



Høgskulen  
på Vestlandet

BACHELOROPPGAVE:

B021E-50 Beregning, simulering og  
verifisering av inrush strømmer til  
transformatorer

---

Markus Tønning  
Bjarte Birkedal  
Simon Bewer

31. mai. 2021

## Dokumentkontroll

<i>Rapportens tittel:</i> Beregning, simulering og verifisering av inrush strømmer til transformatorer	<i>Data/Versjon</i> 31. mai. 2021/1.0
	<i>Rapportnummer:</i> B021E-50
<i>Forfatter(e):</i> Markus Tønning Bjarte Birkedal Simon Bewer	<i>Studieretning:</i> 18HELK
	<i>Antall sider m/vedlegg</i> 64
<i>Høgskolens veileder:</i> Shujun Zhang	<i>Gradering:</i> Åpen
<i>Eventuelle Merknader:</i> Vi tillater at oppgaven kan publiseres.	

<i>Oppdragsgiver:</i> Siemens Energy	<i>Oppdragsgivers referanse:</i> Andreas Sagedal
<i>Oppdragsgivers kontaktperson(er) (inkludert kontakinformasjon):</i> Navn. <i>Andreas Sagedal</i> Tlf.: 454 47 866 Epost: <a href="mailto:andreas.sagedal@siemens.com">andreas.sagedal@siemens.com</a>	

Revisjon	Dato	Status	Utført av
0.1	31.01.21	Forstudie innlevering	Gruppen
0.2	22.03.21	Første utkast	Gruppen
0.21	05.04.21	Andre utkast	Gruppen
0.22	30.04.21	Tredje utkast	Gruppen
0.23	10.05.21	Fjerde utkast	Gruppen
1.0	31.05.21	Ferdig utkast	Gruppen

## Forord

Denne rapporten er utarbeidet våren 2021 under emnet ELE150 Bacheloroppgave. Rapporten er en avsluttende del av bachelor studiet Elkraftteknikk ved Høgskulen på Vestlandet campus Bergen. Oppgaven er gitt av Siemens Energy i samarbeid med Høgskulen på Vestlandet, og omhandler inrush strømmer i transformatorer.

Oppgaven vi fikk utlevert har vært spennende og utfordrende. Vi har lært mye nytt om et emne vi i utgangspunktet hadde lite kunnskap om fra før. Det å arbeide med Simulink har vært utfordrende, noe som har ført til mye læring og bedre forståelse av hvordan Simulink fungerer som verktøy.

Vi ønsker med dette å gi en stor takk til vår veileder hos Siemens Energy, sivilingeniør i Elkraft Andreas Sagedal. Andreas har vært til stor hjelp, både med praktisk og teoretisk forståelse. Gjennom flere veiledningsmøter har Andreas kommet med konstruktive tilbakemeldinger gjennom hele prosjektet.

Vi vil også gjerne takke veileder vår fra HVL, førsteamanuensis ved institutt for datateknologi, elektroteknologi og realfag Shujun Zhang. Shujun har samarbeidet med oss gjennom kontinuerlige møter gjennom semesteret, hvor eventuelle spørsmål ble tatt opp. Disse møtene var viktig for oss ettersom at vi fikk forklare fremdriften i prosjektet og fikk tilbakemelding på hva vi bør fokusere på videre.

Vi vil også takke Eirik Haustveit og Vegard Steinsland for hjelp til praktisk oppkobling. Oppkoblingen var lærerik, og det var interessant å se sammenhengen mellom teori og praksis.



---

Simon Bewer



---

Bjarte Birkedal



---

Markus Tønning

## Sammendrag

Denne rapporten tar for seg teori, verifisering, simulering og analyse av inrush strømmer til transformatorer. Oppgaven ble gitt av Siemens Energy, og gikk i utgangspunktet ut på å modulere et kraftsystem til et maritimt anlegg i Simulink. Her skulle vi analysere inrush strømmer og transiente spenningsfenomener ved magnetisering av transformatorer som påvirker kraftsystemet i negativ retning, og videre komme med tiltak.

Når en transformator blir magnetisert vil det skapes store inrush strømmer som følge av at trafokjernen går i metning. Inrush strømmene kan bli opptil flere ganger merkeverdien til transformatoren. Dette kan føre til ustabilitet i nettet, transiente spenningsfall og uønsket trip av effektbrytere og frekvensomformere.

Dette viste seg å være utfordrende å modulere et maritimt anlegg i Simulink da det krevdes flere parameter enn først antatt. I samsvar med veiledere ble vi enig om å endre på kravspesifikasjonene, og ta utgangspunkt fra en modell vi hentet fra Mathworks som viser inrush fenomenet.

Får å få en fundamental forståelse om inrush har vi i kapittel 4 lagt frem teori om elektromagnetisme og transformatorer. I kapittel 5 har vi lagt frem grunnleggende teori om inrush, hvor vi blant annet viser til hvilke faktorer som påvirker inrush strømmene og metoder som kan begrense de.

Simuleringene vi har lagt frem i kapittel 7 viser hvordan inrush strømmene og fluksen oppfører seg ved ulike tilstander. Her har vi endret på remanensen til transformatoren, fasevinkelen ved innkobling og kilderresistansen. Legg merke til at simuleringsresultatene ikke er gyldig i praksis, men de får frem de viktigste prinsippene om inrush og bekrefter teorien vi la frem i kapittel 5.

Vi har også magnetisert en transformator i skolens laboratorium for å verifisere at det oppstår inrush strømmer i praksis. Dette er lagt frem i kapittel 8.

# 1 Innhold

Forord.....	3
Sammendrag .....	4
1 Innledning.....	9
1.1 Oppdragsgiver .....	9
1.2 Problemstilling.....	9
1.3 Styring av prosjektet.....	10
1.4 Begrensninger.....	10
2 Kravspesifikasjon .....	11
3 Analyse av problemet.....	12
3.1 Utforming av mulige løsninger .....	12
3.1.1 Vurderinger i forhold til verktøy og HW/SW komponenter.....	12
4 Bakgrunn .....	13
4.1 Maritime anlegg .....	13
4.2 Elektromagnetisme .....	14
4.2.1 Magneter og magnetfelt .....	14
4.2.2 Magnetisk fluks.....	15
4.2.3 Magnetisk feltintensitet .....	15
4.2.4 Magnetisk flukstetthet .....	16
4.2.5 Faradays lov .....	17
4.2.6 Analogi av magnetisk og elektrisk krets .....	18
4.2.7 Magnetisk hysteresese .....	18
4.3 Transformator .....	20
4.3.1 Virkemåte .....	20
4.3.2 Trafokjerner.....	21
4.3.3 Virkningsgrad.....	22
5 Inrush strøm teori.....	23
5.1 Generell innføring.....	23
5.1.1 Magnetisering inrush.....	23
5.1.2 Recovery inrush .....	23
5.1.3 Sympathetic inrush.....	23
5.2 Faktorer som påvirker inrush .....	25
5.2.1 Fasevinkel ved innkobling.....	25
5.2.2 Remanens i transformatorjernet.....	27

5.2.3	Kortslutningsytelsen til kraftsystemet.....	28
5.3	Konsekvensen av inrush .....	29
5.4	Tiltak for å redusere inrush strøm.....	30
5.4.1	Rapid Closing Strategy (RCS) .....	32
5.4.2	Delayed Closing Strategy (DCS) .....	33
5.4.3	Simultaneous Closing Strategy (SCS).....	34
6	Simulink modell .....	35
6.1	Transformator .....	35
6.2	Spenningskilde.....	36
6.3	Målinger .....	37
6.4	Fullstendig modell .....	37
7	Simuleringsresultat.....	38
7.1	Fasevinkel .....	39
7.1.1	Analyse av fasevinkelens innvirkning .....	40
7.2	Kilderesistans.....	41
7.3	Remanens .....	42
7.3.1	Analyse av remanensens innvirkning .....	43
7.4	Rapid Closing Strategy (RCS) .....	44
7.5	Delayed Closing Strategy (DCS) .....	46
7.6	Simultaneous Closing Strategy (SCS).....	48
8	Laboratorium Forsøk .....	50
8.1	Resultat.....	51
9	Diskusjon .....	55
10	Konklusjon .....	57
11	Referanser .....	58
Appendiks A	Forkortelser og ordforklaring .....	61
Appendiks B	Prosjektledelse og styring.....	63
B.1	Prosjektorganisasjon .....	63
B.2	Fremdriftsplan .....	63
B.3	Risikovurdering.....	64

## Figurliste

Figur 1 Enlinje skjema maritimt anlegg .....	9
Figur 2 fra venstre; solenoid og stavmagnet [4].....	14
Figur 3 Uniform fluks tetthet av magnitud B [8] .....	16
Figur 4 fluks gjennom en flate [8].....	17
Figur 5 Elektrisk og magnetisk sammenhenger [11] .....	18
Figur 6 Hysteresesløyfe [13] .....	19
Figur 7 Frembrakt fluks ved maksimal verdi [26] .....	25
Figur 8 Frembrakt fluks ved nullgjennomgang [26] .....	26
Figur 9 Frembrakt inrush strøm ved forskjellige scenarier [27] .....	27
Figur 10 Effektene av mekanisk tidsavvik og pre-arcing [31].....	31
Figur 11 Pre-arcing karakteristikk for HVAC brytere [32] .....	31
Figur 12 Illustrasjon av RCS [31] .....	32
Figur 13 Illustrasjon av DCS [32] .....	33
Figur 14 Illustrasjon av SCS [32] .....	34
Figur 15 Transformator blokk i Simulink .....	35
Figur 16 Illustrasjon av metnings karaktestikk [33].....	35
Figur 17 Metning karaktestikk.....	36
Figur 18 Spenningskilde bak en impedans .....	36
Figur 19 Simulink modell .....	37
Figur 20 Inrush strøm ved magnetisering med ulike fasevinkler .....	39
Figur 21 Analyse av inrush strøm ved $\theta=0^\circ$ .....	40
Figur 22 Analyse av inrush ved $\theta=90^\circ$ .....	40
Figur 23 Inrush strøm ved magnetisering med ulike kilderresistanser .....	41
Figur 24 Inrush strøm ved magnetisering med ulike remenans verdier .....	42
Figur 25 Analyse av inrush ved $B_r = 0.8$ .....	43
Figur 26 Analyse av inrush ved $B_r = -0.8$ .....	43
Figur 27 Inrush strøm ved RCS .....	44
Figur 28 Dynamisk fluks ved RCS.....	44
Figur 29 Dynamisk og prospective fluks ved RCS .....	45
Figur 30 Inrush strøm ved DCS .....	46
Figur 31 Dynamisk fluks ved DCS.....	46
Figur 32 Dynamisk og prospektiv fluks ved DCS.....	47
Figur 33 Inrush strøm ved SCS.....	48
Figur 34 Dynamisk fluks ved SCS .....	48
Figur 35 Dynamisk og prospektiv fluks ved SCS .....	49
Figur 36 Bilde av oppkobling i laboratoriet .....	50
Figur 37 Inrush strøm som går mot nominelle verdier .....	51
Figur 38 Magnetisering uten inrush .....	52
Figur 39 Magnetisering med inrush .....	53
Figur 40 Magnetisering med inrush .....	54
Figur 41 Fremdriftsplan .....	63
Figur 42 Revidert fremdriftsplan .....	63

## Tabell liste

Tabell 1 Trafo parametre.....	36
Tabell 2: 3-fase spenningskilde .....	36
Tabell 3 Case. 1.....	39
Tabell 4 Fargekode fase A ved analyse av fasevinkelens innvirkning .....	40
Tabell 5 Case. 2.....	41
Tabell 6 Case. 3.....	42
Tabell 7 Fargekode fase A ved analyse av remenansens innvirkning .....	43
Tabell 8 Parametre RCS .....	44
Tabell 9 Parametre DCS.....	46
Tabell 10 Parametre SCS .....	48
Tabell 11 Parametere 3- fase transformator.....	50
Tabell 12 Utstysliste praktisk forsøk .....	51
Tabell 13 Risikoanalyse.....	64



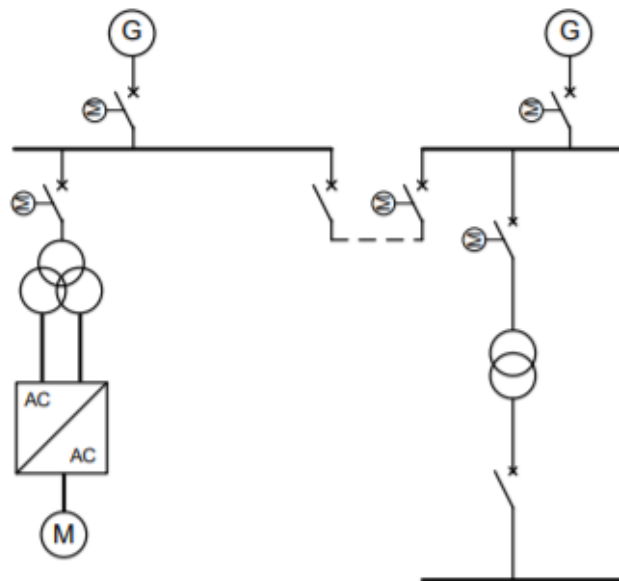
# 1 Innledning

## 1.1 Oppdragsgiver

Siemens Energy er et firma som satser stort på en mer bærekraftig fremtid. Siemens spores helt tilbake til 1866 hvor de startet med konverterte mekanisk energi til elektrisk energi. Gjennom 150 års arbeid har Siemens jobbet hard for å være der de er i dag. Nemlig en stor bedrift med over 91000 ansatte fordelt utover 90 land. Gjennom mangfoldige milepæler har Siemens generert 1/6 av global energi som er basert på deres systemer. [1]

## 1.2 Problemstilling

Maritime anlegg er mer sensitive for ustabilitet i nettet sett i forhold til tradisjonelle landanlegg. Dette fordi de blant annet har et begrenset antall tilkoblede generatorer i sitt system. Ved magnetisering av transformatorer kan det oppstå store inrush strømmer som kan bli flere ganger merkeverdi. Inrush strømmene kan føre til ustabilitet, transiente spenningsfall og uønsket utkobling/ trip av effektbrytere og frekvensomformere. Siemens Energy ønsker derfor at vi skal analysere hvordan transiente spenningsfenomener påvirker kraftsystemet i et maritimt anlegg, og videre kommer med mulige tiltak for å begrense disse.



Figur 1 Enlinje skjema maritimt anlegg

### **1.3 Styring av prosjektet**

I prosjektets oppgave vil vi benytte personlige datamaskiner som det primære verktøyet vårt. Møte med interne og eksterne veiledere vil avtales etter behov, med interne veiledere er det satt opp ett møte hver andre uke. Det er ønskelig å ha ett møte minst to ganger i måneden med eksterne veiledere.

Prosjektet blir skrevet i en felles onedrive der alle deltakeren i gruppen har tilgang til å gjøre endringer. Det skal bli ført timer i en felles timeliste hvor gruppearbeid og enkeltindividet skal føre timer over hva som er gjort i løpet i dagen. All kommunikasjon med veiledere er per dags dato gjennom e-post, telefon og digitale plattformer, dette er på grunn av dagens situasjon med Covid-19. Vi i gruppen håper å få til personlige møter med både intern og ekstern veileder i løpet av semesteret. Gruppen jobber godt sammen og arbeids- og ansvarsfordelingen faller derfor naturlig inn i prosjektets fremdrift.

### **1.4 Begrensninger**

Prosjektet har en begrenset tidsplan som kan føre til at det ikke er mulig å gjennomføre alle forslag fra oppdragsgiver. Hovedsakelig gjelder dette fysisk oppkobling av transformator i skolens laboratorium. Per dags dato er ikke laboratorium for elektriske maskiner i normal drift, og det er derfor ikke avklart om det er mulig å gjennomføre et forsøk der.

Covid-19 kan også føre til begrensninger. Hvordan situasjonsbildet blir fremover er vanskelig å si, men det kan føre til at fysisk oppmøte ikke blir mulig.

## 2 Kravspesifikasjon

I oppgaveteksten er det satt opp flere krav som er ønskelige fra oppdragsgiver.

De ønskede kravspesifikasjonene;

- Lage en simuleringsmodell i Simulink av et dieselelektrisk skipsanlegg. Modellen skal inneholde generatorer, transformatorer og distribusjonssystem.
- Analysere transiente spenningsfenomener i simuleringsmodellen som påvirker kraftsystemet, ved magnetisering av transformator.
- Komme med tiltak for å begrense transiente spenningsfenomen.
- Dokumentere inrush strømmer ved tilkobling av transformator i skolens laboratorium.
- Sammenligne resultatene fra laboratorium med Simulink modell.

Revidert kravspesifikasjon;

- Fokusere på selve inrush fenomenet.
- Ta utgangspunkt i en Simulink modell hentet fra Mathworks.
- Analysere inrush ved å endre på fasevinkel, remanens og kildemotstand.
- Analysere inrush ved styrt-innfasing.

### 3 Analyse av problemet

#### 3.1 Utforming av mulige løsninger

Oppgaven blir en teknisk rapport med analyser, vurderinger, begrunnelser og mulige tiltak mot transiente spenningsfenomen som vil oppstå i et skippsanlegg. Det er liten sannsynlighet for at det vil oppstå kostnader i form av innkjøp av programvarer eller utstyr til laboratoriums forsøk ettersom skolen stiller utstyr til disposisjon.

##### 3.1.1 Vurderinger i forhold til verktøy og HW/SW komponenter

Utarbeide en simuleringsmodell av inrush i transformator.

- Simulink versjon: R2021a

Oppkobling av transformator i skolens laboratorium

- Transformator: Part nummer. B2 12
- Last: Part nummer. K3 12
- Bryter: Type. LUCA
- Amperemeter: Type. E-MD-102 og E-MD-091
- Keysight U1242C: Part nummer. 17
- Oscilloskop M80-X3014A: Part nummer. 20

Alle i prosjektet har noe erfaring i Simulink fra kraftelektronikk faget, men det vil inngå en del tid til å anskaffe seg kompetanse på komponenter og oppbygning av et skippsanlegg i Simulink.

