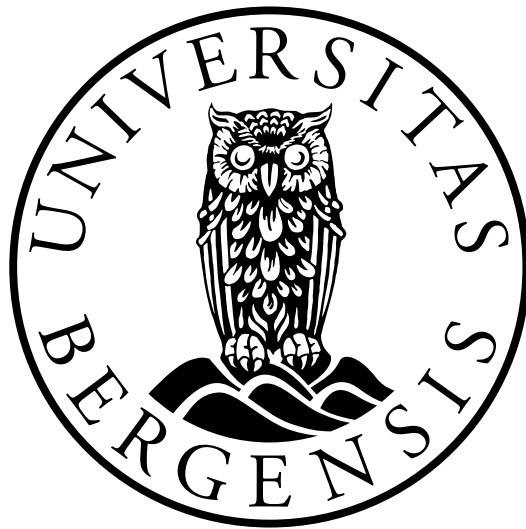


# **Spenningsetting av transformator: Innkoblingsstrøm og koblingsspenninger ved ulike parametere**

---



Masteroppgave for Geofysisk institutt,  
Det matematisk-naturvitenskapelige fakultet  
ved Universitetet i Bergen

Matias Furnes

30. mai 2022

# Sammendrag

Tilfeldig innkobling eller spenningssetting av transformatorer uten last, kan føre til redusert levetid på utstyr og leveringskvalitet i kraftnettet. I tillegg til det økonomiske perspektivet og driftssikkerheten, er dette også ugunstig med tanke på sirkulær økonomi og FNs bærekraftsmål 12; ansvarlig forbruk og produksjon. Kontrollert innkobling derimot, er teknologi som ideelt sett eliminerer de negative konsekvensene for levetiden og leveringskvaliteten. Denne teknologien kan også kalles PoW (Point on Wave) og baserer seg på å lukke effektbrytere i beste øyeblikk med hensyn til kretsens komponenter.

Høye innkoblingsstrømmer kan gjøre like mye skader på transformatorviklingene som kortslutningsstrømmer. Transformatorer er en av de mest kostbare komponentene i en kraftstasjon, og reduksjon av skadelige innkoblingsstrømmer ved bruk av PoW teknologi kan derfor være et fornuftig livsforlengende tiltak. Teknologien til PoW må ta hensyn til en rekke faktorer. Dersom presisjonen til PoW ikke er god nok, kan ett gunstig innkoblingsøyeblikk gå over til et ugunstig innkoblingsøyeblikk, og da fungerer ikke det opprinnelige formålet til PoW. I anlegg hvor PoW benyttes er der en rekke ulike parametere som muligens også kan gi høye innkoblingsstrømmer og koblingsspenninger når en transformator uten last spenningssettes. Simuleringsstudier kan benyttes for å studere hver utvalgte parameter systematisk for å kartlegge deres innvirkning på innkoblingsstrømmer og koblingsspenninger.

Ved hjelp av simuleringsprogramvare, er det kartlagt hvilke av de utvalgte parameterene som øker eller reduserer innkoblingsstrømmer og koblingsspenninger når en transformator uten last spenningssettes. Av de utvalgte simulerte parameterene er lukkevinkelen og gjenværende fluks i transformatorkjernen noen av de mest utslagsgivende parameterne. Lukkevinkel kan forklares som den elektriske fasevinkelen til spenningen, hvor effektbryteren lukker fasen eller fasene i kretsen. Innkobling av transformator i øyeblikket når spenningsbølgen krysser null gir høy innkoblingsstrøm og lav koblingsspenning, mens innkobling på spenningsens bølgetopp gir motsatt utfall. Både lav innkoblingsstrøm og koblingsspenninger er derfor vanskelig å oppnå samtidig, men ikke umulig med rett innkoblingsøyeblikk og bruk av PoW. Simuleringene viser at presisjonen til PoW er avgjørende for å oppnå et tilstrekkelig gunstig resultat for å redusere transienter. Resultatet fra denne rapporten kan bidra til å øke levetiden på transformatoren og bedre leveringskvaliteten i nettet.

# Abstract

Arbitrary switching of no-load power transformer can lead to reduction of lifetime and power quality in the grid. In addition, the economical and operational reliability perspective, another downside is the lack of integrity to circular economy and FN 12'th Sustainability Goal; Sustainable consumption and production. Energizing no-load transformer without the downside of arbitrary switching, can be realized with controlled switching technology. This technology is called PoW (Point-on-Wave) and aim to reduce the unwanted stress that reduces lifetime of transformers.

High inrush currents can constitute an equal extent of damage as short circuit current on the transformer windings. Power transformers are one of the most expensive equipment in sub-stations, and an increase in lifetime by lowering harmful stress is therefore beneficial. PoW equipment must take several factors into account. If the precision of PoW is not sufficient, a best instant can lead to a critical instant. In this way, the purpose of the technology does not reach its goal. There are many parameters in a sub-station where this technology is used, and it is conceivable that these parameters can lead to a positive or negative outcome of PoW or energizing in general. Simulations studies can be used to systematically study these parameters to identify its contributions.

By help of simulation software, each parameter is identified with their contributions to inrush current and overvoltage, when a no-load transformer is energized. Both the value of phase power voltage angle and residual flux in the transformer core, has one of the biggest contributions to both high and low voltage and current transients. Closing the circuit breaker on voltage zero leads to high currents and low overvoltage. And closing circuit breaker on voltage peak leads to opposite results. Both low current and overvoltage is therefore hard to implement, but not impossible by choosing the right closing angle with respect to residual flux in the core and the use of PoW. Simulations show that the precision is crucial to get optimal results for lowering harmful transients. The results of this report can increase lifetime on transformers and power quality in the grid.

# Forord

Denne oppgaven utgjør siste del av mastergraden energi retning elkraft ved UiB. Arbeidet ble utført over to semester, høsten 2021 og våren 2022. Dette ga en god mulighet å sette søkelys på et forskningsprosjekt og tema over tid. De nødvendige ressursene og fasilitetene ble stilt til rådighet av Geofysisk institutt i avdelingen Det matematisk-naturvitenskapelige fakultet ved UiB.

Først vil jeg takke hovedveileder Nils Westerheim som er høyskolelektor ved Høyskolen på Vestlandet og ansatt i Statkraft. Jeg er takknemlig for tildelingen av oppgaven og hjelpen med å skaffe litteratur om temaet. Spenningssetting av transformator uten last var et interessant og lærerikt tema å forske på, og kommer til å dra nytte av mye av kunnskapen i yrkessammenheng.

Det rettes også en stor takk til Ronny Goin fra Statkraft, Lars Eivind Jensvoll fra Norconsult, Magnus Kolgrov fra Statnett og bi-veileder Trygve Skjold fra UiB. Personene har svart på tanker og spørsmål som ledet arbeidet fremover.

Til slutt vil jeg takke de nærmeste, for støtte og hjelp gjennom arbeidet.



Bergen, mai 2022

# Ordforklaringer

**Fluks.** Magnetisk fluks er mengden magnetiske feltlinjer som passerer en overflate. Benevnes ofte med konstanten  $\Phi$ .

**Innkoblingsstrøm.** En type startstrøm i reaktive komponenter som transformator ved innkobling uten last og dannes på grunn av metning i kjernen ved innkobling. Kan være høy i verdi og harmonisk innhold. Innkoblingsstrømmer kan utgjøre like stort mekanisk stress på transformatorviklingene som kortslutningsstrømmer.

**Innkoblingsøyeblikk.** Øyeblikket hvor elektrisk kontakt er opprettet. Ofte referert til fasevinkelen i elektriske grader ved det gitte øyeblikket hvor den elektriske kontakten er opprettet. Kan også refereres med tid, med tiden fra referansetiden er satt frem til den elektriske kontakten er opprettet.

**Koblingsspenning.** En type transient overspenning som oppstår ved kobling av effektbryter i høyspenningsanlegg.

**Leveringskvalitet.** Statnett beskriver dette som et samlebegrep som omfatter leveringspålitelighet, spenningskvalitet og ulike ikke-tekniske elementer, slik som kundeservice og informasjon.

**PoW.** (Point on Wave). Fasevis styring av koblingstidspunktet relatert spennings sinuskurve. Kan også kalles kontrollert kobling og hensikten med funksjonen er å begrense innkoblingsstrømmen til reaktive komponenter, men også begrense spenningspåkjening ved utkobling av shuntreaktor, eller ved spenningssetting av kabel.

**Spenningssette.** Sette elektrisk spenning på objekt. Skjer ved elektrisk innkobling av objekt som transformator.

**Transienter.** Forbigående tilsander som oppstår ved raske endringer av de fysiske kvantitetene i en elektrisk krets og oppstår på grunn av utveksling av energi som er lagret eller lagres i induktanser og kapasitanser. I transiente perioder kan strømmer og spenninger i deler av kretsen bli flerdoblet av det som er normale verdier i drift. Innkoblingsstrømmer og koblingsspenninger er to typer transienter.

# Innhold

<b>Sammendrag</b>	<b>i</b>
<b>Abstract</b>	<b>ii</b>
<b>Forord</b>	<b>iii</b>
<b>Ordforklaringer</b>	<b>iv</b>
<b>1 Introduksjon</b>	<b>1</b>
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Problembeskrivelse og avgrensning av oppgaven	3
1.3 Målet med oppgaven	3
1.4 Rapportens struktur	3
<b>2 Generell teori</b>	<b>5</b>
2.1 AC - Alternierende strøm og spenning	5
2.1.1 Verdier i en sinusbølge	6
2.1.2 Periode og frekvens	7
2.2 Transienter	8
2.2.1 Transientanalyse og energibevaring	8
2.3 Grunnelementer	9
2.3.1 Induktive kretser	9
2.3.2 Kapasitive kretser	12
2.3.3 RLC DC krets	13
2.3.4 RLC AC krets	14
2.4 Vandrende bølger og distribuerte parametere	14
2.4.1 Åpen ende	15
2.4.2 Kortsluttet ende	16
2.5 koblingsspenninger	16
2.5.1 Resonansoverspenninger	18
2.6 Effektbrytere	19
2.6.1 Operasjonstid ved effektbrytere	20
2.6.2 Stigende spenningsbølge	24
2.7 Transformator	25
2.7.1 Transformatorparametere og konfigurasjoner	25
2.7.2 Fluks og spenning	27
2.8 Hvorfor redusere transienter	31

2.9	Kontrollert kobling	33
2.9.1	RCS (Rapid Closing Strategy)	34
2.9.2	DCS (Delayed Closing Strategy)	34
2.9.3	SCS (Simultan Closing Strategy)	35
2.9.4	Flukslåsing	36
2.9.5	Spenningsstoppmetoden	36
2.9.6	Oppsummering av kontrollert kobling	36
2.10	Love og regler	37
2.11	Litteratur om vern og innkoblingsstrømmer	39
2.12	Sammendrag av kapittelet	39
<b>3</b>	<b>Metode</b>	<b>41</b>
3.1	Simuleringsverktøy	41
3.2	Hovedkomponentene	42
3.2.1	Kilde - forsyning fra nettet	43
3.2.2	Effektbryter	43
3.2.3	Kabel	44
3.2.4	Transformator	45
3.3	Styring av modell	47
3.4	Sammendrag	48
<b>4</b>	<b>Resultat</b>	<b>50</b>
4.1	Simuleringstilfeller	50
4.2	Lukkevinkel og kabel	52
4.2.1	Lukkevinkel til effektbryter	52
4.2.2	Kabellengde	53
4.2.3	Lukkevinkel og kabellengde samlet	54
4.3	Forhåndsliggende nett	57
4.3.1	Kortslutningsytelse fra kilden	57
4.3.2	$X$ til $R$ forhold i kilden	58
4.4	Transformator	59
4.4.1	Resistans i transformatorviklinger	59
4.4.2	Resistansfordeling i primær og sekundærvikling	59
4.4.3	Reaktans i transformatorviklinger	60
4.4.4	Reaktansfordeling i primær og sekundærvikling	60
4.4.5	Magnetiseringsresistans	60
4.4.6	Gjenværende fluks	61
4.4.7	Transformatorytelse	61
4.4.8	Transformator kjerner	62
4.4.9	Transformator koblinger	62
4.5	DCS (Delayed Closing Strategy)	66
4.6	Tilleggssimuleringer	70
4.7	Oppsummering av kapittelet	70

<b>5</b>	<b>Analyse og diskusjon</b>	<b>71</b>
5.1	Lukkevinkel og kabellengde . . . . .	71
5.1.1	Lukkevinkel . . . . .	71
5.1.2	Kabellengde . . . . .	73
5.2	Forhåndsliggende nett . . . . .	74
5.2.1	Kortslutningsytelse fra kilden . . . . .	75
5.2.2	$X$ til $R$ forhold i kilden . . . . .	75
5.3	Transformatorparametere . . . . .	75
5.3.1	Resistans i transformatorviklinger . . . . .	76
5.3.2	Resistansfordeling i primær og sekundærvikling . . . . .	76
5.3.3	Reaktans i transformatorviklinger . . . . .	77
5.3.4	Reaktansfordeling i primær og sekundærvikling . . . . .	77
5.3.5	Magnetiseringsresistans . . . . .	78
5.3.6	Gjenværende fluks . . . . .	78
5.3.7	Transformatorytelse . . . . .	79
5.3.8	Transformator kjerner . . . . .	80
5.3.9	Transformator koblinger . . . . .	80
5.4	DCS (Delayed Closing Strategy) . . . . .	80
5.5	Tilleggssimuleringer . . . . .	83
5.6	Diskusjon av simuleringsmodellen . . . . .	83
5.7	Diskusjon av metoden . . . . .	84
5.8	Samlet konklusjon . . . . .	85
<b>6</b>	<b>Konklusjon</b>	<b>88</b>
6.1	Avsluttende kommentarer . . . . .	88
6.2	Fremtidig arbeid . . . . .	89
<b>A</b>	<b>Tillegg: Harmonisk innhold</b>	<b>i</b>
A.1	Metode og resultat . . . . .	i
A.2	Analyse og diskusjon . . . . .	i
A.3	Konklusjon . . . . .	iii
<b>B</b>	<b>Tillegg: Lukking på stigende bølge</b>	<b>iv</b>
B.1	Metode og resultat . . . . .	iv
B.2	Analyse og diskusjon . . . . .	v
B.3	Konklusjon . . . . .	v
<b>C</b>	<b>Tillegg: 3I0 strøm</b>	<b>vi</b>
C.1	Metode og resultat . . . . .	vi
C.2	Analyse og diskusjon . . . . .	vi
C.3	Konklusjon . . . . .	vii



# Figurer

1.1	Innkoblingsstrømmer ved innkobling av transformator uten last. Til venstre er det ikke benyttet kontrollert kobling og til høyre er det benyttet kontrollert kobling [44]. . . . .	2
2.1	DC bølgeform til strøm eller spenning [43]. . . . .	5
2.2	AC bølge med fundamentale beskrivelser av bølgen. (a) $F_m$ beskriver toppverdien til bølgen mens $2\pi$ viser en hel bølgeperiode. (b) og (c) viser $\psi$ som beskriver et faseskift (hovedteksten benytter $\phi$ for faseskift) [43]. . . . .	6
2.3	Toppverdi og topp til toppverdi på en sinusbølge [43]. . . . .	7
2.4	En hel periode i en sinusbølge benevnes som $T$ og er $2\pi$ lang [43]. . . . .	7
2.5	Induktiv krets med DC forsyning og en åpen bryter vises i figuren til venstre. Grafen til høye viser hvordan strømmen utvikler seg over tid når bryteren S i figuren til venstre lukkes [42]. . . . .	10
2.6	R-L krets med DC forsyning og en åpen bryter S vises i figuren til venstre. Grafen til høye viser hvordan strømmen utvikler seg over tid når bryteren S i figuren til venstre lukkes [42]. . . . .	11
2.7	Transientforløpet til en R-L AC krets når en bryter lukkes. Den stiplede kurven viser en symmetrisk sinusbølge mens de solide kurvene viser den asymmetriske sinusbølgen i transientforløpet når en bryter i en R-L AC krets lukkes [42]. . . . .	11
2.8	R-C krets med DC forsyning og en åpen bryter S vises i figuren til venstre. Grafen til høye viser hvordan strømmen utvikler seg over tid når bryteren S i figuren til venstre lukkes [42]. . . . .	12
2.9	RLC krets med DC forsyning og bryter i åpen posisjon [42]. . . . .	13
2.10	Ekvivalent til en kabel eller høyspentlinje med distribuerte parametere [42]. . . . .	14
2.11	Variasjoner av strøm og spenning mot en åpen ende i en kabel eller høyspentlinje [42]. . . . .	16
2.12	Variasjoner av strøm og spenning mot en kortsluttet ende i en kabel eller høyspentlinje [42]. . . . .	17
2.13	Effektbryter i fire tilstander gjennom en åpningsoperasjon. Figur (a) er i lukket og etter to mellomtilstander i (b) og (c) er figuren (d) kommet i åpen posisjon. Figur (b) viser det forekommer lysbue i øyeblikket når polene ikke er en tilstrekkelig lengde fra hverandre. [26]. . . . .	19
2.14	Effektbryterens tre delkomponenter som behøves for å kunne utføre de mekaniske bevegelsen i åpne og lukkeoperasjoner (modifisert) [27]. . . . .	20

2.15	Tiden det tar fra signalet fra vernet sendes og effektbryteren skifter fra åpen til lukket posisjon, er beskrevet på en tidslinje. Den tykkeste kurven beskriver posisjonen til effektbryterpolene [35]. . . . .	21
2.16	Effekten med og uten adaptiv kontroll av operasjonstid til en effektbryter [9]. . . . .	22
2.17	Demonstrasjon av hvordan RDDS (Rate of Decease of Dielectric Strength) påvirker et lukkeforløp til en effektbryter. RDDS linjen er beskrevet som Dielectric Strength i figuren [6]. . . . .	23
2.18	Den kombinerte effekten av mekanisk tidsavvik og RDDS (Rate of Decease of Dielectric Strength) i effektbryteren, når effektbryteren lukker på stigende (A) og fallende (B) spenningsbølge [6]. . . . .	24
2.19	Grafen demonstrerer forholdet mellom tid og lukkevinkel i en sinusbølge som har en frekvens $f$ på 50 Hz og en periode $T$ på 20 ms. . . . .	24
2.20	Enfase transformatorekvivalent [10] (manipulert). . . . .	25
2.21	Tre ulike transformator kjernetyper [21]. . . . .	27
2.22	Stabile forhold i en enfase transformator vist i form av strøm, spenning og fluks i stasjonær tilstand [1]. . . . .	28
2.23	Spenningssetting av en enfase transformator ved lukkevinkel $0^\circ$ og den potensielle fluksen er på sin bølgetopp. Dette resulterer i høy innkoblingsstrøm som vist i grafen nede til høyre. De høye verdiene av strøm oppstår på grunn av en asymmetri i fluksen som oppstår ved et slikt tilfelle [1]. . . . .	29
2.24	Spenningssetting av enfase transformator i et øyeblikk hvor den potensielle fluksen er lik den gjenværende fluksen i transformator kjernen. Figuren viser at dette er et innkoblingsøyeblikk som kan minimere eller eliminere innkoblingsstrømmer [1]. . . . .	30
2.25	Innkoblingsstrøm ved innkobling av en transformator uten last i et øyeblikk som har ført til høy innkoblingsstrøm [1]. . . . .	31
2.26	Magnetiseringskarakteristikk. Magnetisk fluks i transformator kjernen ved nominell spenning [1]. . . . .	32
2.27	Lukkemetoden Rapid Closing Strategy. Første pil til venstre viser at første fase spenningssettes, mens A eller B er spenningssettingstidspunktet av de resterende fasene, hvor A er den foretrukne instansen [4]. . . . .	34
2.28	Lukkemetoden DCS (Delayed Closing Strategy). Solide linjer er den faktiske fluksen og de stiplede linjene er den potensielle fluksen [6]. . . . .	35
2.29	Lukkemetoden SCS (Simultan Closing Strategy). Solide linjer er den faktiske fluksen og de stiplede linjene er den potensielle fluksen [7]. . . . .	35
2.30	Gjenværende fluks i transformator kjerne ved utkobling i et tilfeldig tidspunkt [1]. . . . .	36
3.1	Simulink modellen bygget med standard Simscape Electrical - Specialized Power Systems blokker. Modellen er modellert for å kunne gjenskape transienter som oppstår når en transformator spenningssettes uten last. . . . .	42

3.2	Transformatorkapasitansnettverk. Transformatorblokken i MATLAB Simulink har ikke innebygget kapasitanser, derfor er dette kapasitansnettverket bygget for å implementere kapasitansene til transformatoren i modellen. . . . .	47
3.3	En beskrivelse av metoden og styringen av Simulink modellen som skal foreta spenningssetting av transformator uten last. . . . .	48
4.1	Figuren viser innvirkningen til lukkevinkelen når en transformator uten last spenningssettes. Verdiene er basert på lukking av fase-a og hentet fra en simuleringsvarighet på 300 ms. . . . .	52
4.2	Maksverdier av strøm og spenning ved ulike lukkevinkler generert i fase-b og c, ved lukking av fase-a mot en transformator uten last og hentet fra en simuleringsvarighet på 300 ms. Lukkevinkelen går fra -125 til 125° med en oppløsning på 1°. . . . .	53
4.3	Figuren viser det transientforløpet til den simulerte transformatoren som spenningssettes uten last ved lukkevinklene 0 og 90 grader. Verdiene er basert på lukking av fase-a og hentet fra en simuleringsvarighet på 4 sekunder. . . . .	53
4.4	Innvirkningen av medium forsyningskabel lengde til en transformator som spenningssettes uten last via kabelen. Verdiene er basert på lukking av fase-a og hentet fra en simuleringsvarighet på 300 ms. . . . .	54
4.5	Innvirkningen av korte kabel lengder og demonstrasjon av de visuelle plottet dersom y-aksen justeres etter outliers eller ekstremverdier. Verdiene er basert på lukking av fase-a og hentet fra en simuleringsvarighet på 300 ms. . . . .	55
4.6	Innvirkningen av lang forsyningskabel lengde til en transformator som spenningssettes uten last via kabelen. Verdiene er basert på lukking av fase-a og hentet fra en simuleringsvarighet på 300 ms. . . . .	55
4.7	Maksverdier av strøm og spenning som funksjon av både lukkevinkel og kabel lengde. Verdiene er basert på lukking av fase-a og hentet fra en simuleringsvarighet på 300 ms. Lukkevinkelen går fra -10° til 100° med en oppløsning på 10°. Forsyningskabelen går fra 1-12 km og har en oppløsning på 1 km. . . . .	56
4.8	Maksverdier av strøm og spenning ved ulike lukkevinkler med en 10 km lang forsyningskabel til transformatoren som spenningssettes uten last. Verdiene er basert på lukking av fase-a og hentet fra en simuleringsvarighet på 300 ms. Lukkevinkelen går fra -125 til 125° med en oppløsning på 1°. . . . .	56
4.9	Figuren viser innvirkningen av kortslutningsytelse fra forhåndsliggende nett når en transformator uten last spenningssettes. Verdiene er basert på lukking av fase-a og hentet fra en simuleringsvarighet på 300 ms. . . . .	57
4.10	Figuren viser innvirkningen av X/R forholdsverdier fra forhåndsliggende nett når en transformator uten last spenningssettes. Verdiene er basert på lukking av fase-a og hentet fra en simuleringsvarighet på 300 ms. . . . .	58

4.11	Figuren viser innvirkningen av viklingsresistans i transformatoren når en transformator uten last spenningssettes. Verdiene er basert på lukking av fase-a og hentet fra en simuleringsvarighet på 300 ms. . . . .	59
4.12	Figuren viser innvirkningen av viklingsresistansfordelingen mellom viklingene i transformatoren når en transformator uten last spenningssettes. Verdiene er basert på lukking av fase-a og hentet fra en simuleringsvarighet på 300 ms. . . . .	60
4.13	Figuren viser innvirkningen av viklingsreaktans i transformatoren når en transformator uten last spenningssettes. Verdiene er basert på lukking av fase-a og hentet fra en simuleringsvarighet på 300 ms. . . . .	61
4.14	Figuren viser innvirkningen av viklingsreaktansfordelingen mellom viklingene i transformatoren når en transformator uten last spenningssettes. Verdiene er basert på lukking av fase-a og hentet fra en simuleringsvarighet på 300 ms. . . . .	62
4.15	Figuren viser innvirkningen av magnetiseringsresistansen i transformatoren når en transformator uten last spenningssettes. Verdiene er basert på lukking av fase-a og hentet fra en simuleringsvarighet på 300 ms. . . . .	63
4.16	Figuren viser innvirkningen av gjenværende fluks i transformatorkjernen når en transformator uten last spenningssettes. Verdiene er basert på lukking av fase-a og hentet fra en simuleringsvarighet på 300 ms. Det simuleres for en og en fase og de fasene som ikke inkrementers settes til null. . . . .	63
4.17	Figuren viser innvirkningen av transformatorytelsen i transformatoren når en transformator uten last spenningssettes. Verdiene er basert på lukking av fase-a og hentet fra en simuleringsvarighet på 300 ms. . . . .	64
4.18	Maksverdier av strøm og spenning med relative X og R parametere tilhørende transformatorytelsens i transformatoren ved lukkevinkel $0^\circ$ og $90^\circ$ . Transformatorytelsen går fra 0,5-1200,5 MVA og har en oppløsning på 6,0 MVA. Verdiene er basert på lukking av fase-a og hentet fra en simuleringsvarighet på 300 ms. . . . .	64
4.19	Figuren viser innvirkningen av transformatorkjerner i transformatoren når en transformator uten last spenningssettes. Verdiene er basert på lukking av fase-a og hentet fra en simuleringsvarighet på 300 ms. . . . .	65
4.20	Figuren viser innvirkningen av transformatorkoblinger i transformatoren når en transformator uten last spenningssettes. Verdiene er basert på lukking av fase-a og hentet fra en simuleringsvarighet på 300 ms. . . . .	65
4.21	Figuren viser maksverdier av strøm i fase-a med bruk av DCS (Delayed Closing Strategy) i kombinasjon med spenningsstoppmetoden på en transformator uten last. Strategien går ut på å lukke først fase-a etter tiden $T_a$ , deretter de to resterende fasene med den gitte tidsforsinkelsestiden (Delay). Både $T_a$ og Delay varierer fra 0-20 ms og har en oppløsning på 2 ms. Simuleringsvarighetene er på 100 ms. . . . .	67

4.22	Figuren viser maksverdier av strøm i fase-b med bruk av DCS (Delayed Closing Strategy) i kombinasjon med spenningstoppmetoden på en transformator uten last. Strategien går ut på å lukke først fase-a etter tiden $T_a$ , deretter de to resterende fasene med den gitte tidsforsinkelsen (Delay). Både $T_a$ og Delay varierer fra 0-20 ms og har en oppløsning på 2 ms. Simuleringsvarighetene er på 100 ms. . . . .	67
4.23	Figuren viser maksverdier av strøm i fase-c med bruk av DCS (Delayed Closing Strategy) i kombinasjon med spenningstoppmetoden på en transformator uten last. Strategien går ut på å lukke først fase-a etter tiden $T_a$ , deretter de to resterende fasene med den gitte forsinkelsestiden (Delay). Både $T_a$ og Delay varierer fra 0-20 ms og har en oppløsning på 2 ms. Simuleringsvarighetene er på 100 ms. . . . .	68
4.24	Figuren viser maksverdier av spenning i fase-a med bruk av DCS (Delayed Closing Strategy) i kombinasjon med spenningstoppmetoden på en transformator uten last. Strategien går ut på å lukke først fase-a etter tiden $T_a$ , deretter de to resterende fasene med den gitte forsinkelsestiden (delay). Både $T_a$ og Delay varierer fra 0-20 ms og har en oppløsning på 2 ms. Simuleringsvarighetene er på 100 ms. . . . .	68
4.25	Figuren viser maksverdier av spenning i fase-b med bruk av DCS (Delayed Closing Strategy) i kombinasjon med spenningstoppmetoden på en transformator uten last. Strategien går ut på å lukke først fase-a etter tiden $T_a$ , deretter de to resterende fasene med den gitte forsinkelsestiden (delay). Både $T_a$ og Delay varierer fra 0-20 ms og har en oppløsning på 2 ms. Simuleringsvarighetene er på 100 ms. . . . .	69
4.26	Figuren viser maksverdier av spenning i fase-c med bruk av DCS (Delayed Closing Strategy) i kombinasjon med spenningstoppmetoden på en transformator uten last. Strategien går ut på å lukke først fase-a etter tiden $T_a$ , deretter de to resterende fasene med den gitte forsinkelsestiden (dealy). Både $T_a$ og Delay varierer fra 0-20 ms og har en oppløsning på 2 ms. Simuleringsvarighetene er på 100 ms. . . . .	69
5.1	Figuren viser sammenlagte maksverdier av strøm og spenning i fase-b og c med DCS (Delayed Closing Strategy) i kombinasjon med spenningstoppmetoden. Tabellene samler og legger sammen data fra delkapittel 4.5 for å lettere analysere data fra strategien. . . . .	82
5.2	Figuren viser sammenlagte maksverdier av strøm og spenning i alle tre fasene med DCS (Delayed Closing Strategy) i kombinasjon med spenningstoppmetoden. Tabellene samler og legger sammen data fra delkapittel 4.5 for å lettere analysere resultatene fra strategien. . . . .	82
A.1	Sinusformen til innkoblingsstrømmen til en transformator uten last. . . . .	i
A.2	Harmonisk innhold til det rødmerkede signalet i figur A.1. . . . .	ii
B.1	Eksempel på tidsintervall som treffer stigende spenningsbølge med hensyn til RDDS (Rate of Decrease of Dielectric Strength) på 1 pu. Rød siplestrek er et tidsavvik på 1 ms. . . . .	iv
B.2	Elektrisk kontakt på stigende bølge med RDDS på 1 pu. . . . .	v

---

C.1	3I0 strøm maksverdier og transientforløp til en transformator uten last. .	vii
-----	--	-----

# Tabeller

2.1	En oppsummering av de tre lukkestrategiene med fluksmåling som er beskrevet i delkapittel 2.9. . . . . .	37
3.1	Transformatordata fra en testrapport for en eksisterende generatortransformator i et eksisterende vannkraftverk [22]. . . . . .	46
3.2	Utvalgte parametere fra modellen som skal forskes på for å finne deres innvirkning på koblingsspenninger og innkoblingsstrømmer ved spenningssetting av transformator uten last. . . . . .	48
4.1	Simuleringstilfeller og studeringsparametere som systematisk skal utføres for å se innvirkningen av hvert parametere, når en transformator uten last spenningssettes i ulike tilfeller. Det skal simuleres for 6 272 tilfeller som vist i tabellen, pluss ekstra simuleringer som ikke inngår i denne tabellen. . . . . .	51
5.1	En oppsummering av innvirkningene ulike parametere har på maksverdier av strøm og spenning når en transformator i et vannkraftanlegg spenningsseries uten last. . . . . .	86
5.2	Tilleggs kommentarer til oppsummeringen av tabell 5.1. . . . . .	87
5.3	Hvilke parametere i et vannkraftanlegg som kan styres i drift. Disse parametere kan være lurt å fokusere på for å redusere innkoblingsstrømmene og koblingsspenningene i anlegg som er i drift. . . . . .	87
6.1	En kort oppsummering av parameterkontribusjonene av ulike parametere når en transformator uten last spenningssettes. . . . . .	89

# Kapittel 1

## Introduksjon

### 1.1 Bakgrunn

Deler av sirkulær økonomi og FNs bærekraftsmål 12; ansvarlig forbruk og produksjon, handler om å minske ressursbruken og benytte ressursene så lenge som mulig. En av de mest bærekraftige tiltakene som forbrukere kan gjøre, er å ikke kjøpe nye produkt og bevare materiell som allerede er tilgjengelig. En økning i levetid på materiell, er med på å bevare materialet som allerede er tilgjengelig og kan derfor være et positivt bidrag til sirkulær økonomi og FNs bærekraftsmål nummer 12 [30] [17].

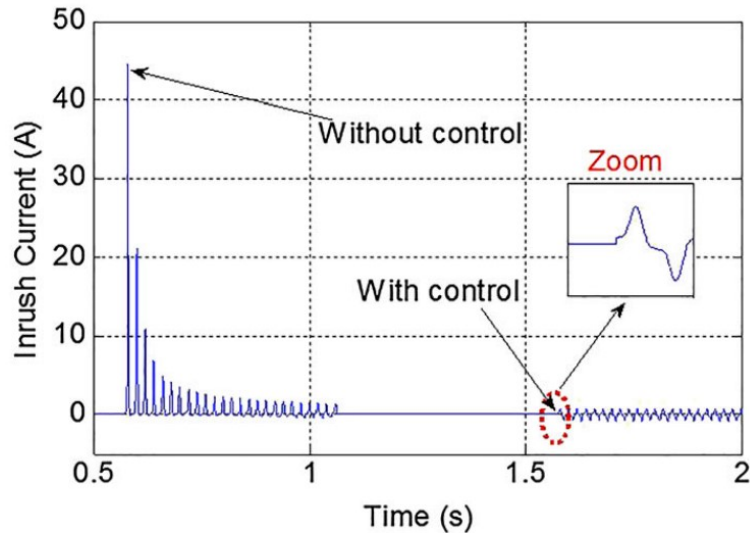
Tilfeldig innkobling av komponenter i kraftsystemet som transformatorer, reaktorer, kondensatorbatterier, lange høyspentlinjer og kabler kan skape høye innkoblingsstrømmer og koblingsspenninger. Konsekvensen av dette er økt stress på komponenter, reduksjon av levetid, økt degradering av den dielektriske isolasjonen og svekking av den mekaniske utholdenheten [28] [9]. Andre negative faktorer er feiloperering av vern og redusert leveringskvalitet i nettet [4]. Transformatorer er kanskje den viktigste overføringskomponenten i fordelingen og overføringen av elektrisk energi i kraftsystemet. Levetiden på transformatorer reduseres blant annet av mekanisk nedbryting som forekommer ved overspenninger og kortslutninger. Dette kan til slutt føre til transformatorhavari [36]. Innkoblingsstrømmer kan utgjøre like stort mekanisk stress på viklingene som kortslutningsstrømmer [10], og burde derfor unngås. Høye koblingsspenninger som er en form for overspenninger, burde også unngås for å redusere stresset på transformatoren [9].

Det er altså assosiert flere negative ulemper fra innkoblingsstrømmene og koblingsspenningene som dannes ved tilfeldig innkobling av transformator uten last. Ved å gå fra tilfeldig innkobling av komponenter til kontrollert innkobling, kan de skadeligste innkoblingsstrømmene og koblingsspenningene reduseres og kan mulig elimineres [35]. Effekten av kontrollert innkobling av en transformator uten last vises i figur 1.1. En effektbryter er en komponent som foretar elektriske koblinger i et høyspenningsanlegg. Kontrollert innkobling også kalt PoW (Point on Wave), tar i bruk algoritmer som gjør at effektbrytere kobles inn ved kretsens best mulige tidspunkt med utgangspunktet til vinkelen til spenningsbølgen og fluksen i kjernen til transformatoren [3]. På denne måten kan PoW teknologien øke levetiden ved å redusere stresset på komponentene, samt forbedre leveringskvaliteten [9]. En konsekvens av rett utførelse av PoW kan være



et positivt bidrag til noen av stegene i sirkulær økonomi og FNs bærekraftsmål, fordi teknologien kan øke levetiden komponenten.

Det første kommersielle PoW systemet ble installert på 1990 tallet og ble først rettet



Figur 1.1: Innkoblingsstrømmer ved innkobling av transformator uten last. Til venstre er det ikke benyttet kontrollert kobling og til høyre er det benyttet kontrollert kobling [44].

mot innkobling av kondensatorbatteri, men senere også brukt til å spenningssette høyspentlinjer, reaktorer og transformatorer [10]. Kontrollert innkobling eller tilsvarende anordning for å begrense innkoblingsstrømmene skal benyttes for transformatorer med merkeytelse  $\geq 150$  MVA [33]. Bruk av PoW teknikken er ikke alltid helt rett frem. Den avhenger sterkt av en presisjon av når kommando til effektbryteren sendes og til den elektriske kontakten er opprettet i effektbryteren ved innkobling [1]. En verdensomspennende undersøkelse om kontrollert lukking [9] konstaterte at 3% av brukerne har utilfredse opplevelser med PoW. Den utilfredse gruppen rapporterte om tilfeller som feil tilsendt informasjon fra produsenter, feil på komponenter, tilfredsstillende resultater uten PoW og utilstrekkelige anbefalinger fra produsenter om kompenseringstider, noe som har ført til feil på effektbrytere. Det er også rapportert at typiske feil ved kontrollert lukking har hendt når effektbryteren ikke har stabile eller forutsigbare operasjonstider. [9].

I en ideell verden er tidsvariasjoner null, men i den fysiske verdenen er det mange faktorer som kan spille inn på tider og avvik. Både ytre og indre faktorer i effektbryteren spiller inn. Last-typen spiller også en stor rolle for hvilken fasevinkel som gir best utfall i innkoblingsøyeblikket [35]. I produksjonsanlegg som for eksempel vannkraftverk hvor PoW benyttes, finnes det en rekke ulike parametere. Disse parametere og PoW kan kanskje gi både høye og lave innkoblingsstrømmer og koblingsspenninger når en transformator uten last spenningssettes. Simuleringsstudier kan benyttes for å studere hver parameter systematisk for å kartlegge deres innvirkning. Denne metoden gjør at det fysiske anlegget ikke utsettes for unødvendig stress. De verste innkoblingstilfellene som resulterer i høyt stress på komponentene kan studeres uten konsekvenser med simuleringsstudier [10], noe som også er gunstig for sirkulær økonomi og FNs

bærekraftsmål i høyspenningsanlegg.

## 1.2 Problembeskrivelse og avgrensning av oppgaven

I denne rapporten skal det settes søkelys på både innkoblingsstrømmer og koblingsspenninger som oppstår ved ulike parametere og parameterverdier, når en transformator uten last spenningssettes. Høye innkoblingsstrømmer og koblingsspenninger reduserer levetiden på transformatoren og leveringskvaliteten i nettet. Simuleringsstudie skal benyttes for å kartlegge hvilke parametere som gir en økning eller reduksjon av innkoblingsstrøm og koblingsspenning, samt undersøke om kontrollert kobling kan føre til høye transienter av disse to typene. Strømmene og spenningene som skal analyseres foregår på transformatorens høyspentside og måles på transformatorterminalene. Lavspentsiden blir sett bort fra i denne analysen. De utvalgte parameterne som skal analyseres studeres systematisk en og en, og inkrementeres i gitte intervaller med mål om å se parameterens innvirkning på trendene. Resultatet av dette er flere tusentalls simuleringer av utvalgte parameterverdier som skal studeres. Simuleringen blir foretatt i en dynamisk modell bygget i MATLAB Simulink. Modellen begrenses til en nettekvivalent, effektbryter, kabel, transformator og kapasitanser. Utvalget av parametre som skal studeres avgrenses av simuleringsmodellens relevante og tilgjengelige parametre som kan manipuleres effektivt. Data som simuleringsmodellen bygges på, er et eksisterende vannkraftverk i Norge. Resultatene fra simuleringene skal etter nedbrytingen av alle parametre, syntetisere et konsist budskapt. Slik avgrenses oppgaven. Målene i oppgaven blir gitt i neste delkapittel.

## 1.3 Målet med oppgaven

Etter en introduksjon av bakgrunnen og problembeskrivelsen, ønsker rapporten å bidra med følgende mål og utfall:

- Utføre et høyt antall simuleringer av utvalgte parametere, for å analysere hvilke parametere som øker og/eller reduserer innkoblingsstrømmene og koblingsspenningene, når en transformator uten last spenningssettes.
- Gi anbefalinger for bruk av PoW.
- Analysere om bruk av PoW kan føre til høye innkoblingsstrømmer eller koblingsspenninger
- Gi anbefalinger til fremtidig arbeid med denne rapporten.

## 1.4 Rapportens struktur

Rapporten er strukturert med følgende kapitler og innhold:

Kapittel 2 introduserer og forklarer nødvendig teori for det mulige problemet med å spenningssette transformatorer uten last. Det er lagt vekt på hvordan transienter

oppstår, forklare hvordan PoW teknologien kan bidra til reduksjon av transienter, samt relasjonen til kretstypen og lukkevinkel.

Kapittel 3 beskriver hvordan MATLAB Simulink simuleringsmodellen er bygget opp, med bruk av standard byggeblokker. Modellen styres slik at resultatet av transientene ved spenningssettingen av transformatoren uten last senere kan visuelt analyseres.

Kapittel 4 viser resultatene fra simuleringer ved bruk av modellen som er presentert i kapittel 3. Simuleringen tar for seg en rekke utvalgte parametere, samt bruk av ulike lukkestrategier av PoW.

Kapittel 5 analyserer og diskuterer de essensielle resultatene fra kapittel 4 ved hjelp av teorien fra kapittel 2. Styrker og svakheter fra modellen i kapittel 3 diskuteres og kommenteres. Parameterene brytes ned, analyseres og diskuteres for å syntetisere et konsist budskapt.

Kapittel 6 konkluderer arbeidet fra rapporten. Spørsmålene og målene fra kapittel 1.3 svares ut med bakgrunn fra resultatene. Til slutt blir det gitt anbefalinger til fremtidig arbeid med denne rapporten.

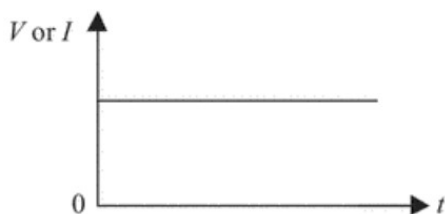
# Kapittel 2

## Generell teori

Dette kapitlet oppsummerer generell teori for innkoblingsstrømmer og koblingsspenninger i forbindelse med spenningssetting av krafttransformatorer uten last. Først introduseres grunnleggende og sentrale begrep for å beskrive bølgene til strøm og spenning. Deretter utledes teorien om transienter og energibevaring i ulike simplifiserte kretser. Videre blir konseptet vandrende bølger og distribuerte parameterene utledet. Etter disse temaene, forklares de fysiske komponentene effektbryter og transformator og hvordan disse objektene bidrar til strøm- og spenningstransienter i kraftsystemet. Her blir kjernen av problemet med spenningssetting av transformator uten last forklart. Dette settes opp mot bruken av fasestyrt innkoblingsutstyr til generatortransformator, og funksjonskravet som er satt av systemansvarlig i Norge til anlegg med transformatorer.

### 2.1 AC - Alternierende strøm og spenning

Det første temaet som skal utredes er strøm og spenning i alternierende kretser. Dette er det første som legges til grunn før en utredning om transienter. AC er en forkortelse for Alternierende Strøm og beskriver at polariteten til spenningens og strømmens retning alternerer periodisk. Dette er det motsatte som skjer i direkte spenning og strøm som også er kalt DC som vist i figur 2.1 hvor verdiene ikke alternerer men er konstante:



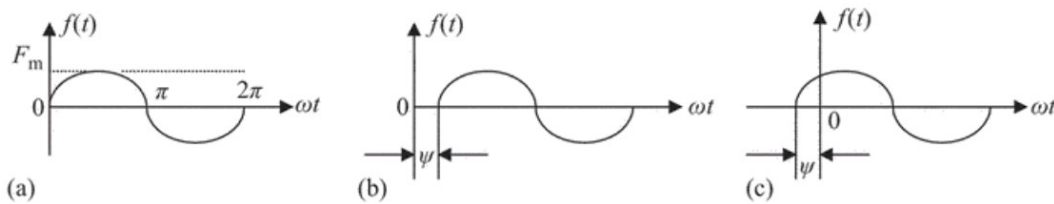
Figur 2.1: DC bølgeform til strøm eller spenning [43].

AC bølgen er sinusformet og er den mest brukte AC bølgeformen. Sinusformet AC bølgeenergi blir produsert i den elektriske kraftindustrien. Det eksisteres også andre typer AC bølgeformer, men fokuset vil ligge på sinusformet AC bølger som vist i figur 2.2. En sinusfunksjon kan bli beskrevet matematisk med formel 2.1. Formelen representerer sinusbølgen som funksjon av tid i tidsdomene, altså kvantiteten over tid [43] og gir:

$$f(t) = F_M \sin(\omega t + \varphi) \quad (2.1)$$

Hvor:

- $F_M$  = Toppverdi: Konstanten  $F_M$  kan byttes ut med  $I_M$  for strøm og  $V_M$  for spenning.
- Avstanden fra null til de maksimale positive eller negative punktet som bølgen kan nå gjennom en hel syklus.
- $\omega$  = Vinkelhastighet: Endringshastigheten av rotasjonen til bølgen.
- Måles som oftest i radianer per sekund [rad/s].
  - Direkte proporsjonal med frekvensen:  $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$ .
- $\varphi$  = Faseskift: Vinkelen til posisjonen fra referansepunktet på den vertikale aksen, som er  $0^\circ$ .
- Kan måles i radianer eller grader. Rapporten benytter elektriskegrader fremfor radianer.
  - Faseskiftet kan være på høyre eller venstre side av  $0^\circ$  og holder seg mellom  $-\pi$  og  $+\pi$  som demonstrert i figur 2.2b og c



Figur 2.2: AC bølge med fundamentale beskrivelser av bølgen. (a)  $F_m$  beskriver toppverdien til bølgen mens  $2\pi$  viser en hel bølgeperiode. (b) og (c) viser  $\psi$  som beskriver et faseskift (hovedteksten benytter  $\varphi$  for faseskift) [43].

