

Simulering av sporfelt i forbindelse med tilstandsovervåkning

Anders Stiksrud Helmen

Master i kybernetikk og robotikk
Innlevert: juni 2017
Hovedveileder: Tor Engebret Onshus, ITK

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for teknisk kybernetikk

Forord

Denne rapporten er en masteroppgave ved institutt for teknisk kybernetikk (ITK) på NTNU i Trondheim, våren 2017. Den er skrevet for Bane NOR (tidligere Jernbaneverket). Oppgaven omhandler sporfelt og har bestått av datasimulering, feilmodi-analyse og beskrivelse av nåværende status for tilstandsovervåking.

I arbeidet har jeg blant annet arbeidet med fagmiljøet i Bane NOR, og har i kortere perioder arbeidet på deres lokaler i Oslo. Jeg fikk også mulighet til å være med på installering av sensorer og annet måleutstyr for sporfeltovervåking ved Nationaltheateret.

Jeg vil takke min veileder i Jernbaneverket Jørgen Torgersen, for all tid, bistand og entusiasme som han har lagt i dette samarbeidet. Det har i tillegg vært flere andre verdifulle ressurspersoner hos Bane NOR som fortjener en takk, deriblant Ben Tollefsen, Kenneth Andersen, Anna Gjerstand og Vidar Larssen.

Jeg vil også rette en takk til min faglige veileder på instituttet Tor Onshus for hjelp og veiledning hele perioden.

Sammendrag og konklusjon

Denne rapporten tar for seg tilstandsovervåkning av sporfelt. Sporfelt er en eldre, men allikevel mye brukt togdeteksjonsmetode på den norske jernbanen. Sporfeltsystemet er kilde til en stor andel av feil og forsinkelse på jernbanen, såkalte «signalfeil». Det er store kostnader knyttet til forsinkelse og det er i den forbindelse satt i gang prosjekter for tilstandsovervåkning av sporfelt, slik at flere feil kan avdekkes før de fører til forsinkelse. Høsten 2016 ble sporfeltovervåkning implementert for første gang på sporfeltene tilknyttet Heimdal og Selsbakk stasjon med ett målingspunkt pr. sporfelt. Våren 2017 ble det implementert utvidet sporfeltovervåkning ved Nationaltheateret stasjon i Oslo, nå med to målepunkt pr. sporfelt. Sporfeltovervåkingen som er implementert på Nationaltheateret presenteres i denne rapporten. Tilstandsovervåking av forskjellige objekter i jernbanen er en del av et prosjekt i Bane NOR kalt «Smart Vedlikehold».

I forbindelse med økt satsing på avdekking av feil på sporfelt er det behov for kompetanseheving i fagfeltet slik at nytten av tilstandsovervåking kan maksimeres. Et sporfelt er en elektrisk krets, og en del av arbeidet med denne rapporten har vært å lage flere simulatorer i programvare som etterligner denne elektriske kretsen, med målemetoder som svarer til de implementerte metodene ved Nationaltheateret. Målet er å gjøre sporfeltforståelse mer tilgjengelig og kunne demonstrere hvordan datasimulering kan benyttes som verktøy for å eksperimentere med forskjellige målemetoder, feilmønstre og lignende. Simuleringene tar utgangspunkt i et «dobbeltisolert vekselstrømssporfelt» med signalfrekvens på 95Hz som er den vanligste i Norge.

Sammen med sporfeltsimuleringen er det utarbeidet en oversikt over mulige feil og uønskede situasjoner som kan oppstå på sporfelt av den simulerte typen. Denne oversikten inneholder feilsituasjoner som simuleringen er med på å gi innsikt i. Denne analysen er basert på metodeverket Failure Mode Effects and Diagnostics Analysis (FMEDA). FMEDA er en «bottom-up»-metode som undersøker konsekvensen ved feilfunksjoner i komponenter og ikke minst muligheten å detektere og diagnostisere disse. Spørsmålet om detekterbarhet er behandlet med hensyn på den nåværende overvåkningsløsningen benyttet ved Nationaltheaterets sporfelt.

En oppdaget feil og på Nationaltheaterets sporfelt i perioden presenteres også og knyttes til funnene fra simuleringen. Simuleringene inkluderer både enkle sporfelt og flere sporfelt etter hverandre.

Abstract

This report deals with field monitoring of track circuits. Track circuits is an older, yet widely used train detection method on the Norwegian railroad. The track circuits system is the source of a large proportion of errors and delays on the railway. There are high costs associated with delay and in this regard, projects for condition monitoring of track circuits have been launched so that more errors can be detected before they lead to delays. In the autumn of 2016, track monitoring was implemented for the first time on the track circuits connected to Heimdal and Selsbakk station with one measurement point per. track circuit. In spring 2017, extended track circuit monitoring was implemented at Nationtheateret station in Oslo, now with two measuring points per. track circuits The track surveillance implemented at the National Theater is presented in this report. Condition monitoring of various objects in the railway is part of a project in Bane NOR called "Smart Maintenance".

With regards to increased efforts to detect defects on track circuit, there is a need for capacity building in the field of expertise, so that the benefit of condition monitoring can be maximized. A track circuit is an electrical circuit, and part of the work of this report has been to create several simulators in software that mimic this electrical circuit, with measurement methods corresponding to the implemented methods at the National Theater. The goal is to make track circuit understanding more accessible and demonstrate how data simulation can be used as tools to experiment with different measurement methods, error patterns, and the like. The simulations are based on a «double-insulated AC power circuit» with a signal rate of 95 *hertz* which is the most common in Norway.

Together with the track simulation, an overview of possible errors and undesirable situations that may occur on the scope of the simulated type has been presented. This overview contains error situations that the simulation helps to provide insight into. This analysis is based on the Failure Mode Effects and Diagnostics Analysis (FMEDA) methodology. FMEDA is a «bottom-up» method that examines the consistency of component failures and the ability to detect and diagnose these. The question of detectability has been dealt with with regard to the current monitoring solution used at the National Theater.

A discovered incorrect and noticeable situation on the National Theater's track area during the period is also presented and linked to the findings from the simulation. The simulations include both simple tracks and multiple tracks after each other.

Innhold

Forord	i
Sammendrag og konklusjon	ii
Abstract	iii
Innhold	vi
Tabelliste	vii
Figurliste	x
Akronymer	xi
1 Innledning	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Problemstilling	2
1.3 Målsetning	2
1.4 Avgrensning	2
1.5 Oppbygning	3
2 Teoretisk grunnlag	5
2.1 Togdeteksjon	5
2.2 Sporfelt	6
2.2.1 Typer sporfelt	7
2.2.2 Kjøreledningsanlegget (KL-anlegget)	10
2.2.3 Fordeler og ulemper med sporfelt som deteksjonsmetode	11
2.3 Tilstandsovervåkning av sporfelt	12
2.4 Sporfeltovervåkning på Nationaltheateret	12
2.5 Visningslaget	13
2.6 Softwaresimulering	15
2.6.1 MATLAB	15
2.7 FMEA/FMEDA	17
2.7.1 FMEA-prosedyren	17
2.7.2 FMEA-formatet	17
2.7.3 Failure Modes, Effects and Diagnostic Analysis (FMEDA)	18

3	Metode	21
3.1	Utfordringer med rapporten	21
3.2	Simuleringsoppsett	21
3.2.1	Komponentliste i simulering	21
3.2.2	Instilling og justering av sporfelt	24
3.2.3	Oppbygning av simuleringen	25
3.2.4	Versjon 1 - Enkeltstående sporfelt uten kjørestrøm	25
3.2.5	Simulering av sporfeltrelé	26
3.2.6	Versjon 2 - Enkeltstående sporfelt med kjørestrøm	27
3.2.7	Versjon 3 - Sammenhengende sporfelt	28
3.3	FMEDA	31
3.4	Litteraturstudium	31
4	Resultat	33
4.1	Tilstandsovervåkning på Nationaltheateret	33
4.1.1	Normal kjøring	33
4.1.2	Forstyrret sporfelt	34
4.2	Simulering av sporfelt	34
4.2.1	Versjon 1 - Enkeltstående sporfelt uten banestrøm	34
4.2.2	Versjon 2 - Enkeltstående sporfelt med banestrøm	39
4.2.3	Versjon 3 - Sammenhengende sporfelt	45
4.3	FMEDA	47
5	Diskusjon	51
5.1	Observerte feil på Nationaltheateret	51
5.2	Sporfeltsimulering	51
5.2.1	Innstilling av sporfelt	51
5.2.2	Simulering av tofaserelé	52
5.2.3	Strømmåling i simulering i forhold til virkeligheten	52
5.2.4	Ideelle motstander, spoler og transformatorer	52
5.2.5	Valg av simuleringsverktøy	53
6	Videre arbeid	55
	Bibliografi	57
A	MATLAB-kode (eksempel) benyttet til kjøring av simulering og plott	59
B	Datablad for sporfelttransformatorer	63

Tabeller

2.1	Navn og beskrives på hver kolonne i en FMEA-analyse	18
2.2	Navn og beskrives på de ekstra kolonnene i en FMEDA-analyse	19
3.1	Aktuelle Simscape-komponenter	22
3.2	Aktuelle Simulink-komponenter	23
3.3	Instillingsverdier tilførselskrets, <i>hentet fra Teknisk regelverk, bearbeidet av Anders S. Helmen</i> [2]	24
3.4	Instillingsverdier returkrets, <i>hentet fra Teknisk regelverk, bearbeidet av Anders S. Helmen</i> [2]	25
4.1	FMEDA-tabell	50

Figurer

2.1	Prinsippskisse sporfeltovervåkning	6
2.2	Enkeltisolert sporfelt [13]	7
2.3	Dobbeltisolert sporfelt [13]	7
2.4	Komponenter benyttet til strømmåling på Nationaltheateret	13
2.5	Oversikt over tilførselmåling på Nationaltheateret	13
2.6	Oversikt over returmåling på Nationaltheateret	14
2.7	Overordnet informasjonsflyt tilstandsovervåkning	14
2.8	Roadmaster - visningslaget i sporfeltovervåkingen	14
2.9	RC-krets laget i Simulink	16
2.10	Strøm og spenning fra Simulink-modellen	16
2.11	RC-krets laget i Simscape	16
2.12	Strøm og spenning fra Simscape-modellen	17
3.1	Instillingsverdier Dobbeltisolert endematet sporfelt (Type 3) [2]	24
3.2	Sporfelt Type 3 - Dobbeltisolert sporfelt, enkeltstående	26
3.3	Enkel relémodell	27
3.4	Relémodell med to faser	27
3.5	Lokalfase modellert i Simscape	28
3.6	Sporfelt Type 3 - Dobbeltisolert sporfelt med KL	28
3.7	Isolert skinneskjøt	29
3.8	Tre sammenhengende sporfelt med tilkoblet kjøreledning	30
4.1	Roadmasters visning av sporfeltstrømmen ved normal operasjon	33
4.2	Roadmasters visning av sporfelt med forstyrrelser	34
4.3	Plot av strøm i tilførsel- og returkrets ved forskjellige viklingsforhold	35
4.4	Strøm og spenning ved forskjellige verdier på togshunt	36
4.5	Plot av strøm i tilførsel- og returkrets ved feil på tilførselsmotstand	37
4.6	Plot av strøm i tilførsel- og returkrets ved feil på returmotstand	38
4.7	Plot av strøm i tilførsel- og returkrets ved varierende linjemotstand	39
4.8	Plot av strøm i tilførsel- og returkrets ved varierende avledning mellom skinnene	39
4.9	Strøm tilførsel- og returkrets med varierende grad av ubalanse i linjemotstanden	40
4.10	Plot av reeltilstand ved ulike grader av ubalanse i linjemotstand	41
4.11	Kraften på reléet ved forskjellig faseforskyvning	42
4.12	Strøm tilførsel- og returkrets med varierende grad av ubalanse i filterimpedans	44
4.13	Plot av strøm i tilførsel- og returkrets ved tre sammenkoblede sporfelt	45

4.14	Strøm i tilførsel- og returkrets ved tre sammenkoblede sporfelt og ubalanse i midtre, grunnet motstandsubalanse	45
4.15	Plot av strøm i tilførsel- og returkrets ved kortsluttet i isolert skinneskjøt mellom spor 2 og 3	46
4.16	Strøm i tilførsel- og returkrets ved kortslutning i isolert skinneskjøt mellom spor 2 og 3, motsatt fase på sporfeltene)	48
4.17	Strøm i tilførsel- og returkrets ved kortslutning i isolert skinneskjøt mellom spor 2 og 3, samme fase på sporfeltene)	49

Akronymer

ERTMS European Railway Traffic Management System

FMEA Failure Mode Effects Analysis

FMEDA Failure Mode Effects and Diagnosis Analysis

KL Kontakledning/Kjøreledning

Innledning

Denne masteroppgaven vil ta for seg tilstandsovervåkning av sporfelter. Sporfelter er den eldste og mest utstrakte formen for togdeteksjon som finnes i norsk jernbane. Metoden benytter skinnenes evne til å lede strøm og togakslingens evne til å kortslutte skinnene som mekanisme for å indikere om det finnes rullende materiell på en gitt togstrekning. Å kunne bestemme en om togstrekning er ledig eller «belagt» er kritisk for sikker og effektiv togfremføring. Sporfeltets oppbygning er av en slik art at enhver feil som oppstår på sporfelt fører til at den aktuelle sporstrekningen indikeres som «belagt» - eller «ikke ledig». Dette er en av årsakene til at det er utfordrende å feilsøke sporfelt.