## 4 Bakgrunn

### 4.1 Maritime anlegg

Et microgrid er definert som et lite geografisk og elektrisk system. Microgrid finnes både i landbaserte kraftsystemer, men også på maritime anlegg. Selv om fellestrekene er mange, finnes det også flere forskjeller man må ta hensyn til. Enkelte maritime anlegg må kunne være uavhengig av andre energikilder og hjelpemidler en det som er om bord i lengre perioder. Da går skipet inn i en såkalt øymodus. Ved slike tilfeller stilles det strenge krav. Eksempelvis hvor skip blir designet for å kunne operere med en enkelt fase til jord. [2]

De største utfordringene med et microgrid er styring og beskyttelse av nettet. Her er det flere utfordringer i ett maritimt microgrid enn hos ett microgrid på land. [2]

Rotasjons treghet hos drivmotorer og generatorer, samt raske lastendringen. Dette kan endre på frekvensen i form av frekvenssvingninger. Det vil si at man kan anta at frekvensen ikke er konstant. [2]

Kraftproduksjonen i landanlegg blir ofte balansert gjennom en svinggenerator. [2]

Størrelse og omfang blir fort en fordel i et maritimt anlegg. De korte avstandene gjør det enklere å kontrollere, samt synkronisere data og målinger. De korte avstandene resulterer også i lav impedans, noe som øker koblingen mellom komponentene i kraftsystemet. [2]

Lasten til maritime anlegg kan oppleve raske endringer. Både aktiv og reaktiv effekt endres oftere enn i landanlegg. Det er fra fremdriftssystemet og andre laster som krever mye effekt at variasjonene vil bli størst. [2]

Det er store kontraster i hvilket miljø et land anlegg og et maritimt anlegg må kunne klare å operere i. Maritime anlegg må være robuste for å tåle store vibrasjoner, store bevegelser, og ikke minst være motstandsdyktig mot fukt og saltvann. [2]

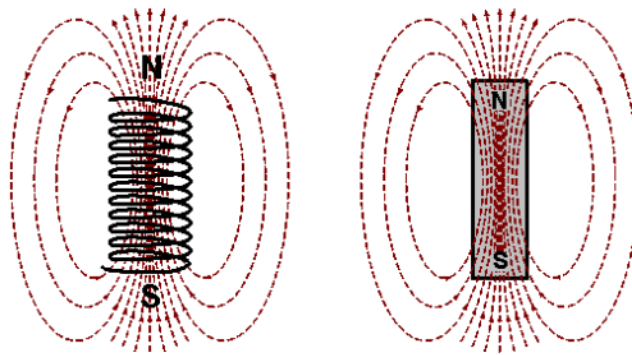
## 4.2 Elektromagnetisme

### 4.2.1 Magneter og magnetfelt

En magnet er et legeme som omgir seg med et magnetisk felt og utøver krefter på gjenstander som har et magnetisk potensial. Vi skiller mellom to typer magneter:

- Permanentmagneter
- Elektromagneter

Permanentmagneter har varige magnetiske egenskaper og er som regel laget av ferromagnetiske materialer, mens elektromagneter består av en elektrisk leder og viser bare magnetiske egenskaper ved strømgjennomgang. En elektromagnet vil ha de samme egenskapene som en permanentmagnet dersom lederen vikles som en spole eller solenoid. [3] Fordelen med en elektromagnet er at feltet kan reguleres.



Figur 2 fra venstre; solenoid og stavmagnet [4]

De magnetiske feltlinjene strekker seg fra nord til sør og tilbake gjennom kjernen. Feltet er sterkest i kjernen og avtar når avstanden til magneten øker. De magnetiske feltlinjene blir også omtalt som flukslinjer. [5]

#### 4.2.2 Magnetisk fluks

Magnetisk fluks er et mål på hvor mange feltlinjer som strømmer gjennom en gitt flate. [6] Det er altså et mål på det totale magnetiske feltet gjennom en flate.

Magnetisk fluks kan uttrykkes ved følgende formel,

$$\Phi_B = \int_S B \cdot dA \quad (1)$$

$\Phi_B = \text{Fluks [Wb]}$

$B = \text{Flukstetthet [T]}$

$A = \text{Areal [m}^2\text{]}$

$dA = \text{integrasjonsområde}$

#### 4.2.3 Magnetisk feltintensitet

Magnetisk feltintensitet er den drivende kraften til den magnetiserende feltstyrken og oppstår som følge av elektrisk strøm i ledere, eller som en virkning av indre, atomære eller molekulære strømmer i permanent magnetiske materialer. Magnetisk feltintensitet eller den magnetiserende feltstyrken har symbolet H, og blir målt i amper per meter. [7]

Magnetisk feltintensitet kan uttrykkes ved følgende formell,

$$\oint H \cdot d\ell = \text{total strøm gjennom stiens indre} \quad (2)$$

$H = \text{Magnetisk feltintensitet [A/m]}$

$\ell = \text{lengde [meter]}$

#### 4.2.4 Magnetisk flukstetthet

Magnetisk flukstettheten beskriver tettheten til de magnetiske feltlinjene gjennom en flate, og oppstår som følge av den magnetiserende feltintensiteten. Tettere linjer vil føre til større flukstetthet og omvendt. Magnetisk flukstetthet eller den magnetiske feltstyrken har symbolet  $B$ , og måles i Tesla.

Magnetisk flukstetthet kan uttrykkes ved følgende formel,

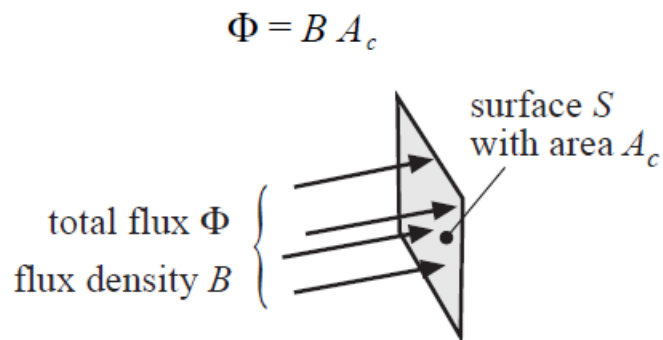
$$B = \mu_0 \mu_r H \quad (3)$$

$B$  = Magnetisk flukstetthet [T]

$\mu_0$  = Permabiliteten til luft [H/m]

$\mu_r$  = Permabiliteten til materialet [H/m]

$H$  = Magnetisk feltintensitet [A/m]



Figur 3 Uniform fluks tetthet av magnitudo  $B$  [8]



#### 4.2.5 Faradays lov

En sluttet krets er avhengig av en elektromotorisk spenning (EMS) for at det skal gå en strøm i kretsen. Michael Faraday fant ut at det induseres en EMS og en strøm i en krets dersom det oppstår en forandring i den magnetiske fluksen. [9] Utrykket for magnetisk fluks forteller oss at dette kan gjøres på tre måter:

- Endre flukstettheten.
- Endre vinkelen.
- Endre arealet.

Den første metoden appellerer til transformatorer ettersom de ikke har noen bevegelige deler. I dette tilfellet vil den varierende vekselstrømmen skape en endring i flukstettheten som videre vil føre til en induisert spenning.

Faradays induksjons lov kan uttrykkes ved følgende formel:

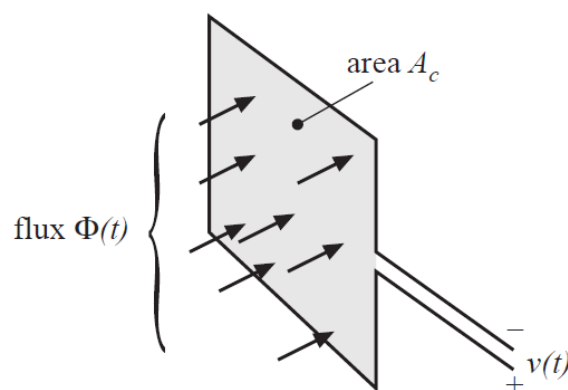
$$\mathcal{E} = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (4)$$

$$\mathcal{E} = EMS [V]$$

$N =$  antall viklinger

$\frac{d\phi}{dt} =$  endring av fluks med hensyn på tid

Minustegnet viser til Lenz' lov, som sier at retningen av den induserte spenningen er slik at den motvirker sin årsak. [10]



Figur 4 fluks gjennom en flate [8]

#### 4.2.6 Analogi av magnetisk og elektrisk krets

Figur 5 oppsummerer noen av de matematiske analogiene mellom magnetiske og elektriske kretser. Begrepene i samme rad har samme matematiske rolle. Det er viktig å legge merke til at dette er matematisk analogi, som ikke må forveksles med fysiske likheter.

ELECTRIC		MAGNETIC	
$V = RI$		$\mathfrak{F} = \mathfrak{R}\Phi$	
Current	$I$ [A]	$\Phi$ [Wb]	Flux
emf	$V$ [V]	$\mathfrak{F}$ [A-t]	mmf
Resistance	$R$ [ $\Omega$ ]	$\mathfrak{R}$ [ $\text{H}^{-1}$ ]	Reluctance
Conductivity	$\sigma$ [S/m]	$\mu$ [H/m]	Permeability

Figur 5 Elektrisk og magnetisk sammenhenger [11]

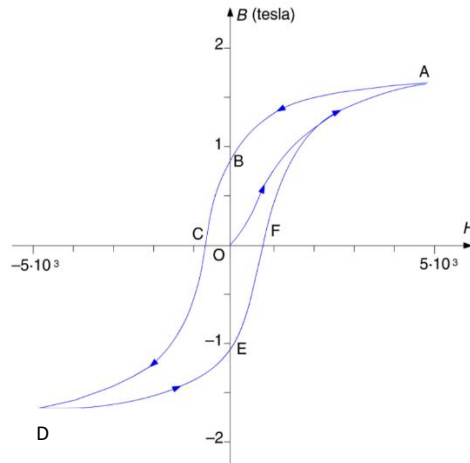
Hovedforskjellen er at magnetiske kretser er ulineære. Motstanden i en elektrisk krets vil være konstant innenfor visse rammer, mens reluktansen i en magnetisk krets vil variere avhengig av styrken til den magnetiske fluksen. Når ferromagnetiske materialer oppnår metning vil reluktansen stige, som skaper et ulineært forhold. Samtidig oppstår det hystereseseffekt i ferromagnetiske materialer. [12]

#### 4.2.7 Magnetisk hystereseseffekt

Hystereseseffekt er det fenomenet at en tilstandsendring i et stoff som følge av en ytre påvirkning ikke forsvinner når påvirkningen fjernes, men først etter at en motsatt rettet påvirkning har virket med en viss styrke. [13]

Ferromagnetiske materialer, for eksempel jern, stål og nikkell, består av atomer. Atomene i en jernkjerne vil orientere seg i samme retning og bli magnetisk, dersom det blir utsatt for et ytre magnetisk felt. Jernkjerner vil fortsatt være magnetisert selv om det ytre magnetiske feltet fjernes, ettersom atomene ikke faller helt tilbake til sine opprinnelige posisjoner. Det er dette vi kaller hystereseseffekten i ferromagnetiske materialer.

Hystereseseffekt illustreres best ved en hysteresesløyfe som vist i Figur 6.



**Figur 6 Hysteresesløyfe [13]**

Her er magnetisk flukstetthet,  $B$ , avsett som en funksjon av den magnetiske feltintensiteten,  $H$ . Om transformatorjernet ikke er magnetisert og man øker feltstyrken  $H$  gradvis i positiv retning, vil  $B$  stige fra origo til  $A$ . Lar man  $H$  så avta mot null, faller  $B$  langs kurven ( $AB$ ), og vi ser at feltet er høyere enn det var fra start. Transformatorjernet vil med andre ord fortsatt være magnetisert, og ha en viss verdi av gjenværende fluks selv om den magnetiske feltintensiteten,  $H$  er fjernet. Gjør man deretter  $H$  negativ, fremkommer kurven ( $BCD$ ), og videre kurven ( $DE$ ) når feltintensiteten er fjernet. Transformatorjernet kommer altså ikke tilbake til den magnetiske tilstanden det hadde til å begynne med.[8] Samtidig ser vi at det trengs en motsatt rettet kraft for å overvinne restmagnetismen. Dette vil føre til energitap i form av varme, som kalles for hysteresetap.

Hysteresesløyfe er et resultat av den varierende vekselstrømmen, og karaktistikken vil variere avhengig av type material. Transformatorer er konstruert til å arbeide i merkedrift med en fluks verdi rett innenfor endepunktene ( $AD$ ). [14] Det er dermed relativt stor sannsynlighet for at det er en viss verdi av restmagnetisme i jernet når transformatoren kobles fra nettet.

#### **4.2.7.1 Metning**

En transformator går i metning når flukstettheten når ytterpunktene ( $AD$ ) som vist i Figur 6. Dette betyr at det ferromagnetiske materialet har oppnådd maks potensiale av flukstetthet, og en videre økning av feltintensiteten vil ha et betydelig lite utsalg på flukstettheten. Induktansen i kretsen vil da reduseres betraktelig, som videre vil føre til en høy inrush strøm. [15]

## 4.3 Transformator

### 4.3.1 Virkemåte

En transformator er en av de viktigste komponentene i en elektrisk overføring. Transformatoren har i oppgave å endre spenningsnivået fra inngang til utgangen av transformatoren. Den kan øke eller minke spenningen, alt etter bruksområdet. En transformator som øker spenningen kalles for en step up transformator, og en som minker spenningen kalles for en step down transformator. Eksempelvis er det naturlig å øke spenningen ut av et kraftanlegg, og vanligvis minke spenningen til forbrukeren. [16]

Man kan se på en transformator som to eller flere nærliggende spoler som er tvinnet rundt en eller flere kjerner. Inngangen blir gjerne kalt primærviklingen, og utgangen for sekundærvikling. Når vi påtrykker en spenning i primærviklingen, vil det skapes en vekslende magnetisk fluks i jernkjernen. Vi er avhengig av å ha en vekselstrøm for at transformatoren skal fungere. Når det flyter vekselstrøm gjennom primærviklingen, vil endrende polaritet og nivå forstyrre de frie elektronene i sekundærviklingen. Dette vil forstyrre de frie elektronene i sekundærspolen, noe som tvinger dem til å bevege seg. Dette kalles elektromotorisk kraft (EMF), og lar seg ikke gjøre med en likestrøms kilde. [16], [17]

Spolene vil sette opp en mot induert spenning  $E_1$  i primærviklingen og  $E_2$  i sekundærviklingen i henhold til Lenz' lov.

$$e_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad (5)$$

Ved hjelp av formel (5) kan vi se at antall viklingstørn  $N_1$  og endringshastighet i fluksen  $\phi$  er proporsjonal med den mot induert spenning.

Vi ser også et forhold mellom de induserte spenningen og antall viklingstørn på primær og sekundær siden. Denne formelen kalles for omsetningsforholdet.

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2} = \alpha \quad (6)$$

Samme gjelder også for påtrykt spenning og strøm.

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (7)$$

Formel (5), (6) og (7) tar høyde for en ideell transformator. Altså at den er tapsfri. Dette vil ikke bli det samme i en virkelig transformator. Men ikke helt feil heller ettersom at transformatorer har svært høy virkningsgrad.

Ettersom at påtrykt spenning er en varierende sinusformet funksjon over tid, vil fluksen også være en varierende sinusfunksjon over tid. [18, p. 9]

$$\Phi(t) = \Phi_m \sin \omega t \quad (8)$$

Med dette kan man uttrykke formel (9).

$$\begin{aligned} e_1 &= N_1 \frac{d(\phi_m \sin \omega t)}{dt} & (9) \\ &= N_1 \omega (\phi_m \cos \omega t) \\ &= N_1 \omega \phi_m \cos \omega t \\ e_{1max} &= N_1 \omega \phi_m \\ e_{1rms} &= \frac{e_{1max}}{\sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \omega \cdot N_1 \cdot \phi_m = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot N_1 \cdot \phi_m = 4,44 \cdot f \cdot N_1 \cdot \phi \end{aligned}$$

Dette er kjent som EMF likningen til en transformator.

### 4.3.2 Trafokjerner

Det finnes hovedsakelig to måter å produsere kjernen med vinklinger rundt. Man har kjernet type og mantel type.

Den hovedsakelige forskjellen er hvor kjernen og viklingene ligger i forhold til hverandre. I en kjernetransformator er beinene til kjernen «omringet» av viklingene. Mens i en manteltransformator er viklingen «omringet» av beinene til kjernen. Mantel transformatorer er kjent for å ha svært gode karakterstikk, og blir derfor ofte brukt i nett, hvor spenningen er svært høy. [19]

Transformatorkjernen er satt sammen av mange tynne jernplater, også kalt for trafoblikk. Blikket er impregnert med lakk for å forhindre elektrisk kontakt mellom platene. Trafoen blir blikket nettopp for å redusere virvelstrømstapene som oppstår i jernet.

### 4.3.3 Virkningsgrad

En virkelig transformator er ikke tapsfri. Tapene kommer stort sett av ohmske tap. Samt hysteres- og virvelstrømstap, tap i magnetfelt kan forekomme i små mengder. [20] Tap i en transformator er veldig naturlig, og man kommer ikke unna tap med mindre man har en superleder. Selv med alle disse tapene, har trafoer i mange tilfeller svært god virkningsgrad. Ofte 97-99 %. 'Grunnen til transformatorens høye virkningsgrad er at det er en statisk maskin uten friksjonstap, noe som bestemmer virkningsgraden til en roterende maskin.' [18, p. 18]

En annen god ting med transformatorer, er den lange levetid. Snittalderen på trafoer rundt i Norge er mellom 40 og 50 år. Mye av grunnen til deres høye snittalder er at komponentene til transformatorer holder en veldig god virkningsgrad over lang tid. I mange områder innen elektro er det ofte lønnsomt å bytte ut gamle komponenter med nye og forbedret komponenter, det er veldig sjeldent i transformatorer. [21]

## 5 Inrush strøm teori

### 5.1 Generell innføring

Når en transformator blir magnetisert vil det oppstå store inrush strømmer som følge av at transformatorjernet går i metning. Inrush strømmene kan i enkelte tilfeller bli 10 til 20 ganger transformatorens merkestrøm. Den første halvperioden er mest utsatt, som vil frambringe den høyeste amplituden av inrush før den avtar mot stasjonære verdier. Dette kan skje i løpet av sekunder til minutter, alt avhengig av transformatorens størrelse og designe. [18]

Inrush strømmene kan føre til ustabilitet i nettet, transiente spenningsfall og uønsket trip av effektbrytere og frekvensomformere. Svake nett, hvor kortslutningsytelsen er lav, er mest utsatt å bli påvirket i negativ retning. Det er derfor viktig å designe et sikkerhetssystem eller ta i bruk tiltak for å redusere inrush strømmene.

