



**Høgskulen
på Vestlandet**

Validering av strøm- og spenningssensorer
til bruk i systemer drevet av
høyspenningsfrekvensomformer
BO24EB-03:

Victor Anang Newman
Nora Anie Hisdal

21.05.2024

Dokumentkontroll

| | |
|--|---|
| <i>Rapportens tittel:</i> Validering av strøm- og spenningsensorer til bruk i systemer drevet av høyspenningsfrekvensomformer - BO24EB-03: | <i>Dato/Versjon</i> 21.05.2024/ |
| | <i>Rapportnummer:</i> B024EB-03 |
| <i>Forfatter(e):</i> Victor Anang Newman Nora Anie Hisdal | <i>Studieretning:</i> AUT21 |
| | <i>Antall sider m/vedlegg</i> 127 |
| <i>Høgskolens veileder:</i> Mojtaba Yousefi | <i>Gradering:</i> Åpen |
| <i>Eventuelle Merknader:</i> Vi tillater at oppgaven kan publiseres. | |

| | |
|--|--|
| <i>Oppdragsgiver:</i> OneSubsea | <i>Oppdragsgivers referanse:</i> Bjørn Inge Sørensen |
| <i>Oppdragsgivers kontaktperson(er) (inkludert kontaktinformasjon):</i> Bjørn Inge Sørensen Tlf: 92854884 Mail: bsorensen2@onesubsea.com | |

| Revisjon | Dato | Status | Utført av |
|-----------------|-------------|----------------|---|
| 0.1 | 05.02.2024 | Forstudie | Victor Anang Newman Nora Anie Hisdal |
| 0.2 | 10.05.2024 | Førsteutkast | Victor Anang Newman Nora Anie Hisdal |
| 0.3 | 21.05.2024 | Endelig utkast | Victor Anang Newman Nora Anie Hisdal |

Forord

Rapporten dokumenterer vår bacheloroppgave på automasjonsstudiet på Høgskolen på Vestlandet

Gjennom arbeid med prosjektet har vi blant annet lært oss programvaren Perception, og har gjennom dette fått testet oss i analyse av data. I tillegg har vi opparbeidet oss viktige erfaringer rundt planlegging og gjennomføring av større prosjekter, i samarbeid med arbeidsgiver. Dette er erfaringer vi vil ta med oss inn i videre studier og arbeidslivet.

Vi vil takke vår eksterne veileder Bjørn Inge Sørensen for samarbeidet. Vi har fått tett oppfølging gjennom hele prosessen, og Bjørn Inge har vært lett å få kontakt med når vi har hatt spørsmål eller behov for en diskusjon. Til slutt vil vi gjerne takke vår interne veileder, Mojtaba Yousefi, for den verdifulle kompetansen han har delt med oss underveis, og for hans engasjement for oppgaven. Mojtaba har vært tilgjengelig under hele prosessen og har vært åpen for spørsmål som har vært til stor hjelp. Samtidig har han hjulpet oss med planlegging og struktur av oppgaven.

Sammendrag

Denne bacheloroppgaven validerer og sammenligner Rogowski-spole, Hall-effektsensor og Fluxgate-sensor, i samarbeid med OneSubsea. Formålet med oppgaven er å analysere hvordan strømsensorene påvirkes ved variabel frekvens og belastning. Det er dokumentert hvilke måleprinsipper sensorene benytter seg av, og hvordan de opererer. Disse sensorene er blitt testet i samarbeid med en pågående motorpumpe-test ved testanlegget til Onesubsea, avdeling Horsøy. Underveis i testingen ble sensorene påført varierende frekvenser og belastninger, hvor data ble samlet inn og analysert ved hjelp av Perception. Det ble sett på hvordan sensorene reagerte ved oppstart, trip og varierende frekvens og belastning. Ved hjelp av disse analysene konkluderte vi med at sensorene har ulike styrker og svakheter, og at valg av sensorer baserer seg på hvilket formål den skal brukes til. Fluxgate-sensoren leverte det beste resultatet, slik som forventet. Hall-effektsensoren viste gode resultater, og presterte i stor grad likt som Fluxgate-sensoren, med unntak av påføring av høy frekvens og belastning. I tillegg presterte Rogowski-spolen bedre enn antatt, og kan bli benyttet oftere i tilfeller som ikke er ytelsestester som for eksempel når man er ute i felt eller ved testing av mindre motorer.

Innhold

| | |
|--|----|
| Dokumentkontroll | 2 |
| Forord | 3 |
| Sammendrag | 4 |
| Liste over Figurer | 7 |
| Liste over Tabeller..... | 9 |
| Liste over Formler | 9 |
| 1 Innledning | 10 |
| 1.1 Oppdragsgiver | 10 |
| 1.2 Problemstilling..... | 10 |
| 1.3 Mål med oppgaven | 11 |
| 2 Programvarer Brukt i Oppgaven..... | 12 |
| 2.1 Eplan..... | 12 |
| 2.2 Perception | 12 |
| 3 Teori..... | 13 |
| 3.1 Strømsensorer | 13 |
| 3.1.1 Strømtransformator..... | 13 |
| 3.1.2 Rogowski-spole | 13 |
| 3.1.3 Hall-effektsensor..... | 15 |
| 3.1.4 Fluxgate-sensor..... | 18 |
| 3.1.5 Sammenligning av strømsensor | 20 |
| 3.2 Spenningssensor | 20 |
| 3.3 Frekvensomformer..... | 21 |
| 3.4 Måleresistor (Burden resistor)..... | 23 |
| 3.5 Begrep og Teori om Formler | 23 |
| 3.5.1 Totale Harmoniske Forvrenginger..... | 23 |
| 3.5.2 RMS – Kvadratisk Gjennomsnitt | 23 |
| 3.5.3 RMS Error | 24 |
| 3.5.4 Nullsekvensstrøm | 24 |
| 3.5.5 Amplitude | 25 |
| 3.5.6 Strømbalanse | 26 |
| 4 Testing..... | 26 |
| 4.1 Testanlegg..... | 26 |

| | | |
|-------------|---------------------------------------|----|
| 4.2 | Helse, miljø og sikkerhet | 27 |
| 4.3 | Utstyr | 27 |
| 4.4 | Hovedmål av testen | 29 |
| 4.5 | Sjekkliste | 30 |
| 4.6 | Systemoversikt..... | 30 |
| 4.6.1 | Enlinjeskjema | 33 |
| 4.6.2 | Flerlinjediagram..... | 33 |
| 4.6.3 | Oppkobling i effektanalysatoren..... | 34 |
| 4.7 | Sensorutsjekk og feilkilder | 36 |
| 4.7.1 | Utgangspunkt..... | 36 |
| 4.7.2 | Måleresistor-test | 39 |
| 4.7.3 | Endring av strømforsyning | 41 |
| 4.7.4 | Brukerfeil..... | 42 |
| 4.8 | Gjennomføring av strømsensortest..... | 42 |
| 5 | Resultat | 42 |
| 5.1 | Introduksjon..... | 42 |
| 5.2 | Oppstart | 43 |
| 5.3 | Trip | 48 |
| 5.4 | 25 Hz og 20 % belastning..... | 50 |
| 5.5 | 50 Hz og 50 % belastning..... | 54 |
| 5.6 | Max Hz og 50 % belastning | 57 |
| 5.7 | Max Hz og 85 % belastning | 60 |
| 5.8 | Max Hz og 100 % belastning | 63 |
| 5.9 | Sammenligning av resultat | 66 |
| 6 | Diskusjon | 70 |
| 7 | Konklusjon..... | 72 |
| 8 | Referanser | 73 |
| Appendiks A | Forkortelser og ordforklaring | 73 |
| Appendiks B | Prosjektledelse og styring | 74 |
| B.1 | Prosjektorganisasjon..... | 74 |
| B.2 | Fremdriftsplan | 74 |
| Appendiks C | Kilder..... | 74 |

Liste over Figurer

| | |
|---|----|
| Figur 1 Logo til OneSubsea [2]..... | 10 |
| Figur 2 Skisse av Rogowski-spole [9]..... | 14 |
| Figur 3 Tilsvarende krets av Rogowski-spole og integrator [9]..... | 14 |
| Figur 4 Hall-effekt måleprinsipp [15] | 16 |
| Figur 5 Struktur av hall-effekt sensor med åpen sløyfe [16]..... | 17 |
| Figur 6 Struktur av hall-effekt sensor med lukket sløyfe [16] | 18 |
| Figur 7 Oppbygging av Fluxgate-sensor [4] | 19 |
| Figur 8 Oppbygging av spenningssensor [21]..... | 21 |
| Figur 9 Struktur av Frekvensomformer [23] | 22 |
| Figur 10 Illustrasjon som viser hva amplitude er [33] | 26 |
| Figur 11 Testanlegget på OneSubsea avdeling Horsøy [36]..... | 27 |
| Figur 12 Forenklet illustrasjon av testfasilitetet som er benyttet på OneSubsea avd Horsøy .. | 31 |
| Figur 13 Oppkobling av strømsensorene | 32 |
| Figur 14 Motorpumpe i testbasseng fylt med vann..... | 32 |
| Figur 15 Enlinjediagram av oppkobling..... | 33 |
| Figur 16 Flerlinjediagram av oppkobling..... | 34 |
| Figur 17 Illustrasjon av oppkobling mellom strømsensorer og Genesis 3t effektanalysator ... | 35 |
| Figur 18 Illustrasjon av oppkoblingen til HBM sin ± 15 V Strømforsyning | 35 |
| Figur 19 Illustrasjon av oppkoblingen til ± 15 V Strømforsyning | 36 |
| Figur 20 Støybildet til strømsensorene som er montert på L1 med påført strøm..... | 38 |
| Figur 21 Støybildet til strømsensorene på L3 uten påført strøm..... | 38 |
| Figur 22 Sammenligning av hvordan en måleresistor påvirker målestøy. Hvor den blå grafen tilsvarer den originale oppkoblingen..... | 39 |
| Figur 23 Sammenligning av hvordan en måleresistor påvirker målestøy uten påført strøm. Hvor den blå grafen tilsvare den originale oppkoblingen..... | 40 |
| Figur 24 Illustrerer forskjell på målestøyet til Lem-sensoren da det er brukt to ulike strømforsyninger | 41 |
| Figur 25 Illustrerer hvordan de tre sensorene reagerer under oppstart. Tidsområdet er bergnet fra start på 1.6 sekunder til da Rogowski-spolen henter seg inn igjen etter 4,1 sekunder | 45 |
| Figur 26 Avgrenset område hvor vi kan se at Fluke-sensoren henter seg inn ved det første tilfellet | 46 |
| Figur 27 Avgrenset område av når Fluke-sensoren henter seg inn..... | 47 |
| Figur 28 Viser hvordan strømsensorene måler ved en utløst trip | 49 |
| Figur 29 TDR verdiene til sensorene ved 25 Hz og 25 % belastning 29 | 52 |
| Figur 30 Nullsekvensstrømmen til sensorene ved 25 Hz og 25 % belastning | 52 |
| Figur 31 Error_RMS verdien til Fluke- og Lem-sensoren set på L1 ved 25 Hz og 25 % belastning | 53 |
| Figur 32 TDR verdiene til sensorene ved 50 Hz og 50% belastning | 55 |
| Figur 33 Nullsekvensstrømmen til sensorene ved 50 Hz og 50% belastning | 55 |
| Figur 34 Error_RMS verdien til Fluke- og Lem-sensoren set på L1 ved 50 Hz og 50 % belastning | 56 |
| Figur 35 TDR verdiene til sensorene ved 75 Hz og 50 % belastning | 58 |

| | |
|---|----|
| Figur 36 Nullsekvensstrømmen til sensorene ved 75 Hz og 50 % belastning | 58 |
| Figur 37 Error_RMS verdien til Fluke- og Lem-sensoren set på L1 ved 75 Hz og 50 % belastning | 59 |
| Figur 38 TDR verdiene til sensorene ved 75 Hz og 85 % belastning | 61 |
| Figur 39 Nullsekvensstrømmen til sensorene ved 75 Hz og 85 % belastning | 61 |
| Figur 40 Error_RMS verdien til Fluke- og Lem-sensoren set på L1 ved 75 Hz og 85 % belastning | 62 |
| Figur 41 TDR verdiene til sensorene ved 75 Hz og 100 % belastning | 64 |
| Figur 42 Nullsekvensstrømmen til sensorene ved 75 Hz og 100 % belastning | 64 |
| Figur 43 Error_RMS verdien til Fluke- og Lem-sensoren set på L1 ved 75 Hz og 100 % belastning | 65 |
| Figur 44 Viser en sammenligning mellom nullsekvensstrømmen til sensorene. Hvor i bilde a) kan vi se hvordan sensorens målte nullsekvensstrøm er ved lav frekvens og belastning. Og i bilde b) kan vi se sensorens målte nullsekvensstrøm ved høy frekvens og 50 % belastning... | 67 |
| Figur 45 Viser en sammenligning mellom nullsekvensstrømmen til sensorene. Hvor i bilde a) kan vi se hvordan sensorens målte nullsekvensstrøm er ved høy frekvens og 50% belastning. Og i bilde b) kan vi se sensorens målte nullsekvensstrøm ved høy frekvens og 85 % | 68 |
| Figur 46 Viser en sammenligning mellom nullsekvensstrømmen til sensorene. Hvor i bilde a) kan vi se hvordan sensoren målte nullsekvensstrøm er ved høy frekvens og 50 % belastning, Og i bilde b) kan vi se sensorenes målte nullsekvensstrøm ved høy frekvens og 100 % | 69 |

Liste over Tabeller

| | |
|--|----|
| Tabell 1 Sjekkliste for hva som må gjøres før sensortesten starter | 30 |
| Tabell 2 Belastning matrisen som blir benyttet til å angi hvilket frekvens- og belastningsområde | 43 |
| Tabell 3 Måleresultat ved 25 Hz og 20% belastning | 50 |
| Tabell 4 Måleresultat ved 50 Hz og 50% belastning | 54 |
| Tabell 5 Måleresultat ved 75 Hz og 50% belastning | 57 |
| Tabell 6 Måleresultat ved 75 Hz og 85% belastning | 60 |
| Tabell 7 Måleresultat ved 75 Hz og 100% belastning | 63 |

Liste over Formler

| | |
|--|----|
| Formel 1 Formel for induert spenning i Rogowski-spole..... | 14 |
| Formel 2 Formel for utregning av spenning som blir målt av en spenningsensor [21]..... | 21 |
| Formel 3 Formel for totale harmoniske forvregninger [27] | 23 |
| Formel 4 Formel for utregning av RMS [27] | 24 |
| Formel 5 Formel for å beregne Root mean square error [27] | 24 |
| Formel 6 Summen av fase strømmen er lik null [30]..... | 25 |
| Formel 7 Formel benyttet for nullsekvensstrøm [31]..... | 25 |
| Formel 8 Formel for amplitude | 25 |

1 Innledning

1.1 Oppdragsgiver

OneSubsea er et verdensledende firma innen teknologi, innovasjon og løsninger knyttet til reservoarutnyttelse. Deres mål er å gjøre verdens energiproduksjon mer miljøvennlig ved å øke utnyttelsen av petroleum reservoar. Produksjonen av olje og gass er i stor grad knyttet til store og stasjonære oljeplattformer på havet. Disse plattformene har vist seg å ha begrensinger siden de må relokalisere og finne nye reservoarer når de ikke lenger greier å utvinne mer olje og gass. [1]. Grunnet innovasjon innen dette feltet har blant annet OneSubsea klart å utvikle flere varianter av Subsea booster pumper [2], som dekker behovet basert på brønnens krav. Dette har resultert i økt produksjon og forbedret utvinning av gass, fra områder som tidligere ble ansett som utilgjengelige. Denne utviklingen forlenger levetiden til produksjonen og bidrar til økt lønnsomhet, samtidig som det er mer miljøvennlig å øke utnyttelsen fra eksisterende felt enn å bygge ut nye.



Figur 1 Logo til OneSubsea [2]

1.2 Problemstilling

Ved utvinning av olje og gass benytter man seg av både pumper og kompressorer. Disse blir drevet av en elektrisk 3-fase motor. Kraftsystemet som driver disse motorene er bygget opp av frekvensomformere, transformatorer, strømsensorer, overføringskabler og undervannskonnetorer.

Strømsensorer er viktige da de gir mulighet til å overvåke og sikre riktige strømmnivåer i et kraftsystem. Ved å benytte en nøyaktig strømsensor er overvåkingen mer pålitelig og presis, noe som gjør det mulig å opprettholde effektiviteten og sikkerheten til systemet. Dersom det

blir benyttet en unøyaktig strømsensor vil påliteligheten til måleresultatet være usikkert, og kan resultere i at uønskede strømnivåer ikke blir oppdaget [3].

Strømsensorene som skal undersøkes er Rogowski-spole, Hall-effektsensor og Fluxgate-sensor, hvor Fluxgate-sensor er svært nøyaktig men kostbar [4], mens Rogowski-spole og Hall-effektsensor er rimeligere alternativer som vanligvis har mindre målenøyaktighet. Rogowski-spole er en enkel sensor å montere, og det er derfor ønskelig å ta den oftere i bruk.

På bakgrunn av dette skal det undersøkes hvordan strømsensorene påvirkes ved varierende frekvenser og belastninger, og hvor nøyaktige målinger de klarer å levere. Dersom sensorene leverer et likt resultat, vil det være mulig å kutte unødvendige kostnader ettersom det er store prisforskjeller mellom dem.

Problemstillingen er som følger:

- Hvordan presterer Rogowski-spole-, Hall-effekt- og Fluxgate-måleprinsippet i et system drevet av en frekvensomformer?
- Hvilken av disse sensorene er best på grunnlag av resultatene?

1.3 Mål med oppgaven

OneSubsea har et ønske om å se på hvordan Rogowski-spole, Hall-effektsensor og Fluxgate-sensor fungerer med frekvensomformer drift. Det er godt dokumentert hvordan disse oppfører seg ved tilførsel av en fast frekvens, men ikke ved bruk av frekvensomformer. Ved variabel frekvens og spenning, harmonisk innhold, belastning og eksterne påkjenninger følger det flere utfordringer. Vi har et mål om å forbedre kunnskapen av hvordan sensorene yter ved variabel frekvens. OneSubsea har følgende ønsker for oppgaven:

- Det ønskes å dokumentere grundig hvordan ulike sensorer fungerer og deres måleprinsipper.
- Det ønskes å dokumentere hvordan drift av frekvensomformer fungerer og hvordan strøm- og spenningsbølgeformer påvirkes.

- Det ønskes å dokumentere hva som er standarder innenfor skjerming, jording, kabling, samt dokumentere metode til dette.
- Det ønskes å bli utført tester, og derfor må studentene ha kunnskap om hvordan utføre dem under trygge omgivelser, både teoretisk og i praksis.

I samarbeid med OneSubsea ble det besluttet å prioritere data fra strømsensortesten fremfor å legge vekt på kabelskjerming og spenningssensor. Beslutningen om å fjerne spenningssensortesten ble tatt på grunn av interessante funn under sensorutsjekktest og fokuset ble istedenfor rettet mot måleresistor.

2 Programvarer Brukt i Oppgaven

Det er ikke spesifisert i oppgaven hvilke programvarer som skal benyttes. Eplan og Perception ble derfor brukt siden dette er verktøy OneSubsea vanligvis benytter seg av.

2.1 Eplan

Eplan er en programvare for design og planlegging av elektriske skjemaer, kontrollpaneler, kretsskjemaer og annen nødvendig dokumentasjon knyttet til elektroinstallasjoner.

Programvaren automatiserer designprosessen ved å tillate sømløs flyt gjennom ulike stadier av prosessen, imens dataene forbedres kontinuerlig i hvert trinn. Dette bidrar til økt effektivitet [5] I oppgaven er Eplan brukt for tegne en- og flerlinjediagram som viser hvordan oppkoblingen skal være.

2.2 Perception

Perception er et verktøy designet for å analysere og tolke store datafiler, og har vært hovedprogramvaren for dataanalysen. En bemerkelsesverdig fordel med programvaren er muligheten for å analysere lagret data, samtidig som programmet registrerer ny rådata, altså ubehandlet data [6]. Før gjennomførelse av testen ble det lagt inn formler i Perception. Dette ble gjort ved hjelp av forhåndsdefinerte formler i programmet, som skal hjelpe å effektivisere analysen av rådataen. En grundig analyse av rådataen bidrar til bedre forståelse av sensorenes oppførsel og vil føre til gode og pålitelig konklusjoner. Det ble lagt til formler underveis etter hvert som det trengtes. Formlene som ble brukt er listet i vedlegg [Formeldatabase].

3 Teori

Denne seksjonen tar for seg relevant teori knyttet til oppgaven. Den teoretiske gjennomgangen begynner med en introduksjon av de ulike strømsensorene og spenningsensor. Deretter følger utledning av viktige begrep som vil bli brukt i resultatdelen.

3.1 Strømsensorer

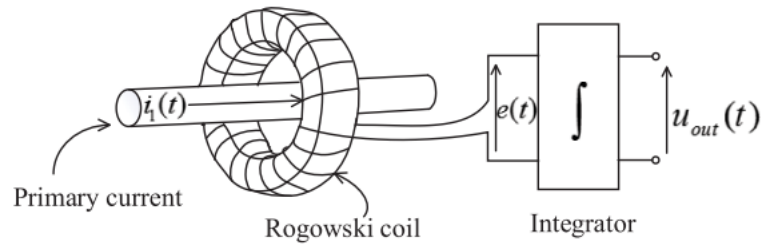
En strømsensor er et instrument som kan detektere og måle elektrisk strøm gjennom en leder [3]. Ved hjelp av en strømsensor er det mulig å overvåke og kontrollere strømforbruket i et elektrisk system. Dette sikrer systemet og kan bidra til bedre ytelse. Ved hjelp av de forskjellige måleprinsippene blir den målte strømmen kvantifisert til et målbart signal, vanligvis i form av spenning eller strømstyrke.

3.1.1 Strømtransformator

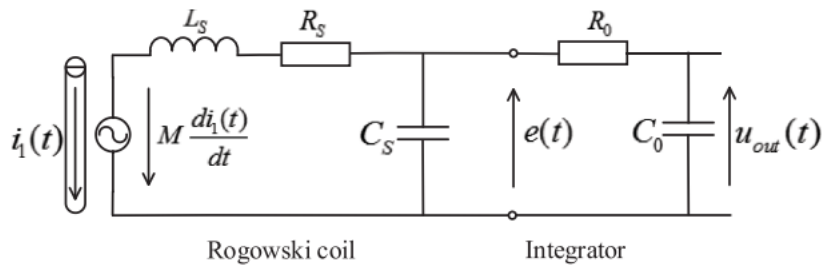
En strømtransformator, på engelsk kalt current transformer (CT), er et instrument som måler strøm i en elektrisk krets. En CT består av en primær- og en sekundærvikling, som bestemmer omsetningsforholdet i transformatoren. Omsetningsforholdet beregnes ved å dele antall tårn på sekundærsiden med antall tårn på primærsiden. CT blir benyttet når strømmen er for stor til å føres direkte inn i et instrument. Da vil CT-en omgjøre strømmen til et lavere nivå ved bruk av omsetningsforholdet. For å lese av strømmen som CT-en måler, må man multiplisere med transformatorens omsetningsforhold. CT kan også brukes for beskyttelsesformål siden den overvåker og sikrer at riktig strøm leveres til instrumentet, som kan hindre skade på utstyret [7].

3.1.2 Rogowski-spole

Rogowski-spole er et måleinstrument som er oppkalt etter den tyske fysikeren Walter Rogowski [8]. Det er et instrument som kan måle både alternerende og hurtige impulsive strømmer, og er basert på Amper- og Faradays lov. Ved bruk av nøyaktige elektroniske komponenter, kan en Rogowski-spole måle alt fra milliampere til mega ampere.



Figur 2 Skisse av Rogowski-spole [9]



Figur 3 Tilsvarende krets av Rogowski-spole og integrator [9]

En strøm gjennom en leder får magnetiske flukser til å sirkulere. Dette fører til at det blir induert en spenning som er proporsjonal med den tidsderiverte av strømmen gjennom lederen. Spenningen kan bli detektert ved følgende formel, hvor M er gjensidig induktans, og di/dt er hastighetsendring av primærstrømmen:

$$u_s(t) = M \frac{di_1}{dt}$$

Formel 1 Formel for induert spenning i Rogowski-spole

Denne spenningen, når den blir integrert som vist i Figur 3, resulterer i en skalert måling av strømmen [9]

En strømtransformator består vanligvis av en metallkjerne, Rogowski-spolen derimot, er konstruert med kobberledninger viklet rundt en fleksibel, ikke magnetisk luft kjerne. Luft kjernen er bygget opp av et rør laget av plast og gummi, og hele konstruksjonen danner en toroid form [10].

Den største fordelen ved å benytte seg av en Rogowski-spole er muligheten til å kunne montere sensoren uten å bryte kretsen. Dette hindrer stopp av produksjonen og sikrer kontinuerlig drift. Ved installasjon av Rogowski-spole er det kun nødvendig å dra målehode rundt kabelen, og det er få begrensninger med hensyn til størrelse av kabelen på grunn av

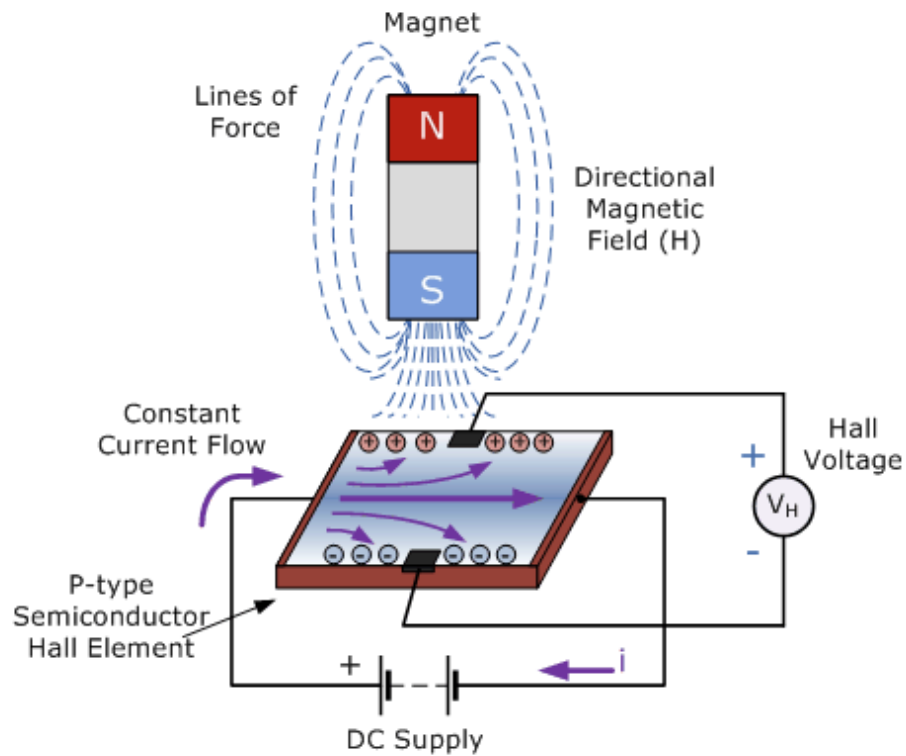
fleksibiliteten i målehodet. Som vist i databladet, er 178mm den maksimale diameteren en kabel kan ha for at Rogowski-spolen skal passe rundt den [\[11\]](#).

