J. Machowski, J. R. Bumby og J. W. Bialek, *Power System Dynamics, Stability and Control*, John Wiley & Sons, Ltd, 2012.
- [12] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill Education, 1994.

- [13] S. J. Chapman, *Electric Machinery Fundamentals - fifth edition*, New York: McGraw-Hill Education, 2012.
- [14] V. Jerkovic, K. Miklosevic og Z. Spoljaric, «Excitation System Models of Synchronous Generator,» 2010.
- [15] D. Sumina, G. Erceg og T. Idzotic, «Excitation control of a synchronous generator using fuzzy logic stabilizing controller,» *2005 European Conference on Power Electronics and Applications*, Dresden 2005.
- [16] N. Jenkins, R. Allan, P. Crossley, D. Kirschen og G. Strbac, «Embedded Generation,» *IEEE Power and Energy Series 31*, London, 2000.
- [17] C.-M. Ong, *Dynamic Simulation of Electric Machinery Using Matlab/Simulink*, Prentice Hall PTR, 1998.
- [18] M. Pavella og P. G. Murthy, *Transient Stability of Power Systems: Theory and Practice*, John Wiley & Sons Ltd, 1994.
- [19] T. Toftevaag og J. I. Marvik, *Induction machine - transient model*, Trondheim: NTNU, 2008.
- [20] A. E. Fitzgerald, C. J. Kingsley og S. D. Umans, *Electric Machinery*, McGraw-Hill Book Company, 1992.
- [21] IEEE, *Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants*, IEEE, 1999.
- [22] DIgSILENT, «PowerFactory Support: How are the pre-fault voltages for the different Short-Circuit analysis methods determined?,» [Internett]. Available: <https://www.digsilent.de/en/faq-reader-powerfactory/how-are-the-pre-fault-voltages-for-the-different-short-circuit-analysis-methods-determined.html>. [Funnet 21 februar 2018].
- [23] DIgSILENT, *PowerFactory 2018 User Manual*, Gomaringen: DIgSILENT GmbH, 2017.
- [24] DIgSILENT, «PowerFactory Support: How is the external grid modelled for RMS simulation?,» [Internett]. Available: <https://www.digsilent.de/en/faq-reader-powerfactory/how-is-the-external-grid-modeled-for-rms-simulation.html>. [Funnet 09 april 2018].
- [25] DIgSILENT, *Technical Reference Documentation External Grid*, Gomaringen: DIgSILENT GmbH, 2017.
- [26] R. Paulsen, Privat Kommunikasjon, NTE Nett AS, 2018-04-14.
- [27] DIgSILENT, *Technical Reference Documentation Two-Winding Transformer (3-Phase)*, Gomaringen: DIgSILENT GmbH, 2017.

- [28] DIgSILENT, Technical Reference Documentation Overhead Line Models, Gomaringen: DIgSILENT GmbH, 2017.
- [29] DIgSILENT, Technical Reference Documentation General Load, Gomaringen: DIgSILENT GmbH, 2017.
- [30] J. R. Smith og M.-J. Chen, Three-Phase Electrical Machine Systems: Computer Simulation, Exeter: Research Studies Press LTD., 1993.
- [31] T. Toftevaag, Privat kommunikasjon, Institutt for elkraftteknikk, NTNU, 2018-05-29.
- [32] IEEE, IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies, New York: IEEE, 2005.
- [33] DIgSILENT, Technical Reference Documentation I-t Characteristic, Gomaringen: DIgSILENT GmbH, 2017.
- [34] Norsk Elektroteknisk Komité, NEK 400: Elektriske lavspenningsinstallasjoner, Norsk Elektroteknisk Komité, 2014.
- [35] D. A. Tziouvaras og D. Hou, «Out-of-step protection fundamentals and advancements,» *57th Annual Conference for Protective Relay Engineers*, pp. 282-307, 2004.

Vedlegg A - Informasjon om nettet

Tabellene nedenfor viser data om nettet som er brukt som utgangspunkt for modellen. Alle verdier er gjennomsnittsverdier for last basert på total last på et år fordelt på et gitt antatt antall brukstimer. Alle verdiene er gitt av NTE Nett AS.

Tabell 32: Data for laster i nettet og flyt gjennom transformatoren, levert av nettselskap.

Knutepunkt	Spenning	Last(kW)	Last(kVAr)	Max.str.(kA)	Min.str.(kA)	Avstand(m)	Marg.tap(%)
T (HS)	21,019	0	0	0,862	0,747	0	0
T (LS)	0,228	0	0	5,832	4,6	0	0,81
L1	0,22	3,697	0,751	0,924	0,586	358	8,01
L2	0,22	3,695	0,75	0,993	0,632	349	7,83
L3	0,22	0,394	0,08	0,825	0,522	411	8,18
L5	0,216	6,516	1,323	0,485	0,303	703	12,59
L6	0,221	0	0	0,318	0,198	1026	7,22
L7	0,219	6,141	1,247	0,42	0,263	843	9,2
B4	0,22	0	0	0,454	0,284	822	8,49
L9	0,225	2,186	0,444	0,438	0,281	495	3,34
L10	0,225	0,095	0,019	0,38	0,244	561	2,86

Tabell 33: Data om transformator levert av nettselskap.

Knutepkt 1	Knutepkt 2	Ytelse(kVA)	Spg(kV)	Flyt(kW)	Flyt(kVAr)	Tap(kW)	Tap(kVAr)	Tomgangstap(kW)	Trinn(%)	Belastning(%)
T(HS)	T(LS)	100	21,019	23,962	5,047	0,3	0,23	0,21	0	26

Tabell 34: Lastflyt i nettet og kabeltype med lengde og belastning, levert av nettselskap.