Transformator inrush strømmer er klassifisert inn i tre kategorier:

#### 5.1.1 Magnetisering inrush

Magnetiserende inrush vil oppstå ved innkobling og det er i disse tilfellene vi kan forvente de høyeste verdier av inrush. Dette er fordi innkobling kan skje på et ugunstig tidspunkt samtidig som det er en viss mengde gjenværende fluks i transformatorjernet. [22]

#### 5.1.2 Recovery inrush

Recovery inrush oppstår når spenningen blir gjenopptatt etter å ha blitt redusert grunnet feil i kraftsystemet. Recovery inrush er alltid mindre enn magnetiserende inrush. [23]

#### 5.1.3 Sympathetic inrush

Denne type inrush oppstår når flere transformatorer er koblet i parallell på samme linje. En transformator T1, som allerede er magnetisert vil skape en viss mengde inrush, dersom en transformator T2 blir koblet til nettet. Innkoblingen fører til en drastisk reduksjon av impedansen i kretsen, og dette vil påvirke T1. [24]

Det er viktig å ha kontroll på hvilke verdier vi kan forvente av inrush strømmer ved designe av et sikkerhetssystem. I slike situasjoner kan et forenklet uttrykk brukes for å beregne topp verdien i den første perioden [23];

$$i_{peak} = \frac{\sqrt{2}V_m}{Z_t} * \left( \frac{2 B_n + B_r - B_s}{B_n} \right) \quad (10)$$

Fra formel (10) kan vi se at det hovedsakelig er tre faktorer som påvirker amplituden til inrush strømmen;

- kortslutningsytelsen til kraftsystemet.
- Fasevinkel ved innkobling.
- Remanens.

Ved å se nærmere på induksjonsloven kan vi bestemme et generelt uttrykk for fluks i en transformator, ved lineær karaktetikk;

$$v(t) = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (11)$$

En spole med en sinusformet spenningskilde kan uttrykkes som;

$$v(t) = V_m \sin(\omega t + \alpha) \quad (12)$$

Vi ser at den induerte spenningen er proporsjonal med den tidsderiverte av fluksen. Fluksen kan dermed uttrykkes som et tidsintegral av den tilførte spenningen;

$$\Phi(t) = -\frac{1}{N} \int_0^t V_m \sin(\omega t + \alpha) \cdot dt = -\frac{V_m}{N} \int_0^t \sin(\omega t + \alpha) \cdot dt \quad (13)$$

Videre integreres uttrykket ved hjelp av kjerneregelen;

$$\Phi(t) = -\frac{V_m}{N\omega} [\cos \alpha - \cos(\omega t + \alpha)] \quad (14)$$

Erstatter så det første leddet med  $\Phi_m = -\frac{E_m}{N\omega}$ , som er maks fluks frembrakt i merkedrift, dermed;

$$\Phi(t) = \Phi_m [\cos \alpha - \cos(\omega t + \alpha)] \quad (15)$$

Dersom det er remanens ( $\Phi_r$ ), i trafokjernen ved magnetisering, blir uttrykket lik;

$$\Phi(t) = (\Phi_m \cos \alpha \mp \Phi_r) - (\Phi_m \cos(\omega t + \alpha)) \quad (16)$$

Sprangresponsen til en spole må også tas med som gir følgende;

$$\Phi(t) = (\Phi_m \cos \alpha \mp \Phi_r) e^{-\left(\frac{R}{L}\right)t} - (\Phi_m \cos(\omega t + \alpha)) \quad (17)$$

Formel (17) forteller oss at det første leddet er en fluks bølge satt sammen av en transient DC komponent og en stabil AC komponent. Den transiente DC komponenten vil avta med tiden, bestemt av forholdet mellom resistansen og induktansen i primær viklingen. [25]

Fluksen som oppstår ved magnetisering vil da ligge et sted mellom  $\Phi_m \leq \Phi \leq 2\Phi_m + \Phi_r$ . Dette blir studert nærmere i neste del.



## 5.2 Faktorer som påvirker inrush

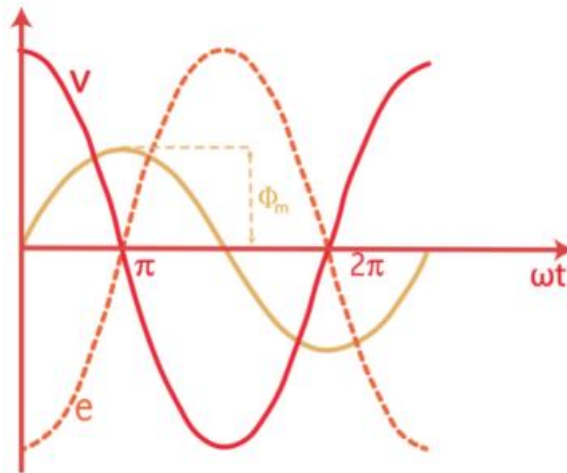
### 5.2.1 Fasevinkel ved innkobling

I stabil drift er forløpet av fluksen sinusformet uten noen likespenningskomponenter og faseforskjøvet 90° etter spenningen. [18] Fluksen vil dermed ikke ha høyere verdier enn  $\Phi_m$ , som skjer ved spenningens nullgjennomgang. Dette er ikke tilfelle ved magnetisering ettersom det midlertidig ikke går noe strøm i transformatorviklingen. Fluksen vil derfor starte med et utgangspunkt lik null. [26] Fasevinkelen til spenningskilden er dermed en viktig faktor som er med på å påvirke inrush strømmens amplitude ved innkobling.

Magnetisering ved spenningens maksimalverdi;

$$\Phi = \Phi_m \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} \sin(\omega t) \cdot d\omega t = \Phi_m \quad (18)$$

Vi ser at fluksen er lik den maksimale fluksen som frembringes ved stabil drift når magnetisering skjer ved spenningens maksimalverdi. Det oppstår med andre ord ikke noe inrush strøm og transformatoren vil trekke strøm som i merkedrift

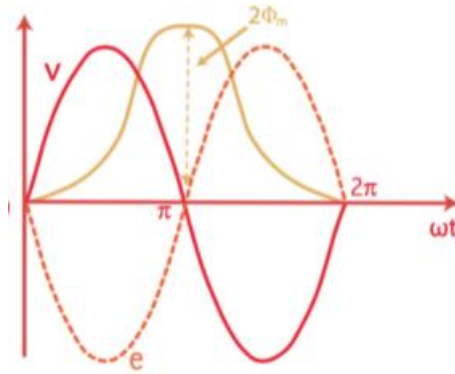


Figur 7 Frembrakt fluks ved maksimal verdi [26]

Magnetisering ved spenningens nullgjennomgang;

$$\Phi = \Phi_m \int_0^{\pi} \sin(\omega t) \cdot d\omega t = 2\Phi_m \quad (19)$$

Når transformatoren legges inn ved en null gjennomgang ser vi at fluksen blir 2 ganger fluksen som i merkedrift. Som nevnt tidligere vil en transformator i merkedrift ha maks amplitude med fluks ( $\Phi_m$ ) som jobber rett innenfor metnings området ( $\Phi_s$ ) til transformatoren. Det vil si at transformatorjernet går i metning når den legges inn ved en null gjennomgang, ettersom  $2\Phi_m \geq \Phi_s$ , som videre fører til inrush strøm.

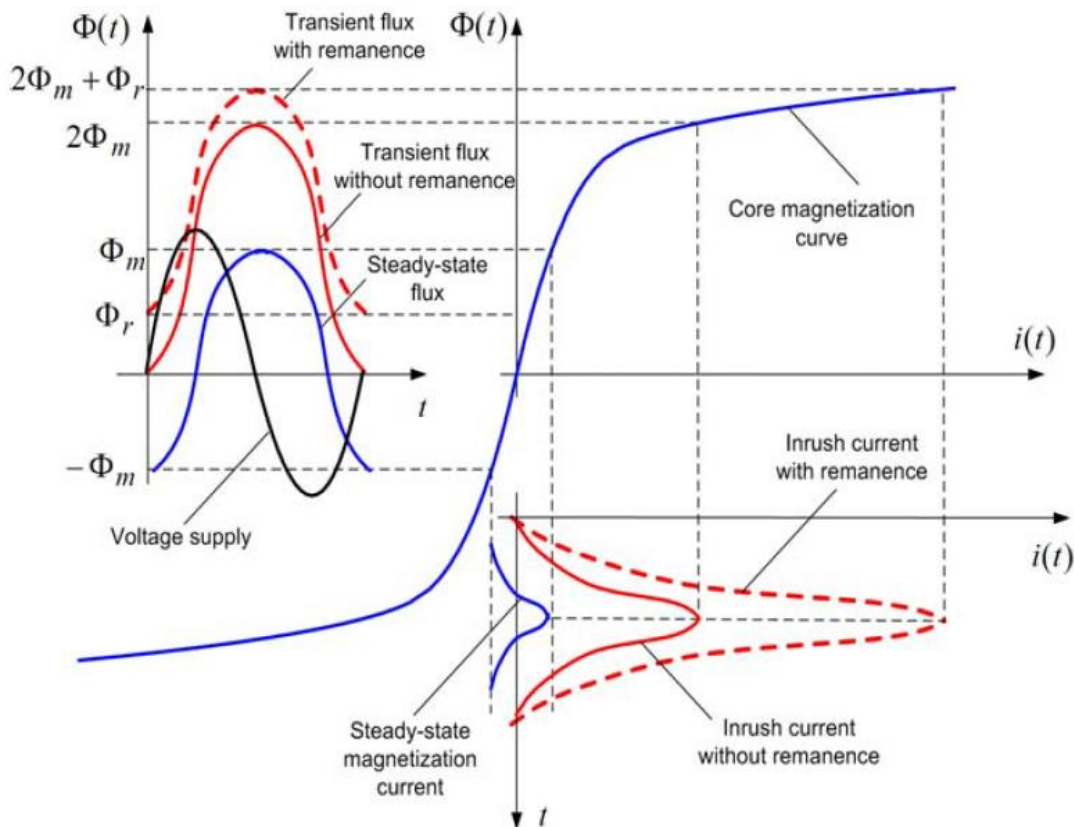


*Figur 8 Frembrakt fluks ved nullgjennomgang [26]*

I en trefase transformator er hver fase 120 grader faseforskjøvet fra hverandre. Dersom alle fasene kobles inn likt er det ikke mulig å unngå at en av fasene magnetiseres nær en nullgjennomgang.

### 5.2.2 Remanens i transformatorjernet

Remanens eller restmagnetisme i transformatorjernet er resultat av hystereseeffekten som oppstår i ferromagnetiske materialer; jernet vil fortsatt være magnetisert selv om den ytre påvirkningen fjernes. Dersom vi går tilbake til hysteresesløyfen beskrevet i kapittel 4.2.7 kan vi se at remanensen ( $\Phi_r$ ), vil ta en verdi mellom punktene B og E som vist på Figur 6. Remanens i jernet vil med andre ord forskyve startverdien til fluksen i positiv eller negativ retning, avhengig av når transformatoren ble koblet fra nettet.



Figur 9 Frembrakt inrush strøm ved forskjellige scenarier [27]

Figur 9 gir et abstrakt bilde på hvor stor innvirkning remanens og innkoblingstid har på inrush strømmens amplitude. Den stykkevis røde linjen illustrerer magnetisering ved spennings nullgjennomgang, samtidig er det en viss verdi av positiv remanens i jernet. Dette fører til at vi får en større start verdi av fluks ved magnetisering. Jernet går da dypere i metning langs den ulineære magnetiseringskurven, og vi får en betraktelig større inrush strøm. Slike tilfeller kan uttrykkes som;

$$\Phi = 2\Phi_m + \Phi_r \quad (20)$$

Det er altså under disse omstendighetene vi kan forvente de mest ekstreme verdier av inrush strøm, som kan skape negative konsekvenser for kraftsystemet. En trefase transformator vil alltid ha en viss

verdi av remanens i to av fasene dersom alle fasene kobles fra nettet samtidig. Som nevnt tidligere kommer dette av at hver fase er 120 grader faseforskjøvet fra hverandre.

### 5.2.3 Kortslutningsytelsen til kraftsystemet

En transformator vil ikke lengre oppføre seg som en spole med lineær økning av strøm når den går i metning. Induktansen til transformatoren vil da bli betraktelig redusert. Økning av strøm i en spole er invers proporsjonal til induktansen. ( $di/dt = v/L$ ). Et fall i induktansen vil dermed føre til at strømmen stiger raskere. Det vil da gå inrush strømmer fra forsyningskilden mot avgangene i kraftsystemet, og det eneste som vil begrense de er totalresistansen til kraftsystemet. [25]

Et kraftsystem med høy kortslutningsytelse vil ha en lav impedans, mens et kraftsystem med liten kortslutningsytelse vil ha en høy impedans. [28] Dette vil si at vi kan forvente høyere verdier av inrush strøm i kraftsystemer som har en høy kortslutningsytelse. [29, p. 149]

### 5.3 Konsekvensen av inrush

Hovedsakelig er det tre konsekvenser som følge av inrush strømmer;

- Høy strøm.
- Uønsket trip av komponenter i kraftsystemet.
- Transiente spenningsfall.

Tidskonstanten ( $L/R$ ) til en RL-krets er ikke konstant; induktansen vil variere avhengig av hvor på metningskurven vi befinner oss. Inrush strøm er størst i de første periodene ettersom trafokjernen da oppnår en dypere metning, som igjen fører til en lav induktans. Etter hvert som tapene og resistansen demper strømmen, faller metning og induktansen øker. Inrush strømmene har derfor en høy utgangshastighet og reduseres gradvis til vi når stasjonære verdier. [25]

Dersom komponentene i kraftsystemet ikke er dimensjonert for å håndtere høye inrush strømmer kan det også føre til uønsket trip av for eksempel effektbrytere og frekvensomformere.

En annen konsekvens er transiente spenningsfall som er et større problem i svake systemer. Svake nett vil ha en lav kortslutningsytelse og en høy impedans, slik at spenningen blir mer påvirket av for eksempel motorstarter eller magnetisering av transformatorer. Det er kapasiteten i transformatoren og dimensjonering kraftsystemet som bestemmer hvilken kortslutningseffekt det er på et hvert punkt i nettet. [28] Et skipsanlegg hvor nettet ikke er «stivt», vil derfor være utsatt for transiente spenningsfall.

## 5.4 Tiltak for å redusere inrush strøm

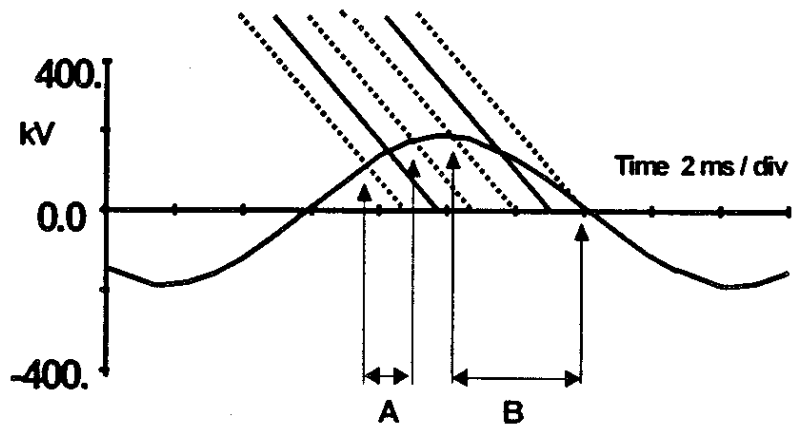
Ettersom inrush strømmene kan bli så høye som 10 til 20 ganger transformatorens merkestrøm, kan det være aktuelt å benytte forskjellige metoder for å begrense de. Vi har valgt å fokusere på tre forskjellige tiltak innenfor styrt-innfasing;

- Rapid Closing Strategy
- Delayed Closing Strategy
- Simultaneous Closing Strategy

Styrt innfasing blir brukt for å bestemme eksakt når bryteren skal lukke eller åpne for å treffe på det best mulige punktet i systemets spenningskurve. I praksis blir dette utført ved å legge inn en tidsforsinking. For å oppnå ett best mulig resultat ved styrt innfasing bør man bruke en mekanisk bryter med høy nøyaktighet og bryteren må kunne brukes uavhengig i hver fase. [30] I teorien vil eliminering av inrush strøm ved bruk av styrt innfasing fungere godt. I en simulering vil bryterne være ideelle. Det vil si at bryterne kan åpne og lukke seg umiddelbart uten noen form for avvik. [14] For bruk av styrt innfasing i ett praktisk anlegg må det tas hensyn til flere faktorer [31];

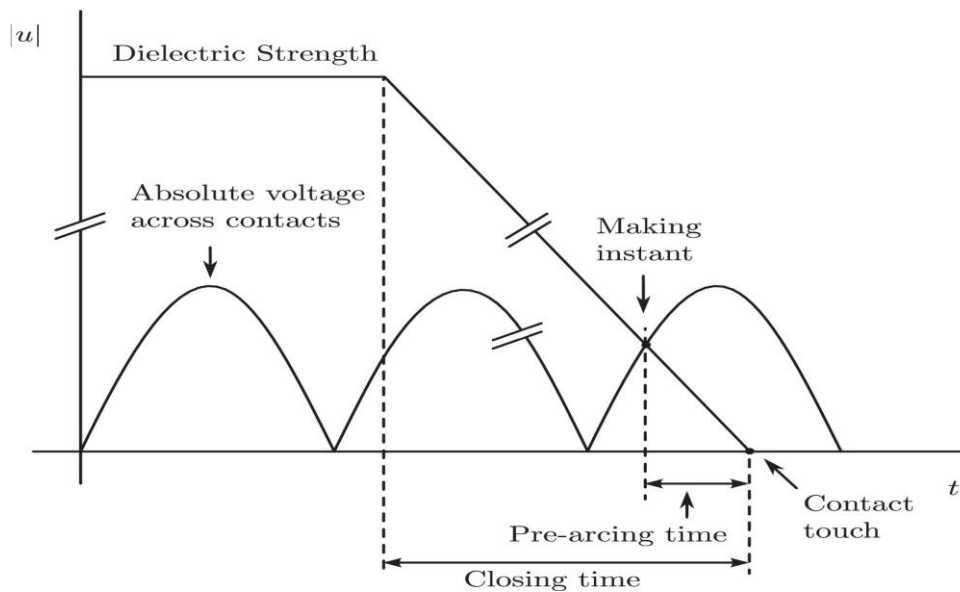
- Mekanisk tidsavvik
- Feil målinger av remanens fluks.
- Påvirkningen av Pre-Arcing.
- Konfigurasjon i transformatorens kjerne og vikling.