## 2.1.1 Verdier i en sinusbølge

Det finnes flere måter å uttrykke og beskrive verdiene til strøm og spenning i en sinusbølge. Sinusbølger varierer periodisk og det er derfor ikke bare en beskrivelse som enkelt kan beskrive bølgen fullt og helt. Ulike uttrykk vi gi ulike måter å analysere kvantitetene i bølgen, disse er:

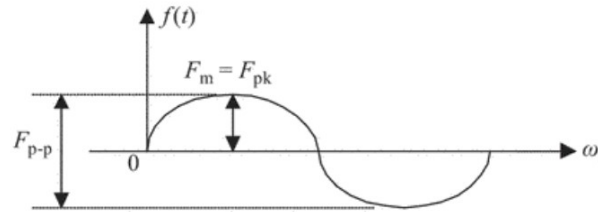
### Topp verdi - $F_{pk}$

- Maksverdien  $F_M = F_{pk}$  i en sinusfunksjon som vist i formel 2.1 og figur 2.3.
- Verdi som bør tas i betraktning for å beregne maks elektrisk holdfasthet på utstyr.

### Topp til toppverdi - $F_{p-p}$

- Avstanden fra negativ til positiv topp, eller minimum til maksimumtopp, eller topp gjennom bølgeformen.

- $F_{p-p} = 2F_{pk}$ .
- Verdi som bør tas i betraktning for å beregne den maksimale elektriske holdfastheten på utstyr.



Figur 2.3: Toppverdi og topp til toppverdi på en sinusbølge [43].

### Momentanverdi - Små bokstaver ( $i, v$ )

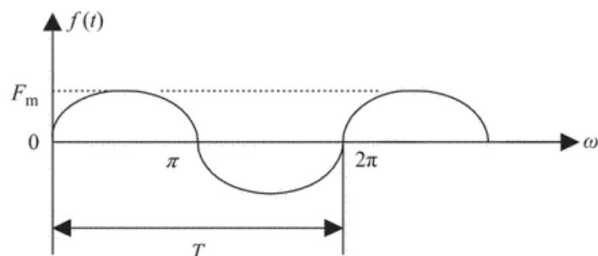
- Den momentane verdien til sinusbøgen  $f(t)$  og den varierer med tiden  $t$  (eller  $\omega t$ ) i hvert tilfeldig punkt på bølgen.

### Effektivverdi - RMS

- Effektivverdien av AC, som gir ekvivalent verdien av kraft som en DC kilde kan levere til en last.
- Uttrykket  $F = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T f^2(t) dx}$ , gir  $V = \frac{V_M}{\sqrt{2}} = 0,707V_M$  og tilsvarende for  $I = 0,707I_M$ .

## 2.1.2 Periode og frekvens

En sinusbølge varierer altså med tiden. Bølgen har en periode som kan benevnes med konstanten  $T$ . Dette er tiden bølgen bruker på å gjøre en full syklus, som innebærer en positiv og negativ alternasjon i en revolusjon, og er  $2\pi$  lang. Antall sykluser per sekund kalles frekvens  $f$  og måles i Hertz [Hz] [43] og kalles ofte svingninger per sekund. Figur 2.4 demonstrerer grafisk disse to konstantene på en AC eller sinusbølge.



Figur 2.4: En hel periode i en sinusbølge benevnes som  $T$  og er  $2\pi$  lang [43].

Dersom det måles 50 sykluser per sekund blir frekvensen da 50 Hz. Dette er verdien nettfrekvensen i Norge benytter [29]. Det inverse av frekvensen  $f$ , kalles perioden  $T$ . Det vil si en frekvens på 50 Hz har en periode  $T = \frac{1}{50\text{Hz}} = 0,02 \text{ sekund} = 20 \text{ ms}$ .

## 2.2 Transienter

Nå har det blitt utredet måter å beskrive sinusbølger på. Beskrivelsene kan være til hjelp for å forklare neste tema. Det neste tematet blir å forklare det som kalles transienter. Forklaringen blir gjort ved hjelp av enkle kretser og senere i rapporten kobles dette opp imot strøm og spenningstransienter, også kalt innkoblingsstrøm, overspenninger eller koblingsspenninger. Transienter er en forbigående tilsand som oppstår ved raske endringer av de fysiske kvantitetene i en elektrisk krets [43]. Transienttypen overspenninger representerer en stor trussel for kontinuiteten og sikkerheten i kraftforsyningen. Kostnaden til de elektriske komponentene og selve kraftsystemet, er nært relatert til isolasjonsnivået i det gjeldende systemet [16]. Derfor er analysen av transienter viktig med tanke på driftsikkerhet og kostnader for å bygge og vedlikeholde anlegg.

### 2.2.1 Transientanalyse og energibevaring

Transientanalyse av elektriske kretser kan være en viktig analyse å foreta, fordi strømmer og spenninger i deler av kretsen kan bli flerdoblet av det som er normale verdier i drift. Slike transienter som er flerdoblet av nominell verdi, kan ødelegge utstyr i kretsen. Det som skiller transiente forløp fra stasjonær tilstand, er at stasjonær tilstand i AC kretser, er periodene i sinusbølgen konstante med sine faste effektivverdier og fasevinkler. Mens i transiente forløp kan mange verdier endres med tiden ikke-periodisk, som strøm, spenning, effekt og energi. Disse verdiene er irrelevant i AC forløpets stasjonær tilstand, da disse verdiene holdes konstant og periodisk.

Transienter oppstår når parametere og eller konfigurasjoner i kretsen endres, dette kan oppstå ved koblinger, kortslutning, åpenslutning eller endringer i kraftforsyningen. Endringer av strøm og spenning ved transienter, er ikke momentane og oppstår svært raskt og kan vare så kort som mikrosekunder. De raske endringene kan ikke oppstå momentant eller bli avbrutt. Dette er fordi transiente forløp oppstår på grunn av utveksling av energi. Utvekslingen av energien i kretsen, er som regel lagret i det magnetiske feltet av induktanser og eller det elektriske feltet av kapasitanser. Induktanser  $L$  og kapasitanser  $C$  er parametere som kan lagre energi i form av magnetisk og elektrisk energi, som vist i formel 2.2 og 2.3. Dette kan forenkles til strøm og spenningskilder, som er elementene som forsyner kretsen med energi i transientforløpet:

Magnetisk energi:

$$W_L = \frac{1}{2} \Phi i = \frac{1}{2} L i^2 \quad (2.2)$$

Elektrisk energi:

$$W_C = \frac{1}{2} q v = \frac{1}{2} C v^2 \quad (2.3)$$

Ved en nærmere analysere formel 2.2, viser formelen at magnetisk energi inneholder elementene  $L$  og  $i$ . Dette viser at den magnetiske energien er produktet av induktansen  $L$  og momentan strømverdien  $i$ . Formel 2.3 viser at den elektriske energien inneholder elementer av  $C$  og  $v$ . Dette viser den elektriske energiens størrelsesorden er resultatet av produktene til kapasitansen  $C$  og den momentane spenningsverdien  $v$ . Dermed

kan det bli sagt at en elektrisk krets som et fysisk system, er karakterisert av visse energiforhold i stasjonær tilstand. I stasjonær tilstand er energien lagret i forskjellige induktanser og kapasitanser. I AC kretser er energien overført mellom det magnetiske og elektriske feltet fra forsyningen periodisk. Når en plutselig endring i kretsen oppstår, omfordeles energien mellom induktanser, kapasitanser og endring i energi fra forsyningen. Omfordelingen av energi kreves av de nye forholdene som oppstår i kretsen for å opprettholde energibevaring. Energiomfordelingen kan ikke endres momentant, men over en periode som er nettopp det som forårsaker et transient forløp. Energiomfordeling kan ikke oppstå momentant, fordi dette vil kreve uendelig mengde energi [34]. Dette er bakgrunnen til transienter, videre skal de grunnleggende kretselementene  $R$ ,  $L$  og  $C$  forklares og senere kobles oppimot transienter som dannes ved spenningssettig av transformator.

## 2.3 Grunnelementer

I en elektrisk krets finnes det primært tre grunnleggende elementer:

- Konstanten  $R$  står for resistans og finnes i resistivt materiale som resistorer.
- Konstanten  $L$  står for induktans og finnes i blant annet spoler og induktorer.
- Konstanten  $C$  står for kapasitans og finnes i blant annet kondensatorer.

I lineære kretser kan oppførselen til disse elementene beskrives med en differensialligning. En  $RLC$  krets med en spenningskilde kan uttrykkes med formel 2.4, og videre utledes med formlene 2.5 og 2.6 [34].

$$v_R + v_L + v_C = v(t) \quad (2.4)$$

Hvor

$$v_R = Ri \quad v_L = L \frac{di}{dt} \quad v_C = \int idt \quad (2.5)$$

Som gir

$$L \frac{d^2i}{dt^2} + R \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} i = \frac{dv}{dt} \quad (2.6)$$

En metode som er brukt for å analysere transienter i elektriske kretser, er bruk av Laplace transformasjoner. Metoden gjør det enklere å håndtere transient kalkulasjoner, fremfor bruk av differensialligninger [42]. I første omgang presenteres grunnelementene  $R$ ,  $L$  og  $C$  med klumpede verdier, senere blir distribuerte verdier beskrevet. Når en bryter i kretsen lukkes, skal oppførselen til en  $R$ - $L$ ,  $R$ - $C$  og til slutt en  $RLC$  krets forklares.

### 2.3.1 Induktive kretser

Først skal oppførselen til en induktiv krets med resistans forklares. Beskrivelsen blir delt inn i to, en beskrivelse for en DC krets, og en beskrivelse for en AC krets med  $R$  og  $L$  elementene. Felles for begge kretsene som forklares, er at en bryter i den elektriske kretsen lukkes og danner en sluttet krets. Kort tid etter starter omfordelingen av energi i kretsen som diskutert i delkapittel 2.2.1.

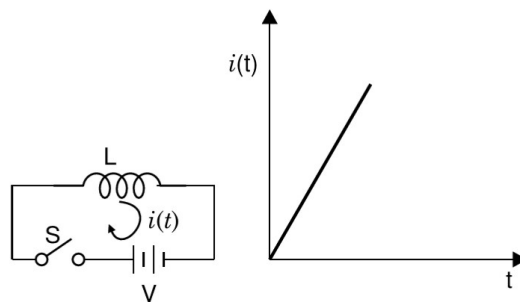


### Induktiv DC krets

En induktiv krets vises i figur 2.5. Figuren viser at ved en ren induktiv krets, øker strømmen lineært med tiden etter  $t = 0^+$  når bryteren lukkes. Når bryteren  $S$  i kretsen til figuren lukkes, kan strømmene uttrykkes matematisk med formel 2.7 for Laplacedomenet formel og 2.8 for tidsdomenet [42].

$$I(s) = \frac{V(s)}{Z(s)} = \frac{V}{s} \frac{1}{Ls} = \frac{V}{L} \frac{1}{s^2} \quad (2.7)$$

$$i(t) = \frac{V}{L} t \quad (2.8)$$



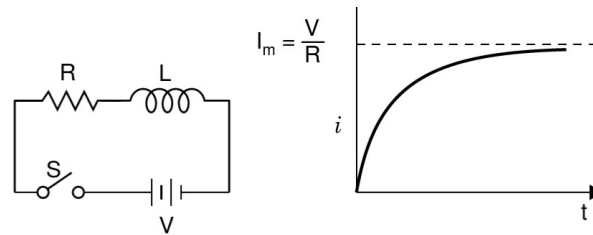
Figur 2.5: Induktiv krets med DC forsyning og en åpen bryter vises i figuren til venstre. Grafen til høyre viser hvordan strømmen utvikler seg over tid når bryteren  $S$  i figuren til venstre lukkes [42].

Dersom kretsen i figur 2.5 inneholder en resistor som vist i figur 2.6, blir da strømmene uttrykt med formel 2.9 for Laplacedomenet og transformert til uttrykket i formel 2.10 for tidsdomenet.

$$\begin{aligned} I(s) &= \frac{V(s)}{Z(s)} = \frac{V}{s} \frac{1}{R + Ls} = \frac{V}{s} \frac{1}{s + \frac{R}{L}} \\ &= \frac{V}{L} \left[ \frac{1}{s} - \frac{1}{s + \frac{R}{L}} \right] \frac{L}{R} \end{aligned} \quad (2.9)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{V}{R} \left[ \frac{1}{s} - \frac{1}{s + \frac{R}{L}} \right] \\ i(t) &= \frac{V}{R} \left[ 1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right] \end{aligned} \quad (2.10)$$

I figur 2.6 viser grafen til høyre at strømmen etter en uendelig tid vil nå  $\frac{V}{R}$  verdien som representerer strømmen  $I_M$ . Når  $R$ - $L$  kretsen har nådd 63,2% av sin maksverdi, har kretsen nådd sin tidskonstant  $\tau$ , som måles i tid. Forholdet mellom  $\frac{L}{R}$  bestemmer tidskonstanten  $\tau$  for induktorer [42]. Det er nå forklart hvordan en  $R$ - $L$  krets oppfører seg i en DC krets. Samme krets som vist i figur 2.6 skal nå forklares i neste delkapittel med en endring med at kretsen blir påtrykt en AC kilde.



Figur 2.6:  $R$ - $L$  krets med DC forsyning og en åpen bryter  $S$  vises i figuren til venstre. Grafen til høire viser hvordan strømmen utvikler seg over tid når bryteren  $S$  i figuren til venstre lukkes [42].

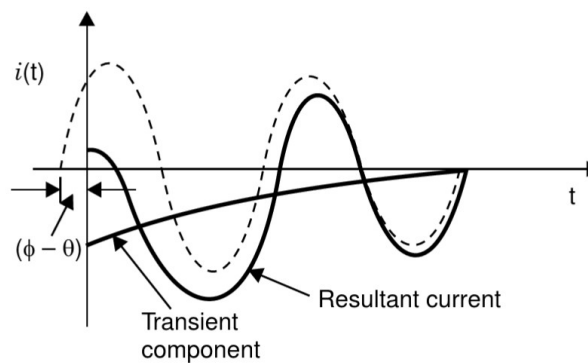
### Induktiv AC krets

En enkel  $R$ - $L$  krets påtrykt en AC kilde har andre elementer i formlene kontra en krets med DC kilde, fordi strømmen nå er periodisk. Strømmen til en  $R$ - $L$  krets påtrykt en AC kilde kan uttrykkes med formel 2.12 med forenklingene som er gjort i formel 2.11 [42].

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\omega L}{R} \quad \text{og} \quad a = \frac{R}{L} \quad (2.11)$$

$$i(t) = \frac{V_M}{(R^2 + \omega^2 L^2)^{\frac{1}{2}}} [\sin(\omega t + \varphi - \theta) - \sin(\varphi - \theta)e^{-at}] \quad (2.12)$$

Formelen 2.12 kan deles inn i to ledd. Første ledd uttrykker sinusleddet og andre leddet uttrykker det transiente leddet som teoretisk skal forsvinne når tiden nærmer seg uendelig. Vanligvis forsvinner det transiente leddet raskt etter to eller tre sykluser eller perioder. Varigheten av transienten er bestemt utifra tidskonstanten til komponenten som er  $\frac{1}{a} = \frac{L}{R} = \tau$  for kretsen.



Figur 2.7: Transientforløpet til en  $R$ - $L$  AC krets når en bryter lukkes. Den stiplede kurven viser en symmetrisk sinusbølge mens de solide kurvene viser den asymmetriske sinusbølgen i transientforløpet når en bryter i en  $R$ - $L$  AC krets lukkes [42].

Ved tiden  $t = 0$  som vist i figur 2.7, viser figuren at den transiente komponenten er lik stasjonær tilstand komponenten. Siden transientkomponenten er negativ, er total strømmen null ved  $t = 0$ . Den transiente komponenten vil være null før bryter  $S$  lukkes. Dersom bryter  $S$  lukkes ved  $\theta = \varphi$ , resultere dette til en bølge med vinkel  $\theta = \tan^{-1} \left( \frac{\omega L}{R} \right)$ . Ved en slik situasjon er det ingen transienter, selv om kretsen inneholder

induktanser og en bryteoperasjon. Derimot når bryter  $S$  lukkes ved  $\varphi - \theta = \pm \frac{\pi}{2}$ , vil transientleddet ha sin maksverdi. Den første toppen av den resulterende strømverdien, vil være en verdi på 2 pu av stasjonær tilstandsverdi av sinusleddet [42]. pu står for per unit og er referert imot en referanseverdi, ofte den nominelle verdien som er satt til en. En pu verdi på 2 betyr at verdien er to ganger høyere enn referanseverdien eller nominell verdi.

En induktiv last genererer høy resistans og den ønskede eller optimale lukke- og åpningsøyeblikket i en induktiv AC krets, er når spenningen er på sin maks verdi, for da krysser strømmen null [35].

## 2.3.2 Kapasitive kretser

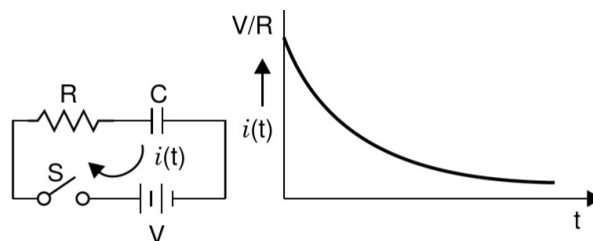
I liket med delkapittelet 2.3.1 om induktive kretser, blir inndelingen og forklaringen av induktive kretser også gjort for kapasitive kretser på tilsvarende måte.

### Kapasitiv DC krets

Kapasitive  $R$ - $C$  kretser som vist i figur 2.8, oppfører seg motsatt av  $R$ - $L$  kretsen i figur 2.6. I stedet for at strømmen bygger seg eksponentielt opp fra null og når sin maks verdi ved tiden uendelig, er strømmen i  $R$ - $C$  kretser på sin maks verdi ved innkobling, altså ved tiden  $0^+$ . Deretter synker strømmen med tiden eksponentielt mot null. En DC  $R$ - $C$  krets kan uttrykkes matematisk med formel 2.13 for Laplacedomenet og formel 2.14 for tidsdomenet [42].

$$I(s) = \frac{V(s)}{Z(s)} = \frac{V}{s} \frac{1}{R + \frac{1}{Cs}} = \frac{V}{s} \frac{\frac{1}{RC}Cs}{s + \frac{1}{RC}} = \frac{V}{R} \frac{1}{s + \frac{1}{RC}} \quad (2.13)$$

$$i(t) = \frac{V}{R} e^{-\frac{t}{RC}} \quad (2.14)$$



Figur 2.8:  $R$ - $C$  krets med DC forsyning og en åpen bryter  $S$  vises i figuren til venstre. Grafen til høire viser hvordan strømmen utvikler seg over tid når bryteren  $S$  i figuren til venstre lukkes [42].

### Bryteforløp til kapasitiv AC krets

Innkobling av kapasitive enheter i kraftnettet som høyspentlinjer, kabler og kondensatorbatteri kan forårsake høye spenninger over bryterpolene på effektbrytere. Forholdet mellom strøm og spenning, er at strøm ligger  $90^\circ$  fremfor spenningen i kapasitive kretser. Dersom den kapasitive enheten legges ut med en bryter når strømmen går i

null, er kondensatorenheten ladet opp med sin maks spenning. Kondensatorenheten i dette forløpet vil i neste halve syklus gi en spenning over effektbyterpolene på omtrent 2 pu. Effektbrytere blir forklart i detalj senere i delkapittel 2.6 og frem til det, kan en effektbryter beskrives som en bryter i høyspenningsanlegg. En slik verdi på 2 pu kan resultere i at effektbryteren kobles inn igjen. Gjeninnkobling av effektbryter kan føre til pendlinger i kretsen ved den naturlige frekvensen som vist i formel 2.15 [42].

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.15)$$

Tilslutt kan det informeres om at en utladet kapasitiv last har en lav resistans, og den ønskede eller optimale lukke- og åpningsøyeblikket i en kapasitiv AC krets er derfor når spenningen er på sin maksimum verdi, siden strømmen da krysser null. Lukking når spenningen krysser null, gir høye koblingsspenninger [35].

### 2.3.3 RLC DC krets

Til nå har en  $R$ - $L$  og  $R$ - $C$  krets blitt utredet og videre skal en kombinasjon av dette, nemlig en  $RLC$  krets utredes. Det starter først med å forklare hvordan en  $RLC$  krets oppfører seg i en DC krets. En  $RLC$  krets som vist i figur 2.9 blir påtrykt en DC spenning, og strømmen kan uttrykkes slik: [42]

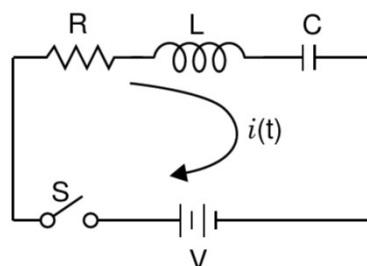
$$I(s) = \frac{V}{s} \frac{1}{R + Ls + \frac{1}{Cs}} = \frac{V}{L} \frac{1}{\left[ s + \left( \frac{R}{2L} - \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}} \right) \right] \left[ s + \left( \frac{R}{2L} + \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}} \right) \right]} \quad (2.16)$$

Hvis  $a = \frac{R}{2L}$  og  $b = \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}}$ , blir da det forenklete uttrykket:

$$I(s) = \frac{V}{L} \frac{1}{(s+a-b)(s+a+b)} = \frac{V}{2bL} \left[ \frac{1}{(s+a-b)} - \frac{1}{(s+a+b)} \right] \quad (2.17)$$

I tidsdomenet gir dette:

$$i(t) = \frac{V}{2bL} \left[ e^{-(a-b)t} - e^{-(a+b)t} \right] \quad (2.18)$$



Figur 2.9: RLC krets med DC forsyning og bryter i åpen posisjon [42].

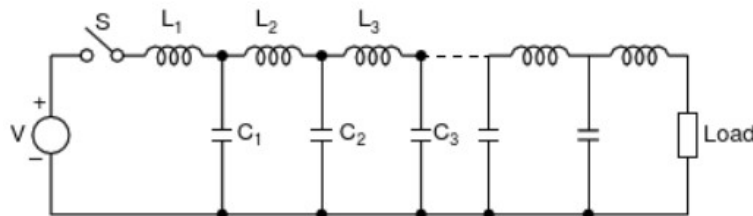
Hvis verdien  $b$  fra formel 2.18 er imaginær, skapes det svingninger i strømmen. Dersom  $b$  verdien er null eller reell, stiger strømmen fra null opp til sin gitte verdi og reduseres til null igjen med tiden. Kapasitansen i kretsen vil gjøre at strømmen går ned mot null igjen når  $RLC$  kretsen er påtrykt en DC forsyning [42].

### 2.3.4 RLC AC krets

Kompleksiteten til formlene i kretsen øker når kretsen i figur 2.9 påtrykkes en AC forsyning. Simulering og kalkuleringssoftware EMTP som står for Electromagnet Transient Program, brukes for å kalkulere elektriske kretser i kraftsystem. Manuelle utregninger av transienter kan være svært arbeidskrevende, strevsomt og noen ganger umulig [37], derfor utledes ikke  $RLC$  kretser som påtrykkes av en AC kilde og det blir gitt en anbefaling om å benytte EMTP software for slike utregninger.

## 2.4 Vandrende bølger og distribuerte parametere

Såkalte klumpede parametere som analysert i delkapittel 2.3, er ikke tilstrekkelig for å analysere visse deler av kraftsystemet. Derfor benyttes distribuerte parametere for visse transientforløp. Klumpede parametere benyttes ved analyser av stasjonær tilstand og er en forenkling av den faktiske kretsen. I en høyspentlinje eller kabel er elementene  $R$ ,  $L$  og  $C$  distribuert gjennom hele lengden av linjen eller kabelen [42] [19]. En mer realistisk modell av en  $L-C$  krets, presenteres dermed som vist i figur 2.10.



Figur 2.10: Ekvivalent til en kabel eller høyspentlinje med distribuerte parametere [42].

Forsyningen  $V$  i figuren sender ut bølger av spenning og strøm i takt med kildens frekvens  $f$ . Strøm og spenning fra kilden er dermed ikke momentant på eller i andre enden av linjen ved koblinger. Bølgen bruker tid på å vandre til den andre enden når bryteren kobles inn. Ved frøste instans når en bryter lukker kretsen, oppfører induktansen  $L_1$  seg momentant som en åpen krets og kapasitansen  $C_1$  momentant som en korslutning. Ved neste instans blir ikke  $L_2$  og  $C_2$  ladet opp på grunn av spenningen over  $C_1$  er null, grunnet korslutning. Etter en gitt tid når  $C_1$  har fått tid til å lade seg opp, lades  $C_2$  opp gjennom  $L_2$ . Slik fortsetter et forløpsmønster frem til andre enden av kretsen. Spenningsoppbyggingen over induktansen kan sees på som en spenningsbølge som vandrer fra ende til ende. Strømbølgen assosieres med den gradvise ladningen av kapasitansene.

I forløpet til vandrende bølger, sees det bort fra tap i linjen. Verdien av strøm- og spenningsbølgen, holdes lik gjennom sin vandring. Vanligvis betraktes avstanden som  $dx$  til vandredebølgen, og tiden som  $dt$ . Den elektrostatiske fluksen, assosieres med

spenningsbølgen, og den elektromagnetiske fluksen er assosiert med strømbølgen.  $\frac{dx}{dt}$  er hastigheten til den vandrende bølgen over linjens leder, og kan bli representert med  $v$  fra formel 2.19 og 2.20. Den elektromagnetiske fluks-linkingen, dannes rundt lederen på grunn av strømmen som strømmer i lederen.

$$I = VCv \quad (2.19)$$

$$V = ILv \quad (2.20)$$

Produktet av formelene 2.19 og 2.20, gir bølgeimpedansen  $Z_n$  til lederen, vist i formel 2.21. Typiske verdier for  $Z_n$  er 400  $\Omega$  for linjer og 40  $\Omega$  for kabel [42].

$$\frac{V}{I} = \sqrt{\frac{L}{C}} = Z_n \quad (2.21)$$

Hastigheten til de vandrende bølgene avhenger av mediet bølgen vandrer i [42], og bestemmes av komponentene  $L$  og  $C$  [19] som vist i formelene:

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{2h}{r} \quad (2.22)$$

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{2h}{r}} \quad (2.23)$$

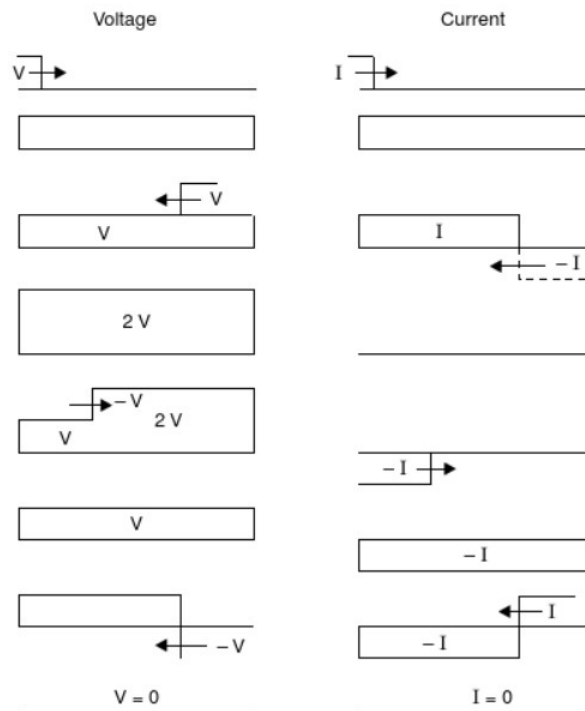
Som gir:

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{\mu_0\epsilon_0}} := c = \text{Lysetshastighet} \quad (2.24)$$

Hastigheten til de vandrende bølgene er teoretisk lysets hastighet, som er lik  $3 \times 10^8 \frac{\text{meter}}{\text{sek}}$ . Dette er hastigheten til bølgene når det ikke er tap i lederen. Reelt er det tap i ledere, derfor vil ikke bølgen nå helt opp til denne hastigheten. Hastigheten korrigeres med ulike korreksjonsfaktorer, basert på mediet bølgen vandrer gjennom. Verdien av  $\epsilon$  består av to komponenter:  $\epsilon_r\epsilon_0$ .  $\epsilon_r = 1$  for linjer og lavere enn en i kabler, på grunn av at i kabler er lederen omgitt av dielektrisk materiale. Det vil si at de vandrende bølgene i kabler har lavere hastighet enn i linjer [42]. En metode som benyttes i EMTP programmer for å regne på vandrende bølger og distribuerte bølger, er Bergeron's metode [38]. Det skal nå forklares to tilstander som vandrende bølger kan vandre mot; åpen ende og kortsluttet ende.

### 2.4.1 Åpen ende

Forløpet til en åpen ende, kan forklares slik. La en bryter koble inn en leder mot en åpen ende, og strøm- og spenningsbølger starter å vandre. Bølgene til strøm og spenning oppfører seg ulikt i møte med en åpen ende. Når startbølgen til spenningen når terminalen i den åpne enden, reflekteres bølgen tilbake med en positiv bølge som gir  $V + V = 2V$ . Strømbølgen reflekteres med et negativt fortegn, som gjør at strømmen er null [42]. Dette forløpet demonstreres i figur 2.11.



Figur 2.11: Variasjoner av strøm og spenning mot en åpen ende i en kabel eller høyspentlinje [42].

## 2.4.2 Kortslettet ende

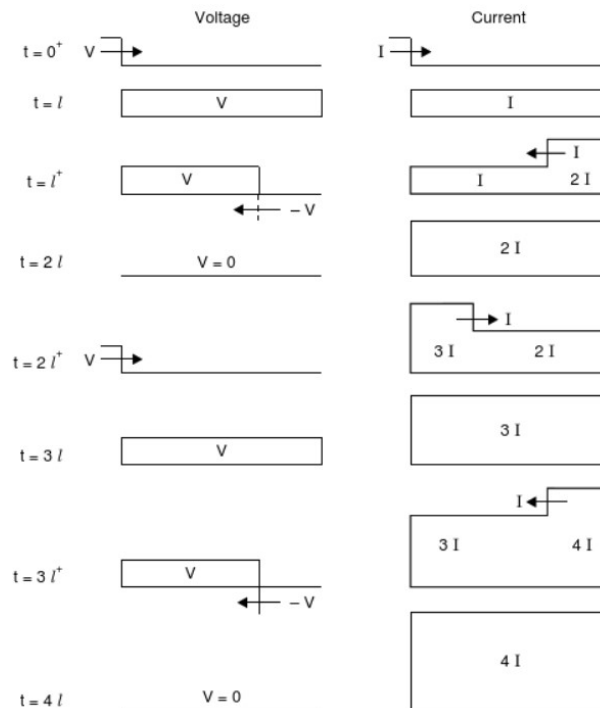
Forløpet til en kortslettet ende, kan forklares slik. La en bryter koble inn en leder mot en kortslettet ende, som gjør at strøm- og spenningsbølger starter å vandre. Bølgene til strøm- og spenning oppfører seg ulikt i møte med en kortslettet ende. Når startbølgen til spenningen når terminalen i den åpne enden, reflekteres bølgen tilbake med en negativ bølge, likt som strømmen oppførte seg ved en åpen ende. Strømbølgen reflekteres med et positivt fortegn. Dette gjør at strømmen bygger seg oppover og oppover fra refleksjon til refleksjon, fremtil strømmen når sin teoretiske verdi på  $I = \frac{V}{Z_n}$  [42]. Dette forløpet demonstreres i figur 2.12.

## 2.5 koblingsspenninger

Til nå har enkle kretser med klumpede og distribuerte parametere blitt forklart. Et fenomen som kan forekomme ved lukking av brytere er koblingsspenninger. Koblingsspenninger er dempede svingninger, som kan ha en frekvens helt opp til 10 kHz. Denne type overspenning er assosiert med lange stigetider. Koblingsspenninger ved systemspenninger  $\geq 300$  kV kan ha en slik størrelsesorden at påkjenningene og stresset kan være høyere en ved overspenninger forårsaket av lyn [16]. Lynets forløp varer rundt noen  $\mu s$  og koblingsspenninger varer i noen ms [19]. Koblingsspenninger kommer av blant annet: [42]

### Inn- og utkobling av høyspentlinjer

Resistansen, kapasitansen og induktansen strekker seg ut gjennom hele høyspentlinjen og danner nett av distribuerte parametere, som diskutert i



Figur 2.12: Variasjoner av strøm og spenning mot en kortslutet ende i en kabel eller høyspentlinje [42].

delkapittel 2.4. Dette skaper transiente bølger med hver kobling av høyspentlinjen. Når en høyspentlinje uten last i motsatt ende kobles inn, kan dette gi spenninger som er opp til to ganger nominell spenningsverdi, altså 2 pu som diskutert i delkapittel 2.4.1. Denne verdien kan være høyere dersom effektbryteren gjeninnkobler en høyspentlinje med gjenværende spenning. Slike spenninger oppstår i høyspentlinjene, grunnet de fangede ladningen fra avbruddet fra spenningsforsyningen.

### Inn- og utkobling av kapasitive strømmer

Dette omfatter kondensatorbatteri/banker, kabler- og linjer uten last. Dette involverer avbrudd av små kapasitive strømmer ved spenningstopp. Restitusjonsspenningen kan nå opp til 1,5 pu over bryterpolene på effektbryteren. En halv syklus etter, når spenningen fra forsyningen fra forsyningssiden når sitt maksimum; ligger en spenning på 2,5 pu over polene på effektbryteren. Dette kan føre til at effektbryteren gjeninnkobles.

### Inn- og utkobling av induktive strømmer

Ved kobling av små induktive strømmer fra transformatorer uten last og shunt reaktorer, oppstår strømkuttings effekten. Dette tvinger strømmen til null før den naturlige ville gått til null. Den høye  $\frac{di}{dt}$  som er assosiert med strømkuttings effekten, induserer høy spenning i den induktive kretsen. Spenningen kan nå oppimot 2- til 3 pu. Transformatorer med last og utstyrt med shunt reaktorer, kan oppleve spenningsverdier på 5 pu av nominell verdi. Ved slike tilfeller kan det være nyttig med spenningshalvledere som beskyttelse.



Teknikker for å redusere toppverdien av brytetransienter til en verdi som er lavere enn 2 pu av nominell verdi er: [42]

- Bryterresistorer.
- Kontrollert synkronisert lukking av effektbryter, også kalt PoW (Point on Wave).
- Shunt reaktorer.
- Uttapping av ladninger før lukking av bryter.

### Metall oksid avledere

I tillegg til teknikkene som nevnt i listen, finnes også metall oksid avledere. Moderene avledere av denne typen er effektive, responderer raskt med ens raske bryterespons, kan absorbere energi og har utmerket spenning-strøm ikke-lineær karakteristikk [16]. På grunn av metall oksid avlederene har som oppgave å avlede lyn, brukes ikke denne komponenten til å avlede koblingsspenninger. Lyn har høyere størrelsesorden enn koblingsspenninger og vil dermed ikke avlede disse transientene [28]. Som diskutert kan dette være motsatt ved høye systemspenninger, og da er avledere noen ganger benyttet til en viss grad for å verne mot høye koblingsspenninger [16].

## 2.5.1 Resonansoverspenninger

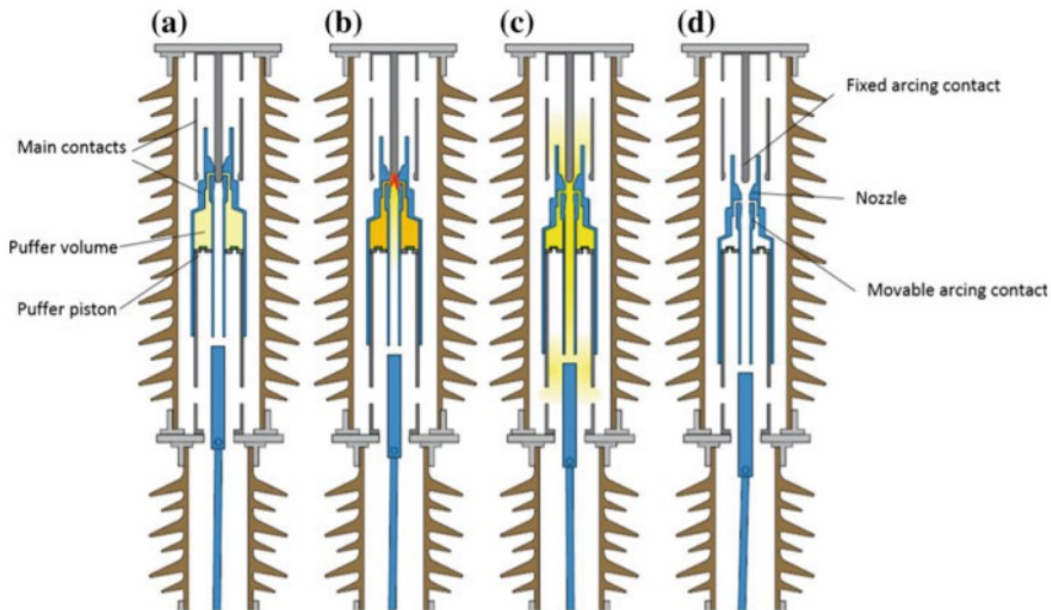
I tillegg til koblingsovespenninger, finnes også resonansoverspenninger. Det er visse parametere og faktorer i kraftnettet som kan bidra til høyere nivå av resonansoverspenninger, disse er: [5]

- Høyere klassifisering av den gitte transformatoren som skal spenningssettes.
- Lengre kretslengde.
- Lav last i systemet.
- Spenning høyere enn nominell spenning.
- Lavere knepunkt på magnetiseringskurven på transformator, slik at den normalt opererer nært knepunktet.
- Posisjoner til trinnkobleren som resulterer i lavere antall viklinger. Transformator, magnetiseringskurve og trinnkobler forklares senere i delkapittel 2.7.

Lengre kretslengde kan tolkes som lengre lengde på kabler eller linjer. Transformatorer som spenningssettes uten last kan oppleve resonansspenninger siden det er lav last i systemet. Transformatorer som spenningssettes uten last er studeringsobjektet i denne rapporten. For å spenningssette transformatorer ved høye systemspenninger kreves det effektbrytere.

## 2.6 Effektbrytere

Til nå har effektbrytere og brytere generelt blitt brukt om en annen, nå skal dette objektet beskrives mer i detalj. I høyspenningsnettet brukes effektbrytere for å koble inn- og ut deler av strømmettet [27]. Komponentens viktige egenskaper er å foreta åpne og lukke operasjoner [35]. Disse operasjonene gir effektbryteren fire ulike posisjoner som vist i figur 2.13. Åpne operasjonen er lik en lukkeoperasjonen, bare i motsatt rekkefølge.

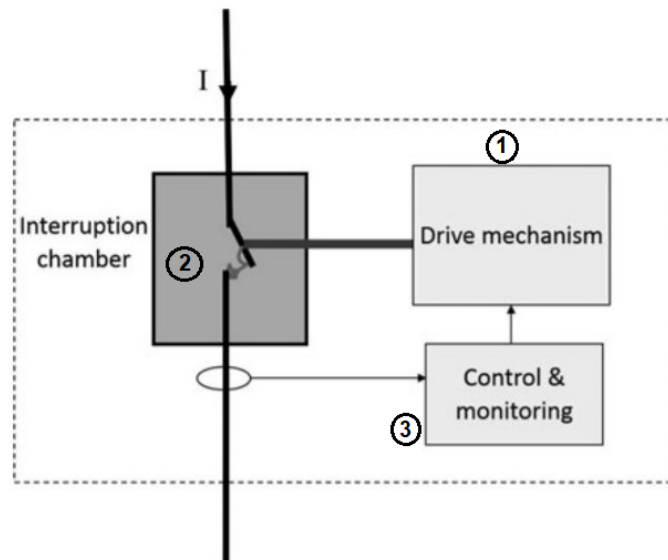


Figur 2.13: Effektbryter i fire tilstander gjennom en åpningsoperasjon. Figur (a) er i lukket og etter to mellomtilstander i (b) og (c) er figuren (d) kommet i åpen posisjon. Figur (b) viser det forekommer lysbue i øyeblikket når polene ikke er en tilstrekkelig lengde fra hverandre. [26].

- Figur 2.13(a) viser:
  - Lukket posisjon.
  - Galvanisk og elektrisk kontakt.
- Figur 2.13(b) viser:
  - Polene vandrer fra hverandre.
  - Elektrisk kontakt via lysbue.
- Figur 2.13(c) viser:
  - Polene vandrer fra hverandre.
  - Eliminering av lysbue.
- Figur 2.13(d) viser:
  - Åpen posisjon.

- Hverken elektrisk eller galvanisk kontakt.

For å kunne utføre de mekaniske bevegelsene, trenger effektbryteren delkomponenter som kan hjelpe til med å bevege polene mot eller fra hverandre. Den første delkomponenten er drivermekanismen, som vist i figur 2.14(1). Drivermekanismen eller driveranordningen skal hjelpe effektbryteren til å åpne og lukke seg med tilstrekkelig hastighet [27]. Det skiller mellom to ulike drivermekanismekategorier: MPO (Multiple Pole Operation) og IPO (Independent Pole Operation). Ved MPO brytes alle fasene likt med en felles driveranordning. Ved IPO har hver fase sin egen driveranordning, som gjør at hver fase kan åpnes og lukkes uavhengig av hverandre [33]. Vanligvis er det mer standardisert å benytte IPO for systemspenninger over 245 kV [6]. Den andre komponenten er bryterkammeret som vist i figur 2.14(2), her befinner polene seg. I figur 2.13 (b) og (c), vises hvordan lysbuen slukkes slik strømmen brytes. Den tredje delkomponenten er måle og kontrollenheten som vist i figur 2.14(3). Hovedoppgaven til denne delkomponenten er å gi åpne og lukkekommandoer til drivermekanismen som får effektbryteren til å bryte eller koble inn strømmen [27].

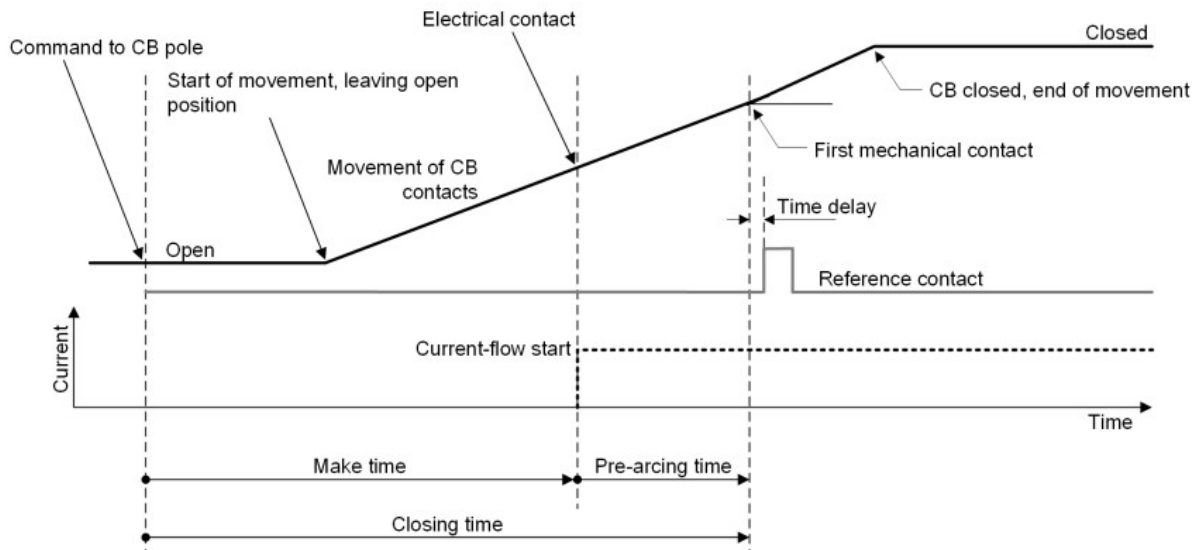


Figur 2.14: Effektbryterens tre delkomponenter som behøves for å kunne utføre de mekaniske bevegelsen i åpne og lukkeoperasjoner (modifisert) [27].

Operasjonstiden til en effektbryter består av lukketid og lysbuetiden. Lukketiden er tiden fra kontrollenheten sender signal om å lukke effekt bryteren, og frem til polene er så nære at en lysbue dannes, og elektrisk strøm starter å vandre mellom polene. Lysbuetiden er tiden fra den elektriske kontakten er opprettet og frem til den mekaniske kontakten er opprettet [35]. Operasjonstiden for å åpne effektbryte gjennomgår de samme prinsippet og forløpet bare det går i motsatt rekkefølge og er essensen i operasjonstid.