Knutepkt 1	Knutepkt 2	Spg(V)	Flyt(kW)	Flyt(kVAr)	Tap(kW)	Tap(kVAr)	Strøm(A)	Belastn.(%)	Lengde(m)	Type	Typebetegnelse
T	A	227	14,952	3,045	0,122	0,027	39	24	85	KA	TFXP 1X4X95 AL
A	A1	223,3	14,83	3,018	0,361	0,086	39	18	252	LL	EX 1X95
A1	L1	220,3	3,705	0,751	0,007	0,001	10	10	21	LL	EX 1X25
A1	L2	220,4	3,7	0,751	0,004	0	10	10	12	LL	EX 1X25
A1	A2	220,3	7,064	1,43	0,018	0,004	19	9	52	LL	EX 1X95
A2	L3	220	0,394	0,08	0	0	1	1	22	KA	PFSP 1X3X25 AL
A2	A3	219,7	6,653	1,346	0,018	0,004	18	8	60	LL	EX 1X95
A3	L4	219,4	0	0	0	0	0	0	20	LL	EX 1X25
A3	A4	218,8	6,634	1,342	0,037	0,009	18	8	120	LL	EX 1X95
A4	L5	216,8	6,598	1,333	0,082	0,01	18	13	134	LL	EX 1X50
T	B	227,6	6,395	1,295	0,022	0,004	17	8	85	KA	TFXP 1X4X95 AL
B	B1	224	6,373	1,291	0,174	0,041	17	8	664	LL	EX 1X95
B1	B2	220,9	0	-0,001	0	0	0	0	194	LL	EX 1X50
B2	L6	220,9	0	-0,001	0	-0,001	0	0	83	KA	TFXP-JETNET 1X4X50
B1	B3	220,3	6,199	1,252	0,037	0,004	17	12	70	LL	EX 1X50
B3	B4	219,6	6,162	1,247	0,001	0	17	6	3	KA	TFXP 1x4x95 AL
B4	L7	219,2	6,161	1,248	0,021	0,001	17	17	21	KA	PFSP 1X3X25 AL
B4	L8	219,6	0	-0,001	0	-0,001	0	0	68	KA	PFSP 1X3X50 AL
T	C	227,8	2,31	0,474	0,003	-0,001	6	4	85	KA	TFXP 1X4X95 AL
C	C1	227,6	2,307	0,475	0,002	0	6	3	54	LL	EX 1X95
C1	C2	227,2	2,305	0,474	0,005	0,004	6	2	130	LL	AL 1X50
C2	C3	226,2	2,3	0,47	0,014	0,007	6	3	178	LL	AL 1X25
C3	C4	225,4	2,192	0,444	0,003	0	6	6	27	LL	EX 1X25
C4	L9	225,1	2,189	0,444	0,002	0	6	6	21	KA	PFSP 1X3X25 AL
C3	C5	225,5	0,095	0,019	0	0	0	0	77	LL	AL 1X25
C5	L10	225,5	0,095	0,019	0	0	0	0	37	LL	EX 1X25

Tabell 35: Sikringsstørrelsene i nettet er levert av nettselskap.

Fra	Til	Størrelse [A]
T	A	200
A1	L1	125
L1	hus	50
A1	L2	125
L2	hus	50
A2	L3	80
L3	hus	50
L5	hus	63
T	B	200
B3	B4	80
L7	hus	50
T	C	200
L9	hus	50
L10	hus	50

Vedlegg B – Stivt nett

Det stive nettet er modellert med følgende verdier:

«Bus type» er satt til PV slik at det stive nettet opprettholder riktig spenning (22kV) på høyspentsiden av transformatoren.

«Acceleration Time Constant» er satt til 999999s.

Max. Values og min. Values er oppgitt med følgende verdier:

Tabell 36: Verdier for stivt nett.

	Maksverdier	Minimumsverdier
Kortslutningsytelse (S_k'')	30 MVA	25 MVA
Kortslutningsstrøm (I_k'')	0,787 kA	0,656 kA
C-faktor	1,1	0,9
R/X forhold	0,1	0,1
X_0/X_1	1	1
R_0/X_0	0,1	0,1

Vedlegg C – Transformatordata

Fordelingstransformatorer med forskjellig ytelse fra Sintef sin planlenningsbok for kraftnett er gitt av Figur 36.

Omsetning i tomgang:

12 000 \pm 2x2.5 %/240 volt

24 000 \pm 2x2.5 %/240 volt

Koplingsgruppe Yyno Periodetall 50 Hz

Ytelse [kVA]	PO [W]	P _k [W]	ek [%]	Oljev [kg]	Tot.vekt [kg]	B	L	H
31,5	125	520	2,5	105	370	560	835	1060
50	155	740	3,6	95	400	560	835	1060
100	240	1200	3,6	125	600	565	940	1150
200	465	1950	3,8	310	1160	710	1250	1400
315	615	2900	4,3	340	1360	700	1270	1430
500	880	3900	4,6	420	1890	740	1440	1740
630	1100	4750	4,9	475	2250	730	1510	1850
800	1220	6300	4,9	580	2650	910	1630	1900
1000	1320	8900	5,3	660	2910	1020	1690	2000
1250	1960	9700	5,7	790	3800	1060	1950	2020
1600	2150	13100	6,2	910	4375	1120	2040	2140

Figur 36: Data for fordelingstransformatorer [10].

Vedlegg D – Linje- og kabelparametere

Ved produksjon av modell er linje- og kabelverdier hentet fra Tabell 37, Tabell 38, Tabell 39 og Tabell 40, basert på linje- og kabeltypene som NTE har oppgitt at de bruker. «Ik 1 sek» oppgir tillatt kortslutningsstrøm i ett sekund.

Tabell 37: Data for valg av luftledning for 230V. Kapasitanser er basert på vertikaloppheng uten jordline [10].

Ledertype			R ohm/km	X	Cj nF/km	Cd	Ith A	Mastebilde
FeAl	1X10	6/1	1.791	0.366	4.18	9.98	118	
FeAl	1X16	6/1	1.126	0.351	4.26	10.42	171	
FeAl	1X25	6/1	0.721	0.337	4.33	10.88	235	
FeAl	1X35	6/1	0.512	0.326	4.39	11.25	287	
FeAl	1X50	6/1	0.359	0.315	4.45	11.68	362	
FeAl	1X70	26/7	0.257	0.304	4.51	12.11	454	
FeAl	1X95	26/7	0.191	0.293	4.57	12.57	544	
FeAl	1X120	26/7	0.151	0.286	4.62	12.91	624	
FeAl	1X150	26/7	0.121	0.279	4.66	13.29	727	
FeAl	1X185	26/7	0.098	0.273	4.70	13.61	832	
FeAl	1X240	26/7	0.076	0.264	4.76	14.06	992	
Al	1x16		1.222	0.359	4.23	10.27	146	
Al	1x25		0.717	0.345	4.30	10.72	192	
Al	1x35		0.513	0.334	4.36	11.08	237	
Al	1x50		0.359	0.323	4.42	11.49	298	
Al	1x70		0.256	0.312	4.48	11.91	370	
Al	1x95		0.190	0.302	4.54	12.34	468	
Al	1x120		0.150	0.294	4.59	12.68	535	
Al	1x150		0.120	0.287	4.63	13.01	601	
Al	1x185		0.098	0.281	4.67	13.35	704	
Al	1x240		0.076	0.273	4.73	13.79	830	
Cu	1x10		1.784	0.396	4.05	9.25	88	
Cu	1X16		1.115	0.373	4.16	9.84	140	
Cu	1x25		0.714	0.359	4.23	10.25	183	
Cu	1X35		0.510	0.348	4.28	10.59	211	
Cu	1x50		0.357	0.338	4.34	10.95	284	
Cu	1X70		0.255	0.327	4.40	11.34	342	
Cu	1x95		0.188	0.317	4.46	11.73	433	
Cu	1X120		0.149	0.309	4.51	12.06	500	
Cu	1X150		0.119	0.302	4.54	12.32	579	
Cu	1x185		0.096	0.296	4.58	12.63	660	
Cu	1X240		0.074	0.286	4.64	13.08	765	

Tabell 38: Data for valg av hengeledning opptil 1kV [10].