Ved bruk av mekaniske brytere vil det oppstå et lite avvik rundt operasjonstiden. Dette skjer på grunn av endringer i systemets karakteristikk, for eksempel omgivelsestemperatur. For slike brytere er et normalt tidsavvik mindre enn  $\pm 1$  millisekund. [31] For bruk av mekaniske brytere i ett reelt system er det viktig å forstå og kompensere for påvirkningen av mekanisk tidsavvik. Ved simulering bruker vi ideelle brytere, vi kan derfor se vekk fra påvirkningen av mekanisk tidsavvik.



Figur 10 Effektene av mekanisk tidsavvik og pre-arcing [31]

Når en bryter lukkes, vil det oppstå elektrisk kontakt før klemmene får mekanisk kontakt. Når gapet mellom polene reduseres vil det oppstå dielektrisk sammenbrudd når spenningen i bryteren overgår bryterens gjennomslagsspenning. [31] Dette fenomenet heter pre-arcing, og blir illustrert i Figur 11. For høyspennings brytere blir nedstengningstiden definert som tiden det tar fra bryteren lukkes til det er mekanisk kontakt mellom polene. [9]

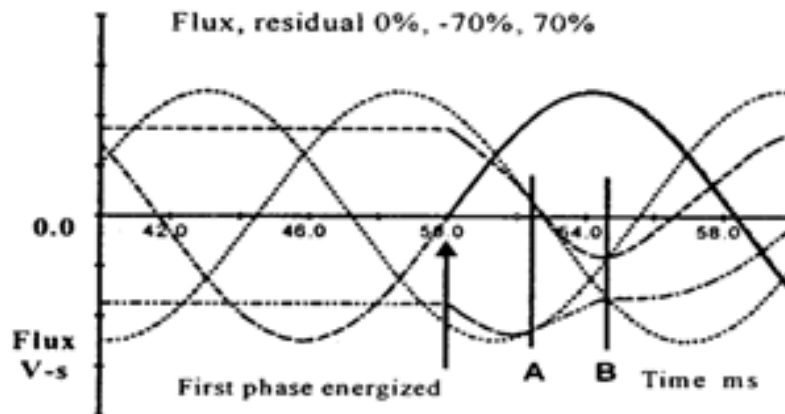


Figur 11 Pre-arcing karakteristikk for HVAC brytere [32]

### 5.4.1 Rapid Closing Strategy (RCS)

Ved bruk av RCS vil først en fase bli magnetisert og de to gjenværende fasene blir magnetisert innen en fjerdedels syklus. Det optimale magnetiseringspunktet er definert ved krysningen mellom den prospektive fluksen og remanensen i trafokjernen. Etter den første fasen er magnetisert vil det bli induisert en dynamisk fluks i de to andre fasene. Den induerte dynamiske fluksen vil da krysse med remanensen innen en fjerdedel syklus, som vi kan se i Figur 12. Det mest optimale tidspunktet å magnetisere de to gjenværende fasene er definert i punk A og B i Figur 12.

Innenfor styrt-innfasing er RCS den vanskeligste strategien å ta i bruk, ettersom den krever IPOC Bryter i hver fase, og at remanensen er kjent i alle tre fasene. Det kreves også kunnskap om trafokjernens karakteristikk ettersom den dynamiske fluksen som oppstår i de to gjenværende fasene er ulineær, etter den første fasen magnetiseres. I praksis er derfor dette en vanskelig metode å ta i bruk.

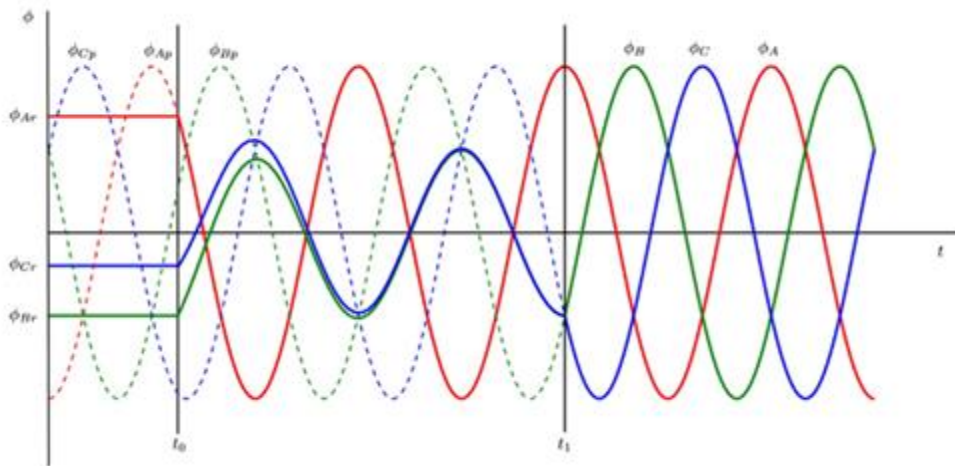


Figur 12 Illustrasjon av RCS [31]



### 5.4.2 Delayed Closing Strategy (DCS)

Ved DCS kreves det bare en IPOC bryter og remanensmåler i en av fasene. Den første fasen lukkes i det den prospektive fluksen er lik remanensen i tilhørende fase i fasen, mens de to andre fasene lukkes etter ett par sykluser. Remanensen i de to fasene som ikke er magnetisert vil etter en kort tid forsvinne og bli erstattet med en andel av den dynamiske fluksen fra den magnetiserte fasen. Denne hendelsen er kjent som kjernefluksutjevning og er demonstrert i Figur 13. På grunn av kjernefluksutjevning trengs det ikke kunnskap om karaktetistikken til trafokjernen.



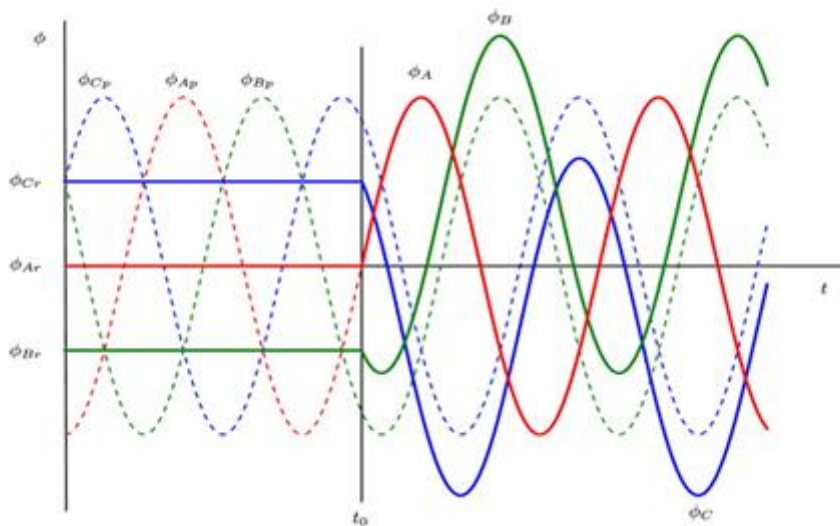
Figur 13 Illustrasjon av DCS [32]

Fra Figur 13 kan man se at fase A blir magnetisert ved  $t_0$  hvor den prospektive fluksen er lik remanensen. Fase B og C blir magnetisert samtidig i  $t_1$ . Det er fordel å magnetisere den fasen med høyest remanens først. Magnetisering med høy prospektiv fluks betyr at man magnetisere med lav spenning. [14]

### 5.4.3 Simultaneous Closing Strategy (SCS)

Ved SCS magnetiseres alle fasene samtidig. Det kreves altså ikke IPOC bryter, men for å eliminere inrush strømmene må en ha kjennskap til remanensen i alle tre fasene. For at denne metoden skal være effektiv må remanensen følge mønsteret  $[0, -r, +r]$ . Dette kan oppnås ved kontrollert avmagnetisering, hvor bryteren åpnes ved en spenningstopp, slikt at remanens i den fasen blir tilnærmet lik null.

Magnetisering skjer umiddelbart når den prospektive fluksen er lik remanensen i den fasen med lavest remanens. Altså hvis remanensen er lik null i en fase vil innkobling skje ved spenningens maksimalverdi i tilhørende fase. De to fasene med remanens nivå  $+r$  og  $-r$  vil ikke ha spenningstopp ved mekanisk stenging. Pre-arcing vill derfor oppstå litt senere og resultere i nærmest optimal magnetisering. [14]



Figur 14 Illustrasjon av SCS [32]

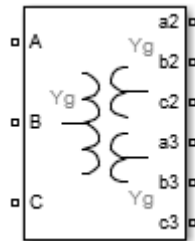
Figur 14 illustrerer SCS hvor remanensen til fase A er lik null, og fase B og C har en remanens verdi omtrent lik  $\mp 1/2$ . Den dynamiske fluksen i fase B og C vil derfor bli litt høyere enn nominell fluks, og inrush strøm blir dermed ikke helt eliminert.

## 6 Simulink modell

Vi har valgt å ta utgangspunkt i en modell designet av G. Sybille (Hydro-Quebec). Modellen er hentet fra nettsiden Mathworks og kan åpnes i Simulink ved følgende MATLAB kommando: `power_transfosat`. Alle blokkene som er brukt i denne modellen er hentet fra «Specialized Power System» biblioteket.

### 6.1 Transformator

Transformator modellen vi har brukt er en trefase transformator (3 vindinger). Denne blokken er satt sammen av tre en-fase-transformatorer. Modellen tar hensyn til resistansen i viklingene (**R1 R2 R3**) og lekkasjeinduktansen (**L1 L2 L3**).

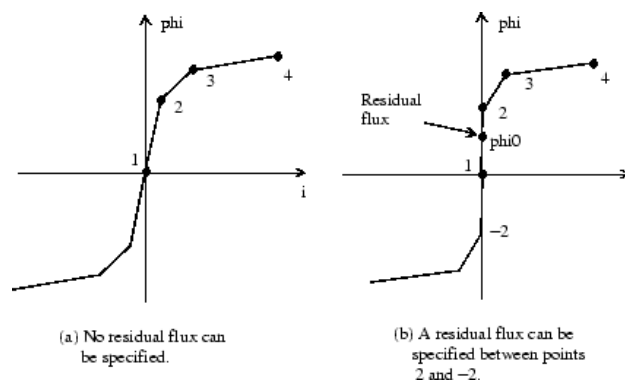


Figur 15 Transformator blokk i Simulink

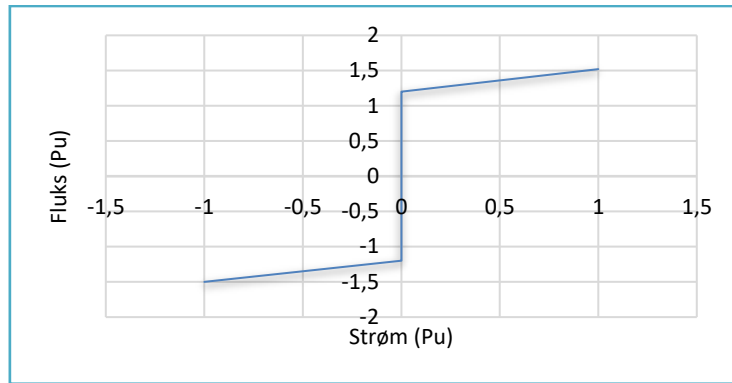
Metning kan aktiveres på to måter:

- Modellere metning uten hysteres. Det totale jernetapet blir da modellert av en stykkevis lineær lineær resistans,  $R_m$ .
- Modellere metning med hysteres. En hystereseloop kan da designes i `powergui` blokken.

Vi har valgt å bruke en modell uten hysteres. Metnings karakteristikk er da et stykkevis lineært forhold mellom fluks og den magnetiserende strømmen. Fra Figur 16 ser vi at punkter på x-y planet kan spesifiseres som ønsket.



Figur 16 Illustrasjon av metnings karakteristikk [33]



Figur 17 Metning karakteristikk

Figur 17 viser metnings karakteristikken som er tatt i bruk i denne modellen. Her kan ønsket remanens spesifiseres mellom 1.2  $Pu$  og -1.2  $Pu$ . Strøm på 1  $Pu$  tilsvarer en fluksverdi på 1.52  $Pu$ .

<b>3 – Fase Transformator ( 3 windings)</b>		
Navn	Verdi	Enhet
$P_n$	450	MVA
$f_n$	60	Hz
$V_1$	500	KV
$V_2$	230	KV
$V_3$	60	KV
$R_1$	0.002	$Pu$
$R_2$	0.002	$Pu$
$R_3$	0.0015	$Pu$
$L_1$	0.08	$Pu$
$L_2$	0.08	$Pu$
$L_3$	0.30	$Pu$

Tabell 1 Trafo parametre

## 6.2 Spenningskilde

Til forsyning er det brukt en spenningskilde bak en impedans.



Figur 18 Spenningskilde bak en impedans

<b>3 – fase spenningskilde</b>		
Navn	Verdi	Enhet
Spennning (RMS)	500	KV
Frekvens	60	Hz
Resistans	5,55	$\Omega$
Induktans	0,221	H

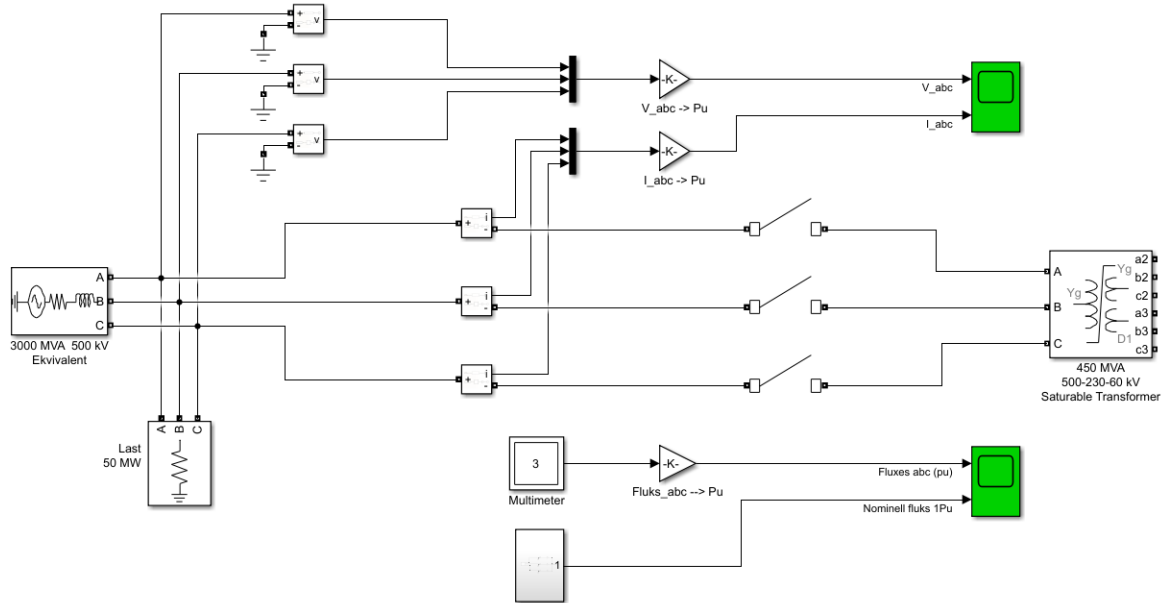
Tabell 2: 3-fase spenningskilde

### 6.3 Målinger

Målingene i de forskjellige simuleringene er gjort ved hjelp av Scope blokken i Simulink. Alle målingene er gjort om til per unit, slik at det er lettere å sammenligne resultatene.

### 6.4 Fullstendig modell

Figur 19 Viser fullstendig bilde av modellen vi har brukt. Vi har også tatt med en resitiv last etter spenningskilden for å redusere støyet på inrush strømmene.



Figur 19 Simulink modell

## 7 Simuleringsresultat

I denne delen vil vi legge frem alle simuleringsresultatene. I del 7.1 til 7.3 er det simulert magnetisering av transformator ved tre forskjellige situasjoner, hvor følgende element har blitt endret;

- Fasevinkel
- Kilderesistans
- Remanens

I del 7.4 til 7.6 har vi simulert magnetisering av transformatoren ved å ta i bruk følgende tiltak;




- Rapid Closing Strategy
- Delayed Closing Strategy
- Simultaneous Closing Strategy

Ved alle simuleringene er transformatoren magnetisert i tomgang. Legg merke til at vi har brukt en stykkevis lineær metningskarakteristikk for å simulere metning. I praksis vil transformatorer følge den ulineære hysteresesløyfen. Resultatene er dermed ikke gyldig for praktisk bruk, men hensikten er å få frem prinsippene forklart i kapittel 5.2.