Frem til nå har det vært få muligheter til å detektere feil på sporfelt før de gir seg utslag i en driftsfeil som påvirker jernbanedriften. I tillegg viser rotårsaksanalyse [10] at mange feil på sporfelt forblir ukjent. Dette gjør det vanskelig å være i forkant når det gjelder vedlikehold. Ved å benytte tilstandsovervåkning av relevante parametre ønsker man å både kunne, i større grad enn før, detektere påbegynnende feil, øke kunnskapen om kilder til feil og utvikle bedre vedlikeholdstrategier.

Erfaringsbasert kunnskap med liten grad av tilgjengelighet kan kalles for «taus kunnskap». I følge Jørgen Torgersen i Bane NOR er sporfelt ett av fagområdene med mye taus kunnskap. Dette er noe av grunnen til at man ønsker å modellere sporfeltsystemet og på denne måten demonstrere hvordan ulike deler av systemet kan feile og i hvilken grad dette er mulig å fange opp ved hjelp av forskjellige deteksjonsstrategier.

Både i arbeid med prosjektoppgaven et halvt år før denne masteroppgaven og i dette arbeidet har forfatter erfart at virkningen av kjøreledningens påvirkning av sporfeltsystemet er underkommunisert. Med dette menes at i mange av kildene som forfatter har benyttet, har ikke dets innvirkning vært diskutert i like stor grad som systemet ellers. Set oppleves som noe «mystisk» hos flere av aktørene som forfatter har konsultert i arbeidet med denne oppgaven, som bekreftes av Jørgen Torgersen. I [10] og [8] er virkemåte til 95/105 Hz sporfelt grundig beskrevet, men samvirkningen mellom sporfelt- og kjørestrøm er mangelfull. Derfor vil denne oppgaven legge ekstra vekt på dette aspektet. Dette for å kunne luke ut hull i forståelsen som kreves for å kunne nyttegjøre seg tilstandsovervåkning på best mulig måte.

1.1 Bakgrunn

Det ble høsten 2016 utført et pilotprosjekt på tilstandsovervåkning av sporfelt ved Heimdal stasjon. Piloten hadde som hovedmål å undersøke nytteverdien av tilstandsovervåkning ved måling av effektivverdien til returstrømmen. Dette var gjenstand for undersøkelse i forfatters prosjektoppgave [8] hvor

returstrømmen ble overvåkt og kurvene undersøkt. Dette resulterte i læring om hvordan nedbør påvirker sporfeltstrømmen og innsikt i hvor godt de benyttede metodene har fungert, med anbefaling om endring av målingsregime.

Våren 2017 er det blitt satt i gang et nytt pilotprosjekt, denne gangen med måling av både sporfeltets tilførselsstrøm og returstrøm med håp om at dette kan åpenbare flere typer feil i kraft av å ha to målte variable på hvert sporfelt i forhold til én.

1.2 Problemstilling

Denne oppgaven beskriver ny pilot i Oslo hvor både returstrøm og tilførselsstrøm skal monitoreres. I tillegg skal det utarbeides en elektronisk sporfeltmodell i simuleringverktøyet «Simulink» for å kunne illustrere og gjøre forsøk som øker kompetansen på sporfelt. Sporfeltmetoden skal i sammenheng med dette også analyseres med et FMEDA-verktøy.

Forskningsspørsmål og delmål

- Analysere sporfelt ved hjelp av FMEA/FMEDA.
- Beskrive sporfeltovervåkingen slik den er implementert i dag.
- Beskrive banestrømmens påvirkning på sporfelt
- Modellere sporfeltkrets ved hjelp av MATLAB Simulink/Simscape.

1.3 Målsetning

Målet med oppgaven er å demonstrere sporfeltets funksjon og et utvalg feilmodi ved hjelp av programvaresimulering. Gjennom simulering med ulik kompleksitet vises hvordan de forskjellige komponentene i sporfeltet sørger for den oppførselen som observeres i det fysiske systemet. Simuleringen har som mål å kunne etterligne systemet slik sporfeltovervåkingen er implementert på sporfeltene tilknyttet Oslo S/ Nationaltheateret i Oslo.

I tillegg skal denne oppgaven kunne benyttes til å lettere forstå mekanismene rundt banestrømmens påvirkning av sporfeltets funksjon. Sammen med FMEDA-analysen skal denne oppgaven gjøre det enklere å sette seg inn i sporfeltfaget og sporfeltovervåkingen slik den er implementert i skrivende stund. En ønsker å kunne benytte mest mulig automatiske metoder for å oppdage feil gjennom sporfeltovervåkingen ¹ og det er derfor svært viktig med god innsikt i kretsens virkemåte og denne oppgaven har som delmål å kunne lette arbeide med å skaffe slik innsikt.

1.4 Avgrensning

Det finnes flere typer sporfelt i bruk i Norge i dag. Den klart mest brukte er AC 95/105 Hz. Både pilotprosjektet med sporfeltovervåking tilknyttet Heimdal stasjon og Nationaltheateret er av denne typen. Derfor vil denne oppgaven i all hovedsak forholde seg til dette. I simuleringen er 95 Hz benyttet. Det er

¹I følge Jørgen Torgersen i Bane NOR

gjort en rekke forenklinger i konstruksjonen av simuleringen, blant annet er BT-systemet² og virkningen av sporveksler utelatt.

FMEDA-analysen er kvalitativ, da denne rapporten ikke har som fokus hyppighet av feil, men heller virkning og innsikt i disse. I rotårsaksanalysen i masteroppgaven som ble skrevet våren 2016 om sporfelt og sporfeltovervåking av Olav Kallerud [10] finnes en mer kvantitativ analyse basert på dokumenterte feil på sporfelt. Komponentene og systemene som beskrives i FMEDA-analysen er begrenset til de som er gjenstand for undersøkelse i simuleringen.

1.5 Oppbygning

Kapittel 1 beskriver sammenhengen for arbeidet med denne oppgaven, i tillegg til motivasjonen for å benytte datasimulering i arbeidet med sporfelt. Videre presenteres bakgrunn, problemstilling, målsetning, avgrensning og oppbygning.

Kapittel 2 beskriver sporfeltteori med fokus på samvirkningen mellom strømmen som driver rullende materiell og signalstrømmen. I tillegg beskrives tilstandsovervåking av sporfelt og løsningen som er valgt for dette på sporfeltene tilknyttet Nationaltheateret. Analysemetoden kjent som FMEA/FMEDA beskrives også.

Kapittel 3 inneholder metoden benyttet i arbeidet med denne oppgaven. Fremgangsmåte i datasimuleringen beskrives på en skrittvis måte fra simpelt til mer komplisert oppsett. Kildebeskrivelser og viktig litteratur presenteres, sammen med utfordringer og svakheter med rapporten.

Kapittel 4 presenterer og beskriver resultater fra sporfeltsimuleringene. Disse legger grunnlaget for innsikten benyttet for gjennomføre FMEDA. Den resulterende tabellen fra FMEDA-analyse finnes også her.

Kapittel 5 diskuterer implikasjonene av resultatene som presenteres i *kapittel 4*. Dette innebærer en diskusjon rundt mulighetene ved datasimulering, fordeler og ulemper ved valgte løsning og grunnlag for utvidelse.

Kapittel 6 presenterer en naturlig fortsettelse av arbeidet med denne rapporten. Det inneholder forslag til metoder som bør benyttes og områder som bør utforskes, med hensyn på simulering og feildeteksjon.

²System som benytter *sugetransformatorer* «for å unngå at returstrømmen lekker ut av skinnene og ned i jordsmonnet» [11]

Teoretisk grunnlag

Dette kapitlet vil beskrive togdeteksjonsmetoden sporfelt med fokus på kjøreledningens påvirkning.

I tillegg vil det komme en beskrivelse av tilstandsovervåking av sporfelt i sammenheng med pilotprosjektet tilknyttet Nationaltheateret i Oslo. Innføring i feilmodianalyse (FMEA/FMEDA) blir også behandlet, samt beskrivelse av verktøyer som benyttes i forbindelse med modellering av sporfeltekrets.

2.1 Togdeteksjon

I togtrafikken er det behov for å vite om et bestemt sporavsnitt er ledig eller «belagt» av materiell. Dette for å kunne vite om det er trygt å kjøre inn på den aktuelle seksjonen. Denne avgjørelsen om hvorvidt det finnes materiell på en angitt seksjon kalles «togdeteksjon». Det omfatter all teknisk utrustning som detekterer tog i et sporavsnitt og gir informasjon om sporavsnittets status til forriglingsutrustningen [3]. Forriglingsutrustningen er det som avgjør om alle krav er innfridd for å kunne gi klarsignal for kjøring.

Det finnes flere metoder for togdeteksjon og den enkleste formen for togdeteksjon er menneskelig visuell bestemmelse. Denne metoden har sine naturlige svakheter ved at den krever store mengder menneskelige ressurser, er uten automatikk og er sårbar for menneskelig svikt, som er vanskeligere å unngå med større og mer komplekse systemer.

Togdeteksjonsmetodene deles gjerne inn i to kategorier: kontinuerlig (sammenhengende) eller diskret (oppstykket) deteksjon. Dette betyr henholdsvis om det rullende materiellet er registrert ved faste målepunkter eller om det til enhver tid registreres. Av de diskrete finnes akseltellere og slepemagneter [9]. Av kontinuerlig finnes sporfelt.¹ I tillegg finnes systemer hvor man ikke benytter togdeteksjon på samme måte, men heller melder sin posisjon og kjøreretning og på dermed sørger for at man ikke behøver utstyr for togdeteksjon på banen. I det felles europeiske signalanlegget for jernbane, European Rail Traffic Management System (ERTMS) som Norges jernbane også skal benytte i fremtiden ² finnes denne løsning.

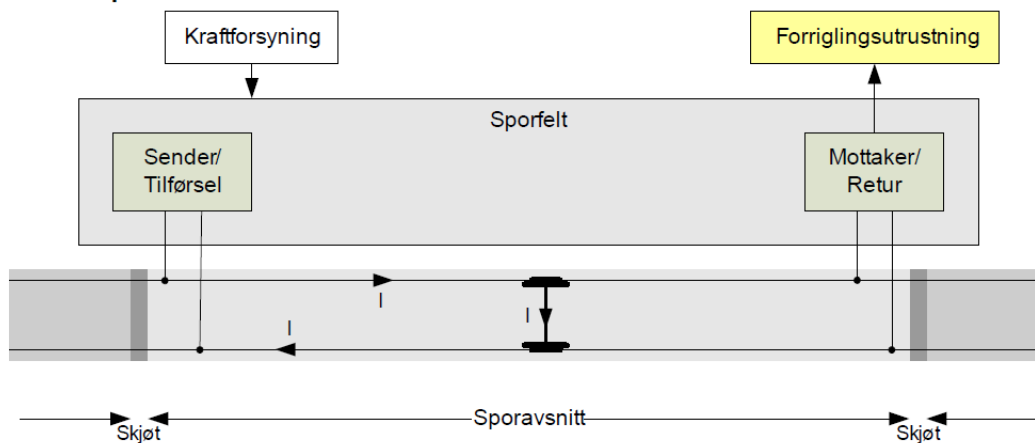
¹mer utfyllende informasjon om togdeteksjonsmetoder finnes i masteroppgaven [10]

²Innføres i Norge med etablering «på de fleste jernbanestrekninger i Norge» innen 2030. [5]

2.2 Sporfelt

Den første sporfeltet ble utviklet i 1872 av amerikaneren William Robinson [9]. Sporfelt gjorde det mulig for første gang å automatisk bestemme hvor toget befant seg på linjen. Dette la grunnlaget for automatisk sikringssystem på jernbanen og man kunne med dette sørge for at det aldri befant seg mer enn *ett* tog på samme sporavsnitt. Gevinsten var mulighet for høyere fart og større trafikk uten å kompromittere sikkerheten.