En annen fordel med Rogowski-spolen er at den ikke har en jernkjerne, og vil derfor ikke oppnå magnetisk metning. Dette har flere fordeler, blant annet at målingene ikke blir påvirket av magnetisk metning, og man unngår problemer som overoppheting, redusert magnetisk fluks og forvrenging av signaler [\[12\]](#). I tillegg til dette betraktes Rogowski-spolen som en rimelig strømsensor.

Målinger gjort av Rogowski-spole kan ha avvik hvis sensoren er feilplassert. Dette kan unngås ved å ha kunnskap om hvordan sensoren monteres riktig. En annen ulempe er at sensoren kan påvirkes av utenforstående magnetisk krefter fra andre strømmer, som vil ha påvirkning på måleresultatene [\[13\]](#).

3.1.3 Hall-effektsensor

Hall-effektsensor er basert på Hall-effekt måleprinsippet. Det går ut på at en leder eller en halvleder med strøm, hvor strømmen flyter i en retning, blir introdusert vinkelrett på et magnetfelt. Dette gjør at det kan måles en spenning vinkelrett på strømbanen. Denne effekten blir ofte brukt for å undersøke elektrontilstandene og ledningsmekanismen i elektriske ledere og halvledere [\[14\]](#).

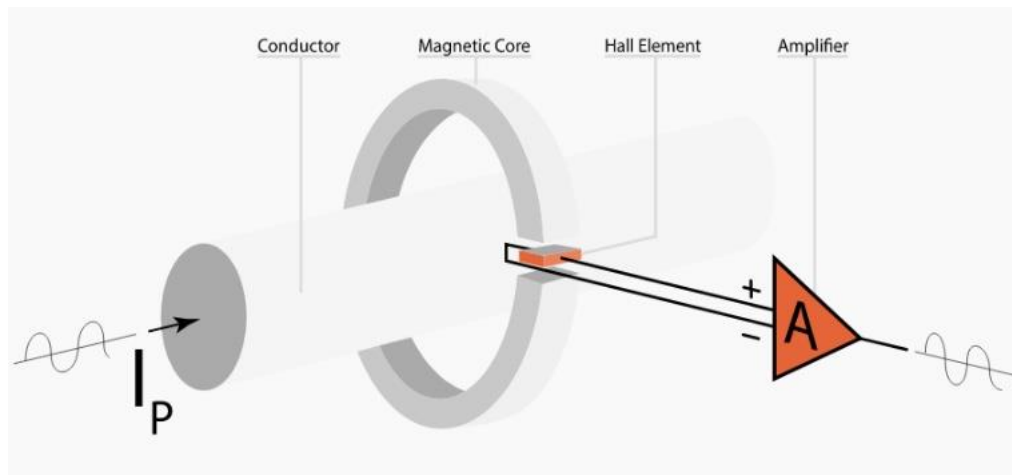


Figur 4 Hall-effekt måleprinsipp [15]

Hall-effektsensoren er bygget opp av en magnetisk kjerne, et hallelement, og en forsterker. Den magnetiske kjernen er utformet med et luftrom hvor hallelementet er plassert [16]. Hallelementet består av en tynn, rektangulær brikke av p-type halvledermateriale, slik som bestående galliumarsenid, indiumantimonid eller indiumarsenid [15]. Det finnes to typer Hall-effektsensorer, en med åpen sløyfe og en med lukket sløyfe.

Åpen sløyfe

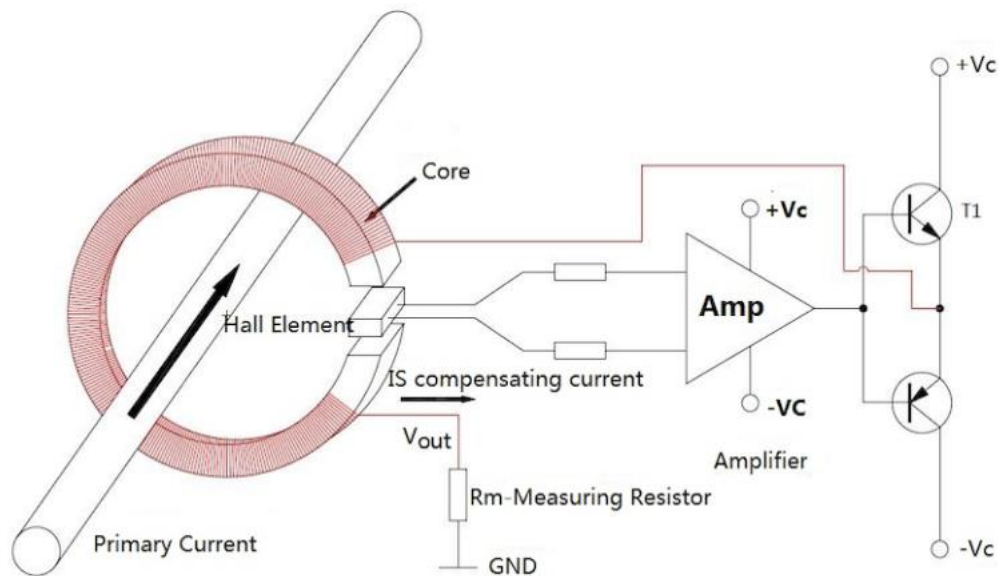
En Hall-effektsensor med åpen sløyfe måler strøm ved å føre strøm gjennom primærlederen, som er på innsiden av den magnetiske kjernen. Denne strømmen genererer et magnetisk felt som blir målt av hallelementet plassert i luftrommet. Spenningen på utgangen er proporsjonal med det magnetiske feltet i kjernen, som igjen er proporsjonalt med strømmen som blir målt. Basert på denne målingen kan strømmen beregnes nøyaktig ved bruk av ohms lov [16].



Figur 5 Struktur av hall-effekt sensor med åpen sløyfe [16]

Lukket sløyfe

En Hall-effektsensor med lukket sløyfe benytter seg av et tilbakekoblingssystem. Dette systemet inkluderer en sekundær vikling som drives av utgangen fra tilbakekoblingsveien. Sensoren sikrer at magnetfeltet i kjerner er lik null ved å registrere magnetfeltet i kjernen gjennom tilbakekoblingsveien, og deretter justerer strømmen gjennom den sekundære viklingen i samsvar med dette. Systemet er designet for å oppnå dette ved å bruke strømmen gjennom sekundærviklingen til å generere et magnetisk felt som motvirker det magnetiske feltet til primærstrømmen. Strømmen som måles går gjennom primærlederen, og det skapes et magnetisk felt i kjernen. Magnetfeltet måles av hallelementet, som er plassert i luftrommet, slik som en åpen sløyfe Hall-effektsensor. Spenningen på utgangen er proporsjonal med det magnetiske feltet, og den forsterkes og konverteres til et strømsignal som går gjennom sekundærviklingen [16].



Figur 6 Struktur av hall-effekt sensor med lukket sløye [16]

Det er mange fordeler ved å bruke en Hall-effektsensor. Den er kjent for å være nøyaktig, som fører til pålitelige målinger. Den kan blant annet måle likestrøm, som er en fordel da det er dette som blir brukt for overføring av strøm over lange avstander [9].

I tillegg er sensoren immun for sjokk og vibrasjoner på grunn av at den blir fabrikkert som en monolittisk integrert krets (IC). IC-forpakking fører også til at sensoren er svært resistent mot fukt og miljøforurensing [17]. Dette er bra da disse faktorene kan føre til feil på sensoren og unøyaktige målinger. En Hall-effektsensor er rimelig og er derfor den mest populære magnetiske strømsensoren [9].

Hall-effektsensoren har også noen ulemper, blant annet må produksjonen stoppes for at den kan bli montert. Dette er fordi at kabelen må bli tredd gjennom sensoren. En annen ulempe med denne sensoren er dens smale båndbredde. Dette er for å unngå overoppheting forårsaket av kjernetap [9].

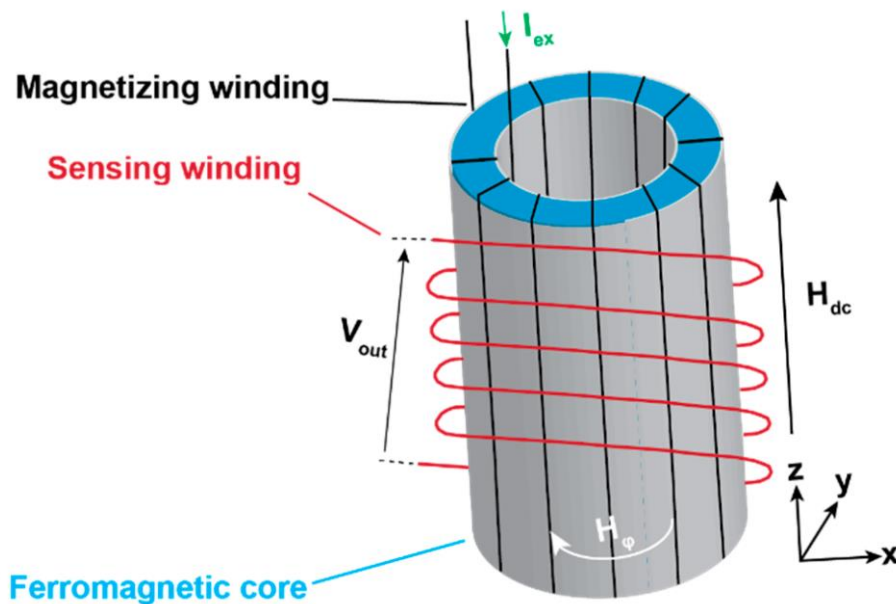
3.1.4 Fluxgate-sensor

Fluxgate-sensor er en magnetisk strømsensor som er basert på Faradays lov om elektromagnetisk induksjon. Dette er en lov som forteller oss at det induseres en elektromotorisk spenning i en strømkrets når den magnetiske fluksen gjennom en krets

forandrer seg [18]. En Fluxgate-sensor utnytter dette prinsippet ved å indukere elektrisk strøm ved å bevege en magnet gjennom en leder formet som en ring [19].

I en Fluxgate-sensor måles det strøm ved å benytte seg av magnetisk metning i en metallkjerne omgitt av en spole. Spolen blir påført en vekselspenning, som fører til at metallkjernen blir magnetisk mettet. Når et ytre magnetfelt påvirker sensoren, vil metningsnivået forskyves. Dette fører til asymmetri i spenningsutgangen mellom de halvperiodene. Styrken på det ytre magnetfeltet kan måles nøyaktig ved å analysere denne asymmetrien [19].

Sensoren har en enkel og kompakt struktur og er bygget opp av en magnetiseringsvikling, kjerne og følevikling [4].



Figur 7 Oppbygging av Fluxgate-sensor [4]

Det er mange fordeler ved å bruke en Fluxgate-sensor. En av dens mest fremtredende egenskaper er evnen til å detektere svake magnetfelt, noe få andre strømsensorer kan. I tillegg er den kjent for å være svært nøyaktig, og sin enkle, kompakte struktur. Strømsensoren produserer minimalt med målestøy, noe som resulterer i nøyaktige og pålitelige målinger. En annen fordel med en Fluxgate-sensor er at den kan bli brukt i mange forskjellige typer omgivelser, selv ved utfordrerne og krevende forhold [4].

Fluxgate-sensor har også noen ulemper. På lik linje som Hall-effektsensoren må produksjonen stoppes for å kunne montere sensoren. En annen faktor som spiller inn er pris, siden Fluxgate-sensor er kostbar [\[4\]](#). Dette er en ulempe da materialekostander kan bli høyere enn hva budsjetter tillater.

3.1.5 Sammenligning av strømsensor

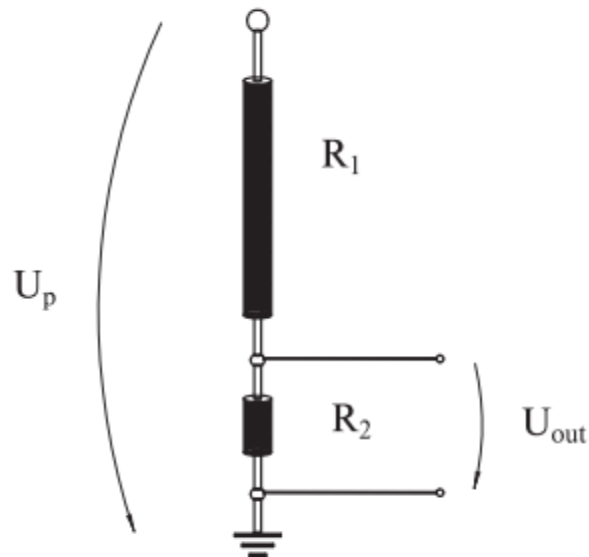
En stor forskjell mellom sensorene er hvordan de monteres. Rogowski-spolen blir montert uten å bryte kretsen sammenlignet med Hall-effektsensor og Fluxgate-sensor, hvor produksjonen må stoppes ved montering. I tillegg er det stor prisforskjell mellom sensorene, hvor Rogowski-spolen og Hall-effektsensoren blir ansett som rimelig, mens Fluxgate-sensoren blir ansett som kostbare.

3.2 Spenningsensor

En spenningsensor måler spenning i en elektrisk krets. Den kan måle høye spenninger og kan detektere lave strømnivåer. Sensoren er essensiell innenfor kraftsystem og industrielle styringssystemer [\[20\]](#).

Det finnes to typer spenningsmålere, en som kan måle spenning, og en som kan måle strøm. Spenningsensoren som måler spenning, er basert på en spenningsfølsom motstand. Denne typen blir brukt innen elektriske kretser, hvor man må registrere små endringer i spenning, som for eksempel sensorer for måling av levetiden til et batteri. Den andre typen spenningsensor, som måler strøm, er en operasjonsforsterker. Denne typen kan bli brukt til oppgaver som å drive motorer eller kontrollere led lys. Man finner ofte slike sensorer i mikrokontrollere som Arduino [\[20\]](#).

I spennings testen som egentlig skulle blitt gjennomført, var det planlagt å benytte en innendørs spenningsensor kalt KEVA 24. Dette er en sensor som er basert på en resistiv spenningsdel som består av to høypresisjon, lav induktans motstander koblet i serie i henhold til primær nominell spenning og definert målestrøm. Utgangssignalet er gitt i volt, og denne spenningen er direkte proporsjonal med primærspenningen [\[21\]](#).



Figur 8 Oppbygging av spenningsensor [21]

Spenningen som er detektert regnes ut ved følgende formel, hvor R_1 er første motstand, R_2 er andre motstand og u_p er spenningen over begge motstandene:

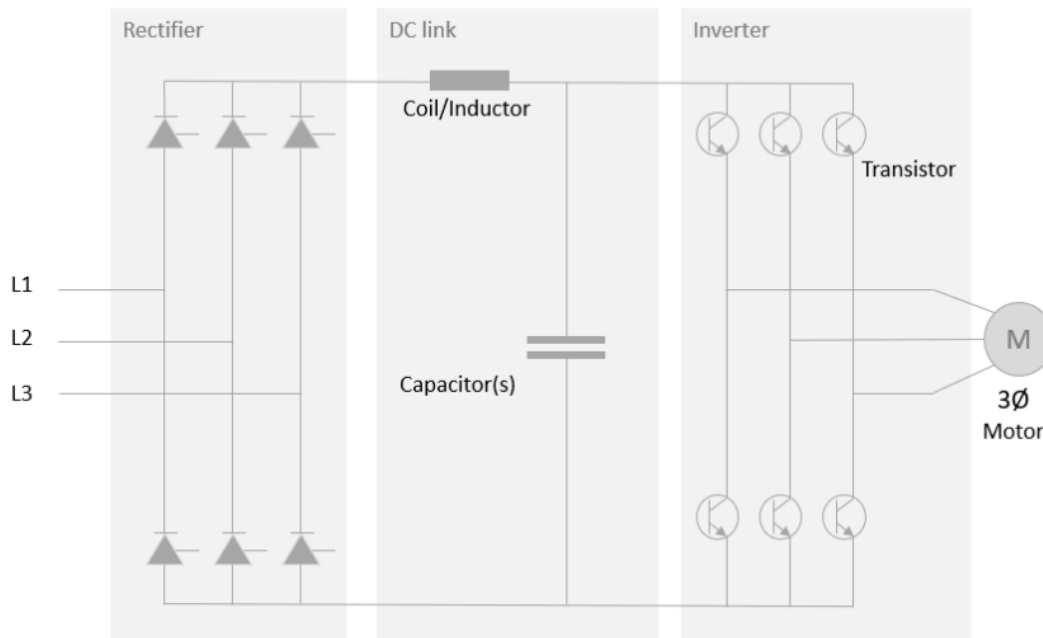
$$u_{out} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} u_p$$

Formel 2 Formel for utregning av spenning som blir målt av en spenningsensor [21]

Det er mange fordeler ved bruk av en spenningsensor, deriblant at den kan både bli brukt for måling av spenning, men også for beskyttelsesformål. Ved bruk av en spenningsmåler har man mulighet for å overvåke utstyret kontinuerlig døgnet rundt. Utenom dette er den også god på å varsle hvis spenningsdataen er kritisk, altså for høy eller lav. En spenningsensor er også svært nøyaktig ovenfor spenningsovervåking. Ved bruk av en slik sensor kan man minimere kostnadene ved et prosjekt da sannsynligheten er mindre for at utstyr blir ødelagt på grunn av muligheten for overvåking som kan forhindre overoppheting og utilstrekkelig strømtilførsel. Dette gjør en spenningsensor til et mer miljøvennlig valg. Utenom dette kan en spenningsensor hjelpe til med å forhindre uventet nedetid på utstyret [21]

3.3 Frekvensomformer

En frekvensomformer (VSD) er et verktøy som endrer frekvensen til en elektrisk vekselstrøm fra én frekvens til en annen [22]. Hovedformålet med en VSD er å kontrollere strømmen mellom strømforsyningen og motoren. En VSD består av en likeretter, en kondensator og en vekselretter [23].



Figur 9 Struktur av Frekvensomformer [23]

Strømmen som blir kontrollert går gjennom frekvensomformeren og blir regulert før den tilføres motoren. En VSD fungerer ved at inngangseffekten går gjennom en likeretter som konverterer AC-effekt til DC-effekt. DC-effekten tilføres deretter til kondensatoren for å jevne ut den elektriske bølgeformen, som gir ren effektforsyning for neste steg. Effekten føres deretter videre fra kondensatoren til en vekselretter, som gjør DC-effekten om til utgangs AC-effekt som føres videre til motoren [24].

Dette trinnet sørger for at VSD'en klarer å justere frekvensen og spenningen som tilføres motoren basert på strømbehovene. Dermed kan man justere hastigheten eller dreiemomentet til motoren etter behov. Dette resulterer i betydelige energi- og kostnadsbesparelser, og gjør frekvensomformere til et mer miljøvennlig valg. I tillegg til energisparing bidrar VSD'en til å redusere omgivelsesstøy som kan påvirke strømsensorer og andre enheter. De kan også forbygge vedlikeholdskostnader ved å optimalisere drift og forhindre unødvendig slitasje på utstyr [24].

3.4 Måleresistor (Burden resistor)

Basert på Ohms lov, oppstår det et spenningsfall over en resistor i en krets hvor det beveger seg en elektrisk strøm. En måleresistor, også kjent som burden resistor, har i oppgave å konvertere det målte strømsignalet om til et spenningsignal, ved hjelp av Ohms lov. Dette gjøres fordi effektanalysatoren bare kan motta spennings signaler. Dette spennings signalet brukes til å generere måledataen som skal analyseres [\[25\]](#).

3.5 Begrep og Teori om Formler

3.5.1 Totale Harmoniske Forvrenginger

Totale harmoniske forvrenginger (TDR) måler graden et elektrisk signal er blitt forvrengt fra sin opprinnelige form. Forvrengningen oppstår når ekstra frekvens blir lagt til den opprinnelige frekvensen. Dette forårsaker potensielle problemer i elektriske enheter. Det er ønsket lave TDR-verdier, da det indikerer et renere og mer nøyaktig signal. TDR blir angitt i prosent og blir brukt for å sjekke kvaliteten på en elektrisk strøm. All strøm med mindre TDR enn 6% betraktes som “god strøm”. En TDR over 6% kan føre til elektronikk svikter tidligere, og en elektrisk forvrengning kan føre til at elektriske komponenter fungerer dårlig eller feil [\[26\]](#).

Det ble brukt Perception for å regne ut TDR, og følgende formel ble benyttet, hvor RMS_{input} er strømmen som blir målt og $RMS_{fundamental}$ er RMS verdien av grunnfrekvensen på inngangen:

$$TDR = 100 \cdot \sqrt{\left(\frac{RMS_{input}}{RMS_{fundamental}}\right)^2 - 1}$$

Formel 3 Formel for totale harmoniske forvrenginger [\[27\]](#)

3.5.2 RMS – Kvadratisk Gjennomsnitt

RMS er forkortelse for root mean square som oversettes til kvadratisk gjennomsnitt på norsk. RMS er en viktig måte å regne ut gjennomsnittet av verdier over en lengre periode. [\[28\]](#)

RMS ble regnet ut ved hjelp av programvaren Perception. Der ble det brukt følgende formel, hvor y_i er verdien ved første målingen i beregningsperioden, y_j er siste måling i beregningsperioden og N er antall målinger innen beregningsperioden. ($N = j - i + 1$)

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{n=i}^j (y_n)^2}{N}}$$

Formel 4 Formel for utregning av RMS [27]

3.5.3 RMS Error

RMS error (RMSE) gir et estimat av hvor nøyaktig en modell er ved å forutsi målevariabelen. Dette gjøres ved å måle gjennomsnittlig forskjell mellom modellens forutsatte verdier og de faktiske observasjonene. Det er ønsket å ha en lav RMSE-verdi, da det indikerer at modellen er bra. Fordelen ved bruk av RMSE er at den representerer feilene i samme enhet som målevariabelen, noe som gjør den enkel å tolke.

RMS error (RMSE) gir en vurdering av sensorens nøyaktighet ved å sammenligne gjennomsnittlig forskjell mellom sensorens forutsatte verdier og de faktiske målingene. En lav RMSE-verdi indikerer at sensoren er god [29]. Den forutsatte verdien har blitt satt som Fluxgate-sensorens RMS-verdi fordi dette er blitt benyttet som referansesensoren. RMSE er blitt beregnet ved Formel 5, hvor y_i er det målte verdien, \hat{y}_i er forutsatte målingen og n er antall observasjoner

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}}$$

Formel 5 Formel for å beregne Root mean square error [27]

3.5.4 Nullsekvensstrøm

I et balansert system vil det være et sett på tre faser som har strømmer som består av tre sinusformete strømmer som har en lik amplitude og frekvens, men er faseforskyvet i fra

hverandre med 120° . Dette betyr at den totale strømmen mellom fasene skal bli 0. Dette blir vist i Formel 7 hvor a, b og c er de forskjellige fasene [\[30\]](#).

$$(I_a + I_b + I_c) = 0$$

Formel 6 Summen av fase strømmen er lik null [\[30\]](#)

Nullsekvensstrøm refererer til strømmen som oppstår blant annet under en jordfeil i et elektrisk system.. Nullsekvensstrømmen er vanligvis representeres ved tre vektorlinjer, og er detektert ved å legge til vektoren av de tre fasestrømmene. Nullsekvensstrømmen kan beregnes ved følgende formel Formel, hvor a, b og c er de forskjellige fasene [\[31\]](#).

$$I_{ao} = \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c)$$

Formel 7 Formel benyttet for nullsekvensstrøm [\[31\]](#)

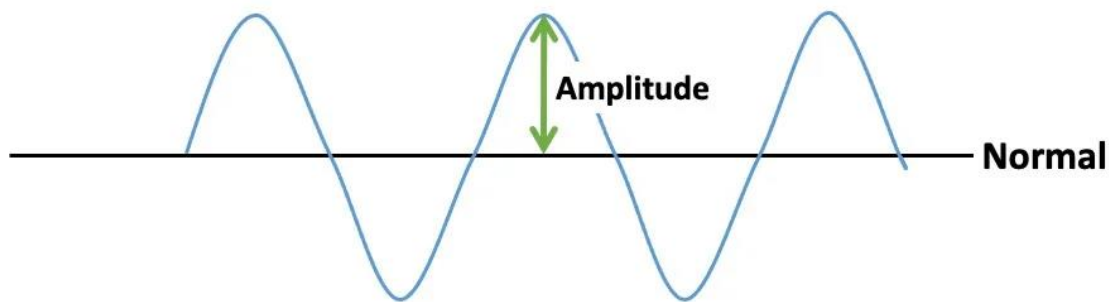
3.5.5 Amplitude

Amplitude er det største utslaget av en svingning, og den måler styrken av svingningen. Den representerer avstanden fra midtposisjonen til en av de ytterste posisjonene [\[32\]](#).

Amplitude ble beregnet et ved å bruk Formel 8, hvor $MAX(I(t))$ er toppunkt til sinuskurven.

$$Amplitude = MAX(I(t))$$

Formel 8 Formel for amplitude



Figur 10 Illustrasjon som viser hva amplitude er [33]

3.5.6 Strømubalanse

Fase ubalanse i et tre-fase-system er noe som skjer da fasene ikke har en lik størrelse.

I et tre-fase-system, er strøm ubalanse definert som det maksimale avviket mellom en hvilken som helst strøm på en fase og gjennomsnitts strømmen, dividert på gjennomsnitts strømmen.

En strøm ubalanse vil produsere overskudd av varme. Dette kan føre til at isolasjon på ledere smelter. I tillegg vil denne ubalansen redusere effektiviteten til motoren samt øke mengde vibrasjon. I lengden vil dette ødelegge både motoren og utstyret. IEEE sin standard for strøm ubalanse i et industrielt system er satt ved en maksimal terskel på 1 % [34].

Feil! Fant ikke referanseilden. er benyttet for å beregne ubalansen.

4 Testing

Dette kapittelet tar for seg testforberedelser og gjennomføring av testen, og gir en oversikt over testområdet og hvilke utstyr som ble benyttet.