Kabeltype			R	X	Cj	Cd	lth	Ik 1 sek
			ohm/km		nF/km		A	kA
EX	1X25	Al	1.200	0.082	0.28	0.55	95	1.9
EX	1X50	Al	0.641	0.0770	0.41	0.80	140	3.7
EX	1X95	Al	0.320	.076	0.52	1.09	220	7.0
EXW	1X150	Al	0.206	0.072	0.60	1.19	295	11.0

Tabell 39: Data for PFSP-kabler med forskjellig tverrsnitt. Tåler opptil 1kV [10].

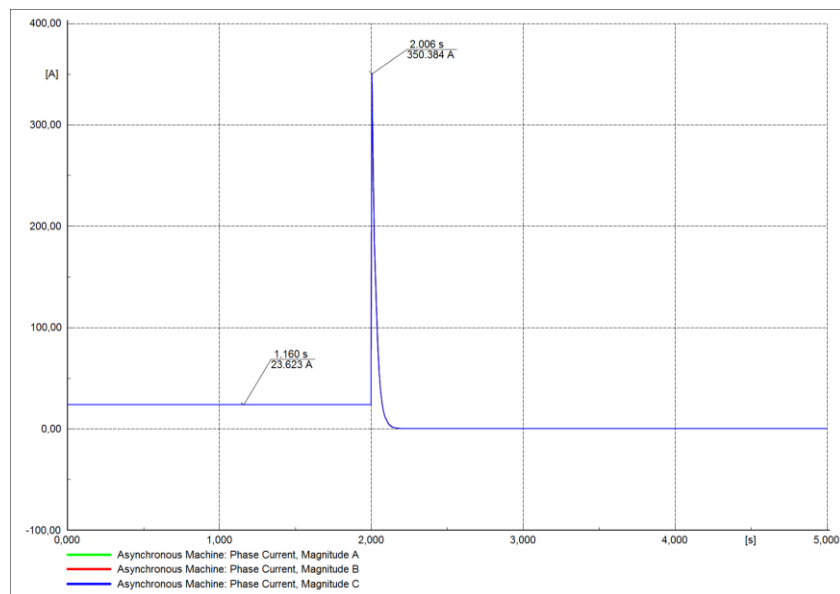
Type og tverrsnitt	R	X	Cj	Cd	lth	Ik 1 sek	Null-system imp. ¹⁾	
							[ohm/km]	[ohm/km]
PFSP 3x16 Al / 10	1,910	0,085	0,37	0,70	78	1,1	7,082	0,1164
PFSP 3x25 Al / 10	1,200	0,082	0,42	0,83	100	1,7	6,372	0,1118
PFSP 3x35 Al / -	0,868	0,079	0,47	0,95	-	-	-	-
PFSP 3x50 Al / 16	0,641	0,079	0,53	1,08	150	3,5	4,089	0,0836
PFSP 3x70 Al / -	0,443	0,075	0,55	1,09	-	-	-	-
PFSP 3x95 Al / 35	0,320	0,075	0,57	1,10	220	6,7	2,103	0,0639
PFSP 3x120 Al / -	0,253	0,072	0,58	1,13	-	-	-	-
PFSP 3x150 Al / 50	0,206	0,072	0,60	1,19	290	10,5	1,467	0,0540
PFSP 3x185 Al / -	0,164	0,072	0,62	1,22	-	-	-	-
PFSP 3x240 Al / 70	0,125	0,072	0,64	1,26	375	16,8	0,8433	0,0569
PFSP 3x16 / 10 Cu	1,150	0,085	0,37	0,70	100	1,8	4,303	0,1220
PFSP 3x25 / 16 Cu	0,727	0,082	0,42	0,83	130	2,8	3,960	0,0892
PFSP 3x35 / 16 Cu	0,524	0,079	0,47	0,95	160	3,9	3,757	0,0842
PFSP 3x50 / 25 Cu	0,387	0,079	0,53	1,08	190	5,5	2,456	0,0827
PFSP 3x70 / 35 Cu	0,268	0,075	0,55	1,09	240	7,7	1,746	0,0686
PFSP 3x95 / 50 Cu	0,193	0,075	0,57	1,10	285	10,5	1,227	0,0636
PFSP 3x120 / 70 Cu	0,153	0,072	0,58	1,13	325	13,2	0,892	0,0468
PFSP 3x150 / 70 Cu	0,124	0,072	0,60	1,19	370	16,5	0,863	0,0463
PFSP 3x185 / 95 Cu	0,099	0,072	0,62	1,22	420	20,4	0,644	0,0491
PFSP 3x240 / 120 Cu	0,075	0,072	0,64	1,26	480	26,4	0,506	0,0476

Tabell 40: Data for TFXP-kabler med forskjellig tverrsnitt. Tåler opptil 1kV [10].

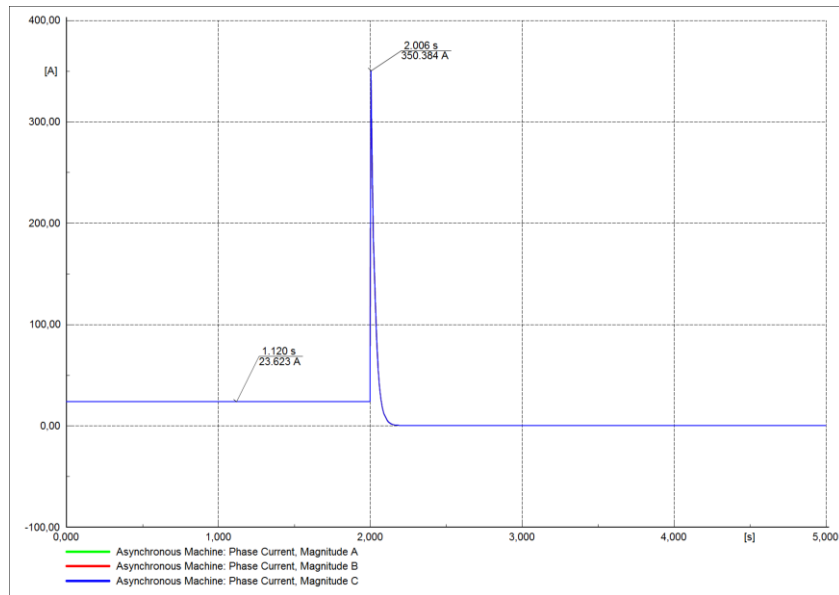
Type og tverrsnitt	R	X	Cj	Cd	lth	Ik 1 sek	Null-system imp.:	
							[ohm/km]	[ohm/km]
TFXP 4x25 Al	1,200	0,082	0,42	0,82	115	2,2	4,800	0,374
TFXP 4x50 Al	0,641	0,079	0,53	1,08	180	4,5	2,564	0,358
TFXP 4x95 Al	0,320	0,076	0,57	1,10	260	8,5	1,280	0,358
TFXP 4x150 Al	0,206	0,072	0,60	1,19	335	13,5	0,824	0,334
TFXP 4x240 Al	0,125	0,072	0,64	1,26	435	21,6	0,500	0,334