Togdeteksjonen gjøres ved at det fra den ene enden av et sporfelt sendes strøm i skinnegangen fra en tilførselskrets. I motsatt ende av sporavsnittet finnes en returkrets med et sporfeltrelé som detekterer strømmen. Ved rullende materiell på den aktuelle strekningen får ikke reléet strøm, ved at akslingen til toget kortslutter skinnestrengen som er koblet til reléet. Dette medfører at reléet «faller av» og det aktuelle togsegmentet er opptatt (belagt). *Figur 2.1*



Figur 2.1: Prinsippskisse sporfeltovervåking [14]

De første sporfeltene benyttet likestrøm i linjen. Dette var i en tid hvor trafikken på jernbanen utelukkende var ikke-elektrifisert, og da med sporfelt-strømmen som eneste strøm i skinnen.

For at togindikasjonen skal kunne fungere på sine distinkte segmenter ved hjelp av sporfeltstrøm er det kritisk at ikke strømmen flyter over fra ett segment til et annet. Dette vil naturlig nok kunne forårsake at reléet tilknyttet nabosegmentet (nabofeltet) blir tilkoblet, og fritt spor indikeres. For å unngå dette benyttes isolerte skinneskjøter mellom tilstøtende sporfelt. I Robinsons originale sporfelt ble den ene skinnestrengen benyttet for å sende sporfeltstrømmen til reléet og den andre ble benyttet til tilbakeføring av strømmen i negativ ende av likestrømkilden (jord). På denne måten trengte man kun å isolere skjøten i den éne skinnen.

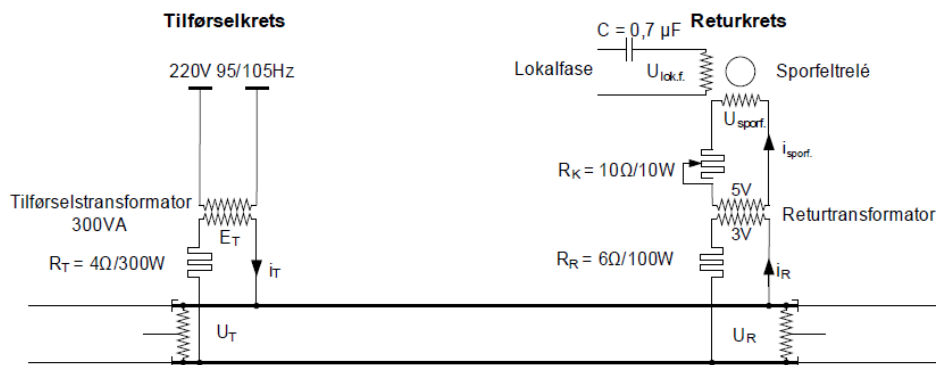
Ettersom sporfeltene har utviklet seg begynte man å benytte vekselstrøm på sporfelt, både på grunn av muligheten til å benytte transformatorer og i forbindelse med elektrifisering av linjen. Dette har gjort at man har flere varianter av sporfelt i dag, med både enkelt- og dobbeltisolerte skinner, frekvens på vekselstrømmen og håndtering av kjørestrømmen.

I det følgende kommer en enkel beskrivelse av de viktigste komponentene som kreves for sporfelt, slik det benyttes i dag. For grundigere beskrivelse av komponentene, refereres leseren til forfatters egen prosjektoppgave [8].

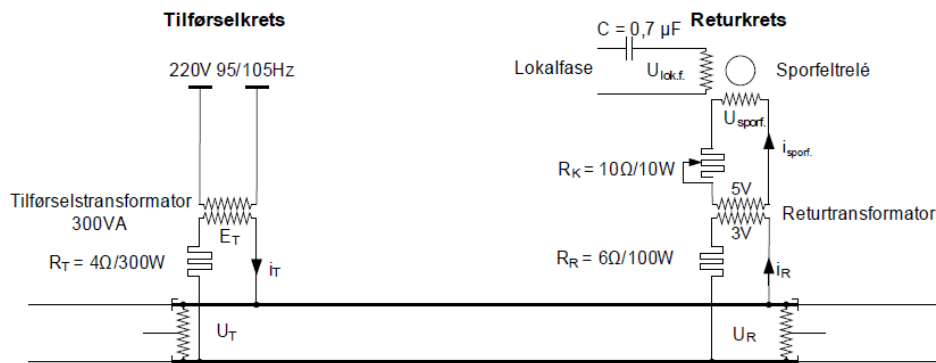
2.2.1 Typer sporfelt

Sporfelter kan benytte både likestrøm og vekselstrøm som signalstrøm. Det originale sporfelt benyttet som nevnt likestrøm. Det klart vanligste i Norge i dag er vekselstrømsporfelt, med 95/105 Hz frekvens. I tillegg finnes høyfrekvente sporfelt og audiofrekvent sporfelt, som benytter frekvenser i størrelsesorden kHz. Denne oppgaven tar kun for seg 95/105 Hz sporfelt.

95/105 Hz kan deles inn i to viktige kategorier, enkeltisolert og dobbeltisolert sporfelt. Betegnelsene beskriver om to sporfelt som ligger etter hverandre er elektrisk isolert på kun den ene skinnestrengen eller begge. Denne forskjellen har konsekvenser for hvordan banestrømmen³ kobles. Dette beskrives i seksjon 2.2.2. Figurene 2.2 og 2.3 viser henholdsvis enkelt- og dobbeltisolerte sporfelt.



Figur 2.2: Enkeltisolert sporfelt [13]



Figur 2.3: Dobbeltisolert sporfelt [13]

Sporfeltrelé

Et relé er i hovedsak en elektrisk bryter som styres av én (eller flere) elektriske krets(er). Det er denne bryteren som svitsjes ved overgangen mellom ubelagt og belagt spor. Ved bruk av likestrømssporfelt som i Robinsons originale felt vil man benytte et enkel relé, mens man i vekselstrømsporfelt benytter et såkalt «tofase-relé». Dette tofase-reléet fungerer på den måten at to separate vekselspenninger må være tilstede, med korrekt faseforskyvning i forhold til hverandre for at reléet skal «trekke». Disse to vekselspenningene er sporfeltkretsen (sporfase) og en «lokalfase». Lokal- og sporfase har samme frekvens faseforskjøvet

³Strømmen som driver toget

90°. Reléet er konstruert på en slik måte at det trekker med høyest kraft når denne faseforskyvningen er på 90° slik at «forurensninger» i sporfeltstrømmen (noe som indikerer at noe er galt) resulterer i frafalt relé og dermed «belagt» spor. Litt forenklet kan trekraften F til reléet skrives som

$$F = k \cdot I_{lf} \cdot I_{sf} \cdot \sin(\alpha), \quad (2.1)$$

hvor I_{lf} og I_{sf} er strømmen i henholdsvis lokal- og sporfase, α er faseforskyvningen ⁴ mellom dem og k er en konstant for reléet [9, s.179]. Det kreves at reléet skal trekke ved faseforskyvningen $90^\circ \pm 30^\circ$ ⁵. Sporfeltstrømmen i to tilstøtende vekselstrømsporfelt har motsatt fase, altså 180° faseforskyvning. Grunnen til det er at hvis det ved en feil flyter sporfeltstrøm mellom to sporfelt, skal ikke strømmen fra det ene kunne bidra til sterkere trekraft på det andre feltets relé.

Isolert skinneskjøt

For at sporfeltstrømmen ikke skal forplante seg fra sitt respektive felt til nabofelt er mellomliggende skinneskjøter elektrisk isolert. Denne isolerte skjøten kan være tilstede på kun den ene skinnestrengen, som i Robinsons originale sporfelt, på begge skinnestringene mellom sporfeltene. De heter da henholdsvis enkelt- og dobbeltisolert sporfelt.

Elektrisk motstand

Stort sett overalt hvor det går elektrisk strøm vil det finnes elektrisk motstand. Dette gjelder også i sporfeltkretsen. Elektrisk motstand kan defineres som et materials evne til å motstå strømgjennomgang. Hvis vi ønsker, kan vi skille mellom motstand som finnes i kretsen «av seg selv» altså hvor den ikke har noen funksjon, men kun er noe man må forholde seg til, eller motstander som settes inn i kretsen. Ved å legge inn en slik motstand kan en for eksempel begrense mengden av strøm som flyter gjennom kretsen i henhold til den velkjente ligningen Ohms lov [15, s.52]:

$$U = R \cdot I, \quad (2.2)$$

hvor U er spenningen over motstanden, I er strømmen gjennom den og R er motstandsverdien (eller resistansen).

I motstander hvor det går elektrisk strøm, forbrukes energi. Hvor mye energi som forbrukes pr tid er som kjent effekten P , og er gitt som:

$$P = U \cdot I. \quad (2.3)$$

Ved å substituere 2.2 inn i 2.3 får vi:

$$P = R \cdot I^2 \quad (2.4)$$

Denne effekten forbrukes i form av varme, altså oppvarmingen av motstanden. Motstander har ulik terskel for hvor mye effekt de kan håndtere uten å bli overopphetet eller ta skade. Dette er angitt som «nominell effekt» ⁶. Det er naturligvis viktig at motstander har en nominell effekt som er tilstrekkelig

⁴ også kalt «fasevinkelen»

⁵ se tabell 3.4

⁶Eng.: *Power rating*

høy for å takle normal kjøring i systemet den er en del av. Allikevel kan klokt valg av nominell effekt til resistorer sørge for at komponenter blir skjermet for skadelig høye strømmer ved at motstanden går i stykker først og bryter kretsen som en sikring. I ett enkelt sporfelt finnes innlagte motstander både på tilførsel- retursiden. På retursiden har man motstand for å sikre at det ikke går tilstrekkelig strøm til å trekke reléet (og dermed angi fritt spor) når det finnes materiell på feltet.

Den inverse størrelsen av resistans er ledningsevne eller *konduktans*. Den betegner heller hvor *godt* strøm ledes, med symbol G og måles i Siemens [S]. Sammenhengen mellom resistans og konduktans er gitt av:

$$G = \frac{1}{R} \quad (2.5)$$

Konduktansen i skinnestrengen skal helst være så høy som mulig (alså lav motstand) . Ved lav konduktivitet vil mer av tilførselsstrømmen gå tapt i sporet, som gjør at mindre av strømmen når returkretsen. I tillegg er jernbanesviller ikke nødvendigvis perfekte isolatorer, noe som gjør at det også kan gå utilsiktet strøm mellom skinnene eller andre veier «til jord». Dette kalles «avledning» og høy avledning vil naturlig nok også bidra til lavere strømverdier i returkretsen. For å sørge for at avledningen er tilstrekkelig lav isoleres svillene fra skinnene i festepunktene mellom de to [9, s.160] ⁷.

Kondensator

For å sikre 90° faseforskjell mellom lokalfase og sporfeltfase benyttes en kondensator på lokalfasen. Kondensatorer har som egenskap at strømmen gjennom den er proporsjonal med endringen i spenning pr tid:

$$i = C \frac{dv}{dt} \quad (2.6)$$

hvor proporsjonalitetskonstanten C er kapasitansen til den aktuelle kondensatoren.

Vekselsspenningen som påtrykkes kondensatoren kan sees på som et sinussignal, og vi får med det et cosinus-formet strømsignal. Det antas her kjent at den tidsderivate av et sinussignal er et cosinussignal. Da oppnår man en 90° faseforskjell (eller fasevinkel) mellom strømmen og spenningen i lokalfasen, og dermed også mellom strømmene i lokal- og returfase. Strømmen i sporfase vil ligge 90° eller en kvart periode *foran* returfasen. ⁸. Dette utledes i forfatters prosjektoppgave [8] hvis leseren er interessert.

Spole/filterimpedans

Det er som nevnt nødvendig at sporfeltstrømmen ikke lekker over til andre nabofelt. Det er imidlertid ikke bare sporfeltstrøm - eller «signalstrøm» som går i skinnene. Dette beskrives nærmere i 2.2.2. Spoler benyttes i kretsen som passive filtre, såkalte «filterimpedanser» for å kunne bestemme hvilken del av strømmen som skal stoppes, og hvilken som skal føres videre. Med «hvilken del av strømmen» menes det implisitt at det finnes strømmer i skinnene med forskjellig frekvens, og ved å benytte filterimpedanser som spole kan en sørge for at for eksempel kun den delen av strømmen med lavest frekvens passerer gjennom filteret [8, s.10].

Den praktiske bruken av filterimpedanser kommer tydeligere frem i *seksjon 2.2.2*, hvor påvirkningen av kjørestrømmen beskrives.

⁷I forfatters prosjektoppgave [8] ble påvirkningen av nedbør på sporets avledning undersøkt i forbindelse med sporfeltovervåkningspilot tilknyttet heimdal stasjon.