4.1 Testanlegg

Testene ble utført på OneSubsea sitt testanlegg på Horsøy, hvor alt av nødvendig utstyr for testen var tilgjengelig. Horsøy er et stort anlegg som består av syv testaheller [35] med mange

fasiliteter, inkludert flere testbasseng. Dette gir mulighet for å teste høyspent, kabler, motorer og andre komponenter før det blir levert til kunde.



Figur 11 Testanlegget på OneSubsea avdeling Horsøy [\[36\]](#)

4.2 Helse, miljø og sikkerhet

Under testing er det viktig å følge visse sikkerhetsregler for å hindre skade på personell og utstyr. Det er viktig at farer og risiko relatert til testingen blir identifisert og vurdert før oppstart av test.

En grundig gjennomgang av sikkerhetsregler for testanlegget på Horsøy ble utført i forkant av testen. Dette er et krav for å kunne ferdes på Horsøy.

Følgende sikkerhetstiltak ble fulgt under testen:

- Bruk av nødvendige verneutstyr
- Testpersonalet skal være bak beskyttelsesbarriere under testing
- Testobjekt styres eksternt
- Beskyttende stoppsystem-knapp skal være lokalisert og merket

4.3 Utstyr

OneSubsea har vært ansvarlig for å stille med nødvendig utstyr for testen. Følgende utstyr ble tatt i bruk:

- Rogowski-spole (Fluke i3000)
- Hall-effektsensor (Lem LF 2005-S)
- Fluxgate-sensor (Danisense DMI1200ID)
- Effektanalysator (Genesis 3t med et GN610B kort)
- Strømforsyning
- Måleresistor (1 Ω og 10 Ω)
- Frekvensomformer
- Datamaskin med Perception

Det ble benyttet en Fluke I3000, som er en variant av Rogowski-spolen. Fluke I3000 blir drevet av batterier og har tre forskjellige målområder den opererer innenfor. Dette kan justeres ved hjelp av en bryter. Den kan måle 0-30 A_{RMS}, 0-300 A_{RMS} og 0-3000 A_{RMS}. Valg av riktig innstilling er viktig for å sikre nøyaktige målinger, og det er en fordel å ta hensyn til målområdet ved valg av innstilling. Sensoren har et frekvensområde på 10 Hz til 50 kHz. Støyen er beregnet til 8 mV AC RMS når bryter er satt til 0 – 30 A_{RMS}, mens den er beregnet til omtrentlig 2 mV AC RMS når bryter er satt til 0 – 300 A_{RMS} og 0 – 3000 A_{RMS}. Mellom 45 Hz og 65 Hz er sensorens nøyaktighet på $\pm 1\%$, og har en linearitet på $\pm 0,2\%$ av avlesning innenfor 10% og 100% av måleområdet [\[11\]](#). Linearitet beskriver evnen en enhet har til å opptre proporsjonalt med inngangssignalet [\[37\]](#).

Det ble benyttet en lukket sløyfe Hall-effektsensor, nærmere bestemt Current Transducer LF 2005-S, levert av Lem. Den har et måleområde på ± 2000 A, ved bruk av en spenningsforsyning på ± 15 V. Den kan måle opp til 2000 A_{RMS} og har et frekvensområde på 0 – 100 kHz. Linearitetsfeilen, altså avviket mellom den ideelle lineære strømmen påført og hva sensoren måler, sensoren er beregnet til mindre enn 0.1%. Linearitetsfeilen, altså avviket mellom den ideelle lineære strømmen påført og hva sensoren måler, til sensoren er beregnet til mindre enn 0.1%. Databladet til Lem-sensoren viser at det skal bli brukt en måleresistor på 0 – 7,5 Ω [\[38\]](#).

Det ble benyttet en DM1200ID Fluxgate-sensor fra Danisense. Denne kan måle opp til 1200 A_{RMS}. Ved bruk av en spenningsforsyning på ± 15 V, og har den et målområde på ± 1800 A.

Sensoren opererer i et frekvensområde fra 0 – 400 kHz, og har en RMS-støy på 0,03 ppm (deler per million) når frekvensen er under 100 Hz. Linearitetsfeilen til sensorer er bra med en verdi mindre enn 0,3 ppm [\[39\]](#).

Effektanalysator som blir brukt heter Genesis 3t og benytter seg av et GN610B kort. Kortet har en input range på ± 10 mV opp til 1000 V. Den har en nøyaktighet på 0,02 % og har en samplingsrate på 2 MS/s [\[25\]](#).

De ble benyttet to forskjellige ± 15 V strømforsyninger. Den originale forsyningen som var beregnet for bruk for Lem-sensoren, var dårligere skjermet og montert i et skap sammen med annen elektronikk. Dersom det er annen elektronikk i kabinettet kan resultere i økt målestøy. HBM sin strømforsyning er en forsyning med god skjerming, samt som at den er konstruert betraktelig bedre. I tillegg er den den er adskilt fra annen elektronikk. Se vedlegg[Strømforsyning i kabinett]

Det er blitt brukt to forskjellige måleresistorer, Lem-sensoren bruker en måleresistor som har en motstand på 10 Ω og Danisense-sensoren bruker en på 1 Ω . Det er essensielt å velge riktig størrelse på måleresistoren, ettersom det kan påvirke nøyaktigheten av måleresultatene. De forskjellige måleresistorene har ulike skaleringsfaktorer og sensitiviteter avhengig av valgt størrelse [\[13\]](#).

4.4 Hovedmål av testen

Målet med testen er å definere nøyaktigheten av Fluxgate-sensor, Hall-effektsensor, og Rogowski-spole. For denne testen er det blitt definert tre hovedmål. De er som følger:

1. Sammenligne Rogowski-spole opp mot Fluxgate-sensor, hvor Fluxgate er en svært nøyaktig strømsensor. På grunnlag av dette kan Rogowski-spole bli verifisert for bruk i fremtidige prosjekter.
2. Sammenligne Hall-effektsensor opp mot Fluxgate-sensor, hvor begge er nøyaktige strømsensorer, for å verifisere hvor minimal forskjellen er mellom dem.
3. Undersøke hvordan de forskjellige strømsensorene reagerer på variabel frekvens.

4.5 Sjekkliste

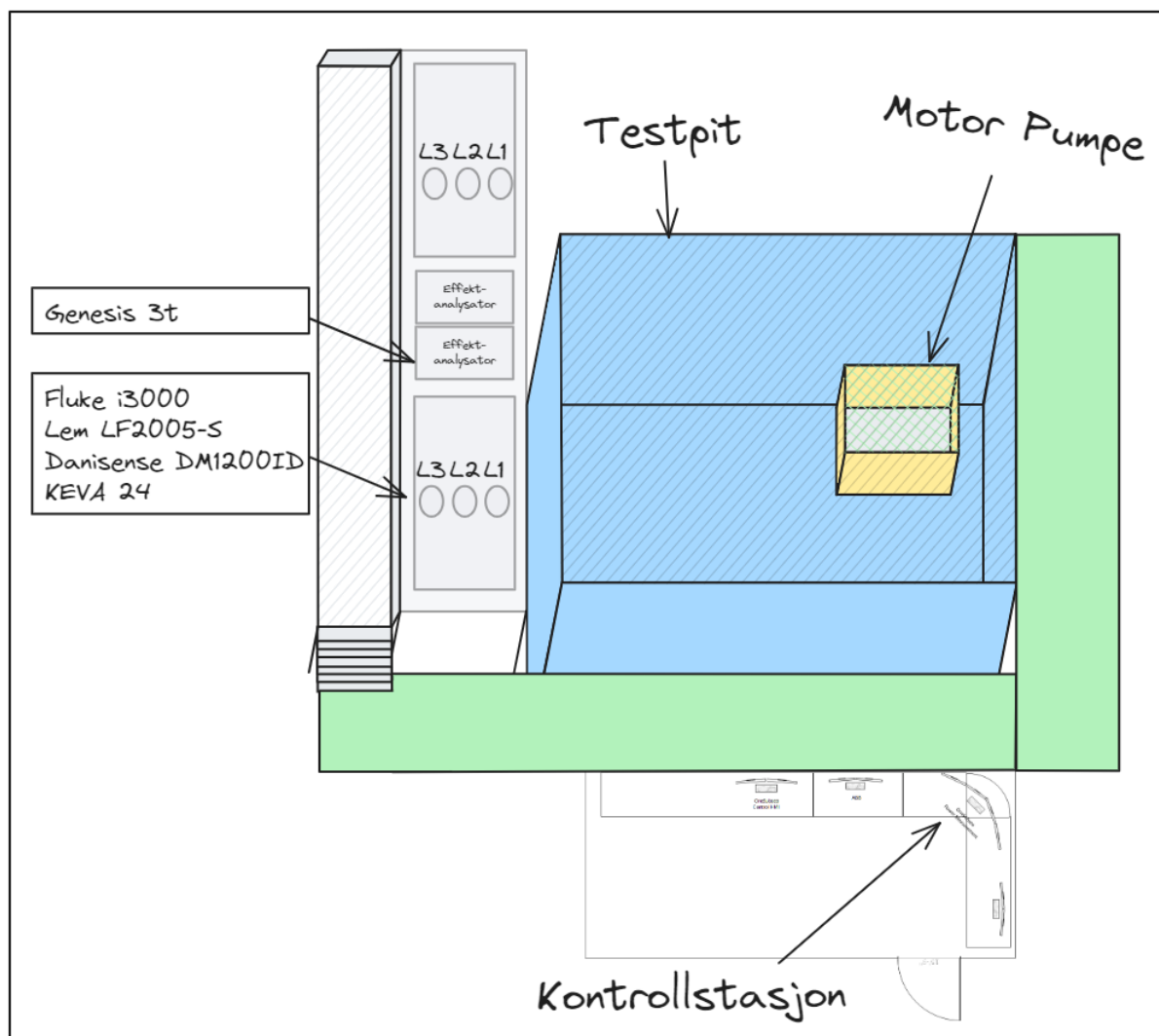
Før testingen kan begynne, må en sjekkliste gjennomgås. Dette er et avgjørende trinn for å sikre at alt er korrekt koblet og er i samsvar med kravene. Sjekklisten er laget for å hindre feil i oppkobling, og dermed unngår målefeil.

| | | |
|--|---|--|
| | Verifisere at sensorene har blitt koblet opp i henhold til flerlinjediagram | |
| | Verifisere at sensorene er plassert i henhold til plan | |
| | Verifisere at strømsensorene er installert riktig vei | |
| | Verifisere at strømsensorene gir riktig verdi til effektanalysatoren | |
| | Verifisere at Perception er satt opp med riktige formler i henholdt til planlagt test | |

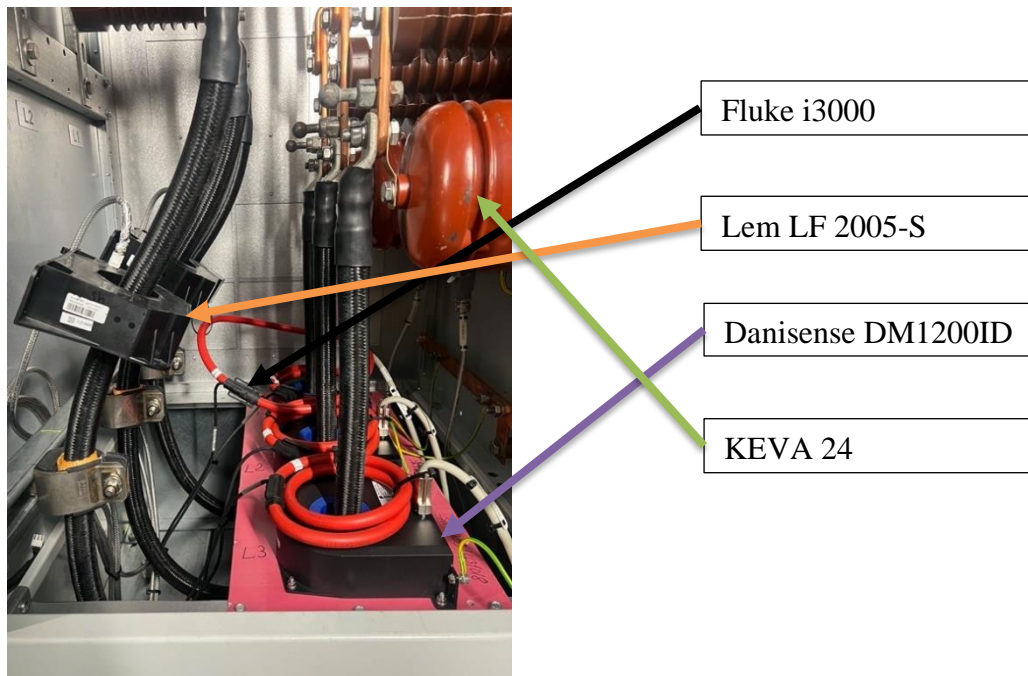
Tabell 1 Sjekkliste for hva som må gjøres før sensortesten starter

4.6 Systemoversikt

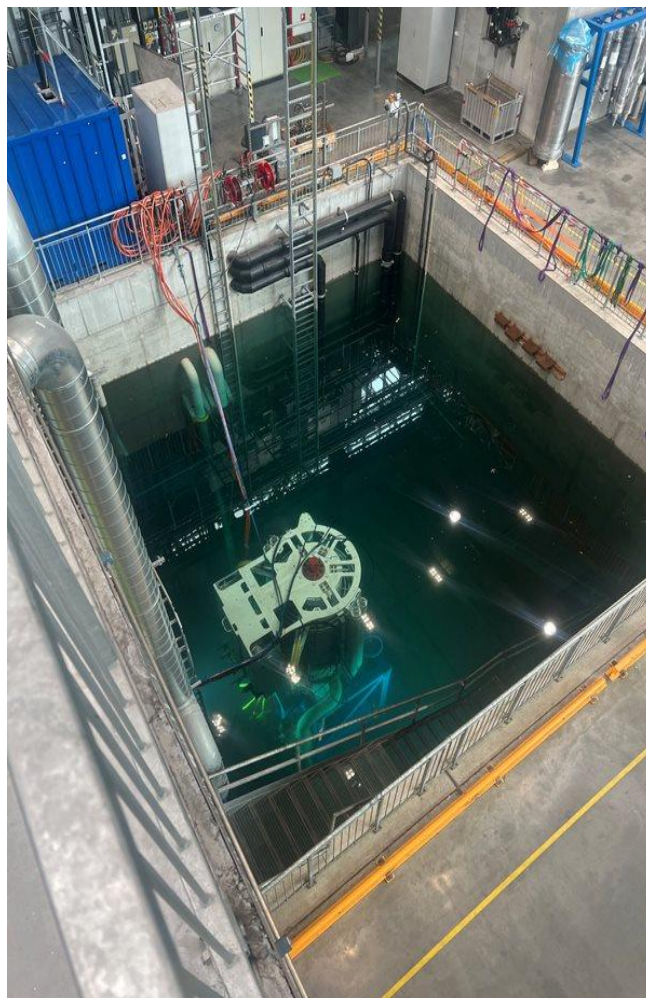
En forenklet oversikt over testområdet blir vist i **Feil! Fant ikke referanseilden.** Gjennom hele testen oppholdt man seg i kontrollrommet, hvor man har tilgang til Perception, Som vist i **Feil! Fant ikke referanseilden.**, er de forskjellige sensorene montert og plassert i kabinettet nærmest kontrollstasjonen. Figur 13 viser hvordan sensorene er blitt koblet opp inne i kabinettet. Kabler derfra føres til både motorpumpen og kontrollkabinettet, hvor Genesis 3t effektanalysatoren er plassert. Figur 14 viser testbassenget, hvor motorpumpen er plassert, som er fylt med saltvann hentet fra ca. 70 m havdyp. Vannet har en jevn temperatur, og har som oppgave å kjøle ned pumpen for å forhindre overoppheting.



Figur 12 Forenklet illustrasjon av testfasilitetet som er benyttet på OneSubsea avd Horsøy



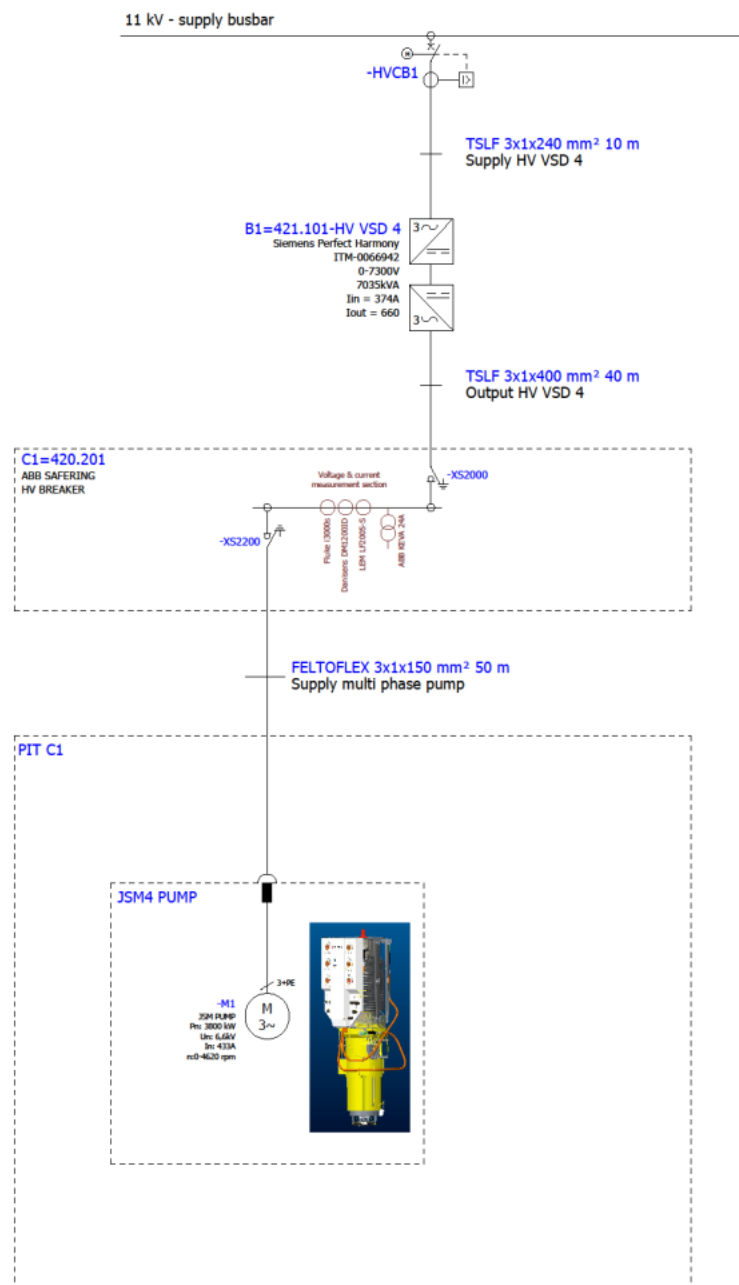
Figur 13 Oppkobling av strømsensorene



Figur 14 Motorpumpe i testbasseng fylt med vann

4.6.1 Enlinjeskjema

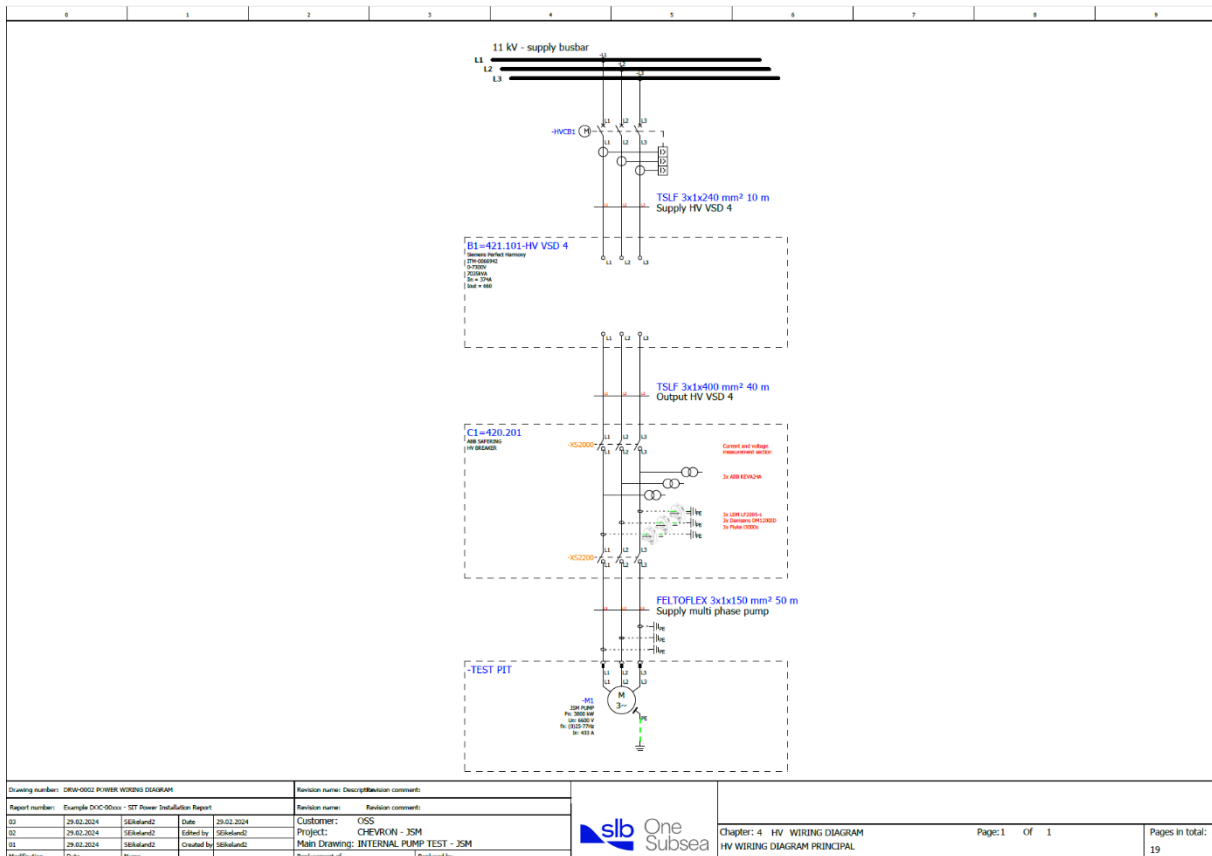
Feil! Fant ikke referanseilden. tar utgangspunkt i sensortestens oppkobling og begynner fra første bryterpunkt ovenfor VSD-en. Dette bryterpunktet er et strømrelé med elektrisk motorbryter og blir kalt HVCB1. Alt over dette bryterpunktet er ikke relevant for sensortesten ettersom det ikke vil ha noe påvirkning på resultatene. Fra VSD'en ned til sensorene er det koblet en 40 m lang TSLF-kabel. Videre fra sensorene er det en Feltoflex-kabel som forsyner multifasepumpen.



Figur 15 Enlinjediagram av oppkobling

4.6.2 Flerlinjediagram

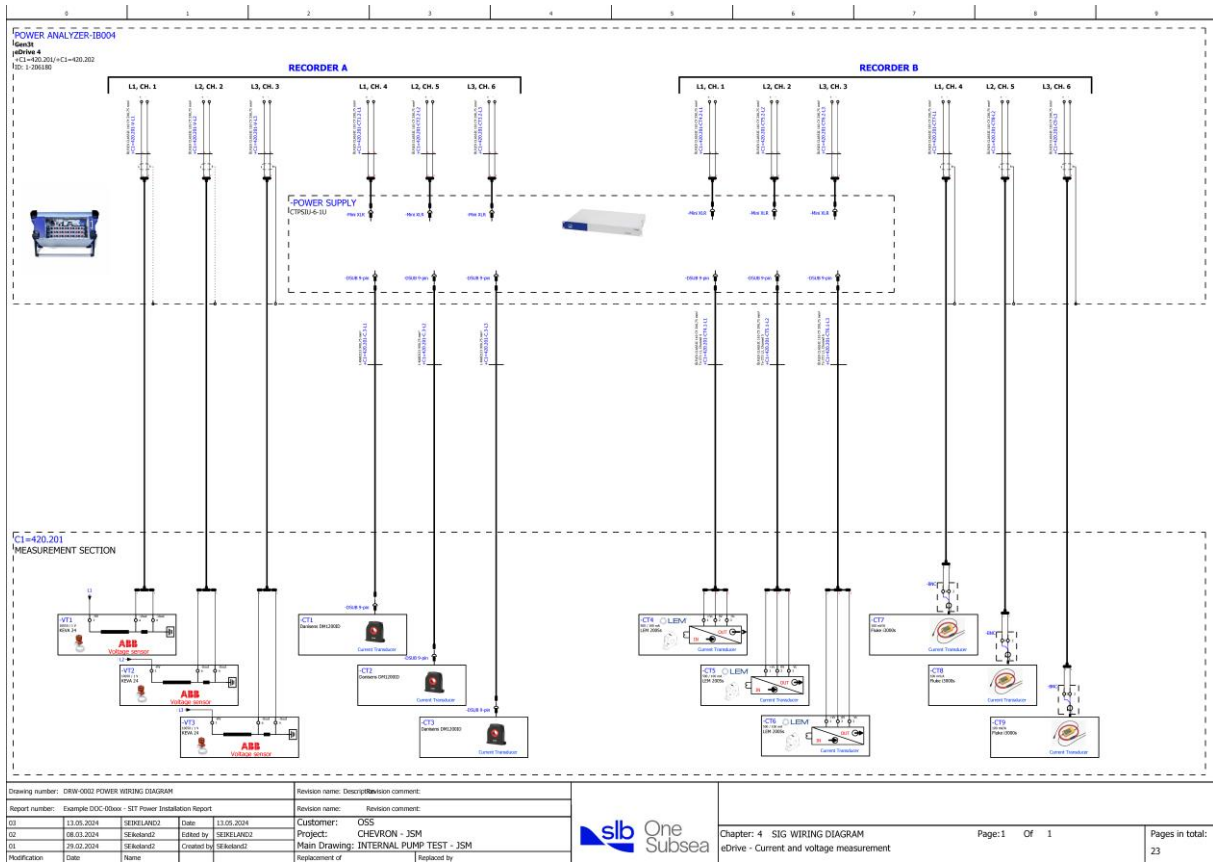
Flerlinjediagrammet er en mer detaljert tegning av oppkoblingen i forhold til de respektive fasene. Figur 16 viser plasseringen av de ulike komponentene. Dette diagrammet øker forståelsen av oppkoblingen, og reduserer sannsynlighet for feil under installasjonen.