Vedlegg E – Koblingen til maskinen

Det er ingen utgjør ingen forskjell for nettet om maskinen har D-kobling eller Y-kobling. Linjespenningen vil uansett være 230V og strømmene inn og ut fra maskinen er avhengig av effekten til maskinen, spenningen på klemmene og parameterverdiene til maskinene som er valgt. Hvilke strømmen som oppstår i spolene til maskinen er ikke nødvendig å ta hensyn til i denne oppgaven. For testene som er kjørt for å vise dette er AS1 brukt. Det er testet hvordan strømmen blir for den samme maskinen med D-koblet stator og med Y-koblet stator når den kjører på tomgang.



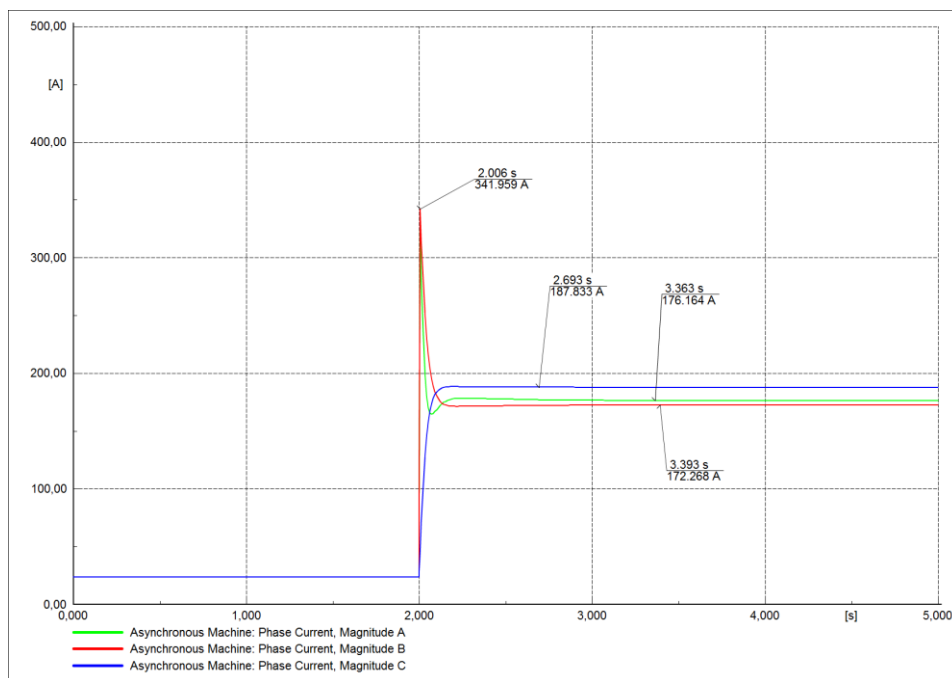
Figur 37: Strøm gjennom motorklemme til D-koblet AS1.



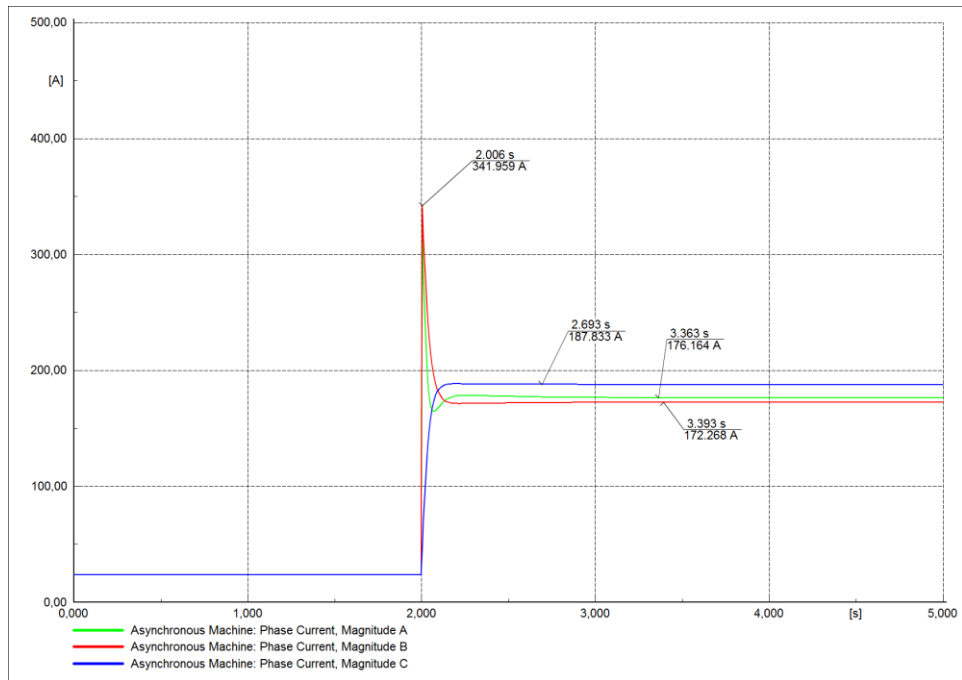
Figur 38: Strøm gjennom motorklemme til Y-koblet ASI.

Dette viser at det ikke er forskjell på strømmene inn og ut av maskinen ved symmetriske hendelser. Før feilen kjører maskinen på tomgang. Etter 2 sekunder oppstår det er 3fase kortslutning på klemmene.

Dersom det oppstår en asymmetri i nettet, som ved topolet kortslutning på klemmene til maskinen, vil fortsatt strømme inn og ut av maskinen være lik ved D-koblet og Y-koblet stator. Dette er vist i Figur 39 og Figur 40 hvor det oppstår kortslutning mellom fase A og fase B på motorklemmene etter 2 sekunder.