### 2.6.1 Operasjonstid ved effektbrytere

Effektbryten kan dermed ikke tilsies at det er en ideell komponent på grunn av fysiske og elektriske genskaper. Effektbryterens brytefunksjon avhenger av geometrien,



Figur 2.15: Tiden det tar fra signalet fra vernet sendes og effektbryteren skifter fra åpen til lukket posisjon, er beskrevet på en tidslinje. Den tykkeste kurven beskriver posisjonen til effektbryterpolene [35].

tiden og komponentene som er vist i figur 2.13, 2.14 og 2.15. Dette gjør at lukke og bryteoperasjoner ikke skjer momentant. Derfor brude dette bli tatt hensyn til når effektbrytere skal foreta lukke eller åpningsoperasjoner og bryte i rett tid når det gjelder hva som er optimalt for hver enkelt krets. Det var noe av temaet i delkapittel 2.3 og blir videre et tema koblet oppimot de fysiske komponenter i kraftsystemet. Operasjonstid kan kanskje analyseres lettere om alle delene i operasjonstiden brytes ned og settes inn i et tidsregnestykke, som gir: [9]

$$T_{operasjonstid} = T_{nominell} + \Delta T_{forutsigbar} + \Delta T_{statistisk} \quad (2.25)$$

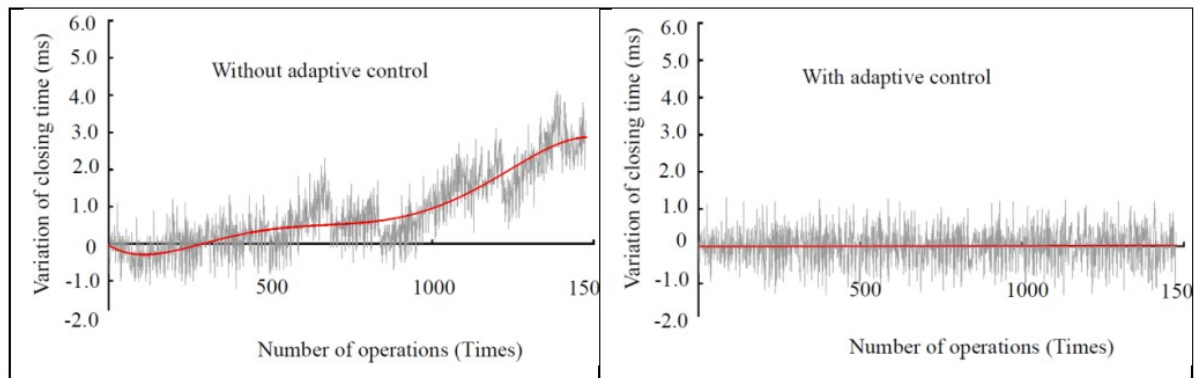
$$\Delta T_{forutsigbar} = \Delta T_{kompensering} + \Delta T_{adaptiv} \quad (2.26)$$

- $T_{operasjonstid}$  = Kontrollerens forutsatte operasjonstid før bryterkommando sendes.
- $T_{nominell}$  = Gjennomsnittlig operasjonstid under nominelle operasjonsforhold som lett kan måles og er programmert inn i kontrolleren.
- $\Delta T_{forutsigbar}$  = Forutsigbare variasjoner av operasjonstid i forhold til  $T_{nominell}$  som kan korrigeres av måle og kontrollenheten fra figur 2.14.
- $\Delta T_{statistisk}$  = Rent statistiske variasjoner av operasjonstid som ikke kan bli korrigert av måle og kontrollenheten.
- $\Delta T_{kompensering}$  = Variasjonen av operasjonstid med betinget parametere som avhenger av driftsforholdene.
- $\Delta T_{adaptiv}$  = Variasjonen av operasjonstid med adaptiv kontroll, som påvirkes av slitasje og aldring på effektbryteren.

Fra formel 2.25 og 2.26 vises det at operasjonstiden på en annen måte fra lukketid og lysbuetid kan deles i to. Forutsigbar tid kan kompenseres for, og statistiske variasjoner kan ikke kompenseres for [9]. Den første delen om operasjonstid som skal diskuteres, er den mekaniske effektbryterens operasjonstid.

### Mekanisk operasjonstid

Mekanisk operasjonstid kalkuleres slik at effektbryteren bryter strømmen i rett øyeblikk. Det er ulike faktorer som har innvirkning på den mekaniske operasjonstiden [35]. En effektbryter består av bevegelige deller og friksjonen mellom disse delene kan variere over tid og endre operasjonstiden og operasjonskarakteristikken. Endringene vil skje sakte over tid. Ved å ta utgangspunkt i forrige operasjonstid til effektbryteren, kan den påfølgende operasjonen ta utgangspunkt i denne tiden og kompensere for avvikene. Slik blir slitasje og aldringseffekten tatt hensyn til ved påfølgende operasjonstid. Dette kalles adaptiv kontroll. En effekt med og uten adaptiv kontroll vises i figur 2.16 og viser at økt antall operasjoner gir økt operasjonstid. Samtidig kan fenomenet effektivt kompenseres for, og holde tidsdifferansen mellom ønskede og faktiske operasjonstiden stabil og forutsigbar [9].



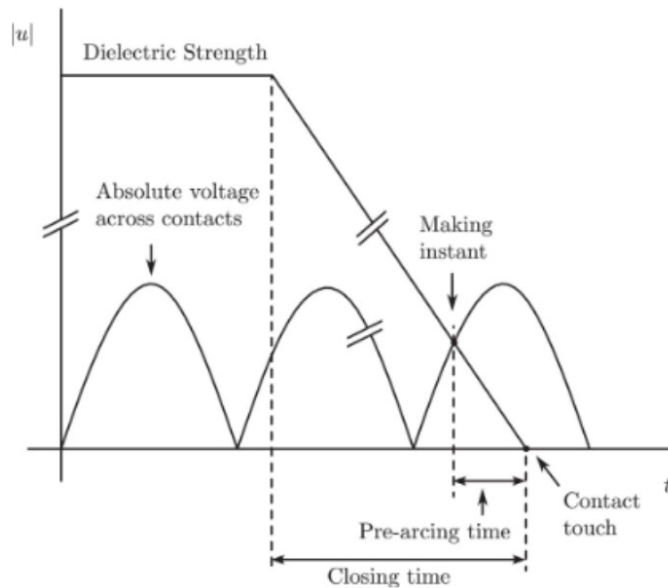
Figur 2.16: Effekten med og uten adaptiv kontroll av operasjonstid til en effektbryter [9].

### Dielektrisk styrke

*RDDS* (Rate of Decease of Dielectric Strength) er et mål på hvor mye spenning brytergapet kan motstå før en lysbue dannes i en lukkeprosess til effektbryteren. Dette uttrykkes med  $\frac{kV}{ms}$ , altså spenning over tid [9]. Nivået til den dielektriske styrken er med på å avgjøre når lysbuen tar form og elektrisk kontakt blir opprettet. Desto større avstand det er mellom polene, desto større dielektrisk styrke. Når polene nærmer seg hverandre, reduseres denne styrken [6]. Ved å studere figur 2.17, viser figuren at den dielektriske styrken daler linjert med tiden. Verdien på *RDDS* bestemmer brattheten. Dersom *RDDS* er uendelig, er den dielektriske streken helt vertikal og ikke skrå. Korrigering av endringen til *RDDS* karakteristikken over tid, kan også implementeres med adaptiv kontroll [9].

### Betinget parametere

Betinget parametere som omgivelsetemperatur, kontrollspenning, mekanisk trykk inngår også i tidsavviket av operasjonstiden til effektbrytere [35] [1] [9]. Temperaturen



Figur 2.17: Demonstrasjon av hvordan RDDS (Rate of Decease of Dielectric Strength) påvirker et lukkeforløp til en effektbryter. RDDS linjen er beskrevet som Dielectric Strength i figuren [6].

kan påvirke spolerresistansen, viskositeten til smøremiddelet, noe som igjen påvirker friksjonen mellom de bevegelige delene i effektbryteren. Kontrollspenningen påvirker operasjonskarakteristikken til stempellet som frigjør fjærmekanismen. Det mekaniske trykket fra fjærmekanismer har mer konsise operasjonstider med avvik på  $\pm 1$  ms, mens i hydrauliske driver mekanismer, kan tidsavviket være på  $\pm 2$  ms. Generelt sett vil lavere omgivelsetemperatur, kontrollspenninger og drivmekanismekraft føre til tregere operasjonstid. En kompensasjon av de nevnte betinget parameterene kan føre til operasjonstiden holder seg innenfor et tidsavvik på  $\pm 1$  innenfor den ønskede lukketiden [9].

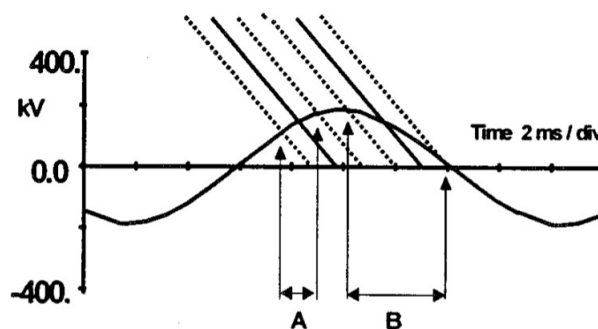
### Det samlede tidsavviket

Et iboende spredningsavvik i operasjonstiden til effektbrytere vil forekomme, selv ved identiske forhold og parametere i samme bryter [37]. Den samlede kombinerte effekten av mekaniske forhold, dielektriske forhold og det iboende spredningsavviket som nevnt, skaper et avvik for koblingsøyeblikket. [6]. Typiske verdier for effektbrytere som er designet for kontrollert kobling er  $\pm 1$  ms [4].

I en verdensomspennende undersøkelse om kontrollert lukking publisert av Working Group WG A3.35, viser undersøkelsen delte meninger om tilfredsstillelsen av kontrollert lukking. 21% er svært tilfreds, 56% er tilfreds, 21% er nøytral og 3% er misfornøyd. Det er rapportert at typiske feil ved kontrollert lukking, er når effektbryteren ikke har stabilt eller forutsigbare operasjonstider. Dette kunne kanskje vært unngått dersom kompenseringparametere som påvirker tidsavviket var kompensert for [9].

## 2.6.2 Stigende spenningsbølge

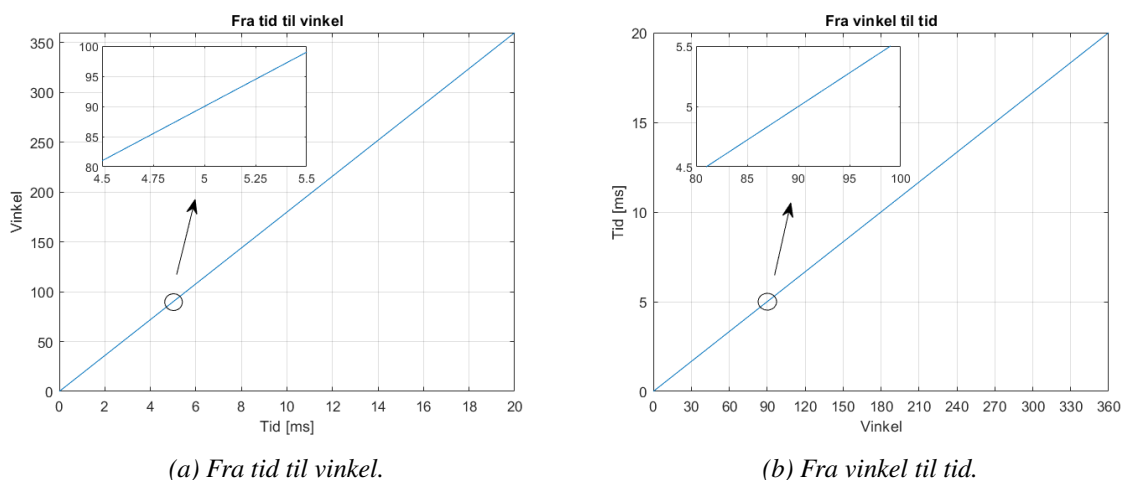
For å bedre presisjonen av  $T_{operasjonstid}$  ytterligere er det flere grep som kan gjøres, som å velge hvor på spenningsbølgen den elektriske kontakten skal opprettes. Øyeblikket lysbuer oppstår i en effektbryter, avhenger av den dielektriske styrken og  $RDDS$  i effektbryteren og verdien på spenningsbølgen. Utfallet av lukking av effektbryter på stigende versus synkende spenningsbølge vises i figur 2.18. Tilfelle A på stigende bølge gir en signifikant bedre tidsberegning enn kobling i tilfelle B som er på en fallende spenningsbølge. Figur 2.18 viser nøyaktigheten til øyeblikk A og B dersom tidsavvikene er på  $\pm 2$  ms. [4].



Figur 2.18: Den kombinerte effekten av mekanisk tidsavvik og  $RDDS$  (Rate of Decease of Dielectric Strength) i effektbryteren, når effektbryteren lukker på stigende (A) og fallende (B) spenningsbølge [6].

### Konvertere tid og lukkevinkel

Med teorien beskrevet til figur 2.17 og 2.18, er det mulig å finne et lukkeintervall som treffer stigende bølge. Det kan gjøres med å konvertere fra tid til grader og motsatt når det er antatt uendelig  $RDDS$ . Konverteringen kan gjøres grafisk utfra figuren 2.19 eller fra formel 2.27 og 2.28. Konverteringen gjelder bare for nettfrekvens  $f = 50$  Hz da perioden har tiden  $T = 20$  ms.



(a) Fra tid til vinkel.

(b) Fra vinkel til tid.

Figur 2.19: Grafen demonstrerer forholdet mellom tid og lukkevinkel i en sinusbølge som har en frekvens  $f$  på 50 Hz og en periode  $T$  på 20 ms.

$$1ms = \frac{360^\circ}{20ms} = 18^\circ \quad (2.27)$$

$$1^\circ = \frac{20ms}{360^\circ} = 0,0556ms \quad (2.28)$$

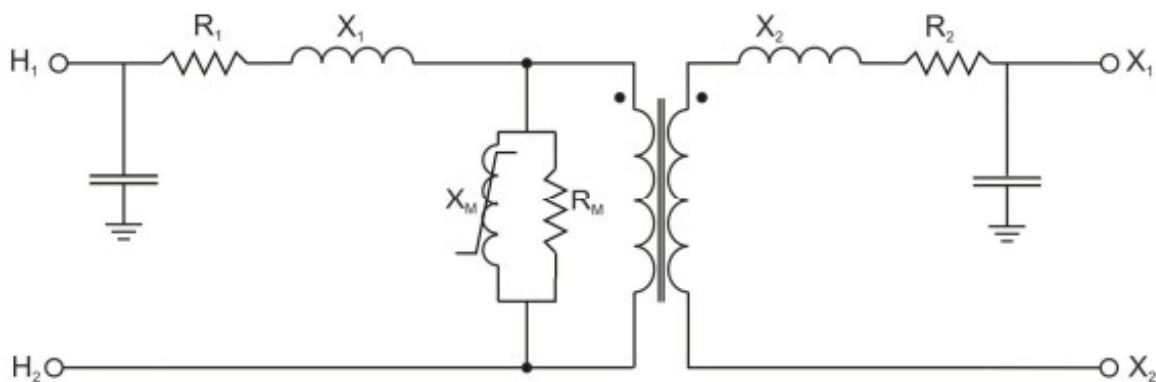
## 2.7 Transformator

På bakgrunn av alt som er beskrevet til nå, kan dette brukes for å forstå transienttematikken til hovedkomponenten i denne rapporten, nemlig transformator eller krafttransformator i høyspenningsanlegg. Krafttransformatorer er en vital komponent i kraftnettet og er generelt sett den mest kostbare komponenten i en kraftstasjon [37]. Ulike transformatorkonfigurasjoner kan gjøre at fasene påvirker og ikke påvirker hverandre ved inn og utkoblinger av transformatoren. Konfigurasjonene er i hovedsak ujordet nøytralpunkt på brytersiden, flerbent kjerne og D-koblet sekundær og tertiærviklinger [1]. Dette må måle og kontrollenhenten ta tas hensyn til når kontrollert kobling senere skal utledes og benyttes.

En krafttransformator som opererer uten last vil i essensen med sekundersiden utkoblet, bare trekke noen få amper til magnetiseringsstrøm. For økonomiske grunner vil hele kjernematerialet i transformatoren utnyttet, som kan gjøre at den magnetiske fluksen når helt opp i knepunktet. Derfor vil magnetiseringsstrømmen normalt ha en klar ikke sinusformet form [1] og i høye transformatorytelser finnes bratte magnetiseringskurver [9]. Dette kapitlet refererer bare til innkobling av en transformator (enfase eller trefase), og nå skal parameterene og konfigurasjonene til transformatoren beskrives mer i detalj.

### 2.7.1 Transformatorparametere og konfigurasjoner

Transformatorparameterene i en transformator kan distribueres som vist i figur 2.20 med klumpede parametere. De viktigste parameterene i transformatoren som skal være i søkelyset, blir nå forklart.



Figur 2.20: Enfase transformatorekvivalent [10] (manipulert).



### Viklingsresistans - $R$

Viklingsresistansen er motstanden i viklingene. Resistivt tap i ledere henger sammen med størrelsen på resistansen  $R$  og strømmen  $I$ , som vist i formel 2.29 [21].

$$P_{\text{tap}} = I^2 R \quad (2.29)$$

### Viklingsreaktans - $X$

Lekkreaktansen eller viklingsreaktansen  $X$  også kalt  $L$  for induktans, er en impedans mellom viklingene. Størrelsen til reaktansen er en funksjon av antall vindinger på viklingen, strømmen i viklingene, lekk feltet og dimensjonen av kjernen og viklingen. Reaktansen gir et tap og spenningsfall i transformatoren, likt med viklingsresistansen [20].

### Magnetiseringsresistans - $R_m$

Kjernetapene er representert med magnetiseringsresistansen  $R_m$  og magnetiseringskarakteristikken med  $X_m$ . Strømmen som genererer den nominelle fluksen i kjernen kalles magnetiseringsstrømmen [20].

### Transformatorytelse

Transformatorytelsen har en nær relasjon til størrelsen på konstruksjonen til transformatoren [21]. Den dimensjonerte verdien til transformatoren er ofte oppgitt i MVA for store krafttransformatorer [20].

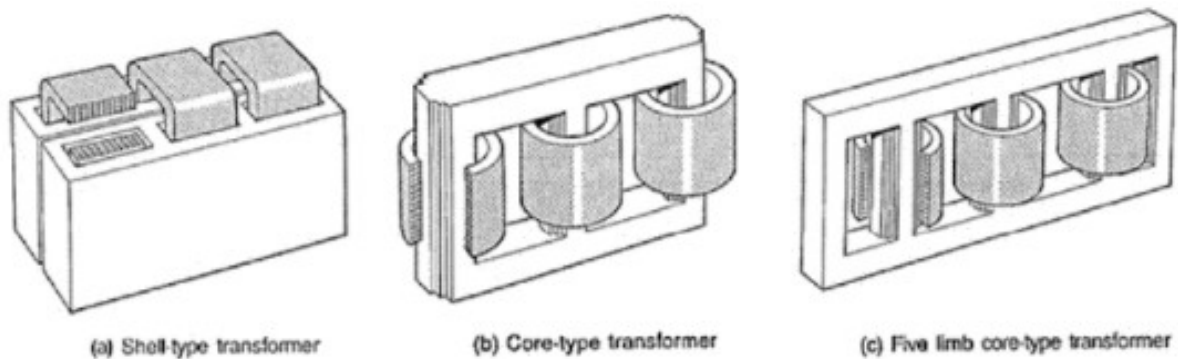
### Koblingsgrupper

Det finnes ulike notasjoner for transformatorer som beskriver sammenkoblingen mellom fasene. Høyspentsiden på en transformator benevnes med store bokstaver, lavspentsiden benevnes med små bokstaver [11]. Den første bokstaven D eller Y beskriver om viklingene er D eller d for deltakoblet og Y eller y for stjernekoblet. G eller g beskriver at nullpunktet er jordet [39], og N eller n beskriver nullpunktet er terminert [11]. Tallet mellom 0-12 beskriver posisjonen til den positive sekvens fasespenningen på lavspentsiden på et klokke-display, referert til at den positive sekvens fasespenningen på høyspentsiden peker mot klokken 12:00 [39]. Dermed vil transformatormerkingen YNd11 beskrive høyspentsiden er stjernekoblet med et terminert nøytralpunkt, og lavspentsiden er deltakoblet og fasespenningen på lavspentsiden peker mot kl 11:00. Koblingsgruppen gir et faseskift på  $30^\circ$ .

### Kjernetyper

Det finnes tre hovedtyper transformator kjerner. En skall type (shell-type) transformator kjerner vises i figur 2.21a. I denne kjernetyper er returneringsveien til fluksen utenpå og omfavner viklingene. Fordelen til denne kjernetyper, er at kjernetyper i seg selv gir god magnetisk skjerming forårsaket av kjernearrangementet. Derfor passer denne type kjerne til transformatorer som forsyner smelteverk som krever høye strømmer ved lavere spenninger [21]. En core-type eller trebentkjerne vises i figur 2.21b. I

denne kjernetypen sitter viklingene rundt de tre kjernebena og det ligger et åk under og over de tre bena. Denne kjernetypen har og trenger ingen separate returveier for fluksen, fordi fluksen vil summeres til null dersom det er et balansert trefasesystem. En ulempe med denne kjernetypen er at for store transformatorer, kan høyden bli ett problem når det gjelder transport og montasje [21]. En fembent transformatorkerne vises i figur 2.21c. I den fembente kjernetypen er tverrsnittet av øvre og nedre åk redusert for å redusere høyden til transformatoren. For å kompensere for reduksjonen i tverrsnittet til åkene, er det lagt på to kjerneben på utiden av de hovedbena som skal være returveier for fluksen [21], som resulterer i fem ben i kjernen. Trebent- og fembent kjerner har ulik relasjon til null sekvens- og den tredje harmoniske fluksen. Trefase kjerner har større økonomiske fordeler fremfor tre enfase transformatorer, forutenom ved de største størrelsene. Enfase transformatorer er ofte brukt for de største generatortransformatorene. Fordelen med enfase transformatorene er at dem reduserer transportvekten og dimensjonene, begrenser skadeomfanget ved feil, og kan lettere være i reseve og byttes ut etter feil siden det er tre separate enfase transformatorer [21].



Figur 2.21: Tre ulike transformatorjernetyper [21].

### Trinnkobler

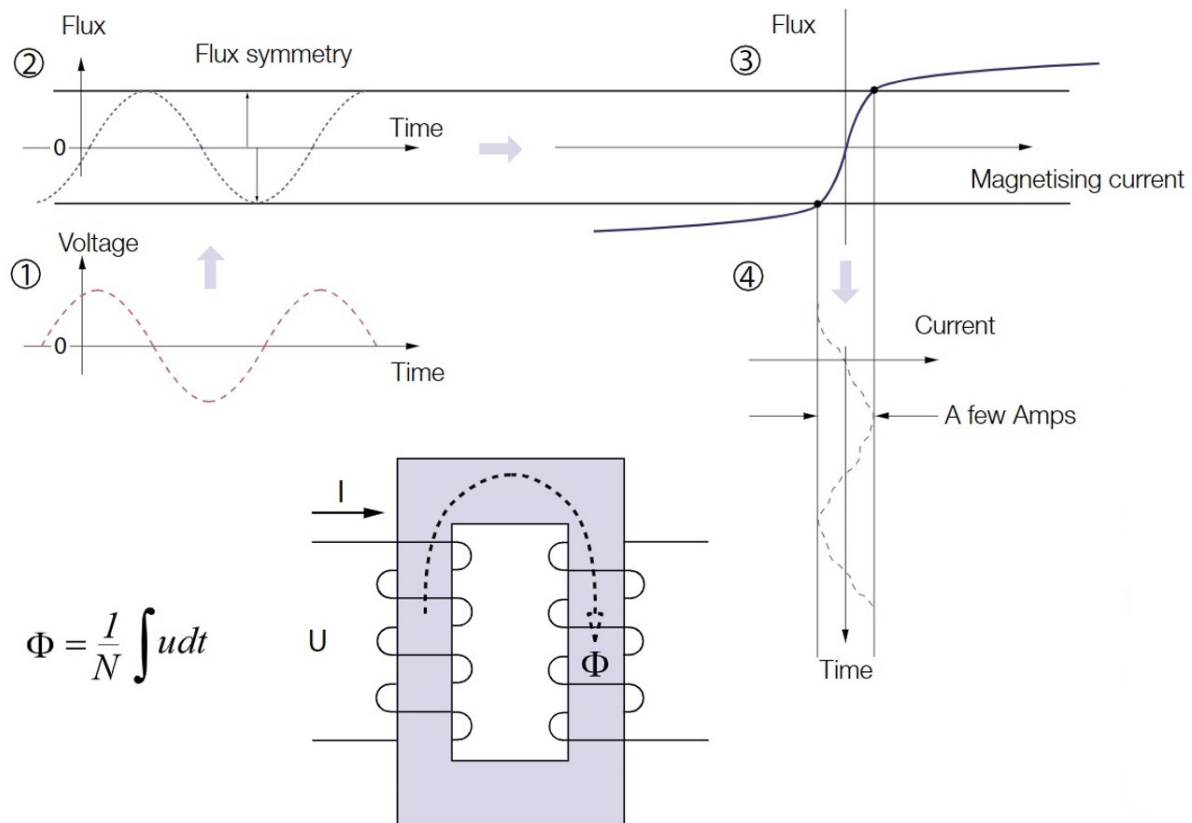
Trinnkobler er et objekt på transformatoren som kan regulere spenningen ut av transformatoren med å regulere et gitt antall viklinger. Enheten kan brukes til å regulere spenning til nominell verdi ved høyt eller lavt spenningsfall [21]. Vanligvis er det ikke trinnkobler i generatortransformatorer, siden generatoren selv kan sørge for spenningsregulering [31]. Et høyt antall vindinger reduserer flukstettheten i kjernen, derfor kan det tenkes at om trinnkobleren er innstilt med maks antall vindinger, gir dette økt resistans og kan være med på å dempe smått eller redusere innkoblingsstrømmene ved spenningssetting [10]. Det finnes flere deler på transformatoren, men disse blir ikke beskrevet. Nå går fokuset mer bort fra de fysiske delene og over til de mer teoretiske delene i transformatoren.

## 2.7.2 Fluks og spenning

Viktig kunnskap for å forstå transienter i transformatorer, er å kjenne til sammenhengen mellom fluks og spenning i transformatorkjernen. Forholdet mellom spenningen og fluksen i kjernen på en transformator vises i formel 2.30 [1] [9].

$$\Phi = \frac{1}{N} \int V dt \quad (2.30)$$

Formelen 2.30 gir en matematisk beskrivelse på hvorfor den genererte symmetriske fluksen  $\Phi$  i stabile forhold, ligger  $90^\circ$  fremfor spenningen  $V$ . Den symmetriske fluksen vil derfor på sin tid, resultere i en symmetrisk minimert magnetiseringsstrøm, bestemt av den magnetiske karakteristikken av kjernen. For enfase transformatorer i stabile forhold, vil sammenhengen mellom spenning, strøm og fluks være som illustrert grafisk i figur 2.22.



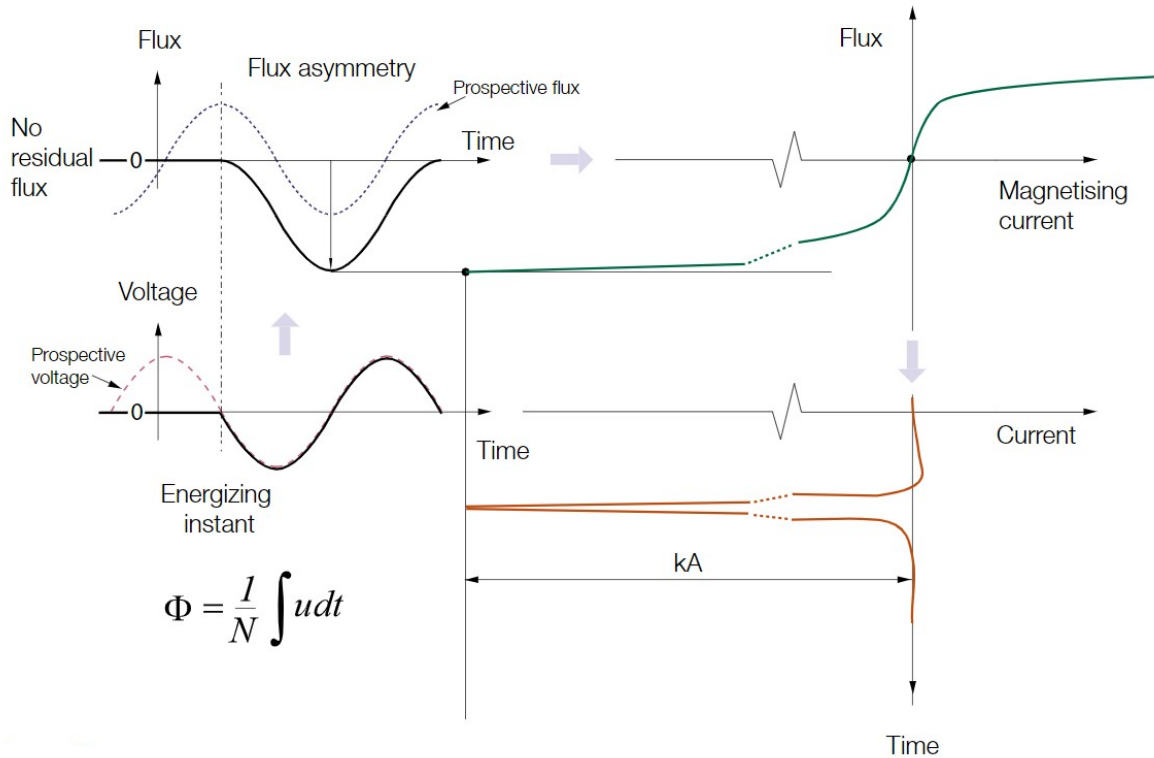
Figur 2.22: Stabile forhold i en enfase transformator vist i form av strøm, spenning og fluks i stasjonær tilstand [1].

Figur 2.22 viser:

1. Jevn spenning over transformatorviklingene.
2. Jevn fluks generert av den påtrykte spenningen.
3. Jevn symmetrisk fluks som avgjør formen til magnetiseringskarakteristikken.
4. Resulterende magnetiseringsstrøm avgjort av formen til magnetiseringskarakteristikken.

Usymmetrisk fluks kan oppstå ved spenningssetting av transformator uten last i ugunstige øyeblikk på grunn av magnetisk treghetsmoment som vist i figur 2.23. Fluksen starter fra det gjenværende fluksnivået i kjernen og med en potensiell bølgeform med en forskyvning introdusert som følge av den magnetiske tregheten

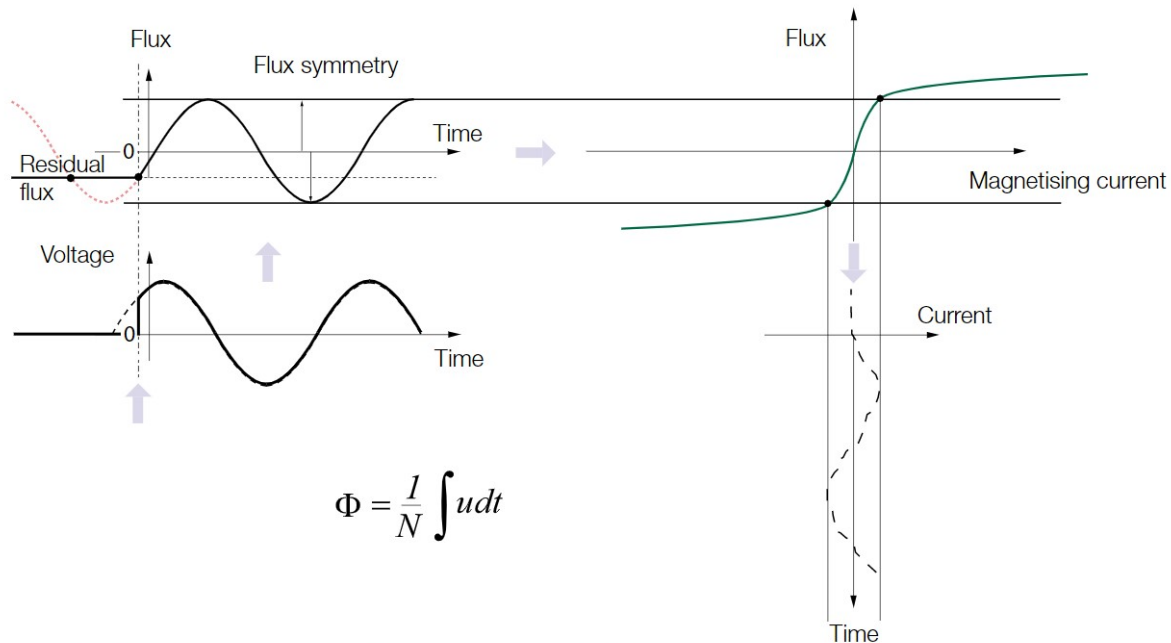
[1]. Verste tilfelle å spenningssette en enfaset transformator med null gjenværende fluks i kjernen, er når spenningen krysser null som vil si lukkevinkel  $0^\circ$ . Dette fører til usymmetrisk fluks i viklingene, noe som driver transformatorkjernen inn i metning. Resultatet av dette er høy innkoblingsstrøm og spenningsfall i nettet [9]. Figur 2.23 viser visuelt hvorfor høye innkoblingsstrømmer blir generert i et ugunstig spenningssettings øyeblikk.



Figur 2.23: Spenningssetting av en enfase transformator ved lukkevinkel  $0^\circ$  og den potensielle fluksen er på sin bølgetopp. Dette resulterer i høy innkoblingsstrøm som vist i grafen nede til høyre. De høye verdiene av strøm oppstår på grunn av en asymmetri i fluksen som oppstår ved et slikt tilfelle [1].

Høye innkoblingsstrømmer kommer derfor av dårlig valg av koblingsøyeblikk med hensyn til fasevinkelen til spenningen og spenningens relasjon til fluks. Dette kan komme av tilfeldige innkoblinger [9] eller utilstrekkelig presisjon av operasjonstiden til effektbryteren. For å lage symmetrisk fluks ved innkobling som ligner stasjonær tilstand i transformatoren, kobles effektbryteren inn i et øyeblikk hvor den potensielle fluksen møter den gjenværende fluksen. Figur 2.24 viser et eksempel på når en transformator spenningssettes i et øyeblikk hvor den potensielle fluksen er lik den gjenværende fluksen. Da minimeres innkoblingsstrømmen som et resultat av å spenningssette i et slikt ideelt øyeblikk [1].

For å kunne spenningssette transformatorer i best mulige øyeblikk, kreves måling av den gjenværende fluksen. Måling av fluks kan gjøres med å ta utgangspunkt i integreringen av spenningen og forholdet mellom antall vindinger  $N$ , som vist i formel 2.30 [1]. Måling av gjenværende fluks kan være utfordrende og et kompleks tema, og avhenger av spesifikasjonene til hvert anlegg [9]. Det antas den gjenværende fluksen forblir uladet fra utkobling til neste koling. Altså, fluksverdien antas å være uendret fra utkobling til neste innkobling [1].

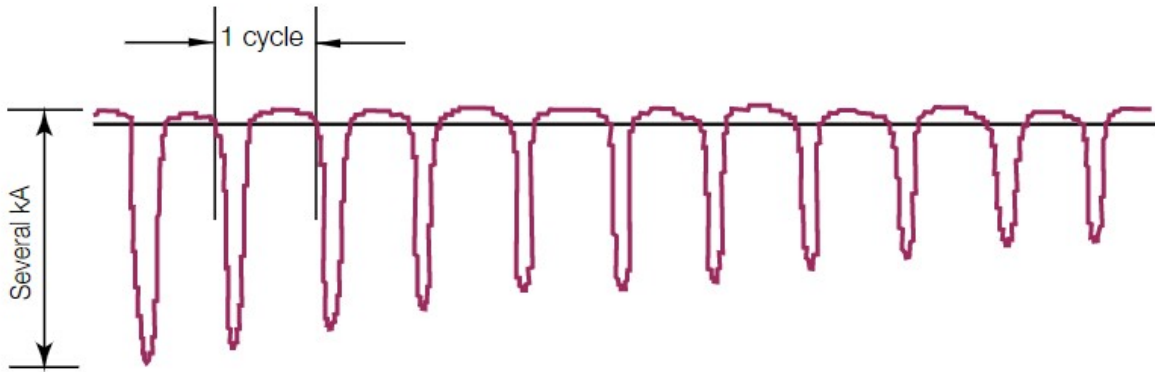


Figur 2.24: Spenningssetting av enfase transformator i et øyeblikk hvor den potensielle fluksen er lik den gjenværende fluksen i transformator kjernen. Figuren viser at dette er et innkoblingsøyeblikk som kan minimere eller eliminere innkoblingsstrømmer [1].

Den magnetiske fluksen i transformator kjernen er altså proporsjonal med integralet til spenningen over viklingen fra utkoblingen. I stasjonær tilstand vil både spenningen og fluksen være symmetrisk og sinusformet, som vist i figur 2.22. Situasjonen kan være merkbart annerledes dersom spenningssettingen skjer ved et ugunstig spenningsverdi øyeblikk. I et eksempel med en fase og sett bort fra gjenværende fluks, er det verste tilfellet at spenningssetting skjer når spenningens momentanverdi er null, som vist i figur 2.23. Ved et slik scenario vil fluksen bli presset opp til det doble av toppverdien i forhold til stasjonær tilstand. Fluksen vil bli høyt asymmetrisk og sakte vende tilbake til dens normale symmetrisk form. Som en konsekvens vil kjernen bli drevet langt inn i metning, og den tilsvarende verdien til innkoblingsstrømmen kan være sterkt asymmetrisk og ikke sinusformet som demonstrert i figur 2.25. Avhengig av polariteten, vil hver rest av fluks i kjernen i koblingsøyeblikket summeres til fluksen relatert til spenningen og gjøre situasjonen mer alvorlig. En typisk innkoblingsstrøm kan nå en toppverdi på flere tusen ampere (kA), som vist i figur 2.25. Høy innkoblingsstrøm fører til høyt stress på transformatoren og kan potensielt redusere levetiden på transformatoren og i verste fall føre til havari [9].

### Utkobling av transformator

En spenningsatt transformator uten last vil trekke en relativ liten magnetiseringsstrøm i forhold til den nominelle strømmen. De naturlige svingningene i viklingene er mye mindre utsatt og sterkere dempet i dette tilfellet. Derfor vil spenningen som er generert ved åpning operasjoner eller utkobling være lav og normalt ikke harmfulle. For å begrense overspenninger, er kontrollerte åpning av effektbryter ikke nødvendig. Etter



Figur 2.25: Innkoblingsstrøm ved innkobling av en transformator uten last i et øyeblikk som har ført til høy innkoblingsstrøm [1].

en utkobling vil det ligge igjen fluks i transformatorkjernen som holder seg som nevnt uendret og kalles gjenværende fluks. Utkobling ved strøm som er i naturlig null verdi, vil føre til lavest gjenværende fluks. Siden tomgangsstrømmen er lav, kan strømmen lett brytes av effektbryteren når strømverdien er langt fra null. Dette vil føre til høy gjenværende fluks [1] som vist i figur 2.26 og bruk av formel 2.30. I de tilfeller hvor tilkoblingene på transformatoren har tilstrekkelig kapasitans, kan avbruddet assosiert med dempede svingninger fremkomme, (relatert til transformator induktansen og kapasitansen til omgivelsene). Slike svingninger vil minske til null med den gjenværende fluksen.

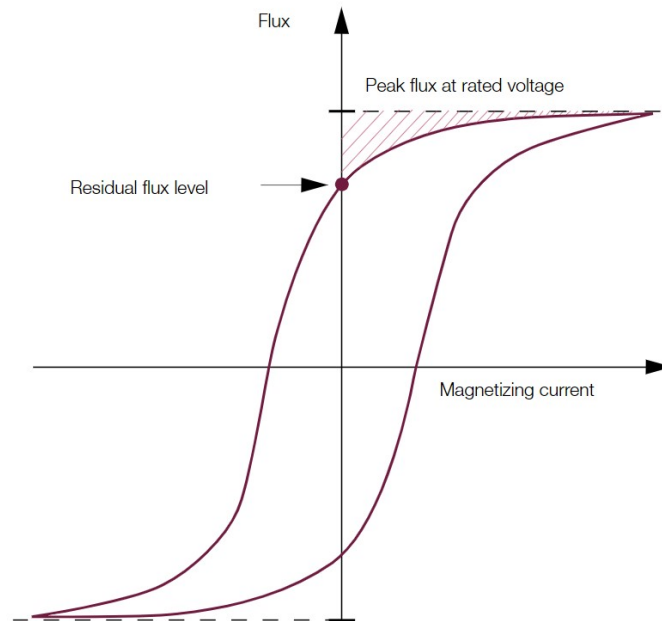
Dette er den grunnleggende teorien om hvordan fluks og spenning påvirker utkobling og innkobling av transformator uten last, og hvorfor transienter derfor oppstår. Videre skal det forklare hva transientene gjør og hvordan de praktisk kan reduseres med kontrollert kobling og PoW (Point on Wave) teknologi.

## 2.8 Hvorfor redusere transienter

Det er nå beskrevet hvordan en transformator fungerer og hvorfor transienter oppstår når en transformator spenningssettes. Hovedfokuset for å benytte det som kalles kontrollert kobling, eller fasevis synkronisert kobling eller PoW (Point on Wave) på transformatorer, er for å kontrollere spenningssettingen og redusere innkoblingsstrøm-transientene [9], noe som er fordelaktig fordi dette: [37]

- Redusere elektromagnetisk stress på viklingene.
- Forhindrer midlertidig harmoniske spenninger, som kan forårsake degradering av kraftforsyningskvaliteten.
- Unngår interferens i sekundær kretser fra høye null-sekvens strømmer.
- Unngår feiloperasjon av vern.

Innkoblingsstrømmer er normalt lavere enn kortslutningsstrømmer. Selv om innkoblingsstrømmene normalt er mindre, kan de elektromagnetiske kreftene på innsiden



Figur 2.26: Magnetiseringskarakteristikk. Magnetisk fluks i transformatorkjernen ved nominell spenning [1].

av transformatoren forårsaket av innkoblingsstrømmer ha lik verdi som kortslutningsstrømmer, samtidig har innlingsstrømmer lengre eksponeringstid eller varighet. Alt dette resulterer i høyt mekanisk stress på viklingisolasjonen og kan føre til skader, havari eller redusert levetid. Mekanisk overbelastning i form av overspenninger og kortslutning (som nå også kan identifiseres med innkoblingsstrøm som likt stressnivå) [9] fører til mekanisk nedbryting av isolasjonen i viklingene [36]. Høye innkoblingsstrømmer og det resulterende spenningsfallet kan føre til tripp i overstrømsvern og underspenningsvern. I svake nett kan også kontrollert kobling øke spenningskvaliteten betydelig [10]. Å unngå feiloperasjon av vern når transformator spenningssettes, er en betydelig grunn for å benytte kontrollert innkobling av transformatorer. Andre høyspentlinjer eller kabler kan i verste tilfelle bli utkoblet ved visse spenningsøkelyblikk. Jordfeilstrømsvern og 3I0 vern oppdager skjevstrømmer som forplantes i kraftstasjonen, og kobler ut effektbrytere som tilhører, og ikke tilhører transformatoren dersom geneseverdiene til vernene overskrides på grunn av innkoblingsstrømmer. Dette er en av grunnene til at systemansvarlig har funksjonskrav om at krafttransformatorer med ytelse  $\geq 150$  MVA skal benytte fasevis synkronisert kobling eller lignende [41]. Transformatorytelse fra 100-150 MVA skal behøvsprøves og for størrelser under 100 MVA er det ikke gitt krav om funksjonskravet fasevis synkronisert kobling [33].

NVF (National veileder for funksjonskrav i kraftsystemet) [33], legger til grunn å benytte strømbegrensende anordning ved kobling for transformatorer, som kan innebære bruk av kontrollert innkobling. Veilederen er et vedlegg til retningslinjene for §14 *Fastsettelse og oppfølging av funksjonalitet i anlegg i kraftsystemet*. Paragrafen er gitt i foreskrift *utøvelse av systemansvaret* - fos som Statnett kaller det [33], eller *Forskrift om systemansvaret i kraftsystemet* - FOR som Lovdata kaller det [14].

Nå er det forklart hvorfor transientene er uønsket og hvilke krav som settes til ulike

transformatorstørrelser. Videre skal det forklares hvordan funksjonskravet på ulike måter praktisk kan fungere.

## 2.9 Kontrollert kobling

PoW (Point on Wave) eller kontrollert kobling, er en metode som kan gjøre at lukke og åpne operasjoner av effektbrytere, reduserer transienter fordi hver enkelt effektbryter innkobles i et ideelt spenningssettings øyeblikk. Fordelene med bruk av kontrollert kobling avhenger av kretstypen med ens iboende parameternatur i kretsen [37]. En  $R-L$  krets lukkes optimalt ved en spenningstopp og en  $R-C$  krets lukkes optimalt når spenningsbølgen krysser null [35], som diskutert i delkapittel 2.3. Bruk av kontrollert innkobling er mest vanlig hos shunt kondensatorer og reaktorer [37], men er i økende grad brukt på transformatorer [9]. Bruk av kontrollert innkobling kan dra nytte av teknologien fra et rent teknisk perspektiv til økonomiske signifikante faktorer, som reduksjon av vedlikeholdskostnader [37], økt levetid på transformatorer og leveringskvalitet [9]. For å oppnå optimale forhold for kontrollert kobling, stilles det normalt to krav til utstyr: [6]

IPO Independent Pole Operation. Fasene må kunne opereres uavhengig av hverandre. Dette gjøres med å benytte individuelle drivermekanismer til hver effektbryterpol. [33].

VT Spenningstransformator. VT er nødvendig for kontrollert innkobling av transformatorer, fordi dette er komponenten som kan måle spenningsbølgen og den gjenværende fluksen i transformatorkjernen som vist i formel 2.30. VT installeres optimalt nært transformatoren. Det kan være situasjoner der den gjenværende fluksverdien ikke er tilgjengelig, som driftsettelse av installasjonen eller mangel på VT [6].