⁸Den samme øvelsen kan gjøres med en cosinusformet inngangssignal, som gir en sinusformet strøm med motsatt fortegn, som også leder til 90° «forsprang» på for strømmen

Transformator

I vekselstrømsporfelt finnes transformatorer i begge ender av feltet, både på forskyningssiden og retur-siden. Transformatorer er laget av to spoler som er viklet rundt en felles jernkjerne. Disse to viklingene kalles henholdsvis «primær-» og «sekundærsiden»⁹ Denne jernkjernen sørger for at de to spolene er «magnetisk koblet». Det beskriver at ved en vekselstrøm påtrykket den ene spolen, vil det i det ideelle tilfellet induseres en tilsvarende vekselstrøm i den andre. Transformatorer kan også benyttes til å transformere spenningen¹⁰ ved å benytte et forskjellig antall viklinger, eller runder rundt jernkjernen i primær- og sekundærspolen. Spenningene over hver spole i en ideell transformator er gitt som

$$\frac{V_1}{N_1} = \frac{V_2}{N_2}, \quad (2.7)$$

hvor V_n er antall viklinger i spole n , og V_n er spenningen over spole n

Ved å benytte transformatorer oppnår man flere gunstige effekter. Jernkjernen i en transformator magnetiseres når det påtrykkes en vekselstrøm på den ene spolen, og magnetiseringen øker med spenningen man påtrykker. Det er imidlertid praktiske grenser for hvor mye en jernkjerne kan magnetiseres, og denne grensen kalles transformatorens «metningspunkt». Hvis man påtrykker så mye spenning at transformatoren «går i metning» vil den induserte spenningen i sekundærspolen ikke lenger øke i takt med påtrykte signalet, men betraktelig saktere [9, s.187]. I for eksempel kraftproduksjon er dette en uønsket egenskap ved transformatoren, ved at man ikke får transformert all den påtrykte spenningen. I sporfelt er transformatorens evne til å gå i metning en sikkerhetsbarriere slik at ved tilfeller av store uønskede strømmer på sporfeltet, vil ikke alt flyte gjennom transformatoren, og derfor beskyttes komponentene på sekundærsiden. I dette tilfellet er det snakk om returkretsens sårbare komponenter som sporfeltreléet. Slike strømmer vil kunne forekomme fra KL-anlegget og beskrives nærmere i 2.2.2.

2.2.2 Kjøreledningsanlegget (KL-anlegget)

Det elektriske anlegget som har til hensikt å levere motorkraft for å drive togtrafikken kalles kjøreledningsanlegget, og strømmen som går kalles gjerne kjørestrømmen eller banestrømmen. Den første elektrifiserte strekningen var Oslo V - Drammen, og strekningen ble elektrifisert i 1922. Kjøreledningen ble bestemt å ha en forsyningsspenning på 15kV og frekvens $16\frac{2}{3}$ Hz [9].

Denne strømmen forsynes ved hjelp av statiske transformatorer, og går fra omformerstasjon, også kalt matestasjon, gjennom kontaktledningen til trekraftaggregatet og via skinnene tilbake til matestasjonen. Banestrømmen i skinnene er gjerne i størrelsesorden hundrevis av Ampere, til forskjell fra sporfeltstrømmen i skinnene som ikke er høyere enn 10 Ampere. Banestrømmen har av denne grunn stort potensiale til å påvirke sporfeltkretsen.

Banestrømmens returvei er imidlertid ikke alltid begrenset til togskinne. Av og til, spesielt ved høye strømmer finner strømmen også andre veier til «jord». Dette kan for eksempel være gjennom kabler, rør, gjerder eller annen utrustning ved sporet. For å unngå slike jordstrømmer, som kan være potensielt skadelig både for mennesker og materiell, benyttes såkalte «sugetransformatorer». En sugetransformator er «en strømtransformator med omsetningsforhold 1:1 med primærvikling koblet til banestrømkretsen og sekundærvikling koblet til returkretsen for å føre returstrømmen tilbake til matestasjonen. Suge-transformatoren bidrar til å styre returstrømmen inn mot returkretsen som består av returledere og/eller kjøreskinne.»[12].

⁹Primær- og sekundærvikling, eller -spole brukes også

¹⁰endrer spenningen på signalet

KL i enkeltisolert sporfelt

I enkeltisolert sporfelt har én av skinnestrengene isolert skinneskjøt mellom hvert sporfelt. Den andre skinnen er uisolert helt til matestasjonen, og benyttes som returledning av banestrømmen. I det idelle tilfellet fører dette til at ingen banestrøm flyter til verken sporfeltets tilførsel- eller returkrets, da banestrømmen har sin «egen» tapsfrie linje. Ingen strøm vil flyte i forgreininger til en krets som har en kortslutning til jord. Men linjen er som kjent ikke tapsfri, og har i følge «Arbeid i signalanlegg 1» [9, s.184] en motstand for banestrømmen på om lag $0,2 \Omega/\text{km}$. Det gjør at noe av strømmen vil finne veien om sporfeltkretsen. Selv ved kun en liten andel av banestrømmen som tar denne veien, vil mengden banestrøm i forhold til sporfeltstrøm kunne bli betydelig, fordi den totale strømstyrken i banestringen er så høy. Dette problemet vil være større med økende banestrøm og økende sporfeltlengde.

KL i dobbeltisolert sporfelt

I motsetning til enkeltisolert sporfelt benytter en i dobbeltisolert sporfelt ikke én enkel skinnestreng for å returnere banestrømmen til matestasjonen, men begge. På denne måten oppnår man i det idelle tilfellet at banestrømmen ikke bidrar til spenningsforskjell mellom skinnestrengene. Av Ohms lov har vi derfor at det heller ikke vil «trekkes» noe strøm mellom dem. Sporfeltkretsen går nettopp fra den ene skinnen til den andre, og vil på grunn av *superposisjonsprinsippet* [15, s.144] gå som om det ikke var banestrøm i skinnene. Ved å benytte dobbeltisolert sporfelt vil altså *ikke* linjemotstand i seg selv medføre banestrøm i sporfeltkretsen.

Isolering av hvert sporfelt er som nevnt nødvendig for at hver sporfeltstrøm kun skal kunne påvirke sitt eget sporavsnitt. Der er allikevel nødvendig at banestrømmen får anledning til å flyte tilbake til matestasjonen. KL-strømmen må altså føres over denne skjøten, uten at sporfeltstrømmen er med. Sagt på en annen måte må banestrømmen *filtreres ut*. Til dette formålet benyttes *filterimpedanser*. Som nevnt i *seksjon 2.2.1* er spenningen over en spole avhengig av frekvensen i strømmen gjennom den. Et strømsignal med høyere frekvens vil dermed oppleve en høyere motstand¹¹ enn strømkomponenter med lavere frekvens. I kraft av at banestrømmen har vesentlig lavere frekvens ($16\frac{2}{3}\text{Hz}$) enn sporfeltstrømmen ($95/105\text{Hz}$) vil den flyte lettere over spolene og videre til neste sporfelt enn sporfeltstrømmen.

Dobbeltisolerte sporfelt baserer seg altså på at det går like mye banestrøm gjennom begge skinnestrengene. Hvis det derimot ikke gjør det, får vi spenningsforskjell mellom dem og banestrøm i sporfeltkretsen. Dette skjer om de to skinnene opplever forskjellig impedans, for eksempel ved motstandsforskjell i de to skinnene, eller ulik avledning til jord [9, s.185].

2.2.3 Fordeler og ulemper med sporfelt som deteksjonsmetode

Sporfelt som metode har som vist en rekke kriterier som må være tilfredsstillt for at det skal kunne fungere som togdeteksjonsmetode. Sporfeltreléet er laget på en slik måte at hvis disse kriteriene ikke er tilfredsstillt vil det naturlig falle av på grunn av tyngdekraften. Denne virkemåten gjør at sporfeltet opptrer «fail-safe». Dette betyr at feil på sporfeltet gjør at systemet settes i en sikker tilstand. Og i sporfeltsammenheng betyr sikker tilstand at signallyset blir rødt for det aktuelle sporavsnittet. Dette gjør at vi ikke skal kunne få det motsatte tilfellet, at det gis klarsignal, selv om sporfeltet i realiteten er opptatt av rullende materiell.

På den annen side så vil enhver feil (uten bruk av tilstandsovervåking) føre til samme konsekvens, altså signal om belagt sporavsnitt. Dette gjør feilsøking iboende utfordrende, da feilen i prinsippet kan

¹¹Egentlig impedans

ligge på hele sporfeltet. Som beskrevet i de to foregående seksjonene har økende banestrøm ¹² ført til utfordringer i sporfeltet, da det skal mindre «ubalanse» til i sporet for at dette fører til banestrøm i sporfeltkretsen. Sporfelt som togdeteksjonsmetode er i følge Jørgen Torgersen i Bane NOR en teknologi som skal utfases sammen med innføringen av *akseltellere* og ERTMS. Det kan også være problematisk å skaffe reservedeler til sporfeltsystemet, da disse i økende grad går ut av produksjon.

2.3 Tilstandsovervåking av sporfelt

Tilstandsovervåking handler om å holde øye med variabler og parametre som kan si noe om tilstanden til et system. Det er i utgangspunktet ikke grenser for hvilke parametre som kan inngå i tilstandsovervåking. Ved å velge hensiktsmessige metoder og parametre ønsker en å få innsikt i systemet i en større grad enn man ellers ville kunnet oppnå. Slik innsikt kan inkludere kunnskap om for eksempel ledningsevne, varmegang, energiforbruk, funksjonsnivå eller lignende. Ved å overvåke relevante parametre systematisk med hensiktsmessig hyppighet, vil man kunne finne mønstre som gjør en i stand til å lettere oppdage avvik slik at man vil kunne få et bedre grunnlag for vedlikeholdsbeslutninger. I tillegg åpner logging og lagring av parameterverdier over tid for mer effektiv feilsøking, noe som er spesielt viktig i sporfelt, som nevnt i seksjon 2.2.3.

I norsk jernbane finnes det flere eksempler på bruk tilstandsovervåking. De viktigste inkluderer sporvekselovervåking, hvor man benytter effektkurvene til drivmaskinene til å vurdere funksjonsnivå. Måten det gjøres på er at det defineres en *optimal* effektkurve ved sporvekselomlegging som måles når den aktuelle drivmaskinen er i ideell tilstand, som fungerer som referanse. Så sammenlignes kurvene med denne referansen ved hver omlegging med tilhørende advarsler eller alarmer hvis avviket er for stort. Forskjellige typer avvik kan gi ulike forslag til diagnose og utbedring av vekslet. Dette er en viktig satsning i følge Jørgen Torgersen i Bane Nor, da problemer med sporveksler har vært en stor kilde til forsinkelse i togtrafikken. Denne typen tilstandsovervåking har vist seg effektiv og utrullingene skjer nå i stor skala. Andre eksempler er jordfeilovervåking, oppvarming av kalde sporveksler og akustisk «lytting» på hjullagrene i forbipasserende tog.

I sporfeltovervåking benyttes strøm som tilstandsvariabel. Pilotprosjektet som ble utført på sporfeltene tilknyttet Heimdal og Selsbakk stasjon høsten 2016 benyttet strømsensorer på retursiden av sporfeltet. Det ble i tillegg benyttet en filterenhet, som gjennom sammenligning og evaluering ble besluttet å være unødvendig [8]. ¹³. Videreføringen av denne piloten ble våren 2017 realisert i 25 sporfelt tilknyttet Nationaltheateret i Oslo. Denne gangen med strømovervåking på både tilførsel- og returside. Effektivverdien av strømmen, den såkalte RMS-verdien, logges opptil flere ganger i sekundet.

2.4 Sporfeltovervåking på Nationaltheateret

Det er implementert sporfeltovervåking på 25 sporfelt på Nationaltheateret. Alle sporfeltene er av typen 95/105 Hz. Sporfeltovervåkingen ble implementert i mars 2017 med overvåking av effektivverdien (RMS-verdien) av strømmen både på tilførsel- og retursiden og er levert av Voelstapine.

Til å gjøre strømmålingene benyttes strømsensorer (CMS-102DR) som kobles til kontrollmodul (CMS-700 control unit) fra ABB og signalene går derfra til en minilogger laget av Voelstapine, som sender verdiene på nettet ¹⁴. *Figur 2.4* viser komponentene benyttet til Nationaltheaterets sporfeltovervåking.