Figur 39: Strøm gjennom motorklemlene til D-koblet ASI ved kortslutning på fase A og B.



Figur 40: Strøm gjennom motorklemlene til Y-koblet AS1 ved kortslutning på fase A og B.

Det observeres at alle verdier er identiske. Det samme vil gjelde for en kortslutning av en fase mot jord ettersom en eventuell Y-kobling ikke ville vært jordet i nøytralpunktet.

Vedlegg F – Data for maskiner

Dette vedlegget inneholder data for maskinene brukt i oppgaven.

Asynkronmaskinene

For asynkronmaskin er det valgt to forskjellige maskiner som skal øke kortslutningsytelsen. Begge er 40kW med tregghetsmoment på 1kgm^2 . Det er valgt én maskin med «låst rotor strøm» på 4,06pu og en annen med 7,71pu. Verdiene for resistans og reaktans for rotor og stator er blitt endret slik at maskinen har høy startstrøm, noe som også bidrar til en høy kortslutningsstrøm. Det blir brukt maskiner med forskjellig størrelse av startstrøm for å få en oversikt over hvor mye dette bidrar til å slå ut vern raskere. Begge maskinene er modellert med kortslutningsrotor.

Tabell 41: Maskindata for asynkronmaskinene brukt i oppgaven.

	AS1	AS2
S_N [kVA]	47,1	43,5
P_N [kW]	40,0	40,0
V_N [V]	230	230
f_N [Hz]	50	50
n_N [rpm]	2907	2979
Poler	2	2
Kobling	D	D
J [kg m²]	1	1
H [s]	0,45	0,45
Låst-rotor strøm ($\frac{I_{lr}}{I_N}$)	4,06	7,71
R_s [pu]	0,03	0,007
X_s [pu]	0,12	0,065
X_m [pu]	4,5	4
R_r [pu]	0,03	0,007
X_r [pu]	0,122	0,065

Synkronmaskinene

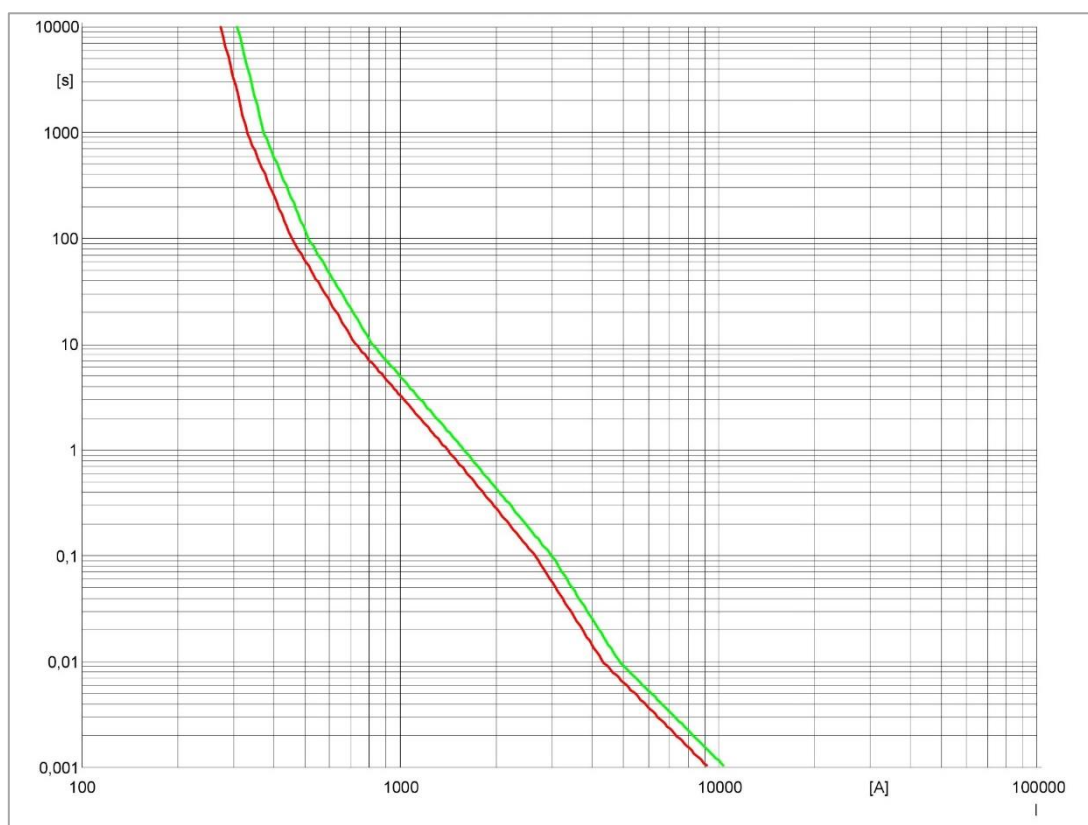
Begge maskinene er modellert med salient rotor. SM1 er maskinen som hovedsakelig er brukt for å se på synkronmaskin. SM2 er samme maskinen med dobling av aktiv effekt. Denne er ikke parametrisert annerledes for å se på hvordan økningen av effekt vil øke strømbidraget.

Tabell 42: Maskindata for synkronmaskinene brukt i oppgaven.