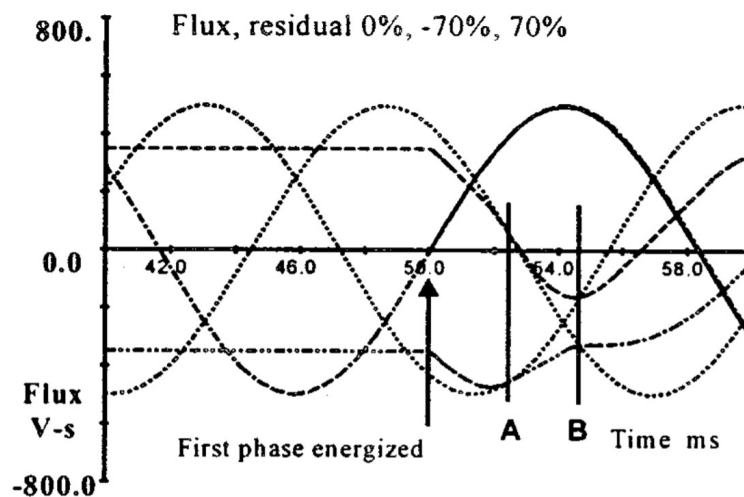
Selv om IPO og VT er nødvendig for en optimal kontrollert lukking, finnes det også ulike strategier for kontrollert lukking hvor en eller to av disse kravene ikke oppfylles [6]. Generelt er det tre lukkestrategier som benytter måling av gjenværende fluks i transformatorkjernen. Informasjonen om den gjenværende fluksen, gjør at effektbryteren kan siktes inn på å lukkes når den potensielle fluksen i spenningen er lik den gjenværende fluksen i transformatorkjernen. Dette gjør at strømtransientene eller innkoblingsstrømmene i transformatoren kan begrenses eller elimineres. Fem ulike strategier heter: [3]

- RCS (Rapid Closing Strategy).
- DCS (Delayed Closing Strategy).
- SCS (Simultaneous Closing Strategy).
- Flukslåsing.
- Spenningstoppmetoden.



## 2.9.1 RCS (Rapid Closing Strategy)

Strategien går ut på at først spenningssettes en fase, så to faser samtidig innen en kvart syklus [3] etter spenningsens første null kryssing til den første fasen som ble spenningsatt [9]. Hver fase blir spenningsatt ved sitt optimale tidspunkt med tanke på potensiell og gjenværende fluks. Etter første fase er spenningsatt i en transformator, blir dynamisk fluks induisert i de to gjenværende fasene og deretter blir de spenningsatt [3]. Et eksempel på bruk av RCS vises i figur 2.27. Dette er den vanskeligste strategien å implementere av de tre strategiene med fluksmåling [4]. Fordi den potensielle fluksen i alle tre faser må være kjent og det behøves bruk av IPO. Inndelingen av fluks i kjernen er ikke linjer i tidsperioden mellom første og til de to siste fasene er spenningsatt og den transiente kjernefluksen må være kjent [3]. Figur 2.27 viser de to gjenværende fasene kan spenningssettes i øyeblikk A eller B. Øyeblikk A er foretrukket over B, fordi bølgeene til induisert dynamisk fluks faller i bølgeene til forutsatt fluks [4].

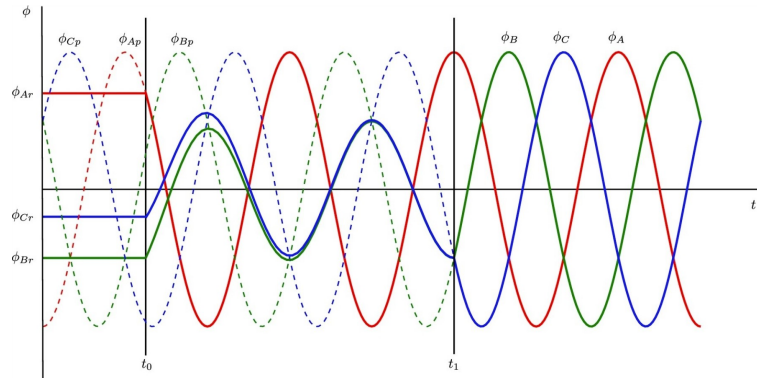


Figur 2.27: Lukkemetoden Rapid Closing Strategy. Første pil til venstre viser at første fase spenningssettes, mens A eller B er spenningssettingstidspunktet av de resterende fasene, hvor A er den foretrukne instansen [4].

## 2.9.2 DCS (Delayed Closing Strategy)

Strategien går ut på at den utvalgte fasen med fluksmåling av gjenværende fluks, lukkes på et optimalt tidspunkt med tanke på gjenværende- og potensiell fluks. Gjenværende fluks i de to ikke spenningsatte fasene vil etter kort tid være spredt i kjernen, og bli utbyttet med en andel dynamisk fluks fra den spenningsatte fasen. Dette er kalt kjernefluksutligning. Deretter lukkes de to gjenværende fasene samtidig etter noen sykluser [6]. I figur 2.28 blir DCS benyttet og demonstrert. I praktiske eksempler er det forekommet gode resultat med tidsforsinkelse (*Delay*) på 4,5 sykluser [8]. Andre kilder mener at tidsforsinkelse mellom første og de to resterende fasene skal være så kort som mulig. DCS frarådes med lange kabler, da dette kan skape ferroresonans [9]. DCS er en av de enklere lukkemethodene [8] av de tre metodene med fluksmåling, fordi det trengs bare fluksmåling i en fase. Den transiente kjerneflukskarakteristikken må

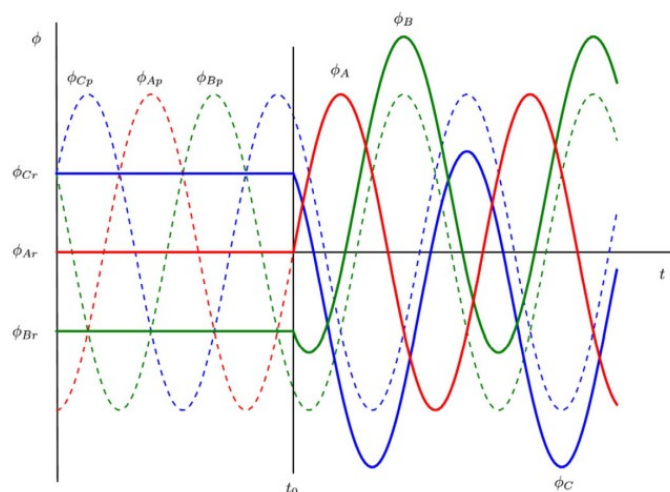
ikke være kjent, men det må benyttes IPO. Fordelsmessig spenningssettes fasen med minst fluks først [4].



Figur 2.28: Lukkemetoden DCS (Delayed Closing Strategy). Solide linjer er den faktiske fluksen og de stiplede linjene er den potensielle fluksen [6].

### 2.9.3 SCS (Simultan Closing Strategy)

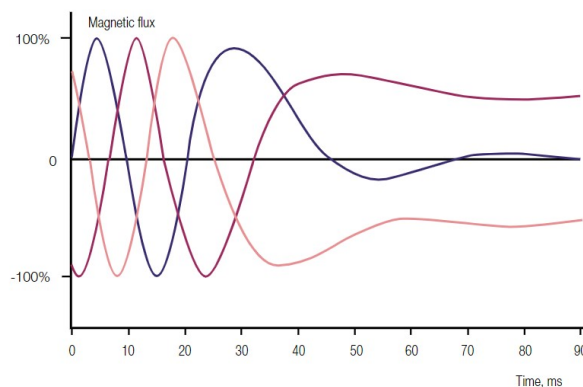
Ved bruk av SCS lukkes alle tre fasene samtidig. For at metoden skal være effektiv må kontrolleren og måleenheten vite den gjenværende fluksen i alle tre fasene og må følge mønsteret  $[0, -r, r]$  [4]. Dette setter krav til at gjenværende fluksverdien er høy og krever mer sofistikerte algoritmer til å determinere korrekt koblingsøyeblikk. Figur 2.29 viser et eksempel på bruk av SCS. På grunn av muligheten for MPO ved denne strategien, kan strategien passe for lavere spenninger der det ikke er standard med bruk av IPO [8]. Det kan ikke oppnås fullstendig eliminasjon av innkoblingsstrømmer ved denne metoden [7].



Figur 2.29: Lukkemetoden SCS (Simultan Closing Strategy). Solide linjer er den faktiske fluksen og de stiplede linjene er den potensielle fluksen [7].

## 2.9.4 Flukslåsing

I situasjoner hvor det kan finnes gjenværende fluks, kan kontrollert åpning eller utkobling bli brukt til å kontrollere størrelsen og polariteten til fluksen [1]. Dette kalles også flukslåsing [9]. Med å bruke kontrollert åpning som støtte for den kommende kontrollerte innkoblingen, kan innkoblingsstrømmen bli begrenset enda ytterligere [1] og være mer forutsigbar [9]. Figuren 2.30 viser hvordan fluksmønsteret kan se ut, dersom transformatoren utkobles i et tilfeldig tidspunkt. Den kontrollerte utkoblingen skal gjøre at den magnetiske fluksen kan gjøres kjent, ikke tilfeldig og uvisst som vist i figuren.



Figur 2.30: Gjenværende fluks i transformator-kjerne ved utkobling i et tilfeldig tidspunkt [1].

## 2.9.5 Spenningstoppmetoden

Kontrollert innkobling uten hensyn av gjenværende fluks, er en metode som også kan benyttes. Metoden heter spenningstoppmetoden og er en mye brukt metode og antar det er null fluks i kjernen [9]. Dette er en mer rett frem metode som vil begrense den høyeste innkoblingsstrømmen, selv om det er gjenværende fluks i kjernen. På grunn av dette, vil dette gjelde tilfeller med gjenværende fluks eller med ukjent gjenværende fluks. Det vil oppnås bedre resultater av å benytte RCS og DCS [1], men metoden gjør det mulig å redusere innkoblingsstrømmen med 50% fremfor tilfeldig innkobling [10]. For en transformator med YGd kobling og fembent kjerne er anbefalingene; Fase-a har ideelt lukkevinkel på topp av spenningsbølgen og de to resterende fasene innkobles 90° etter denne vinkelen. En ulempe med spenningstoppmetoden er høye koblingsspenninger dersom innkoblingskjer ved spennings bølgetopp. Derfor er det anbefalt å sikte innkoblingsøyeblikket før bølgetoppen for å unngå de høyeste koblingsspenningene. Lukkevinkel 45° er derfor i noen tilfeller et greit mellompunkt for å unngå både de høyeste innkoblingsstrømmene og koblingsspenningene [9]. Samtidig er det anbefalt å koble på stigende spenningsbølge som demonstrert i figur 2.18 for å bedre presisjonen til operasjonstiden.

## 2.9.6 Oppsummering av kontrollert kobling

En oppsummering av tre lukkestrategiene med måling av fluks blir gitt i tabell 2.1. Typiske verdier for lukkevinkel til strategiene i den første fasen varierer mellom 35-

Tabell 2.1: En oppsummering av de tre lukkestrategiene med fluksmåling som er beskrevet i delkapittel 2.9.

Metode	Strategi	Må vite	Krever	Kommentarer
(RCS) Rapid Closing Strategy	Optimalt tidspunkt i hver faste mht. gjenværende og potensiell fluks. Spenningssette en fase, så de to resterende fasene samtidig innen en kvart syklus	Gjenværende fluks i alle tre faser. Transient kjernefluks karakteristikk	IPO. Fluksmåling i hver fase	Vanskeligere strategi
(DCS) Delayed Closing Strategy	Optimalt tidspunkt i hver fase mht. gjenværende og potensiell fluks. Spenningssette fasen med fluksmåling, så de to resterende samtidig innen få sykluser	Gjenværende fluks i en fase	IPO. Fluksmåling i en fase	Lettere å implementere. Ikke anbefalt på lange kabler
(SCS) Simultan Closing Strategy	Gjenværende og potensiell fluks er lik fasene med lavest gjenværende fluks. Spenningssette alle tre faser samtidig	Gjenværende fluks i alle tre faser	MPO. Fluksmåling i hver fase. Følgning av mønster $[0, -r, r]$	Krever ikke IPO

90° og avhenger av fluksen. Flukslåsing med kontrollert utkobling gjør fluksmønsteret kjent og påfølgende innkobling kan kobles inn mot dette mønsteret for å la potensiell fluks møte gjenværende fluks. I tilfeller hvor fluksmåling ikke er tilgjengelig, er det ulike anbefalinger basert på anleggskonfigurasjonen og her kan spenningsstoppmetoden benyttes. Hvilke anbefalinger som bli gitt av lukkevinkel til en transformator med felles kjerne, avhenger av transformatorkoblingene og konfigurasjonene. Spenningsstoppmetoden fører ikke alltid til lavest innkoblingsstrøm, men metoden unngår de verste innkoblingstilfellene som genererer høy innkoblingsstrøm. Det finnes altså ulike metoder med og uten måling av fluks. Til felles for strategiene eller metodene, er at innkoblingsstrømmene reduseres og verste innkoblingstilfeller blir unngått [9].

## 2.10 Lover og regler

Hvilke spenninger og funksjonskrav som settes av TSO (systemansvarlig i transmisisjonsnettet) i sammenheng med spenningssetting av transformatorer, skal nå undersøkes. I delkapittel 2.5.1 ble det forklart at høyere klasifisering av transformator kan bidra til høyere resonansoverspenninger. Derfor kan det være naturlig å studere anlegg for spenningsnivået 420 kV samtidig som større transformatorer finnes i dette spenningsnivået med ytelser  $\geq 150$  MVA. Dette spenningsnivået blir temaet for resten av rapporten. Som diskutert i delkapittel 2.6 om effektbrytere, er det vanlig å benytte seg av IPO brytere for dette spenningsnivået. Noen av spenningssettingsstrategiene forklart i delkapittel 2.9 forutsetter også bruk av IPO.

### Spenningsgrenser

National veileder for funksjonskrav NVF [33], setter funksjonskrav om at spenningsnivå med navnbetegnelse 420 kV - nett, er 420 kV den maksimale kontinuerlige spenningen nettet skal påtrykkes. Andre spenningsgrenser i 420 kV nett, som er tilknyttet utstyr i forbruksanlegg og nettanlegg, og er tilknyttet regional- eller transmisisjonsnettet skal kunne tåle uten utfall er:

- Spenninger under 30 sekunder = 462 kV.  $(\frac{462kV}{420kV} = 1,10pu)$
- Spenninger under 5 sekunder = 483 kV.  $(\frac{483kV}{420kV} = 1,15pu)$

- Lyn-impulsbeskyttelsesnivå = 1 424 kV. ( $\frac{1424kV}{420kV} = 3,39pu$ )
- Koblingsimpulsbeskyttelsesnivå = 1 050 kV. ( $\frac{1050kV}{420kV} = 2,5pu$ )

Den nedre kontinuerligespenningsgrensen for 420 kV nett er på 90% av 400 kV, som resulterer i 360 kV. Dette blir da 85,7% av 420 kV.

### Krav om fasestyrt innkobling

NVF (National veileder for funksjonskrav i kraftsystemet) [33] beskriver fasevis synkronisert ut eller innkøling, er styring av hvor på sinuskurven koblingsøyeblikket skal være. Styringen forutsetter effektbryteranordningen er IPO. Funksjonens hensikt er å begrense innkoblingsstrømmen til de reaktive komponentene. Utkoblinger av shuntreaktorer- og for spenningssetting av kabel- med denne funksjonen vil bidra til å begrense spenningspåkjenningene til disse objektene. Annen anordning for å begrense innkoblingsstrøm og spenninger er innkoblingsmotstand samtidig kan andre teknologi/løsninger enn fasevis innkobling (PoW) og innkoblingsmotstand benyttes. Funksjonskravet gitt i NVF 5.2.4.5 oppgir at *Effektbrytere skal kunne koble og spenningssette transformator slik at innkoblingsstrøm og koblingsspenninger ikke reduserer koblingsanleggets funksjonalitet eller kraftsystemets leveringskvalitet* [33]. NVF 5.2.4.5.1.1 påkrever at effektbrytere som skal spenningssette transformatorer lik eller over 150 MVA, skal ha anordning for å begrense innkoblingsstrøm og koblingsspenninger [33]. Transformatorer mellom 100 og 150 MVA skal kravet behovprøves, forklart i NVF 5.2.4.5.1.2. Transformatorer som normalt spenningssettes fra generatorer krever ikke anordning som begrenser innkoblingsstrømmen eller spenningene (NVF 5.2.4.6). *Spenningssetting av generatortransformator skal helst skjer fra generator. Dersom generatortransformator skal spenningssettes fra nettet, skal behov for apparat for begrensnings av innkoblingsstrømmer vurderes iht. kapittel 5.2.4 (5.2.4.6)* [33].

### Vern og 3I0 strømmer

Jordstrømsvern er et vern som vil kunne koble ut transformatorer, og eventuelt andre avganger dersom spenningssetting av transformator gir innkoblingsstrømmer som overskrider vernets satte grenser. Jordstrømsvernfunksjonene til nullfølgestrømmen 3I0 har en strømvhengig tidsforsinkelse i henhold til NEK EN 60255-151 [33]. Overstrømsvern har som funksjon å være reservevern for transformatordifferensialvern og skal også gi reservedekning ved feil på nedspentside av transformator. Om disse vernene ikke er korrekt stilt inn for å ta hensyn til innkoblingsstrøm, kan vernene gi tripp på innkoblingsstrøm. Men dette skal tas hensyn til når releplaner utarbeides. Grensene på innkoblingsstrøm er ofte ikke satt, men transformatorene vil ha noen naturlige begrensninger med tanke på hvor stor innkoblingsstrømmen kan bli. Det er viktig at 3I0 strømmen ikke medfører tripp av vern, dette kan gjøres med å gi god margin til strømgrensene sammen med den strømvhengige tidsforsinkelsen [41]. Høye innkoblingsstrømmer kan være høye i verdi, så høye at vernene kan forveksle strømmen med en kortsluting, og dette vil føre til vernene gir tripp signaler til effektbryter [9].

## 2.11 Litteratur om vern og innkoblingsstrømmer

Til nå er det beskrevet at spenningssetting av en transformator i visse øyeblikk kan føre til store innkoblingsstrømmer. Innkoblingsstrømmen kan være negativt for levetiden på transformatoren, grunnet økt mekanisk og termisk stress på viklingene [6]. Transienten påvirker også leveringskvaliteten grunnet spenningsfall og vernene kan feiloperere overstrømsvern, differensial vern, [6] [20] [45] og jordstrømsvern [41]. Strømmen fører også til midlertidige spenningsfall og påvirker derfor leveringskvaliteten i nettet [6].

Overmagnetisering og innkoblingsstrømmer produserer forvrengte strømbølger. En tolkning av disse bølgeene kan gi vernene informasjon som kan hjelpe å skille mellom innkoblingsstrøm, overmagnetisering, interne feil [20] og kortslutninger [46]. Innkoblingsstrømmer inneholder ofte et DC offset, oddetallsharmoner og partallsharmoner. Det harmoniske innholdet i strømmen kan brukes for å få detektert hvilken type strøm det er, noe som kan gjøre at vern ikke feilkobler dersom en transformator spenningssetter ved et tidspunkt som gir høy innkoblingsstrøm. Vern kan velge å blokkere tripp signalene når det det harmoniske innholdet samstemmer med innholdet til en innkoblingsstrøm, slik at vern ikke feilopererer. En annen metode som kan hjelpe vernene med å skille mellom innkoblingsstrøm, overmagnetisering, interne feil og kortslutningsstrømmer, baserer seg på å gjenkjenne formen på bølgeene og kan kombineres med ta DC offsettet i innkoblingsstrømmen i betraktning [20] [46]. Noen kilder i transformatoranlegget gjør det vanskelig å skulle skille innkoblingsstrøm, overmagnetisering og internefeil fra hverandre. Dette er fordi det er kilder til forvrengning i transformatoren som måler strøm, ikke-linjer feilmotstand eller systemresonanser [20]. Altså kan det tolkes at riktig utstyr og algoritmer kan eliminere eller redusere feilopereringer av vern forårsaket av innkoblingsstrømmer. Det som kan være verd å merke seg er at det harmoniske innholdet i en syklus kan være et annet innhold i den neste syklusen, som gjør at innholdet variere med tiden. Noen ganger kan visse harmoner være på sitt maksimum etter noen perioder. Utviklingen av harmonisk innhold kan derfor ikke generaliseres for et gitt øyeblikk. Det harmoniske innholdet er høyt avhengig av den spesifikke transformatoren, forhåndsliggende nett og spenningssettingsøyeblikket. Detekteringen må da justeres for hver enkelt anlegg, [10] før denne metoden kan benyttes. Etter en beskrivelse av sinusbølger, transienter og energibevaring, effektbryter, transformator og kontrollert kobling, var dette siste delkapittelet for den generelle teorien.

## 2.12 Sammendrag av kapittelet

Teorien som er presentert i dette kapittelet, dekker forklaringen av årsakene til innkoblingsstrømmer og koblingsspenninger dannes når en transformator uten last spenningssettes. Sinusbølger kan beskrives på ulike måter matematisk og kan beregnes med EMTP programvare. Transienter forekommer på grunn av energibevaringsprinsippet og oppstår når parametere og konfigurasjoner i en krets endres. Grunnelementene  $R$ ,  $L$  og  $C$  påvirker ulikt transientene i en krets, når en krets sluttes. For å redusere transienter når en induktiv krets sluttes, sluttes kretsen når spenningen er på sin maks verdi på sinusbølgen. For kapasitive kretser er det optimale øyeblikket når

spenningsbølgen går i null. På bakgrunn av dette ble mer praktiske eksempler på transienter i kraftnettet forklart og beskrevet med begrepene koblingsspenninger og innkoblingsstrømmer, som forekommer når en effektbryter spenningssetter en transformator uten last. Nøyaktigheten til den ønskede lukkevinkelen og faktiske lukkevinkelen er påvirket av flere indre og ytre faktorer i effektbryteren. For å oppnå et bedre resultat av ønsket lukkevinkel, er det anbefalt å lukke effektbryteren på stigende spenningsbølge og ta i bruk kompenseringfunksjonen som bedrer presisjonen av operasjonstiden. Det optimale øyeblikket for å redusere innkoblingsstrømmer i en transformator, er når den gjenværende fluksen i kjernen er lik den potensielle fluksen ved innkoblingsøyeblikket. Dersom den gjenværende fluksen ikke kan tas hensyn til, er det optimale lukkeøyeblikket når spenningen er på sin toppverdi på spenningsbølgen, fordi fluksen ligger  $90^\circ$  fremfor spenningen og da krysser gjennom null. Disse optimale innkoblingsøyeblikkene kan realiseres med kontrollert kobling også kalt PoW (Point on Wave) eller synkronisert fasevis innkobling. Høye innkoblingsstrømmer er uønsket fordi det kan føre til at vern feilopererer, at stresset på transformatoren øker og at leveringskvaliteten blir redusert. NVF (Nasjonal veileder for funksjonskrav i kraftsystemet) har et funksjonskrav om at transformatorer  $\geq 150$  MVA skal ha en anordning som begrenser innkoblingsstrømmene, PoW eller kontrollert kobling kan være en slik anordning. Neste kapittel tar for seg oppbyggingen av en modell som skal brukes til å forske på hvilke parametere som bidrar til høye innkoblingsstrømmer og koblingsspenninger ved bruk av PoW.

# Kapittel 3

## Metode

I dette kapitlet blir en modell laget i simuleringsverktøyet MATLAB Simulink, for å simulere transienter som innkoblingsstrømmer og koblingsspenninger ved transformatorer som spenningssettes uten last. Dette i håp om å avdekke hva som skaper høye transienter som kan redusere levetiden på transformatoren og leveringskvaliteten. Verktøyet MATLAB Simulink blir forklart og redgjort for hvorfor dette skal benyttes som simuleringsprogram. Deretter blir simuleringsmodellen som skal etterligne deler av et vannkraftverk med alle sine hovedkomponenter, oppbygget og forklart mer i detalj. Til slutt forklares hvordan styringen av simuleringsmodellen skal foregå, og det blir gitt en oppsummering av kapitlet.

### 3.1 Simuleringsverktøy

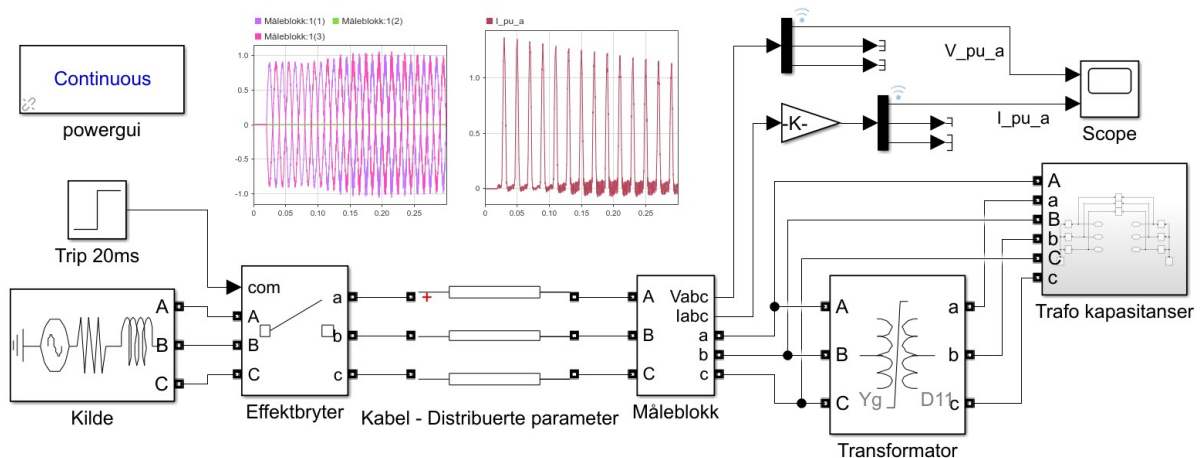
Diskusjonen i delkapittel 2.3 avsluttes med at kalkuleringer av transienter er best å overlate til EMTP programmer ved komplekse *RLC* kretser. Simuleringsverktøyet som brukes i denne rapporten er MATLAB Simulink. Opprinnelig skulle EMTP-RV programmet som er et mer spesialisert program for transientstudier i kraftnettet benyttes. Søknaden om lisens til dette programmet ble avslått av fakultetet selv om studiekonsulenten fra HVL anbefalte å benytte dette verktøyet. Avslaget kom tre måneder etter søknaden ble sendt. En vernspesialist i Statnett anbefalte å benytte PSCAD og søke om data og modeller fra PSSE avedlingen i Statnett. Avdelingen kom ikke med noe svar og PSCAD benyttet et programmeringsspråk som forfatteren ikke har benyttet før. På bakgrunn av dette ble heller ikke PSCAD benyttet. Fakultetet kunne derimot stille med lisens til MATLAB programmet og ble derfor det tilgjengelige EMTP verktøyet. Andre mer spesialiserte programmer som EMTP-RV, PSCAD og ATP-EMTP kan simulere transformator innkoblingsstrøm og kan kanskje i noen tilfeller gi bedre resultater da programmet er mer spesialisert for denne typen anlegg. Simulink som er en del av MATLAB, og er et grafisk programmeringsverktøy som er brukt i flere akademisk studier som simulerer dynamiske system [47]. Modellen skal benytte Simscape Electrical Specialized Power Systems tilleggspakken til simulink i MATLAB. Denne pakken er tidligere brukt av en forsker i tilsvarende emne [46]. Simuleringsverktøyet gjør det mulig å reprodusere oppførselen til systemet ved de gitte parameterene i modellen til de påtrykte tilfellene som simuleres for [47].



## 3.2 Hovedkomponentene

Ett av målene med denne rapporten er å foreta simuleringer som får frem hvilke parametere som påvirker innkoblingsstrømmer og koblingsspenninger når en transformator uten last spenningssettes. Spesifikt skal dette rettes oppimot en spesifikk generatortransformator i et vannkraftverk som skal spenningssettes fra nettet og ikke generatoren. Dette er et scenario som NVF kapittel 5.2.4.5.1.2 gir visse funksjonskrav for, som diskutert i delkapittel 2.10. De fleste parametere som blir valgt i blokkene i modellen, er hentet fra et eksisterende vannkraftverk.

Simuleringsmodellen er bygget opp på følgende måte. Hovedkomponenten i studeringssonen er krafttransformatoren. De andre komponentene i studeringssonen er kabel, effektbryter og kraftforsyningen fra nettet også kalt kilde. Disse komponentene kobles sammen på en linje og skal representere deler av produksjonsanlegget. Et råd fra Juan A. Martinez er å minimere deler i systemet som skal representeres, fordi et økt antall komponenter fører nødvendigvis ikke til økt nøyaktighet. Dette fordi det kan øke sannsynligheten for utilstrekkeligheter eller feil i modellene. Et annet råd er å idealisere noen komponenter for å lette utgaven av datafilen og forenkle analysen av simuleringsresultatene. I tillegg vil en veldig detaljert systemmodell kreve lengre simuleringstider [24]. Komponentene i anlegget kan enkelt representeres med å bruke for eksempel EMTP programmet sine innebygget modeller eller blokker i simuleringsverktøyet [23]. I noen tilfeller vil kraftberedskapsforeskriften og energiloven bli brutt dersom for mye informasjon fra anlegget blir gitt i rapporten [15] [13]. På bakgrunn av disse punktene benyttes bare enkle blokker i pakken Simscape Electrical Specialized Power Systems tilhørende MATLAB Simulink. Figur 3.1 viser komplett figur av den oppbygget modellen som simuleringene tar utgangspunkt i. Videre blir hver hovedkomponent forklart mer i detalj.



Figur 3.1: Simulink modellen bygget med standard Simscape Electrical - Specialized Power Systems blokker. Modellen er modellert for å kunne gjenspeile transienter som oppstår når en transformator spenningssettes uten last.

### 3.2.1 Kilde - forsyning fra nettet

Forsyningen oppstrøms fra effektbryter kan være kompleks og har mange ledd [41] [28] [10]. Derfor gjøres det simplifiseringer som letter komputeringspresessen og tar hensyn til begrensningen av data. En komplett modell av forsyningsnettet fører til tidskonsumerende simuleringer, samtidig som tallene i virkeligheten vil kunne oppdatere seg med nettverkskonfigurasjonen som stadig endrer seg med inn- og utkoblinger av laster. Siden det eksterne nettverket antas til å være linjert og generatoren antas til å ikke være umiddelbar nær den eksterne kretsen, kan ekvivalenten representeres med kraftfrekvensen på  $f = 50$  Hz i spenningskilden, som unngår mekanisk lavfrekvent transienter i modellen [5]. Rapporten til Eivind Jensvoll [22] inneholder data fra et forhåndsliggende nett til et spesifikt vannkraftverk. Disse dataene gjøres simplifiseringer av og benyttes i kildeblokken som skal representere forhåndsliggende nett. Kildeblokken basert på dataene fra [22], gir:

- Kildespenning  $V_{Base} = 420$  kV.
- Kortslutningsytelse  $S_k = 7300$  MVA.
- Kortslutningsstrøm  $I_k = 11,75$  kA.
- Thevenin-impedans  $Z_{Th} = 2,21 + 17,07j \Omega = 17,21 \angle 82,62^\circ \Omega$ .
- $X/R$  forhold = 7,7.

Kortslutnings-impedansmetoden er i prinsippet Thevenin ekvivalenten til det tilkoblede systemet.  $X$  til  $R$  forholdsverdien velges for å representere dempningen, vanligvis er dempningsvinkelen  $75-85^\circ$  [5]. Dette vinkelestimatet fra [5] stemmer overens med data i [22] til forhåndsliggende nett. Det legges inn en  $120^\circ$  faseforskyvning  $\phi$  mellom fasene. Det neste leddet etter forsyningen av forhåndsliggende nett er effektbryteren.

### 3.2.2 Effektbryter

Effektbryterblokken som skal representere effektbryteren i anlegget, kan ikke ta hensyn til alle indre og ytre parameterene som er diskutert i delkapittel 2.6 om effektbryter. Effektbryterblokken i modellen er uten tidsvariasjoner og  $RDDS$ , noe som kan gjøre at tilfellene blir så spesifikke som mulig til innkoblingstilfellene. Ideelle effektbrytere kan benyttes i følge denne referansen: [10] for transientstudier på transformator uten last. Dette gjør forløpet til innkoblingstidspunktet spesifikt og fenomenene ved det eksakte tidspunktet eller lukkevinkelen blir tydeliggjort. I virkeligheten beregnes innkoblingsøyeblikket ved bruk av faktorene som spilles inn som er forklart i delkapittel 2.6, formel 2.25 og 2.26. Ved bruk av faktorene kan forløpet fra simuleringen til en grad gjenkonstrueres i virkeligheten når tidsberegningen hører sammen med simuleringstidsberegningen og sammen med vedlegg B. Effektbryteren i modellen benytter ikke snubbermotstand, hverken resistivt eller kapasitivt, men effektbryteren har en iboende motstand på  $0,001 \Omega$ . Effektbryterblokken er innstilt med verdiene som er anbefalt av MATLAB for å simulere transienter i Specialized Power Systems blokkene [40]. I simuleringsforløpet står effektbryteren i åpen posisjon inntil 20 ms har passert, da vil fase-a kobles inn. Perioden  $T$  på 20ms blir benyttet

som kommando tid fra vernene til effektbryteren, grunnet da har sinusbølgen til fase-a passert en periode på grunn av nettfrekvensen  $f$  på 50 Hz, som diskutert i delkapittel 2.1.2. Da vil fase-a alltid passere null når forsyningen  $\varphi$  har en faseforskyvning på null elektriske grader. Dersom forsyningen settes til en faseforskyvning på  $90^\circ$ , tilsvarer det at fase-a brytes i samme vinkel ved denne konfigurasjonen. På denne måten har skriptet som blir skrevet i MATLAB, kontroll på hvilken lukkevinkel effektbryterne spenningssetter transformatoren.

Som diskutert i delkapittel 2.9 om kontrollert innkobling, er noen av premissene for metodene bruk av IPO (Independent Pole Operation). Derfor er effektbryterne i modellen satt opp i en IPO konfigurasjon. Metoden RCS (Rapid closing strategy), DCS (Delayed closing strategy) og spenningstopp metden utfører første innkoblingsinstans ved å lukke en effektbryter først. Basert på dette blir simuleringene og målingene fra simuleringene bare foretatt i fase-a når parameterene isolert simuleres, og forutsetter at påfølgende faser i virkeligheten spenningssettes optimalt fra den første innkoblingsinstansen. CIGRE benytter også studier som undersøker bare en fase, siden de to resterende fasene har enten lik eller lavere verdier i verste spenningssettingstilfelle [9]. Dette kan også lette analysen når tidene og vinkelen til de to resterende fasene ikke tas med i kalkuleringene og det visuelle materiale. Dette kan gjøre at hver parameter kan demonstrere sin innvirkning ved første instans. Etter effektbryteren kommer kabelen som er linken mellom effektbryterne og transformatoren.

### 3.2.3 Kabel

Kabler har flere ulike parametere og kabellengden er en av parameterene som kan ha innvirkning på transientene [28] [18]. Den valgte kraftkabelen som kabelblokken skal representere, er en XLPE landkabel. Denne kabelen har et  $630 \text{ mm}^2$  aluminium ledertverrsnitt, og baserer seg på databladet [2]. Kabelen fra databladet oppfyller kravene i blant annet IEC 60228 Ledere av isolerte kabler. Kabeltypen er av samme type som er installert i et gitt produksjonsanlegg i referanse: [22], og på bakgrunn av dette, er samme kabeltype og tverrsnitt valgt. Kabel [2] fra ABB, blir brukt i modellen med sine tilhørende parametere. Nullsekvens parameterene er generert fra simulink powergui RLC Line Parameter kalkulator. Cigre C4 502 WG indikerer at de viktigste parameterene til kabelen for simuleringen er lederradiusen, perimitiviteten og tykkelsen av hovedisolasjonslaget til kabelen. Lederresistiviteten, skjermtykkelsen og resistiviteten, indre halvlederlag og jord resistivitetslag har mindre påvirkning av nøyaktigheten til modellen når det gjelder lavfrekvens domentet, som er kategorien transformator spenningssettingsstudier går under [5]. Ideelt skal modellen som blir brukt, være frekvensavhengig og benytte distribuerte parametere. Dette kan gi en mer realistisk fremstilling og tar for seg noen problemstilligne som blir presentert i delkapittel 2.4 og 2.5.1. Dette er i trå med anbefalingen til Cigre WG C4.307 [5] for modell av kabel i transformator spenningssettingsstudier i studeringssonen. Desverre krever den frekvensavhengige blokken i MATLAB Simulink mye større forsinket minne-budsjett av datamaskinen. Så stort at simuleringen har tilnærmet ingen fremdrift og kan ikke benyttes for å gi resultater, spesielt ikke når det er planlagt å simulere flere tusen simuleringer. Derfor blir ikke frekvensavhengig kabelmodell brukt. Alternativt,

brukes kabelmodellen med distribuerte parametere som benytter Bergeron's metode, og tar i bruk teorien som er beskrevet i delkapittel 2.4 om distribuerte parametere og vandrende bølger. Kabelen fra datablad [2] har følgende parametere med den gitte kabelen:

- Kapasitans  $C_{kabel} = 0,13 \frac{\mu F}{km}$ .
- Induktans  $L_{kabel} = 0,60 \frac{mH}{km}$  (Ved flat formasjon).
- Resistans  $R_{kabel} = 0,0469 \frac{\Omega}{kM}$  (Ved 20°C).
- Lederdiameter = 29,8 mm.

Kabelblokken i simuleringmodellen benytter elektriske data fremfor geometriske data. Dette er på grunn av manglende verdier fra datablad som skulle kunne gi den nødvendige informasjonen programmet trengte for å utregne de elektriske parametrene basert på de geometriske. Databladets elektriske data, kunne være en løsning på problemet som er gjennomførbar og blir derfor benyttet [28]. Etter kabelen kommer transformatoren.

### 3.2.4 Transformator

Hovedkomponenten i studeringssonene er transformatoren som presenteres med en transformatorblokk fra Specialized Power Systems pakken. En transformator som skal spenningsettes i studeringssonen, må være i tilstrekkelig detalj, fordi transformatoren genererer innkoblingsstrømmene som blant annet er primær kilden av strømharmoner som dyttes inn i systemet. De viktigste aspektene i stigende rekkefølge ved studering av transformatorspenningsetting er: [5]

- Lekkimpedans og viklingresistans.
- Ikke linjer metning og tap i kjernen.
- Luftgapinduktansen.
- Magnetisk fasekobling.
- Gjenværende fluks.
- Frekvensavhengig tap i viklingene.
- Impedansen i nullsekvensen.
- Hysterese og frekvensavhengig kjernetap.
- Kapasitanser.

Kapasitansene er nederst på listen i de viktigste parametrene for å studere transformatorspenningsettinger, som betyr at kapasitansene er mindre viktige for transformatorspenningsettingstudier. Det kan kanskje være en ulempe med å implementere kapasitansene siden induktive og kapasitive kretser har ulike optimale lukkevinkler,

Tabell 3.1: Transformatordata fra en testrapport for en eksisterende generatortransformator i et eksisterende vannkraftverk [22].

Hoveddata	[kV]	[MVA]	[kA]	Kobling
HS	420	260	0,357	YN
LS	16	260	9,382	d11
Åpen kretstest	$E_0$ [%]	[MVA]	$I_0$ [%]	$P_0$ [kW]
LS	90	260	0,035	76,70
LS	100	260	0,044	99,77
LS	110	260	0,096	110,00
Kortslutningstest	[kV]	[MVA]	$ek$ [%]	$P_k$ [kW]
HS/LS	420/16	260	12,20	460,55

samt at det kanskje kan gjøre at null innkoblingsstrøm ikke kan oppnås i simuleringene. Disse verdiene er likeveilt valgt å ta med i modellen, på grunn av at stabiliteten i modellen øker. Oppsettet av kapasitansene er vist i figur 3.2. De blanke feltene i midten av figuren skal representere transformatorterminalene på primær og sekundærside. De valgte kapasitansene er hentet fra en generatortransformator i et eksisterende vannkraftverk og de andre viktigste parameterene vises i tabell 3.1. Desverre er det ikke tilstrekkelige standarder for å determinere alle parametre i ikke linjære transformatorer, enkelte parametre kan ikke anskaffes fra vanlige transformortester alene [23]. Transformatormodellen i rapporten, tar utgangspunkt i data fra en testrapport av en eksisterende transformator i et produksjonsanlegg. Transformatoren har en ytelse på 260 MVA og spenningsforhold på 420/16 kV. Kjernen er en fembent-kjerne med YNd11 kobling. De geometriske målene til transformatorkjernen er ikke blitt tilgjengeliggjort, derfor benyttes ikke transformatorblokk som baserer seg på de geometriske størrelsene. Den brukte transformatorblokken baserer seg på fembentstrukturen til kjernen og YNd11 koblingsstrukturen til transformatoren. Den gjenværende fluksen i kjernen settes til null for å få en fast referanse til fluksen. Kapasitansmålingene per fase til transformatoren er hentet fra transformatorenstestrappport og har følgende verdier:

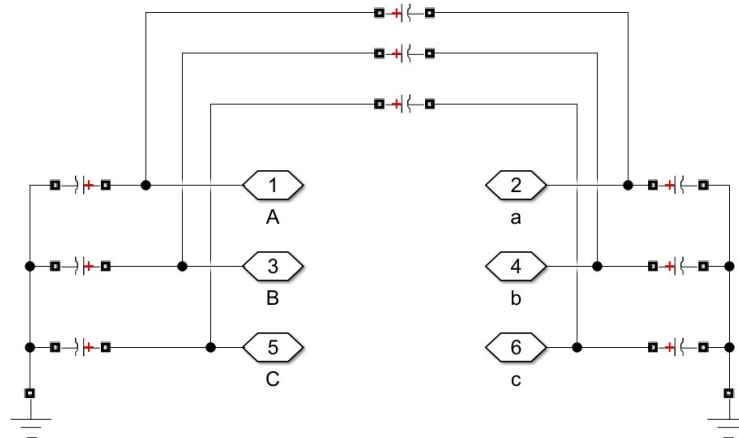
- Primær side: 2,139 nF.
- Sekundær side: 6,595 nF.
- Primær - Sekundær: 2,218 nF.

Ut fra data fra det eksisterende anlegget, kan viktige parametre som skal brukes i transformatorblokken beregnes. Utrekningene omformes til per unit verdier. Utrekningene baserer seg på formler fra [32], [10], [25] og [36]:

$$Z_{base} = \frac{V_{base}^2}{S_{base}} = \frac{420^2 kV}{260 MVA} = 678,462 \Omega \quad (3.1)$$

$$ex = \sqrt{ek^2 - er^2} = \sqrt{12,12^2 - 0,2^2} = 12,118\% \quad (3.2)$$

$$R1_{pu} = R2_{pu} = \frac{\frac{er}{100} \frac{V_{base}^2}{S_{base}}}{Z_{base}} \frac{1}{2} = \frac{0,2}{100} \frac{420^2 kV}{260 MVA} \frac{1}{2} = 0,001 pu \quad (3.3)$$



Figur 3.2: Transformorkapasitansnettverk. Transformatorblokken i MATLAB Simulink har ikke innebygget kapasitanser, derfor er dette kapasitansnettverket bygget for å implementere kapasitansene til transformatoren i modellen.

$$L1_{pu} = L2_{pu} = \frac{\frac{ex}{100} \frac{V_{base}^2}{S_{base}}}{Z_{base}} \frac{1}{2} = \frac{\frac{12,118}{100} \frac{420^2 kV}{260 MVA}}{678,462} \frac{1}{2} = 0,060 pu \quad (3.4)$$

$$Rm_{pu} = \frac{\frac{V_{base}^2}{P_0}}{Z_{base}} = \frac{\frac{420^2 kV}{98 kV}}{678,462} = 2652,067 pu \quad (3.5)$$

Transformormodellen [39] som benyttes inkluderer lekkimpedans og viklingresistans, ikke linjer metning, tap i kjernen, magnetisk fasekobling, gjenværende fluks, hysteres og kapasitanser. Dette er noen av punktene som er anbefalt å implementere ved transformatorspenningssettings simuleringer [24] [5]. Det er ikke tilkoblet last på transformatorens sekundærside for å simulere transformatorinnkoblinger uten last. Transformatorblokken gir ikke mulighet for å styre metningen og hysteresen på samme måte som de andre parameterene i modellen. Dette gjør at skriptet i MATLAB ikke kan ta for seg kontrollen over de to parameterene. Disse verdiene til de to parameterene blir satt som forhåndsinnstilt verdi av Simulink. De utvalgte parameterene i hele modellen som kan styres og hvordan disse blir styrt, blir nå forklart i neste delkapittel.

### 3.3 Styring av modell

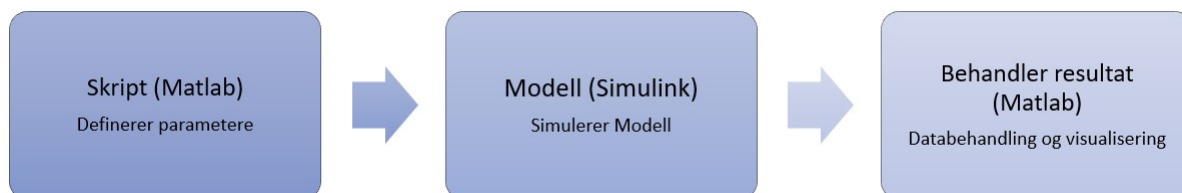
Modellen simuleres gjennom et skript skrevet i MATLAB. Gjennom standard for-loop programmering, blir simuleringen av modellen med blokkene kjørt i loop samtidig som studeringsparameterene endres gradvis for hver simuleringrunde. De utvalgte parameterene fra modellen som er bygget og effektivt kan simuleres, presenteres i tabell 3.2.

Den anbefalte solverkonfigurasjonen til Simulink ved simuleringer av transienter, er ode23tb i et kontinuerlige domene [40]. Kildeblokken styrer lukkevinkelen til effektbryteren. Dette gjøres med å endre faseforskyvningen  $\varphi$  til den syntetiserte sinusbølgen fra kildeblokken. Faseforskyvningen tilsvarer da lukkevinkelen til effektbryteren, siden effektbryteren alltid lukkes etter en periode  $T$  på 20 ms i skriptet.