¹²noe som er naturlig ved økende trafikk og elektrifisert jernbane

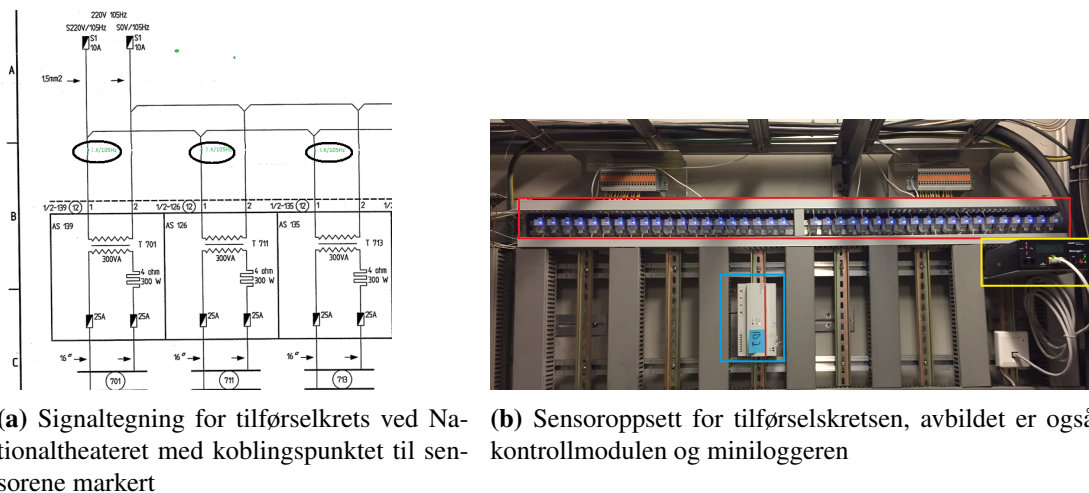
¹³Dette var en av elementene som var gjenstand for undersøkelse i forfatters prosjektoppgave

¹⁴Dette er en ny konfigurasjon i forhold til oppsettet tilknyttet i Heimdal som behandles i [8]



Figur 2.4: Komponenter benyttet til strømmåling på Nationaltheateret

Konfigurasjonsfilen til loggeren kan en definere kriterier for sending av data, alarmverdier og lignende. Dataloggeren sender i utgangspunktet kun data ved en endring fra ett datapunkt til det neste på mer enn en definert «delta» (for eksempel 10 mA), men sender uansett ett datapunkt hvert kvarter, uavhengig av endring. Det benyttes i hovedsak kablet nett fra loggerne. Disse datasendingene kalles «events» og disse eventene kan være av forskjellig art, for eksempel kan man ha eventer med alarmverdier hvis strømmen befinner seg i et verdiområde som betyr at noe er galt. Signaltegning og fotografier av det fysiske oppsettet sees i *figurene 2.5 2.6b*



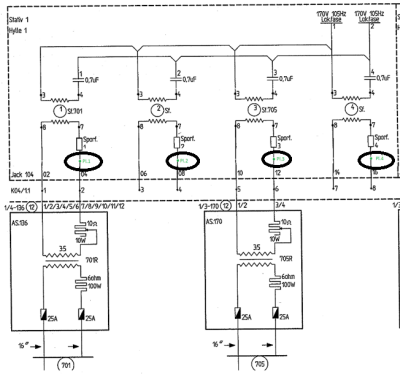
(a) Signaltegning for tilførselskrets ved Nationaltheateret med koblingspunktet til sensorene markert
(b) Sensoroppsett for tilførselskretsen, avbildet er også kontrollmodulen og miniloggeren

Figur 2.5: Oversikt over tilførselmåling på Nationaltheateret

Dataen sendes så via internett til visningslaget. Informasjonsflyten i tilstandsovervåkingen kan sees i figur 2.7.

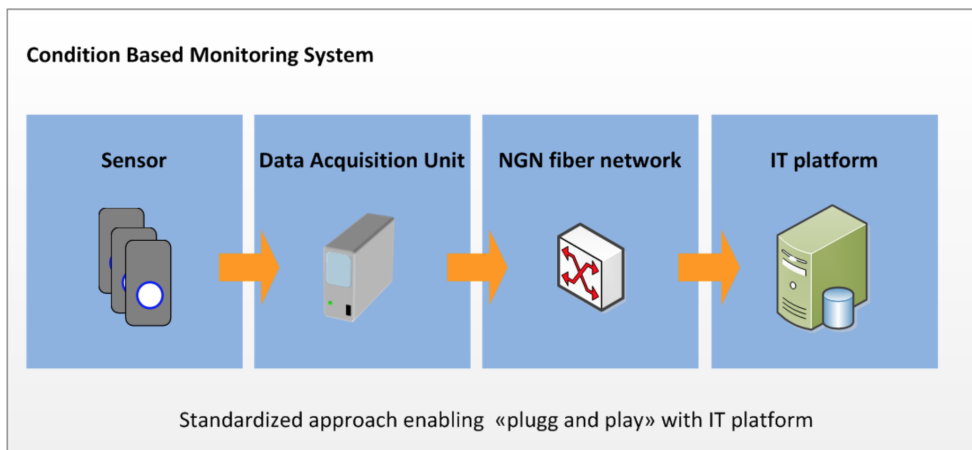
2.5 Visningslaget

Visningslaget til Jernbaneverkets nåværende løsning for tilstandsovervåking kalles «Roadmaster» og leveres også av Voelstapine. Roadmaster er realisert som en web-applikasjon hvor man kan inspisere hvert sporfelts verdier over tid. Per nå er grensesnittet veldig enkelt for sporfelt med grafer tilhørende hvert sporfelt, konfigurerbart tidsvindu (periode man ser på) og listevisning for alarmer i perioden. I følge Jørgen Torgersen er en ny versjon på trappene, som inneholder flere av de funksjonene som ble etterlyst i forfatters prosjektoppgave [8], blant annet enklere sammenligning av de forskjellige spofelt.

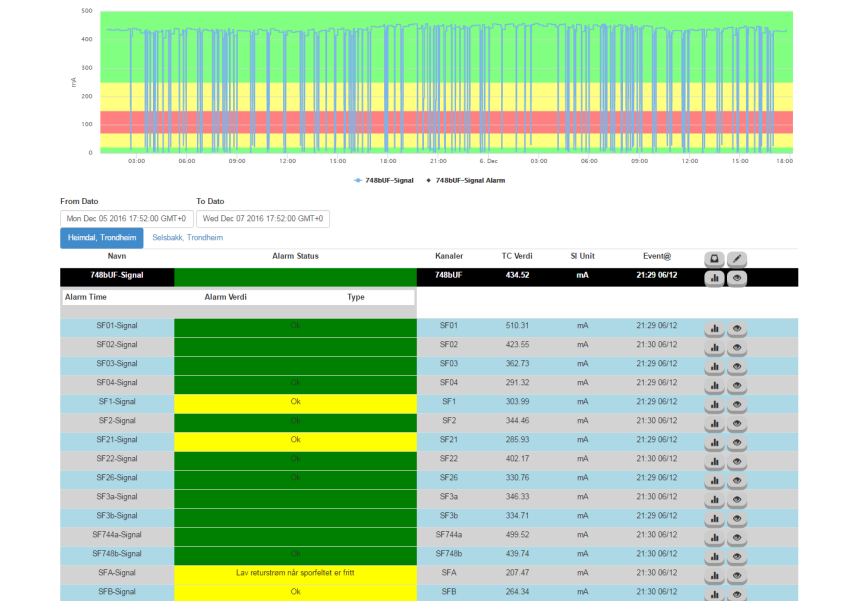


(a) Signaltegning for returkrets ved Nationaltheateret med koblingspunktet til sensorene markert
 (b) Sensoroppsett for tilførselskretsen, avbildet er også sporfeltreléer

Figur 2.6: Oversikt over returnmåling på Nationaltheateret



Figur 2.7: Overordnet informasjonsflyt tilstandsovervåking, hentet fra Jernbaneverkets dokumentasjon



Figur 2.8: Roadmaster - visningslaget i sporfeltovervåkingen

2.6 Softwaresimulering

Ved å lage simuleringer av sporfeltsystemet ønsker man å enklere få innsikt i hvordan kretsen oppfører seg. Med et godt simuleringsverktøy kan man endre parametre og forhold for å demonstrere spesifikke situasjoner på en tydeligere måte enn man kan ved kun teori (lærebøker osv.). På Jernbanskolens lokaler i Groruddalen befinner det seg en fysisk sporfeltsimulator. Dette er miniatyrversjon av et sporfelt med innlagte motstander som emulerer linjemotstand, og er komplett med sporfeltrelé og tilførsel- og returtransformatorer. Denne simulatoren kan være nyttig for å gjøre seg kjent med sporfeltkonseptet og fysisk kunne se hele systemet. Desverre er ikke banestrømmen, som vanligvis også går gjennom skinnene i et sporfelt, inkludert i denne simulatoren, og den er derfor ikke nyttig til å demonstrere forstyrrelse fra banestrømmen.

2.6.1 MATLAB

Simuleringen er realisert ved hjelp av MATLAB. MATLAB er et omfattende matematikkprogram med utallige bruksområder og verktøy. MATLAB har et eget skriptspråk basert på C og benyttes blant annet til matriseregning, simuleringer, bildebehandling, plotting av funksjoner og mye mer. Språket er et såkalt «fjerde-generasjons programmeringsspråk» som betyr at det er et språk med høyt abstraksjonsnivå, er enkelt lesbart og programmeringsvennlig. Fordelene med dette er at brukeren skal kunne bruke en større del av tiden på å løse oppgaver, og mindre tid på å forholde til seg den indre virkemåten til språket, som for eksempel minnebruk.

En annen styrke ved MATLAB er de mange «verktøykassene»¹⁵ som er pakker som kan inkluderes for å utvide funksjonaliten. To av disse pakkene er nettop «Simulink» og «Simscape».

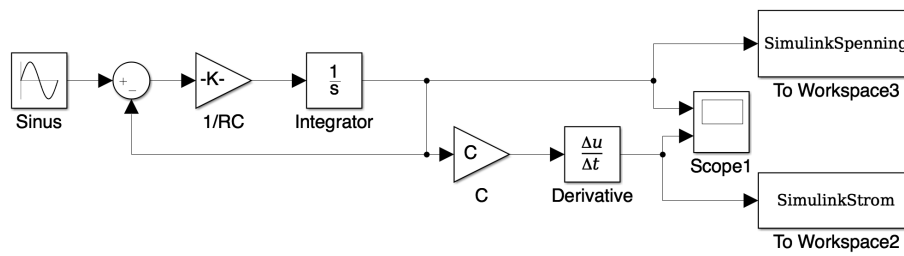
Simulink og Simscape

Simulink er et grafisk simuleringsverktøy i MATLAB som gjør bruk av «blokkdiagrammer» for multi-domene simuleringer. Simulink kan blant annet benyttes til å bygge matematiske modeller, simulere reguleringsverktøy og signalbehandling. Simulink er integrert med MATLAB, noe som gjør at en kan benytte algoritmer laget i MATLAB i Simulink-modeller og eksportere simuleringsresultater for plotting og videre analyse [4].

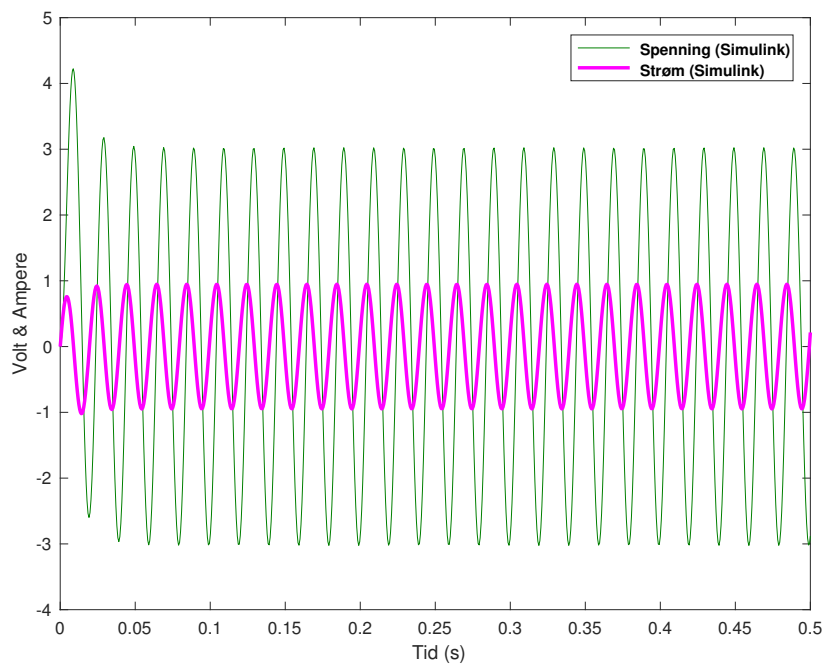
«Simscape» gjør en i stand til å simulere systemer i det fysiske domenet integrert i Simulinkmiljøet. Dette betyr at en kan benytte modeller av fysiske komponenter direkte i simuleringen til forskjell fra å beskrive det med matematiske ekvivalenter. Komponenter fra Simscape-biblioteket kan integreres i blokkdiagrammer og en kan designe egne Simscape-komponenter ved hjelp av MATLABs skriptspråk.