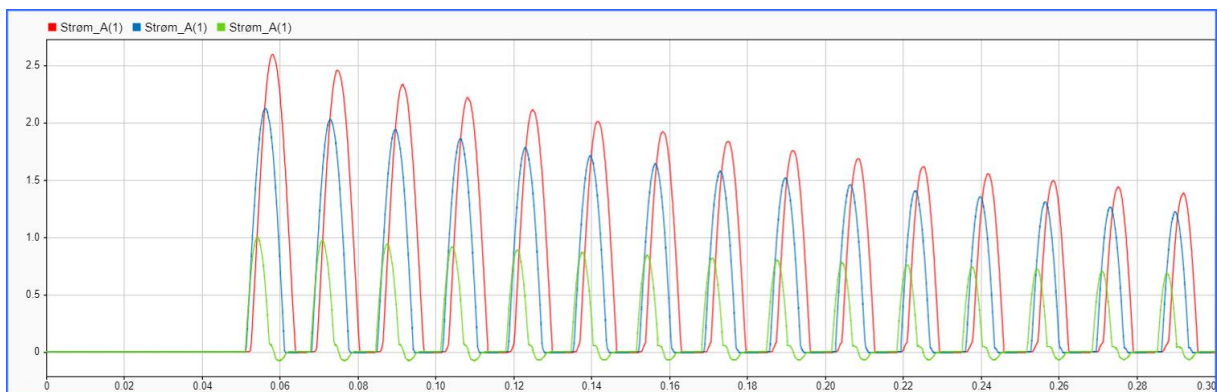
Dette gjelder også ved simulering av tiltakene. Strømmene ble i disse tilfellene veldig små på grunn av den stykkevis lineære metningskarakteristikken.

## 7.1 Fasevinkel

I denne delen har vi analysert inrush strøm ved ulike fasevinkler ved innkobling. Tabell 3 viser hvilke verdier som er benyttet under simulering. Simuleringen varer i 0,30 sekunder, og innkobling av transformator skjer ved 0,05 sekunder. Alle verdiene er fra fase A.

<b>Case.1 Fasevinkel ved innkobling</b>		
$R_s$	1.0	Pu
$B_r$	[0.8 - 0.4 0.4]	Pu
$\theta$	Variabel	°
	$\theta = 0^\circ$	
	$\theta = 45^\circ$	
	$\theta = 90^\circ$	

Tabell 3 Case. 1



Figur 20 Inrush strøm ved magnetisering med ulike fasevinkler

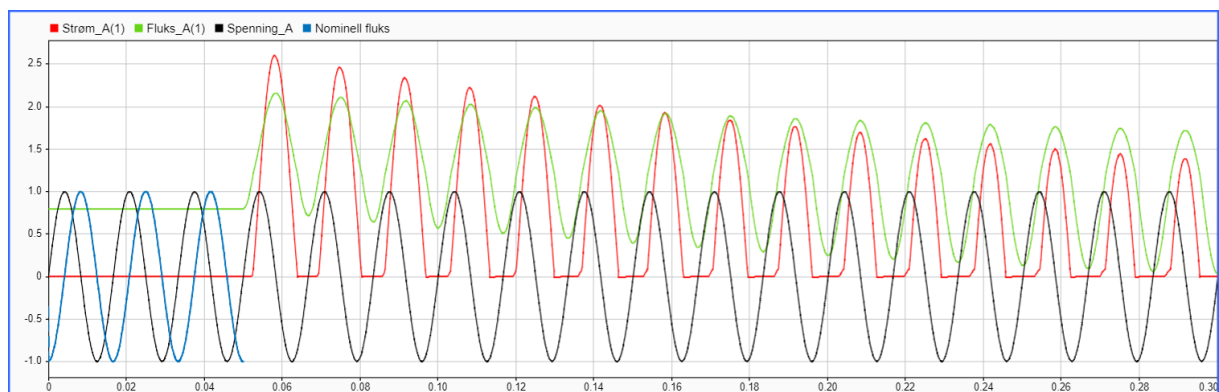
Ved å studere Figur 20 ser vi at den største amplituden oppstår når  $\theta = 0^\circ$ , og den minste når  $\theta = 90^\circ$ . Dette stemmer også med teorien vi fremla i kapittel 4.2.1; Innkobling ved en nullgjennomgang genererer det største pådraget av inrush strøm.

### 7.1.1 Analyse av fasevinkelens innvirkning

Den blå kurven viser nominell fluks ved 1.0 Pu, og er en hjelpe linje til å forklare hva som skjer. Ved drift er fluks faseforskjøvet 90° etter spenningen. Fluks har da sin nullgjennomgang når spenningen er ved en topp/peak, som nevnt tidligere er ikke dette mulig ved innkobling, dersom vi ser vekk i fra remanens. Fluks vil dermed starte med et utgangspunkt lik null. I Denne analysen er  $\Phi_r = 0.8$  Pu, ved  $t = 0$ .

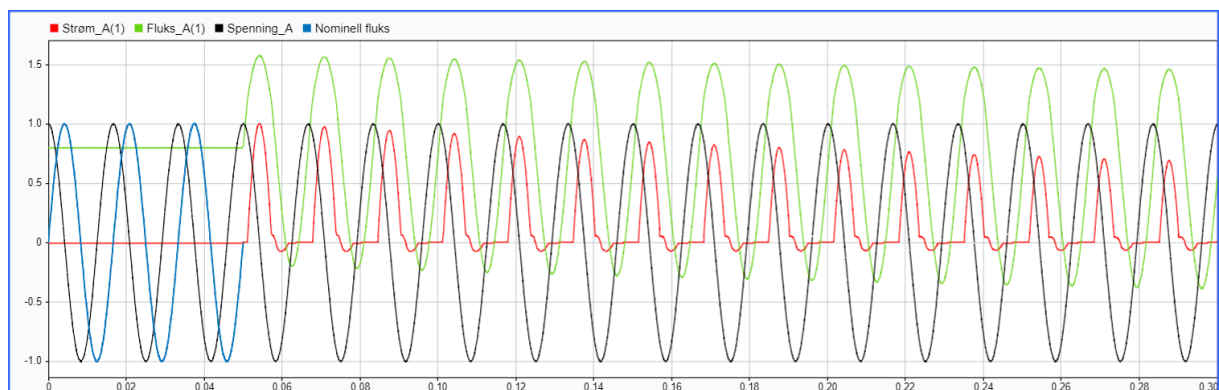
<b>Fase_A</b>	
<span style="color: red;">—</span>	= Strøm (Pu)
<span style="color: green;">—</span>	= Fluks (Pu)
<span style="color: blue;">—</span>	= Nominell fluks (1.0 Pu)
<span style="color: black;">—</span>	= Spenning (1.0 Pu)

Tabell 4 Fargekode fase A ved analyse av fasevinkelens innvirkning



Figur 21 Analyse av inrush strøm ved  $\theta=0^\circ$

Fra Figur 22 ser vi at nominell fluks er ved sin negative peak ved innkobling, og er på vei til å snu i positiv retning. Spenningen er da ved en nullgjennomgang. Når spenningen er ved en nullgjennomgang, er endringsraten til fluks størst. Summen av innkobling ved spenningens nullgjennomgang, og remanens i jernet gjør at vi her får en høy inrush strøm.



Figur 22 Analyse av inrush ved  $\theta=90^\circ$



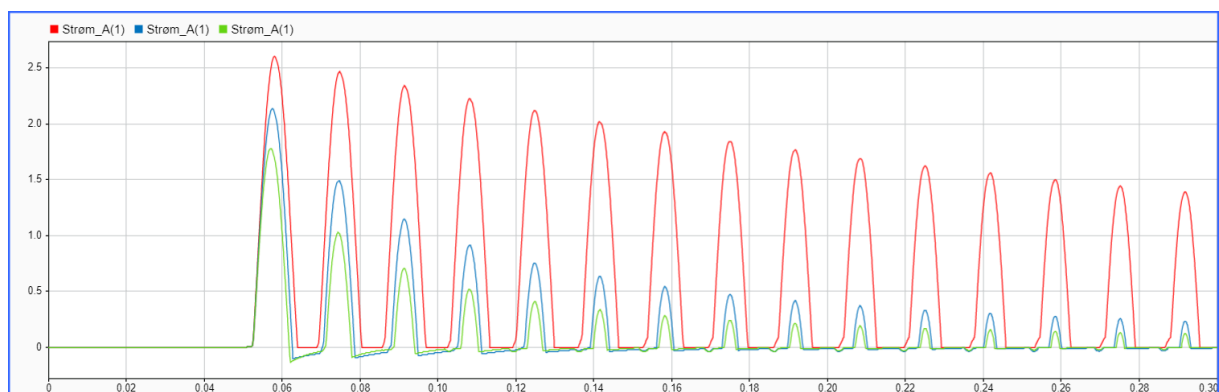
Fra Figur 22 skjer innkobling ved en spennings peak. I motsetning til Figur 21, er endringsraten til fluks minst i dette tilfellet. Dette fører til en betraktelig reduksjon av inrush strøm.

## 7.2 Kilderesistans

I Denne delen har vi analysert inrush strøm ved ulike resistansverdier til spenningskilden. Tabell 5 viser hvilke verdier som er benyttet under simulering. Simuleringen varer i 0,30 sekunder, og innkobling av transformator skjer ved 0,05 sekunder. Alle verdiene er fra fase A. Det er antatt at  $R_s = 1 \text{ Pu}$ , tilsvarer  $5.55\Omega$ .

<b>Case. 2 Kilderesistans</b>		
$R_s$	Variabel	Pu
$B_r$	[0.8 - 0.4 0.4]	Pu
$\theta$	0	°
<span style="color: red;">—</span> $R_s = 1 \text{ Pu}$		
<span style="color: blue;">—</span> $R_s = 10 \text{ Pu}$		
<span style="color: green;">—</span> $R_s = 20 \text{ Pu}$		

Tabell 5 Case. 2



Figur 23 Inrush strøm ved magnetisering med ulike kilderesistanser

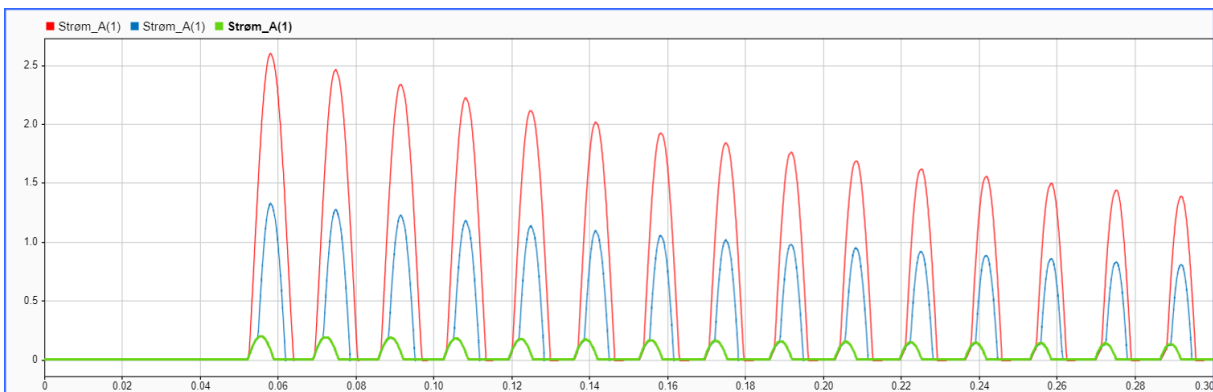
Ved å studere Figur 23 ser vi at mindre motstand fører til høyere inrush strøm. Avviket på den første peaken er ikke like stor som ved ulike fasevinkler, men det interessante her er hvor raskt inrush strømmen forsvinner ved høyere motstand. Altså inrush strømmens varighet blir betraktelig redusert på grunn av X/R forholdet.

### 7.3 Remanens

I Denne delen har vi analysert inrush strøm ved ulike remanens verdier i trafokjernen. Tabell 6 viser hvilke verdier som er benyttet under simulering. Simuleringen varer i 0,30 sekunder, og innkobling av transformator skjer ved 0,05 sekunder. Alle verdiene er fra fase A.

<i>Case. 3 Remanens</i>		
$R_s$	1.0	Pu
$B_r$	Variabel	Pu
$\theta$	0	°
<span style="color: red;">—</span>	$B_r = [0.8 \quad -0.4 \quad 0.4] Pu$	
<span style="color: blue;">—</span>	$B_r = [0.0 \quad -0.4 \quad 0.4] Pu$	
<span style="color: green;">—</span>	$B_r = [-0.8 \quad -0.4 \quad 0.4] Pu$	

Tabell 6 Case. 3



Figur 24 Inrush strøm ved magnetisering med ulike remanens verdier

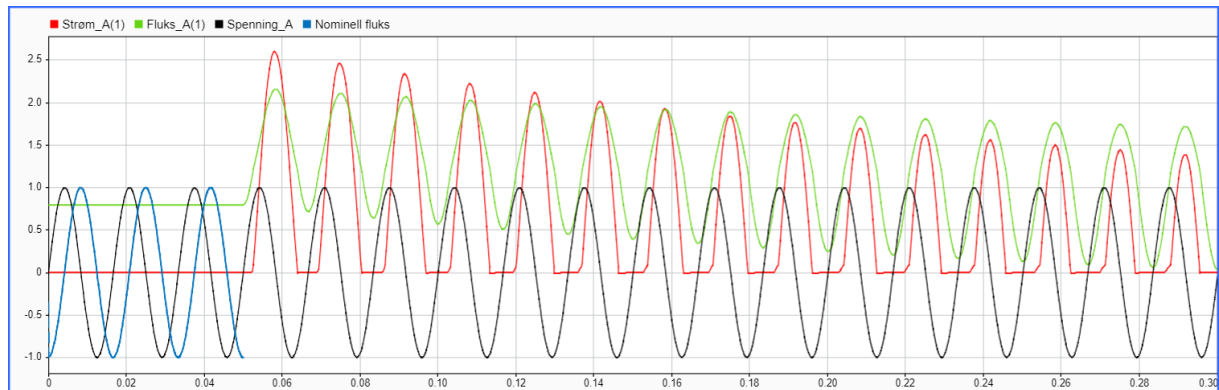
Ved å studere Figur 24 ser vi at den største peaken oppstår når  $B_r = 0.8$ , og den minste når  $B_r = -0.8$ .

### 7.3.1 Analyse av remanensens innvirkning

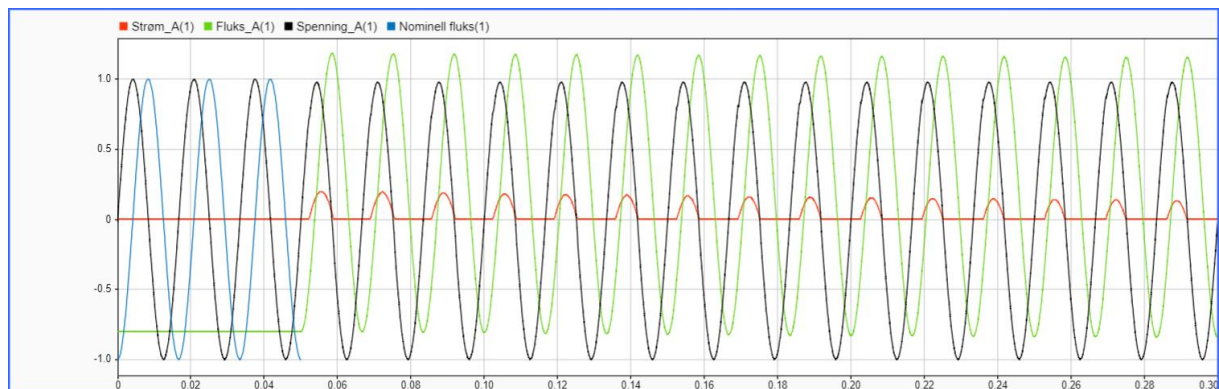
Den blå kurven viser nominell fluks ved 1.0 Pu, og er en hjelpe linje til å forklare hva som skjer.

<b>Fase_A</b>	
<span style="color: red;">—</span>	= Strøm (Pu)
<span style="color: green;">—</span>	= Fluks (Pu)
<span style="color: blue;">—</span>	= Nominell fluks (1.0 Pu)
<span style="color: black;">—</span>	= Spenning (1.0 Pu)

Tabell 7 Fargekode fase A ved analyse av remanensens innvirkning



Figur 25 Analyse av inrush ved  $B_r = 0.8$



Figur 26 Analyse av inrush ved  $B_r = -0.8$

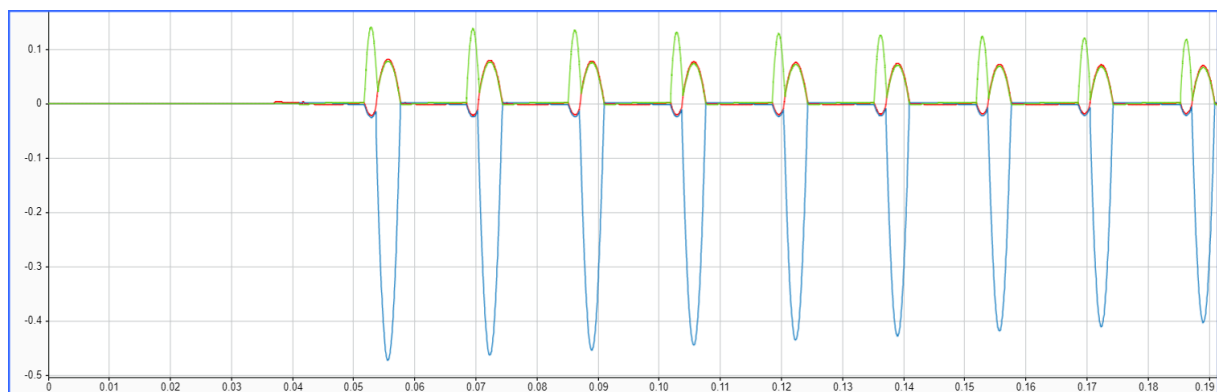
I både **Figur 25** og **Figur 26** skjer innkobling ved spenningens nullgjennomgang. Endringsraten til fluks er da størst og like stor i begge tilfellene. I **Figur 26** starter fluksen med et utgangspunkt lik  $\Phi_r = -0.8$ , som vil resultere i en reduksjon av inrush strøm. Altså endringsraten er like stor i begge tilfeller, men remanensen i den nederste starter med et negativt utgangspunkt.