Tabell 3.2: Utvalgte parametere fra modellen som skal forskes på for å finne deres innvirkning på koblingsspenninger og innkoblingsstrømmer ved spenningssetting av transformator uten last.

Parameter	Kommentar
Lukkevinkel	Til effektbryteren
Kabellengde	Mellom effektbryter og transformator
Kortslutningsytelse	Fra kilden
$X$ til $R$ forhold	I Kilden
Viklingsresistans	I transformatoren
Viklingsresistansfordeling	Mellom primær og sekundærside
Viklingsreaktans (Lekkreaktans)	I transformatoren
Viklingsreaktansfordeling	Mellom primær og sekundærside
Magnetiseringsresistans	I transformatoren
Gjenværende fluks	I transformator kjernen
Transformatorytelse	Til transformatoren
Kjernetype	I transformatoren
Koblingskonfigurasjoner	I transformatoren
DCS (Delayed Closing Strategy)	Med null gjenværende fluks i kjernen. Utgjør en kombinasjon av DCS og spenningstoppmetoden som ikke benytter fluksmåling

Ved lukkevinkler lavere enn  $-125$  grader og lukkevinkler høyere enn  $125$  positive grader, klarer ikke solveren å beregne resultatene fra modellene. Derfor forholder simuleringene seg til lukkevinkler mellom  $-125$  til  $125$  eklektiske grader. Målingene av strøm og spenning blir foretatt på transformatorens primærside terminaler. Målingene måles i fase-fase verdier og konverteres til pu verdier. Resultatverdiene samles og sendes tilbake til MATLAB, som skal behandle og sortere dataresultatene og generere linjediagram av resultatene. Figur 3.3 viser en grafisk fremstilling av metoden. En lignende fremgangsmåte for kabellengde alene er benyttet i andre studier [18] og er ikke en ny metode, men den valgte metoden gir et bredt bilde for et større antall parametere. Simuleringer og databehandlingen blir hovedtema i kapittel 4.



Figur 3.3: En beskrivelse av metoden og styringen av Simulink modellen som skal foreta spenningssetting av transformator uten last.

### 3.4 Sammendrag

I dette kapittelet blir det bygget en modell som skal simulere innkoblingsstrømmer og koblingsspenninger ved en transformator uten last som spenningssettes. Dette i håp om

å avdekke hva som skaper høye transienter som reduserer levetiden på komponenter og leveringskvaliteten. Simuleringsverktøyet som brukes er MATLAB Simulink, og benytter blokker fra Simscape Specialized Power Systems. Modellen beskrives i komponentenes rekkefølge fra venstre til høyre. Verdiene som blir gitt til blokkene, baserer seg på gitte verdier fra et eksisterende vannkraftverk. Kilden representerer det som kan bli levert av ytelse oppstrøms med spenning, kortslutningsytelse og forholdet mellom induktans og resistans i forhåndsliggende nett. Effektbryteren er representert med tre ideelle effektbryterblokker som er innstilt med verdier som er anbefalt av MATLAB for å simulere transienter i Simulink. Kabelen er modellert etter data fra leverandøren ABB i XLPE landkabelkatalog. Kabelblokken benytter distribuerte parametere med tilhørende elektriske data fra katalogen. Transformatoren er hovedkomponenten i studeringssonen, og der blir innkoblingsstrømmen generert. Transformatoren er en 420/16 kV YNd11 transformator med ytelse 260 MVA. Den komplette modellen styres via et skript i MATLAB som kjører simuleringen i en loop som samtidig endrer studeringsparameterene gradvis. Hver simulering loggføres og skal videre databehandles for å finne resultatene til utvalgte parametere. Utføringen og resultatene fra simuleringene blir tema i neste kapittel.



# Kapittel 4

## Resultat

Dette kapitlet skal presentere resultatene fra de systematiserte simuleringene med modellen bygget i kapittel 3. Dette vil si en transformator uten last spenningssettes med utvalgte parametere fra tabell 3.2 og bruk av kontrollert lukking. MATLAB skriptet er laget slik at Simulink modellen skal utføre systematiserte simuleringer, som tar for seg ulike simuleringstilfeller og parametere. Simuleringsresultatene i figurene og grafene skal vise hva de utvalgte parameterene og PoW (Point on Wave) resulterer til, i form av innkoblingsstrømmer og koblingsspenninger. Høye verdier av disse transientene kan føre til redusert levetid på transformatorer og redusert leveringskvalitet som diskutert i kapittel 1. Resultatene kan være med på å avdekke hvilke parameter og parametertrender som fører til disse transientene. Til slutt blir det gitt en oppsummering av kapitlet.

### 4.1 Simuleringstilfeller

En rekke parametere skal simuleres. For å se deres påvirkning i et gunstig og ugunstig innkoblingsøyeblikk, velges lukkevinkel 0 og 90° som et utgangspunkt med bakgrunnen av teorien i kapittel 2. Dette er fordi en enfaset transformator uten last kobles ideelt inn når spenningsbølgen er på topp som vil si at fluksen er på sin bunn. Samtidig er det ugunstige innkoblingsøyeblikket når spenningsbølgen krysser null. Dette er med tanke på innkoblingsstrøm, som diskutert i kapittel 2.

Parameterene som skal simuleres, kan deles inn i fire ulike deler. En del tar for seg lukkevinkler, kabellengde og den samlede innvirkningen av lukkevinkel og kabellengde. Den andre delen tar for seg parameterene fra forhåndsliggende nett. Den tredje delen tar for seg parameterene tilhørende transformatoren. Den siste delen simulerer en form for DCS (Delayed Closing Strategy), som i essensen er ulike lukkevinkler for ulike faser. Simuleringene endrer bare en og en parameter og holder de andre parametere konstant forutenom figur 4.7 og simuleringene til DCS som begge har tre akser. Dette er for å isolere virkningen av parameteret alene, som diskutert i delkapittel 3.3

Simuleringstilfellene som skal bli presentert, har til felles at resultatene viser verdiene for fase-a alene bortsett fra ved bruk av koblingsstrategien DCS. Lukkingen av fase-a har en innvirkning på fase-b og c, grunnet den magnetiske koblingen i transformatoren,

Tabell 4.1: Simuleringstilfeller og studeringsparametere som systematisk skal utføres for å se innvirkningen av hvert parametere, når en transformator uten last spenningssettes i ulike tilfeller. Det skal simuleres for 6 272 tilfeller som vist i tabellen, pluss ekstra simuleringer som ikke inngår i denne tabellen.

Studeringsparametere	Ekskludering	Scenario	Inkrementering	Simuleringer [stk]	Kommentar
Lukkevinkel	Kabel	-125-125°	-125:1:125°	251 × 4	Solver klarer ikke løse utregninger for andre vinkler.
Lukkevinkel med lang kabel	Ingen	-125-125°	-125:1:125°	251 × 2	Solver klarer ikke løse utregninger for andre vinkler
Kabellengde 2 km	Ingen	0- og 90°	0,01:0,01:2,00 [km]	200 × 2	
Kabellengde 10 km	Ingen	0- og 90°	0,1:0,1:10 [km]	100 × 2	
Lukkevinkel og kabellengde samlet	Kabel	-10-100°	Kilde: -10:10:100° Kabel: 1:1:12 [km]	12 <sup>2</sup> × 2	For i en for loop
Kortslutningsytelse	Kabel	0- og 90°	50:50:10 000 [MW]	200 × 2	
X/R forhold	Kabel	0- og 90°	0,1:0,1:20,0 [forhold]	201 × 2	
R i viklinger	Kabel	0- og 90°	0,0001:0,0004:0,1201 [R pu]	301 × 2	
R N1/N2 fordeling	Kabel	0- og 90°	0,01% av 0,001 [R pu]	100 × 2	for n=1: simRunder R1_pu=R*Ratio(n); R2_pu=R*(1-Ratio(n)); end
X i viklinger	Kabel	0- og 90°	0,0001:0,001:0,3001 [X pu]	301 × 2	
X N1/N2 fordeling	Kabel	0- og 90°	0,01% av 0,06 [X pu]	100 × 2	for n=1: simRunder L1_pu=L*Ratio(n); L2_pu=L*(1-Ratio(n)); end
R <sub>m</sub> i trafo	Kabel	0- og 90°	10:20:4010 [R <sub>m</sub> pu]	201 × 2	
Gjenværende fluks	Kabel	0- og 90°	-1,0:0,1:1,0 [pu]	21 × 2 × 3	Hver fase simuleres og settes til 0 pu når fasen ikke simuleres for
Transformatorytelse	Kabel	0- og 90°	0,5:6,0:1200,5 [MVA]	201 × 4	
Elektromagnetiske kjernekoblinger og konfigurasjoner	Kabel	0°	Koblingstyper og kjernetyper	16 + 3	Manuelle simuleringer
DCS (Delayed Closing Strategy)	Kabel	0-360°	Ta: 0:2:20 [ms] Delay: 0:2:20 [ms]	11 <sup>2</sup>	For i en for loop

som diskutert i delkapittel 2.7. Begrensningen er gjort for å begrense analysen til kontrollert lukking av en fase, da fase-a simuleres til å være den første fasen som lukkes i dette simuleringssammenheng. Som diskutert i delkapittel 3.2.2, er verdiene i de to resterende fasene enten lik eller lavere i de verste spenningssettingstilfellene [9]. Simuleringstilfellene med tilhørende studeringsparametere vises i tabell 4.1 og presenteres i de kommende delkapitlene. I alle simuleringstilfeller blir transformatoren spenningsatt uten last.

### Per unit- og resultatverdier

Resultatene fra simuleringene er omgjort til per unit verdier med forkortelsen pu. Baseverdiene som ligger til grunn er; kildepenningen og den nominelle strømmen referert til transformatorens primærside. Målingene av strøm og spenning blir foretatt på transformatorterminalene på transformatorens primærside, og prosessert som forklart i delkapittel 3.3. Lukking av effektbryter blir foretatt etter en periode  $T$  på 20 ms. Dette gjøres på bagrunn av det som blir forklart i delkapittel 2.1.2, 3.2.2 og 3.3. Simuleringslengden er på 300 ms, og målingene som blir foretatt, registreres i tidsintervallet 0-300 ms for hver simulering. Forutenom figur 4.3 som har en simuleringslengde på fire sekunder og DCS strategien som har en simuleringslengde på 100 ms. Tidene som er nevnt nå er den interne tiden til systemet i modellen. Tiden det

tar å simulere hvert tilfelle er mye lengre enn den interne tiden til systemet i programmet. Simuleringene kan ta flere minutter, og et simuleringstilfelle kan dermed vare opp til flere timer når parameterene skal inkrementeres noen hundre ganger for det utvalgte parameteret. Slik er modellen satt opp og klargjort for simuleringer.

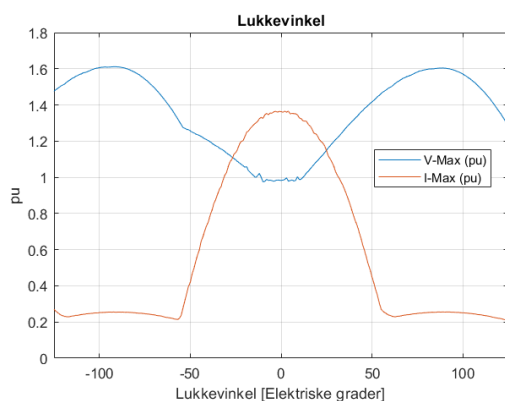
- 1 [V] pu = 420 kV
- 1 [I] pu = 357 A

## 4.2 Lukkevinkel og kabel

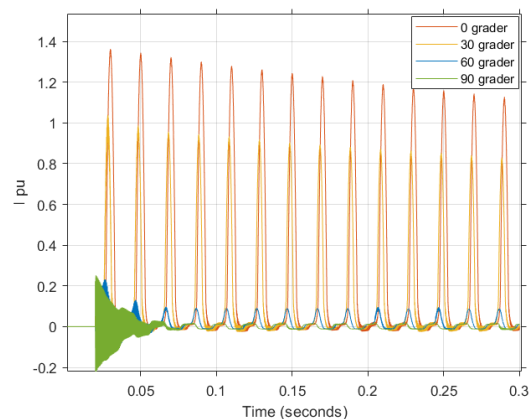
Det skal nå presenteres resultatene for hva parameterene lukkevinkel og kabellengde bidrar med i form av innkoblingsstrøm og koblingsspenninger. Først presenteres lukkevinkel.

### 4.2.1 Lukkevinkel til effektbryter

I dette simuleringstilfellet, skal påvirkningen alene av lukkevinkelen analyseres. Dette praktiseres med å la modellen beholde sine originalparametere foruten om lukkevinkelen fra kilden. Lukkevinkelen inkrementeres gradvis med en grad per simulering fra minus til pluss 125 grader, se figur 4.1a. Dette resulterer i 251 simuleringer for dette studeringsparameteret. I figur 4.1b vises innvirkningen lukkevinkelen har på fire ulike lukkevinkler. Kabelen er ikke en del av modellen i dette simuleringstilfellet, for å isolere effekten av strøm og spenningstransienter forårsaket av lukkevinkler alene.



(a) Maksverdier av strøm og spenning ved ulike lukkevinkler. Lukkevinkelen går fra  $-125$  til  $125^\circ$  med en oppløsning på  $1^\circ$ .

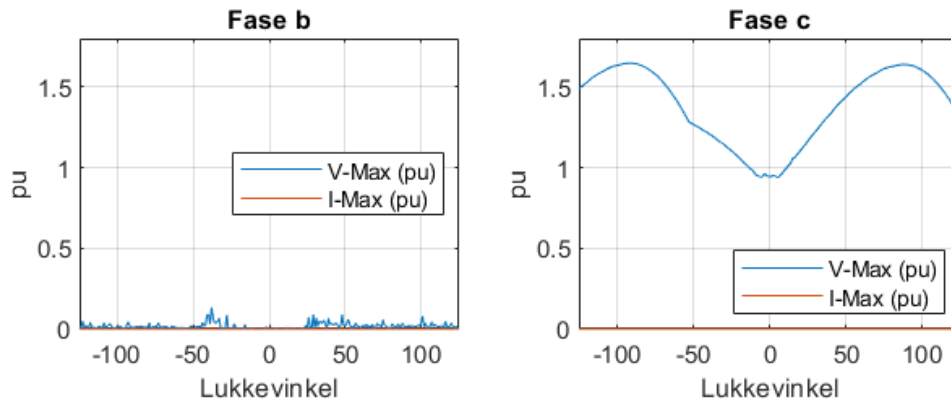


(b) Innkoblingsstrømmer ved utvalgte lukkevinkler.

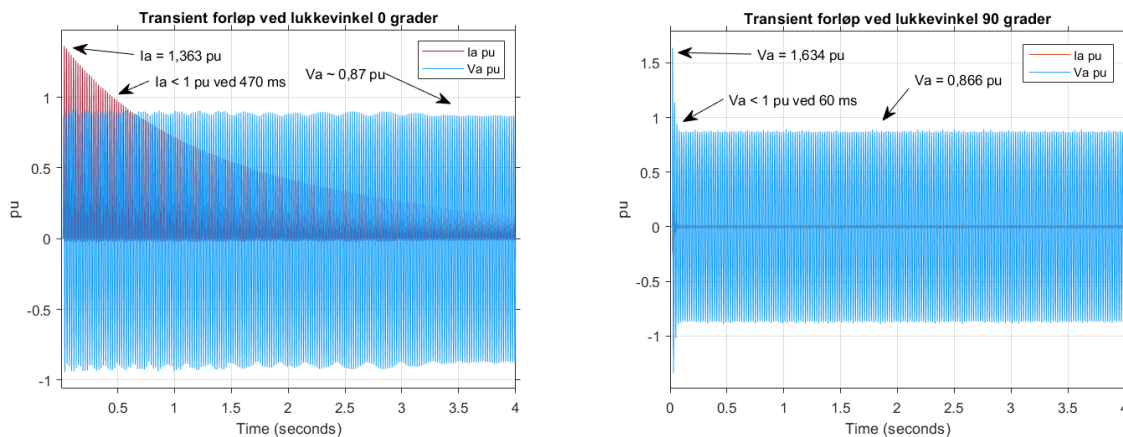
Figur 4.1: Figuren viser innvirkningen til lukkevinkelen når en transformator uten last spenningssettes. Verdiene er basert på lukking av fase-a og hentet fra en simuleringstid på 300 ms.

Det blir også foretatt simuleringer for å se strømmene og spenningene som genereres i fase-b og c når fase-a lukkes ved samme prosess. Simuleringene av dette blir vist i figur 4.2.

Videre simuleres det for lukkevinkel 0 og 90 grader, som vist i figur 4.3. Figuren viser resultatene fra modellen med sine originalparametere, og varigheten til simuleringen varer i fire sekunder.



Figur 4.2: Maksverdier av strøm og spenning ved ulike lukkevinkler generert i fase-b og c, ved lukking av fase-a mot en transformator uten last og hentet fra en simuleringsvarighet på 300 ms. Lukkevinkelen går fra  $-125$  til  $125^\circ$  med en oppløsning på  $1^\circ$ .



(a) Transientforløpet til strøm og spenning ved lukkevinkel 0 grader.

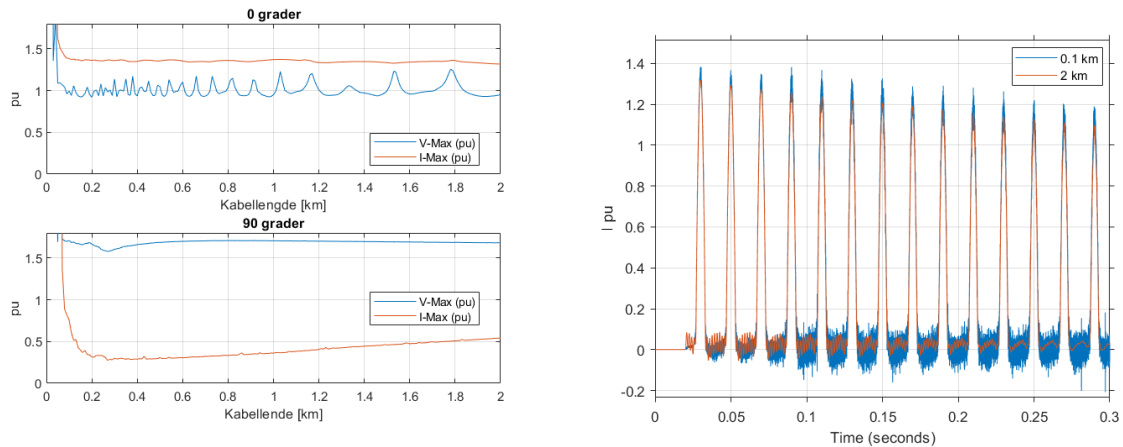
(b) Transientforløpet til strøm og spenning ved lukkevinkel 90 grader.

Figur 4.3: Figuren viser det transientforløpet til den simulerte transformatoren som spenningssettes uten last ved lukkevinklene 0 og 90 grader. Verdiene er basert på lukking av fase-a og hentet fra en simuleringsvarighet på 4 sekunder.

## 4.2.2 Kabellengde

Studeringsparameteret som skal presenteres nå er kabellengden. I figur 4.4a simuleres det for lengder i intervallet 0,01-2,00 km med 400 simuleringer. I figur 4.6a simuleres det for kabellengder i intervallet 0,1-10,0 km med 200 simuleringer. Simuleringene gjøres med lukkevinkel 0 og 90 grader, på grunn av teori i kapittel 2 og figur 4.1a viser dette er vinklene som gir omtrent høyest og lavest verdier for både strøm- og spenningstransienter. Figurene 4.4b og 4.6b viser innkoblingsstrømmene ved utvalgte kabellengder i simuleringsintervallet 0-300 ms ved lukkevinkel 0 grader.

Lukkevinkel 90 grader ser ut til å gi lave innkoblingsstrømmer, som vist i figur 4.1a. Ved å studere figur 4.4a, viser figuren at strømmen øker med kabellengden ved denne eksakte lukkevinkelen. For å se om trenden fortsatt stiger, ble det gjort en simulering med lengre kabellengde, vist i figur 4.6.



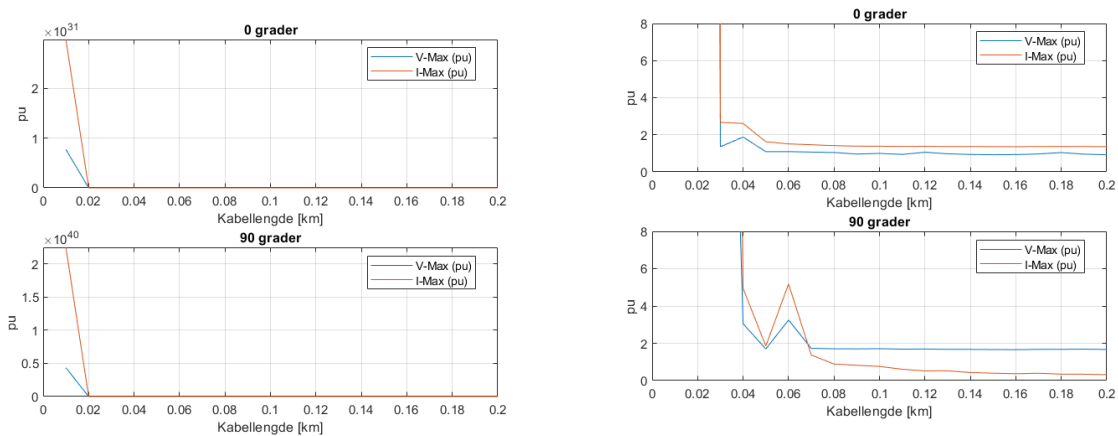
(a) Maksverdier av strøm og spenning i lukkevinkel  $0^\circ$  og  $90^\circ$  ved forsyningskabel på 0,01-2,00 km med en oppløsning på 0,01 km. (b) Innkoblingsstrømmer ved utvalgte forsyningskabel-lengder ved lukkevinkel  $0^\circ$ .

Figur 4.4: Innvirkningen av medium forsyningskabel lengde til en transformator som spenningssettes uten last via kablen. Verdiene er basert på lukking av fase-a og hentet fra en simuleringsvarighet på 300 ms.

### 4.2.3 Lukkevinkel og kabellengde samlet

For å se innvirkningen av både lukkevinkel og kabellengde samtidig, gjøres det en simulering som loopes i en dobbel for løkke i MATLAB. Først Simuleres alle vinklene for første kabellengde, så inkrementeres kabellengden med 1 km. Deretter simuleres alle vinklene for den nye kabellengden. Slik kjører simuleringen frem til siste kabellengdeinkrementering er gjort, og som stopper ved 12 km. Resultatene inneholder både x, y og koordinater der z-koordinaten representerer maksverdien. Dette settes inn i ett stem-plot som vis i figur 4.7.

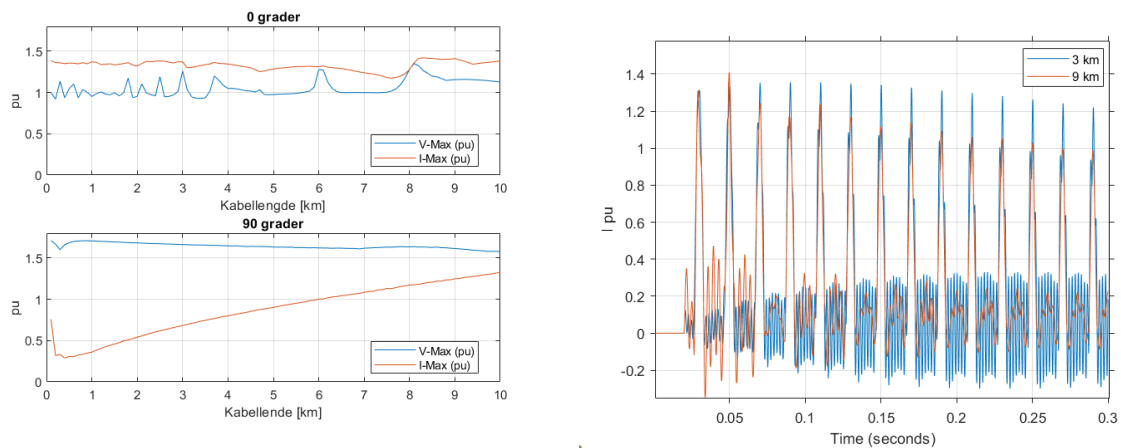
Spørsmålet om det finnes andre lukkevinkler enn 90 grader som genererer lave innkoblingsstrømmer kommer kanskje til syne i figur 4.7. For å visualisere dette bedre, gjøres det like simuleringer som i delkapittel 4.2.1, bare nå gjøres simuleringene med en kabel med lengde på 10 km som vist i figur 4.8.



(a) Maksverdier av strøm og spenning i lukkevinkel  $0^\circ$  og  $90^\circ$  ved kabellengde 0,01-0,20 km med en oppløsning på 0,01 km. Figuren er laget uten y-akse begrensninger for å se toppverdien i de korteste kabellengdene.

(b) Maksverdier av strøm og spenning i lukkevinkel  $0^\circ$  og  $90^\circ$  ved kabellengde 0,01-0,20 km med en oppløsning på 0,01 km. Figuren er laget med en y-akse begrensning på 8 pu for å kunne se verdiene av strøm og spenning lengre enn 0,02 km.

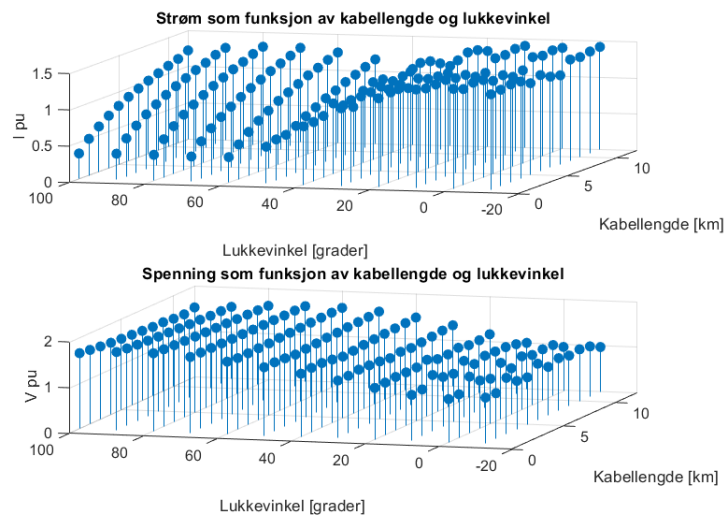
Figur 4.5: Innvirkningen av korte kabellengder og demonstrasjon av de visuelle plottet dersom y-aksen justeres etter outliers eller ekstremverdier. Verdiene er basert på lukking av fase-a og hentet fra en simuleringsvarighet på 300 ms.



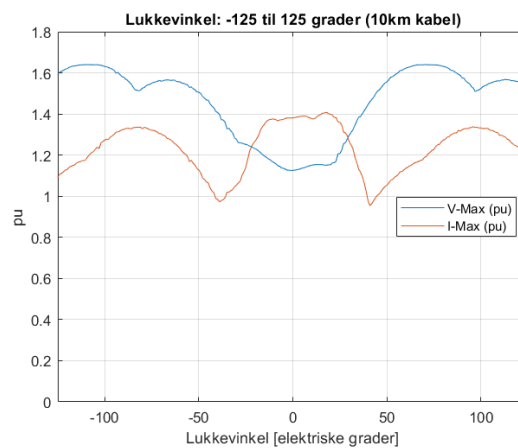
(a) Maksverdier av strøm og spenning i lukkevinkel  $0^\circ$  og  $90^\circ$  ved forsyningskabel på 0,1-10,0 km med en oppløsning på 0,1 km.

(b) Innkoblingsstrømmer ved utvalgte kabellengder ved lukkevinkel  $0^\circ$ .

Figur 4.6: Innvirkningen av lang forsyningskabellengde til en transformator som spenningssettes uten last via kabelen. Verdiene er basert på lukking av fase-a og hentet fra en simuleringsvarighet på 300 ms.



Figur 4.7: Maksverdier av strøm og spenning som funksjon av både lukkevinkel og kabellengde. Verdiene er basert på lukking av fase-a og hentet fra en simuleringsvarighet på 300 ms. Lukkevinkelen går fra  $-10^\circ$  til  $100^\circ$  med en oppløsning på  $10^\circ$ . Forsyningskabelen går fra 1-12 km og har en oppløsning på 1 km.



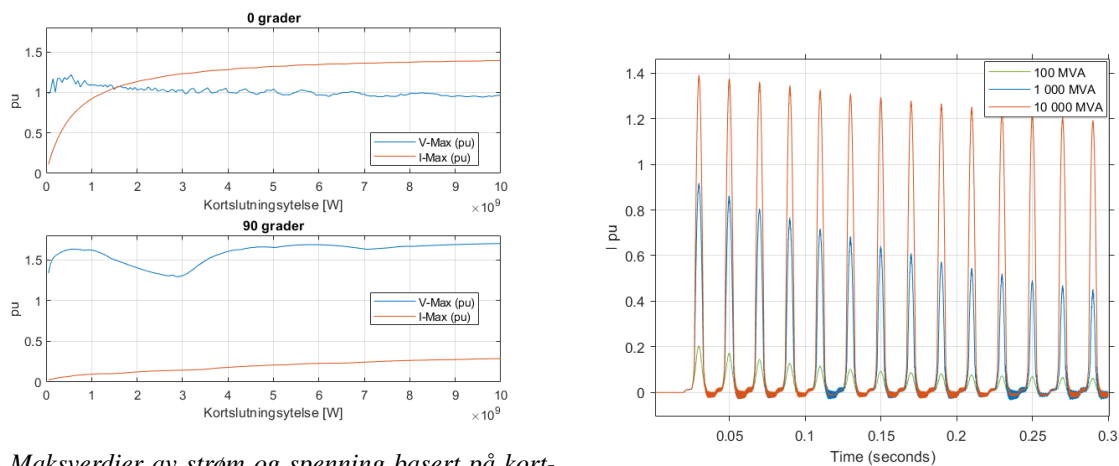
Figur 4.8: Maksverdier av strøm og spenning ved ulike lukkevinkler med en 10 km lang forsyningskabel til transformatoren som spenningssettes uten last. Verdiene er basert på lukking av fase-a og hentet fra en simuleringsvarighet på 300 ms. Lukkevinkelen går fra  $-125$  til  $125^\circ$  med en oppløsning på  $1^\circ$ .

## 4.3 Forhåndsliggende nett

Dette delkapittelet tar for seg hva parameterene i kildeblokken potensielt bidrar med endring av parameterene kortslutningsytelse og forholdet mellom  $X$  til  $R$  av forhåndsliggende nett.

### 4.3.1 Kortslutningsytelse fra kilden

I dette simuleringstilfellet som vist i figur 4.9, vises innflytelsen kortslutningsytelsen har på innkoblingsstrøm og koblingsspenninger. Intervallet i figur 4.9a er fra 50 MW til 10 000 MW med en inkrementering på 50 MW langs x-aksen. Dette resulterer i en oppløsning på 400 simuleringer i figuren eller 200 simuleringer per x-akse. Figur 4.9b viser innkoblingsstrømmen til tre ulike verdier av kortslutningsytelse.



(a) Maksverdier av strøm og spenning basert på kortslutningsytelse fra forhåndsliggende-nett ved lukkevinkel  $0^\circ$  og  $90^\circ$ . Kortslutningsytelsen går fra 50-10 000 MW og har en oppløsning på 50 MW.

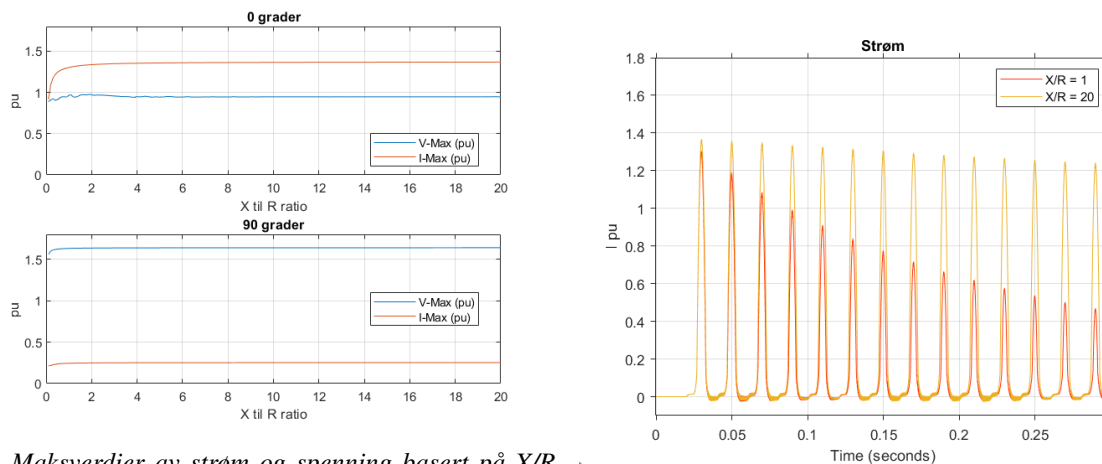
(b) Innkoblingsstrømmer ved utvalgte kortslutningsytelser ved lukkevinkel  $0^\circ$ .

Figur 4.9: Figuren viser innvirkningen av kortslutningsytelse fra forhåndsliggende nett når en transformator uten last spenningssettes. Verdiene er basert på lukking av fase-a og hentet fra en simuleringstid på 300 ms.



### 4.3.2 $X$ til $R$ forhold i kilden

Resultatet av forholdet mellom  $X$  og  $R$  i kilden vises i figur 4.10. Forholdstallet starter fra 0,1 til 20,0 i figur 4.10a, med en inkrementering på 0,1. Dette resulterer i 402 simuleringer. Figur 4.10b viser innkoblingsstrømmen i ytterpunktene til figur 4.10a. Dette i håp om å tydeliggjøre innflytelsen til verdien av  $X$  til  $R$  forholdet fra kilden, altså forholdet mellom reaktans og resistans i forhåndsliggende nett.



(a) Maksverdier av strøm og spenning basert på  $X/R$  forholdet fra forhåndsliggende nett ved lukkevinkel  $0^\circ$  og  $90^\circ$ .  $X/R$  forholdsverdien går fra 0,1-20,0 og har en oppløsning på 0,1. (b) Innkoblingsstrømmer ved utvalgte  $X/R$  forholdsverdier ved lukkevinkel  $0^\circ$ .

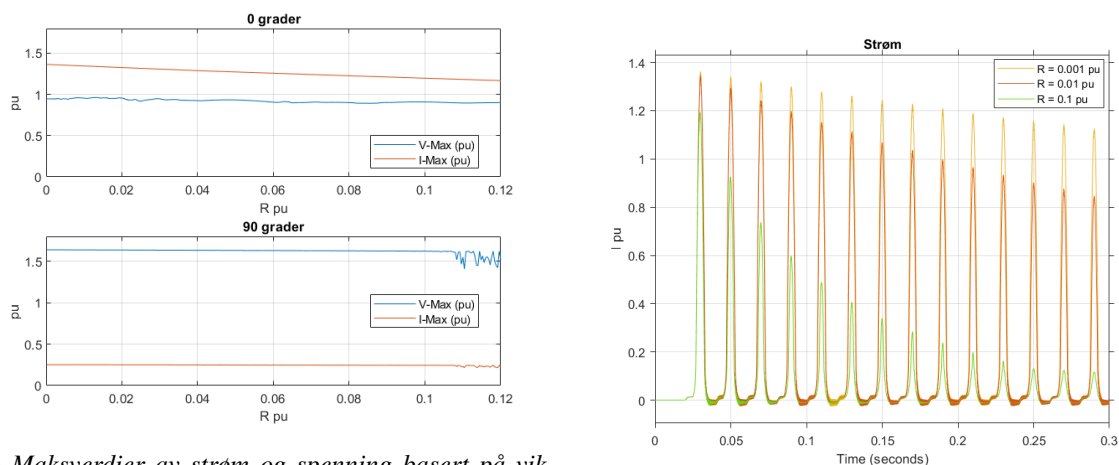
Figur 4.10: Figuren viser innvirkningen av  $X/R$  forholdsverdier fra forhåndsliggende nett når en transformator uten last spenningssettes. Verdiene er basert på lukking av fase-a og hentet fra en simuleringsvarighet på 300 ms.

## 4.4 Transformator

Det nest siste delkapittelet av studingsparametergruppen, tar for seg parameterene som tilhører transformatoren. Dette er parametere som resistans, reaktans, fordelingen av resistans- og reaktans mellom primær- og sekundærside, magnetiseringsresistans, gjenværende fluks, transformatorytelse, transformator kjerner og transformator koblinger.

### 4.4.1 Resistans i transformatorviklinger

Figur 4.11 baserer seg på at viklingsresistansen på primær og sekundærside endres, samtidig som det er en 50/50 % distribusjon av resistans mellom vikingene. Det gjøres 602 simuleringer i figur 4.11a, hvor resistansen går fra 0,0001 pu til 0,1201 pu med en inkrementering på 0,0004 pu. Det blir presentert innvirkningen av tre ulike ytterverdier av viklingresistans i figur 4.11b, med tilhørende innkoblingsstrømmer.



(a) Maksverdier av strøm og spenning basert på viklingsresistansen i transformatoren ved lukkevinkel  $0^\circ$  og  $90^\circ$ . Resistansen går fra 0,0001-0,1201 pu og har en oppløsning på 0,0004 pu.

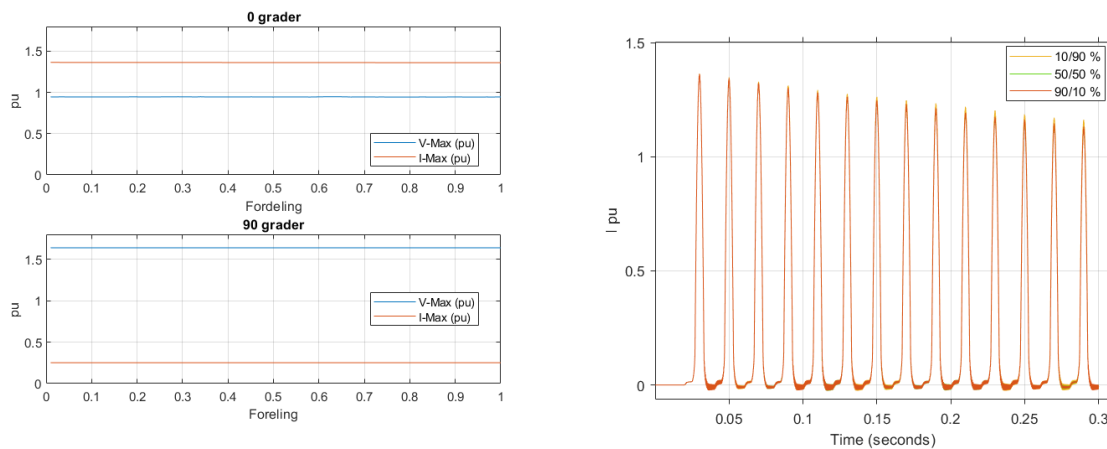
(b) Innkoblingsstrømmer ved utvalgte viklingsresistanser ved lukkevinkel  $0^\circ$ .

Figur 4.11: Figuren viser innvirkningen av viklingsresistans i transformatoren når en transformator uten last spenningssettes. Verdiene er basert på lukking av fase-a og hentet fra en simuleringsvarighet på 300 ms.

### 4.4.2 Resistansfordeling i primær og sekundærvikling

I dette simuleringstilfellet som vist i figur 4.12, fordeles den originale resistansen på 0,001 pu mellom sekundær og primærsiden. I utgangspunktet er andre simuleringer gjort med en fordeling på 50/50 %, med 0,001 pu resistans på hver side. Fremgangsmåten av simuleringen til figur 4.12a utføres med at ved første simulering er 1 % av 0,002 pu på primærside og 99 % av 0,002 pu på sekundærside. I neste simulering er 2 % av 0,002 pu på primærside, mens sekundærsiden har 98 % av 0,002 pu. Dette mønsteret følges frem til det er gjort 100 simuleringer på hver x-akse. Da har primærside 99 % av 0,002 pu og sekundærside har 1 % av 0,002 pu. Figur 4.12b viser innkoblingsstrømmen til tre tilfeller av resistansfordeling; et tilfelle med høy og lav verdi på primærside og

en 50/50 % fordeling. Eksempelvis vil avlest 0,3 på x-aksen tilsi at 30 % av resistansen er på primærsiden og 70 % på sekundærsiden på figur 4.12a.



(a) Maksverdier av strøm og spenning basert på viklingsresistansfordelingen mellom primær og sekundærsiden på transformatoren ved lukkevinkel  $0^\circ$  og  $90^\circ$ .

(b) Innkoblingsstrømmer ved utvalgte viklingsresistansfordelinger ved lukkevinkel  $0^\circ$ .

Figur 4.12: Figuren viser innvirkningen av viklingsresistansfordelingen mellom vikingene i transformatoren når en transformator uten last spenningssettes. Verdiene er basert på lukking av fase-a og hentet fra en simuleringsvarighet på 300 ms.

### 4.4.3 Reaktans i transformatorviklinger

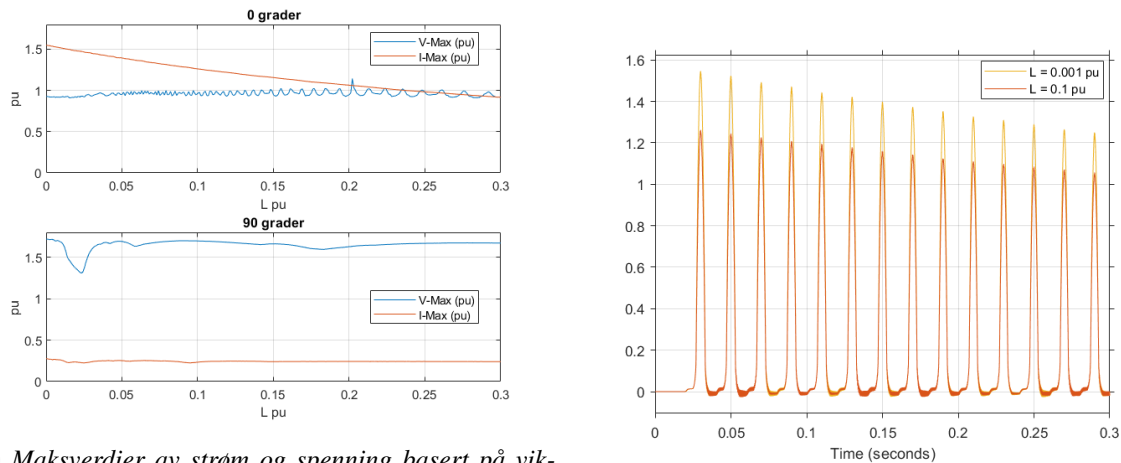
Simuleringstilfellet i figur 4.13 viser innvirkningen reaktansen i transformatorviklingene utgjør i et spenningssettingstilfelle med en transformator uten last. Figuren 4.13a starter med et intervall fra 0,0001- til 0,3001 pu med en inkrementering på 0,001 pu, som resulterer i 602 til figuren. Figur 4.13b innkoblingsstrømmen for en høy og lav viklingsreaktans.

### 4.4.4 Reaktansfordeling i primær og sekundærvikling

Reaktansfordelingen i figurene 4.14 følger samme prinsipp som forklart i delkapittel 4.4.2, bare at nå er reaktansfordelingen mellom vikingene studeringsparameteret. Figur 4.14a viser maksverdiene ved ulike fordelinger og figur 4.14b viser innkoblingsstrømmene ved utvalgte fordelinger.

### 4.4.5 Magnetiseringsresistans

I figur 4.15 blir det simulert for studeringsparameteret magnetiseringresistans. Figur 4.15a viser resultater til en magnetiseringsresistans fra 10- til 4010 pu med inkrementering på 20 pu. Dette resulterer i 402 simuleringer. Figur 4.15b viser innkoblingsstrømmen ved en høy og lav magnetiseringresistans.



(a) Maksverdier av strøm og spenning basert på viklingsreaktansen i transformatoren ved lukkevinkel  $0^\circ$  og  $90^\circ$ . Reaktansen går fra 0,0001-0,3001 pu og har en oppløsning på 0,001 pu. (b) Innkoblingsstrømmer ved utvalgte viklingsreaktanser ved lukkevinkel  $0^\circ$ .

Figur 4.13: Figuren viser innvirkningen av viklingsreaktans i transformatoren når en transformator uten last spenningssettes. Verdiene er basert på lukking av fase-a og hentet fra en simuleringsvarighet på 300 ms.