I Simscape finnes blant annet bibliotekene «Fluids», «Driveline», «Multibody», «Electronics» og «Power Systems». Simuleringene i denne oppgaven er for det meste realisert ved hjelp av komponenter fra Simulink og Simscapes «Electronics»-bibliotek. *Figurene 2.9 og 2.11* med det tilhørende plottene i *figur 2.10 og 2.12* viser en elektrisk krets med passive komponenter laget ved hjelp av komponenter fra henholdsvis Simulink og Simscape.

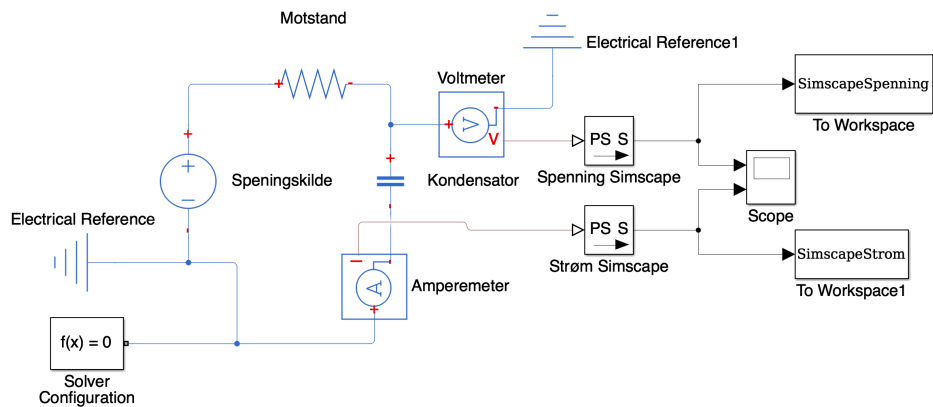
¹⁵Eng.: Toolboxes



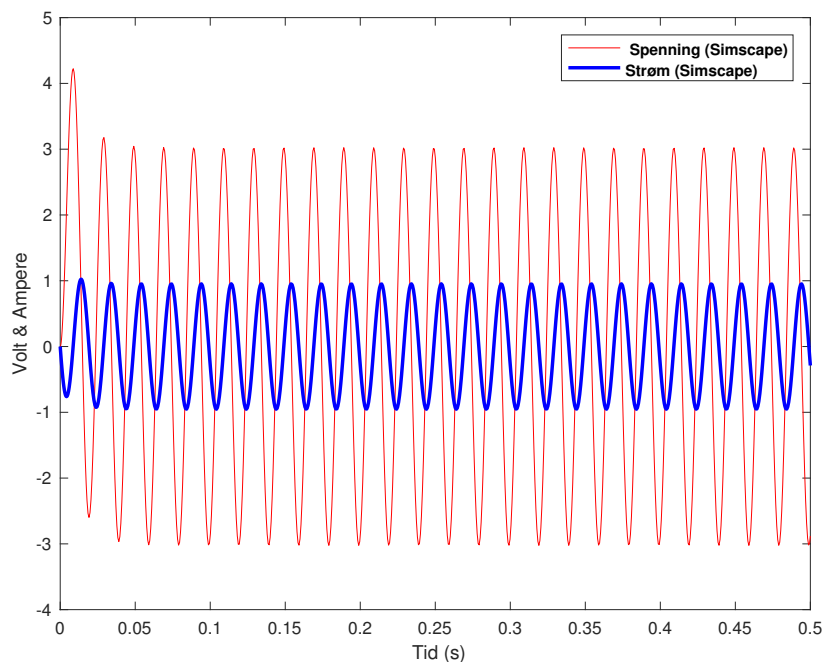
Figur 2.9: RC-krets laget i Simulink



Figur 2.10: Strøm og spenning fra Simulink-modellen



Figur 2.11: RC-krets laget i Simscape



Figur 2.12: Strøm og spenning fra Simscape-modellen

2.7 FMEA/FMEDA

En «Failure Modes and Effects Analysis» er en systematisk teknikk for å identifisere problemer. Det er en såkalt «bottom-up»-metode, som betyr at man starter med å se på bunnivå, altså komponentene i et system og benytte måten disse kan feile på, til å analysere systemet. Dermed går man gjennom hele systemet, én komponent av gangen.

2.7.1 FMEA-prosedyren

De nødvendige stegene som må til i en FMEA-prosess er [7, s.303]:

1. Opplisting av alle komponenter
2. For hver komponent, list opp alle feilmodi ¹⁶
3. For hver feilmodus, list opp hvordan dette påvirker nivået over
4. For hver feilmodus, list opp alvorlighetsgrad ¹⁷

2.7.2 FMEA-formatet

Dokumentasjonen som følger en FMEA-analyse ¹⁸ er en tabell. Det finnes forskjellige standarder for denne tabellen, ett eksempel er en tabell med ni kolonner: *Name, Code, Function, Mode, Cause, Effect,*

¹⁶Eng: Failure Mode

¹⁷Eng: Sverity

¹⁸Å skrive «FMEA-analyse» er egentlig «smør på flesk», da «a»-en i FMEA står for nettopp «analysis». Forfatter komme allikevel til å benytte denne skriveformen

Kolonnenavn	Beskrivelse
Navn	Navnet på den aktuelle komponenten eller modulen
Kode	Delnummer, komponentkode eller annen identifiserende kode
Funksjon	Beskriver funksjonen til komponenten
Modus	Én av feilmodiene til den aktuelle komponenten. Kan være flere feilmodi pr komponent. Det benyttes én linje per feilmodus
Årsak	Årsak til at feilmodus har oppstått. Vanligvis er dette den nærmeste feilårsaken. Eksempler er varmeutvikling, rust eller lignende.
Virkning	Hvordan feilmodusen påvirker systemet. Eksempler kan være hvordan et brudd forårsaker tap av strøm.
Kritikalitet	Hvor kritisk er feilen? Dette kan være i for eksempel «farlig», «harmløs» eller «kritisk». ¹⁹
λ	Beskriver feilraten (failure rate) knyttet til den spesifikke feilmodusen. Denne kolonnen er valgfri om analysen har kvalitativt fokus.
Bemerkninger	Her skrives kommentarer, relevant informasjon og gjerne forslag til forbedringer og så videre.

Tabell 2.1: Navn og beskrives på hver kolonne i en FMEA-analyse (norsk oversettelse av Anders S. Helmen)

Criticality, λ og *Remarks* [7, s.303]. Beskrivelse av hver av kolonnene finnes i tabell 2.1.

2.7.3 Failure Modes, Effects and Diagnostic Analysis (FMEDA)

I FMEDA-analyser legges det vekt på diagnostikk knyttet til de forskjellige feilmodi (failure modes). FMEDA er en utvidet versjon av FMEA, med de samme kolonnene i resultattabellen som FMEA, i tillegg til noen ekstra, knyttet til diagnostikk. I versjonen av FMEDA som benyttes i [7, s.306] finnes syv ekstra kolonner: *Detectable*, *Diagnostics*, *Mode*, *Safe Detected Failure Rate(SD)*, *Safe Undetected Failure Rate (SU)*, *Dangurous Detected Failure Rate (DD)* og *Dangurous Undetected Failure Rate*. Som beskrevet i tabell 2.2 ser vi at de fleste av disse kolonnene regnes ut matematisk for å kvantisere hyppigheten av de forskjellige detekterbare og ikke-detekterbare registrerte feilmodi. Ved bruk av kvalitativ FMEA/FMEDA som nevnt i seksjon 2.7.1 vil disse kolonnene dermed ikke være aktuelle. Analysen i dette arbeidet vil være kvalitativ.

Kolonnenavn	Beskrivelse
Detekterbarhet	Denne kolonnen angir om hvorvidt en feilmodus er detekterer online. Dette denoteres med enten nummeret «1» eller «0» for henholdsvis detekterbar eller ikke.
Diagnostikk	Angir hvordan den gjeldende feilen diagnostiseres, eksempel er «strømmen faller» eller «bryteren faller av»
Modus nr.	Angir kategori for den feilmodusen, ved hjelp av tall eller bokstaver. I tilfellet hvor de to kategoriene er «trygg» og «farlig» kan en for eksempel benevne med «0» eller «1».
Trygge oppdagede feil-rate	Regnes ut ved å multiplisere λ , «modus nr.» og «detekterbarhet».
Trygge ikke-oppdagede feil-rate	Regnes ut ved å multiplisere λ , «modus nr.» og 1 - «detekterbarhet».
Farlige oppdagede feil-rate	Regnes ut ved å multiplisere λ , 1- «modus nr.» og «detekterbarhet».
Farlige ikke-oppdagede feil-rate	Regnes ut ved å multiplisere λ , 1- «modus nr.» og 1 - «detekterbarhet».

Tabell 2.2: Navn og beskrives på de ekstra kolonnene i en FMEDA-analyse (*norsk oversettelse av Anders S. Helmen*)

Metode

I dette kapittelet beskrives de arbeidsmetodene som er benyttet for å innhente og bearbeide relevant fagkunnskap som ligger til grunn for denne rapporten. En stor del av dette kapittelet er viet til beskrivelse av simuleringsoppsettet fra et enkelt og minimalistisk oppsett til et relativt komplekst verktøy.

3.1 Utfordringer med rapporten

I starten av arbeidet gikk det med en del tid på å finne et godt simuleringsverktøy. Mange verktøyer som finnes tilgjengelig er svært enkle med lite funksjonalitet. Valget av verktøy falt til slutt på Simulink da forfatter har mye erfaring med bruk av dette tidligere, dog aldri med Simscape. Det har gått med mye tid på å sette seg inn i dette, i tillegg til å beslutte hvor omfattende sporfeltsimuleringen skal gjøres.

Når det gjelder FMEDA-analysen var ambisjonen i utgangspunktet at den skulle framstå som en mer eller mindre fullstendig feilmodioversikt. Men på grunn av manglende kildemateriale var det utfordrende å utvide omfanget på den uten at dette måtte basere seg på andres erfaringer. Derfor ble det besluttet at feilmodioversikten ikke skulle beskrive situasjoner som ikke var innenfor omfanget til simuleringene. På denne måten unngår man å gå i den samme fellen som simuleringen har som mål å unngå, nemlig å basere systemforståelsen på ikke-testbare antakelser.











I arbeid med oppsett for simulering har fokus i første omgang vært å benytte informasjon fra fagbøker og teknisk regelverk. På denne måten vil en kunne vurdere hvor langt disse kildene holder for å beskrive sporfeltets dynamikk. Enkelte av komponentenes spesifikasjoner har vært utfordrende å få tak i, noe som har gjort at de enten er blitt estimert eller blitt erstattet av mer ideelle komponenter.

3.2 Simuleringsoppsett


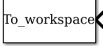












Her følger en beskrivelse av simuleringsoppsett slik det er utformet i Simulink. Det har vært fokus på å kunne demonstrere den enkleste funksjonalitet først, før utvidelse og mer komplekse virkemåter.

3.2.1 Komponentliste i simulering

Som nevnt i 2.6.1 er komponenter fra Simscape og Simulink benyttet. I *tabell 3.1* og *3.2* finner vi komponentene benyttet i henholdsvis Simscape og Simulink, med en kort beskrivelse.

Symbol	Navn og funksjon
	Resistor, spesifiserer motstand med operasjonsgrenser.
	Spenningskilde, spesifiserer amplitude, fase og frekvens på spenning.
	Kondensator, spesifiserer kun kapasitans.
	Ideell spole, spesifiserer kun induktans.
	Amperemeter, benyttes til strømmåling
	Voltmeter, benyttes til spenningsmåling
	Ideell transformator
	Jording (elektrisk referanse), trengs i enhver krets, i tillegg til på hver side av en transformator
	RMS-blokk, omgjør et vekselsignal til Root Mean Square-verdien. Blokken benytter en basis-frekvens som input.
	Kretsbytter, sammenligner et spenningssignal med en terskel for å bestemme om kretsen skal være åpen eller lukket.