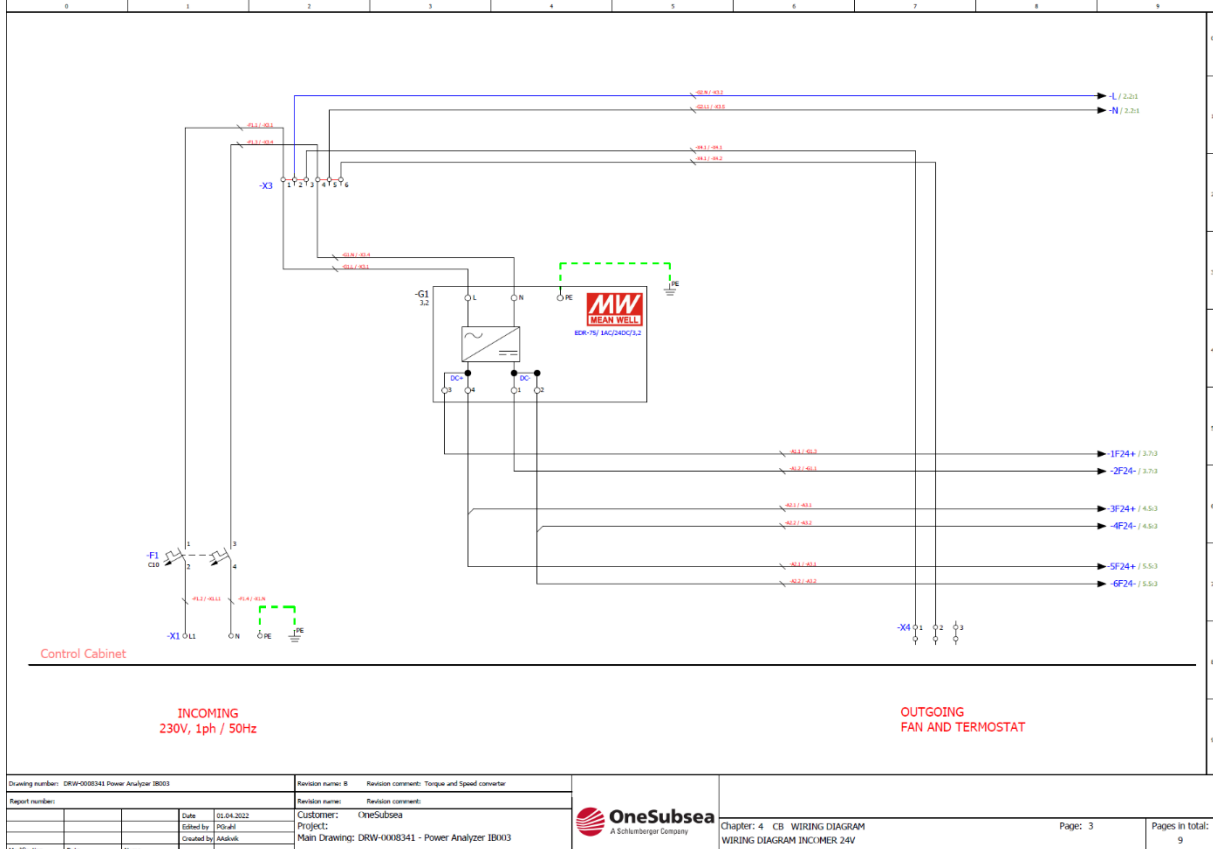
Figur 16 Flerlinjediagram av oppkobling

4.6.3 Oppkobling i effektanalysatoren

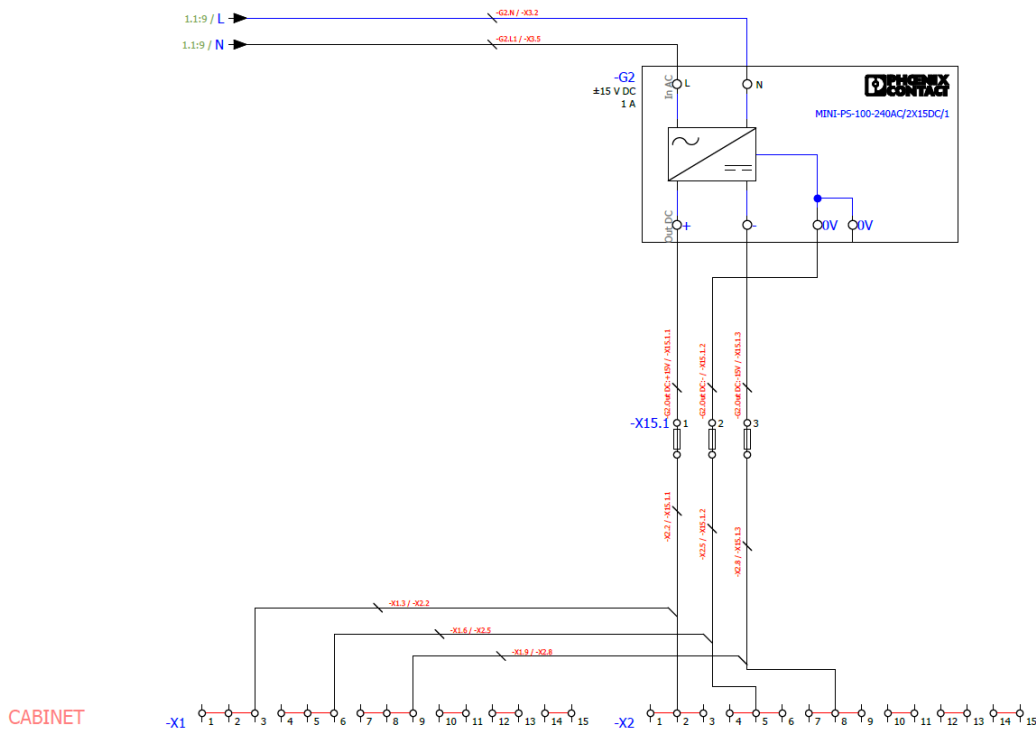
Ved hjelp av effektanalysatoren er det mulighet for å måle og kvantifisere signalene fra strømsensorene. Oppkoblingen mellom effektanalysatoren og sensorene er vist i Figur 17. I Figur 18 og Figur 19 vises oppkoblingen til de to forskjellige strømforsyningene.



Figur 17 Illustrasjon av oppkobling mellom strømsensorer og Genesis 3t effektanalysator



Figur 18 Illustrasjon av oppkoblingen til HBM sin ±15 V Strømforsyning



Figur 19 Illustrasjon av oppkoblingen til ±15 V Strømforsyning

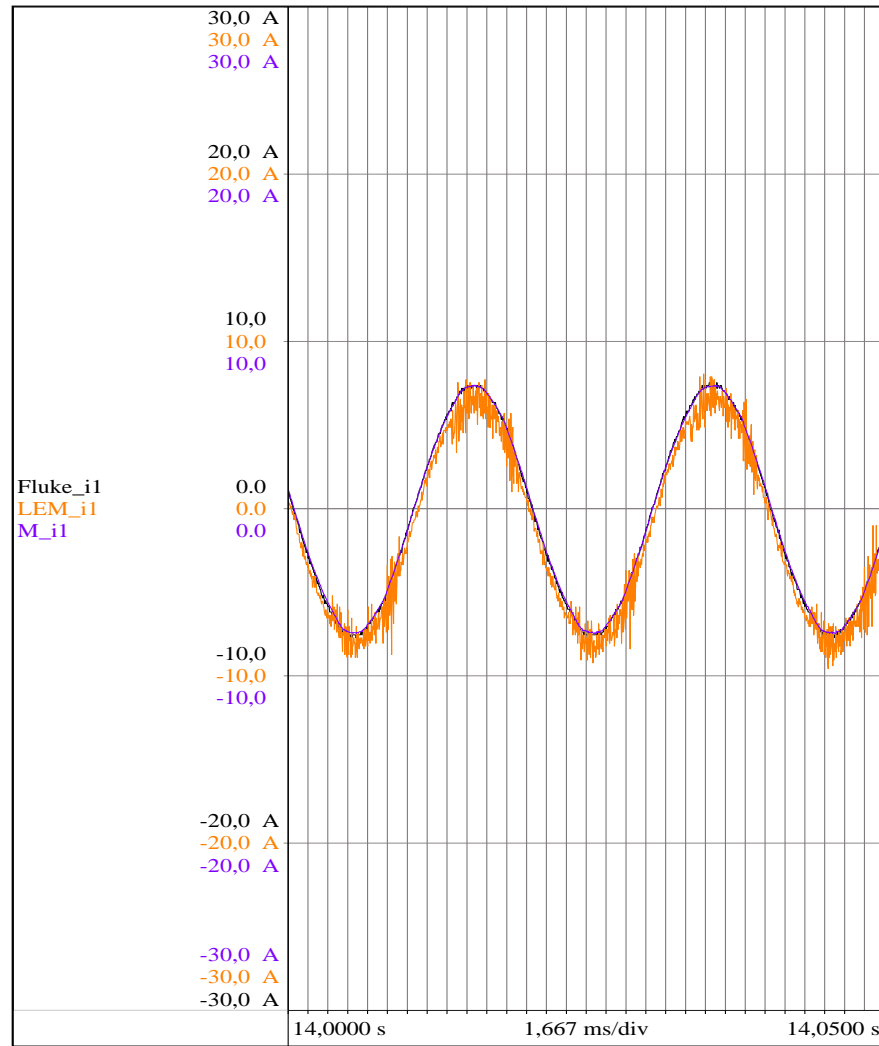
4.7 Sensorutsjekk og feilkilder

Før strømsensortesten, ble det utført en sensorutsjekkstest. Den hadde i oppgave å identifisere eventuelle feil ved sensorene. Denne testen avdekket noen funn, som vil bli presentert i delkapitlene nedenfor.

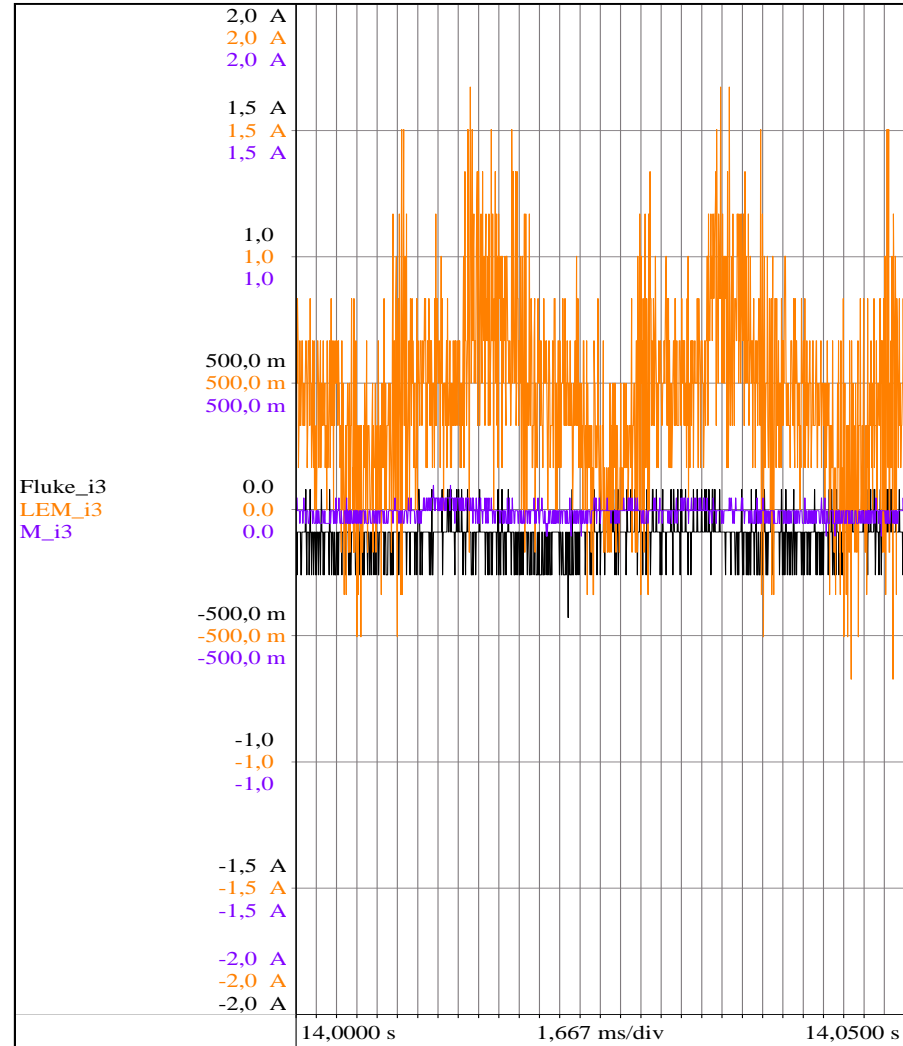
4.7.1 Utgangspunkt

Under første sensorutsjekken ble det påført en strøm på ca. 7 A på fase 1, ved hjelp av en Sverker. Figur 20 viser hvordan strømsensorene reagerer ved tilførsel av strøm, hvor det er tydelig med støy på målingene til Lem-sensoren. Figur 21 illustrerer støynivået til sensorene når det ikke er påført en strøm. Det er betraktelig mer støy på Lem-sensoren i forhold til de to andre. Grafen viser at Lem-sensoren måler en støy som er på ca. 1500 mA, sammenlignet med Danisense-sensoren som måler en støy på ca. 100 mA og Fluke-sensoren som måler en støy på ca. 200 mA. Det er en markant forskjell i støynivået, og det er derfor viktig å få redusert den slik at målingene for testen blir pålitelige.

Det som er viktig å påpeke, er at under første sensorutsjekk testen er det merkbart støy på Lem-sensoren både ved en påført strøm og ved ikke påført strøm sammenlignet med de to andre strømsensorene.



Figur 20 Støybildet til strømsensorene som er montert på L1 med påført strøm

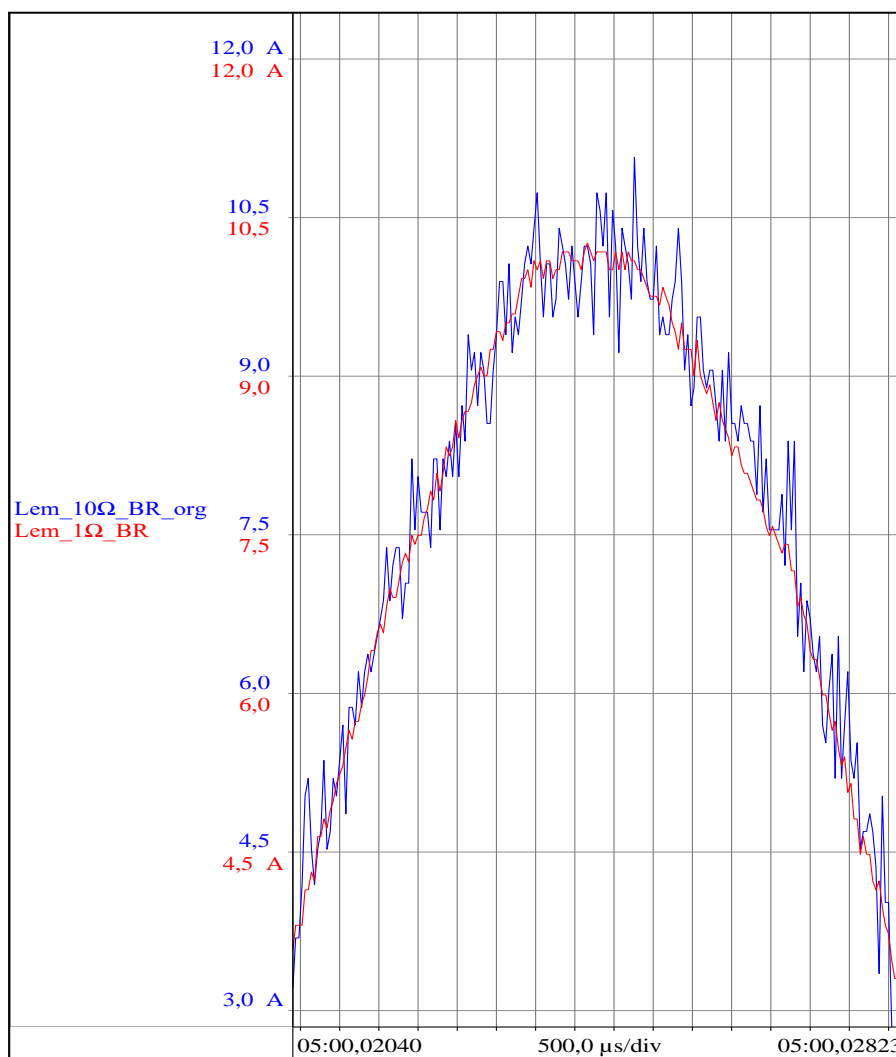


Figur 21 Støybildet til strømsensorene på L3 uten påført strøm

4.7.2 Måleresistor-test

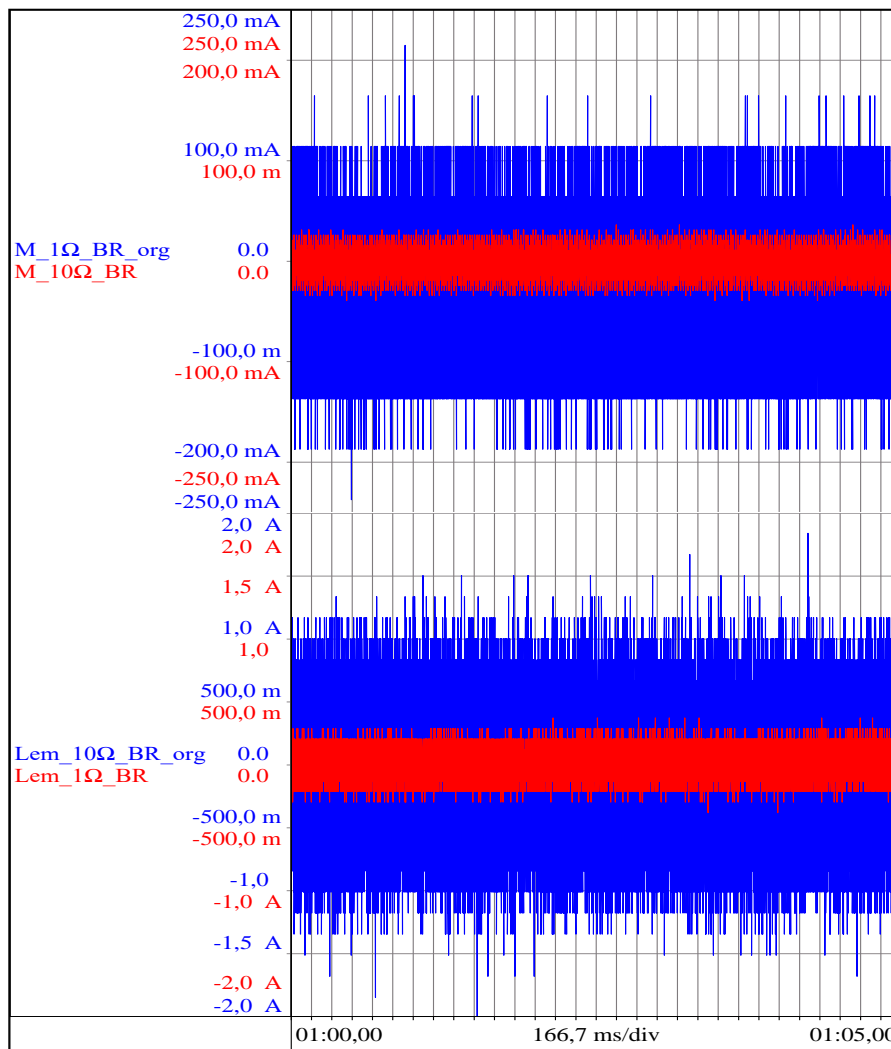
Det er blitt gjennomført tester for å undersøke hvor stor påvirkning måleresistoren har på støynivået til Lem- og Danisense-sensoren. Som nevnt tidligere hadde Lem- og Danisense-sensoren en opprinnelig måleresistor på $10\ \Omega$ og $1\ \Omega$. På bakgrunn av det som står i databladet til Lem-sensoren ble det besluttet å bytte om på måleresistorene for å undersøke hvilken påvirkning dette har.

Feil! Fant ikke referanse-kilden. viser en sammenligning av Lem-sensoren når den måler en strøm på ca. 10 A. Sammenligningen viser at målestøyen til sensoren har blitt redusert ved å bytte måleresistor fra $10\ \Omega$ til $1\ \Omega$.



Figur 22 Sammenligning av hvordan en måleresistor påvirker målestøy. Hvor den blå grafen tilsvare den originale oppkoblingen

Ved å observere grafene i Figur 23, er det tydelig at støyen til Lem-sensoren er halvert ved bytte av måleresistor. En mulig grunn til dette er at databladet angir at maks målemotstand skal være $7,5 \Omega$ ved $\pm 15 \text{ V}$ strømforsyning [38]. Siden vi benytter oss av en målemotstand som er større en angitt verdi i databladet, vil dette være en mulig påvirkningsfaktor på hvorfor det oppstår mer støy, selv om det måles lave strømmer. Ved å bytte til en måleresistor på 10Ω , halveres også målestøyen til Danisense-sensoren. Denne reduksjonen betraktes imidlertid som minimal, da støyen allerede var lav ved bruk av en 1Ω måleresistor.



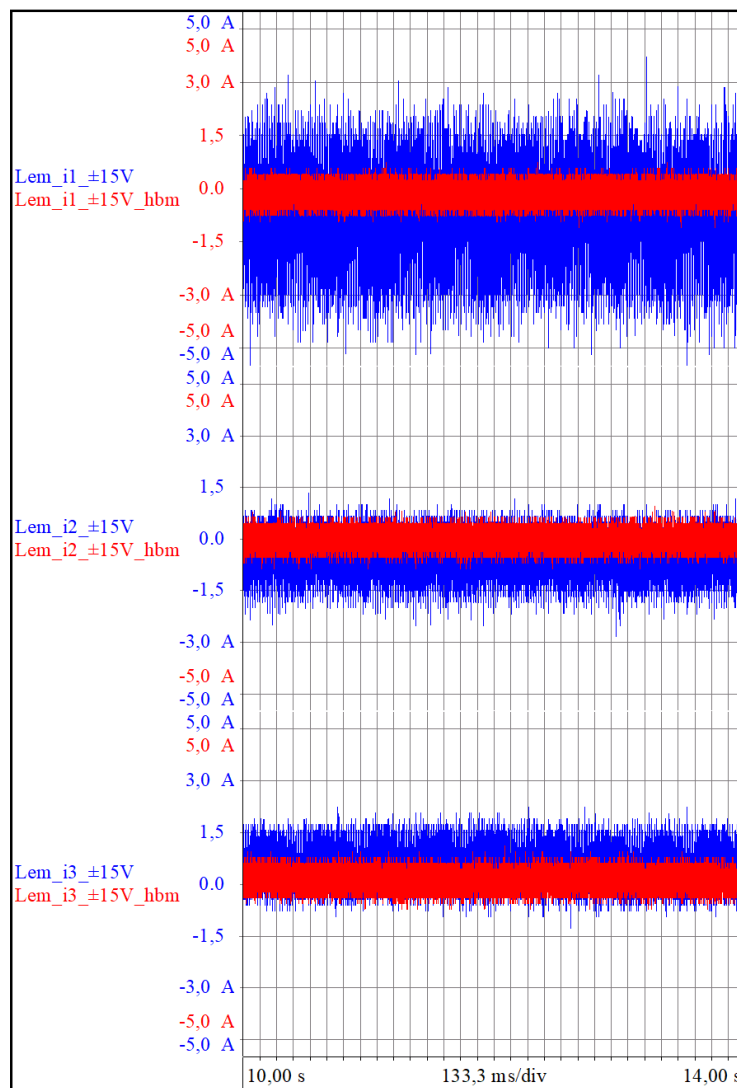
Figur 23 Sammenligning av hvordan en måleresistor påvirker målestøy uten påført strøm. Hvor den blå grafen tilsvare den originale oppkoblingen

Selv om Lem-sensoren målte mindre støy ved bruk av en 1Ω måleresistor, ble det besluttet å beholde den originale oppkobling. Grunnen til dette var at endringer ville påvirke den

pågående motorpumpe-testen siden sensorene hadde blitt kalibrert i forhold til det originale oppsettet på forhånd.

4.7.3 Endring av strømforsyning

Som nevnt tidligere var det benyttet to forskjellige ± 15 V strømforsyninger. På bakgrunn av dette ble det besluttet å undersøke hvor stor påvirkning strømforsyningen hadde på målestøyet. Figur 24 illustrerer forskjellen i støynivået ved bruk av to forskjellige strømforsyninger. Det kommer tydelig fram at den nye strømforsyningen reduserer støynivået kraftig. Dette resultatet samsvarer med kapittel 4.3 som omhandler strømforsyninger, ettersom den nye strømforsyningen levert fra HBM er bedre skjermet og er montert i et kabinett uten annen elektronikk.



Figur 24 Illustrerer forskjell på målestøyet til Lem-sensoren da det er brukt to ulike strømforsyninger

4.7.4 Brukerfeil

Underveis i testingen ble det oppdaget brukerfeil. Observasjoner fra kontrollrommet viste at kurvene til Rogowksi-spolen ble kuttet. Videre undersøkelser identifiserte at en av operatørene som kobler strømsensorene til systemet, hadde feilaktig justert bryteren for Rogowski-spolen. Bryteren hadde blitt innstilt på 30 A istedenfor 3000 A. Hvis dette ikke hadde blitt oppdaget ville de påvirket de endelige resultatene og ført til feilaktige konklusjoner. Dette understøtter viktigheten av å feilsøke og håndtere utstyret rett.

4.8 Gjennomføring av strømsensortest

Testen begynte med at motoren startet, og fortsatte til den nådde ønsket turtall. Loggføringen startet da motoren nådde 1500 omdreininger i minuttet (rpm). Underveis i testen økte turtallet til 2000, 3000, 4000, og 4600 rpm. På grunn av samarbeid med en pågående motorpumpe-test har det ikke vært mulig å kontrollere hvilke belastninger som har blitt oppnådd. Det har ført til at målingene i noen tilfeller har blitt tatt i et avgrenset stabilt område, slik at resultatet blir representativt.

5 Resultat

5.1 Introduksjon

I denne delen av oppgaven gjennomgår vi analysen av rådata, hvor vi henter ut nødvendig informasjon. Som tidligere nevnt har vi gått igjennom flere frekvens- og belastningsområder, og det er valgt å fokusere på dataene som gir oss de mest signifikante funnene. Dette inkluderer hvordan sensorene reagerer ved oppstart, trip og forskjellige frekvens- og belastningsområder.