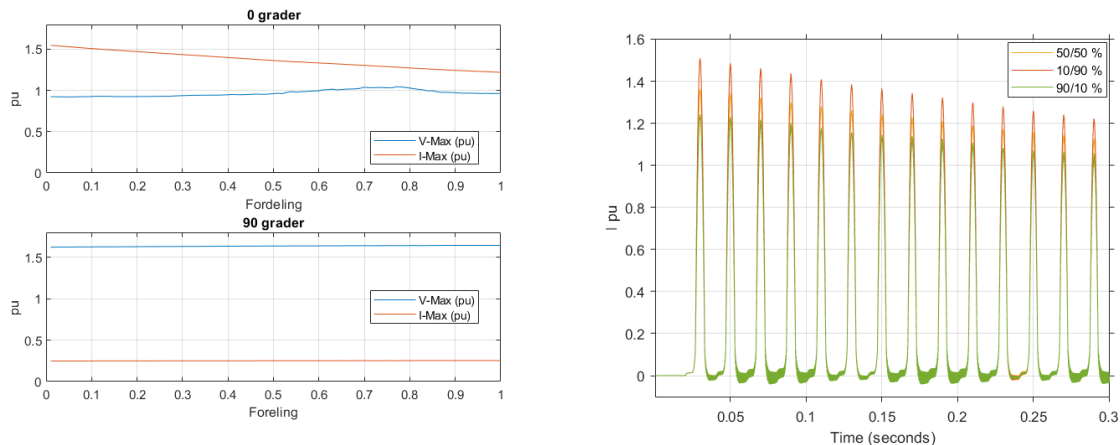
#### 4.4.6 Gjenværende fluks

Figuren 4.16 tar for seg simuleringene som simulerer den gjenværende fluksen i transformator kjernen ved to lukkevinkler. Hvor figur 4.16a viser resultatene ved  $0^\circ$  og 4.16b viser resultatene for  $90^\circ$ . Simuleringene blir utført med å endre pu verdiene til den første kjerne fasen fra -1,0 til 1,0 pu samtidig som de to resterende kjernefasene er gitt en fluks på 0,0 pu. Når den aktuelle fasen er ferdigsimulert, byttes inkrementeringen til neste fase og den forrige fasen settes til 0,0 pu i kjernen på transformatoren. Dette gjøres for å isolere resultatene for hver kjernefase.

#### 4.4.7 Transformatorytelse

Figurene i 4.17 viser transformatorytelsens resultater på maksimalverdi av strøm og spenning for modellen. Figur 4.17a viser resultater fra simuleringer som starter fra 0,5- til 1200,5 MVA med en inkrementering på 6,0 MVA, som resulterer i 402 simuleringer. Figur 4.17b viser innkoblingsstrømmene til tre forskjellige transformatorytelse ved lukkevinkel 0 grader. Resistansene og reaktansene beholder sine beregnede pu verdier, samtidig endrer baseverdien seg, grunnet baseverdien tar utgangspunkt i transformatorytelsen som vist i formel 3.1.

Figur 4.17 viser innkoblingsstrømmen og koblingsspenningene referert til transformatorytelsen 260 MVA. Figur 4.18 viser strømverdien referert til den simulerte transformatorytelsen som følger formelen  $I_{pu} = \frac{\text{Transformatorytelse}}{\sqrt{3} \times 420kV}$ .



(a) Maksverdier av strøm og spenning basert på viklingsreaktansfordelingen mellom primær og sekundærsiden på transformatoren ved lukkevinkel  $0^\circ$  og  $90^\circ$ .

(b) Innkoblingsstrømmer ved utvalgte viklingsreaktansfordelinger ved lukkevinkel  $0^\circ$ .

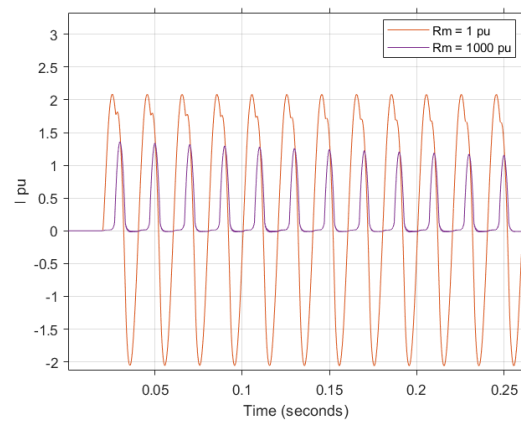
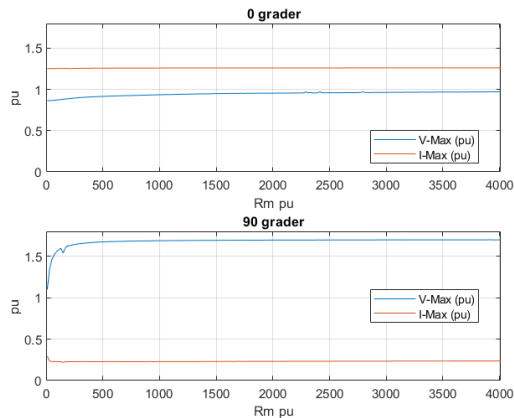
Figur 4.14: Figuren viser innvirkningen av viklingsreaktansfordelingen mellom viklingene i transformatoren når en transformator uten last spenningssettes. Verdiene er basert på lukking av fase-a og hentet fra en simuleringstid på 300 ms.

## 4.4.8 Transformator kjerner

Det neste studeringsparameteret er transformator kjerner. Figuren 4.19 viser resultatene fra tre ulike transformator kjernetyper; en-fase kjerne, tre-bent-kjerne og fembent-kjerne. Figur 4.19a viser maksverdiene til innkoblingsstrømmen og koblingsspennin-gene ved lukkevinkel  $0^\circ$  i form av et stolpediagram hvor hver av de tre stolpene representerer hver kjernetype.

## 4.4.9 Transformator koblinger

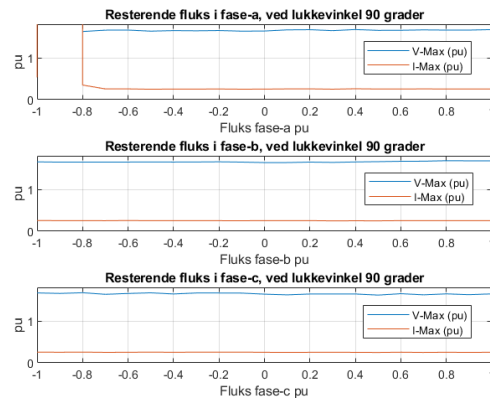
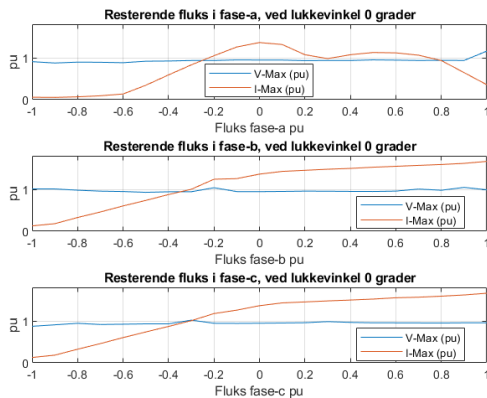
Transformatorblokken har fire mulige koblinger som utgjør 16 mulige kombinasjoner av koblinger på primær og sekundærsiden. Figur 4.20 viser de høyeste innkoblingstrømmer i nedre del og koblingsspenninger i øvre del ved lukking av fase-a ved  $0^\circ$ .



(a) Maksverdier av strøm og spenning basert på magnetiseringsresistansen i transformatoren ved lukkevinkel  $0^\circ$  og  $90^\circ$ . Magnetiseringsresistansen går fra 20-4010 pu og har en oppløsning på 20 pu.

(b) Innkoblingsstrømmer ved utvalgte magnetiseringsresistanser ved lukkevinkel  $0^\circ$ .

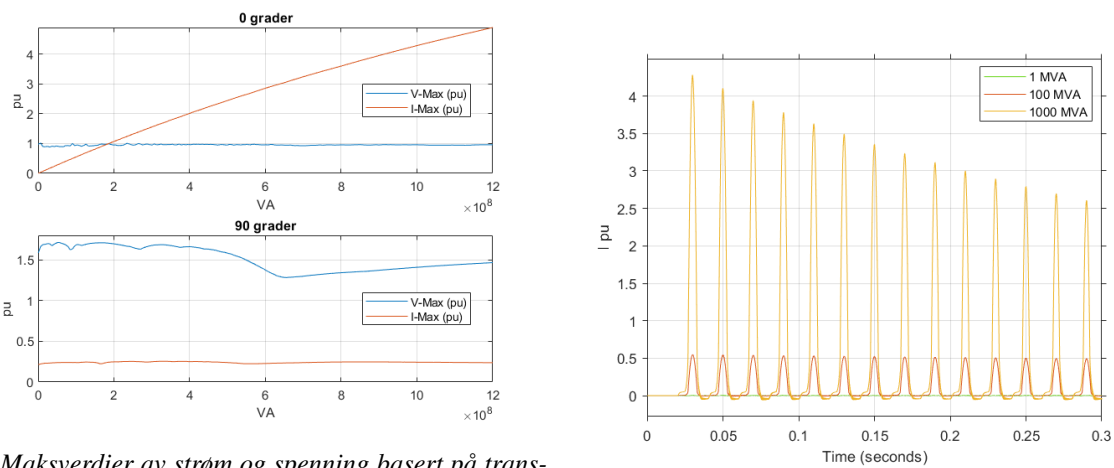
Figur 4.15: Figuren viser innvirkningen av magnetiseringsresistansen i transformatoren når en transformator uten last spenningssettes. Verdiene er basert på lukking av fase-a og hentet fra en simuleringstid på 300 ms.



(a) Maksverdier av strøm og spenning basert på gjenværende fluks i transformator-kjernen ved lukkevinkel  $0^\circ$  i fase-a, b og c. Den gjenværende fluksen i transformator-kjernen går fra -1,0-1,0 pu og har en oppløsning på 0,1 pu.

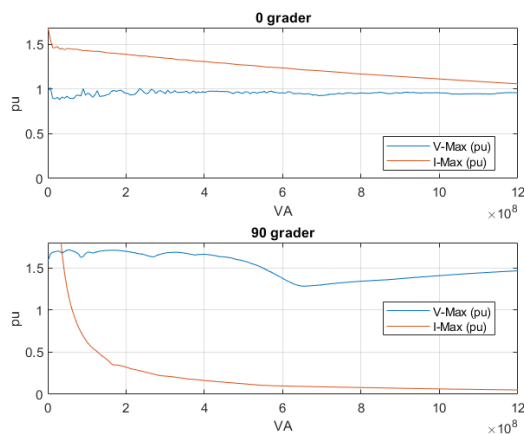
(b) Maksverdier av strøm og spenning basert på gjenværende fluks i transformator-kjernen ved lukkevinkel  $90^\circ$  i fase-a, b og c. Den gjenværende fluksen i transformator-kjernen går fra -1,0-1,0 pu og har en oppløsning på 0,1 pu.

Figur 4.16: Figuren viser innvirkningen av gjenværende fluks i transformator-kjernen når en transformator uten last spenningssettes. Verdiene er basert på lukking av fase-a og hentet fra en simuleringstid på 300 ms. Det simuleres for en og en fase og de fasene som ikke inkrementeres settes til null.

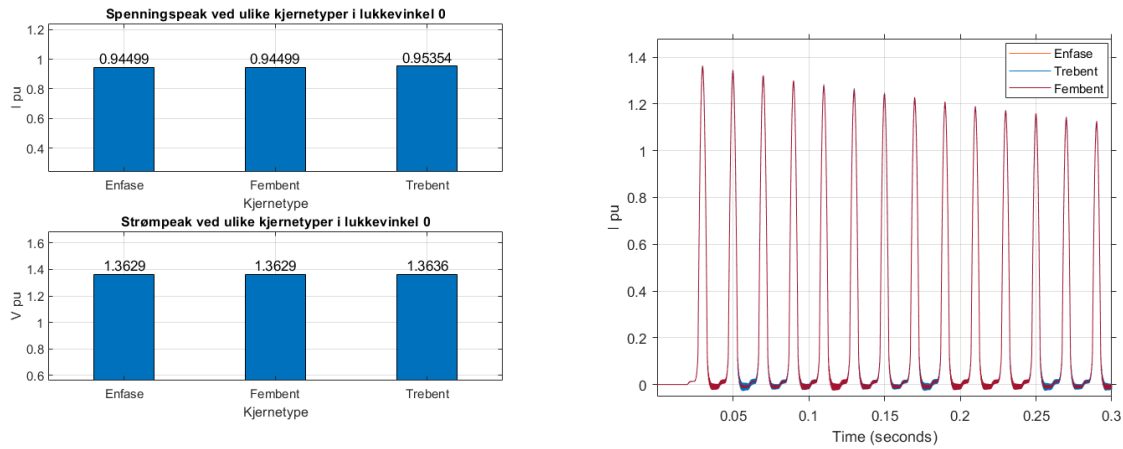


(a) Maksverdier av strøm og spenning basert på transformatorytelsen i transformatoren ved lukkevinkel  $0^\circ$  og  $90^\circ$ . Transformatorytelsen går fra 0,5-1200,5 MVA og har en oppløsning på 6 MVA. (b) Innkoblingsstrømmer ved utvalgte transformatorytelsel ved lukkevinkel  $0^\circ$ .

Figur 4.17: Figuren viser innvirkningen av transformatorytelsen i transformatoren når en transformator uten last spenningssettes. Verdiene er basert på lukking av fase-a og hentet fra en simuleringsvarighet på 300 ms.



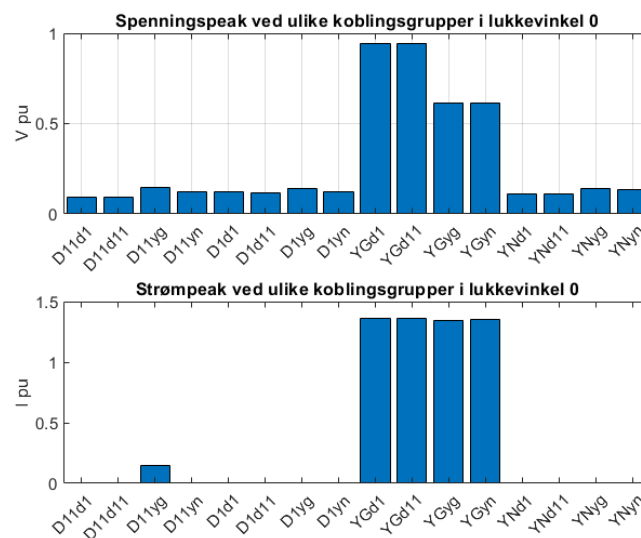
Figur 4.18: Maksverdier av strøm og spenning med relative  $X$  og  $R$  parametere tilhørende transformatorytelsens i transformatoren ved lukkevinkel  $0^\circ$  og  $90^\circ$ . Transformatorytelsen går fra 0,5-1200,5 MVA og har en oppløsning på 6,0 MVA. Verdiene er basert på lukking av fase-a og hentet fra en simuleringsvarighet på 300 ms.



(a) Maksverdier av strøm og spenning basert på tre ulike transformator-kjerner i transformatoren ved lukkevinkel 0°.

(b) Innkoblingsstrømmer ved tre ulike transformator-kjerner ved lukkevinkel 0°.

Figur 4.19: Figuren viser innvirkningen av transformator-kjerner i transformatoren når en transformator uten last spenningssettes. Verdiene er basert på lukking av fase-a og hentet fra en simuleringstid på 300 ms.



Figur 4.20: Figuren viser innvirkningen av transformator-koblinger i transformatoren når en transformator uten last spenningssettes. Verdiene er basert på lukking av fase-a og hentet fra en simuleringstid på 300 ms.



## 4.5 DCS (Delayed Closing Strategy)

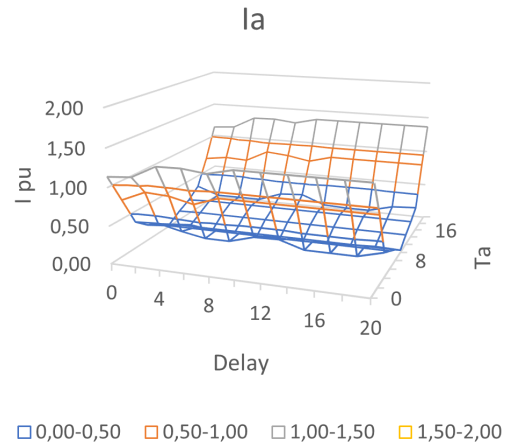
I delkapittel 2.9 ble det presentert tre ulike lukkestrategier. Fra oppsummeringen gitt i tabell 2.1 er DCS (Delayed Closing Strategy) en av metodene som er lettere å implementere sammenlignet med RCS (Rapid Closing Strategy) som diskutert i delkapittel 2.9. Derfor velges DCS for analyse av en lukkemetode. SCS (Simultan Closing Strategy) kan også vises med DCS om tidsforsinkelsen (*Delay*) er satt til null. For å gjøre simuleringer av DCS, måtte det gjøres noen justeringer i modellen og databehandlingen. Solveren måtte benytte ode45. Denne solveren er en tregere enn den som tidligere er benyttet, men denne solveren var den som klarte å utføre kaluleringene for metoden. På grunn av at simuleringene tok lengre tid ved den nye solveren, ble det bare simulert i 100 ms for det reelle systemet. For dette tilfellet ble det foretatt målinger i alle faser for både strøm og spenning.

Først Simuleres alle tidsforsinkelsene (*Delay*) for første  $T_a$  verdi, så inkrementeres  $T_a$  tiden med 2 ms. Deretter simuleres alle tidsforsinkelsene (*Delay*) for den nye  $T_a$  tiden. Slik kjører simuleringen fremtil siste  $T_a$  inkrementeringer er gjort, som stopper ved 20 ms. 20 ms er benyttet for å se effekten i en bølgeperiode til fundamentalfrekvensen.

Presentasjonen av resultatene fra simuleringen blir presentert i tabell og overflateplot. Tallene i tabellen er fargekodet relativ til verdiene i tabellen. Lave verdier har grønn farge og høye verdier er røde. Styrken i fargen avhenger av hvor lav eller høy verdiene er. Maksverdiene av strøm i fase-a er gitt i figur 4.21, strøm i fase-b gitt i figur 4.22 og strøm i fase-c er gitt i figur 4.23. Maksverdiene av spenning for fase-a er gitt i figur 4.24, for fase-b gitt i figur 4.25 og fase-c gitt i figur 4.26. DCS går ut på som diskutert i delkapittel 2.9 at en fase lukkes de to resterende etter en gitt tid. Siden  $T_a$  og *Delay* kan være null på samme tid, gir dette en demonstrasjon på SCS som går ut på å lukke alle fasene samtidig. Effekten av SCS blir vist i kolonnen med  $Delay = 0$  ms for alle figurene tilhørende DCS. Fluksen i kjernen er satt til null i alle simuleringene. Dette gjør at DCS gjøres i kombinasjon med spenningstoppmetoden som ikke foretar målinger av fluks, men bare baserer seg på lukkevinkelen alene og antar fluksen er null.

Ia	
Ta [ms]	Delay [ms]
	0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20
0	1,14 1,16 1,32 1,33 1,29 1,36 1,36 1,36 1,36 1,36 1,36
2	0,75 0,88 0,86 0,79 0,90 0,90 0,90 0,90 0,90 0,90 0,90
4	0,36 0,37 0,30 0,24 0,24 0,33 0,34 0,24 0,24 0,24 0,33
6	0,21 0,24 0,24 0,24 0,24 0,24 0,24 0,24 0,24 0,24 0,24
8	0,13 0,15 0,15 0,15 0,15 0,15 0,15 0,15 0,15 0,15 0,15
10	0,03 0,05 0,01 0,01 0,00 0,00 0,00 0,01 0,03 0,04 0,03
12	0,13 0,14 0,14 0,14 0,14 0,14 0,14 0,14 0,14 0,14 0,14
14	0,21 0,23 0,23 0,23 0,23 0,23 0,23 0,23 0,23 0,23 0,23
16	0,34 0,23 0,23 0,23 0,34 0,36 0,24 0,23 0,23 0,31 0,33
18	0,70 0,74 0,73 0,88 0,85 0,79 0,88 0,88 0,88 0,88 0,88
20	1,14 1,16 1,32 1,33 1,29 1,36 1,36 1,36 1,36 1,36 1,36

(a) Maksverdier av strøm i fase-a, presentert i tabell.

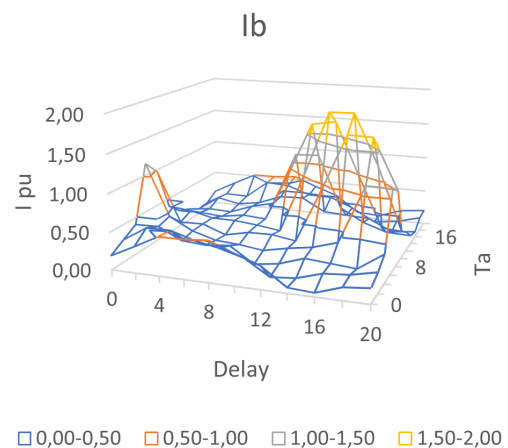


(b) Maksverdier av strøm i fase-a, presentert med overflateplot.

Figur 4.21: Figuren viser maksverdier av strøm i fase-a med bruk av DCS (Delayed Closing Strategy) i kombinasjon med spenningsstoppmetoden på en transformator uten last. Strategien går ut på å lukke først fase-a etter tiden  $T_a$ , deretter de to resterende fasene med den gitte tidsforsinkelsestiden (Delay). Både  $T_a$  og Delay varierer fra 0-20 ms og har en oppløsning på 2 ms. Simuleringsvarighetene er på 100 ms.

Ib	
Ta [ms]	Delay [ms]
	0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20
0	0,19 0,35 0,51 0,52 0,54 0,42 0,30 0,07 0,05 0,16 0,20
2	0,30 0,49 0,50 0,40 0,34 0,25 0,04 0,07 0,17 0,20 0,27
4	0,41 0,41 0,26 0,24 0,27 0,05 0,10 0,21 0,19 0,16 0,39
6	1,16 0,46 0,29 0,20 0,18 0,13 0,20 0,25 0,36 1,12 1,11
8	0,97 0,28 0,29 0,17 0,24 0,25 0,20 0,91 1,67 1,66 1,01
10	0,39 0,36 0,28 0,28 0,25 0,20 1,01 1,89 1,89 1,21 0,38
12	0,23 0,24 0,21 0,26 0,24 0,91 1,65 1,70 0,98 0,29 0,26
14	0,17 0,20 0,19 0,30 0,38 1,13 1,14 0,41 0,23 0,12 0,11
16	0,07 0,29 0,22 0,27 0,40 0,41 0,23 0,21 0,20 0,03 0,07
18	0,09 0,26 0,26 0,50 0,48 0,37 0,36 0,23 0,05 0,09 0,18
20	0,19 0,36 0,51 0,52 0,54 0,42 0,30 0,07 0,05 0,16 0,20

(a) Maksverdier av strøm i fase-b, presentert i tabell.

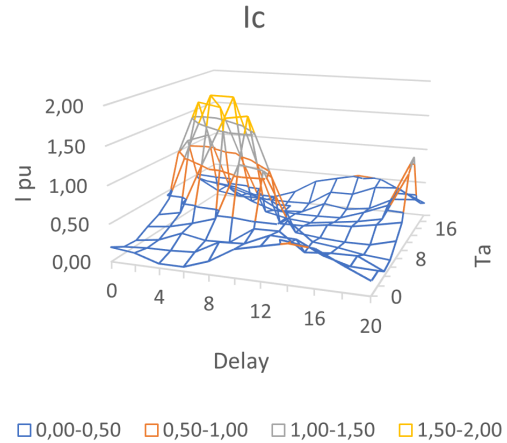


(b) Maksverdier av strøm i fase-b, presentert med overflateplot.

Figur 4.22: Figuren viser maksverdier av strøm i fase-b med bruk av DCS (Delayed Closing Strategy) i kombinasjon med spenningsstoppmetoden på en transformator uten last. Strategien går ut på å lukke først fase-a etter tiden  $T_a$ , deretter de to resterende fasene med den gitte tidsforsinkelsen (Delay). Både  $T_a$  og Delay varierer fra 0-20 ms og har en oppløsning på 2 ms. Simuleringsvarighetene er på 100 ms.

		Ic										
Ta [ms]	Delay [ms]											
	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	
0	0,19	0,16	0,06	0,06	0,17	0,37	0,44	0,52	0,49	0,33	0,19	
2	0,09	0,11	0,12	0,14	0,31	0,33	0,48	0,46	0,30	0,20	0,19	
4	0,07	0,12	0,25	0,19	0,20	0,42	0,42	0,19	0,22	0,22	0,06	
6	0,16	0,20	0,28	0,38	1,15	1,09	0,47	0,22	0,18	0,12	0,09	
8	0,24	0,30	1,00	1,67	1,72	0,92	0,20	0,16	0,14	0,15	0,24	
10	0,38	1,17	1,90	1,90	1,01	0,19	0,19	0,24	0,26	0,32	0,38	
12	0,96	1,74	1,68	0,92	0,23	0,16	0,13	0,18	0,23	0,30	0,96	
14	1,09	1,20	0,42	0,26	0,15	0,14	0,13	0,15	0,26	0,40	1,11	
16	0,44	0,27	0,21	0,22	0,05	0,07	0,23	0,18	0,22	0,39	0,42	
18	0,31	0,26	0,16	0,10	0,10	0,11	0,31	0,32	0,45	0,47	0,28	
20	0,19	0,16	0,06	0,06	0,17	0,37	0,44	0,52	0,49	0,34	0,19	

(a) Maksverdier av strøm i fase-c, presentert i tabell.

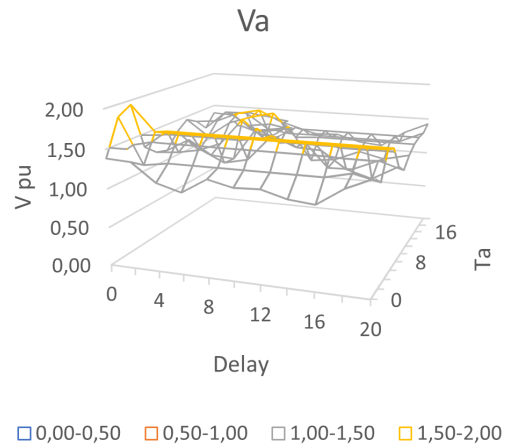


(b) Maksverdier av strøm i fase-c, presentert med overflateplot.

Figur 4.23: Figuren viser maksverdier av strøm i fase-c med bruk av DCS (Delayed Closing Strategy) i kombinasjon med spenningstoppmetoden på en transformator uten last. Strategien går ut på å lukke først fase-a etter tiden  $T_a$ , deretter de to resterende fasene med den gitte forsinkelsestiden (Delay). Både  $T_a$  og Delay varierer fra 0-20 ms og har en oppløsning på 2 ms. Simuleringsvarighetene er på 100 ms.

		Va										
Ta [ms]	Delay [ms]											
	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	
0	1,38	1,37	1,13	1,04	1,24	1,17	1,18	1,09	1,06	1,28	1,42	
2	1,84	1,25	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,37	1,30	
4	1,94	1,61	1,61	1,61	1,61	1,61	1,61	1,61	1,61	1,61	1,61	
6	1,32	1,56	1,56	1,56	1,56	1,56	1,56	1,56	1,56	1,56	1,56	
8	1,18	1,20	1,26	1,11	1,18	1,52	1,40	1,38	1,16	1,07	1,25	
10	1,13	1,31	1,12	1,09	1,54	1,36	1,41	1,08	1,09	1,23	1,13	
12	1,34	1,09	1,21	1,58	1,32	1,52	1,08	1,12	1,25	1,18	1,25	
14	1,45	1,23	1,45	1,55	1,63	1,31	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33	
16	1,37	1,40	1,53	1,60	1,45	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	
18	1,20	1,47	1,48	1,27	1,21	1,22	1,21	1,21	1,21	1,21	1,36	
20	1,38	1,37	1,13	1,04	1,24	1,17	1,18	1,09	1,06	1,28	1,43	

(a) Maksverdier av spenning i fase-a, presentert i tabell.

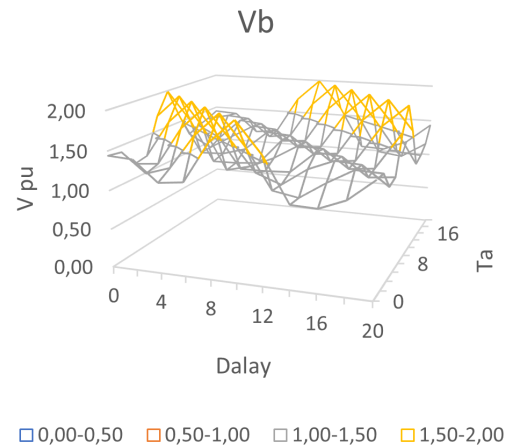


(b) Maksverdier av spenning i fase-a, presentert med overflateplot.

Figur 4.24: Figuren viser maksverdier av spenning i fase-a med bruk av DCS (Delayed Closing Strategy) i kombinasjon med spenningstoppmetoden på en transformator uten last. Strategien går ut på å lukke først fase-a etter tiden  $T_a$ , deretter de to resterende fasene med den gitte forsinkelsestiden (delay). Både  $T_a$  og Delay varierer fra 0-20 ms og har en oppløsning på 2 ms. Simuleringsvarighetene er på 100 ms.

		Vb									
Ta [ms]	Delay [ms]										
	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
0	1,44	1,42	1,16	1,19	1,70	1,99	1,60	1,05	1,03	1,16	1,43
2	1,41	1,16	1,27	1,70	1,99	1,60	1,10	1,04	1,25	1,44	1,42
4	1,19	1,22	1,70	1,99	1,60	1,21	1,09	1,31	1,44	1,42	1,18
6	1,22	1,70	1,99	1,60	1,16	1,15	1,17	1,45	1,42	1,19	1,22
8	1,70	1,99	1,60	1,04	1,11	1,25	1,44	1,42	1,19	1,22	1,70
10	1,99	1,60	1,05	1,06	1,08	1,43	1,42	1,19	1,22	1,70	1,99
12	1,60	1,08	1,09	1,18	1,45	1,42	1,19	1,22	1,70	1,99	1,60
14	1,26	1,09	1,27	1,45	1,42	1,19	1,22	1,70	1,99	1,60	1,08
16	1,33	1,17	1,45	1,42	1,19	1,22	1,70	1,99	1,60	1,16	1,13
18	1,38	1,45	1,42	1,17	1,21	1,70	1,99	1,60	1,06	1,02	1,23
20	1,44	1,42	1,16	1,19	1,70	1,99	1,60	1,05	1,03	1,16	1,43

(a) Maksverdier av spenning i fase-b, presentert i tabell.

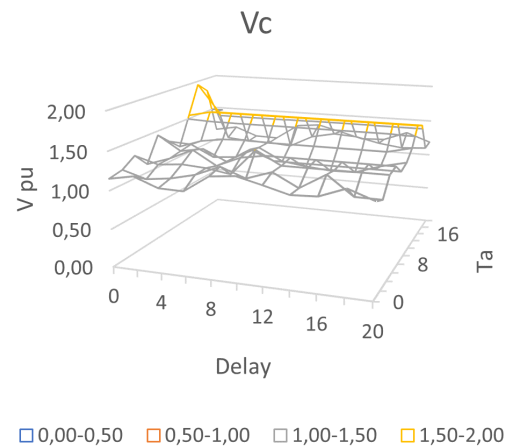


(b) Maksverdier av spenning i fase-b, presentert med overflateplot.

Figur 4.25: Figuren viser maksverdier av spenning i fase-b med bruk av DCS (Delayed Closing Strategy) i kombinasjon med spenningstoppmetoden på en transformator uten last. Strategien går ut på å lukke først fase-a etter tiden Ta, deretter de to resterende fasene med den gitte forsinkelsestiden (delay). Både Ta og Delay varierer fra 0-20 ms og har en oppløsning på 2 ms. Simuleringsvarighetene er på 100 ms.

		Vc									
Ta [ms]	Delay [ms]										
	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
0	1,15	1,21	1,09	1,08	1,30	1,33	1,25	1,17	1,18	1,30	1,19
2	1,19	1,10	1,13	1,21	1,34	1,22	1,33	1,16	1,36	1,12	1,12
4	1,30	1,21	1,24	1,22	1,17	1,50	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33
6	1,11	1,22	1,36	1,17	1,31	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36
8	1,44	1,25	1,30	1,15	1,34	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22
10	1,29	1,27	1,12	1,14	1,30	1,14	1,10	1,06	1,07	1,18	1,26
12	1,15	1,25	1,30	1,32	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,38
14	1,55	1,61	1,61	1,61	1,61	1,61	1,61	1,61	1,61	1,61	1,61
16	1,95	1,56	1,56	1,56	1,56	1,56	1,56	1,56	1,56	1,56	1,56
18	1,81	1,11	1,08	1,08	1,05	1,22	1,28	1,26	1,19	1,15	1,17
20	1,15	1,21	1,09	1,09	1,30	1,33	1,25	1,17	1,18	1,30	1,19

(a) Maksverdier av spenning i fase-c, presentert i tabell.



(b) Maksverdier av spenning i fase-c, presentert med overflateplot.

Figur 4.26: Figuren viser maksverdier av spenning i fase-c med bruk av DCS (Delayed Closing Strategy) i kombinasjon med spenningstoppmetoden på en transformator uten last. Strategien går ut på å lukke først fase-a etter tiden Ta, deretter de to resterende fasene med den gitte forsinkelsestiden (dealy). Både Ta og Delay varierer fra 0-20 ms og har en oppløsning på 2 ms. Simuleringsvarighetene er på 100 ms.

## 4.6 Tilleggssimuleringer

Det blir foretatt tilleggssimuleringer i vedleggene **A**, **B** og **C**. Disse simuleringene gjøres for å analysere ekstra punkter som tar for seg harmonisk og visuell analyse av innkoblingsstrøm, *3I0* strøm og lukking på stigende bølge med *RDDS* (Rate of Decrease of Dielectric Strength) tatt i betraktning. Dette var siste delkapittelet for resultatene fra metoden.

## 4.7 Oppsummering av kapittelet

Det kapittelet har nå presentert simuleringsresultatene til over 6 000 simuleringer, for ulike studeringsparameter i Simulink modellen som er bygget i kapittel 3. Simuleringsresultatene presenteres med pu verdier som har sitt utgangspunkt i de presenterete verdiene. Simuleringsparameterene grupperes og presenteres i fire deler; lukkevinkel og kabellengde, forhåndsliggende nett, transformator og til slutt lukkestrategier. Parameterene blir gitt ulike verdier i hver simulering. Neste kapittel, foretar en analyse og diskusjon av simuleringstilfellene som er gjort i dette kapittelet. Dette i håp om å kartlegge hvilke av de utvalgte parameterene som bidrar sterkest eller svakest til innkoblingsstrømmer og koblingsspenninger som kan redusere levetiden til transformatorer og komponenter. Samt om bruken av PoW kan føre til høye transienter.

# Kapittel 5

## Analyse og diskusjon

Dette kapittelet foretar observasjoner, analyse og diskusjon fra simuleringsresultatene presentert i kapittel 4, knyttet opp mot noe av teorien beskrevet i kapittel 2. Analysen og diskusjonene skal gi indikasjoner og konklusjoner på hvilke av de utvalgte parameterene som øker eller reduserer innkoblingsstrømmer og koblingsspenninger når en transformator uten last spenningssettes. Samt om bruken av kontrollert kobling fører til høye transienter. Lukkevinkelen og trendene gjennom ulike inkrementeringsintervall til parameterene blir større vektlagt enn selve sluttverdiene parameterene gir.

### 5.1 Lukkevinkel og kabellengde

De to første parametrene som skal analyseres og diskuteres fra kapittel 4 er lukkevinkel og kabellengde. Som diskutert i kapittel 2 er det indikasjoner om at lukkevinkelen skal gi betydelige utslag på både innkoblingsstrøm og koblingsspenninger.

#### 5.1.1 Lukkevinkel

En analyse av resultatene i figur 4.1a viser at lukkevinkelen som gir høyest strømverdier er 0 grader, samtidig er dette vinkelen som gir lavest spenningsverdier. Figuren 4.1a viser også at lukkevinkel 90 grader gir omtrent høyest spenningstransienter, og det er i dette området hvor innkoblingsstrømmen er lav, men ikke aller lavest. Dette kan kanskje skyldes kapasitansene som er diskutert i delkapittel 3.2.4. Figuren viser tydelig at lukkevinkler som gir lav innkoblingsstrøm gir høye koblingsspenninger, og vinkler som gir lave koblingsspenninger gir høye innkoblingsstrømmer. Fluksen i kjernen er null og resultatene fra figuren 4.1a vil derfor kunne være nært korrelert til spenningstoppmetoden. Figur 4.1 viser at vinklene 0 og 90 grader utgjør omtrent høyest og lavest verdier for både strøm og spenning når fluksen i kjernen settes til null. Dette er en bekreftelse av teorien som er diskutert i delkapittel 2.3 og 2.7.2. Altså bekrefter dette teorien om en enfaset transformator uten last og gjenværende fluks kobles ideelt inn for å minimere innkoblingsstrømmene når spenningsbølgen er på topp som vil si at fluksen er på sin bunn. Samtidig er det ugunstige innkoblingsøyeblikket når spenningsbølgen krysser null, med tanke på innkoblingsstrøm når fluksen er satt til null. Derfor ble disse vinklene brukt som utgangspunkt i de påfølgende simuleringene som ble gjort i kapittel 4 og legges vekt på i dette kapittelet.

Simuleringene som skal vise strømmene og spenningene som blir generert i fase-b og c, blir presentert i figur 4.2. Figuren viser at strømmen i fase-b og c er tilnærmet eller lik null. Spenningen i fase-b er lav, og spenningen i fase-c følger omtrent likt mønster som fase-a, som vist i figur 4.1a. Lukking av bare en fase fører til at strømmen ikke har returvei og det blir ikke generert strøm i fase-b eller c [31] [9], det ser ut som figuren 4.2 kan bekrefte dette. Derfor ble det ikke foretatt studeringer av fase-b og c på de påfølgende simuleringene og resultatene.

Figuren 4.3 viser transientforløpet i en fire sekunders simuleringsperiode til strømmen og spenningen i fase-a ved lukkevinkel 0 og 90 grader. Ved lukkevinkel 0 grader som vist i figur 4.3a, er innkoblingsstrømmen 1,363 pu og går under nominell verdi etter 470 ms. Effektbryteren lukkes etter 20 ms, som gjør at innkoblingsstrømmen går under nominell verdi etter en lengde på 450 ms. Det er dermed indikasjoner på desto høyere innkoblingsstrøm, desto lengre tid tar det før innkoblingsstrømmen synker til å være tomgangsstrømmen. Spenningen holder seg til omtrent 0,87 pu for lukkingen ved 0 grader. Ved lukkevinkel 90 grader som vist i figur 4.3b, er innkoblingsstrømmen lav og spenningen høy. Spenningens maksverdi er på 1,634 pu, og etter maksverdien er spenningen 1 pu ved omtrent 60 ms, som gir en transientvarighet på 40 ms. Spenningen stabiliseres etter denne tiden til 0,866 pu.

Noen av hovedresultatene fra studeringsparameteret lukkevinkel, er at lukkevinkelen påvirker innkoblingsstrømmen og koblingsspenningene sterkt som også er diskutert fra teorien i kapittel 2. Lukkevinkler som gir lav innkoblingsstrøm gir høy koblingsspenning, og lukkevinkler som gir lav koblingsspenning gir høy innkoblingsstrøm. Disse resultatene kan bare bekreftes av metoden for lukkevinklene i intervallet -125 til 125 grader og gjenværende fluks i kjernen er null. Lukkevinklene utenfor dette intervallet kan ikke bekreftes da det ikke er simulert for. Årsaken til at et større lukkeintervall ikke er brukt, er forklart i delkapittel 3.3. I delkapittel 2.3 forklares lukkevinkelen som gjør at spenningen går i null, som er 0 og 180 og er teoretisk er best for å lukke kapasitiv krets, og delkapittelet viser at når spenningen er på en topp eller bunn, som vil si 90 eller 270 grader, er best for å lukke induktive kretser. Lukkevinkel er en parameter som til en viss grad kan styres av effektbryteren og blir derfor et viktig parameter å ta hensyn til for å redusere transienter som øker levtiden på komponenter, samt forbedrer leveringskvaliteten. Operatøren som skal lukke effektbryteren må gjøre et valg om innkoblingsstrømmen skal være lav eller koblingsspenningen skal være lav. Dette gjelder når fluksen i kjernen er antatt null og spenningstoppmetoden blir benyttet. Dette er et kjent dilemma presentert av Cigre [9]. Cigre stiller fortsatt spørsmålet om hvilken av innkoblingsstrømmer og dielektrisk stress på transformatoren er mest skadelig [9]. Innkoblingsstrømmen bør ikke være så høy at vern feilopererer og skader levetiden på utstyr.

Dilemmaet med lave innkoblingsstrømmer er at da blir koblingsspenningene høye. Samtidig har resultatene fra simuleringene gitt marginer i verste koblingsspenninger på omtrent 0,87 pu fra koblingsgrensen på 2,50 pu gitt av NVF [33]. Dermed skal det gitte simulerte anlegge i følge NVF tåle slike koblingsspenninger uten utfall. Det kan tenkes at høye koblingsspenninger over tid kan gi slitasje og utfordre holdfastheten

på anleggets komponenter samt redusere levetiden. Dette kan tenkes gjelder bare for spenningstoppmetoden som antar den gjenværende fluksen er null. Ved å endre den gjenværende fluksen til å være lik den potensielle fluksen generert av lukkevinkelen til spenningsbølgen, kan kanskje andre resultater vises. Denne analysen av lukkevinkelen kan derfor kanskje bare gjelde for spenningstoppmetoden dersom matching av fluks eliminerer problemet. Dette spørsmålet kan ikke besvares i denne rapporten da dette ikke er simulert.

Som diskutert i delkapittel 2.9 kan lukkevinkel  $45^\circ$  for spenningstoppmetoden være et fint mellompunkt for å unngå både de verste innkoblingsstrømmene og koblingspenningene. Figur 4.1a viser hvor sensitiv PoW teknologier er for tidsavvik eller dårlig presisjon. Ved å la *RDDS* være uendelig for forenkle denne analysen, utgjør et tidsavvik på  $\pm 1,0$  ms et lukkeintervall på  $36^\circ$ ,  $\pm 1,5$  ms utgjør  $54^\circ$  og *pm* 2,0 ms gir et intervall på  $72^\circ$  ved  $f = 50$  Hz. De statistiske tidsavvikene  $\Delta T_{\text{statistisk}}$  kan ikke kompenseres for, mens de forutsigbare variasjoner  $\Delta T_{\text{forutsigbar}}$  kan kompenseres for som diskutert i 2.6.1. Det blir derfor gitt en anbefaling om å benytte effektbrytere med lave statistiske variasjoner, samt å ta i bruk alle tidskopeneringsfunksjonene i PoW modulen. Dette kan gjøre tidsavvikene  $\Delta T_{\text{forutsigbar}}$  så forutsigbar som mulig som igjen kanskje kan bedre presisjonen slik at de verste vinklene blir unngått når en gunstig vinkel er valgt. Det er også anbefalt å koble på stigende bølgetopp som demonstrert i figur 2.18 for å bedre innkoblingspreisjonen med tanke på *RDDS*.

Det kan være enkelt for en person bare å si at presisjonen må bedres, være god eller tilstrekkelig uten å legge mer i det. Presisjonen avhenger av informasjon fra effektbryterleverandører som polenes stillestående tid, pålitelighets informasjon, *RDDS*, standardavvik og tilstrekkelige kompenseringskurver for forutsigbare parametere som inngår i  $\Delta T_{\text{forutsigbar}}$ . PoW moduler er avhengig av denne informasjonen for å utregne korrekte operasjonstider. Ved måling under klargjøring eller ferdigstilling av anleggene burde prosessen foregå metodisk [9] for å unngå menneskelige feil og rett utførelse. Effektbryteren burde også vedlikeholdes og testes for å påse at operasjonstidene er stabile eller blir justert etter slitasjen og ladingen på komponenten som diskutert i delkapittel 2.6.1. Presisjonen kan da tenkes avhenger av flere parter og samarbeidet mellom dem. Alt dette kan tenkes er til fordel på å oppnå pålitelig og gjentagende for operasjonstider  $T_{\text{operasjonstid}}$  som bedrer presisjonen til lukkevinkelen.

Til slutt skal det nevnes at lukkevinkelen er et parameter som kan til en viss grad av det som er forklart nå, velges og er ikke en permanent installasjon som forklart i tabell 5.3. På bakgrunn av dette utgjør denne parameteren en viktig rolle fremfor andre parametere når det kommer til å redusere skadelige transienter ved spenningssetting av transformator uten last.

## 5.1.2 Kabellengde

Den neste parameteren er kabellengden. Resultatene for lave kabellengder, viser tall som ikke er til å sammenligne med resultatene som simuleringene for over 0,2 km gir. Verdiene når  $2,2 \times 10^{40}$  pu, noe som virker usannsynlig høyt, noe som kan kalles



statistiske outliers på engelsk eller ekstremverdier på norsk. Dette er bakgrunnen til figuren 4.4a og 4.6a har verdier som går utenfor y-aksen ved de laveste kabellengdene. Figurene 4.5 viser hvordan plottene ser ut, uten en y-akse begrensning på 1,8 pu. Det stilles spørsmål om resultatene under 0,2 km er til å stole på. Hva som får resultatene til å gå mot uendelig, blir det ikke gitt et konkret svar på. Ved å se på hvilke verdier som forekommer uten kabel 4.1a ved lukkevinkel 90 grader, viser det tall som kan sammenlignes med tall i figur 4.4a ved 90 grader, når kabellengden starter fra 0,2 km. Et annet spørsmål som kan stilles da er om den slake økningen ovenfor 0,2 km i figur 4.4a ved 90 grader kan lineariseres ned mot kabellengden null [31]. Det kan tenkes at dette er mer presentable verdier, men dette er det ikke noe fasit svar på. Figur 4.6a viser at trenden øker med kabellengde ikke brytes, innkoblingsstrømmen øker med kabellengden for lukkevinkelen 0 grader. Det kan da til slutt spørres om den gunstigste lukkevinkelen for å generere lavest innkoblingsstrøm da endrer seg med kabellengden.