## 7.4 Rapid Closing Strategy (RCS)

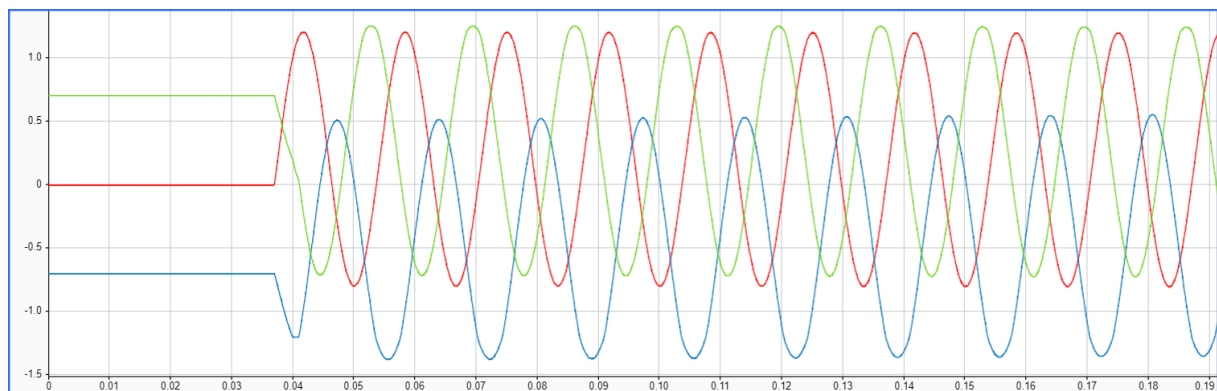
Tabell 8 viser hvilke verdier som er benyttet under simulering. Simuleringen varer i 0,20 sekunder.

<i>Verdier</i>		
$R_s$	1.0	<i>Pu</i>
$B_r$	[0.0 - 0.7 0.7]	<i>Pu</i>
$\theta$	0	$^\circ$
<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="width: 20px; height: 5px; background-color: red; margin-right: 5px;"></div> <span><i>Fase_A</i></span> </div>		
<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="width: 20px; height: 5px; background-color: blue; margin-right: 5px;"></div> <span><i>Fase_B</i></span> </div>		
<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="width: 20px; height: 5px; background-color: green; margin-right: 5px;"></div> <span><i>Fase_C</i></span> </div>		

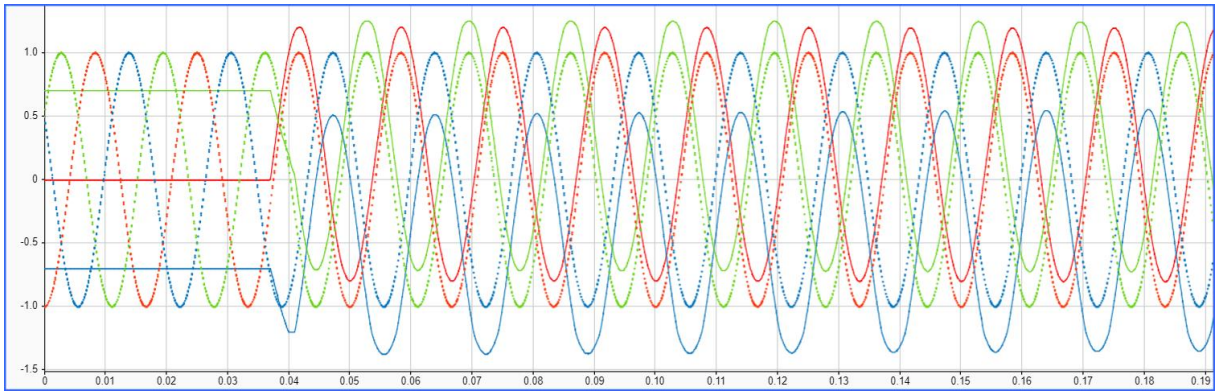
Tabell 8 Parametre RCS



Figur 27 Inrush strøm ved RCS



Figur 28 Dynamisk fluks ved RCS



**Figur 29 Dynamisk og prospective fluks ved RCS**

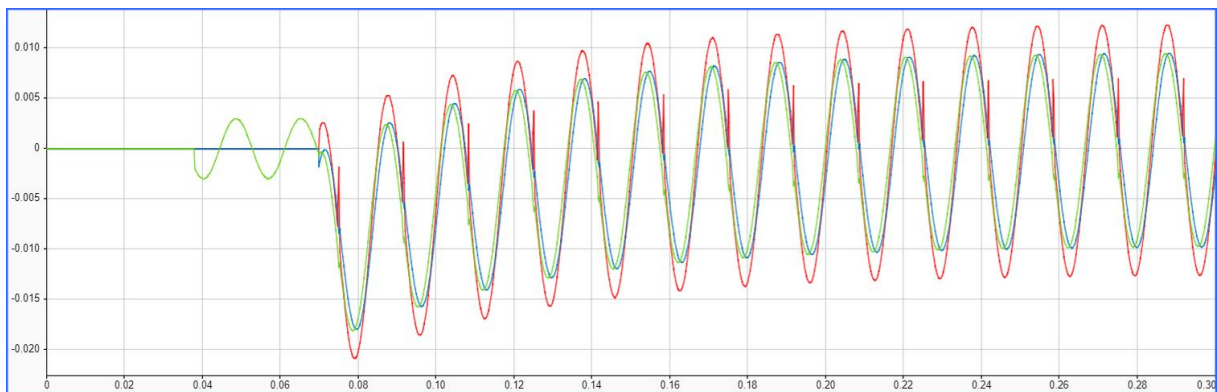
Fra Figur 29 kan vi se at fase\_A (rød) magnetiseres når den tilhørende prospektive fluksen til fase\_a har sin nullgjennomgang. Etter en fjerdedels syklus magnetiseres fase\_B (blå) og fase\_C (grønn). Vi ser at den dynamiske fluksen krysser den prospektive fluksen relativt godt ved magnetisering av alle fasene. Fase\_b har noe avvik fra ved magnetisering mellom den prospektive og dynamiske fluksen, og dette kan vi se igjen fra Figur 27 hvor strømmen slår høyest ut på fase\_B.

## 7.5 Delayed Closing Strategy (DCS)

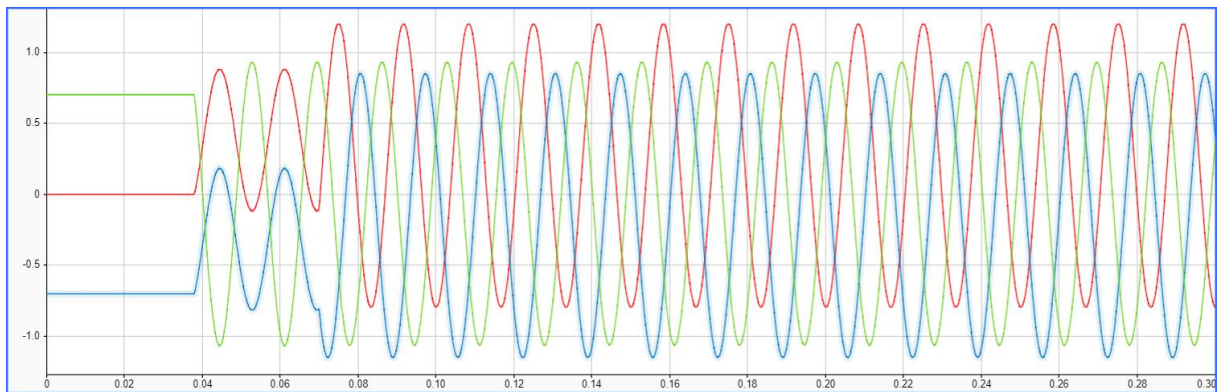
Tabell 9 viser hvilke verdier som er benyttet under simulering. Simuleringen varer i 0,30 sekunder.

<i>Verdier</i>			
$R_s$		1.0	<i>Pu</i>
$B_r$	[0.0 - 0.7 0.7]		<i>Pu</i>
$\theta$		0	$^\circ$
<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="width: 20px; height: 5px; background-color: red; margin-right: 5px;"></div> <span><i>Fase_A</i></span> </div>			
<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="width: 20px; height: 5px; background-color: blue; margin-right: 5px;"></div> <span><i>Fase_B</i></span> </div>			
<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="width: 20px; height: 5px; background-color: green; margin-right: 5px;"></div> <span><i>Fase_C</i></span> </div>			

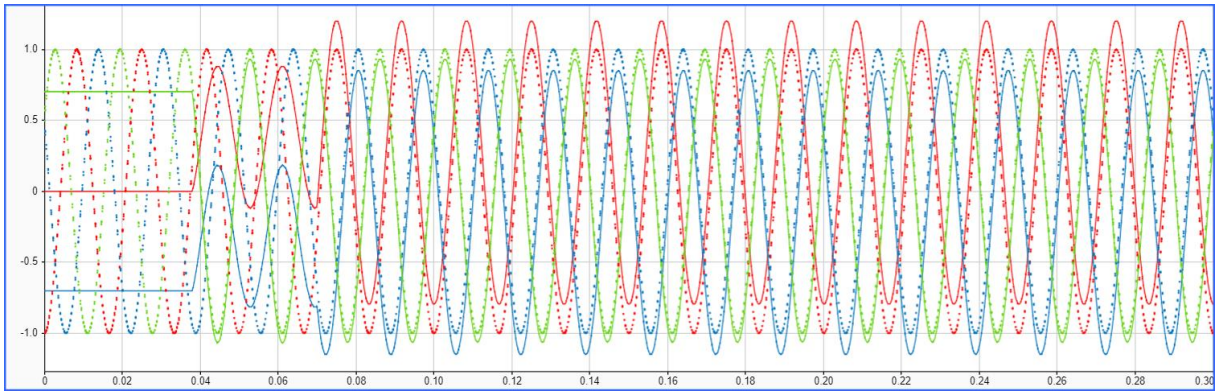
Tabell 9 Parametre DCS



Figur 30 Inrush strøm ved DCS



Figur 31 Dynamisk fluks ved DCS



*Figur 32 Dynamisk og prospektiv fluks ved DCS*

Fra Figur 32 kan vi se at fase\_C (grønn) magnetiseres når den tilhørende prospektive fluksen er lik remanensen. To sykluser senere magnetiseres fase\_A (rød) og fase\_B (blå). Vi ser i dette punktet at den dynamiske og prospektive fluksen krysser hverandre relativt bra.

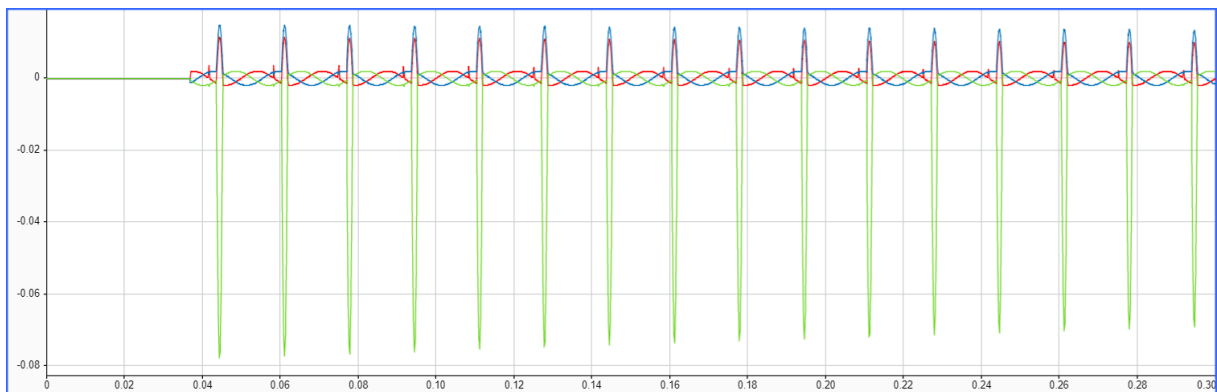


## 7.6 Simultaneous Closing Strategy (SCS)

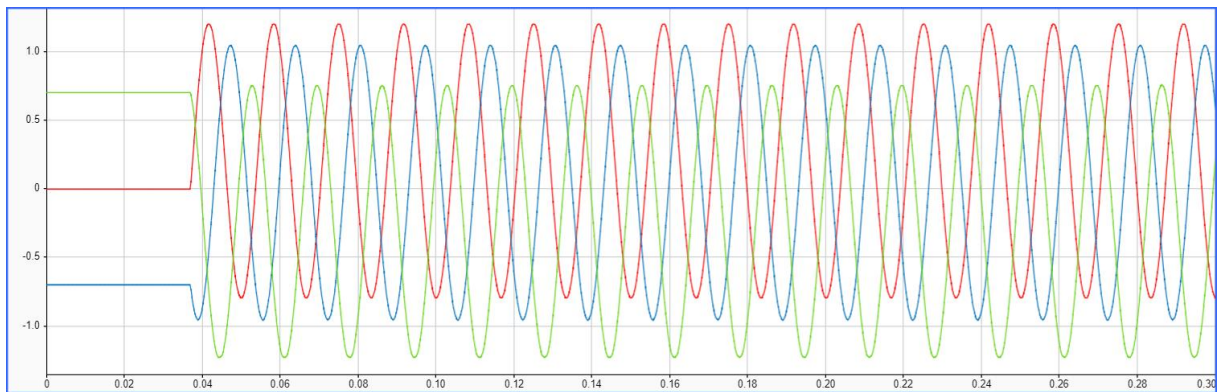
Tabell 10 viser hvilke verdier som er benyttet under simulering. Simuleringen varer i 0,30 sekunder.

<b>Case.1 Fasevinkel ved innkobling</b>		
$R_s$	1.0	Pu
$B_r$	[0.8 - 0.4 0.4]	Pu
$\theta$	Variabel	°
<div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;"> <div style="width: 20px; height: 5px; background-color: red; border: 1px solid black;"></div> <span><math>\theta = 0^\circ</math></span> </div>		
<div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;"> <div style="width: 20px; height: 5px; background-color: blue; border: 1px solid black;"></div> <span><math>\theta = 45^\circ</math></span> </div>		
<div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;"> <div style="width: 20px; height: 5px; background-color: green; border: 1px solid black;"></div> <span><math>\theta = 90^\circ</math></span> </div>		

Tabell 10 Parametre SCS

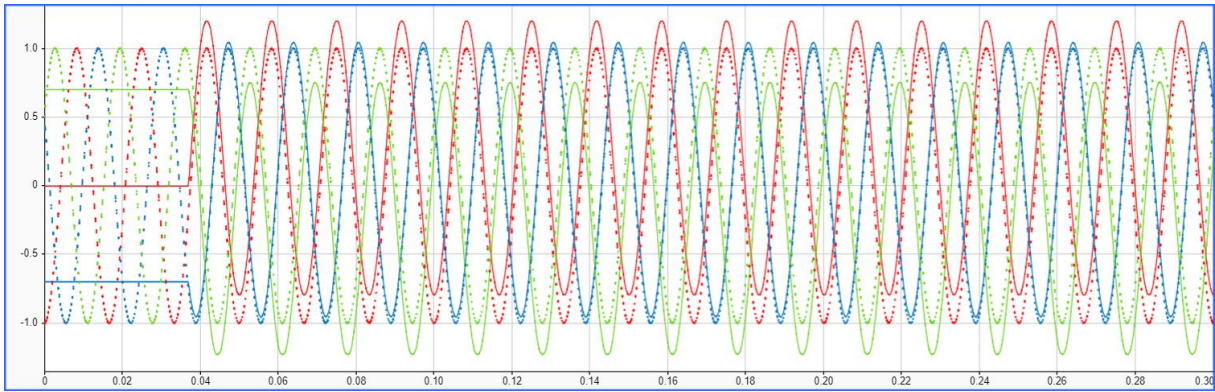


Figur 33 Inrush strøm ved SCS



Figur 34 Dynamisk fluks ved SCS





**Figur 35 Dynamisk og prospektiv fluks ved SCS**

Når remanensen følger mønsteret  $[0, -r, r]$  kan alle fasene legges inn samtidig. Vi ser fra Figur 35 at den prospektive fluksen er relativt lik remanensen i hver fase når magnetisering skjer. Fase\_C og fase\_B vil ikke ha spenningstopp når fasene legges inn, pre-arcing vil derfor oppstå ved ett senere tidspunkt som fører til nærmest optimal magnetisering.

## 8 Laboratorium Forsøk

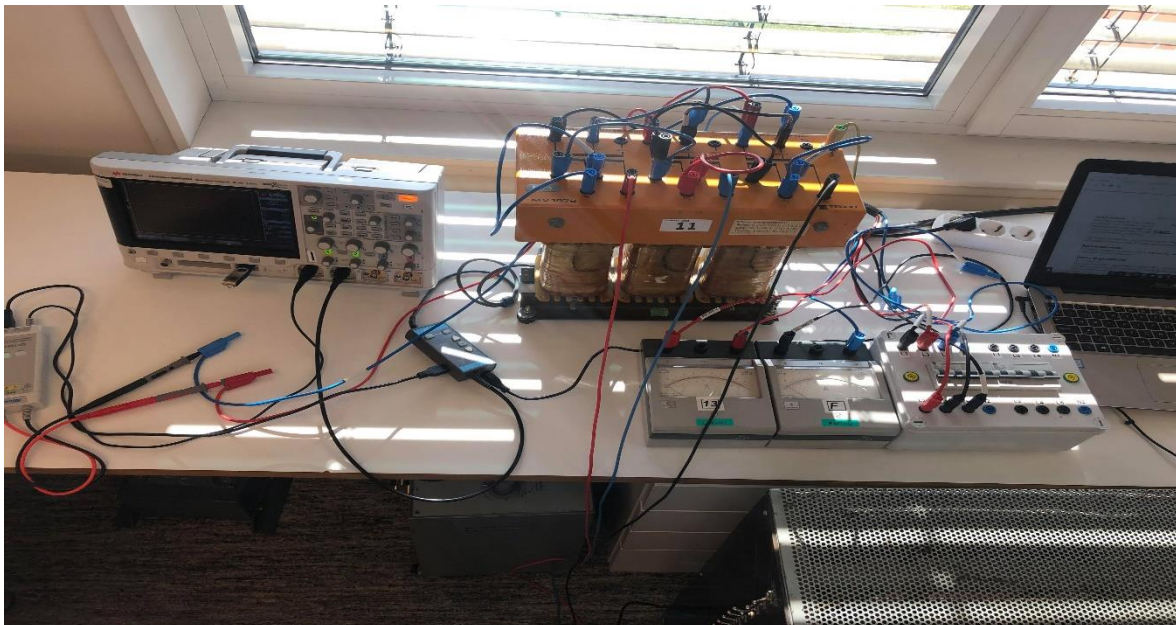
I Laboratorium forsøket har vi magnetiser en transformator ved gjentatte innkoblinger. Legg merke til at denne transformatoren ikke har like parameter som den som er brukt i Simulink modellen. Hensikten med dette laboratorium forsøket er å verifisere og dokumenter inrush strømmer i praksis. Videre vil vi analysere resultatene fra Oscilloskopet.