Det er blitt benyttet en tabell som gir en oversikt over hvilke frekvens- og belastningsområder som er undersøkt. Det er markert i grønt hvilke områder som er oppnådd, mens det er markert i blått hvilke områder det skal fokuseres på og som skal analyseres. Dette er vist i Tabell 2

| | Frekvens | 25 Hz | 50 Hz | 60 Hz | 70 Hz | Max Hz |
|------------|----------|-------|-------|-------|-------|--------|
| Belastning | | | | | | |
| 20% | | | | | | |
| 30% | | | | | | |
| 40% | | | | | | |
| 50% | | | | | | |
| 60% | | | | | | |
| 70% | | | | | | |
| 80% | | | | | | |
| 85% | | | | | | |
| 90% | | | | | | |
| 95% | | | | | | |
| 100% | | | | | | |

Tabell 2 Belastning matrisen som blir benyttet til å angi hvilket frekvens- og belastningsområde

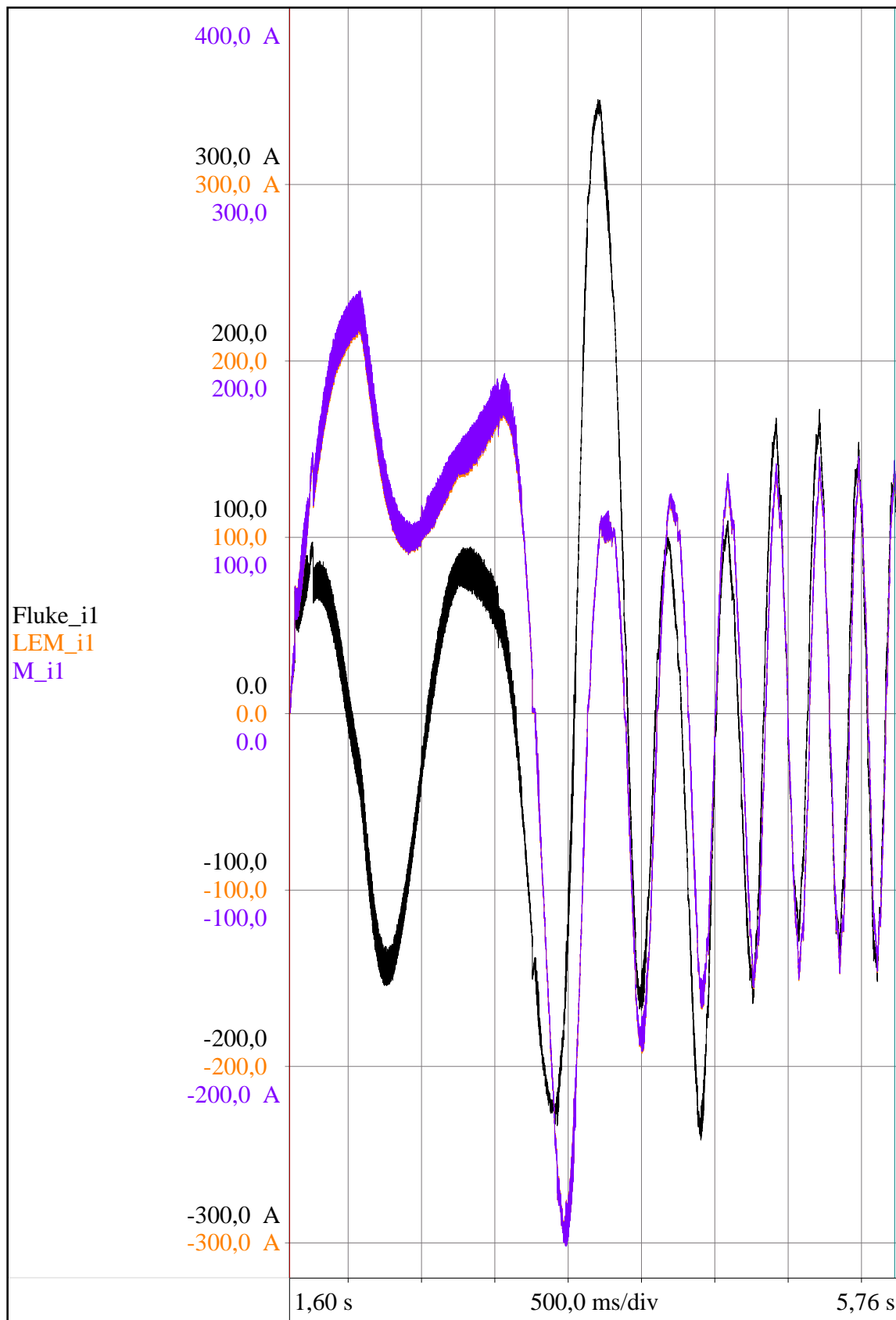
I frekvens- og belastningsområdene som vist i **Feil! Fant ikke referansekilden.** skal det bli undersøkt hvordan de forskjellige sensorene fungerer opp imot hverandre. Det er valgt å benytte Amplitude, RMS, TDR, Error_RMS, iMax_ub og nullsekvensstrøm for å kunne avgjøre hvilken sensor som er best egnet. Alle tabellene i resultatdelen er beregnet over en periode på 60 sekunder, og viser gjennomsnittet av målingene. I figurene nedenfor vil det bli benyttet fargekoder for sensorene, hvor svart er Fluke-sensor, oransje er Lem-sensor og lilla er Danisense-sensor.

5.2 Oppstart

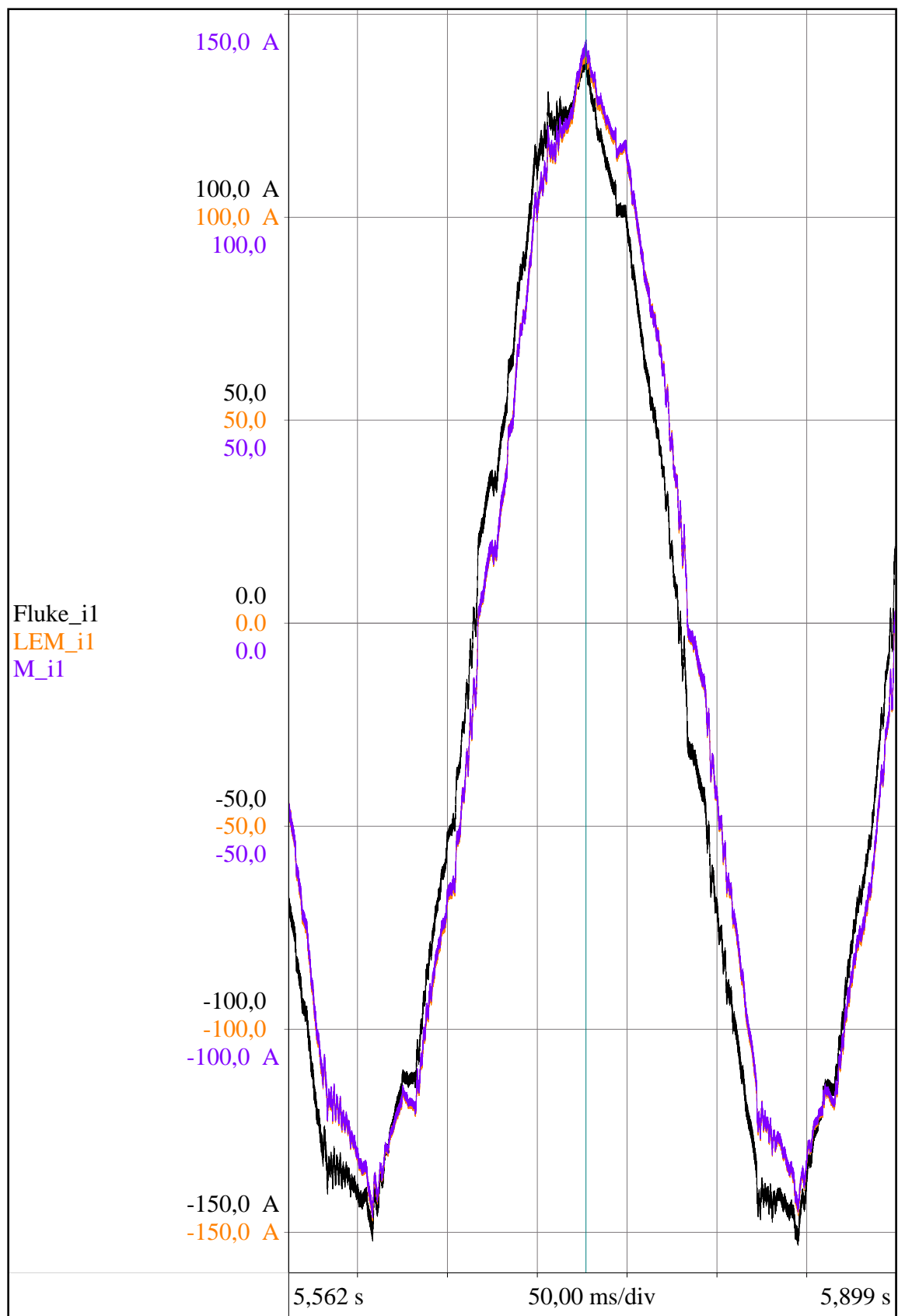
Det har blitt valgt å undersøke hvordan sensorene håndterer oppstarten av et system. Grunnen til dette er at sensorene har ulike frekvensområder. Som nevnt tidligere i kapittelet om utstyr starter Fluke-sensoren sitt frekvensområde på 10 Hz, mens Lem- og Danisense-sensoren kan

måle fra 0 Hz. På grunnlag av dette er det besluttet å undersøke hvordan Fluke-sensoren opererer før den når sitt angitte frekvensområde. Det er tydelig at Lem- og Danisense-sensoren følger hverandre, mens Fluke-sensoren sitt signal avviker. Ved å analysere grafen kan man se at Fluke-sensoren bruker 4,117 sekunder før den tilpasser seg og leverer et resultat som samsvarer med de andre sensorene. Dette blir vist i Figur 25 og Figur 26.

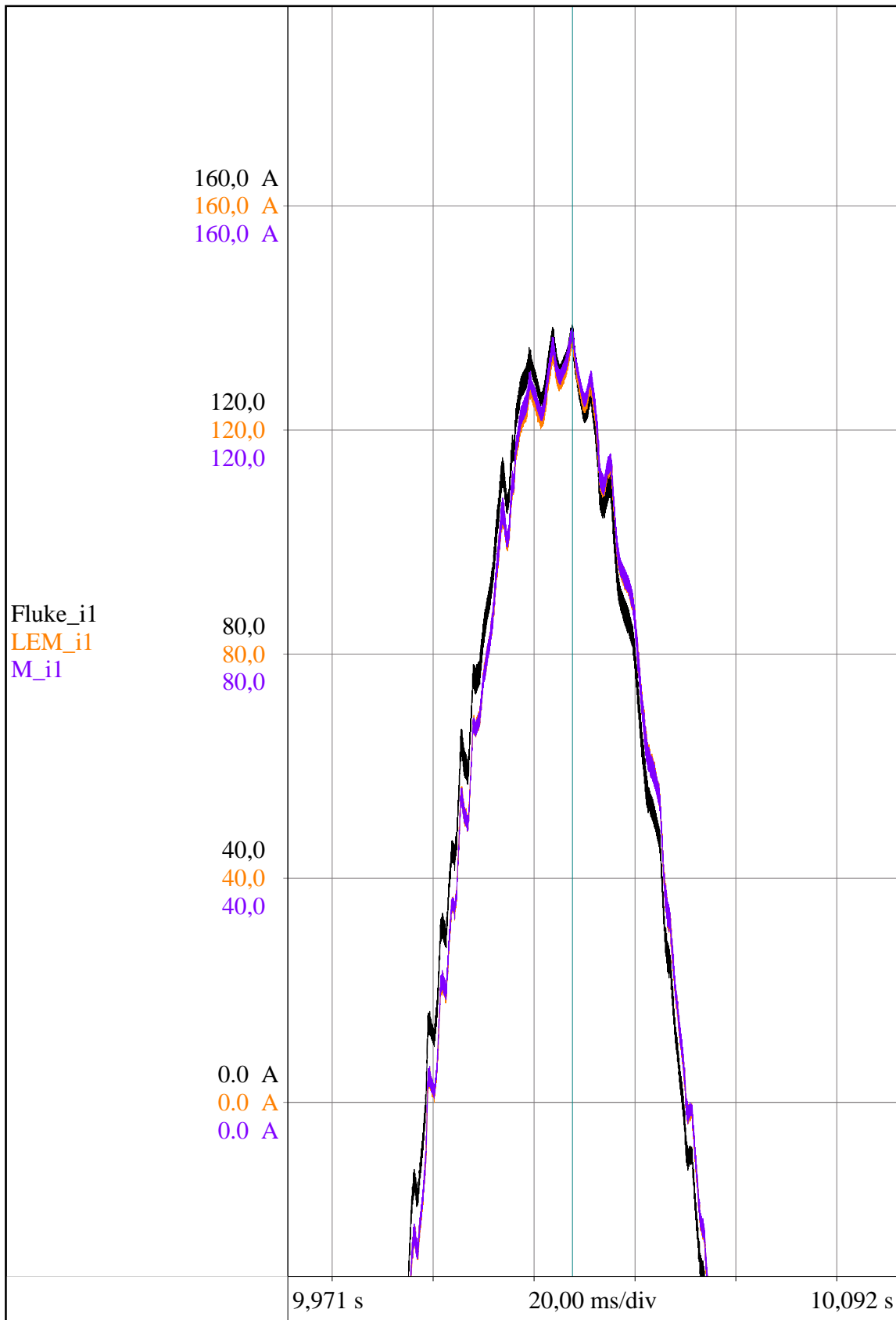
Da det har gått 8,427 sekunder ser man at Fluke-sensoren har oppnådd sitt egnete frekvensområde på 10Hz, da blir det tydelig at forskjellen forsvinner. Dette blir vist i Figur. Selv om det er tydelige forskjeller som vist Figur kan dette utelukkes ettersom OneSubea sine systemer sjeldent opererer i så lave frekvensområder.



Figur 25 Illustrerer hvordan de tre sensorene reagerer under oppstart. Tidsområdet er bergenet fra start på 1.6 sekunder til da Rogowski-spolen henter seg inn igjen etter 4,1 sekunder



Figur 26 Avgrenset område hvor vi kan se at Fluke-sensoren henter seg inn ved det første tilfellet

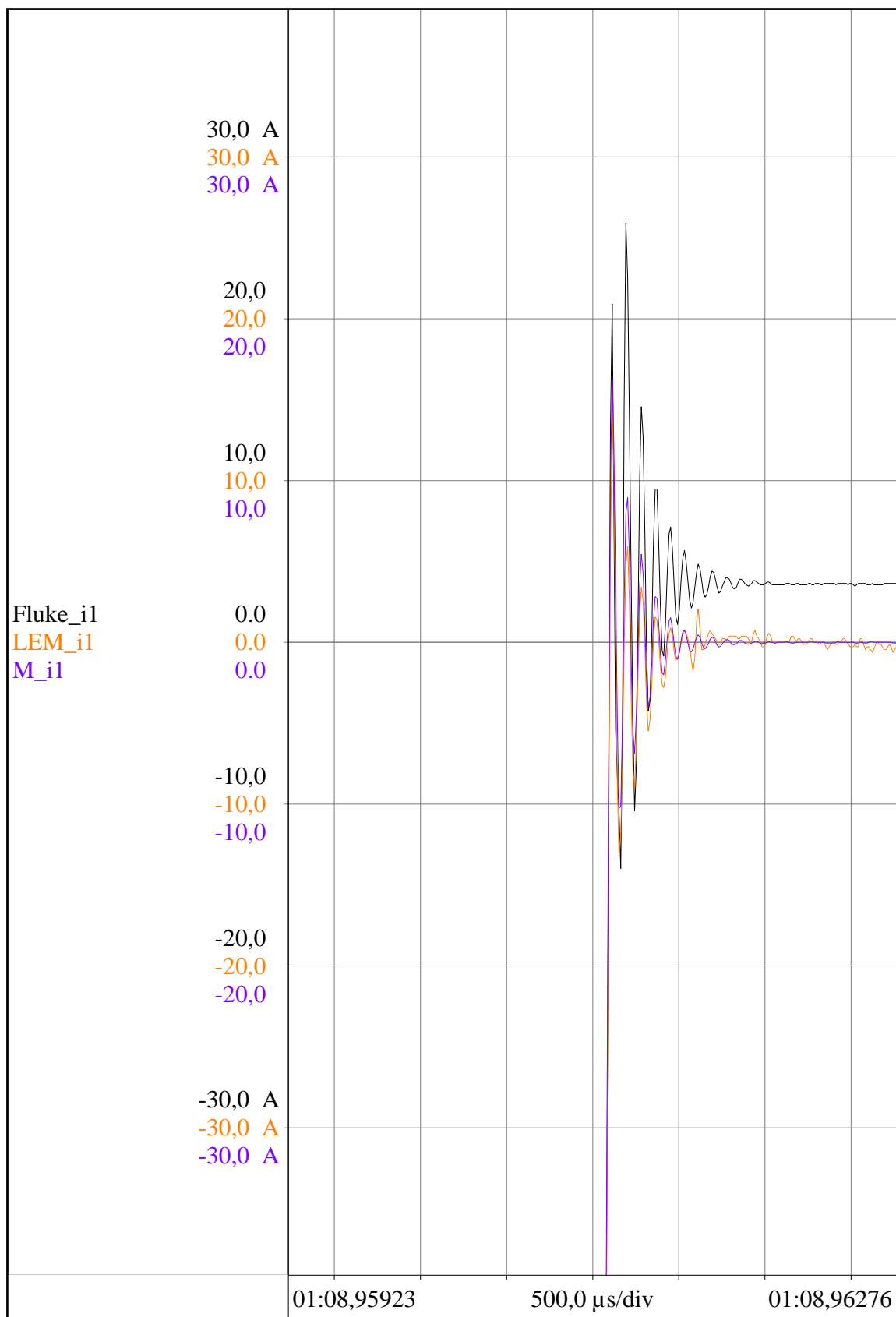


Figur 27 Avgrenset område av når Fluke-sensoren henter seg inn.

5.3 Trip

En trip er en sikkerhetsfunksjon hvor systemet stopper på grunn en uønsket hendelse eller tilstand. Det er blitt gjennomført en trip-test, som er en teknikk som blir benyttet for å teste og verifisere om systemet vil håndtere feil og uønskede tilstander. Hensikten med denne testen er å observere hvordan systemet responderer ved prosess stopp, nødstopp eller høyspentstopp. Under en trip ønsker vi at systemet skal gjennomgå en kontrollert og stabil stans. Ved å gjennomføre slike tester regelmessig, vil man til enhver tid sikre at systemet kontinuerlig leverer ønskede resultat, selv hvis det oppstår feil. Dette opprettholder påliteligheten til systemet [\[40\]](#).

Det er blitt undersøkt en trip, som har blitt utløst på grunn av vibrasjoner. Dette resulterer i at strømforsyningen til motorpumpen kuttes, og prosessen stopper. Ved hjelp av grafene i Figur 28 er det mulig å se at Fluke-sensoren har et stort avvik sammenlignet med de to andre sensorene.



Figur 28 Viser hvordan strømsensorene måler ved en utløst trip

5.4 25 Hz og 20 % belastning

Videre skal dataen som er samlet inn når sensorene påføres ulike frekvenser og belastninger, analyseres. Analysen starter med lav frekvens og belastning og fortsetter opp mot høye frekvenser og belastninger.

| | | | | |
|--------------|-------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|-------|
| Filnavn | JsM4 B70-4600-12-1003 | | Tidspunkt | 07:46 |
| Frekvens | 25Hz | | Start tid | 50 s |
| Belastning | 20 % | | Slutt tid | 110 s |
| Beskrivelse | | | | |
| Sensor type | Fluke i3000 Rogowski-spole | Lem LF 2005-S Hall-effekt | Danisense DM1200ID Fluxgate | Enhet |
| Frekvens | 25,06 | | | Hz |
| Belastning | 24,27 | | | % |
| Amplitude L1 | 155,233 | 154,875 | 154,246 | A |
| Amplitude L2 | 156,502 | 156,555 | 156,796 | A |
| Amplitude L3 | 159,871 | 157,655 | 157,382 | A |
| RMS L1 | 104,173 | 104,189 | 104,289 | A |
| RMS L2 | 105,197 | 105,305 | 105,315 | A |
| RMS L3 | 106,117 | 105,474 | 105,663 | A |
| TDR L1 | 4,069 | 3,897 | 3,823 | % |
| TDR L2 | 3,52 | 3,317 | 3,282 | % |
| TDR L3 | 3,998 | 3,586 | 3,611 | % |
| Error_RMS L1 | 2,906 | 0,697 | 0 | % |
| Error_RMS L2 | 3,181 | 0,527 | 0 | % |
| Error_RMS L3 | 2,86 | 0,588 | 0 | % |
| iMax_ub | 0,975 | 0,762 | 0,762 | % |

Tabell 3 Måleresultat ved 25 Hz og 20% belastning

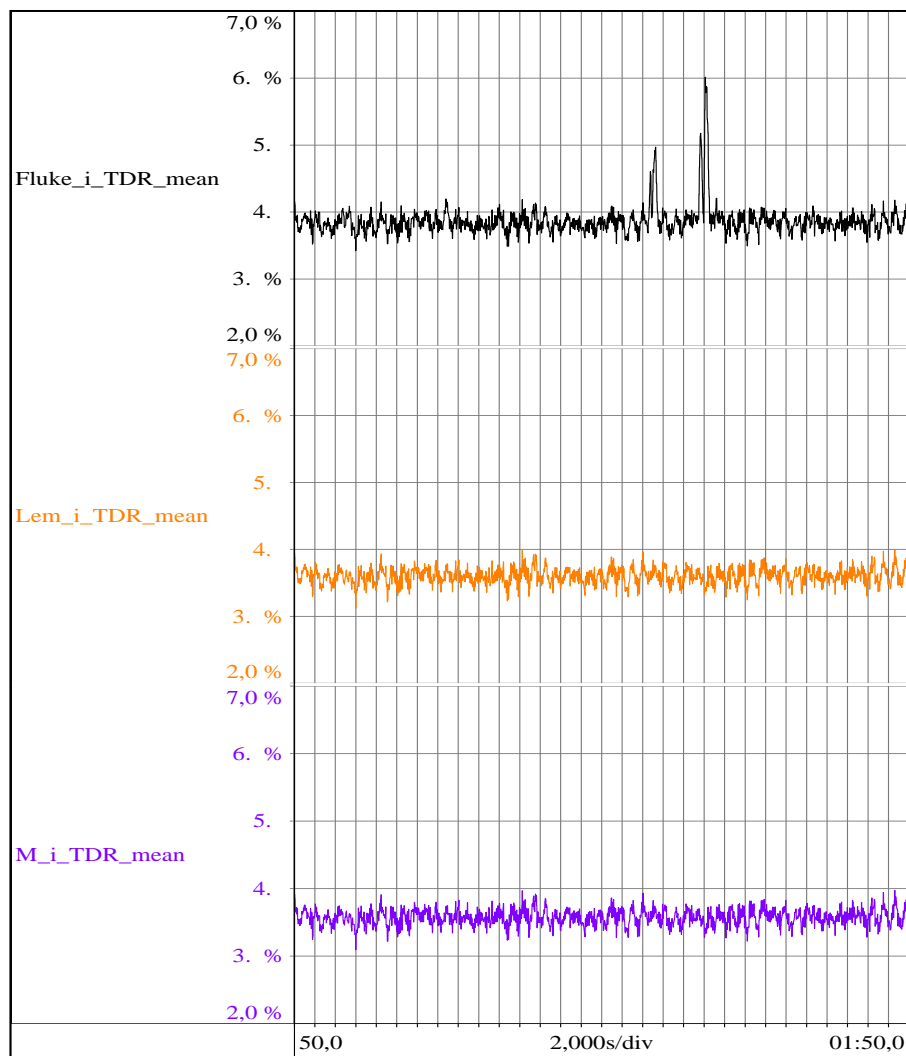
Tabell 3 skal i utgangspunktet ta for seg en frekvens på 25 Hz og en belastning på 20 %. Det som ble oppnådd var en frekvens på 25,06 Hz og en belastning på 24,27 %.

Ved å studere Tabell 3 er det tydelige likhetstrekk mellom målingene til sensorene.

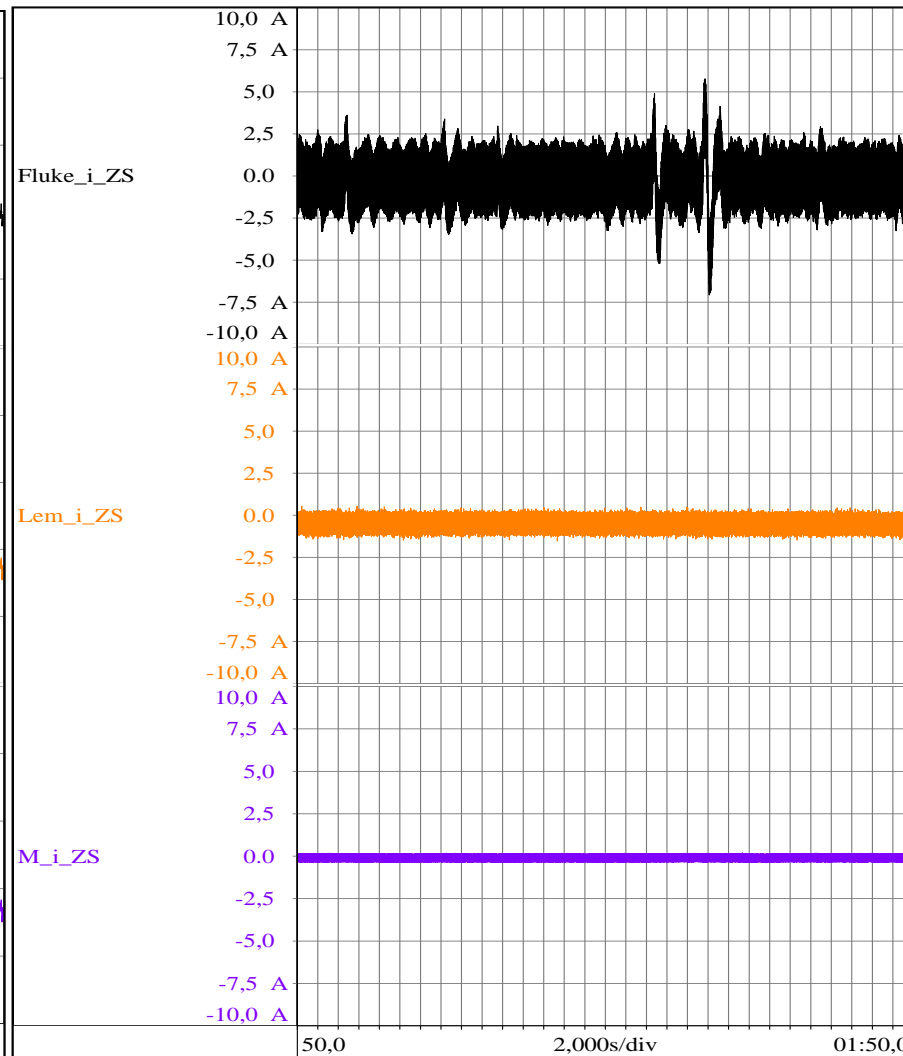
For det første er den målte RMS-verdien svært lik mellom alle sensoren, og Fluke- og Lem-sensoren har mindre enn 1 % i forskjell fra referansesensoren, Danisense-sensoren. For det andre er amplitude-verdiene også i samsvar med hverandre. TDR-verdien på L3 til Fluke-sensoren har et avvik på ca. 10 % i forhold til Danisense-sensoren. Fluke-sensoren skiller seg fra Lem- og Danisense-sensoren når det gjelder RMSE. Ved å studere Figur, kommer det

tydelig fram hvor stor forskjellen er. På L2 er prosentforskjellen i RMSE-verdi på 143,15% mellom Fluke- og Lem-sensoren.