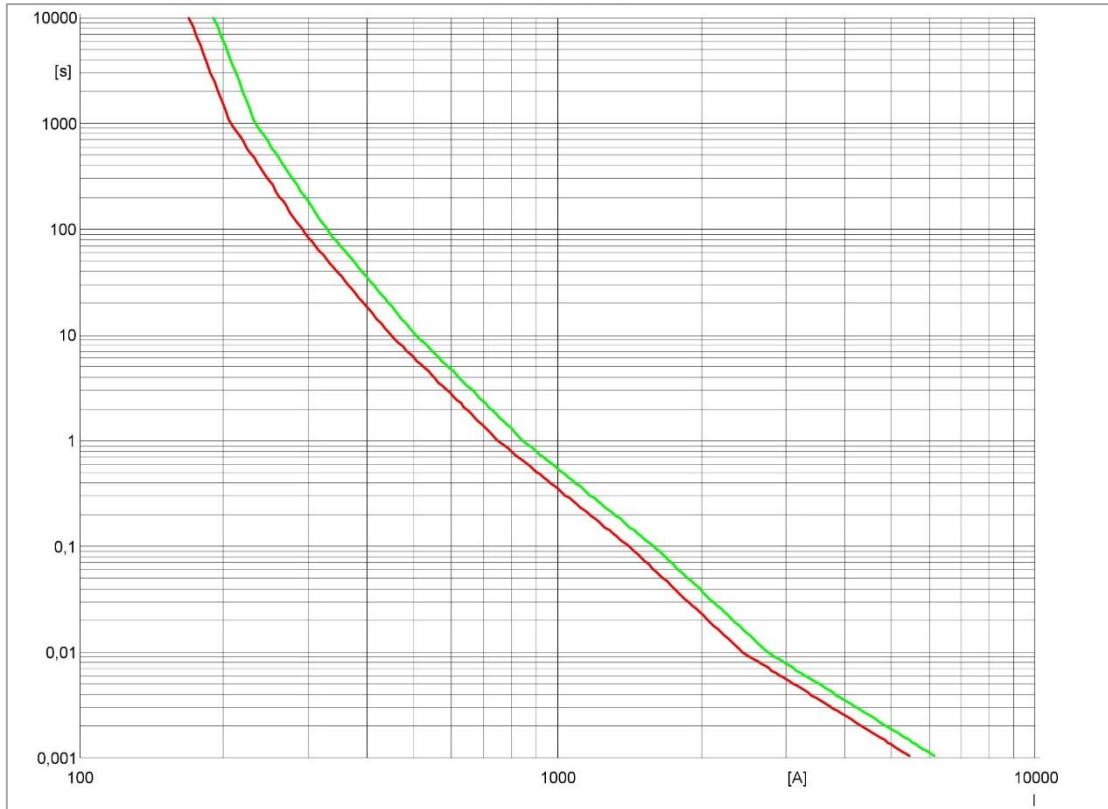
	SM1	SM2
S_N [kVA]	45	90
V_N [V]	230	230
$\cos \varphi$	0,9	0,9
f_N [Hz]	50	50
Poler	2	2
Kobling	D	D
J [kg m²]	1	1
H [s]	0,45	0,45
R_s [pu]	0,001	0,001
X_l [pu]	0,08	0,08
X_d [pu]	1	1
X_q [pu]	0,7	0,7
X_d' [pu]	0,3	0,3
X_d'' [pu]	0,11	0,11
X_q'' [pu]	0,11	0,11
T_d' [s]	0,33	0,33
T_d'' [s]	0,012	0,012
T_q'' [s]	0,016	0,016

Vedlegg G – Sikringskarakteristikk

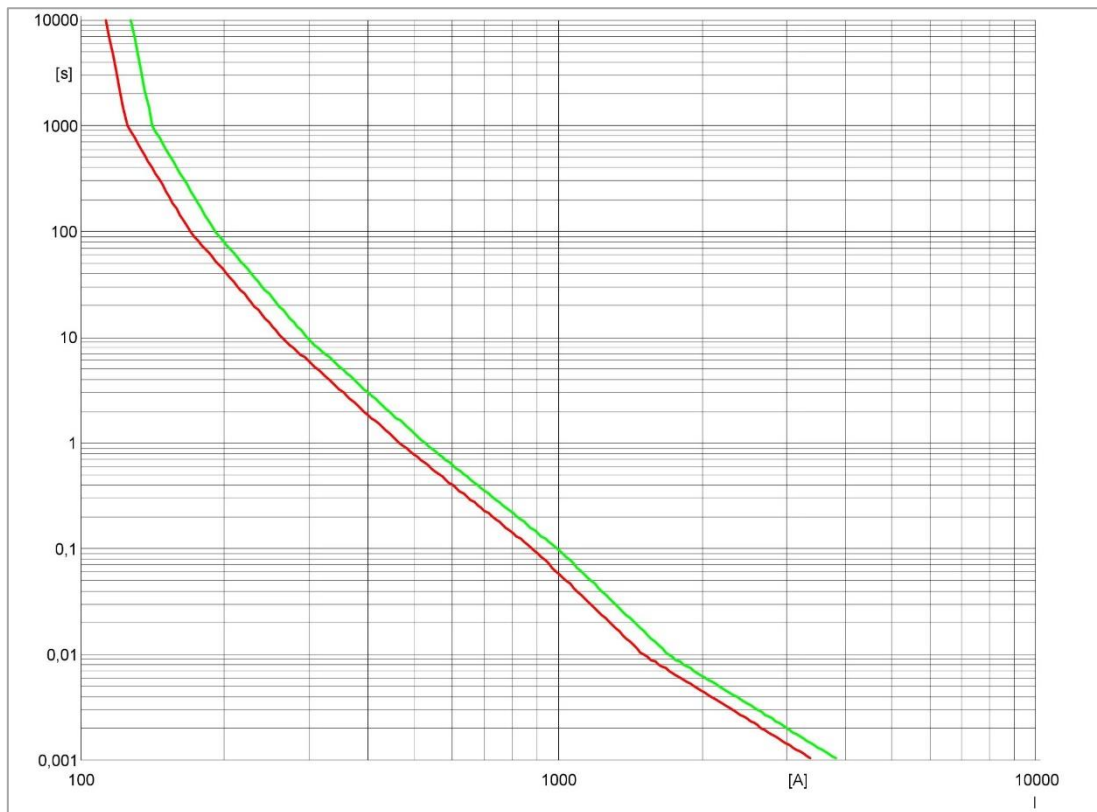
Alle sikringene som er brukt i oppgaven er sikringer fra Siemens. Karakteristikken for sikringene som er bruk er gitt i dette vedlegget.



Figur 41: Sikringskarakteristikk for simens sikring AK_3NA_1_690_GG_200A i PowerFactory.



Figur 42: Sikringskarakteristikk for simens sikring AK_3NA_1_690_GG_125A i PowerFactory.



Figur 43: Sikringskarakteristikk for simens sikring AK_3NA_1_690_GG_80A i PowerFactory.

Vedlegg H – Kortslutningsstrøm i hele nettet basert på IEC 60909

Tabell 43, Tabell 44 og Tabell 45 gir en oversikt over kortslutningsstrømmer i nettet før motor blir lagt inn. Oversikten over kortslutningsstrømmer er regnet ut basert på IEC 60909. Analysen antar at spenningen i hver node er lik 90% av nominell spenning. Det vil føre til at de virkelige kortslutningene sannsynligvis vil være høyere ettersom den normale laststrømmen i nettet før feilen vil være lavere enn den som gir 10% spenningsfall i nettet.

Tabell 43: Kortslutningsstrøm ved største og minste feil i hver node på radial A, utregnet med IEC 60909.

	Ik maks [A]	Ik min [A]	Skss (maks) [kVA]
T(HS)	787	568	29989
T(LS)	6819	4892	2716
A	3655	2315	1456
A1	1228	724	489
L1	1021	597	407
L2	1101	646	439
A2	1075	632	428
L3	906	529	361
A3	940	551	374
L4	818	477	326
A4	751	438	299
L5	522	303	208

Tabell 43, Tabell 44 og Tabell 45 viser at kortslutningsytelsen raskt blir lavere lenger inn i lavspennettet. Parameterverdiene til maskinene må bli valgt slik at kortslutningsstrømmen blir høy.