<b>3 – Fase transformator</b>		
<i>Primær</i>	220/380 [V]	3,3 [A]
<i>Sekundær</i>	66,5 + 66,5 [V]	5 [A]
<i>Ytelse</i>	2 [KVA]	
<i>Frekvens</i>	50 [Hz]	

*Tabell 11 Parametere 3- fase transformator*

Transformatoren ble koblet i stjerne- stjerne (Y-y) og lasten ble målt til 10Ω per fase. Transformatoren ble koblet til en spenningskilde med 240 [V] under magnetisering.

Magnetisering er utført ved å koble inn og ut bryteren. Hensikten med inn og utkoblingen er å treffe ulike punkter på spenningskurven, og samtidig få forskjellige remanens verdier i transformator kjernen. Det er brukt to amperemeter og ett Oscilloskop for å lese av verdiene av utførelsen. Avlesingene er tatt på en fase på primærsiden av transformatoren.



*Figur 36 Bilde av oppkobling i laboratoriet*

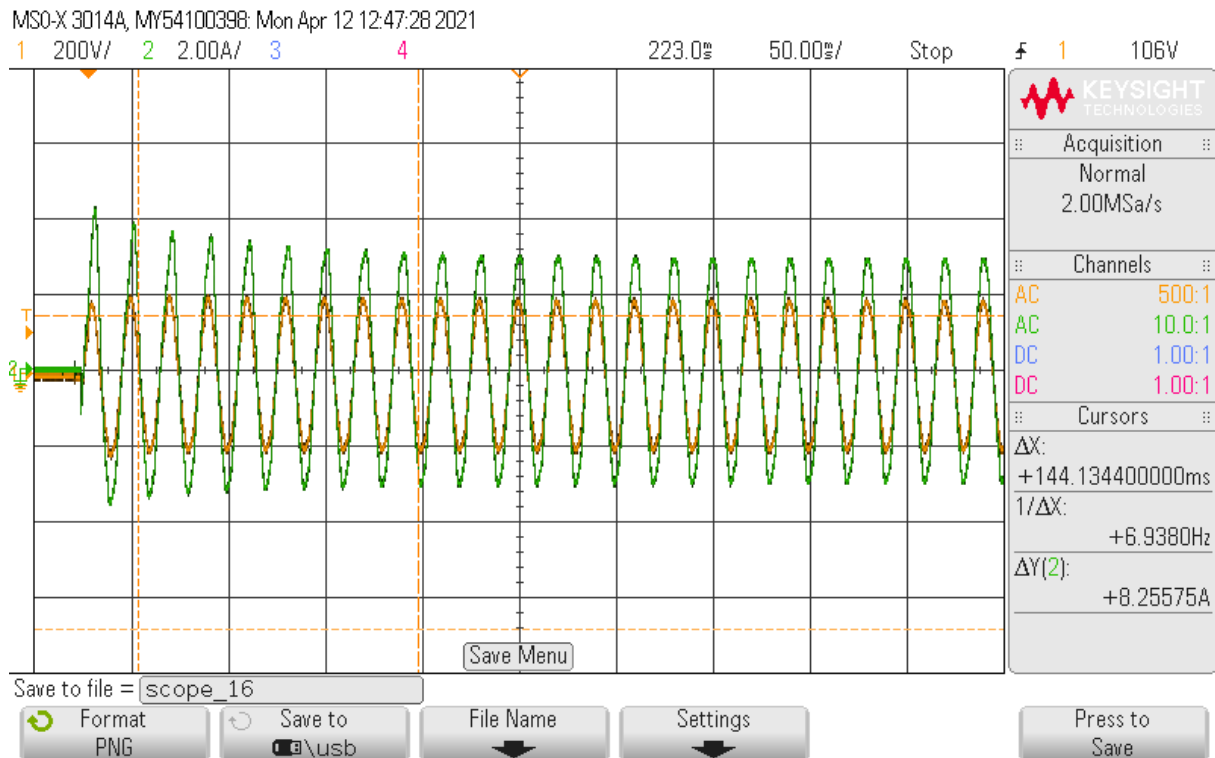
Under den praktiske oppkoblingen og videre testing har vi tatt hensyn til Helse, miljø og sikkerhet. Oppkobling og nedkobling er utført spenningsløst. Ledningene som er brukt er beskyttet med mantel for å hindre berøringskontakt. Transformatoren er plassert på et stabilt underlag og i god arbeidshøyde.

<b>Utstyrliste</b>	
<b>Type</b>	<b>Antall</b>
<i>Last, 3 – Fase</i>	10 $\Omega/f$
<i>Amperemeter</i>	2
<i>Bryter, 3 – Fase</i>	1
<i>Oscilloscop</i>	1
<i>Multimeter</i>	1
<i>Current probe</i>	1
<i>Voltage probe</i>	1

Tabell 12 Utstyrliste praktisk forsøk

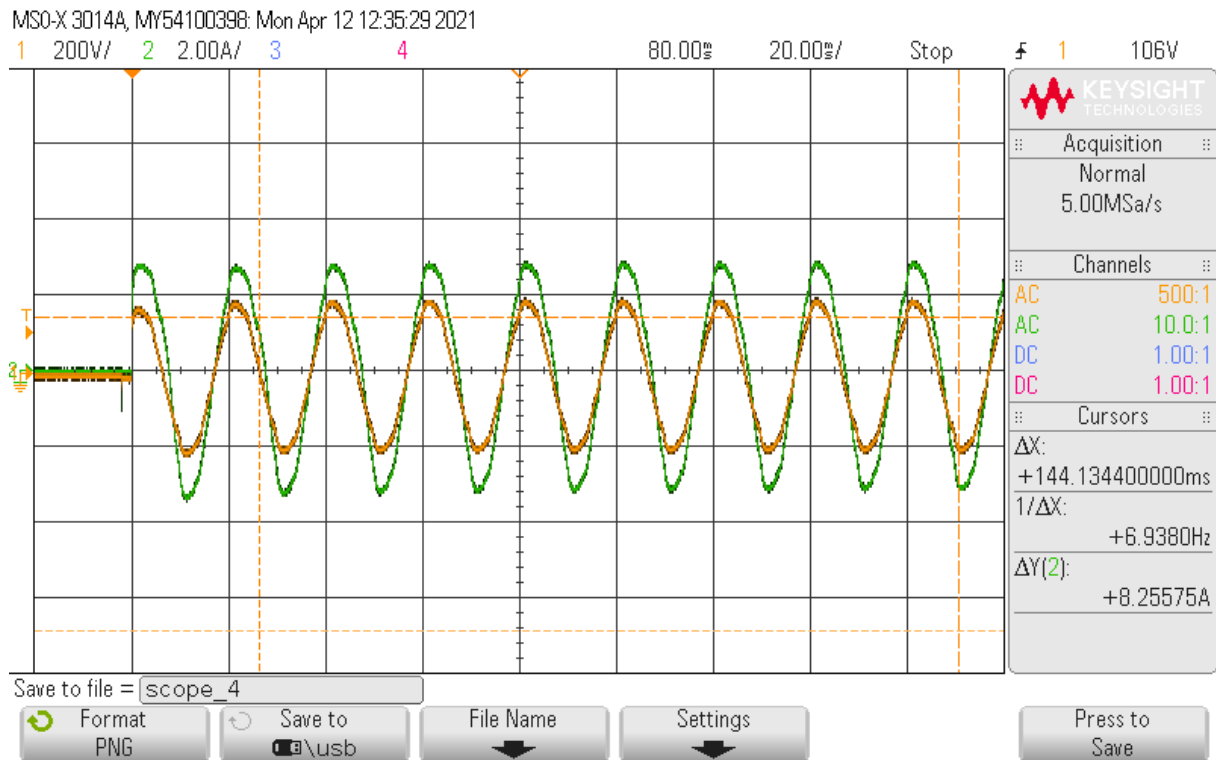
## 8.1 Resultat

I denne delen vil vi legge frem noen av resultatene fra laboratoriums forsøket. I Oscilloskopet er det to sinus kurver, hvor signal 1(oransje) er spenningen og signal 2(grønn) er strømmen. Ettersom skolens laboratorium ikke har utstyr for å måle remanens i er det vanskelig å si nøyaktig hvilke utgangspunkt transformatorkjernen har ved magnetisering. Det blir derfor gjort antagelser.



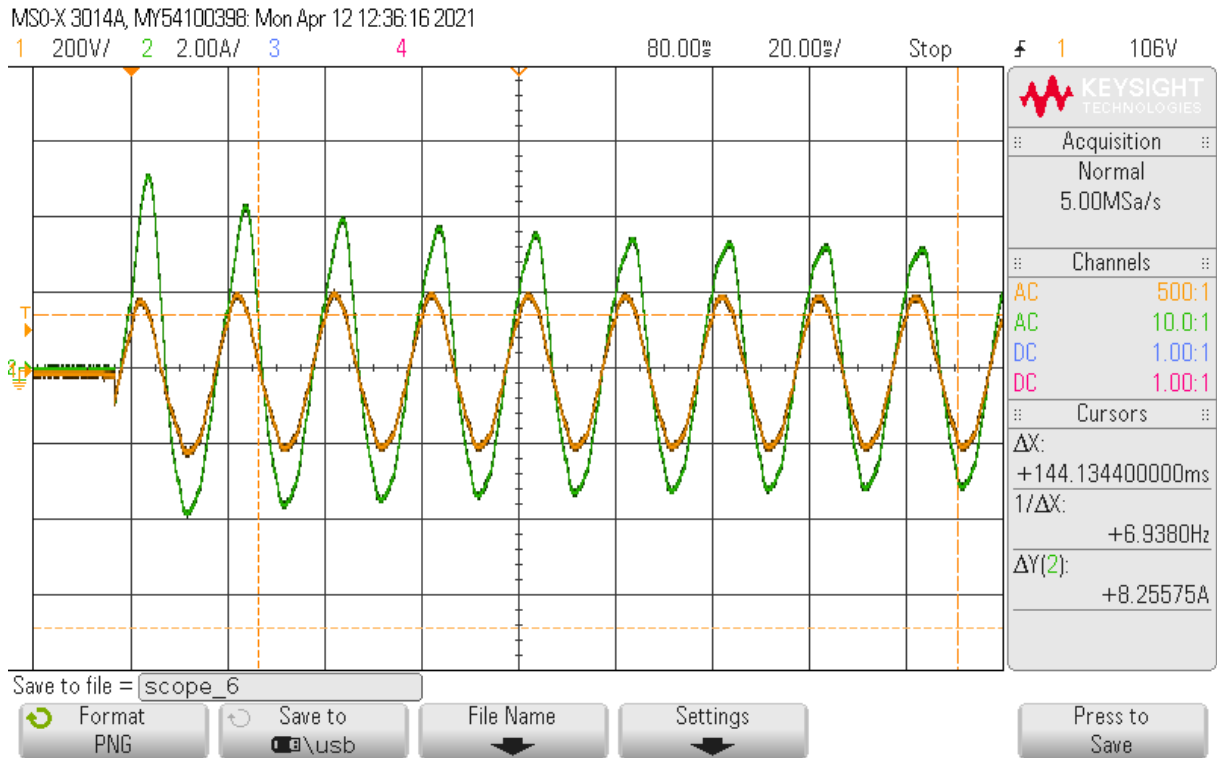
Figur 37 Inrush strøm som går mot nominelle verdier

Figur 37 er brukt som referanse for videre analyse. Vi ser at inrush strømmen stabiliserer seg på rundt 2.4 Ampere.



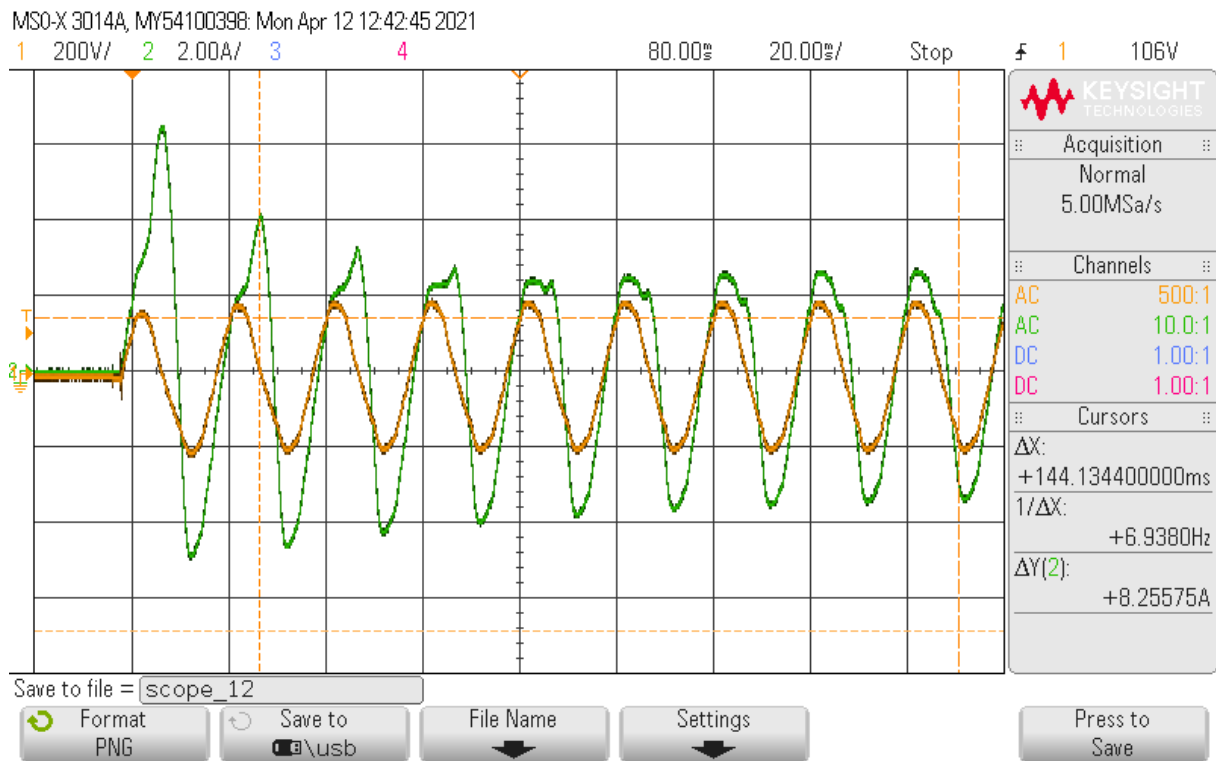
**Figur 38 Magnetisering uten inrush**

Fra Figur 38 ser vi at magnetisering skjer nær spenningens maksimalverdi og vi får et neglisjerbart pådrag av inrush strøm. Vi antar dermed at den frambrakte fluksen ved magnetisering er dermed lik  $\Phi_m$ .



**Figur 39 Magnetisering med inrush**

Fra Figur 39 ser vi at magnetisering skjer nær spenningens nullgjennomgang og vi får et pådrag av inrush strøm som er dobbelt så stort som fra Figur 38. Vi antar dermed at den frembrakte fluksen ved magnetisering er lik  $2\Phi_m$ .



**Figur 40 Magnetisering med inrush**

Fra Figur 40 ser vi at magnetisering skjer nær spenningens nullgjennomgang, men i dette tilfellet får vi pådrag av inrush strøm som er større enn Figur 39. Vi antar dermed at det har vært en viss verdi av positiv remanens i trafokjernen ved magnetisering. Den frembrakte fluksen er dermed lik  $2\Phi_m + \Phi_r$ .

## 9 Diskusjon

Fremdriftsplanen vi utarbeidet i slutten av januar har vært til god hjelp, og vi oppdaget fort nytten av klare tidsfrister og struktur i prosjektet. Vi satt av mye tid i begynnelsen av prosjektet for å innhente kunnskap om inrush strømmer og relevant teori. Mesteparten av teorien er hentet fra tidligere oppgaver og forskningsartikler ettersom inrush fenomenet ikke er et veldig omtalt emne i lærebøker. Mange av artiklene vi leste var kompliserte og var basert på at en kunne det fundamentale rundt inrush. Store deler av tiden gikk dermed med på å forstå det fundamentale og alt av teori som er koblet opp mot inrush. Da vi følte oss sikre på at vi hadde forstått teorien skrev vi dette inn i rapporten.

Parallelt med dette prøvde vi å utvikle en modell i Simulink som skulle modellere kraftsystemet til et skippsanlegg med generator, distribusjonssystem og tilkoblede transformatorer. Dette viste seg å være utfordrende. Vi hadde veldig lite forkunnskaper rundt Simulink, vi måtte derfor først anskaffe kompetanse på aktuelle komponenter og oppbygning av et skippsanlegg i Simulink. Dette ble også nevnt i forstudiet under punkt 3.1.1.

Videre oppdaget vi at vi ikke hadde nok informasjon fra datablad til å bygge ønsket Simulink modell. Når det gjelder generatoren hadde vi ikke tilgjengelig informasjon om parameter til magnetiseringssystemet og til «Diesel Engine Governor» som er den mekaniske reguleringen til generatoren. Vi manglet også informasjon om transformatorens metningskurve. I databladet var det bare oppgitt en «strøm-tid» karaktetikk relatert til inrush strømmen. Det ble vanskelig å ta utgangspunkt i denne karaktetikken, da den ikke gav noe informasjon om hvilke parameter og tilstand transformatøren var i under den gitte karaktetikke. Vi ble derfor nødt til å lete etter nye løsninger.

Vi fant en artikkel: «A method for estimating Current-Flux Curve of a single phase transformer for electromagnetic transient simulations of inrush current». [34] De la frem en metode for å estimere transformatorens «strøm-fluks» karaktetikk basert på «strøm-tid» karaktetikken. Denne metoden krevde også verdier fra en tomgangstest til transformatoren. Dette var informasjon vi ikke hadde tilgjengelig i databladet. Videre fant vi ut at vi kunne estimere en hysteresis karaktetikk ut fra forskjellige mål på transformatoren og jernkjernens egenskaper. Dette var også informasjon vi ikke hadde tilgjengelig.