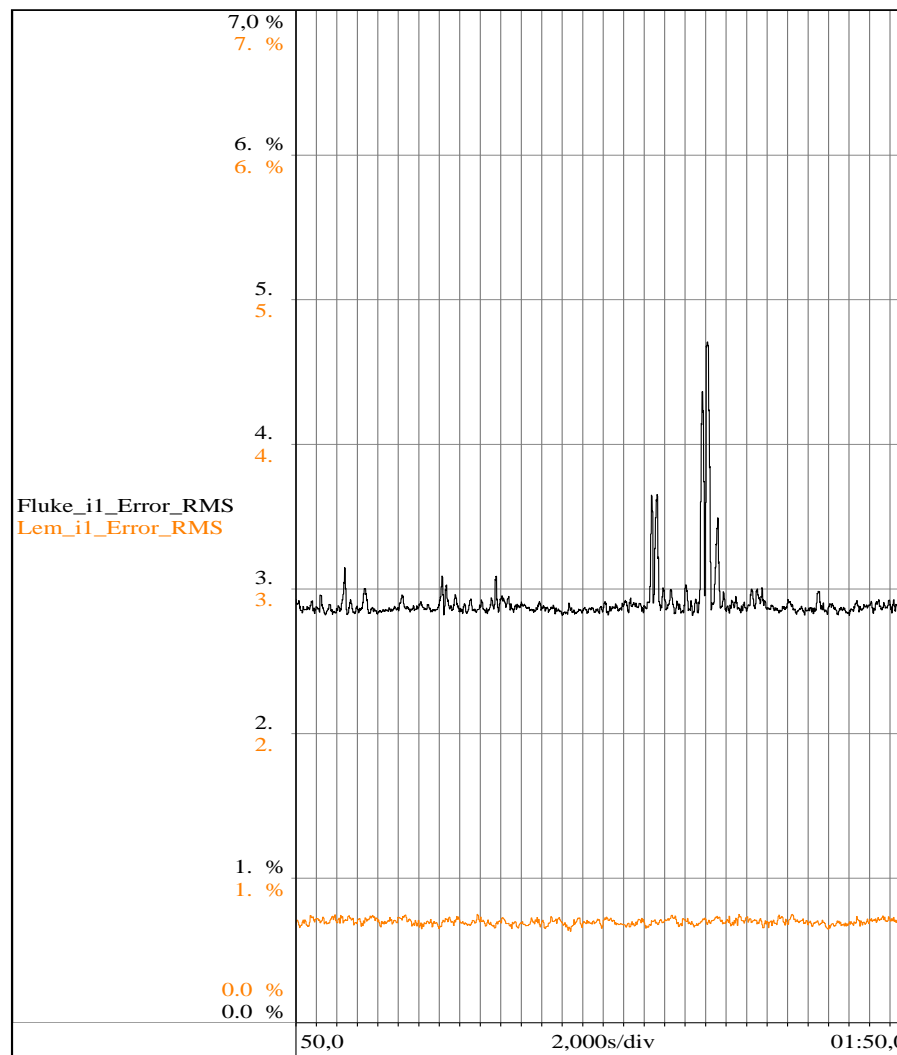
Figur viser til sensorenes nullsekvensstrøm, hvor det er tydelig at Fluke-sensorens målinger avviker fra Lem- og Danisense-sensoren.



Figur 29 TDR verdiene til sensorene ved 25 Hz og 25 % belastning 29



Figur 30 Nullsekvensstrømmen til sensorene ved 25 Hz og 25 % belastning



Figur 31 Error_RMS verdien til Fluke- og Lem-sensoren set på L1 ved 25 Hz og 25 % belastning

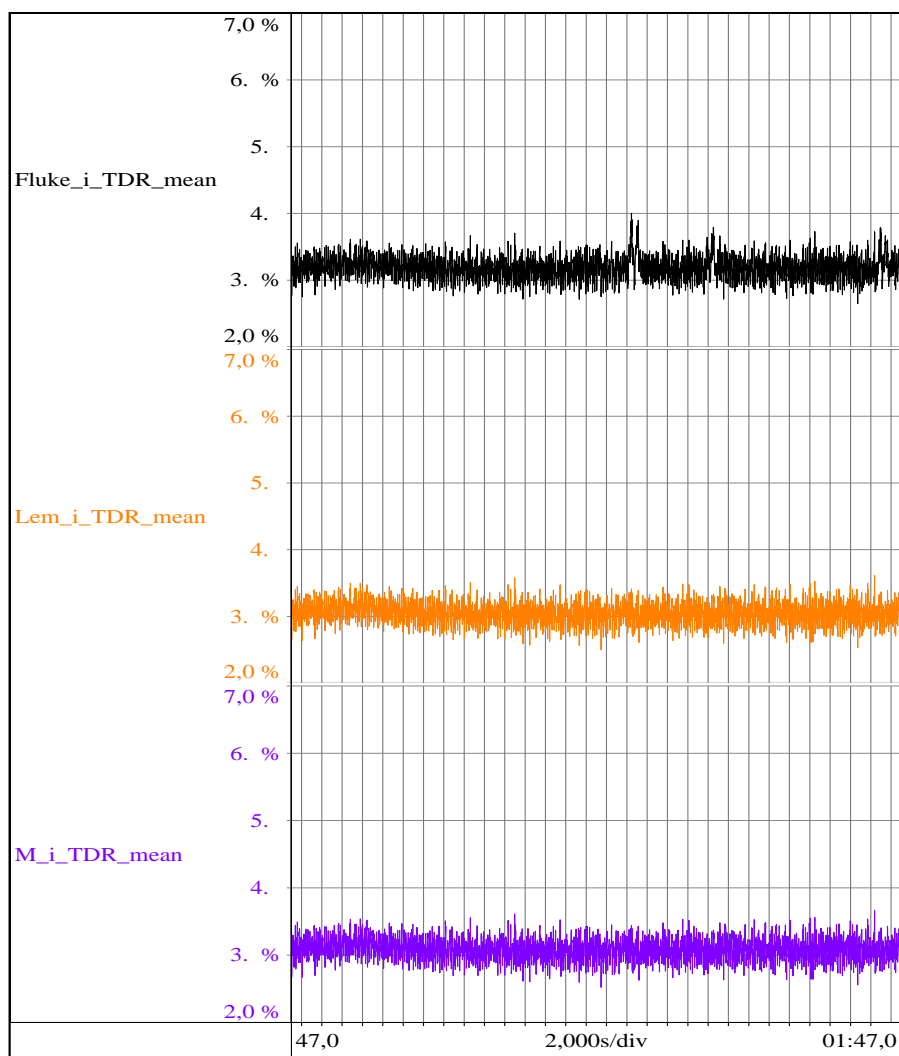
5.5 50 Hz og 50 % belastning

| | | | | |
|--------------|-------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|-------|
| Filnavn | JsM4 B30-3000-12-2004 | | Tidspunkt | 13:01 |
| Frekvens | 50 Hz | | Start tid | 47 s |
| Belastning | 50 % | | Slutt tid | 107 s |
| Beskrivelse | | | | |
| Sensor type | Fluke i3000 Rogowski-spole | Lem LF 2005-S Hall-effekt | Danisense DM1200ID Fluxgate | Enhet |
| Frekvens | 50,24 | | | Hz |
| Belastning | 49,87 | | | % |
| Amplitude L1 | 311,627 | 310,828 | 310,92 | A |
| Amplitude L2 | 313,348 | 313,357 | 313,709 | A |
| Amplitude L3 | 314,78 | 311,502 | 311,623 | A |
| RMS L1 | 214,514 | 214,392 | 214,652 | A |
| RMS L2 | 215,737 | 215,993 | 216,507 | A |
| RMS L3 | 217,25 | 216,431 | 216,666 | A |
| TDR L1 | 3,041 | 2,892 | 2,916 | % |
| TDR L2 | 3,401 | 3,318 | 3,367 | % |
| TDR L3 | 3,122 | 2,942 | 2,98 | % |
| Error_RMS L1 | 1,494 | 0,345 | 0 | % |
| Error_RMS L2 | 1,638 | 0,375 | 0 | % |
| Error_RMS L3 | 1,347 | 0,358 | 0 | % |
| iMax_ub | 0,705 | 0,574 | 0,6 | % |

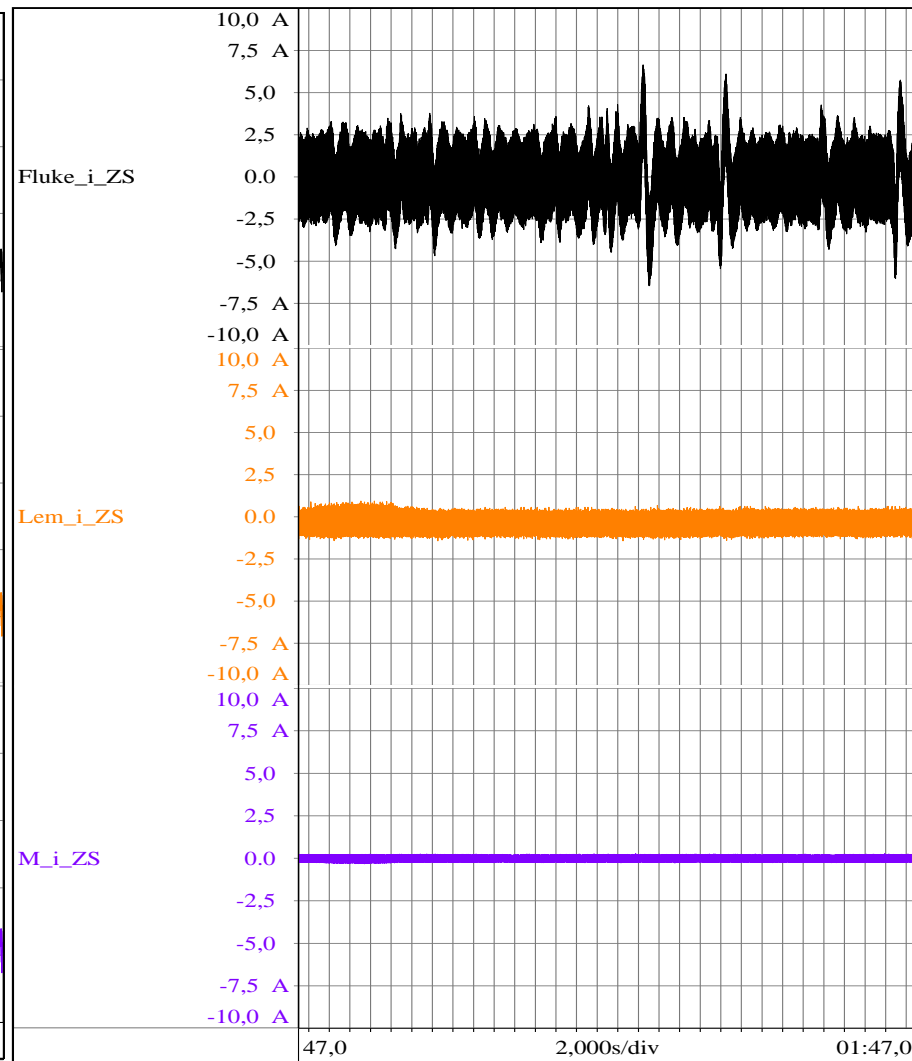
Tabell 4 Måleresultat ved 50 Hz og 50% belastning

Tabell 4 skal i utgangspunktet ta for seg en frekvens på 50 Hz og en belastning på 50 %. Det som ble oppnådd var en frekvens på 50,24 Hz og en belastning på 49,87 %.

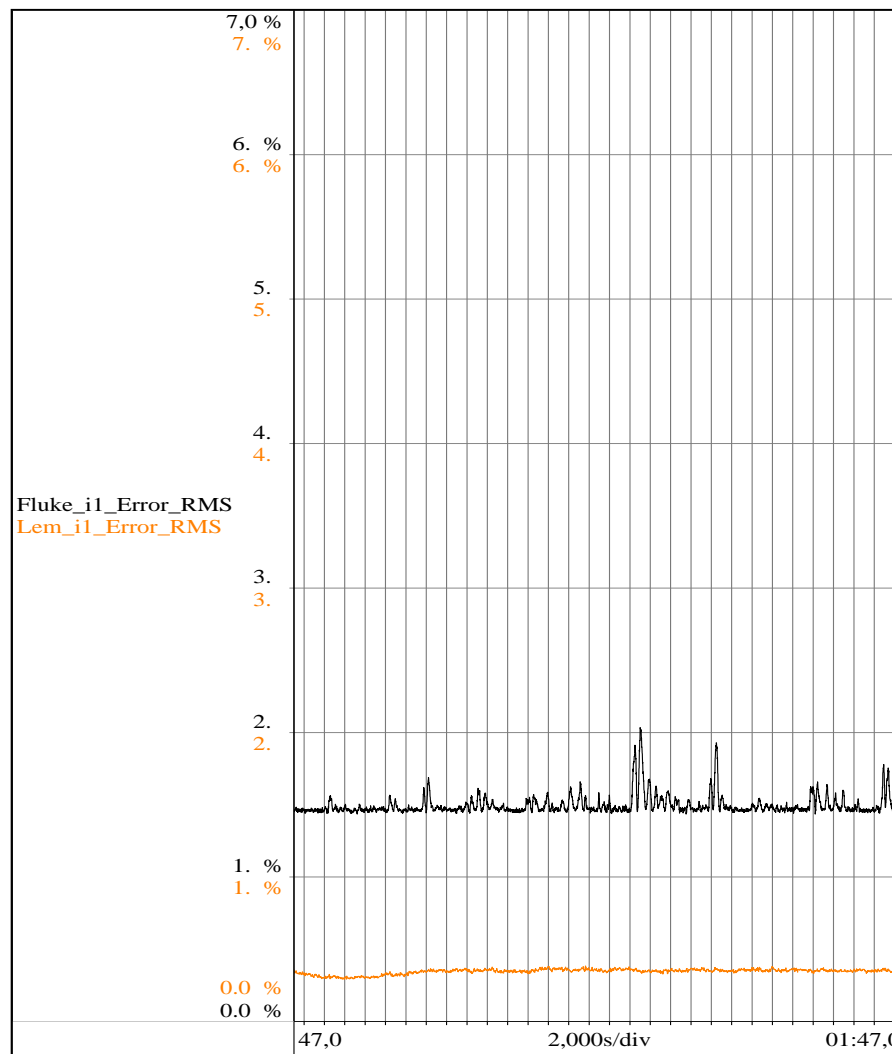
Det som er av betydning i Tabell 4 er at RMSE-verdien til Fluke- og Lem-sensoren har blitt halvert ved å doble frekvensen til 50Hz. Det kan også bli observert i Figur synker med 1% på alle sensorene i L1. Som vist i Figur 33 påvirkes ikke nullsekvensstrømmen av at frekvensen doubles.



Figur 32 TDR verdiene til sensorene ved 50 Hz og 50% belastning



Figur 33 Nullsekvensstrømmen til sensorene ved 50 Hz og 50% belastning



Figur 34 Error_RMS verdien til Fluke- og Lem-sensoren set på L1 ved 50 Hz og 50 % belastning

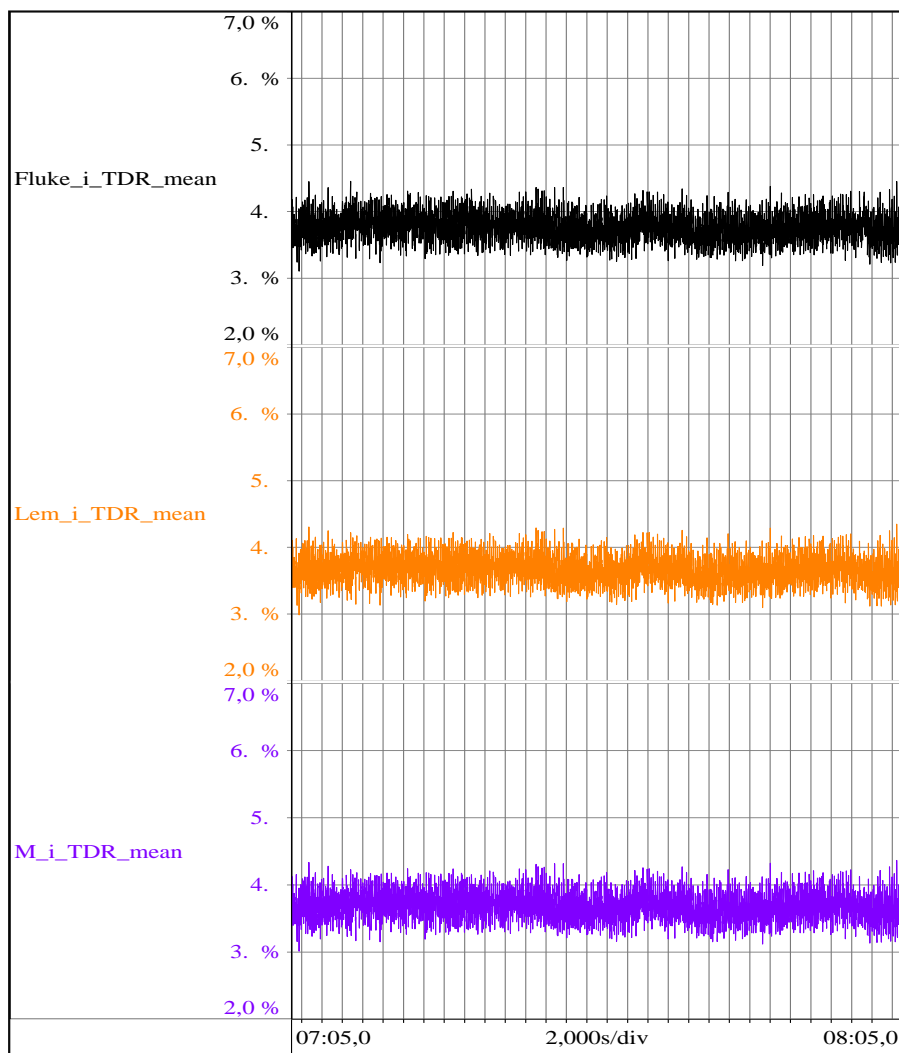
5.6 Max Hz og 50 % belastning

| | | | | |
|--------------|-------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|-------|
| Filnavn | JsM4 B70-4600-12-1001 | | Tidspunkt | 16:05 |
| Frekvens | 75 Hz | | Start tid | 425 s |
| Belastning | 50 % | | Slutt tid | 485 s |
| Beskrivelse | | | | |
| Sensor type | Fluke i3000 Rogowski-spole | Lem LF 2005-S Hall-effekt | Danisense DM1200ID Fluxgate | Enhet |
| Frekvens | 76,93 | | | Hz |
| Belastning | 53,16 | | | % |
| Amplitude L1 | 300,859 | 301,103 | 301,13 | A |
| Amplitude L2 | 303,269 | 303,889 | 304,271 | A |
| Amplitude L3 | 304,84 | 303,267 | 303,217 | A |
| RMS L1 | 206,968 | 207,378 | 207,617 | A |
| RMS L2 | 208,776 | 209,571 | 210,021 | A |
| RMS L3 | 209,952 | 209,682 | 209,864 | A |
| TDR L1 | 3,801 | 3,717 | 3,713 | % |
| TDR L2 | 3,651 | 3,592 | 3,619 | % |
| TDR L3 | 3,85 | 3,704 | 3,735 | % |
| Error_RMS L1 | 1,005 | 0,373 | 0 | % |
| Error_RMS L2 | 1,27 | 0,397 | 0 | % |
| Error_RMS L3 | 0,874 | 0,371 | 0 | % |
| iMax_ub | 0,8 | 0,72 | 0,743 | % |

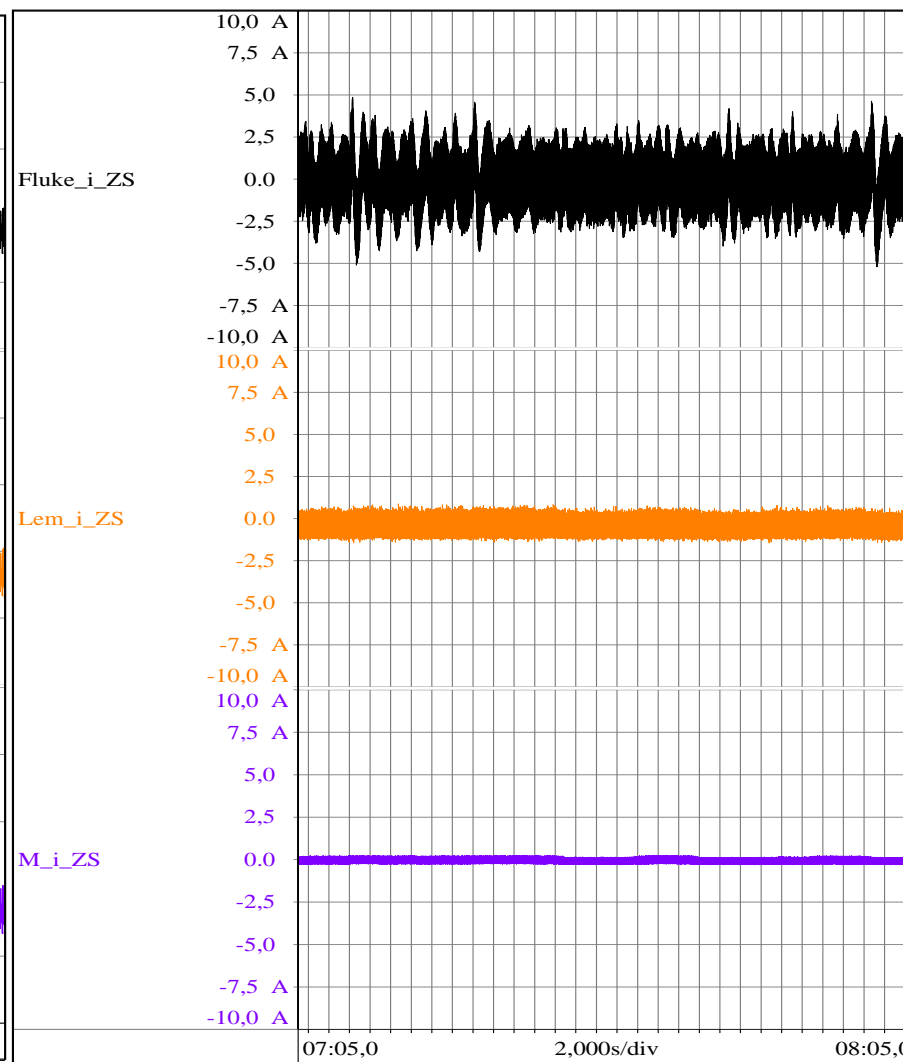
Tabell 5 Måleresultat ved 75 Hz og 50% belastning

Tabell 5 skal i utgangspunktet ta for seg en frekvens på 75 Hz og en belastning på 50 %. Det som ble oppnådd var en frekvens på 76,93 Hz og en belastning på 53,16 %. Dette er tilfellet hvor målingene til de tre sensoren er i størst grad lik.. Som vist i Tabell 5 er avvikene til Fluke- og Lem-sensoren minimale sammenlignet med Danisense-sensoren. Sett på L1, så er det kun en TDR prosentforskjell på 2.34% mellom Fluke- og Danisense-sensoren.