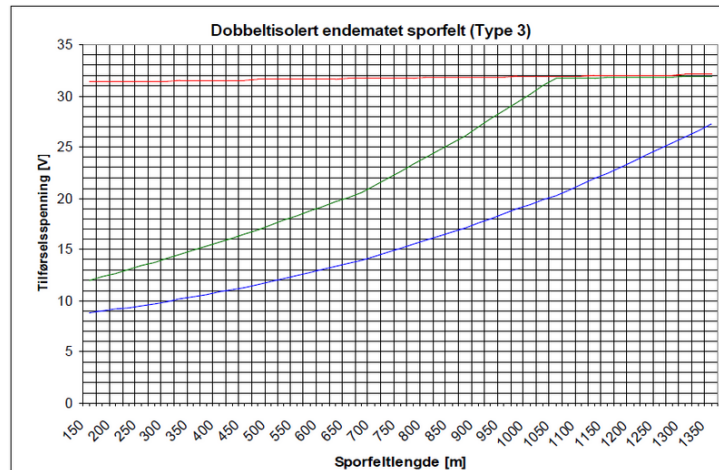
Tabell 3.1: Aktuelle Simscape-komponenter

Symbol	Navn og funksjonalitet
	Solverkonfigurasjon, trengs for spesifikasjon av simuleringsparametre ved bruk av Simscape
	«To workspace»-blokk, sender simuleringsdata som «Timeseries Object» til MATLABs workspace. Dett gjør dataen tilgjengelig for manipulasjon ved hjelp av MATLABs øvrige verktøy, eller plotting.
	Trigonometriske funksjoner.
	Radianer til grader
	Matematisk produkt
	Konvertering fra Simscape-datatype til Simulink-datatype. Dette er nødvendig for å benytte Simulink-biblioteket på signaler fra Simscape.
	Matematisk funksjon
	Konstant input
	Forsterkning av signal (Eng.: gain)
	Display, viser nåverdi av et signal.
	Bryter, benytter en logisk betingelse for å bestemme hvilket av to signaler som sendes videre.
	MATLAB-funksjon. Blokken gjør at simulinksignaler kan benyttes som input og evalueres i egendefinerte matlabfunksjoner under simulering, på samme måte som en ordinær Simulink-blokk
	Subsystem, benyttet for å gjemme kompleksitet i undersystemer i simulink.
	Pulsgenerator, gir ut en eller flere «firkant-signal», eller pulser med en bestemt høyde og bredde.

Tabell 3.2: Aktuelle Simulink-komponenter

3.2.2 Instilling og justering av sporfelt

På Bane NORs *Tekniske regelverk* finnes regler og tabeller for instilling av sporfelt. Tabellen 3.3 og 3.4 sammen med figur 3.1 gir justeringsregler for type 3 vekselstrømsporfelt (95/105 Hz) [2] og benyttes som «fasit» i simuleringsoppsettet. Med det menes at verdiene i simuleringen er satt slik at de best mulig tilfredsstiller de samme reglene som relle sporfelt.



Figur 3.1: Instillingsverdier Dobbeltisolert endematet sporfelt (Type 3) [2]

Tilførselskrets

	Beskrivelse	Grenseverdi
1	Kontroller at tilførselskretsen er bygget opp som vist på figur 2.3	
2	Sporfeltets totale lengde fastsettes i henhold til kabelplan og sporisolering.	
3	Tilførselspenningens innstillingsverdi E avleses i forhold til sporfeltets lengde i fig. 3.1. Tilførselstransformator tilkobles det uttaket som er nærmest den avleste verdi. MERK: Spenning må aldri overstige øvre grense.	Ref. fig. 3.1
4	Mål tilførselspenning E_T på tilførselstransformator	Ref. fig. 3.1: Øvre grense $> E_T >$ nedre grense
5	Kortslutt sporet ved tilførselsenden med en motstand på: <ul style="list-style-type: none"> • 0,2 Ω for sporfelt på linjen • 0,5 Ω for sporfelt på stasjonen og mål sporspenning U_T . Fjern kortslutning i sporet.	$< 1,5V$
6	Mål sporspenning U_T og strøm i_T	
7	Kontroller motfase over isolerte skjøter	

Tabell 3.3: Instillingsverdier tilførselskrets, hentet fra *Teknisk regelverk*, bearbeidet av Anders S. Helmen [2]

Returkrets

	Beskrivelse	Grenseverdi
1	Kontroller at returkretsen er bygget opp som vist på figur 2.3	
2	Juster kabelmotstand R_K slik at total motstand i returkrets blir 10Ω	10Ω
3	Mål sporspenning U_R og strøm i_R	
4	Kortslutt sporet med en regulerbar motstand. Juster motstandsverdien og kontroller at spenningen $U_R \geq 1,5V$ når sporfeltreleet faller.	$> 1,5V$
5	Kontroller motfase over isolerte skjøter.	
6	Mål spenning $U_{spor.f.}$ i releets sporfase	
7	Mål Strøm $i_{spor.f.}$ i releets sporfase. Dersom $i_{spor.f.} < 250mA$ bør forhold undersøkes Dersom $i_{spor.f.} > 500mA$ bør tilførselspenning reduseres.	$200mA < i < 500mA$
8	Mål spenning $U_{lok.f.}$ i releets lokalfase.	$170 V$
9	Mål fasevinkel mellom sporfase og lokalfase.	$90^\circ \pm 30^\circ$

Tabell 3.4: Instillingsverdier returkrets, hentet fra Teknisk regelverk, bearbeidet av Anders S. Helmen [2]

3.2.3 Oppbygning av simuleringen

Som nevnt i 1 er simuleringen av «sporfelt Type 3 - Dobbeltisolerte sporfelt for stasjon og linjen». I figur 2.3 sees skjematisk beskrivelse av oppbygningen av sporfelt type 3, med tilhørende verdier til hver komponent. Det er denne modellen den første versjonen av simuleringen er basert på, vist i figur 3.2.

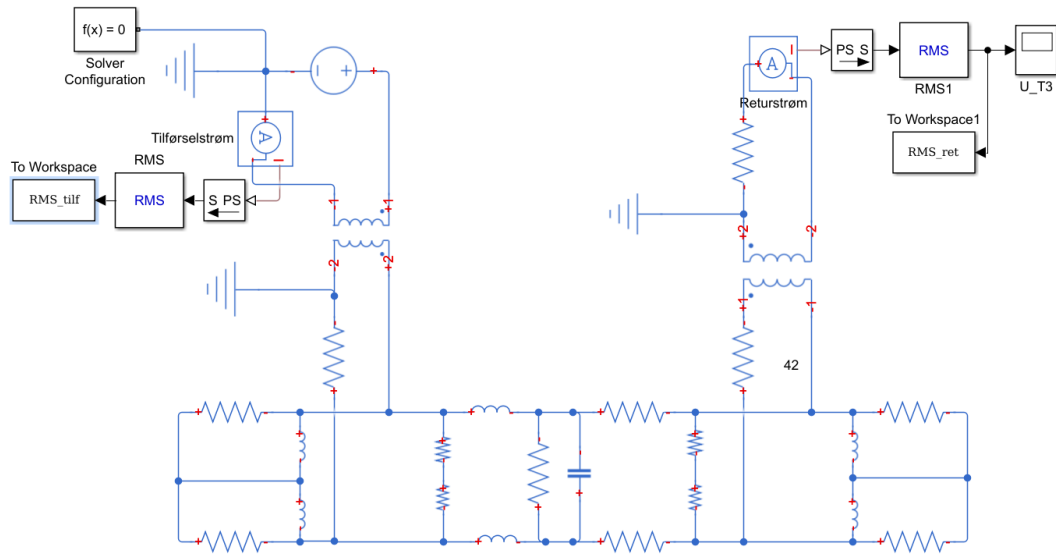
3.2.4 Versjon 1 - Enkeltestående sporfelt uten kjørestrøm

Av komponenter ikke avbildet i figur 2.3 har vi de horisontale langsgående resistorene som modellerer den elektriske motstanden i selve sporet og den midtre vertikale resistoren, som representerer avledning mellom skinnene (og til «jord» via omgivelsene). Størrelsen på disse verdiene er baert på en linje ca 400m lang linje med avledning som gitt i [9, s.160] Videre er kapasitansen som oppstår mellom skinnene, hvis noen, er modellert med kondensatoren koblet på hver skinnestreng. Spolene langs med skinnene er til for å simulere induktansen i linjen ¹. På hver side av disse finnes seriekoblede motstander på tvers av skinnene. Disse benyttes til simulering av togaksling på linjen. Det benyttes to resistorer på hver side for å kunne benytte «fault»-egenskapen til resistorer i Simscape, til å «slå av og på» kortslutningen ². Et designmessig valg har vært å benytt to av disse, slik at man har to steder det kan plasseres tog på sporfeltet.

Helt til høyre og venstre i figur 3.2 er filterimpedansene (spolene) plassert, og resistorene er store motstander som representerer den isolerte skinneskjøten som finnes mellom nabosporfelt. Denne modellen har ingen nabofelt, og inneholder derfor ingen dynamikk mot disse. Strømmålingene svarer til målemetoden som benyttes på sporfeltene tilknyttet Nationaltheateret, med RMS-måling på tilførsel- og returside. Virkemåten til tofase-reléet er ikke tatt med.

¹Det er ikke brukt særlig tid på å kalibrere disse verdiene, etter råd fra Ben Tollefsen.

²Det som egentlig gjøres er å svitsje mellom motstandsverdien til en togshunt og uendelig motstand, hvor uendelig motstand betyr at det ikke finnes tog på sporfeltet.



Figur 3.2: Sporfelt Type 3 - Dobbeltisolert sporfelt, enkeltstående

3.2.5 Simulering av sporfeltrelé

Som nevnt i 2.2.1 kreves det to signaler med riktig frekvens, størrelse og faseforskyvning for å sørge for at sporfeltreléet skal trekke og indikere fritt spor. Sporfeltreléets to tilstander (tilkoblet/frafalt) kan betegnes som henholdsvis «1» eller «0». Da reléets tilstand ikke påvirker sporfeltstrømmen står en fritt til å regne ut denne tilstanden i etterkant, gitt at alle verdiene som trengs for å evaluere tilstanden er tilgjengelig. Den enkleste modellen som en kan tenke seg er en simpel terskel på strømstyrken til sporfeltstrømmen, uten å ta hensyn til faseforskyvningen. Da vil en sporfeltstrøm over en gitt terskel gi logisk «1», altså ubelagt, og «0» ellers. Alternativet er å benytte kraften gitt i ligning *ligning 2.1* og heller sammenligne den med en gitt grense. Begge deler er gjort i denne oppgaven. *Tabell 3.4* punkt 4 gir terskelverdi på når reléet skal falle, gitt som spenningsforskjell mellom skinnene.

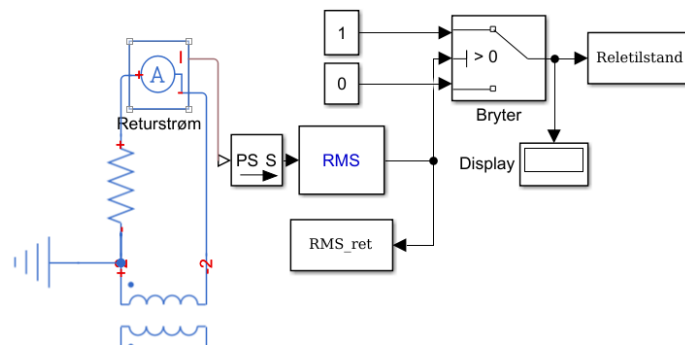
Sporfelté som enkel terskelbryter

Figur 3.3 viser hvordan sporfeltreléet kan modelleres ved hjelp av simlink-blokken «switch», se 3.2. Ved å benytte to inputblokker, en med verdien 1 og en med verdien 0, sammen med en passende terskelverdi vil vi få utverdien 1 eller 0 avhengig av om strømstyrken er stor nok. Denne verdien kan sendes til en «To workspace»-blokk, slik at det er tilgjengelig som en tidsserie etter endt simulering. Vi kan se den reléets nå-tilstand under simulering ved å benytte en «Display»-blokk.

Sporfeltrelé modellert med to faser

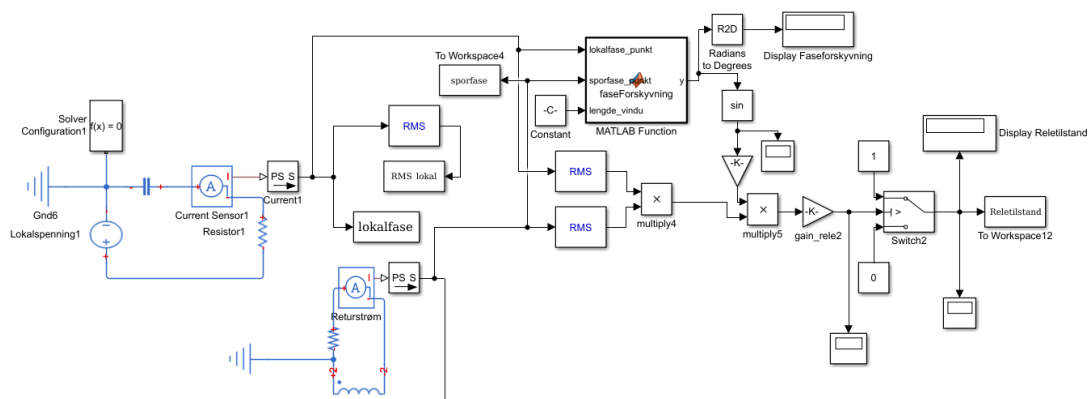
Figur 3.4 viser hvordan en variant av sporfeltrelé hvor lokalfasen benyttes, sammen med sporfasen i henhold til *ligning 2.1*. Helt til venstre i figuren finner vi lokalfasen som den er i *figur 3.5*. «MATLAB-Function»-blokkene tar inn sporfasen og lokalfasen sammen med en tredje konstant. Dette er lengden på «vinduet»³ som benyttes til beregningen av faseforskyvningen. Sinusverdien til faseforskyvningen

³Et «vindu» er i denne sammenhengen et en vektor med lengde lik input-konstanten som inneholder de siste verdiene av de to signalene



Figur 3.3: Sporfeltrelé modellert som en enkel terskelbryter

som beregnes i funksjonsblokken multipliseres med produktet av de to strømstyrkene og ganges med en forsterkning k^4 før det sammenlignes med en terskel på samme måte som i figur 3.3.