Tabell 44: Kortslutningsstrøm ved største og minste feil i hver node på radial B, utregnet med IEC 60909.

	Ik maks [A]	Ik min [A]	Skss (maks) [kVA]
T(HS)	787	568	29989
T(LS)	6819	4892	2716
B	3655	2315	1456
B1	576	335	229
B2	387	224	154
L6	339	196	135
B3	490	284	195
B4	489	283	195
L7	451	261	180
L8	427	247	170

Tabell 45: Kortslutningsstrøm ved største og minste feil i hver node på radial B, utregnet med IEC 60909.

	Ik maks [A]	Ik min [A]	Skss (maks) [kVA]
T(HS)	787	568	29989
T(LS)	6819	4892	2716
C	3655	2315	1456
C1	2610	1595	1040
C2	1232	760	491
C3	565	340	225
C4	508	303	202
L9	470	279	187
C5	457	274	182
L10	406	241	162

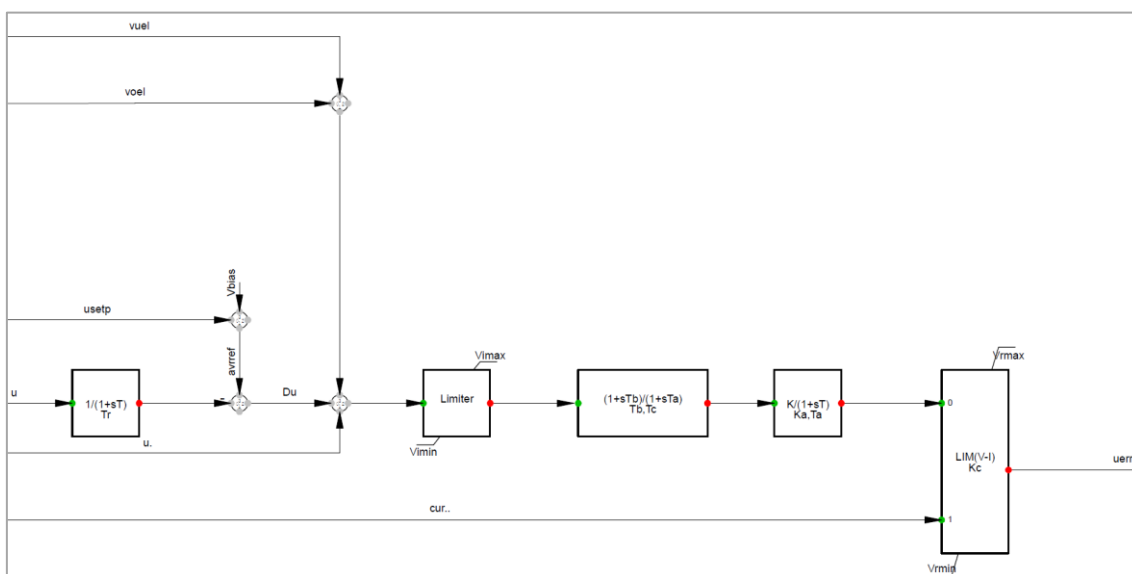
For alle simuleringer vil lastene trekke like mye som det er gitt av lastflytskjemaet fra NTE. Det vil si at det blir brukt gjennomsnittlig forbrukt fordelt på antatt brukstid. Oversikt over laststrømmene som går i nettet er gitt av Vedlegg A.

Vedlegg I – AVR

Her ligger parametervalg for de to forskjellige spenningsregulatorene som er brukt.

Statisk magnetisering

For statisk magnetisering er «avr_EXAC4» i PowerFactory brukt. Denne har fullt navn «1981 IEEE type AC4 excitation system». Blokkdiagrammet for denne er vist i Figur 44.



Figur 44: Blokkdiagram for EXAC4

Inne i boksen som heter «LIM(V-I) Kc» er det en funksjon som begrenser magnetiseringsspenningen. Spenningen blir begrenset til maks

$$V_{rmax} - I \cdot Kc$$

og til minimum

$$V_{rmin} - I \cdot Kc$$

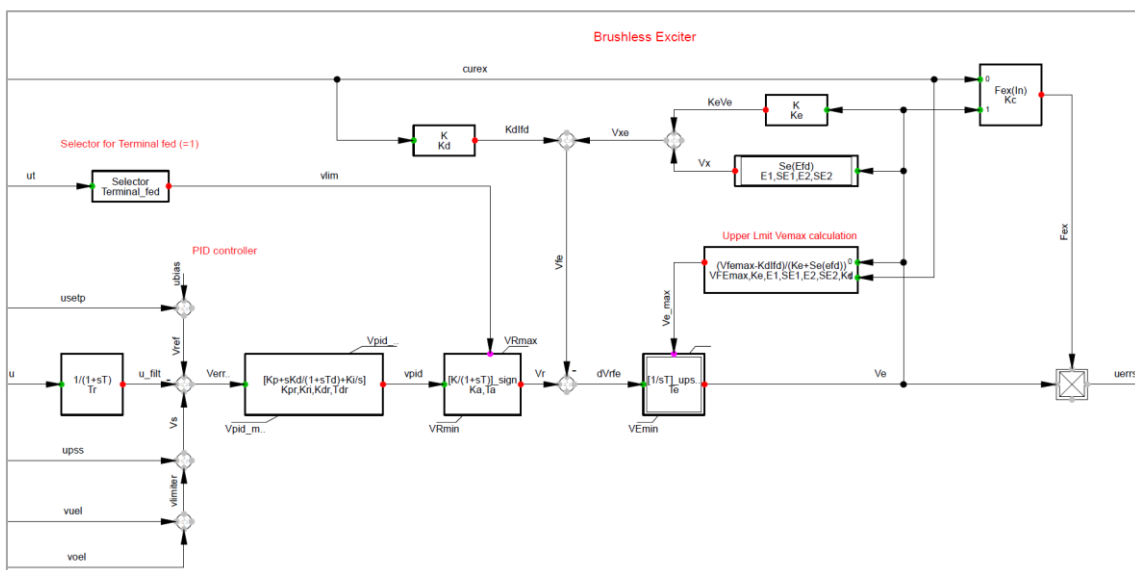
V_{rmax} og V_{rmin} er parametere som er endret, sammen med Kc som forsterker effekten magnetiseringsstrømmen har på reduksjon av magnetiseringsspenningen.

Tabell 46: Parameterverdier for AVR EXAC4.