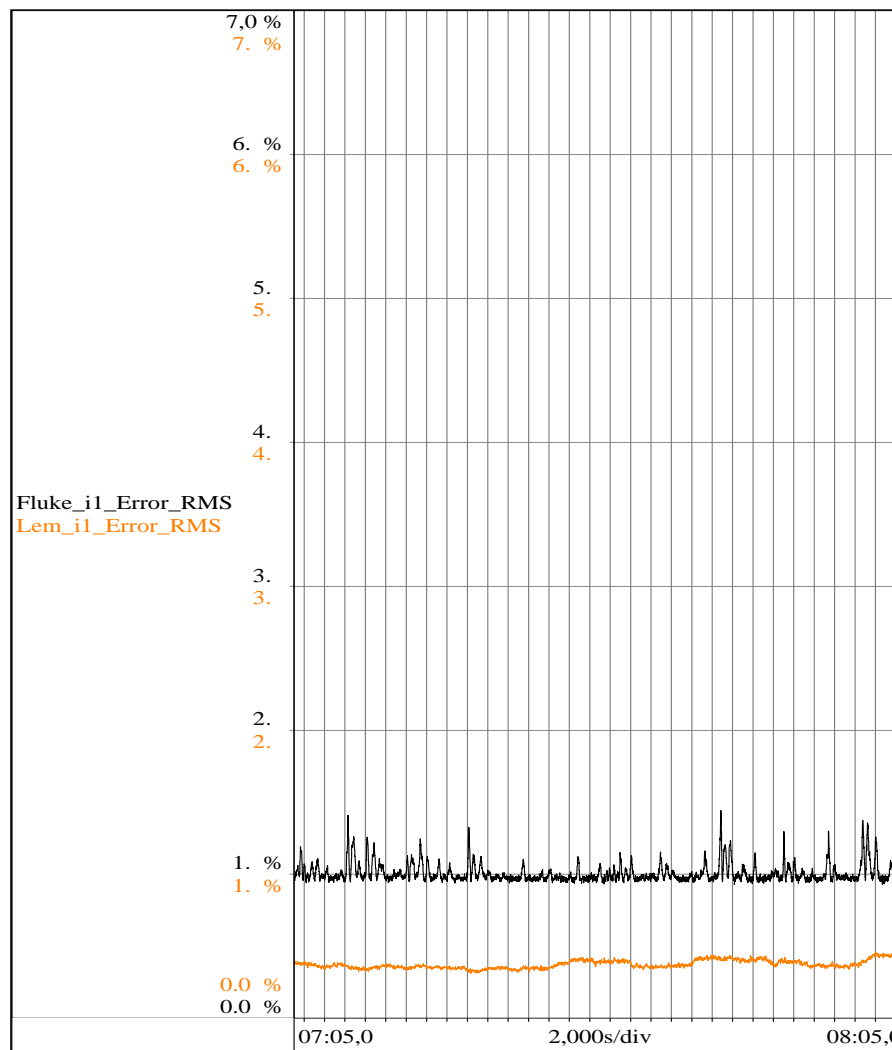
I Figur 36 er det heller ikke observert noen endring i nullsekvensstrømmen til sensorene ved enda en økning av frekvens. Det bemerkes at RMSE-verdien for Fluke-sensoren er blitt ytterligere redusert. Dette er vist i Figur 37



Figur 35 TDR verdiene til sensorene ved 75 Hz og 50 % belastning



Figur 36 Nullsekvensstrømmen til sensorene ved 75 Hz og 50 % belastning



Figur 37 Error_RMS verdien til Fluke- og Lem-sensoren set på L1 ved 75 Hz og 50 % belastning

5.7 Max Hz og 85 % belastning

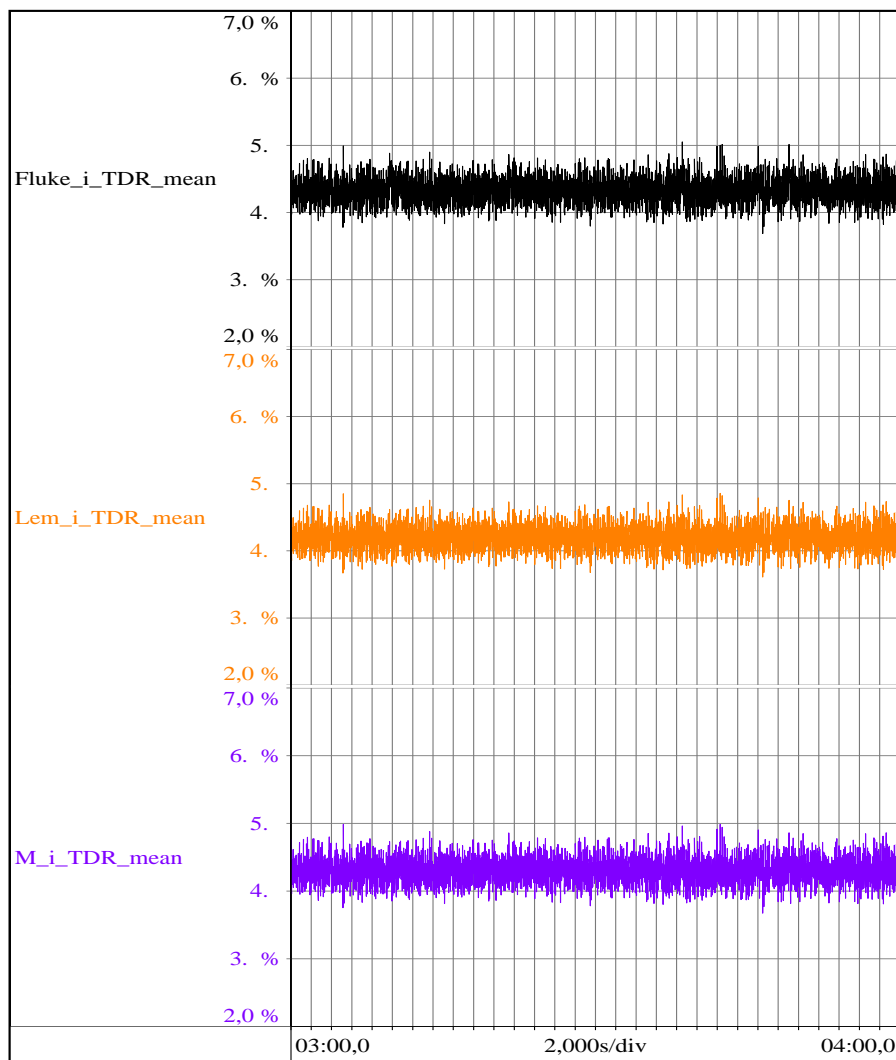
| | | | | |
|--------------|-------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|-------|
| Filnavn | JsM4 B60-4600-12-4001 | | Tidspunkt | 15:59 |
| Frekvens | 75 Hz | | Start tid | 180 s |
| Belastning | 85 % | | Slutt tid | 240 s |
| Beskrivelse | | | | |
| Sensor type | Fluke i3000 Rogowski-spole | Lem LF 2005-S Hall-effekt | Danisense DM1200ID Fluxgate | Enhet |
| Frekvens | 77,13 | | | Hz |
| Belastning | 85,66 | | | % |
| Amplitude L1 | 537,503 | 535,439 | 536,721 | A |
| Amplitude L2 | 541,825 | 542,342 | 542,092 | A |
| Amplitude L3 | 540,504 | 531,708 | 537,004 | A |
| RMS L1 | 367,842 | 367,868 | 368,359 | A |
| RMS L2 | 371,399 | 372,557 | 372,416 | A |
| RMS L3 | 372,991 | 368,934 | 371,935 | A |
| TDR L1 | 4,292 | 4,163 | 4,258 | % |
| TDR L2 | 4,395 | 4,326 | 4,384 | % |
| TDR L3 | 4,294 | 4,091 | 4,255 | % |
| Error_RMS L1 | 0,992 | 0,377 | 0 | % |
| Error_RMS L2 | 1,041 | 0,237 | 0 | % |
| Error_RMS L3 | 0,786 | 1,296 | 0 | % |
| iMax_ub | 0,783 | 0,75 | 0,686 | % |

Tabell 6 Måleresultat ved 75 Hz og 85% belastning

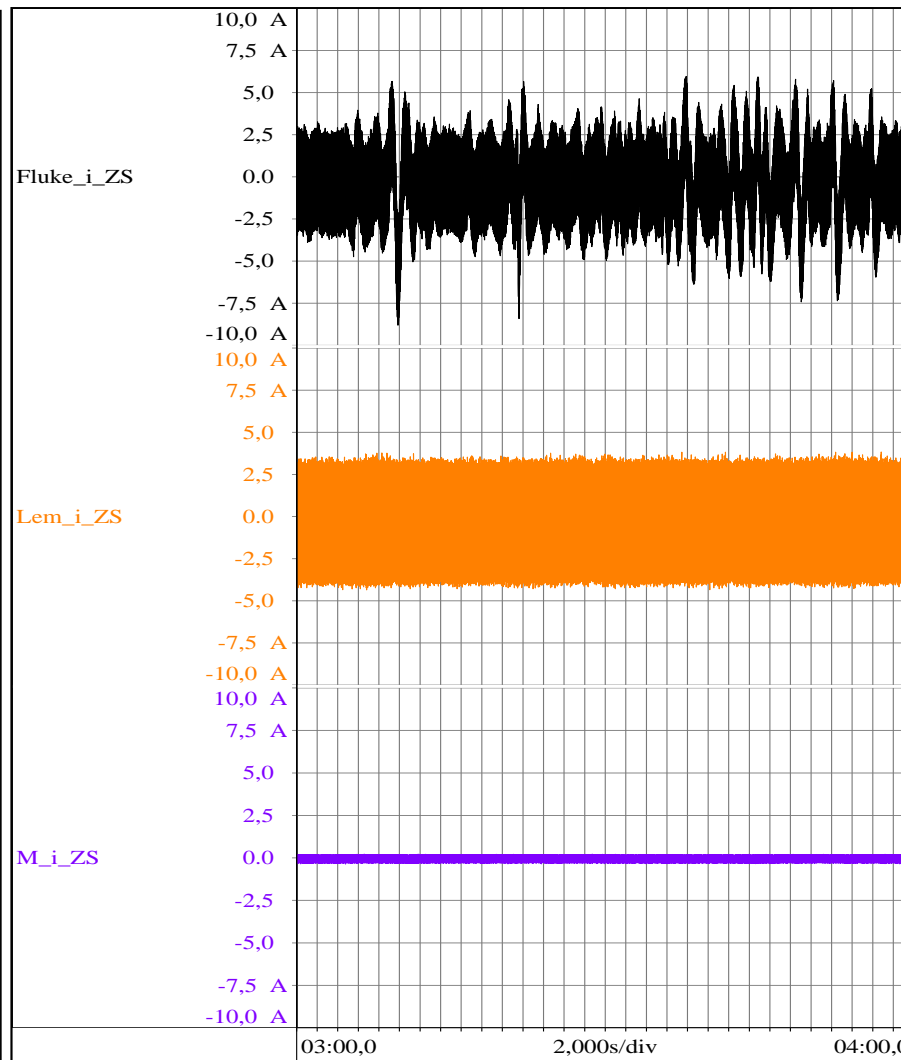
Tabell 6 skal i utgangspunktet ta for seg en frekvens på 75 Hz og en belastning på 85 %. Det som ble oppnådd var en frekvens på 77,13 Hz og en belastning på 85,66 %.

Grunnen for det er blitt valgt å se på denne er fordi at det er ønskelig å se på nøyaktig hvor Lem-sensoren begynner å yte dårligere. I Tabell 6 kan det bli observert at Lem-sensoren presterer likt ved de fleste tilfeller, men hvor målingene på L3 går fra å være lik de andre fasene. Til å ha et avvik som gjentar seg på alle måleparametere tilknyttet L3.

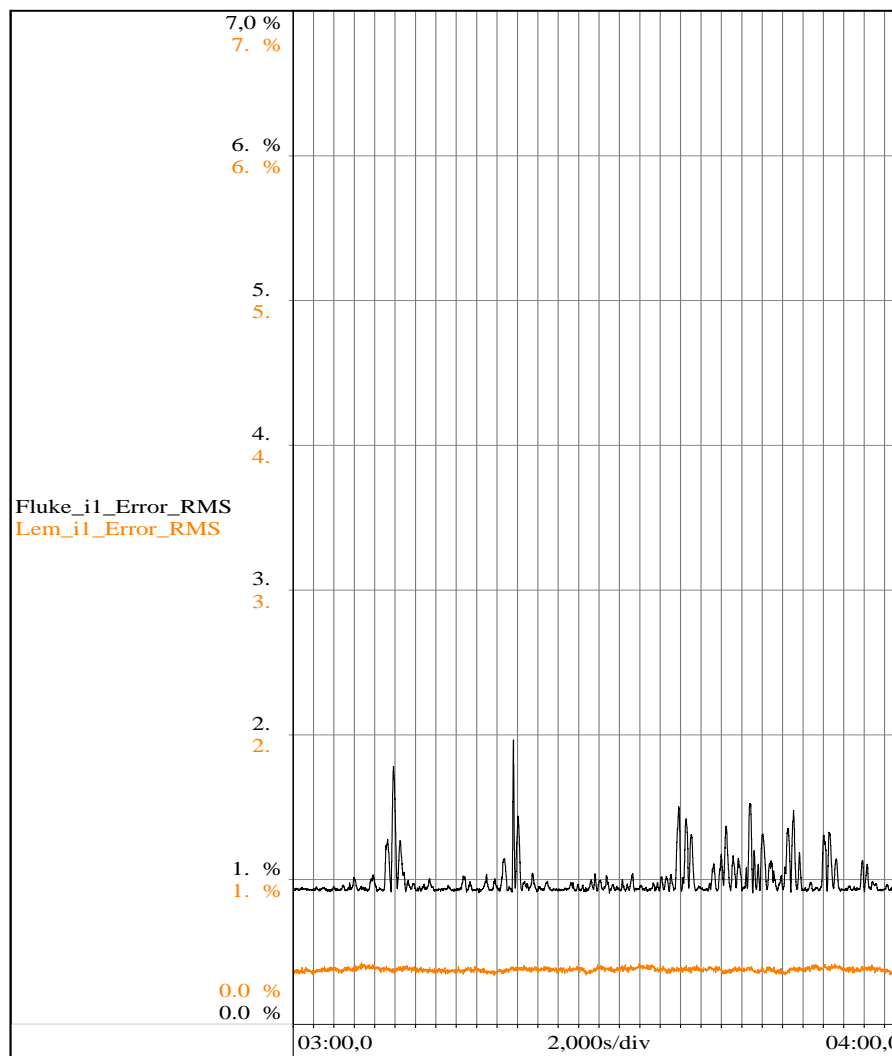
I Figur 39 vil resultatet av at Lem-sensoren på L3 begynner å avvike vises. Dette gjør blant annet at nullsekvensstrømmen blir negativt påvirket. Selv om RMSE verdien til Lem-sensoren på L3 blir påvirket, kan det bli observert i Figur 40 at L1 ikke har noen endring.



Figur 38 TDR verdiene til sensorene ved 75 Hz og 85 % belastning



Figur 39 Nullsekvensstrømmen til sensorene ved 75 Hz og 85 % belastning



Figur 40 Error_RMS verdien til Fluke- og Lem-sensoren set på L1 ved 75 Hz og 85 % belastning

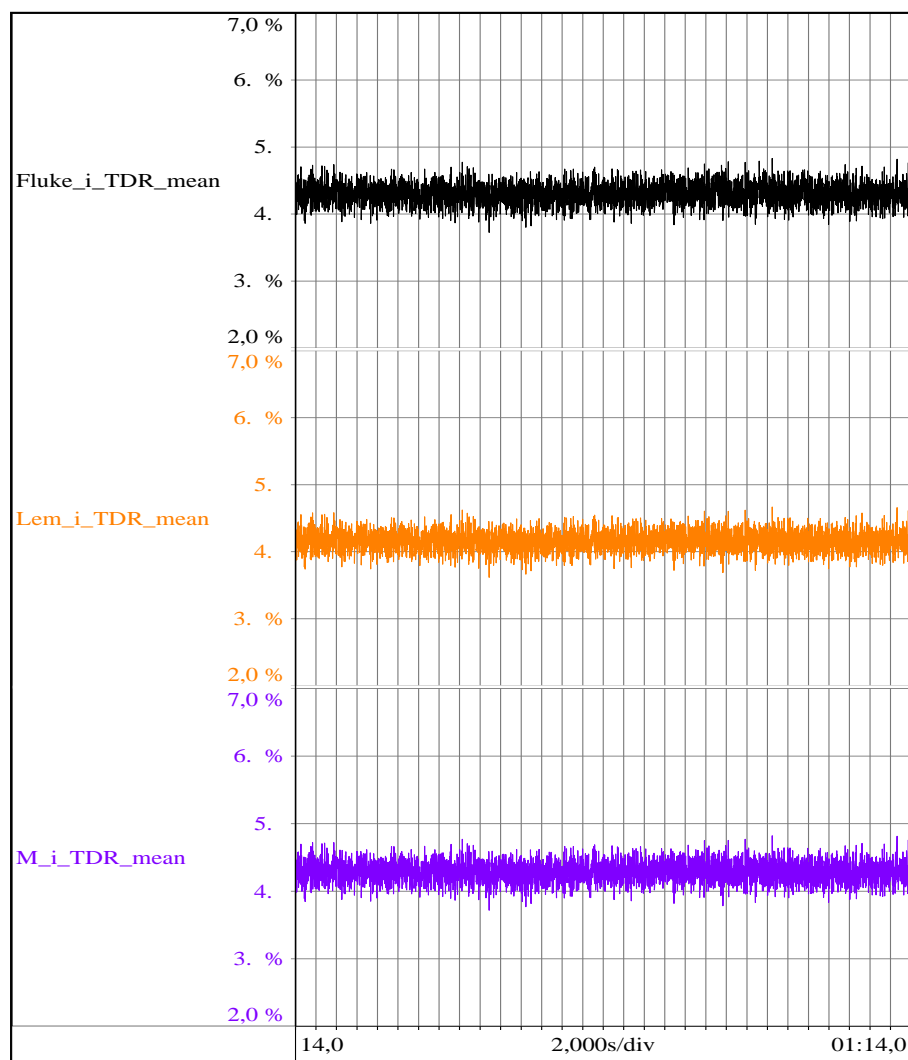
5.8 Max Hz og 100 % belastning

| | | | | |
|--------------|-------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|-------|
| Filnavn | JsM4 B30-4600-12-4001 | | Tidspunkt | 09:55 |
| Frekvens | 75 Hz | | Start tid | 14 s |
| Belastning | 100 % | | Slutt tid | 74 s |
| Beskrivelse | | | | |
| Sensor type | Fluke i3000 Rogowski-spole | Lem LF 2005-S Hall-effekt | Danisense DM1200ID Fluxgate | Enhet |
| Frekvens | 77,22 | | | Hz |
| Belastning | 100,96 | | | % |
| Amplitude L1 | 633,869 | 624,99 | 632,427 | A |
| Amplitude L2 | 638,426 | 636,801 | 637,965 | A |
| Amplitude L3 | 638,527 | 621,132 | 634,143 | A |
| RMS L1 | 434,25 | 431,167 | 434,262 | A |
| RMS L2 | 438,15 | 437,797 | 438,993 | A |
| RMS L3 | 439,807 | 431,485 | 438,16 | A |
| TDR L1 | 4,315 | 4,17 | 4,29 | % |
| TDR L2 | 4,276 | 4,184 | 4,277 | % |
| TDR L3 | 4,318 | 4,134 | 4,296 | % |
| Error_RMS L1 | 0,939 | 0,937 | 0 | % |
| Error_RMS L2 | 0,986 | 0,458 | 0 | % |
| Error_RMS L3 | 0,79 | 2,037 | 0 | % |
| iMax_ub | 0,721 | 0,995 | 0,658 | % |

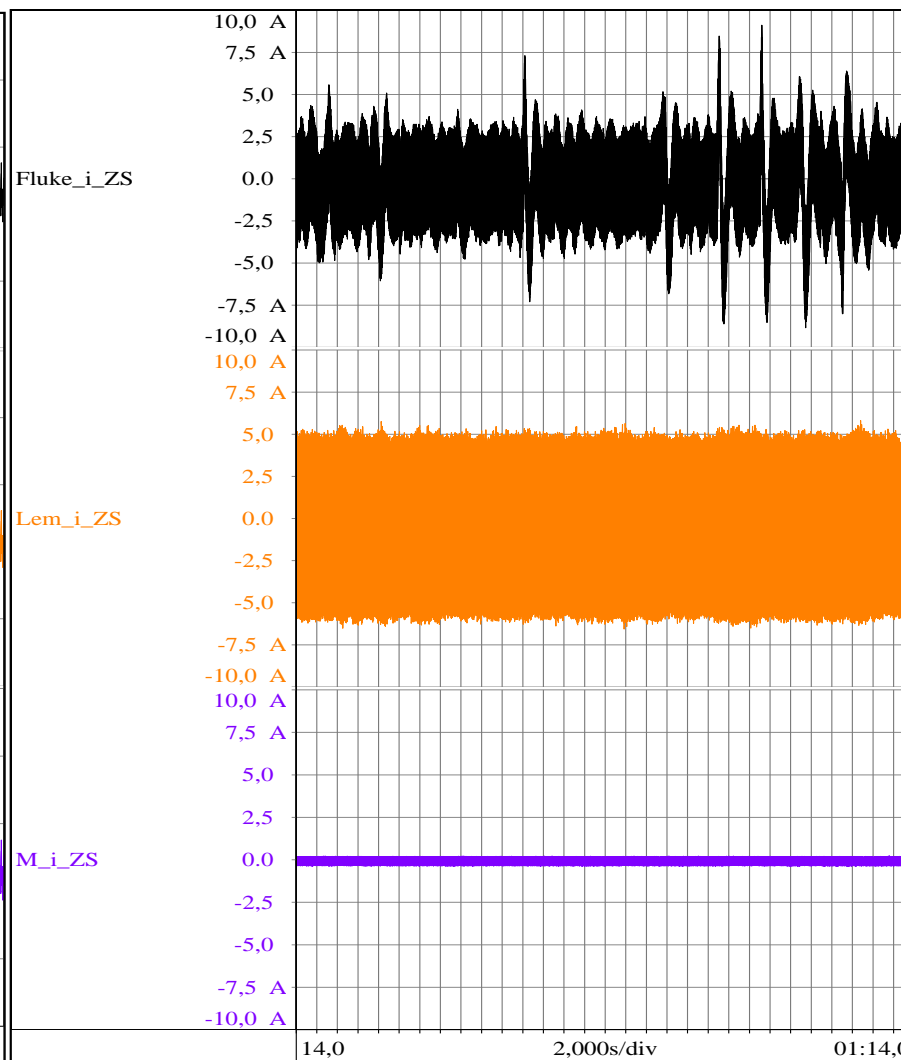
Tabell 7 Måleresultat ved 75 Hz og 100% belastning

I Tabell 7 skal i utgangspunktet ta for seg en frekvens på 75 Hz og en belastning på 100 %.

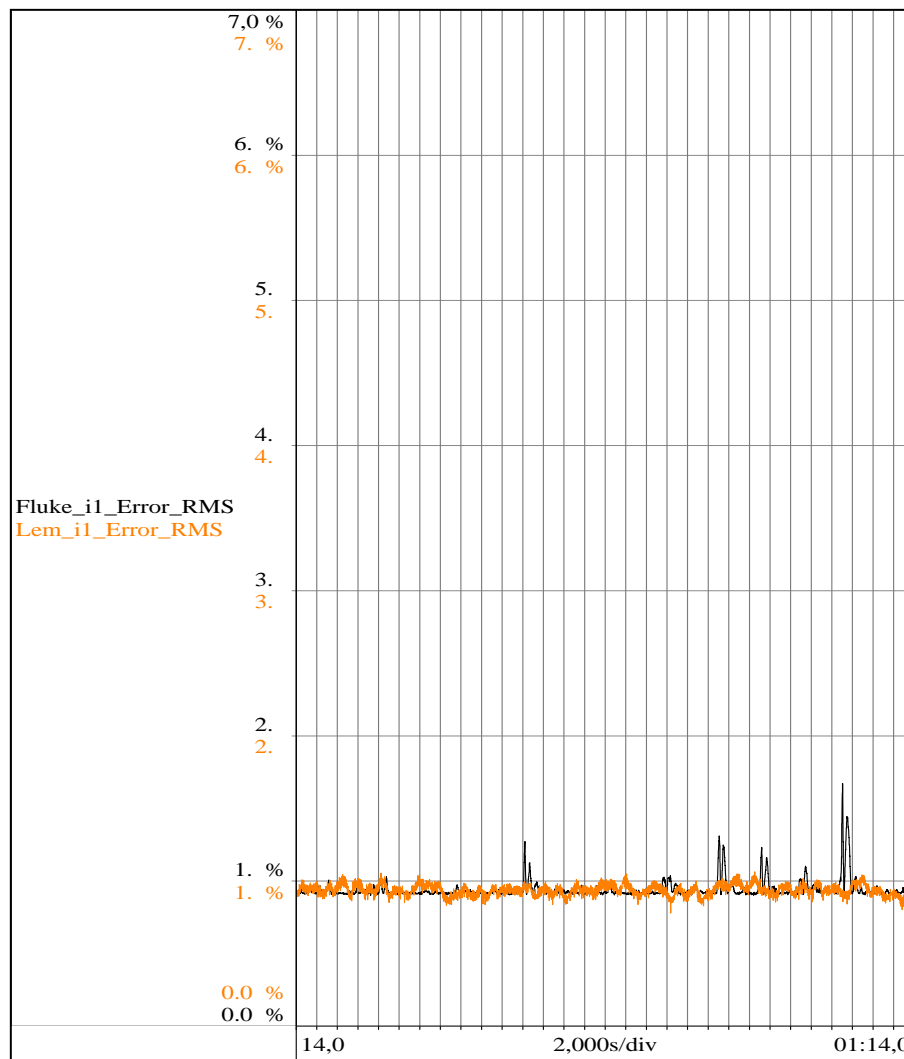
Det som ble oppnådd var en frekvens på 77,22 Hz og en belastning på 100,96%. Dette er det første tilfellet hvor Fluke-sensoren presterer bedre i forhold til måleparametere i tabellen. RMSE verdien til Lem-sensoren på L3 har doblet seg med en økning av 15 % belastning tidligere. I Figur 42 kan det bli observert hvordan nullsekvensstrømmen til sensoren blir målt. Her er det tydelig at Lem-sensoren operer dårligere ved en høy belastning enn Fluke- og Danisense-sensoren. Hvor Danisense-sensoren ikke har hatt noen form for negativ påvirkning ved økning av både frekvens og belastning. Som vist i Figur 43 begynner RMSE verdien til Lem-sensoren på L1 å avvike. Dette er første tilfellet hvor RMSE verdiene til Fluke- og Lem-sensorene er like.



Figur 41 TDR verdiene til sensorene ved 75 Hz og 100 % belastning



Figur 42 Nullsekvensstrømmen til sensorene ved 75 Hz og 100 % belastning



Figur 43 Error_RMS verdien til Fluke- og Lem-sensoren set på L1 ved 75 Hz og 100 % belastning

5.9 Sammenligning av resultat

Ved å sammenligne alle målingene, så er det bemerkelsesverdig å se hvordan den målte nullsekvensstrømmen til Lem sensoren endrer seg. Dette er noe OneSubsea har erfart tidligere i tilfeller hvor det forekommer høy frekvens og belastning [13].