Resultatene fra simuleringen til figur 4.8, viser den høyeste innkoblingsstrømmen ikke øker med en kabellengde på 10 km, men det er flere vinkler som er mindre gunstige for å gi lav innkoblingsstrøm. Det kan se ut som det er en metning i intervallet rundt null på x-aksen, samtidig som bunngrensene for alle lukkevinkelene har forflyttet seg til høyere verdier langs y-aksen. Vanligvis går ikke kabellengdene lengre enn 1,5 km mellom effektbryter og transformator, som tilhører Statkraft [31] [28]. Verdiene som vises da i figur 4.4a ved lukkevinkel 90 grader, viser at kabellengden ikke har så stor innflytelse på intervallet 0,2 til 1,5 km [28] [31]. Resultatet som vises i figur 4.6a om at innkoblingsstrømmen øker i takt med kabellengden, stilles det spørsmål rundt om er riktig. Kabelen inneholder kapasitive elementer som i sluttsum økes med kabellengden. Kanskje er det disse parameterene som gir denne trenden siden kapasitive kretser gir høyest innkoblingsstrøm ved lukkevinkel 90° som diskutert i 2.3. For alle andre simuleringer ekskluderes kabelmodellen, for at kabelen ikke skal innvirke på de andre studeringsparameterene.

Resultatene fra kabellengde er usikre, men det kan se ut som kabellengden i intervallet 0,2 til 1,5 km ikke gir betydelige avvik fra resultatene uten kabel. Trenden for strømtransientene i figur 4.4b og 4.6b, er at økende kabellengde gir raskere demping som gjør at innkoblingsstrømvariheten er lavere. Dette kan kanskje komme av endringen av systemets tidskonstant  $\tau$ , bølgeimpedansen  $Z_n$  fra formel 2.21 og bølgehastigheten fra formel 2.24. Siden kabellengder vanligvis ikke overskrider 1,5 km for slike anlegg [31] [28], er denne demningseffekten eller påvirkning nesten neglisjerbar for aktuelle kabellengder. Det burde til slutt for kabel også nevnes at DCS (Delayed Closing Strategy) ikke er en anbefalt lukkestrategi for lange kabler, på grunn av dannelse av ferroresonans. Spenningssette transformatoren ved bruk av spenningsstoppmetoden, kan benyttes på kabler da forsinkelsestiden *Delay* må ta hensyn til spenningsvingningen som oppstår i en slik *L-C* Krets [9].

## 5.2 Forhåndsliggende nett

Den neste seksjonen skal analysere og diskutere parametre fra forhåndsliggende nett. De spesifikke parameterene er kortslutningsytelse og  $X$  til  $R$  forholdet i nettet.

## 5.2.1 Kortslutningsytelse fra kilden

Den første parameteret fra forhåndsliggende nett er kortslutningsytelsen. Figur 4.9 forutenom figur 4.9a ved 90 grader, viser at kortslutningsytelsen påvirker sterkt innkoblingsstrømmen. Maksverdiene til strømmen ved 0 grader i figur 4.9a reduserer sin stigningsgrad etter omtrent 2 000 MVA, og starter å flate ut samtidig som maksverdien øker sakte. Ved lukkevinkel 90 grader stiger innkoblingsstrømmen sakte, med en ikke til betydelig pu verdi. Spenningen følger et mønster som det ikke legges inn en kommentar på hvorfor resultatene er som de er. Det kan utfra resultatene tenkes at lukkevinkel 90 grader gir høye koblingsspenninger for denne lukkevinkelen, samtidig som verdiene er under 1,5 pu i intervallet 1 500 til 3 500 MVA. Figur 4.9b viser innkoblingsstrømmens verdiendringer mellom ytelsene 100, 1 000 og 10 000 MVA. Figur 4.9a viser strømmen mellom 1 000- til 10 000 MVA, har en differanse på omtrent 0,5 pu. Spenningen ved lukkevinkel 0 grader i figur 4.9a kan se ut til å kunne tilsi en regresjonskurve som er svakt dalende fra 500 MVA og utover. Årsaken til dette er vanskelig å si konsist; hvorfor denne trenden. En tanke kan være at økende innkoblingsstrøm kan gi økende spenningsdipper. En svakhet med denne analysen er at figuren tar for seg bare maksimumverdier og ikke minimumverdier eller spenningsfall. Derfor kan ikke denne analysen konstantere at denne teorien er sann, men kilder viser til at høy innkoblingsstrøm gir spenningsfall i nettet [9]. Til oppsummering har kortslutningsytelsen en sterk påvirkning på innkoblingsstrømmene i gitte parameterintervaller og noe påvirkning på koblingsspenningene.

## 5.2.2 $X$ til $R$ forhold i kilden

Det neste parameteret fra forhåndsliggende nett er  $X$  til  $R$  forholdet. De største utslagsendringene på innkoblingsstrømmen er når  $X$  til  $R$  forholdsverdien er under 2, tilhørende lukkevinkel 0 grader som vist i figur 4.10a. Etter forholdsverdien 2, øker gradvis innkoblingsstrømmen frem til omtrent forholdsverdi 10, da stabiliserer innkoblingsstrømmen seg på omtrent 1,4 pu ved lukkevinkel 0 grader. Ved lukkevinkel 90 grader gir forholdsverdien det meste av utslaget sitt under forholdsverdien 0,5. For lukkevinkel 0 grader spiller ikke forholdsverdien en betydelig rolle for innkoblingsstrømmen og koblingsspenningen, annet enn at spenningen er høy for denne lukkevinkelen. Dette er den gjennomgående trenden ved innkobling i denne lukkevinkelen, som diskutert i delkapittel 5.1.1. Figur 4.10b viser at verdien er smått mindre ved forholdsverdi på 1 kontra 20. Det som denne figuren viser tydelig, er at innkoblingsstrømmer dempes raskere ved lavere verdier kontra høye verdier for denne parameteren. Dette kan kanskje ha direkte sammenheng med tidskonstanten  $\tau$  og bølgeimpedansen diskutert i delkapittel 2.3 og 2.4. Dermed kan det konkluderes med at  $X$  til  $R$  forholdet i kilden har noe påvirkning på innkoblingsstrømmene og dempningen av dem, og forholdstallet har liten påvirkning på koblingsspenningene.

## 5.3 Transformatorparametere

Til nå er det analysert parameterene før transformatoren. Det skal nå bli gitt en analyse og diskusjon av parametrene som tilhører selve transformatoren. Det kan tenkes at

resultatene fra disse parametrene også kan benyttes i fremtiden til å foreta design av transformatorer som skal ha egenskaper som reduserer innkoblingsstrømmer og eller koblingsspenningsene.

### 5.3.1 Resistans i transformatorviklinger

Det første parameteret som skal analyseres og diskuteres er resistansen i viklingene. Figur 4.11a viser maksverdien av strømmen og spenningen ved lukkevinkel 0 grader. Maksverdiene for strøm og spenning, avtar med økende resistans i viklingene. Strømmen avtar raskere enn spenningen i denne lukkevinkelen. Årsaken kan være at resistansen gir høyere spenningsfall over transformatoren, og resistansen kan ha en dempningsinnvirkning på kretsen for strømmen. Ved lukkevinkel 90 grader er spenningen høy og innkoblingsstrømmen lav, som er den gjennomgående trenden for denne lukkevinkelen som vist i figur 4.1a. Strømmen og spenningen holder seg tilnærmet konstant frem til resistansen har en verdi på 0,105 pu. Da brytes det konstante mønsteret opp til noe som kan ligne på forvrengninger, med noe mer variasjon i spenningen. Årsaken til forvrengningen er ukjent, kanskje er det resonans som oppstår fordi  $X/R$  forholdene endres som videre påvirker bølgeimpedansen og tidskonstanten. Figur 4.11b viser resistansen har noe påvirkning på innkoblingsstrømverdien og dempningshastigheten. Høyere resistansverdi gir lavere innkoblingsstrøm og raskere dempning av strømmen. Det er viktig å merke seg om denne parameteren skal benyttes for å designe transformatorer som skal ha egenskaper som demper eller redusere innkoblingsstrømmer, så er ulempe med en høyere resistansverdi et høyere tap, som vist i formel 2.29.

Resistansen i viklingene kan til en svak grad påvirkes med en trinnkobler, da trinnkobleren er koblet slik at maks antall viklinger oppnås. Resistansedifferansen mellom høyeste og laveste stillingen på trinnkobleren er ukjent, og det er ukjent hvor mye innkoblingsstrømmen kan reduseres. Det skal også sies at trinningen i trinnkobleren ikke skjer momentant, det tar tid å trinne trinnkobleren til ytterste stille. Å endre smått resistansen for å redusere transienter ved hjelp av trinnkobler er ikke en ny ide. En studie har konkludert med at dette kan være et billig alternativ for å redusere transienter [18], men viser ikke i hvilken grad dette påvirker transientene. Resultatet fra 4.11 kan være en forlengelse av den ideen og viser hva innvirkningen av trinnkobleren kan være dersom resistansendringene fra trinnkobleren er kjent. Generatortransformatorer har vanligvis ikke trinnkobler siden spenningen styres av generatoren [31], og har derfor ikke den muligheten til å justere denne resistansparameteren smått. Resistansen har dermed som diskutert i dette delkapittelet noe påvirkning på transientene samt tapet i transformatoren.

### 5.3.2 Resistansfordeling i primær og sekundærvikling

Resistansverdien mellom primær og sekundærsiden er en forlengelse av innvirkningen til resistansen i viklingene. Resultatene i figur 4.12 viser at resistansfordelingen mellom primær og sekundærside har tilnærmet ingen innvirkning på innkoblingsstrømmen eller koblingsoverspenningen. Verdiene er tilnærmet lik de resultatene som er gitt i figur

4.1a for lukkevinklene 0 og 90 grader. Det er usikkert om det er reelt at resistansfordelingen ikke har noen påvirkning. Det kan være kalkuleringene i simuleringene tar den samlede verdien av resistansen og ikke fordeler resistansen på hver vikling. Transformatorblokken som blir brukt i Simulink, har fått resistansverdiene innskrevet i feltene både på primær og sekundærside. Det kan være resistansfordelingen ikke har noen innvirkning på strømmen og eller spenningen som simuleringsresultatene viser i figur 4.12. MATLAB Simulink viser ikke hvordan beregningene blir gjort i bruksanvisningen til blokken. Dermed er det vanskelig å verifisere tallene og hvordan utregningene skjer. Enten tar transformatoren å fordeler den tilgitte resistansen mellom vikingene, eller så tar transformatoren den samlede resistansen i beregningen. Om det blir kalkulert resultater basert på den samlede resistansen, blir trolig resultatene konstante siden den samlede resistansverdien er lik samtidig som fordelingen endres. Figur 4.14 viser derimot at fordelingen mellom vikingene gir resultatendringer når det gjelder reaktansen i transformatoren. Metoden ble utført to ganger for å utelukke menneskelig feil. På bakgrunn av dette viser resultatene at resistansfordelingen ikke påvirker transientene, samtidig er dette usikkert siden kalkulasjonsmetoden ikke kan verifiseres.

### 5.3.3 Reaktans i transformatorviklinger

Det neste parameteret for tur er reaktansen eller lekkreaktansen i vikingene. Ved lukkevinkel 0 grader, viser figur 4.13a at innkoblingsstrømmen avtar med økende reaktans. Maksverdiene for strømmen avtar raskest i starten av reaktansintervallet og går under 1 pu ved en reaktans høyere enn 0,24 pu. Spenningen holdes i lengre perioder under 1 pu og pendler noen ganger over 1 pu, og opp til 1,144 pu på det høyeste. Ved lukkevinkel 90 grader er strømmen lav og spenningen høy. Spenningen reduseres ned til 1,31 pu ved en reaktansverdi på 0,022 pu. Årsaken til spenningsdippen er uklar, samtidig er spenningen aldri over 2,5 pu grensen fastsatt av NVF [33] for koblingsgrensen. Figuren 4.13b viser reaktansverdien gir høyere verdier av strøm i lukkevinkel 0 grader, der lavest reaktansverdi gir høyere strømverdi. Reaktansverdien ser ikke ut til å ha noen innvirkning på dempningshastigheten. Reaktans eller lekkreaktansen har påvirkning ved de laveste reaktansverdiene på innkoblingsstrømmen, mens parameteren har ansett liten endring fra de opprinnelige verdiene når det kommer til koblingsspenninger.

### 5.3.4 Reaktansfordeling i primær og sekundærvikling

Reaktansen mellom primær og sekundærsiden er en forlengelse av innvirkningen til reaktansen i vikingene. Figuren 4.14a viser at ved lukkevinkel 0 grader er innkoblingsstrømmen høyest når reaktansen er mest fordelt på sekundærsiden, mens innkoblingsstrømmen er lavest når reaktansen er mest fordelt på primærsiden. Spenningen ved lukkevinkel 0 grader går over 1 pu, dersom primærviklingen har 60-80% av reaktansen, det vil si at sekundærviklingene har 20-40% av reaktansen. ved en 85/15% fordeling går spenningen under 1 pu igjen. Årsaken til denne svake økningen og avtakingen i dette intervallet er ukjent, men kan hende har noe med endringen av tidskonstanten og bølgeimpedansen. Ved lukkevinkel 90 grader er verdiene i figur 4.14a tilnærmet lik verdiene fra figur 4.1a. Figur 4.14b viser at høyere reaktans fordelt på sekundærsiden

gir noe høyere innkoblingsstrøm, og høyere reaktansfordeling på primærsiden gir lavere innkoblingsstrøm ved lukkevinkel 0 grader. Reaktansfordelingen har dermed noe påvirkning på innkoblingsstrømmene og tilnærmet liten endring fra de opprinnelige verdiene på koblingsspenningene.

### 5.3.5 Magnetiseringsresistans

Den andre resistansverdien i transformatoren er magnetiseringsresistansen. Figur 4.15a viser at magnetiseringresistanser under omtrent 250 pu har størst innvirkning på intervallet, høyere verdier har liten innvirkning. Ved lukkevinkel 90 grader er spenningen ned i 1,1 pu og øker raskt med stigende verdi på magnetiseringresistansen. Strømmen i samme lukkevinkel viser at strømmen er noe høyere ved de laveste magnetiseringresistansverdiene og stabiliserer seg raskt ved 300 pu. Ved lukkevinkel 0 grader har spenningen noen lavere koblingsspenninger for de laveste magnetiseringresistansverdiene. Strømmen i samme lukkevinkel øker relativt svakt frem til 1 000 pu. Altså er den største innvirkningen av maks strøm og spenningsverdier for magnetiseringsresistansen i lavere verdier. Figur 4.15a har laveste magnetiseringsresistansverdi på 10 pu, samtidig viser figur 4.15b en pu verdi på 1, har enda større innvirkning på innkoblingsstrømmen. Innkoblingsstrømmen er omtrent to ganger nominell verdi både i positiv og negativ verdi som gir  $V_{p-p} = 4$  pu. Altså har magnetiseringsresistansen liten påvirkning på transientene med unntak av det de laveste pu verdiene.

### 5.3.6 Gjenværende fluks

Gjenværende fluks i transformatorkjernen er et annet parameter i likhet med lukkevinkelen som beskrevet i kapittel 2 som i teorien skal ha innvirkning på transientene. Resultatene fra figur 4.16 viser innvirkningen av den gjenværende fluksen i transformatorkjernen. Ved lukkevinkel  $0^\circ$  som vist i figur 4.16a, påvirker denne parameteren innkoblingsstrømmen. Fase-a skiller seg litt fra fase-b og c. I fase-a er innkoblingsstrømmen stigende fra -1 til 0 pu. Etter 0 pu er maksverdiene dalenede frem til 0,30 pu og gir en liten oppgang frem til 0,55 pu og daler sterkere etter 0,8 pu. For fase-b og c er strømmen jevnt over stigende på intervallet med noe variasjoner på stigningsgraden. Trenden for de to fasene er at økt fluks i positiv verdi gir høyere innkoblingsstrøm. Spenningen er lite avvikende i alle fasene og holder den forventende trenden basert på tidligere delkapitler i dette kapittelet, om å være lav ved denne lukkevinkelen. Ved lukkevinkel  $90^\circ$ , som vist i figur 4.16b, er resultatene tilnærmet upåvirket av den gjenværende fluksen i transformatoren. Med unntak av resultatene i fase-a ved -0,9 pu. Her har Simulink solvern gitt resultater som ikke henger sammen med konteksten til de andre resultatene. Strømmen ved -0,9 pu er  $3,2 \times 10^7$  pu. Til sammenligning er strømmen ved -1,00 pu en maksverdi på 0,53 pu og strømmen ved -0,80 pu gir 0,35 pu. Tilsvarende scenario gjelder for spenningen ved -0,9 pu fluks i fase-a. Derfor begrenses y-aksen til 0 til 1,8. Verdiene for -0,9 pu fluks i fase-a ved lukkevinkel  $90^\circ$  velges også derfor å se bort fra.

Figur 4.16 viser at fluksen i transformatorkjernen påvirker resultatene sterkt ved lukkevinkel  $0^\circ$ . En av grunnene til at resultatene kanskje ikke utpreger seg så mye,

særlig ved lukkevinkel  $90^\circ$ , kan være at fluksen i to av fasene er satt til 0. Dette kan gjøre at fluksmønsteret i kjernen kanskje ikke er så asymmetrisk og derfor kanskje ikke så utslagsgivende. Fluksen ligger  $90^\circ$  fremfor spenningen som vist i formel 2.30. Dermed vil lukkingen av fase-a ved  $90^\circ$  tilsynelatende gi lav innkoblingsstrøm siden dette kanskje vil hindre at kjernen går i metning av fluksene og ikke skaper høye strømmen. Resultatene fra figur 4.16b kan gi indikasjoner på at innkobling bare basert på spenningsbølgen uten hensyn til gjenværende fluks i kjernen, kan gi tilfredsstillende resultater. Dette er også en metode som blir brukt som diskutert i delkapittel 2.9 og 2.7. Som diskutert for parameteret lukkevinkel, gir valget av den laveste innkoblingsstrøm med spenningsstoppmetoden en resulterende høy koblingsspenning. Men mer tilfredsstillende resultat kan kanskje oppnås om den gjenværende fluksen blir tatt hensyn til som vist i denne referansen: [9]. Kontrollert utkobling og flukslåsning er en av måtene som kan gjøre den gjenværende fluksen i kjernen kjent og deretter koble inn mer kontrollert ved innkobling, som diskutert i delkapittel 2.9.4. Simuleringene fra figur 4.16 viser at innkoblingsstrømmen er sterkt avhengig av den gjenværende fluksen i kjernen ved lukkevinkelen  $0^\circ$ .

### 5.3.7 Transformatorytelse

Transformatorytelsen er den dimensjonerende faktoren for transformatoren. Figur 4.17a viser ved lukkevinkel 90 grader er strømmen stabil og holder seg godt under nominell verdi. Spenningen er på over 1,6 pu før 585 MVA da den går ned til 1,3 pu før den øker lineært etter 640 MVA. Generelt er spenningen på et høyt nivå, som er trenden for denne lukkevinkelen, se delkapittel 5.1.1. Ved lukkevinkel 0 grader viser figur 4.17 at innkoblingsstrømmen øker med økende transformatorytelse. Innkoblingsstrømmen overskrider nominell verdi når transformatorstørrelsen når 180 MVA. Samtidig er spenningen rett under nominell verdi ved denne lukkevinkelen. Merk at resultatene i figur 4.17 er referert til 260 MVA.

Figuren 4.18 som viser pu verdiene referert til den simulerte transformatorytelsen viser motsatte trender fra figur 4.17. Figur 4.18 viser nå at innkoblingsstrømmen relativt til transformatorytelsen, er strømmen i de to viste lukkevinklener, at verdiene kanskje går mot uendelig i de lave transformatorytelsene. Dette kan kanskje være på grunn av resistansen og reaktansen referert til transformatorytelsen som sin pu verdi. I de lave ytelsene kan da disse verdiene nærme seg null, noe som kan gi de høye tallene som går langt utenfor grensene til y-aksen.

Altså øker innkoblingsstrømmen med økende transformatorytelse, men pu verdien til strømmen relatert til transformatorytelsen reduseres. Større ytelser på transformatorer, er dimensjonert for høyere strømmen fordi transformatorytelsen er dimensjonerende for transformatoren. Som diskutert delkapittel 2.8 er det assosiert negative konsekvenser med høye innkoblingsstrømmen. Økt transformatorytelse gir økt innkoblingsstrøm, og en konsekvens av dette kan være økt spenningsfall og forstyrrelser i nettet. Modellen har ikke implementering av beregning av spenningsfall, så dette kan ikke bekreftes og maksverdien på spenningen ser ikke ut til å endres med økende ytelser. Selv om modellen ikke kan gi et klart bilde, er kanskje kravet fra NVF (Nasjonal veileder for

funksjonskrav i kraftsystemet) om fasevis synkronisert kobling et fornuftig krav med økende transformatorytelse siden innkoblingsstrømmen øker med ytelsen.

### 5.3.8 Transformator kjerner

Det neste parameteret eller objektet for tur er transformator kjerner. Resultatene fra simuleringen om transformator kjerner i figur 4.19, viser at det er tilnærmet ingen forskjell mellom de ulike kjernetypene simuleringmodellen har modellert. Det kan rettes kritiske spørsmål rundt at resultatene viser ingen forskjell. Årsaken til simuleringen ikke viser noen særlige utslag på kjernetypen er ikke konstantert. En teori kan være at dette er resultatene fra bare en fase som blir spenningsatt. Det kan være at når flere faser lukkes mot transformatoren samtidig, kan resultatene være annerledes og sprike mer. Modellen foretar ingen målinger forutenom den fundamentale harmonien, det kan tenkes at det kan være forskjell mellom trebent og fembent i andre harmoniske komponenter. Fordi trebent og fembent kjerner har ulik relasjon til null sekvens- og den tredje harmoniske fluksen [21] som diskutert i 2.7. Det kan derfor tenkes at å benytte strategien fra vedlegg A, kanskje kan vise ulike resultater for de harmoniske komponentene, dette blir ikke undersøkt nærmere. Teorien beskrevet i delkapittel 2.7 sier at kjernetypen skal bety noe for fluksflyten i kjernen, men resultatene målt i strøm og spenning viser tilnærmet ingen endring. Det konstateres derfor med at resultatene for kjernetypene til simuleringmodellen ikke er gyldige for det simulerte tilfelle.

### 5.3.9 Transformator koblinger

Det siste parameteret i transformatoren i analysen og diskusjonen er transformator koblinger. Figuren 4.20 viser at de fleste koblinger med en g eller G kobling som står for jord, har mer utslag enn koblinger uten jord som har en n eller N kobling, som står for nøytralpunkt. Størst er utslagene ved YG koblinger, som står for en stjerne koblet sekundærvikling med jordet-nøytralpunkt. Årsaken til at nettopp disse koblingskonfigurasjonene viser høyest strøm og spenningsverdier kan komme av figur 4.20 viser resultatene for lukking av en fase. Om det ikke er en direkte koblet vikling, så kan det ikke oppstå en strøm ved spenningssetting av en fase, fordi strømmen ikke har en returvei. Det må spenningssettes minst to faser før det oppstår en returstrøm [31] [9]. De lave strømmene fra figuren på omtrent 0,1-0,2 pu kan skyldes lekkstrømmene fra kapasitansene [28]. På bakgrunn av dette blir det ikke simulert for flere lukkevinkler for studeringsparameteret transformator koblinger. Innvirkningen av transienter for koblingsgrupper kan ikke konstateres med denne måten simuleringene er utført.

## 5.4 DCS (Delayed Closing Strategy)

Av lukkestrategiene som er presentert i delkapittel 2.9 er DCS (Delayed Closing Strategy) den valgte metoden. Simuleringmodellen utførte en form for implementering av denne metoden og presenterte resultatene i delkapittel 4.5. En metode for å lettere analysere totaliteten av DCS, kan være å legge sammen totalverdiene som vist i figur 5.2. Ved å studere disse figurene, kommer det til syne at strømmen og spenningen har omtrent ulike trender. Hvor strømmen er lav, er spenningen høy, og motsatt.

Men dette gjelder ikke over alt, men for flertallets tilfeller. Ved foreksempel  $T_a = 0$  ms og  $Delay = 10$  ms, er både strømmen og spenningen høy samtidig. Ved å benytte formel 2.27, 2.28 og vedlegg B oppimot figur 5.2, kommer det frem at tiden 5 ms samt 15 ms til  $T_a$  som er første instans innkobling. Dette gir lukkevinkel  $90^\circ$  og  $270^\circ$  som er vinkelen hvor spenningsbølgen er på sin topp verdi. I sammenheng med teorien fra delkapittel 2.3 og 2.7 er dette et godt innkoblings tidspunkt for å gi lave innkoblingsstrømmer i transformatoren, men som også på samme tid resulterer i høye koblingsspenninger. Utfra tabellene i figur 5.2 er det presentert at bruk av DCS strategien med en tidsvariasjon i innkoblingsøyeblikket på større enn  $\pm 1$  ms kan gjøre at gunstige innkoblinger kan føre til ugunstige innkoblinger, og motsatt.

Siden første innkobling skjer i fase-a og de to resterende fasene skjer i fase-b og c samtidig, kan en analyse av de to instansene isolert gi noen pekepinner til et godt innkoblingsforløp. For strømmen i fase-a vist i figur 4.21a, spiller tidsforsinkelsen  $Delay$  faktoren en neglisjerbar rolle. Den viktigste faktoren for en lav innkoblingsstrøm er at  $T_a$  tiden er koblet opp imot lukkevinkelen, noe som figur 4.1a også demonstrerer. For spenningen i fase-a spiller tidsforsinkelsestiden  $Delay$  en rolle. De gunstige tidsforsinkelsestidene  $Delay$  forandrer seg med  $T_a$ . For å analysere fase-b og c nærmere, legges verdien i tabellene sammen som vist i figur 5.1. I grove trekk er det vanskelig å påpeke visuelt side om side hva som er gunstige verdier for både  $T_a$  og tidsforsinkelsen  $Delay$  som gir lav innkoblingsstrøm og koblingsspenning. I korte tidsintervaller kan både strømmen og spenningen være lav, men for andre intervall kan verdiene av strøm og spenning være høye samtidig. Strømmen i fase-a er lavest mellom 4-16 ms uansett tidsforsinkelsestid. Med dette intervallet som utgangspunkt er spenningen i fase-a lavest med  $T_a$  verdi på 8-12 ms og en tidsforsinkelse  $Delay$  på 0-4 og 14-20 ms. Med disse tidene som utgangspunkt for innkobling av fase-b og c, gir dette at strømmen og spenningen har noe lavere resultater samtidig ved  $T_a = 10$  ms og  $Delay = 10$  ms. Strømmen i fase-b og c med en forflyttese på 2 ms gir et ugunstig innkoblingsøyeblikk. Dette demonstrerer vanskeligheten med å få både lav innkoblingsstrøm og koblingsspenning, samt hvor sensitiv teknologien kan være for tidsvariasjoner eller tidsavvik. Ved å utføre samme metode bare for innkoblingsstrømmen, gir dette at strømme i fase-a er lavest mellom 4-16 ms uansett forsinkelsestid. Ved  $T_a = 4$  og 16 ms er forsinkelsestiden neglisjerbar.  $T_a$  tidene imellom det intervallet er mer sensitivt for forsinkelsestiden  $Delay$ , men gunstige innkoblingsøyeblikk i intervallet finnes med ulike forsinkelsestider ( $Delay$ ).

En svakhet med utførelse av denne metoden for DCS, er at tidsoppløsningen ikke er høy. En differanse på 2 ms gir et intervall på  $36^\circ$ . En høyere tidsoppløsning ble ikke benyttet da simuleringene var svært belastende på datamaskinen. Simuleringene tok 4,5 timer pluss en frysetid på omtrent to døgn for å hente ut dataene fra simuleringene. En annen svakhet med utførelsen av denne lukkemethoden er at forsinkelsestiden ( $Delay$ ) ikke er lengre enn 20 ms. En lengre forsinkelsestid kan kanskje føre til at fluksen i kjernen etter første instans kan få tid til å jevne seg ut (dynamisk fluks) før de resterende fasene innkobles. Effekten av dette kommer da kanskje ikke frem ved bruk av denne forsinkelsestiden. Referanse [8] er for en lengre forsinkelsestid, mens referanse [9] er imot en lengre forsinkelsestid i kapittelet om ferdigstillelse av PoW på transformatorer til referansen. Den sistnevnte referansen fraråder bruk av DCS



Summen av Ib og Ic		Summen av Vb og Vc	
Ta [ms]	Delay [ms]	Ta [ms]	Delay [ms]
	0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20		0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20
0	0,38 0,51 0,57 0,57 0,72 0,79 0,75 0,59 0,55 0,50 0,39	0	2,59 2,63 2,25 2,28 3,00 3,32 2,85 2,21 2,21 2,47 2,62
2	0,39 0,61 0,62 0,54 0,65 0,57 0,52 0,53 0,47 0,40 0,47	2	2,60 2,26 2,40 2,91 3,33 2,82 2,43 2,20 2,61 2,56 2,54
4	0,48 0,53 0,50 0,42 0,47 0,47 0,53 0,40 0,40 0,38 0,45	4	2,49 2,43 2,94 3,21 2,77 2,71 2,42 2,64 2,77 2,75 2,51
6	1,32 0,66 0,57 0,58 1,32 1,23 0,67 0,47 0,53 1,25 1,20	6	2,33 2,92 3,35 2,77 2,46 2,51 2,53 2,81 2,78 2,55 2,58
8	1,21 0,58 1,30 1,84 1,96 1,17 0,40 1,07 1,82 1,81 1,24	8	3,15 3,24 2,90 2,19 2,46 2,47 2,66 2,64 2,40 2,44 2,92
10	0,76 1,53 2,19 2,18 1,26 0,39 1,20 2,13 2,15 1,53 0,76	10	3,28 2,87 2,17 2,20 2,39 2,57 2,52 2,25 2,29 2,88 3,24
12	1,20 1,97 1,89 1,19 0,47 1,07 1,78 1,88 1,21 0,58 1,22	12	2,75 2,33 2,39 2,50 2,75 2,72 2,49 2,52 3,00 3,29 2,98
14	1,25 1,40 0,61 0,56 0,54 1,27 1,28 0,56 0,49 0,52 1,22	14	2,81 2,70 2,89 3,06 3,04 2,80 2,84 3,31 3,61 3,22 2,70
16	0,51 0,55 0,44 0,49 0,45 0,48 0,46 0,39 0,42 0,43 0,49	16	3,28 2,72 3,01 2,98 2,75 2,77 3,26 3,55 3,16 2,71 2,69
18	0,39 0,52 0,42 0,60 0,58 0,48 0,68 0,55 0,50 0,57 0,46	18	3,19 2,55 2,50 2,25 2,27 2,91 3,27 2,86 2,25 2,17 2,39
20	0,38 0,51 0,57 0,58 0,72 0,79 0,75 0,59 0,54 0,50 0,39	20	2,59 2,63 2,25 2,28 3,00 3,32 2,86 2,21 2,21 2,47 2,62

(a) Sammenlagt maksverdier av strøm i fase-b og c. Verdier hentet fra figur 4.22a og 4.23a.

(b) Sammenlagt maksverdier av spenning i fase-b og c. Verdier hentet fra figur 4.25a og 4.26a.

Figur 5.1: Figuren viser sammenlagte maksverdier av strøm og spenning i fase-b og c med DCS (Delayed Closing Strategy) i kombinasjon med spenningstoppmetoden. Tabellene samler og legger sammen data fra delkapittel 4.5 for å lettere analysere data fra strategien.

(Delayed Closing Strategy) på lengre kabler på grunn av dannelse av ferroresonans. En annen svakhet er at figuren 5.2 bare tar for seg maksverdiene av maksverdiene. Større ikke visende skjevheter kan oppstå i fasene men ikke i figurene, men disse kan studeres separat i figur 4.21, 4.22, 4.23, 4.24, 4.25 og 4.26. På tross av svakhetene, kan det tenkes at figur 5.2 gir gode indikasjoner på gunstige og ugunstige innkoblingstidspunkt eller lukkevinkler finnes. Metoden demonstrerer også at valg av lukkevinkel og presisjonen er avgjørende for utfallet. Samtidig har spenningen og strømmen ulike gunstige og ugunstige innkoblings tidspunkt.

Total strøm		Total spenning	
Ta [ms]	Delay [ms]	Ta [ms]	Delay [ms]
	0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20		0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20
0	1,52 1,67 1,89 1,90 2,01 2,15 2,11 1,96 1,91 1,86 1,75	0	3,98 4,00 3,38 3,32 4,24 4,49 4,03 3,30 3,27 3,75 4,05
2	1,14 1,49 1,48 1,33 1,55 1,47 1,42 1,43 1,37 1,30 1,36	2	4,44 3,51 3,70 4,21 4,63 4,12 3,73 3,50 3,91 3,93 3,84
4	0,83 0,90 0,80 0,66 0,71 0,81 0,87 0,64 0,64 0,62 0,78	4	4,43 4,04 4,55 4,82 4,38 4,32 4,03 4,25 4,39 4,36 4,12
6	1,54 0,90 0,81 0,82 1,56 1,47 0,91 0,71 0,77 1,49 1,44	6	3,65 4,47 4,91 4,33 4,02 4,07 4,08 4,36 4,34 4,10 4,13
8	1,34 0,73 1,44 1,99 2,11 1,32 0,54 1,22 1,96 1,96 1,39	8	4,32 4,44 4,16 3,30 3,64 3,99 4,06 4,02 3,57 3,51 4,17
10	0,79 1,58 2,20 2,18 1,26 0,39 1,20 2,14 2,18 1,57 0,79	10	4,41 4,18 3,29 3,29 3,93 3,93 3,92 3,33 3,38 4,11 4,37
12	1,32 2,11 2,03 1,32 0,61 1,21 1,92 2,02 1,34 0,72 1,36	12	4,08 3,42 3,60 4,08 4,06 4,25 3,56 3,64 4,25 4,47 4,23
14	1,46 1,63 0,83 0,79 0,76 1,49 1,50 0,78 0,72 0,75 1,45	14	4,26 3,93 4,34 4,62 4,67 4,11 4,17 4,65 4,94 4,55 4,03
16	0,85 0,78 0,66 0,72 0,79 0,84 0,70 0,62 0,65 0,74 0,82	16	4,65 4,12 4,54 4,57 4,19 4,13 4,62 4,91 4,52 4,07 4,05
18	1,09 1,26 1,14 1,49 1,43 1,27 1,55 1,42 1,38 1,44 1,33	18	4,39 4,03 3,98 3,51 3,48 4,13 4,49 4,08 3,46 3,38 3,75
20	1,52 1,67 1,89 1,90 2,01 2,15 2,11 1,95 1,91 1,87 1,75	20	3,98 4,00 3,38 3,32 4,24 4,49 4,03 3,30 3,27 3,75 4,05

(a) Sammenlagt maksverdier av strøm i alle tre fasene. Verdier hentet fra figur 4.21a, 4.22a og 4.23a.

(b) Sammenlagt maksverdier av spenning i alle tre fasene. Verdier hentet fra figur 4.24a, 4.25a og 4.26a.

Figur 5.2: Figuren viser sammenlagte maksverdier av strøm og spenning i alle tre fasene med DCS (Delayed Closing Strategy) i kombinasjon med spenningstoppmetoden. Tabellene samler og legger sammen data fra delkapittel 4.5 for å lettere analysere resultatene fra strategien.

## 5.5 Tilleggssimuleringer

Tilleggssimuleringene i vedleggene **A**, **B** og **C** tar ikke for seg en systematisk analyse som viser hvilke transienter som reduseres eller økes ved lukking av en fase. Simuleringene demonstrerer andre målinger og parametere som kan være nyttig å ta hensyn til ved transformatorinnkoblinger.

## 5.6 Diskusjon av simuleringsmodellen

Simuleringsmodellen har oppnådd sin oppgave med å kartlegge de utvalgte parametrene og bruk av kontrollert kobling. Modellen ble bygget i kapittel 3, benyttet i kapittel 4 og analysert i dette kapitlet. MATLAB Simulink modellen ble laget med standardblokker fra Specialized Power Systems pakken og styrt via MATLAB. Utgangspunktverdiene til parameterene ble hentet fra et eksisterende produksjonsanlegg i Norge og kabeldata ble hentet fra databladet: [2]. Nullsekvens parameterene til kabelen ble generert av RLC Line Parameter Tool i Simulink, og det er usikkerhet om det kan være menneskelige eller kalkuleringsfeil inne i bildet når det gjelder å knytte opp disse parameterene som ble generert her inn i kabelmodellen. Kabelen benytter distribuerte parametere og er basert på Bergerons's traveling wave metode som er brukt i Elektro Magnetisk Transient Program. Resultatene fra kabellengden diskuterer usikkerhetene knyttet opp imot kabellengder som er utenfor normale lengder for slike produksjonsanlegg som diskutert i delkapittel 5.1.2.

Det er flere deler av modellen som er ikke helt presise rekonstruksjoner av den virkelige verden. Kilden som representerer forhåndsliggende nett er forenklet til en ekvivalent. Effektbryteren er en ideell bryter uten innkoblingsavvik forårsaket av mekanikk, dielektriske styrker eller andre interne eller eksterne parametere. En fordel med dette er at resultatene er innhettet fra den faktiske lukkevinkelen. En effektbryter har flere variabler som gjør at den ønskede lukkevinkelen ikke blir nådd, og ofte blir det gitt et sannsynlig lukkeintervall som effektbryteren vil lukke innenfor. Resultatene som modellen presenterer kan da knyttes opp mot lukkeintervallet den fysiske effektbryteren gir med alle sine variabler som er beskrevet i delkapitlet 2.6 og delkapitlets underkapitler oppimot de faktiske lukkevinklene som resultat. Transformatorblokken kan simulere ulike kjernetyper, men gir ikke mulighet for å velge kjernedimensjonene. I dette tilfelle er heller ikke kjernedimensjonene kjent for transformatoren som transformatorblokken er modellert etter. Modellen som vist i figur 3.1 er derfor ikke en 100 % gjengivelse av det reelle eksisterende anlegget. Parameterene som simuleres for, er i flere tilfeller ekstremt høye og lave verdier, som kanskje aldri vil finne plass i typiske produksjonsanlegg. Resultatene viser derimot trendene som parameterene bidrar med når det gjelder innkoblingsstrøm og koblingsspenninger. Det andre som er en mangel med simuleringsmodellen, er at målinger av strøm og spenning sitt harmonisk innhold ikke blir foretatt. Innkoblingsstrømmer kan bidra med høyt harmonisk innhold [3], noe som denne modellen ikke kan fange opp med mindre FFT analysis tool er benyttet som vist i vedlegg A. Samtidig er den direkte strømkomponenten høy for innkoblingsstrømmer [3] som bekreftet i vedlegg A.

En av de største styrkene til modellen er muligheten å gjøre mange simuleringer og styringen via MATLAB. Kapittel 4 viser resultatene fra over 6 000 simuleringer, og trendene til parameterene kan systematisk observeres og defineres i dette kapitlet. Altså er det flere variabler i modellen som ikke er en nøyaktig rekonstruksjon av virkeligheten og kan derfor ikke gjenkonstruere nøyaktig samme resultater som kan oppstå i det faktiske anlegget. Men modellen kan til en grad konstruere parameter-trendene for anlegget. Resultatene som er presentert fra modellen skal ikke tolkes som eksakte, men de skal presentere trendene til parameterene og endringene fra simulering til simulering. En sammenligningsstudie for EMTP transient software forklarer at det finnes et mer standardisert simuleringsprogram som er spesifikt rettet mot å simulere transientproblemer i slike anlegg, dette heter ATP-EMTP. Programmet er designet for å simulere den fysiske prosessen til høyspentlinjer og transformatorer raskt og praktisk. MATLAB simulink er mer rettet mot dynamiske system og har gode muligheter for simulering av kraftelektronikk, signalprosessering og kontroll. Likevel viser studien at MATLAB Simulink og ATP-EMTP kan simulere problem av samme klasse, men MATLAB Simulink brukte 513% lengre simuleringstid for problemet av samme klasse sammenlignet med ATP-EMTP [12].

## 5.7 Diskusjon av metoden

Det er gjort flere funn og bekreftelser av teori forklart i kapittel 2 med bruk av metoden i denne rapporten. Dette gjør at metoden kan gi indikasjoner på hvilke av de utvalgte parameterene som øker eller reduserer innkoblingsstrømmer og koblingsspenninger når en transformator uten last spenningssettes, samt om PoW (Point on Wave) fører til høye transienter. Dette er den viktige motivasjonen i kapittel 1 for å avdekke hva som skaper transienter som reduserer levetiden på transformatorer. Det kan tenkes at rapportens systematiske metode også kan benyttes for andre studeringsobjekt som reaktorer, kondensatorbatteri/banker og høyspentlinjer eller kabler. Dette gjøres med å bytte ut transformatorblokken fra kapittel 3 til det nye studeringsobjektet av interesse og utføre testene fra kapittel 4 på nytt. Nye analyser, diskusjoner, resultat og konklusjoner kan deretter trekkes.

Svakheten og styrken av metoden kan relateres til brukerens tilgjengelighet på eksisterende informasjon og parametere til anlegget. Styrken er at absolutt alle anleggsparametere ikke behøves, samtidig som flere detaljer kanskje kan gjøre resultatene mer og eller mindre nøyaktige. Dette er også diskutert i delkapittel 3.2. Den andre svakheten kan relateres til brukerens programmeringsevner, håndtering av simuleringsprogrammer, datamaskinkraft, korrekt gjenskaping av anlegg, hvordan utføre mange simuleringer effektivt og data behandlingen av simuleringsresultatene. Disse punktene gir føringer på hvordan resultatene blir presentert og hentet ut.

Metoden og resultatene for transformatoren uten last, kan ikke gi et overbevisende svar på om det er innkoblingsstrømmer eller dielektrisk stress som er mest ødeleggende for transformatoren. Dette er noe som CIGRE WG A3.07 har spurt seg siden år 2000. Tendensene til kontrollert kobling sammenfalles til å eliminere eller redusere innkoblingsstrømmen og den assosierte spenningsforstyrrelsen ved spesielt verste

spenningssettingstilfellene [9]. Resultatene i 4.1a gir indikasjoner på hva som er verste og beste tilfeller for strøm og spenningstransienter, når en transformator uten last spenningsettes med null gjenværende fluks i kjernen.

Den presenterte metoden og resultatene i denne rapporten gir et bilde av hvilke parametere som er kritiske ved spenningssetting av transformator uten last og bruk av PoW. Det er gitt en klar visuell presentasjon og bekreftelse av strøm versus spenningstransienter problematikken som vist i figur 4.1a. Altså som diskutert: lukkevinkler som gir lav innkoblingsstrøm gir høye koblingsspenninger, og vinkler som gir lave koblingsspenninger gir høye innkoblingsstrømmer. Et lengre sammendrag og samlet konklusjon av simuleringsresultatene blir det neste temaet.

## 5.8 Samlet konklusjon

Teorien, analysen og diskusjonen avdekket hvilke av de utvalgte simulerte parametrene som bidrar til transienter som reduserer levetiden og leveringskvaliteten når transformatorer som spenningsettes uten last. Teorien om en enfaset transformator uten last og null gjenværende fluks ideelt kobles inn når spenningsbølgen er på topp og ikke når spenningen krysser null med tanke på innkoblingsstrøm, kommer til syne i simuleringsresultatene. De fleste parametrene ved lukkevinkel  $0^\circ$  har en gjennomgående trend med lav koblingsspenning over nominell verdi, og innkoblingsstrømmen er høy. Ved lukkevinkel  $90^\circ$  er den gjennomgående trenden motsatt fra lukkevinkel  $0^\circ$ . Da er tilfellet høye koblingsspenninger, og innkoblingsstrømmen er tilnærmet uendret og lav, med unntak for kabellengden. Kabelmodellen er det store usikkerheter rundt og blir derfor ikke gjeldene resultater for visse kabellengder. Ved å knytte dette oppimot PoW, kan det tenkes at anleggets parametere ikke utspiller seg stort om lukkevinkelen er den korrekte for transformatoren når fluksen er null. Det generelle for parametrene, er at ved lav innkoblingsstrøm kommer høy koblingsspenning og ved lav koblingsspenning kommer høy innkoblingsstrøm med bruk av spenningstoppmetoden.

Lukkevinkelen og den gjenværende fluksen i transformator kjernen er parametrene som er omtrent mest utslagsgivende med tanke på innkoblingsstrøm. PoW teknikkene og teknologien har sin rot og utgangspunktet disse parametrene. Resultatene av simuleringene viser at dette er fornuftige parametere å fokusere på. Simuleringene av DCS (Delayed Closing strategy) viser at både innkoblingsstrøm og koblingsspenninger kan være høy og lav samtidig. Simuleringene er utført uten tidsforsinkelser. Styrken av dette er at utfallet av tidsavvikene som diskutert i delkapittel 2.6.1 kan demonstreres ved å se på verdiene til nabocellene i tabellene for lukkestrategien. Konsekvensene av dårlig presisjon kommer derfor til syne i resultatene til DCS. En vektlegging av korrekt lukkevinkel og presisjonen er da viktig for å oppnå gode resultater for PoW. Resultatene fra simuleringene med  $R$  parametere som viklingsresistans i transformatoren og i forhåndslygnede nett kan gi indikasjoner på resistansen bestemmer dempehastigheten. Transformatorer nær generator har lav demping i systemet kontra transformatorer lengre ute i nettet. Temperaturøkning i viklingene kommer av overbelastning, og høye temperaturer på viklinger er svært negativt for levetiden på transformatoren [36]. Derfor er generatortransformatorer kanskje mer utsatt for innkoblingsstrømmer da det

Tabell 5.1: En oppsummering av innvirkningene ulike parametere har på maksverdier av strøm og spenning når en transformator i et vannkraftanlegg spenningsseries uten last.