Navn	Verdi	Enhet	Beskrivelse
Tr	0,02	[s]	Forsinkelse av målt spenning
Tb	1	[s]	Filterforsinkelse
Tc	1	[s]	Filter-derivattidskonstant
Ka	50	[pu]	Regulatorens forsterkning
Ta	0,04	[s]	Tidskonstant for regulator
Kc	0,6	[pu]	Magnetiseringsstrømmens kompensasjonsfaktor
Vimin	-0,2	[pu]	Minste inngangsverdi for regulator
Vrmin	-2	[pu]	Minste utgangsverdi for magnetiseringsspenning
Vimax	0,2	[pu]	Maksimum utgangsverdi for regulator
Vrmax	2	[pu]	Minste utgangsverdi for magnetiseringsspenning

Børsteløs magnetisering

For børsteløs magnetisering er «avr_AC8BnoPIDlimits» i PowerFactory. Fullt navn for denne er «IEEE 421.5 2005 AC8B excitation system», men den bruker en PID kontroller uten metning. Det finnes også en AVR som er lik, med PID kontroller som har metning. Denne heter «avr_AC8B» i PowerFactory og her kan grensene til PID reguleres. I oppgaven brukes AC8B uten PID begrensninger og blokkdiagrammet for denne er vist i Figur 45. Parameterverdiene som er brukt er vist i Tabell 47.



Figur 45: Blokkdiagram for AVR AC8B uten PID begrensninger.

Tabell 47: Parameterverdier for AVR AC8B.

Navn	Verdi	Enhet	Beskrivelse
Kpr	80	[pu]	Proporsjonal forsterkning
Kir	0,1	[pu]	Integral forsterkning
Kdr	10	[pu]	Derivat forsterkning
Tdr	0,1	[s]	Forsinkelseskonstant for derivat forsterkning
Ka	1	[pu]	Regulatorens forsterkning
Ta	0	[s]	Tidskonstant for regulator
Vfemax	3,4	[pu]	Øvre begrensning av magnetiseringsspenning
Ke	1	[pu]	Feltgeneratorkonstant relatert til selvmagnetisert felt
E1	6,5	[pu]	Verdi relatert til metning av magnetisering
SE1	0,3	[pu]	Verdi relatert til metning av magnetisering
E2	9	[pu]	Verdi relatert til metning av magnetisering
SE2	3	[pu]	Verdi relatert til metning av magnetisering
Kd	1,1	[pu]	Demagnetiseringsfaktor
Kc	0,55	[pu]	Likeretters lastfaktor proporsjonal med kommuteringsreaktans
Te	1,2	[s]	Tidskonstant for feltgenerator
Terminal_fed	0		Valg om aktivering av terminalmating
Tr	0	[s]	Forsinkelse av målt spenning
Vrmin	0	[pu]	Laveste grense for spenning videre i kretsen
VEmin	0	[pu]	Laveste grense for magnetiseringsspenning
VRmax	35	[pu]	Øverste grense for spenning videre i kretsen

Vedlegg J – Valg av sikringer

Dette kapittelet viser bakgrunnen for valgene som er foretatt for nye sikringer i nettet. Utregning av nye sikringsstørrelser er basert på formel 2.1 og formel 2.3.

Sikring for A3-L5:

Velger sikring mellom A3 og L4 (A3-L4). Linjen har en belastningsstrøm på $I_b = 50A$ og termisk grenselast på $I_z = 95A$. Sjekker for smeltesikring med 80A nominell strøm for formel 2.1 og formel 2.3.

$$50A \leq 80A \leq 95A$$

$$80A \cdot 1,6 \leq 1,45 \cdot 95 \rightarrow 128A \leq 138A$$

Linjene A1-L1, A1-L2 og A3-L4 har lik last og type leder, så alle kan bruke 80A. NTE har satt sikring på 125A for linjen A1-L1 og A1-L2, så det er bare A3-L4 som får sikring på 80A. De andre kan endres dersom det blir nødvendig. Sikringene som er oppgitt av NTE blir foreløpig brukt videre og bare nye sikringer blir regnet ut.

Sikring for A4-L5:

Belastningsstrøm til lasten er $I_b = 63A$ og termisk grenselast er $I_z = 140A$. Det blir sjekket for smeltesikring med 80A nominell strøm for formel 2.1 og formel 2.3.

$$63A \leq 80A \leq 140A$$

$$80A \cdot 1,6 \leq 1,45 \cdot 140 \rightarrow 128A \leq 203A$$

Sjekker også for 125A sikring.

$$63A \leq 125A \leq 140A$$

$$125A \cdot 1,6 \leq 1,45 \cdot 140 \rightarrow 200A \leq 203A$$

Begge sikringsstørrelsene kan brukes. 80A blir brukt videre i oppgaven for at utløsning av vernet skal skje raskere. 125A sikring hadde gitt mulighet for å øke lasten senere, men radialen har ikke mulighet for å utvide belastningen uansett.

Sikring for B1-B2:

Belastningsstrøm til lasten er $I_b = 50A$ og termisk grenselast for hele avgreiningen er $I_z = 140A$. Sjekker for smeltesikring med 80A nominell strøm for formel 2.1 og formel 2.3.

$$50A \leq 80A \leq 140A$$

$$80A \cdot 1,6 \leq 1,45 \cdot 140 \rightarrow 128A \leq 203A$$

80A sikring kan brukes.

Sikring for B1-B3:

Her er det tenkt at den gamle sikringen for B3-B4 flyttes til B1-B3.

$$I_b = (50A + 50A) \cdot 0,6 = 60A$$

Belastningsstrøm for linjen er $I_b = 60A$ og termisk grenselast er $I_z = 140A$. Tester for 80A sikring mot formel 2.1 og formel 2.3

$$60A \leq 80A \leq 100A$$

$$80A \cdot 1,6 \leq 1,45 \cdot 100 \rightarrow 128A \leq 145A$$

80A sikring kan brukes for B1-B3.

Sikring for C3-C4 og C3-C5:

Ettersom maksimal belastning for L9 og L10 er lik og termisk grenselast er lik for begge avgreiningene, kan sikring for C3-C4 og C3-C5 regnes ut sammen. Begge radialene har en maksimal belastningsstrøm på 50A og termisk begrensning for begge radialene er 95A for EX 1x25 hengekabel.

$I_b = 50A$ for hver radial og $I_z = 95A$ blir sjekket med smeltesikring på 80A nominell strøm for formel 2.1 og formel 2.3:

$$50A \leq 80A \leq 95A$$

$$80A \cdot 1,6 \leq 1,45 \cdot 90 \rightarrow 128A \leq 130,5A$$

80A sikring kan brukes for begge avgreiningene.