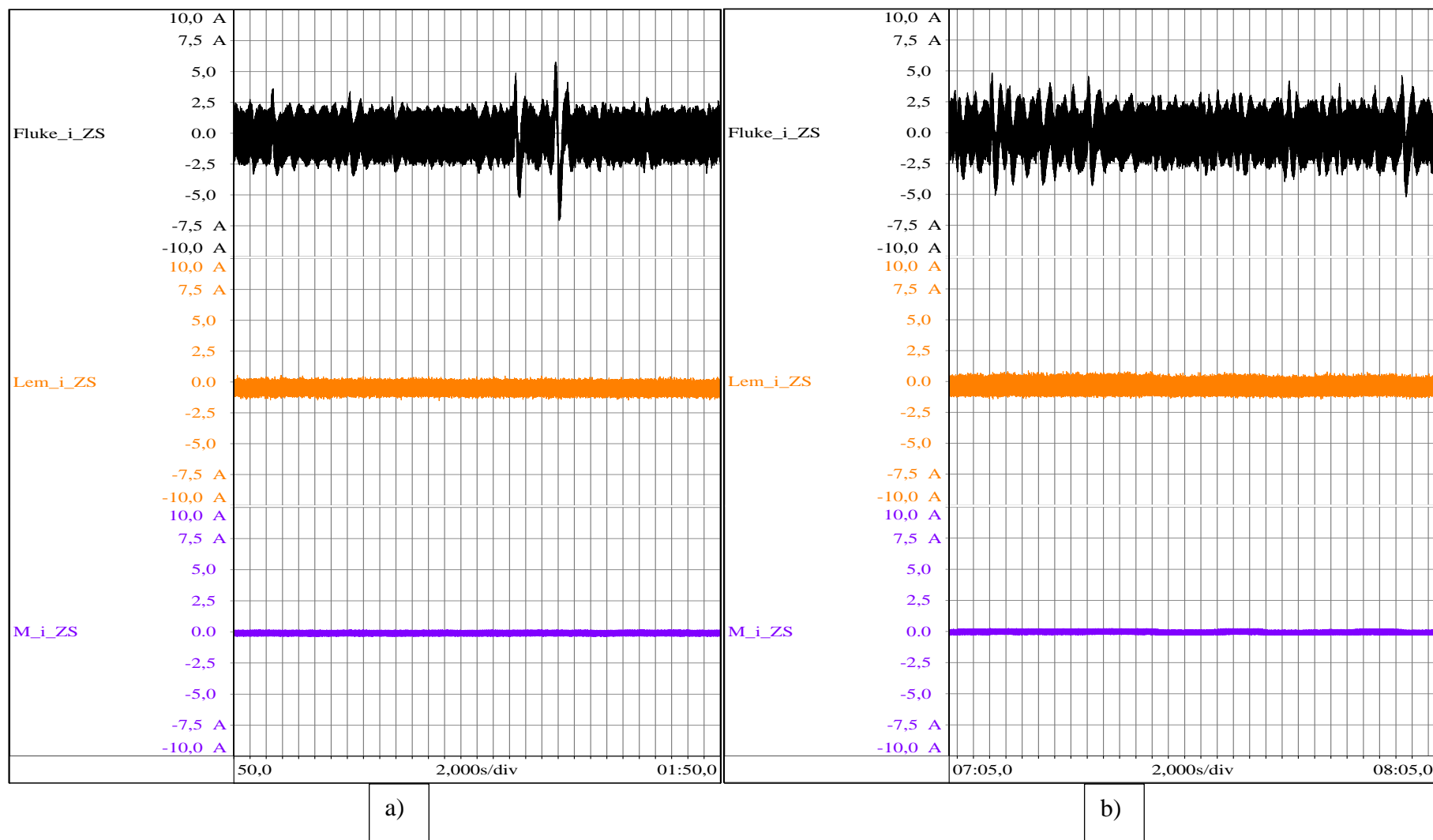
Figur 44 viser en sammenligning mellom nullsekvensstrømmene til de tre sensorene ved lav frekvens og belastning og høy frekvens og 50% belastning. Det kan bli observert i b) at nullsekvensstrømmen til alle sensorene har ingen påvirkning da det blir endret til høy frekvensen og 50% belastning.

Figur 45 viser resultatet av hva som skjer da belastningen øker fra 50 % til 85 %.

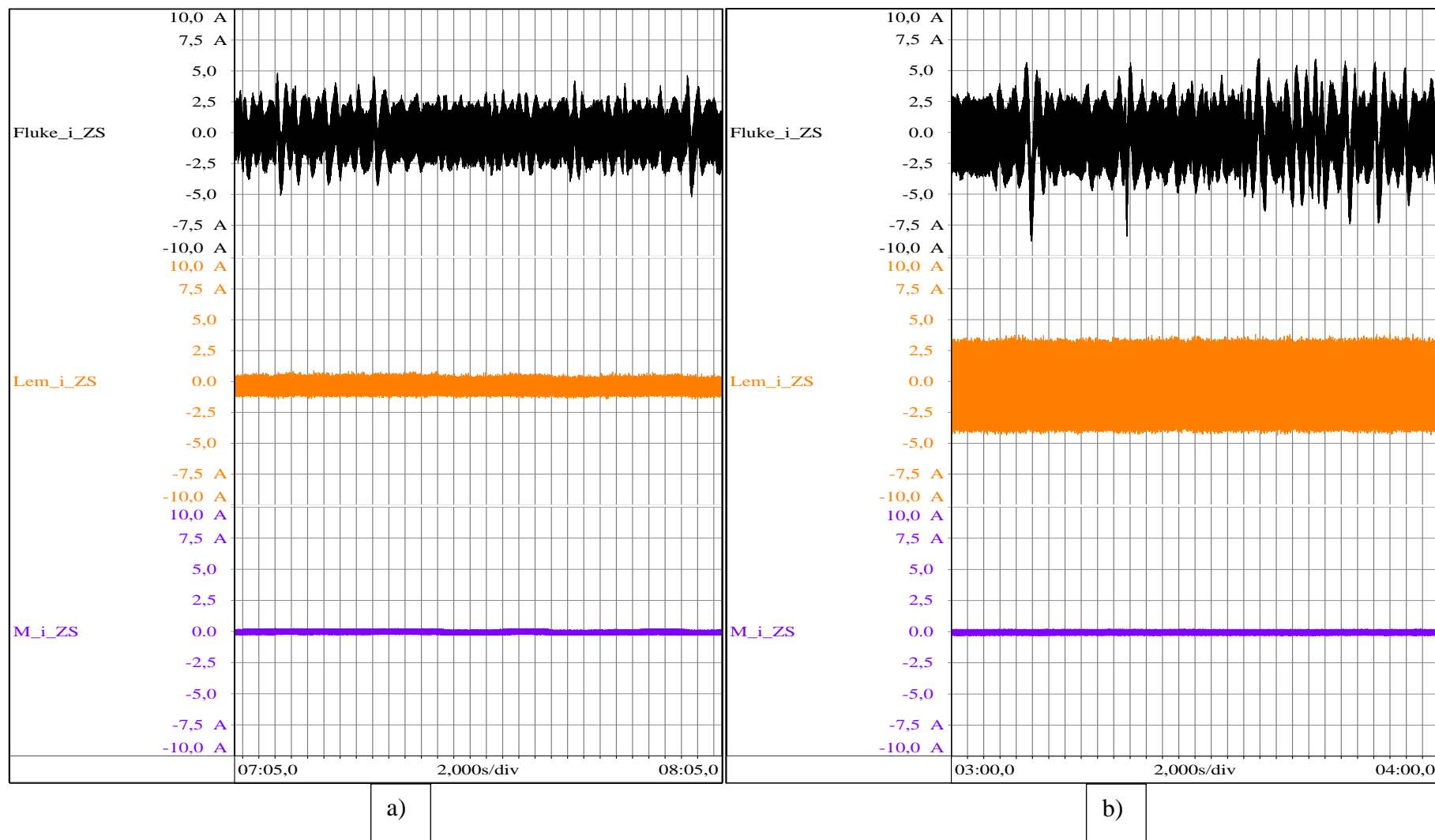
Det er tydelig at Lem-sensorens målinger blir påvirket ved høy belastning, ettersom nullsekvensstrømmen går fra å være ca. 500mA til å være over 2,5 A Dette tilsvarer en økning på 400 % i nullsekvensstrømmen til Lem-sensoren. I den samme figuren vises det hvor lite påvirkning belastningsøkningen hadde både på Fluke- og Danisense-sensoren. Ved å nærmere studere grafen til Danisense-sensoren, er det tydelig at nullsekvensstrømmen er tilnærmet lik null ved begge tilfeller.

Figur 46 viser at maks belastning har en stor påvirkning på Lem-Sensoren.

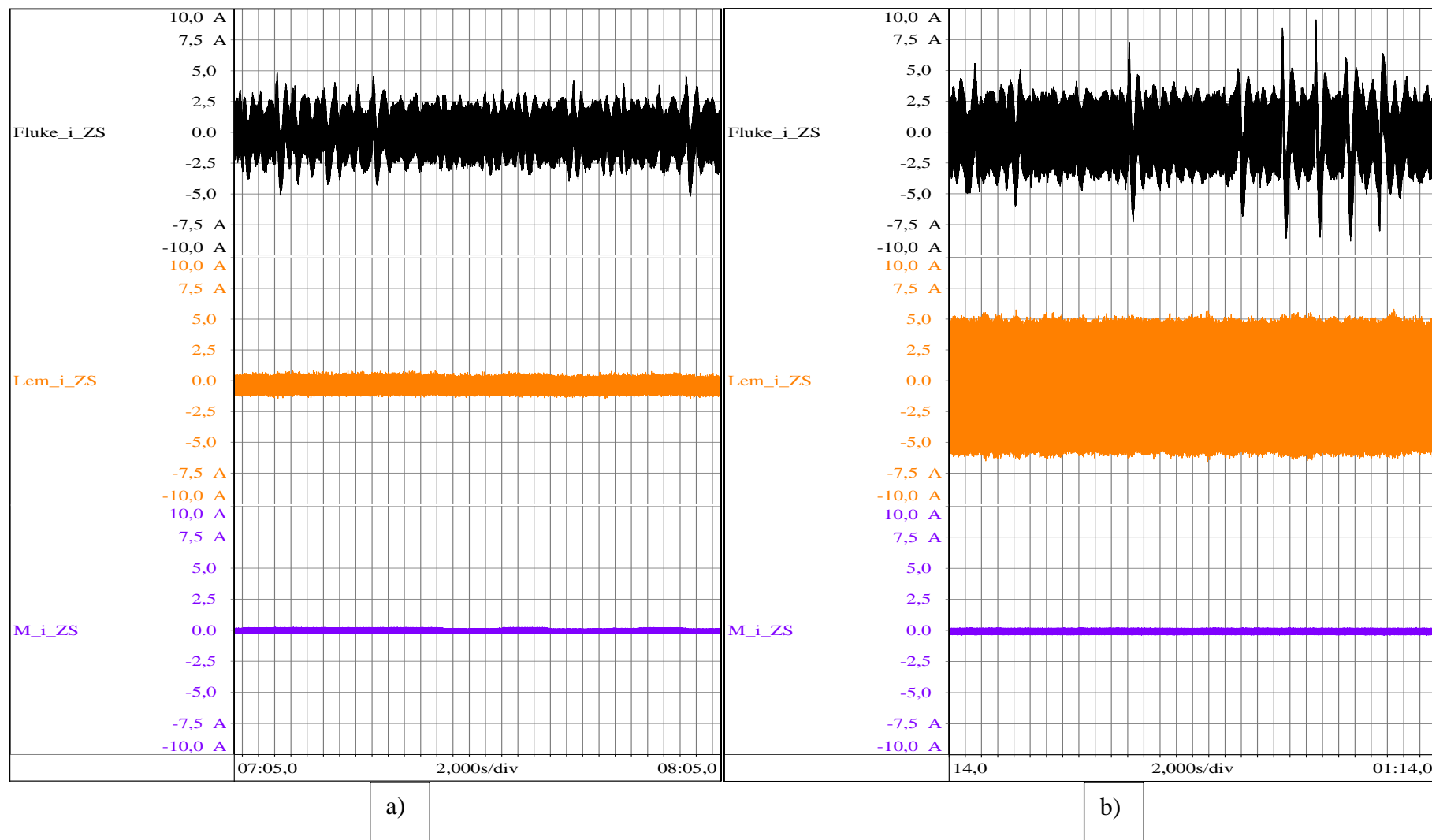
Nullsekvensstrømmen har gått fra 500 mA til 5 A, som er en øking ca. 900 %, mens den maksimale belastningen ikke påvirker Danisense-sensoren. Til og med Rogowski-spolen har en minimal endring.



Figur 44 Viser en sammenligning mellom nullsekvensstrømmen til sensorene. Hvor i bilde a) kan vi se hvordan sensorens målte nullsekvensstrøm er ved lav frekvens og belastning. Og i bilde b) kan vi se sensorens målte nullsekvensstrøm ved høy frekvens og 50 % belastning.



Figur 45 Viser en sammenligning mellom nullsekvensstrømmen til sensorene. Hvor i bilde a) kan vi se hvordan sensorens målte nullsekvensstrøm er ved høy frekvens og 50% belastning. Og i bilde b) kan vi se sensorens målte nullsekvensstrøm ved høy frekvens og 85 %



Figur 46 Viser en sammenligning mellom nullsekvensstrømmen til sensorene. Hvor i bilde a) kan vi se hvordan sensoren målte nullsekvensstrøm er ved høy frekvens og 50 % belastning, Og i bilde b) kan vi se sensorenes målte nullsekvensstrøm ved høy frekvens og 100 %

6 Diskusjon

Denne seksjonen tar for seg resultatene som ble presentert i kapittel 5. Her skal resultatene og potensielt videre arbeid diskuteres.

Som tidligere vist i kapittel 5, reduseres RSME-verdien til Fluke-sensoren ved økene frekvens og belastning. Høyeste registrerte RMSE-verdi er ved 25 Hz og 24 % belastning. Da er den registrerte verdien på L2 er 1,638 %, mens de laveste verdiene er observert ved frekvens på 75 Hz, ved både 85 % og 100 % belastning. På L3 er RSME-verdiene henholdsvis 0,786 % og 0,79 %. Disse verdiene ved høy frekvens og belastning er mer enn halvert, sammenlignet med lav frekvens og belastning. Dette indikerer at Rogowski-spolen fungerer bedre ved høy frekvens og belastning, og gjør den egent for slike anvendelser.

Når man ser på nullsekvensstrømmen, leverer Fluke-sensoren stabile resultater gjennom alle frekvens- og belastningsnivåer, i motsetning til Lem-sensoren, hvor nullsekvensstrømmen øker gradvis når frekvens og belastning stiger. På grunnlag av dette, kan det argumenteres for at Fluke-sensoren er bedre egent for bruk ved høy frekvens og belastning, da den gir stabile resultater med samme avvik. Lem-sensoren derimot er mer nøyaktig ved lav frekvens og belastning, og leverer ikke optimalt ved høy frekvens og last, og dermed vil målingene være mindre pålitelige. Det er verdt å bemerke seg at OneSubsea har erfart at Lem-sensoren ikke fungerer optimalt ved høy frekvens og belastning.

Med tanke på at Fluke-sensoren presterer bedre ved høy frekvens og belastning, mens Lem-sensoren er optimal ved lav frekvens og belastning, vil en mulighet være å velge sensorene plangrunnlag av hvilket frekvensområde systemet skal operere i. Disse observasjonene styrker viktigheten av å velge riktig sensor for å oppnå pålitelige målinger.

Fluke-sensoren er treig i oppstarten, og målinger avviker fra de to andre sensorene, som følger hverandre tett. På grunnlag av dette er ikke Fluke-sensoren egnet for bruk der oppstart er en viktig måling. Det er verdt å bemerke seg at Fluke-sensoren har et frekvensområde som starter på 10 Hz, mens både Lem- og Danisense-sensoren klarer å måle strøm fra 0 Hz. Våre observasjoner om at Fluke-sensoren ikke klarer å følge med i første del av oppstarten er derfor

ikke uventet. Imidlertid den bruker få sekunder på å hente seg inn, og deretter følger den målingene til Danisense-sensoren tett.

Det var uventet at Fluke-sensoren presterte så bra som den gjorde. Våre antagelser før testingen var at Fluke-sensoren ikke ville klare å levere samme stabilitet som Lem-sensoren. Det viser seg at begge sensorene er konkurransedyktige med Danisense-sensoren. De måler strømmen tilnærmet lik den Danisense-sensorer gjør, som har vært vår referanse gjennom hele testperioden.

Videre arbeid som kan gjøres inkluderer gjennomføring av en ny test for å bekrefte våre funn, samt utforske de punktene vi ikke hadde mulighet til å oppnå. Dette innebærer å undersøke flere frekvenser kombinert med ulike belastninger for å få en grundigere forståelse av sensorenes funksjon og prestasjon under ulike forhold.

Det hadde vært interessant å se på hvordan Lem-sensoren reagerer ved tilfeller hvor frekvensen er lav, og belastningen på høy. Vil det samme fenomenet oppstå hvor den målte nullsekvensstrømmen begynner å avvike.

7 Konklusjon

Denne oppgaven har tatt for seg hvordan ulike strømsensorer reagerer ved forskjellige frekvens- og belastningsområder. Vi har gjennom testing undersøkt oppførselen til sensorene ved å påføre lav frekvens og belastning, middels frekvens og belastning, og høy frekvens og belastning. Dette har gitt innsikt i hvordan sensorene yter under ulike driftsforhold, og bidrar til bedre forståelse av hvordan de fungerer.

Våre funn gir en indikasjon på at sensorene har forskjellig styrker og svakheter, og at deres optimale måleområder varierer med hensyn til frekvens og belastning. Basert på dette er det ikke hensiktsmessig å konkludere med at en av sensorene er best generelt, men vil komme med en anbefaling for bruk. Fluxgate-sensoren leverte det beste resultatet og er egnet for bruk ved alle frekvens- og belastningsområder. Fluke-sensoren kan bli tatt i bruk oftere og anvendt ved enkle tester som ikke inkluderer ytelsestester, mens Hall-effektsensoren er en god erstatning for Fluxgate-sensor hvis det måles ved lave frekvens- og belastningsområder.

Videre forskning kan imidlertid være nødvendig for å få en bredere forståelse av sensorene, og undersøke hvordan de oppfører seg i et enda bredere område av frekvens sammen med belastningene som allerede er blitt brukt.

8 Referanser

Appendiks A Forkortelser og ordforklaring

Her skal relevante forkortelser og ordforklaringer komme i alfabetisk rekkefølge. Husk at forklaring på forkortelser tas med i dokumentet første gang en forkortelse brukes, eks:

Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)

| | |
|----------------------|---|
| A: | Ampere |
| AC: | Vekselstrøm |
| ADC: | Analog-til-digital omformer |
| ARMS: | |
| CT: | Strømtransformator |
| DC: | Likestrøm |
| Hz: | Hertz |
| kHz: | Kilohertz |
| kV: | Kilovolt |
| Linearitet | Evnen en enhet har til å opptre proporsjonalt med inngangssignalet |
| Linearitetfeil måler | Aviket mellom den ideelle lineære strømmen påført og hva sensoren måler |
| mV: | Millivolt |
| PPM: | Parts per million/ del per million |
| RMS: | Kvadratromiddel |
| RMSE: | RMS-error |
| RPM: | Omdreininger per minutt |
| Rådata: | Ubehandlet data |
| Sverker: | En serie testapparater fra Megger, vanligvis brukt for testing av jordingssystemer og beskyttelse mot lynnedslag (tatt fra chatgpt,, så må ormulerees)og event finne en annen kilde. |
| TDR: | Totale harmoniske forvrenginger |
| V: | Volt |
| VSD: | Frekvensomformer |
| Sverker | Et test verktøy som har en innebygd variabel spenningskilde. Den kan bli brukt for å teste trefasesystem |

- [5] EPLAN. «Automasjonsteknologi.» eplan.no. Hentet fra: <https://www.eplan.no/disipliner/automasjonsteknologi/> (Lastet ned 25.04.2024)
- [6] Hottinger Brüel & Kjær. «Perception Software: Reliable Data Acquisition at High Speed.» hbm.com. Hentet fra: https://www.hbm.com/en/2279/high-speed-data-acquisition-software-perception/?product_type_no=High%20Speed%20Data%20Acquisition%20Software (Lastet ned 25.04.2024)
- [7] K. A. Rosvold. «Strømtransformator.» snl.no. Hentet fra: [[strømtransformator – Store norske leksikon \(snl.no\)](#)] (Lastet ned 02.04.2024)
- [8] Accuenergy. «What is a Rogowski coil?» accuenergy.com. Hentet fra: <https://www.accuenergy.com/articles/what-is-a-rogowski-coil/> (Lastet ned: 19.04.2024)
- [9] Y. Shi, Z. Xin, P. C. Loh og F. Blaabjerg, «A Review of Traditional Helical to recent Miniaturized Printed Circuit Board Rogowski Coils for Power-Electronic Applications,» vol. 35, nr. 11, apr. 2020, s. 12207-12222. doi: [10.1109/TPEL.2020.2984055](https://doi.org/10.1109/TPEL.2020.2984055).
- [10]. Powerway. «What is a Rogowski Coil.» Powerwayct.com. Hentet fra: https://www.powerwayct.com/new_a/3a161b1d-c89f-d90e-ee53-d30c576d1775.shtml?_gl=1*_1khowc9*_up*MQ..*_ga*MjAwNzc4MTMyNy4xNzE2MjEyMDE3*_ga_F4WBW42WYP*MTcxNjIxMjAxNS4xLjAuMTcxNjIxMjAxNS4wLjAuMA..&gclid=Cj0KCQjw6auyBhDzARIsALIo6v-8T0rcdX5tAJZTlaB6n3L6PA9Jseu3d6zCkka8jGeoSpMu4gU3INwaAtobEALw_wcB (Lastet ned: 19.04.2024)
- [11] AC stømtang (3000 A), 610 mm, mai 2024. Utgitt av Fluke Corporation. <https://www.fluke.com/no-no/product/accessories/current-clamps/fluke-i3000s-flex-24/ds>
- [12] Eletrical14U. «What is Magnetic Saturation?» eletrical14u.com. Hentet fra: [Understanding Magnetic Saturation and Its Effects | Electrical4U](#) (Lastet ned:)
- [13] B. I. Sørensen, personlig kommunikasjon, 12 mars 2024.

- [14] J. Sandstad. «Halleffekt.» snl.no. Hentet fra: <https://snl.no/halleffekt> (Lastet ned: 08.04.2024)
- [15] Electronics Tutorials. «Hall Effect Sensor.» electronics-tutorials.ws. Hentet fra: [Hall Effect Sensor and How Magnets Make It Works \(electronics-tutorials.ws\)](https://electronics-tutorials.ws/hall-effect-sensor-and-how-magnets-make-it-works/) (Lastet ned: 08.04.2024)
- [16] Dr. S. Arar. «Hall Effect Current Sensing: Open-Loop and Closed-Loop Configurations.» allaboutcircuits.com. Hentet fra: [Hall Effect Current Sensing: Open-Loop and Closed-Loop Configurations - Technical Articles \(allaboutcircuits.com\)](https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/hall-effect-current-sensing-open-loop-and-closed-loop-configurations-technical-articles/) (Lastet ned: 08.04.2023)
- [17] E. Ramsden, «Introduction,» i Hall-Effect Sensors: Theory and Application, utgave 2, Elsevier Science & Technology, 2006, s. xi-xiii. [Online]. Hentet fra: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/hogskbergen-ebooks/reader.action?docID=317230>
- [18] J. Skaar og Ø. Grøn. «Faradays induksjonslov.» snl.no. Hentet fra: https://snl.no/Faradays_induksjonslov (Lastet ned: 26.01.2024)
- [19] J. A. Holtet. «Magnetometer.» snl.no. Hentet fra: <https://snl.no/magnetometer> (Lastet ned 02.02.2024))
- [20] Fiix. «Voltage sensor.» fiixsoftware.com. Hentet fra: <https://fiixsoftware.com/glossary/what-is-a-voltage-sensor/> (Lastet ned: 12.02.2024)
- [21] “Indoor Voltage Sensor KEVA 24,” 2007. Utgitt av ABB. Hentet fra PDF. (Lastet ned: 12.02.2023)
- [22] T. Hansen. «Frekvensomformer.» snl.no. Hentet fra: <https://snl.no/frekvensomformer> (Lastet ned: 03.05.2024)
- [23] O. Sande, «Simatic S7 1500 and TIA Portal Programming,» 2020. Hentet fra PDF. (Lastet ned 20-05-2024)

- [24] ABB. «What is a variable speed drive?» new.abb.com. Hentet fra:
<https://new.abb.com/drives/what-is-a-variable-speed-drive> (Lastet ned: 03.05.2024)
- [25] «GEN series GN610B (GN611B).»] 24 August 2023. Utgitt av Hottinger Brüel & Kjær.
<https://www.hbm.com/fileadmin/mediapool/hbmdoc/technical/B04374.pdf> (Lastet ned:
12.02.2024)
- [26] Generac Support. «Total Harmonic Distortion.» support.generac.com.
<https://support.generac.com/s/article/What-Is-Total-Harmonic-Distortion-THD> (Lastet ned:
25.04.2024)
- [27] «User Manual (versjon 9.0).» Okt. 2021. Utgitt av HBM.
<https://www.hbm.com/fileadmin/mediapool/hbmdoc/technical/A02689.pdf> (Lastet ned
25.04.2024)
- [28] Advanced Navigaton. «Root Mean Square (RMS).» advancednavigation.com. Hentet fra:
Hentet fra: <https://www.advancednavigation.com/glossary/RMS> (Lastet ned: 25.04.2024)
- [29] Sap. «Root Mean Squared Error (RMSE).» help.sap.com. Hentet fra:
https://help.sap.com/docs/SAP_PREDICTIVE_ANALYTICS/41d1a6d4e7574e32b815f1cc87c00f42/5e5198fd4afe4ae5b48fefe0d3161810.html (Lastet ned: 25.04.2024)
- [30] J. W. Nilsson, S. A. Riedel, Electric Circuits, 11 utg. Pearson Education Limited, 2019.
- [31] Circuit Globe. «Zero Sequence Current.» circuitglobe.com. Hentet fra:
<https://circuitglobe.com/zero-sequence-current.html> (Lastet ned: 25.04.2024)
- [32] K. Hofstad. «Amplitude.» snl.no. Hentet fra: <https://snl.no/amplitude> (Lastet ned:
25.04.2024)
- [33] Primary Science Online. «Amplitude.» primaryscienceonline.org. Hentet fra:
<https://primaryscienceonline.org.uk/glossary-of-teRMS/amplitude/> (Lastet ned: 25.04.2024)

- [34] «Current Unbalance.» Utgitt av faraday predictive. Hentet fra: <https://www.faradaypredictive.com/uploads/diagnostic-files/IBalance.pdf> (Lastet ned 18.05.2024)
- [35] O. H. Dale. «Framo Horsøy.» bygg.no. Hentet fra: <https://www.bygg.no/framo-horsoy/87543!/> (Lastet ned: 25.04.2024)
- [36] Schlumberger Norge AS. «OneSubsea med Luefeng-kontrakt.» Naeringsforeningen.no. Hentet fra: <https://www.naeringsforeningen.no/nytt-fra-vaare-medlemmer/onesubsea-med-lufeng-kontrakt/> (Lastet ned 17.04.2024)
- [37] Universitet i Oslo. «Flere teknikker for kretsanalyse og transformasjon.» UIO.no. Hentet fra: <https://www.uio.no/studier/emner/matnat/ifi/nedlagte-emner/INF1410/v09/undervisningsmateriale/Fo4.pdf> (Lastet ned 20.05.2024)
- [38] Current Transducer LF 2005-S/SP1, nr. 16, okt. 19, 2012. Utgitt av Lem. Hentet fra: [\[https://www.lem.com/sites/default/files/products_datasheets/lf%202005-s%20sp1.pdf\]](https://www.lem.com/sites/default/files/products_datasheets/lf%202005-s%20sp1.pdf)
- [39] H. Elbæk. «Danisense.» Mars 15, 2022. Utgitt av Danisense. <https://Danisense.com/wp-content/uploads/DM1200ID-4.pdf>
- [40] A. G. Rushton, «The Selection of Trip System Configuration,» nr. 124. <https://www.icheme.org/media/10425/xi-paper-23.pdf>