Vi brukte mye tid på leting etter nye metoder uten hell. Etter hvert ble tiden knapp, og i samsvar med veiledere ble vi enige om å justere ned kravspesifikasjonene. Vi ble dermed enig om følgende plan;

- Fokusere på selve inrush fenomenet.
- Ta utgangspunkt i en Simulink modell hentet fra Mathworks.
- Analysere inrush ved å endre på fasevinkel, remanens og kildemotstand.
- Analysere inrush ved styrt-innfasing.

Mot slutten ble tiden knapp, da det gikk mye tid til prøving og feiling av simulink modeller. Vi fikk etter hvert laget en modell som fungerte med våre nye kravspesifikasjoner. I prosjektets tidlige fase brukte vi mye tid på teori som førte til at vi fortsatt lå godt an i forhold til fremdriftsplan og leveringsfrist.

Gruppen mener vi har levert ett godt produkt som får fram problematikken ved inrush. I oppgaven har vi beskrevet hvorfor inrush oppstår og hvordan det kan begrenses, dette har gitt oss verdifull kunnskap om ett emne vi ikke kunne så mye om fra før.

Under begrensingen nevnte vi at praktisk oppkobling mest sannsynlig utgikk, ettersom skolens laboratorium var stengt. Underveis i semesteret ble det åpnet opp for en gjennomføring av praktisk oppkobling.

Risikoanalysen vi utarbeidet har fungert etter hensikt, vi hadde ingen hendelser eller ulykker ved praktisk oppkobling da gruppen var klar over hvilke farer som var aktuelle. I gruppen har vi hatt tilfeller av kortvarig sykdom, dette har ikke påvirket oppgaven i negativ retning. Ingen i gruppen har blitt smittet av covid-19 og alt teknisk utstyr har fungert godt.



## 10 Konklusjon

Oppgaven lot seg ikke gjøre med kravspesifikasjonene vi fikk utdelt i starten av prosjektet. Vi bestemte oss derfor å endre på kravene i samsvar med veilederne. Etter vi endret på kravspesifikasjonene ble målet med oppgaven mer vinklet inn på teori og forståelse av inrush fenomenet.

I kapittel 4 la vi frem grunnleggende teori om elektromagnetisme og transformatorer, som bygger på teorien om inrush. Kapittel 4 la grunnlaget for kapittel 5 hvor vi gikk mer i dybden til inrush fenomenet. Deretter simulerte og verifiserte vi inrush strøm i en Simulink modell. Fra simuleringsresultatene kunne vi verifisere at teorien vi la frem i kapittel 5 stemmer overens med simuleringene.

Tiltakene vi la frem i kapittel 5.4 har sine fordeler og ulemper. Den enkleste og mest aktuelle metoden er SCS. Denne metoden er bare effektiv om remanensen følger mønsteret  $[0, -r, r]$ , dette kan oppnås med kontrollert avmagnetisering, hvor bryteren åpnes på en fasespenningstopp.

Tiden ble knapp mot slutten, vi har allikevel fått frem inrush problematikken, hvorfor inrush oppstår og hvordan det kan begrenses. Gruppen har fått resultater og grafer som viser hva som påvirker inrush i positiv og negativ retning. Vi har videre fått til å begrense inrush strømmen med hjelp av forskjellige tiltak.

Videre arbeid med denne oppgaven vil vi anbefale å se på transiente spenningsfall i kraftsystemet ved magnetisering. Det vil da kreves fullstendig informasjon og komplette datablad om generator og transformator.

Vi har i løpet av prosjektet lært mye nytt innen et emne vi ikke kunne så mye om fra før. Vi har lært mye om hvordan Simulink kan brukes som dataverktøy, og sitter igjen med mye verdifull kunnskap.

## 11 Referanser

- [1] Siemens Energy, «The History of Energy at Siemens,» Siemens Energy, [Internett]. Available: <https://www.siemens-energy.com/global/en/company/about/history.html>. [Funnet 19 01 2021].
- [2] E. Skjong, R. Volden , E. Rødskar, M. Molinias, T. A. Johansen og J. Cunningham, «Past, Present, and Future Challenges of the Marine Vessel's Electrical Power System,» *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 2, nr. 4, pp. 522-537, Desember 2016.
- [3] T. v. Pelt og E. Knol, *El-lære 1*, 1. red., NKI-forl., 1989.
- [4] «Solenoid and Electromagnet,» Communications Museum, [Internett]. Available: [http://www.cmm.gov.mo/eng/exhibition/secondfloor/MoreInfo/2\\_2\\_4\\_MagneticSuction.html](http://www.cmm.gov.mo/eng/exhibition/secondfloor/MoreInfo/2_2_4_MagneticSuction.html). [Funnet 17 02 2021].
- [5] «Lines Of Flux,» Chegg Study, [Internett]. Available: <https://www.chegg.com/homework-help/definitions/lines-of-flux-4>. [Funnet 02 03 2021].
- [6] «Hvordan virker en generator,» UngEnergi, 14 07 2020. [Internett]. Available: <https://ungenergi.no/energibaerere/elektrisitet/generator/>. [Funnet 17 02 2021].
- [7] «Magnetisk Feltstyrke,» Store norske leksikon, 18 03 2015. [Internett]. Available: [http://snl.no/magnetisk\\_feltstyrke](http://snl.no/magnetisk_feltstyrke). [Funnet 17 02 2021].
- [8] R. W. Erickson og D. Maksimovic, *Fundamentals of Power Electronics*, Cham: Springer, 2020.
- [9] H. D. Young og R. A. Freedman, *Sears and Zemansky's university physics: with modern physics, Skandinavian Edition red.*, vol. 2, Harlow: Pearson, 2015.
- [10] Wikipedia, «Elektromagnetisk induksjon,» Wikipedia, [Internett]. Available: [https://no.wikipedia.org/w/index.php?title=Elektromagnetisk\\_induksjon&oldid=19965822](https://no.wikipedia.org/w/index.php?title=Elektromagnetisk_induksjon&oldid=19965822) . [Funnet 17 02 2021].
- [11] N. Chiesa, «Power Transformer Modeling for Inrush Current Calculation,» NTNU open, Trondheim, 2010.
- [12] «Magnetic circuit,» Wikipedia, [Internett]. Available: [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Magnetic\\_circuit&oldid=1021628288](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Magnetic_circuit&oldid=1021628288). [Funnet 21 04 2021].
- [13] J. Sandstad, «Hysteres,» Store norske Leksikon, 06 07 2020. [Internett]. Available: <http://snl.no/hysteres>. [Funnet 10 02 2021].

- [14] L. E. Jensvoll, «Transients During Energization of Unloaded Generator Step-Up Transformers,» NTNU, Trondheim, 2019.
- [15] «Critical checkpoint: Transformer saturation,» ROHM TECH WEB, 11 05 2017. [Internett]. Available: [https://techweb.rohm.com/knowledge/acdc/acdc\\_sr/acdc\\_sr01/2505](https://techweb.rohm.com/knowledge/acdc/acdc_sr/acdc_sr01/2505). [Funnet 03 03 2021].
- [16] P. Evans, «How Transformers Work,» The Engineering Mindset, 12 11 2019. [Internett]. Available: <https://theengineeringmindset.com/how-transformers-work/>. [Funnet 12 02 2021].
- [17] K. Saugstad, «Transformator,» Store norske leksikon, 24 01 2019. [Internett]. Available: <http://snl.no/transformator>. [Funnet 03 03 2021].
- [18] L. Sivertsen, Elektriske maskiner: oppbygning, virkemåte og drift, 1 red., Bergen: Fagbokforlaget, 2019.
- [19] Wikipedia, «Transformer,» Wikipedia, [Internett]. Available: <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Transformer&oldid=1021357719>. [Funnet 03 03 2021].
- [20] K. A. Rosvold, «transformatortap,» Store norsk leksikon, 06 09 2019. [Internett]. Available: <http://snl.no/transformatortap>. [Funnet 16 02 2021].
- [21] O. R. Valmot, «Transformatorene er strømnettets skjulte kraftkarer,» TU.no, 22 02 2020. [Internett]. Available: <https://www.tu.no/artikler/transformatorene-er-stromnettets-skjulte-kraftkarer/485808>. [Funnet 2021 02 16].
- [22] K. J. Patel, «Effects of transformer inrush current,» University of Southern Queensland, Queensland, 2013.
- [23] H. M. B. Metwally og A. M. A. Mostafa, «Modeling and Analysis of Transformer Inrush current using ANFIS,» *ijera*, vol. 7, nr. 11, p. 8, November 2017.
- [24] J. P. Patra, «A Discussion on Power Transformer Magnetizing Inrush, Remedy, Fault Detection in Matlab–Simulink Environment,» *International Journal of Electrical Engineering*, vol. 4, nr. 2, p. 20, 2011.
- [25] Anonym, «ESTIMATION OF INRUSH CURRENT,» [Internett]. Available: [https://nanopdf.com/download/estimation-of-inrush-current\\_pdf](https://nanopdf.com/download/estimation-of-inrush-current_pdf). [Funnet 22 03 2021].
- [26] E. Barghamadi, «Transformer Inrush Current,» 06 02 2019. [Internett]. Available: <https://www.linkedin.com/pulse/transformer-inrush-current-ebrahim-barghamadi/>. [Funnet 06 02 2021].

- [27] E. Cazacu og L. Petrescu, «INRUSH CURRENT INVESTIGATION FOR SINGLE PHASE POWER TRANSFORMERS BY MEANS OF MAGNETIC MATERIAL CORE CHARACTERISTICS,» *University POLITEHNICA of Bucharest, Romania*, vol. 77, nr. 2, p. 12, Januar 2015.
- [28] K. A. Rosvold, «spenningkvalitet,» Store norske leksikon, 30 04 2019. [Internett]. Available: <http://snl.no/spenningskvalitet>. [Funnet 24 05 2021].
- [29] K. R. M. Nair, *Power and Distribution Transformers: Practical Design Guide*, Boca Raton: CRC Press, 2021, p. 499.
- [30] M. Stanek og K. Fröhlich, «Circuit Breaker Controll Switching: Reducing Switching Overvoltages at the Source,» i *CIGRE SC 33 Colloquim*, Lucerne, 1999.
- [31] J. H. Brunke og K. J. Fröhlich, «Elimination of transformer inrush currents by controlled switching. II. Application and performance considerations,» *IEEE- Transactions on Power Delivery*, vol. 16, nr. 2, pp. 281-285, April 2001.
- [32] R. Cano-González, A. Bachiller-Soler, J. A. Rosendo-Macías og G. Álvarez-Cordero, «Controlled switching strategies for transformer inrush current reduction: A comparative study,» *Electric Power Systems Research*, vol. 145, pp. 12-18, 01 04 2017.
- [33] «Implement two- or three-winding saturable transformer,» Mathworks, [Internett]. Available: <https://se.mathworks.com/help/phymod/sps/powersys/ref/saturabletransformer.html?fbclid=IwAR3YRXtcFQwru5YkqHJu0ps8REf5YimfqN7RYvcxaBFnL9EoQl6CDW7ydEU>. [Funnet 04 03 2021].
- [34] R. Oyanagi, T. Noda og M. Ichikawa, «A Method for Estimating the Current-Flux Curve of a Single-Phase Transformer for Electromagnetic Transient Simulations of Inrush Currents,» *Electrical Engineering in Japan*, vol. 204, nr. 2, pp. 13-24, Juli 2018.

## Appendiks A      Forkortelser og ordforklaring

A	Amper
Arcing	Lysbue
$B_n$	Nominell flukstetthet
$B_r$	Gjenværende flukstetthet i transformatorjerne
$B_s$	Metnings flukstetthet
DLS	Delayed closing strategy
Dynamisk fluks	Fluks i endring
EMF	Elektromotorisk kraft
EMS	Elektromagnetisk spenning
H	Henry
Hysteres- og virvelstrømstap	Jerntap i transformator kjerne
Hz	Hertz
IPOC bryter	Independent pole operated circuit breaker
KV	Kilo volt
KVA	Kilo volt amper
L1 L2 L3	Lekkasjeinduktans
MVA	Mega volt amper
Ohmsk tap	Kobber tap i ledere
Pu	Per unit
RCS	Rapid closing strategy
Remanens	Restmagnetisme
$R_m$	Tomgangsmotstand
RMS	Effektivverdien av variert spenning, strøm og fluks.
$R_s$	Kilderesistansen
R1 R2 R3	Resistansen i viklingene
SCS	Simultanes closing strategy
$t$	Tid
Trip	Utkobling av brytere eller omformere.
T1	Transformator 1
T2	Transformator 2
V	Volt
$V_m$	Maksimal spenning

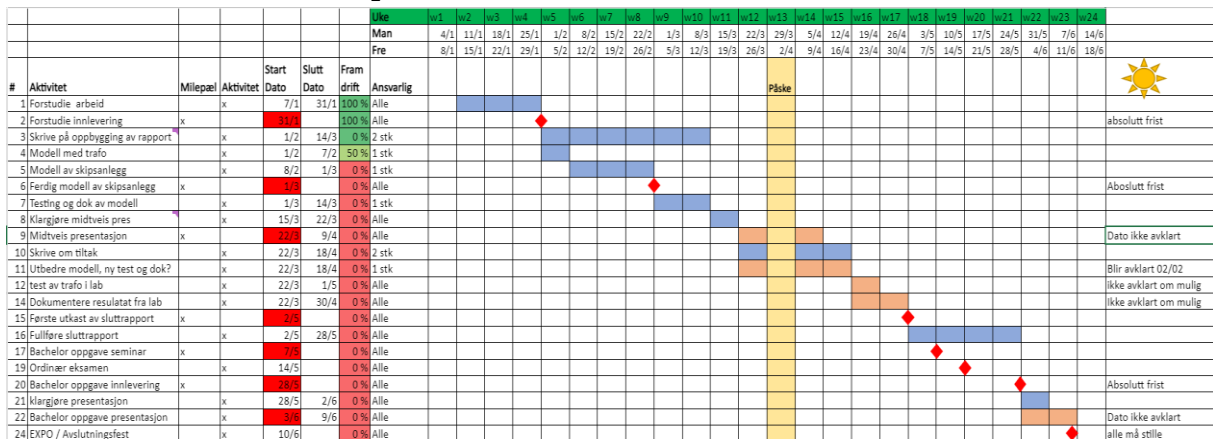
$Z_t$	Systemets totale impedans
$\theta$	Fasevinkel
$\Phi$	Fluks
$\Phi(t)$	Momentanverdi fluks
$\Phi_m$	Maksimal fluks i merkedrift til transformator
$\Phi_r$	Rest fluks
$\Omega$	Ohm
$\omega$	Vinkelfrekvens
$\alpha$	Magnetiserings vinkel

## Appendiks B Prosjektledelse og styring

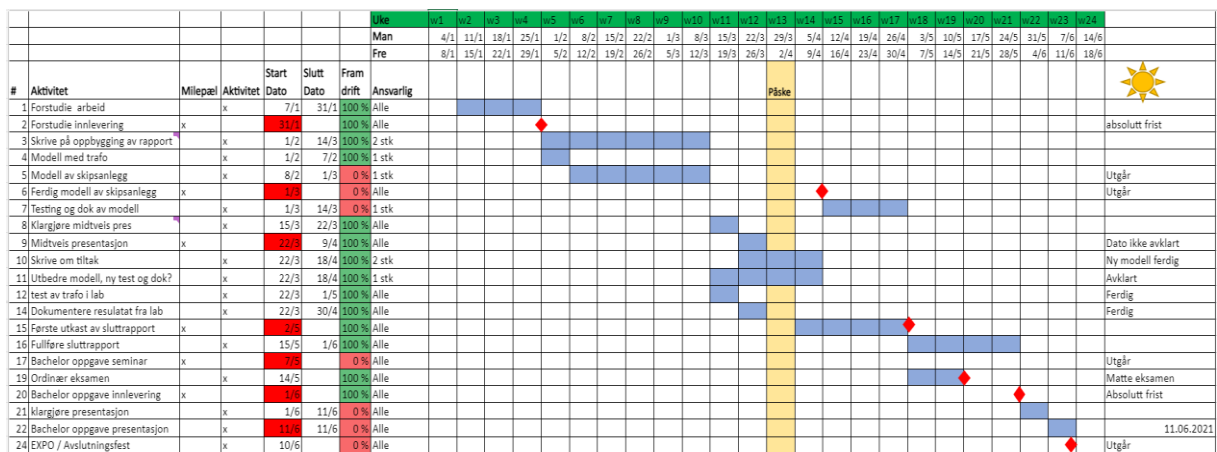
### B.1 Prosjektorganisasjon

Gruppen valgte å gå for en flytende lederstil hvor alle var ansvarlig for å fullføre sine arbeidsoppgaver. Fordelingen av arbeidsoppgaver har falt naturlig. Markus har hatt overordnet ansvar for å oppdatere lister for framtidig arbeid samt passe på at oppgaver blir gjort innen gitt tid. Simon har hatt kontroll på grupperom og ansvar for at timelister/logg blir utført. Bjarte har hatt ansvar for møter med Siemens Energy og å skrive referat fra møtene.

### B.2 Fremdriftsplan



Figur 41 Fremdriftsplan



Figur 42 Revidert fremdriftsplan

### B.3 Risikovurdering

Risikotype	Høy risiko	Moderat risiko	Lav risiko	Ingen risiko	Konsekvens	Kommentar
Simulering			x		Mangel av resultat	Sørge for at simuleringsprogram fungerer.
Praktisk kobling		x			Støtfare	Koble uten spenning.
Fysisk testing/måling		x			Støtfare	Være årvåken ved testing.
Kortvarig sykdom	x				Tap av arbeidstid	God tid ift. fremdriftsplan
Langvarig sykdom			x		Underbemanning	Være oppdatert på hverandres arbeid.
Covid-19	x				Tap av arbeidstid	Følge gjeldende smittevernregler.
Teknisk svikt		x			Tap av dokumenter	Skylagring, sende kritisk materiell i en gruppe.
Tidsfrist			x		Får ikke tid til å levere innen frist	Oppdatert på fremdriftsplan.
Kildekritikk			x		Feil informasjon	Være kildekritisk.

Tabell 13 Risikoanalyse