Studeringsparameter	Resultater: Lukkevinkel 0°	Resultater: Lukkevinkel 90°
Lukkeinkel	Høyest innkoblingsstrøm og lavest koblingsspenning	Lav innkoblingsstrøm og høyest koblingsspenning
Kabellengde	Høy innkoblingsstrøm og lav koblingsspenning	Høy koblingsspenning lav innkoblingsstrøm. Strømmen øker med kabellengden. Innkoblingsstrøm når nominell verdi ved 6 km
Kortslutningsytelse	Sterk påvirkning på innkoblingsstrøm. Desto høyere ytelse, desto høyere innkoblingsstrøm	Nov variasjoner i høye koblingsspenninger. Generelt sett høye koblingsspenninger for vinklene, samtidig med lav innkoblingsstrøm
X/R fordeling	Gir lavere innkoblingsstrøm i forholdsverdier opp til 1. Lavere ratioverdier gir hurtigere dempning	Tilnærmet uendret resultat fra de opprinnelige verdiene
Viklingsresistans	Noe innvirkning på innkoblingsstrømmen. Desto høyere resistans, desto lavere innkoblingsstrøm, spenningsfall og raskere dempning av transientperioden	Tilnærmet uendret resultat fra de opprinnelige verdiene
Viklingsresistansfordeling	Tilnærmet uendret resultat fra de opprinnelige verdiene	Tilnærmet uendret resultat fra de opprinnelige verdiene
Viklingsreaktans/ Lekkreaktans	Noe påvirkning av innkoblingsstrøm. Desto lavere reaktans, desto høyere innkoblingsstrøm	Noen lunde likt resultat fra de opprinnelige verdiene
Viklingsreaktansfordeling	Fordelingen noe har innvirkning. Høyere fordeling på sekundærsiden gir høyere innkoblingsstrømsammenlignet med lavere fordeling på sekundærsiden. Høy fordeling på primærsiden gir lavest innkoblingsstrøm. Lavere spenningsdipper for intervallet 60/40 til 85/15%	Tilnærmet uendret resultat fra de opprinnelige verdiene
Magnetiseringsresistans	Liten innvirkning. Høy innkoblingsstrøm for pu verdier nært null, da er koblingsspenningsverdiene også lavere	Tilnærmet uendret resultat fra de opprinnelige verdiene over 500 pu
Gjenværende fluks	Påvirker innkoblingsstrømmen sterkt med økende fluks i kjernen	Høy koblingsspenning og lav innkoblingsstrøm jevnt over hele intervallet
Transformatorytelse	Påvirkning. Økende ytelser gir økende innkoblingsstrøm. Relativt til transformatorytelsens nominelle strøm, reduseres pu verdien av innkoblingsstrømmen	Noe varierende spenningsverdier med generelt høye koblingsspenninger og lave innkoblingsstrømmer
Transformatorjerne	Ingen tydelige differanse mellom kjernene og tilnærmet uendret resultater fra opprinnelige verdier	Ingen tydelige differanse mellom kjernene og tilnærmet uendret resultater fra opprinnelige verdier
Transformatorkobling	Resultater ikke gyldige	Resultater ikke gyldige
DGS (Delayed Closing Strategy)	Høy innkoblingsstrøm og lav koblingsspenning	Høy koblingsspenning og lav innkoblingsstrøm

elektromagnetiske stresset på viklingene varer lengre når dempningen er lav.

En oppsummering av simuleringsresultatene blir gitt i tabell 5.1 med tilleggskommentarer gitt i tabell 5.2. Av parametere som simuleres for og som kan styres for anlegg i drift, blir gitt i tabell 5.3. Parameterene som kan styres i drift, kan være lurt å fokusere på. Fordi disse parameterene blir spillereglene for PoW og hva utstyret kan ta hensyn til i koblingsoperasjoner. En kort oppsummering og forslag til videre arbeid blir presentert i neste kapittel. Der blir også en sammensatt anbefaling og konklusjon fra dette kapittelet gitt.

Introduksjonen av kapittel 1 startet med forklare at sirkulær økonomi og FNs bærekraftsmål nummer 12 handler om å minske ressursbruken og benytte ressursene så lenge som mulig. PoW og kjennskap til parameteres innvirkning kan hjelpe å redusere stresset på transformatorer og andre objekter fra innkoblingsstrømmer og koblingsspenninger. Reduksjon av stress på transformatorer i form av innkoblingsstrømmer og koblingsspenninger kan da knyttes direkte opp mot disse punktene da levetid på transformatoren kanskje forlenges og transformatorhavari reduseres. I tillegg kommer også en bedring i leveringskvaliten.

Tabell 5.2: Tilleggs kommentarer til oppsummeringen av tabell 5.1.

Studeringsparameter	Tilleggs kommentarer
Lukkevinkel	Kan ikke oppnå både lav innkoblingsstrøm og koblingsspenning
Kabellengde	Usikkert intervall i 0,0-0,2 km som gir statistiske ekstremverdier. For lange kabler som 10 km, justeres beste og verste lukkevinkel for strøm og spenningstransienter. De lengste kabellengdene for spenningssetting av generatortransformator overskrider sjeldent 1,5 km
Kortslutningsytelse	Ved 0° er stigningen av innkoblingsstrømmen raskest i starten, før den flater sakte ut med stigende verdier
X/R fordeling	Lavere fordelingsverdi gir lavere innkoblingsstrøm og hurtigere demping av transienter. Høye fordelingsverdier gir motsatt effekt
Viklingsresistans	Trinnkobler kan kanskje påvirke smått denne verdien
Viklingsresistansfordeling	Ingen innvirkning
Viklingsreaktans/ Lekkreaktans	Spenningen spriker på det meste med 0,3 pu fra de opprinnelige verdiene
Viklingsreaktansfordeling	Lavest fordeling på sekundærside gir laves innkoblingsstrøm
Magnetiseringsresistans	Ved parameterverdier nær null, er det høyere innkoblingsstrømmer og koblingsspenninger
Gjenværende fluks	Spenningen påvirkes mindre og avviker smått fra de opprinnelige verdiene
Transformatorytelse	Er noen usikkerheter i resultatene siden flere transformatorparametere tar utgangspunkt i ytelsesverdien som baseverdi
Transformator-kjerne	Tilnærmet ingen innvirkning kan skyldes lukking av en fase
Transformator-kobling	Lukking av en fase med isolert nøytralt punkt gir ikke returstrømmer
DCS (Delayed Closing Strategy)	Resultatene avhenger av presisjonen som igjen fører til valg av lukkevinkel

Tabell 5.3: Hvilke parametere i et vannkraftanlegg som kan styres i drift. Disse parameterene kan være lurt å fokusere på for å redusere innkoblingsstrømmene og koblingsspenningene i anlegg som er i drift.

Parameter	Kan styres i drift:
Lukkevinkel	Ja. Styres av effektbryter
Kabellengde	Nei. Permanent installasjon
Kortslutningsytelse	Nei. Forutbestemt av forhåndsliggende nett
X/R forhold	Nei. Forutbestemt av forhåndsliggende nett
Viklingsresistans	Svakt. Kan endres smått med trinnkobler
Viklingsresistansfordeling	Nei. Permanent installasjon
Viklingsreaktans	Svakt. Kan kanskje endres smått med trinnkobler
Viklingsreaktansfordeling	Nei. Permanent installasjon
Magnetiseringsresistans	Nei. Permanent installasjon
Gjenværende fluks	Kan bestemmes med kontrollert utkobling
Transformatorytelse	Nei. Permanent installasjon
Transformator-kjerne	Nei. Permanent installasjon
Transformator-koblinger	Nei. Permanent installasjon

# Kapittel 6

## Konklusjon

Dette kapittelet skal konkludere og oppsummere de viktigste funnene som er gjort i denne rapporten. Til slutt blir det presentert forslag til fremtidig arbeid.

### 6.1 Avsluttende kommentarer

Introduksjonen til problemstillingen i kapittel 1, handlet om at høye innkoblingsstrømmer og koblingsspenninger reduserer levetiden på transformatorer og reduser leveringskvaliteten, når en transformator uten last spenningssettes. Kapittel 2 presenterte grunnleggende teori om dannelse av innkoblingsstrømmer og koblingsspenninger i transformatorer som spenningssettes uten last. Den systematiserte metoden simulerte over 6 000 simuleringer for utvalgte parametere og bruk av kontrollert kobling gjennom modellen bygget i kapittel 3. Analysen og diskusjonen av resultatene fra metoden gir indikasjoner på hvilke av parameterene som har sterkest og svakest innflytelse på innkoblingsstrømmer og koblingsspenninger når en transformator uten last spenningssettes, samt om bruk av kontrollert kobling kan føre til høye transienter av denne typen. Resultatet kan være med på å forlenge levetiden til transformatoren, som er et riktig steg for sirkulær økonomi og FNs bærekraftsmål 12; ansvarlig forbruk og produksjon. I tillegg kan dette forbedre forsyningskvaliteten. De viktigste hovedfunnene i rapporten er:

- En systematisk simulering av utvalgte parametere kan gi indikasjoner på hvilke parametere som øker eller reduserer innkoblingsstrømmer og koblingsspenninger når en transformator uten last spenningssettes. En kort oppsummering av innvirkningen til de utvalgte parameterne er gitt i tabell 6.1.
- Lukkevinkelen og gjenværende fluks i kjernen er noen av de mest utslagsgivende parameterne. Disse parameterene kan styres i drift, noe som også gjør parameterene viktig å sette søkelys på fremfor de andre utvalgte parameterene.
- Lukking av effektbryter når spenningen krysser null gir høy innkoblingsstrøm og lav koblingsspenning, mens lukking på spenningens bølgetopp gir motsatt utslag når det er null gjenværende fluks i kjernen, som vil tilsi spenningstoppmetoden.
- DCS (Delayed Closing Strategy) metoden kan føre til lav innkoblingsstrøm og koblingsspenning, men ikke alltid lav på samme tid i kombinasjon med spenningstoppmetoden.

Tabell 6.1: En kort oppsummering av parameterkontribusjonene av ulike parametere når en transformator uten last spenningssettes.

Parameter	Innkoblingsstrøm	Koblingsspennning
Lukkevinkel	Sterk påvirkning	Sterk påvirkning
Kabellengde	Liten endring fra opprinnelige verdier, ved lengder under 2 km	Noe påvirkning
Kortslutningsytelse	Sterk påvirkning	Påvirkning
X/R forhold	Noe påvirkning. Påvirker dempehastigheten	Liten endring fra de opprinnelige verdiene
Viklingsresistans	Noe påvirkning	Noe påvirkning
Viklingsresistansfordeling	Ingen påvirkning	Ingen påvirkning
Viklingsreaktans	Påvirkning, størst ved lave verdier	Liten endring fra de opprinnelige verdiene
Viklingsreaktansfordeling	Noe påvirkning	Liten endring fra de opprinnelige verdiene
Magnetiseringsresistans	Lite påvirkning	Liten påvirkning
Gjenværende fluks	Sterk påvirkning	Liten endring fra de opprinnelige verdiene
Transformatorytelse	Sterk påvirkning	Noe påvirkning
Transformatorjerne	Resultater ikke gyldige	Resultater ikke gyldige
Transformatorkobling	Kan ikke påvises med lukking av en fase	Kan ikke påvises med lukking av en fase

- Lavest mulig innkoblingsstrøm ved bruk av PoW (Point on Wave) krever høy presisjon av lukkeøyeblikk og rett valg av lukkevinkel. En differanse større enn  $\pm 1$  ms kan i noen tilfeller gjøre at et gunstig øyeblikk for å redusere innkoblingsstrømmen, kan gå over i et ugunstig tilfelle og motsatt.
- PoW kan føre til høy innkoblingsstrøm eller koblingsspenninger ved utilstrekkelig presisjon og feil valg av lukkevinkler. Teknologiens mål om lav innkoblingsstrøm har også en ulempe med indikasjoner til høye koblingsspenninger ved bruk av spenningsstoppmetoden. Innkobling før spenningstoppen reduserer de høyeste koblingsspenningsene, men gjør innkoblingsstrømmen noe høyere, men høyeste innkoblingsstrøm blir unngått.

## 6.2 Fremtidig arbeid

Det er flere punkter som kan analyseres og forbedres videre i denne rapporten, for å dekke et større spekter av transformatorspenningssetting uten last. Noen punkt til videre arbeid kan være:

- Benytte annet EMTP (Elektro Magnetisk Transient Program) som tar for seg mer i detalj kabellengdens innvirkninger.
- Gjennomføre beregninger av spenningsfall ved spenningssettingen og ikke bare maksverdiene for spenningen.
- Utvide analysen av det harmoniske innholdet for å gi en algoritme som kan detektere innkoblingsstrømmen på bakgrunn av harmonisk innhold, samt gjenkjenningen av innkoblingsstrømbølgene ved hjelp av null krysningstidene til bølgen.



# Tillegg A

## Tillegg: Harmonisk innhold

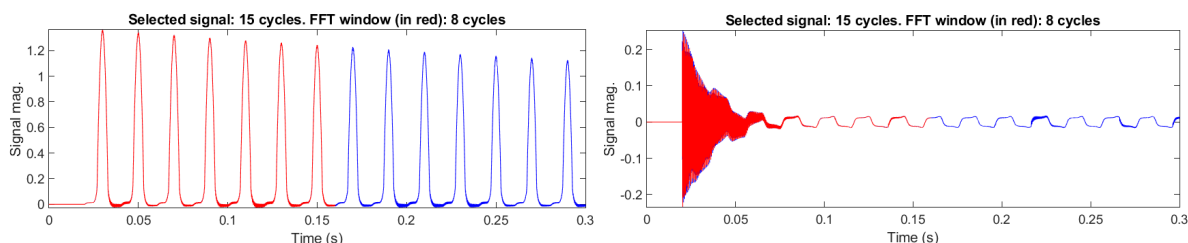
Dette vedlegskapittelet knytter seg opp imot teorien som er beskrevet i delkapittel 2.11 om harmonisk innhold og visualisering av innkoblingsstrøm. Det skal gjøres forsøk på å se om modellen bygget i kapittel 3 kan visualisere slike harmoner og sinusformen til en innkoblingsstrøm. Dette blir gjort i et vedlegg siden dette ikke er et studeringsparameter.

### A.1 Metode og resultat

Det blir tatt i bruk verktøyet FFT Analysis i Simulink for å presentere innholdet i innkoblingsstrømmen ved lukkevinkel 0 og 90°. Målingene blir foretatt i fase-a. Figurene i A.1 viser sinusformen til innkoblingsstrømmen. Figurene A.2 viser det harmoniske innholdet til strømmene fra figur A.1. Figuren A.2 viser innholdet innhentet fra 8 sykluser mellom frekvensen 0-500 Hz. Et større frekvensspekter ble ikke benyttet siden verdiene ved høyere frekvenser er lave og ofte ikke tilstedeværende i simuleringen. Dette FFT Analysis verktøyet har et grafisk brukergrensesnitt vindu, og det blir derfor ikke foretatt en analyse for enhver lukkevinkel.

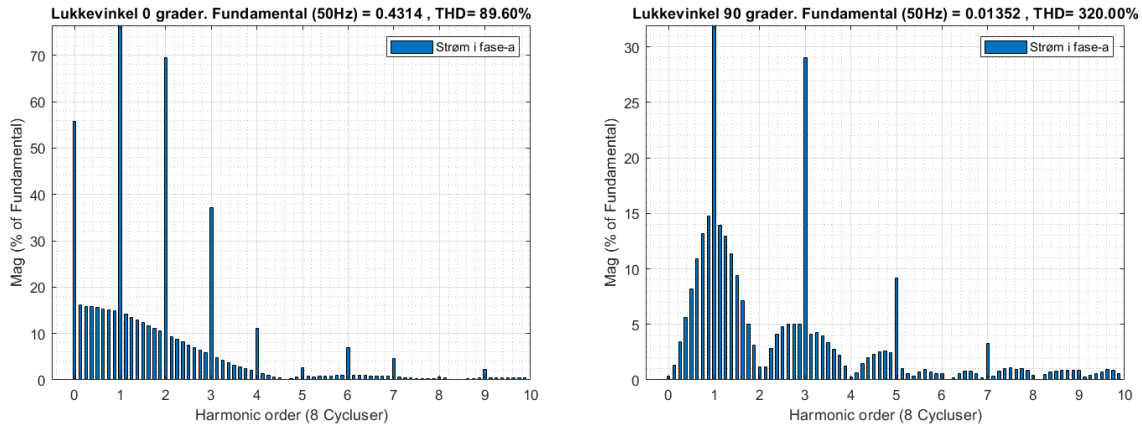
### A.2 Analyse og diskusjon

Resultatene fra figurene A.1 og A.2 viser karakteristikken til innkoblingsstrømmen ved lukkevinkel 0 og 90°. Ved lukkevinkel 0° som vises i figur A.1a, er sinusformen til strømmen lik den forventede strømmen som forklart i kapittel 2 med figur 2.25,



(a) Innkoblingsstrøm til en transformator uten last ved lukkevinkel 0°. (b) Innkoblingsstrøm til en transformator uten last ved lukkevinkel 90°.

Figur A.1: Sinusformen til innkoblingsstrømmen til en transformator uten last.



(a) Harmonisk innhold fra det rødmerkete signalet i figur A.1a som er ved lukkevinkel  $0^\circ$ . (b) Harmonisk innhold fra det rødmerkete signalet i figur A.1b som er ved lukkevinkel  $90^\circ$ .

Figur A.2: Harmonisk innhold til det rødmerkede signalet i figur A.1.

bare figuren har motsatt polaritet. Dermed kan det konkluderes at modellen har evner til å simulere den asymmetriske sinusformen til en innkoblingsstrøm. Figuren A.2a viser at innkoblingsstrømmen som vist i figur A.1a inneholder en DC komponent på 55% av den fundamentale verdien. Strømmen inneholder en sterk andre harmonisk komponent på 70% av den fundamentale verdien, og den tredje harmoniske inneholder ca 37% av den fundamentale verdien. Det finnes både oddetalls- og partallsfrekvenser i innkoblingsstrømmen. Ved lukkevinkel  $90^\circ$  demonstrert i figur A.2b, viser innkoblingsstrømmen som vist i figur A.1b inneholder ingen DC komponent av den fundamentale frekvensen. Strømmen inneholder en sterk tredje harmonisk komponent på 28% av den fundamentale verdien, og den femte harmoniske inneholder ca 10% av den fundamentale verdien. Trenden i harmoniene viser det er oddetalskomponentene som markerer seg sterkest og komponentene har lavere verdier sammenlignet med lukkevinkel  $0^\circ$ .

Som diskutert i delkapittel 2.11 kan dekomponeringen av sinusbølgen og informasjonen av det harmoniske innholdet, hjelpe vernene til å detektere om strømmen er en innkoblingsstrøm eller ikke. Figuren A.1a og A.2a gjenspeiler de komponentene som vernene skulle detektere for å navngi strømmen en innkoblingsstrøm. Egenskapene og informasjonene er høy asymmetri, stor DC komponent og innholdet av de harmoniske komponentene. Dersom det lages en suksessfull algoritme som tar dette i betraktning og klarer å detektere innkoblingsstrøm, kan vernene blokkere tripp signalene som gjør at vern ikke feilopererer på grunn av høy innkoblingsstrøm. Denne metoden om å detektere innkoblingsstrømmen reduserer ikke innkoblingsstrømmen. Men metoden kan hjelpe vern med å ikke feiloperere ved innkobling av transformator ved lukkevinkler som gir høy innkoblingsstrøm. Dette kan forbedre forsyningskvaliteten i et aspekt siden vernene ikke feilopererer, men transformatoren blir påtrykt de høye og skadelige innkoblingsstrømmene, på samme tid reduseres leveringskvaliteten som følge av dette. Noen av komplikasjonene av detekteringen diskuteres i delkapittel 2.11.

## A.3 Konklusjon

Den bygde modellen fra kapittel 3 kan analysere og gjenskape innkoblingsstrøm med harmonisk innhold. Dersom en algoritme for detekteringen av innkoblingsstrøm blir laget og kan hindre feiloperering av vern, kan dette være en bedring av leveringskvaliteten i det aspektet men ikke økning i levetiden på transformatoren eller andre aspekter av økt leveringskvalitet.

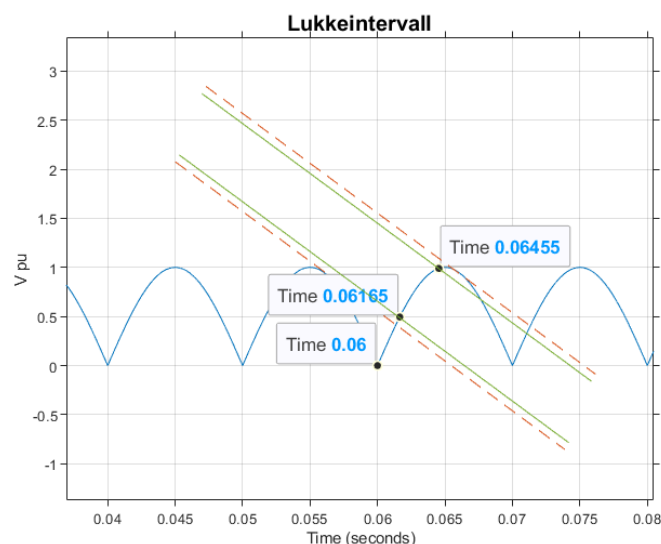
# Tillegg B

## Tillegg: Lukking på stigende bølge

Dette vedlegget viser et eksempel på lukking av effekt bryter på stigende bølge med hensyn til *RDDS* (Rate of Decrease of Dielectric Strength). Det blir også vist et praktisk eksempel på å omregne tid til lukkevinkel.

### B.1 Metode og resultat

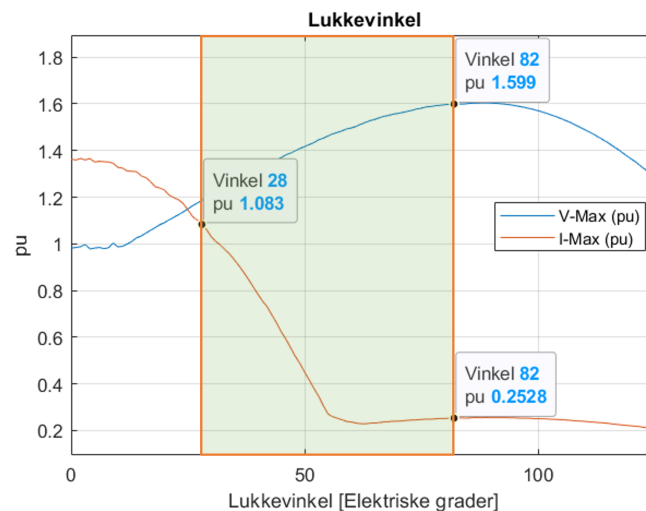
I eksempelet fra figur B.1 er *RDDS* satt til 108 kV/ms, som i følge [9] tilsvarer til 1 pu i et 400 kV nettsystem med en nettfrekvens  $f$  på 50 Hz. Det mekaniske tidsavviket settes til  $\pm 1$  ms. Deretter settes 60 ms som referansepunkt og blir da starttiden 0 ms og vinkelen  $0^\circ$ . Tidene de to grønne strekene når spenningskurven og oppretter elektrisk kontakt er da etter 1,56 ms og 4,55 ms fra referansetiden som er  $0^\circ$ . Dette er maksimum tidene i begge ender uten at de røde stiplede strekene går over i andre bølger enn målbølgene.



Figur B.1: Eksempel på tidsintervall som treffer stigende spenningsbølge med hensyn til *RDDS* (Rate of Decrease of Dielectric Strength) på 1 pu. Rød siplert strek er et tidsavvik på 1 ms.

## B.2 Analyse og diskusjon

Figuren B.1 kan benytte eksempelet i delkapittel 2.6.2, med figur 4.1 og formel 2.27, for å omgjøre lukkevinkelen til lukketiden. Eksempelet for en effektbryter med 1 pu  $RDDS$  som skal lukke på stigende bølge, resulterer i et lukkeintervall fra  $28,08^\circ$  til  $81,90^\circ$ . Større intervall gjør at innkobling kan skje før eller etter den satte målbølgen. Resultatene til lukkeintervallet som treffes på stigende spenningsbølge, vises i figur B.2. Figuren viser lukkeintervallet til eksempelet unngår de aller høyeste innkoblingsstrømmene, samtidig som intervallet inneholder lukkevinkler som resulterer i lavest innkoblingsstrøm. I samme tilfelle viser figuren at spenningen er på noen av de høyeste koblingsspenningene på slutten av lukkeintervallet. Det resulterte lukkeintervallet er det største intervallet med det gitte tidsavviket på 1 ms og  $RDDS = 1$  pu. PoW (Point on Wave) kontrollere avhenger av pålitelige operasjonstider og gode dielektriske stryker. Utmerket dielektriske egenskaper betegnes som bratte  $RDDS$  kurver, desto brattere kurver desto mer eksakte tider [9].



Figur B.2: Elektrisk kontakt på stigende bølge med  $RDDS$  på 1 pu.

## B.3 Konklusjon

Ved å lukke på stigende spenningsbølge blir de høyeste innkoblingsstrømmene unngått. En høyere  $RDDS$  kan gi høyere presisjon av lukkevinkelen. Det kan gjøre at målbølgen treffes uten at bølgen foran eller bak blir truffet selv om spenningen har en sinusform, effektbrytere har et tidsavvik og  $RDDS$  kurven er synkende med tiden og skråformet.

# Tillegg C

## Tillegg: 3I0 strøm

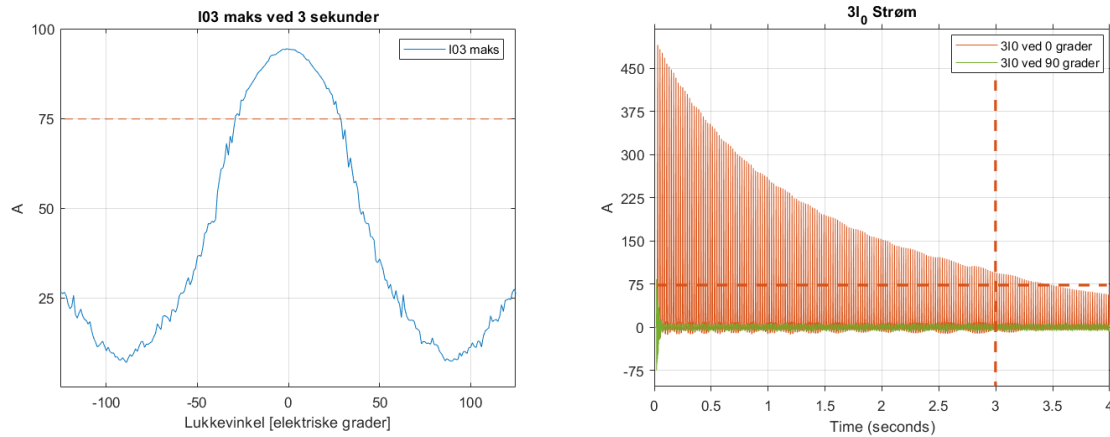
Dette vedlegget tar for seg et forsøk på å måle en 3I0 strøm i simuleringsmodellen. Forsøket blir gjort i et vedlegg siden dette ikke er et studeringsparameter.

### C.1 Metode og resultat

Det blir foretatt simuleringer som måler 3I0 strømmen. Dette utføres på samme måte som forklart i delkapittel 4.2.1 forutenom målingene blir foretatt en annen plass i modellen. Strømmen som måles går gjennom nullpunktet til jord på høyspenningssiden i transformatoren. Som forklart i delkapittel 2.10, har nullfølgestrømmen 3I0 en strømvhengig tidsforsinkelse utløsningskarakteristikk på vernene i henhold til NEK EN 60255-151. For demonstrasjonen skyld, settes simleringens grense til 75 A og 3 sekunder selv om verngrensene har strømvhengig tidsforsinkelse. Effektbryteren lukkes etter 20 ms, noe som utgjør 0,67% av tidsforsinkelsen og blir derfor sett bortfra. Det simuleres og måles for lukkeintervallet -125 til 125 grader, som resulterer i 251 simuleringer. Resultatet av dette blir vist i figur C.1a, som viser maksverdiene til 3I0 strømmen som er ved 3 sekunder. Figur C.1b viser transientforløpet til 3I0 strømmen, når lukkevinkelen er 0 og 90 grader. Det er satt en horisontal rød stiplet strek ved 75 A i figuren C.1. Det er også satt en rød stiplet strek vertikalt på x-aksen i figur C.1b for å vise at dette er tiden den satte grensen er nådd.

### C.2 Analyse og diskusjon

Resultatene av 3I0 strømmen vises i figur C.1. Figuren C.1b viser at innkoblingsstrømmen ved lukkevinkel 0° er kritisk. Strømmen er over 75 A selv etter den satte konstante ikke strømvhengig tidsforsinkelses grensen på 3 sekunder er overskredet. Økt verdi på innkoblingsstrøm gir økt varighet på innkoblingsstrømmen, som vist i figur 4.1b. Figur C.1a viser at vinklene som gir høyere 3I0 strøm etter 3 sekunder, er i lukkeintervallet mellom -30 til 29 grader. Tatt i betraktning at usymmetrier i nettet opp til 20 A kan forekomme, blir da det ugunstige lukkeintervallet mellom -39 til 38°. Om 3I0 strømmen vil gi tripp på andre vern enn til den gitte transformatoren, kan ikke simuleringene gi svar på. Fordi det ikke er foretatt målinger av 3I0 strømmen andre steder enn ved den ene transformatoren. Modellen i kapittel 3 inneholder ikke flere høyspentlinjer eller transformatorer enn den ene transformatorgrenen. Det kan vise seg



(a) Maksverdier til  $3I_0$  strømmen målt etter 3 sekunder (b) Transientforløp til  $3I_0$  strømmen målt i transformatorens nullpunkt.

Figur C.1:  $3I_0$  strøm maksverdier og transientforløp til en transformator uten last.

at strømmen som måles antagelig vis ikke er den  $3I_0$  strømmen som vernene måler [31]. Grensene er heller ikke satt med strømvhengig tidsforsinkelse. Simuleringene viser dermed ikke en reell  $3I_0$  vernfunksjon, men påpeker at økt innkoblingsstrøm gir økt varighet på innkoblingsstrømmen. Økt varighet på innkoblingsstrømmen kan gi økt stresslengde på transformatoren, som igjen kan gi redusert levetid. Kanskje kan dette indikere at skadeomfanget av innkoblingsstrømmen øker eksponentielt med høye innkoblingsstrømmer siden eksponeringstiden øker eksponentielt. Den eksponentielle kurven til innkoblingsstrømmen vises i figur C.1a

## C.3 Konklusjon

Måling av returstrøm foregår ofte på returlederen og i fasene til de andre lederne og er strømvhengig tidsforsinket [31] [33]. Målingene i denne metoden er ikke i trå med dette og hvordan vernfunksjonen normalt opererer. Noe som analysen av denne metoden kan indikere, er at økt verdi på innkoblingsstrømmen gir økt varighet på innkoblingsstrømmen som igjen kan øke skadeomfanget til innkoblingsstrømmen på transformatorer.

# Bibliografi

- [1] ABB. *Controlled Switching - Buyer's and Application Guide*. ABB, 2010.
- [2] ABB. *XLPE Land Cable Systems - Rev 5*. 2021. URL: <https://library.e.abb.com/public/ab02245fb5b5ec41c12575c4004a76d0/XLPE%20Land%20Cable%20Systems%20GM5007GB%20rev%205.pdf>.
- [3] J.H. Brunke og K.J. Frohlich. "Elimination of transformer inrush currents by controlled switching. I. Theoretical considerations". I: *IEEE Transactions on Power Delivery* 16.2 (apr. 2001). Conference Name: IEEE Transactions on Power Delivery, s. 276–280. ISSN: 1937-4208. DOI: [10.1109/61.915495](https://doi.org/10.1109/61.915495).
- [4] J.H. Brunke og K.J. Frohlich. "Elimination of transformer inrush currents by controlled switching. II. Application and performance considerations". I: *IEEE Transactions on Power Delivery* 16.2 (apr. 2001). Conference Name: IEEE Transactions on Power Delivery, s. 281–285. ISSN: 1937-4208. DOI: [10.1109/61.915496](https://doi.org/10.1109/61.915496).
- [5] WG C4.307. *Transformer energization in power systems: A study guide*. e-cigre. 2014. URL: <https://e-cigre.org/publication/568-transformer-energization-in-power-systems-a-study-guide> (sjekket 23.11.2021).
- [6] Ramón Cano-González mfl. "Controlled switching strategies for transformer inrush current reduction: A comparative study". I: *Electric power systems research* 145 (2017). Publisher: Elsevier BV, s. 12–18. ISSN: 0378-7796. DOI: [10.1016/j.epsr.2016.11.018](https://doi.org/10.1016/j.epsr.2016.11.018). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037877961630503X>.
- [7] Ramón Cano-González mfl. "Optimal gang-operated switching for transformer inrush current reduction". I: *Electric Power Systems Research* 131 (1. feb. 2016), s. 80–86. ISSN: 0378-7796. DOI: [10.1016/j.epsr.2015.10.009](https://doi.org/10.1016/j.epsr.2015.10.009). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779615003053> (sjekket 18.10.2021).
- [8] CIGRE. *Controlled switching of unloaded power transformers*. e-cigre. Feb. 2004. URL: [https://e-cigre.org/publication/ELT\\_212\\_3-controlled-switching-of-unloaded-power-transformers](https://e-cigre.org/publication/ELT_212_3-controlled-switching-of-unloaded-power-transformers) (sjekket 18.10.2021).
- [9] CIGRE. "Guidelines and best practices for the commissioning and operation of controlled switching projects - 757". I: 757 (sep. 2019), s. 369. ISSN: 978-2-85873-459-7.
- [10] WG C4.307 CIGRE. *Transformer energization in power systems: A study guide*. Feb. 2014. ISBN: 978-2-85873-263-0. URL: <https://e-cigre.org/publication/568-transformer-energization-in-power-systems-a-study-guide> (sjekket 25.04.2022).



- [11] Magnus Dalva. *Elektriske maskiner og omformere*. I samarbeid med Olav Vaag Thorsen og Per Arvid Ølmheim. Bokmål/nynorsk[utg.]. Oslo: Gyldendal yrkesopplæring, 2001. 396 s. ISBN: 978-82-05-27487-7. URL: <https://www.nb.no/search?q=oaiid:%22oai:nb.bibsys.no:990110648384702202%22&mediatype=b%C3%B8ker> (sjekket 16.03.2022).
- [12] Miklós Danyek, Péter Handl og David Raisz. "Comparison of Simulation Tools ATP-EMTP and MATLAB-Simulink for Time Domain Power System Transient Studies". I: *Proceedings of the European EMTP-ATP conference, Sopron, Hungary, 2002* (1. jan. 2002).
- [13] Olje- og energidepartementet. *Forskrift om sikkerhet og beredskap i kraftforsyningen (kraftberedskapsforskriften) - Lovdata*. 1. jan. 2019. URL: <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2012-12-07-1157> (sjekket 09.05.2022).
- [14] Olje- og energidepartementet. *Forskrift om systemansvaret i kraftsystemet - Lovdata*. Forskrift om systemansvaret i kraftsystemet. 26. jan. 2010. URL: <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2002-05-07-448> (sjekket 28.09.2021).
- [15] Olje- og energidepartementet. *Lov om produksjon, omforming, overføring, omsetning, fordeling og bruk av energi m.m. (energiloven) - Lovdata*. 7. jan. 2021. URL: <https://lovdata.no/dokument/NL/lov/1990-06-29-50/> (sjekket 28.09.2021).
- [16] Institution of Engineering {and} Technology. *Advances in High Voltage Engineering*. IET power and Energy 40. IET Digital Library, 1. jan. 2004. ISBN: 978-0-86341-984-3. DOI: [10.1049/PBPO040E](https://doi.org/10.1049/PBPO040E). URL: <https://digital-library.theiet.org/content/books/po/pbpo040e> (sjekket 01.10.2021).
- [17] Hitachi ABB Power Grids. *Transformatorservice – med sirkulærøkonomi i ryggmargen*. Hitachi Energy. 28. apr. 2021. URL: <https://www.hitachienergy.com/news/web-stories/2021/04/no-transformatorservice-med-sirkul-r-konomi-i-ryggmargen> (sjekket 06.04.2022).
- [18] Bjørn Gustavsen, Arne Petter Brede og John Olav Tande. "Multivariate Analysis of Transformer Resonant Overvoltages in Power Stations". I: *IEEE Transactions on Power Delivery* 26.4 (okt. 2011). Conference Name: IEEE Transactions on Power Delivery, s. 2563–2572. ISSN: 1937-4208. DOI: [10.1109/TPWRD.2011.2143436](https://doi.org/10.1109/TPWRD.2011.2143436).
- [19] Svein Thore Hagen og Elin Fjeld. *High Voltage Technology*. 9th edition. Porsgrunn: University College of Southeast Norway, 31. mai 2017.
- [20] James H. Harlow. *Electric Power Transformer Engineering*. Baton Rouge, UNITED STATES: Taylor & Francis Group, 2012. ISBN: 978-1-4398-5636-9. URL: <http://ebookcentral.proquest.com/lib/hogskbergen-ebooks/detail.action?docID=911982> (sjekket 16.03.2022).
- [21] Martin J. Heathcote. *J & P transformer book*. 13th ed. Oxford: Newnes, 2007. 989 s. ISBN: 978-1-281-03508-0.
- [22] Lars Eivind Jensvoll. *Transients During Energization of Unloaded Generator Step-Up Transformer*. Master Thesis. NTNU, jun. 2019.
- [23] J.A. Martinez og J. Martin-Arnedo. "Voltage sag studies in distribution Networks-part I: system modeling". I: *IEEE Transactions on Power Delivery* 21.3 (jul. 2006). Conference Name: IEEE Transactions on Power Delivery, s. 1670–1678. ISSN: 1937-4208. DOI: [10.1109/TPWRD.2006.874113](https://doi.org/10.1109/TPWRD.2006.874113).

- [24] Juan A. Martinez. "Parameter Determination for Power Systems Transients". I: *2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting*. 2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting. ISSN: 1932-5517. Jun. 2007, s. 1–6. DOI: [10.1109/PES.2007.385564](https://doi.org/10.1109/PES.2007.385564).
- [25] Ned Mohan. *Electric machines and drives: a first course*. Book Title: Electric machines and drives : a first course. Hoboken, N.J: Wiley, 2012. XI, 276. ISBN: 978-1-118-07481-7.
- [26] Kaveh Niayesh og Magne Runde. "Current Interruption Technologies". I: *Power Switching Components: Theory, Applications and Future Trends*. Red. av Kaveh Niayesh og Magne Runde. Power Systems. Cham: Springer International Publishing, 2017, s. 135–186. ISBN: 978-3-319-51460-4. DOI: [10.1007/978-3-319-51460-4\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-51460-4_4). URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-51460-4\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-51460-4_4) (sjekket 06.10.2021).
- [27] Kaveh Niayesh og Magne Runde. "Introduction". I: *Power Switching Components: Theory, Applications and Future Trends*. Red. av Kaveh Niayesh og Magne Runde. Power Systems. Cham: Springer International Publishing, 2017, s. 1–11. ISBN: 978-3-319-51460-4. DOI: [10.1007/978-3-319-51460-4\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-51460-4_1). URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-51460-4\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-51460-4_1) (sjekket 06.10.2021).
- [28] Nils Westerheim. I samarbeid med Westerheim Nils. 2021.
- [29] SWECO Norge mfl. *Veileder i planlegging, bygging og drift av små kraftverk*. 1/2010. Norges vassdrags- og energidirektorat, 2010. URL: [https://publikasjoner.nve.no/veileder/2010/veileder2010\\_01.pdf](https://publikasjoner.nve.no/veileder/2010/veileder2010_01.pdf).
- [30] FN Norway. *Ansvarlig forbruk og produksjon*. FN-SAMBANDET. 23. feb. 2022. URL: <https://www.fn.no/om-fn/fns-baerekraftsmaal/ansvarlig-forbruk-og-produksjon> (sjekket 06.04.2022).
- [31] Ronny Goin fra Statkraft. I samarbeid med Ronny Goin. 14. feb. 2022.
- [32] Statnett SF. *Fosweb: Data for transformator – parameterveileder*. 2019. URL: <https://www.statnett.no/globalassets/for-aktorer-i-kraftsystemet/systemansvaret/fosweb/fosweb---data-for-transformator---parameterveileder.pdf> (sjekket 19.01.2022).
- [33] Statnett SF. *Nasjonal veileder for funksjonskrav i kraftsystemet*. 2020. URL: <https://www.statnett.no/globalassets/for-aktorer-i-kraftsystemet/systemansvaret/retningslinjer-fos/nvf-2020---nasjonal-veileder-for-funksjonskrav-i-kraftsystemet.pdf>.
- [34] "Classical Approach to Transient Analysis". I: *Transient Analysis of Electric Power Circuits Handbook*. Red. av Arieh L. Shenkman. Boston, MA: Springer US, 2005, s. 1–48. ISBN: 978-0-387-28799-7. DOI: [10.1007/0-387-28799-X\\_1](https://doi.org/10.1007/0-387-28799-X_1). URL: [https://doi.org/10.1007/0-387-28799-X\\_1](https://doi.org/10.1007/0-387-28799-X_1) (sjekket 30.09.2021).
- [35] Siemens. "SIPROTEC 5 - Point-on-Wave Switching Manual". I: *Siemens (C53000-H5040-C082-2* apr. 2021).
- [36] Lasse Sivertsen. *Elektriske maskiner: oppbygning, virkemåte og drift*. 1. utgave. Book Title: Elektriske maskiner : oppbygning, virkemåte og drift. Bergen: Fagbokforlaget, 2019. ISBN: 978-82-450-3296-3.

- [37] Rene Peter Paul Smeets. *Switching in power transmission and distribution systems*. 1st edition. Chichester, England: Wiley, 2015. 443 s. ISBN: 978-1-118-70362-5.
- [38] Inc The MathWorks. *Implement N-phase distributed parameter transmission line model with lumped losses - Simulink - MathWorks Nordic*. 2022. URL: [https://se.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/distributedparametersline.html?s\\_tid=doc\\_ta](https://se.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/distributedparametersline.html?s_tid=doc_ta) (sjekket 14.05.2022).
- [39] Inc The MathWorks. *Three-Phase Transformer (Two Windings) - MathWorks Nordic*. Three-Phase Transformer (Two Windings). 2021. URL: <https://se.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/threephasetransformertwowindings.html> (sjekket 19.01.2022).
- [40] Inc. The MathWorks. *Simulating Transients - MathWorks Nordic*. Simulating Transients. 2021. URL: <https://se.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ug/simulating-transients.html> (sjekket 20.01.2022).
- [41] *Vernspesialist i Statnett*. I samarbeid med Magnus Kolgrov og Statnett SF. 13. sep. 2021.
- [42] C.L. Wadhwa. *High Voltage Engineering*. Daryaganj, INDIA: New Age International Ltd, 2007. ISBN: 978-81-224-2323-5. URL: <http://ebookcentral.proquest.com/lib/hogskbergen-ebooks/detail.action?docID=333157> (sjekket 04.10.2021).
- [43] Meizhong Wang. *Understandable Electric Circuits: Key concepts: Key concepts*. Stevenage: The Institution of Engineering and Technology, 2019. ISBN: 978-1-78561-697-6. URL: [https://bibsys-almaprimo.hosted.exlibrisgroup.com/primo-explore/fulldisplay?docid=TN\\_cdi\\_iet\\_primary\\_9781785616983&context=PC&vid=HIB&lang=nn\\_NO&search\\_scope=default\\_scope&adaptor=primo\\_central\\_multiple\\_fe&tab=default\\_tab&query=sub,exact,%20RLC%20circuits%20,AND&facet=rtype,include,books&mode=advanced&offset=0](https://bibsys-almaprimo.hosted.exlibrisgroup.com/primo-explore/fulldisplay?docid=TN_cdi_iet_primary_9781785616983&context=PC&vid=HIB&lang=nn_NO&search_scope=default_scope&adaptor=primo_central_multiple_fe&tab=default_tab&query=sub,exact,%20RLC%20circuits%20,AND&facet=rtype,include,books&mode=advanced&offset=0).
- [44] Abdelghani Yahiou, Abdelhafid Bayadi og Badreddine Babes. "Modified method for transformer magnetizing characteristic computation and point-on-wave control switching for inrush current mitigation". I: *International journal of circuit theory and applications* 47.10 (2019). Publisher: Wiley Subscription Services, Inc, s. 1664–1679. ISSN: 0098-9886. DOI: [10.1002/cta.2682](https://doi.org/10.1002/cta.2682).
- [45] Jian Yang mfl. "A simulation calculation method for suppressing the magnetizing inrush current in the setting of the overcurrent protection of the connecting transformer in the hydropower station". I: *2020 5th International Conference on Mechanical, Control and Computer Engineering (ICMCCE)*. 2020 5th International Conference on Mechanical, Control and Computer Engineering (ICMCCE). Des. 2020, s. 197–202. DOI: [10.1109/ICMCCE51767.2020.00051](https://doi.org/10.1109/ICMCCE51767.2020.00051).
- [46] Yundong Song mfl. "Simulation analysis of inrush current of three phase transformer based on MATLAB". I: Book Title: 2017 29th Chinese Control And Decision Conference (CCDC) ISSN: 1948-9447. IEEE, 2017, s. 3983–3985. ISBN: 978-1-5090-4656-0. DOI: [10.1109/CCDC.2017.7979197](https://doi.org/10.1109/CCDC.2017.7979197).
- [47] Luca Zamboni. *Getting Started with Simulink*. Olton, UNITED KINGDOM: Packt Publishing, Limited, 2013. ISBN: 978-1-78217-139-3. URL: <http://ebookcentral.proquest.com/lib/hogskbergen-ebooks/detail.action?docID=1389357> (sjekket 15.01.2022).