Figur 3.4: Sporfeltrelé modellert etter ligning 2.1

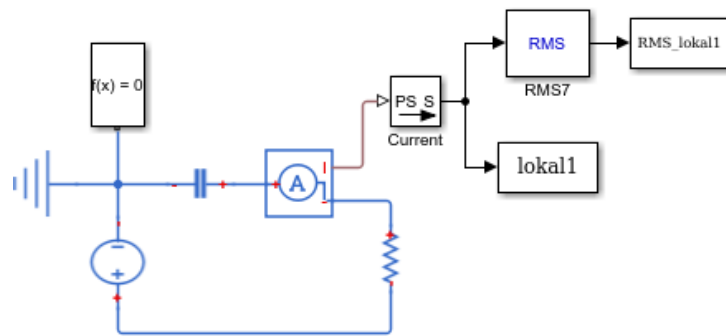
Lokalfasen

Lokalfasen er hentet fra strømmettet og det benyttes en $0.7\mu\text{F}$ kondensator for å gi faseforskyvningen [2]. Denne kretsen kan enkelt modelleres som vist i 3.5. Legg merke til at her kan hentes ut både den reelle lokalfase, og RMS-verdien ved å plassere «To workspace»-blokker på

3.2.6 Versjon 2 - Enkeltstående sporfelt med kjørestrøm

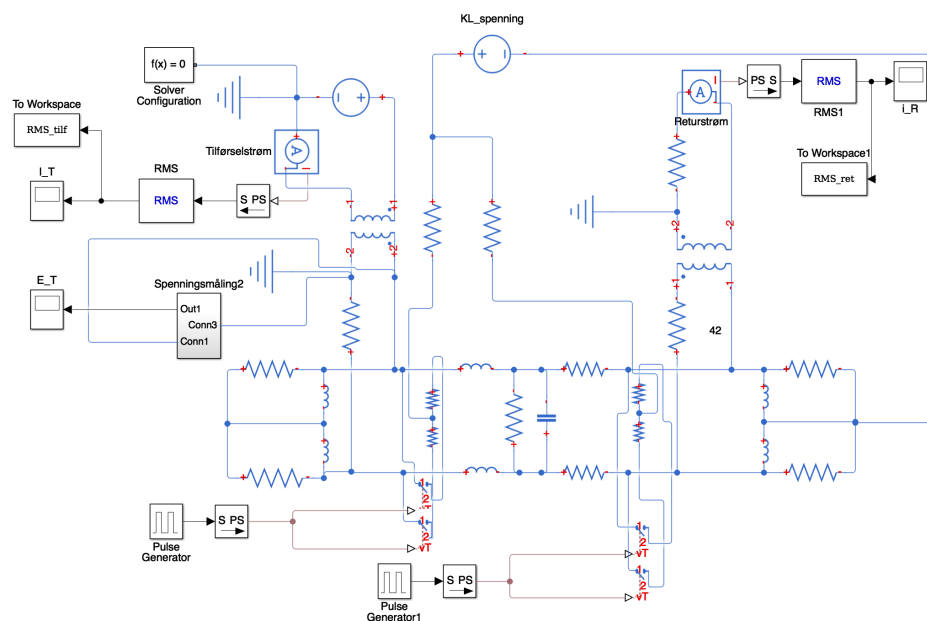
Som nevnt i seksjon 2.2.2 benyttes skinnestrengene til å tilbakeføre kjørestrømmen til matestasjonen. Til forskjell fra enkeltisolerte sporfelt, beskrevet i 2.2.1, hvor kjørestrømmen har sin egen skinnestreng uten isolasjon, vil et sporfelt type 3, fordele returstrømmen mellom begge skinnene. I figur 3.6 sees sporfeltet utvidet med kjørestrømmen. Fysisk benyttes kraftige transformatorer for å forsynes banestrøm. Siden denne transformatorens dynamikk ikke er gjenstand for undersøkelse i denne oppgaven, benyttes en generell spenningskilde i simuleringen. Tilførselsspenningen har RMS-spenning på 15 kV og med frekvens $16\frac{2}{3}$. Togmoteren er modellert som en motstand på $100\ \Omega$.

⁴Denne forsterkningen kan sløyfes mot å sette terskelen tilsvarende lavere, men ved å ha den med vil modellen tilsvare ligning 2.1



Figur 3.5: Lokalfase modellert i Simscape

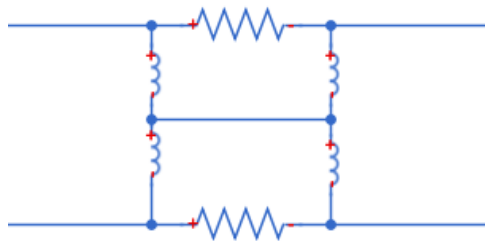
KL-kretsen føres ned mellom shunt-motstandene. Metoden for å svitsje av og på togakslingen er modifisert fra *figur 3.2* til *figur 3.6*. Grunnen til dette er at i simuleringen uten KL holder det at én av motstandene har uendelig motstand for at ingen strøm kan flyte. Med KL koblet mellom dem kan derimot strømmen flyte gjennom den andre, og vi får en situasjon som ikke skjer i virkeligheten. I den siste brytes hele aksling-koblingen ved hjelp av to kretsbytere styrt av den samme signalet, i dette tilfellet fra en Simulink puls-generator.



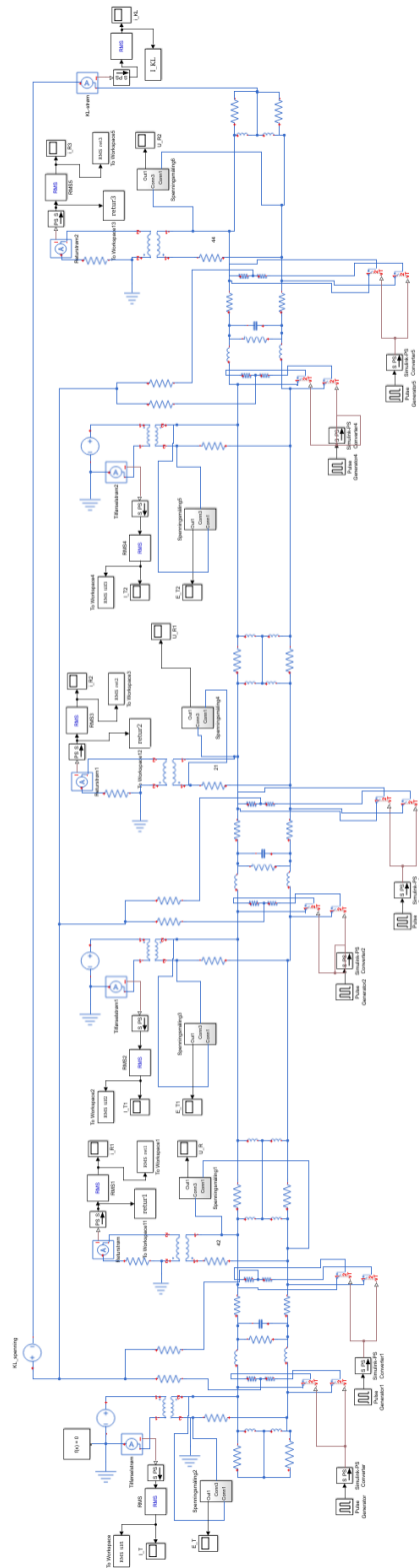
Figur 3.6: Sporfelt Type 3 - Dobbeltisolert sporfelt med KL

3.2.7 Versjon 3 - Sammenhengende sporfelt

I denne siste simuleringversjonen er det satt tre sporfelt etter hverandre, som vises i *figur 3.8*. Også her er banestrømmen med, og føres over de isolerte skjøtene mellom sporfeltene ved hjelp av filterimpedansene. *Figur 3.7* viser hvordan de isolerte skinneskjøtene med filterimpedansene er modellert.



Figur 3.7: Isolert skinnereskjøt som benyttet i sporfeltmodell versjon 3



Figur 3.8: Tre sammenhengende sporfelt med tilkoblet kjøreledning, *Bildet er rotert 90° av plasshensyn*

3.3 FMEDA

FMEDA-formatet er som nevnt tidligere ikke veldefinert, men finnes i forskjellige varianter. Formatet på tabellen i denne oppgaven er inspirert av en provisorisk feilmodioversikt utarbeidet av Ben Tollefsen. Parametrene knyttet til feilrater er byttet ut, da dette er en kvalitative analyse, til fordel for utvidede «virkning»-kolonner. Siden den nåværende sporfeltovervåkingen og denne oppgavens sporfeltsimulering tar utgangspunkt i måling av strømmen i tilførsel- returkretsen er det naturlig at virkningen på disse to beskrives. I tillegg er sporfeltreléet tilstand med. I diagnostikk-feltet er det forslag til hvordan dette kan fanges opp av tilstandsovervåkingssystemet slik det er implementert i dag, fortrinnsvis med automatiske rutiner, ikke manuell undersøkelse av grafer. Kritikalitet-kolonnen er omdøpt til «Type» hvor *type 1* betegner sikkerhetsfeil og *type 2* betegner driftsfeil.

3.4 Litteraturstudium

I det neste kommer en beskrivelse av de viktigste kildene benyttet for arbeidet med denne oppgaven. Litteraturen som har vært viktigst er:

- «**Feilanalyse og tilstandsovervåking av togdeteksjonssystemer**» [10], *en masteroppgave av Olav Kallerud*
 - Denne oppgaven har vært viktigst for innføring i faget «sporfelt» og tilstandsovervåking. Den er skrevet våren 2016 og har en solid mengde godt skrevet teori som har vært nyttig i arbeidet med denne oppgaven.
- «**Arbeid på signalanlegg 1**» [9]
 - Dette er den første av to lærebøker om arbeid på Signalmontørfaget med fire kapitler, hvorav ett av de handler om sporfelt. Gir grundig innføring med praktisk vinkling.
- «**Teknisk regelverk**» [1]
 - Nettsted i wiki-stil for tekniske krav og dokumentasjon for Bane NORs anlegg. Den er benyttet som en pålitelig kilde til tekniske krav og innsikt i hva som finnes i tillegg til viktig kilde for figurer.
- «**Teori (Læremateriell) i sporfeltforståelse**» [6]
 - Upublisert bok skrevet av Rolf Gillebo på ukjent tidspunkt. Verket er gammelt men det meste av materialet er like aktuelt på det nåværende tidspunkt som da det ble skrevet.
- «**Safety Instrumented Systems Verification**» [7]
 - Fagbok i pålitelighetsteori. Boken er benyttet for innføring i FMEA- og FMEDA-metodikk.

I tillegg til disse kildene har forfatter vært på besøk på Jernbaneskolen, tidvis arbeidet fra Bane NORs kontorer og vært med ute i felten da sensorer ble installert på Nationaltheateret stasjon. Det har i tillegg vært utført en rekke skype-møter, og «spørretimer» med enkelte ressurspersoner på Sporfelt, viktigs av disse har vært Jørgen Torgersen og Ben Tollefsen.

Kapittel 4

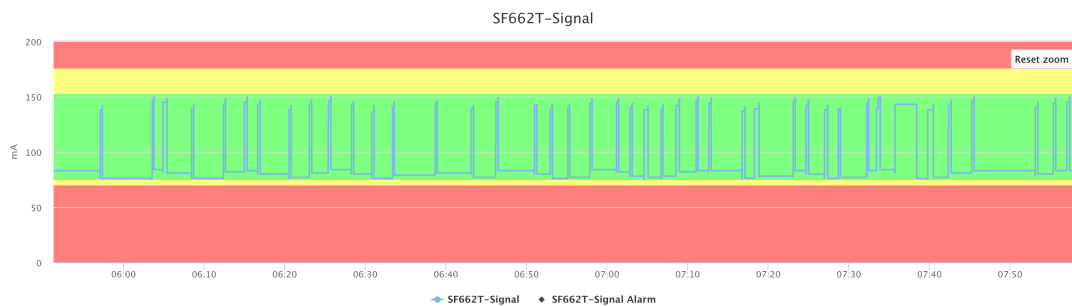
Resultat

4.1 Tilstandsovervåkning på Nationaltheateret

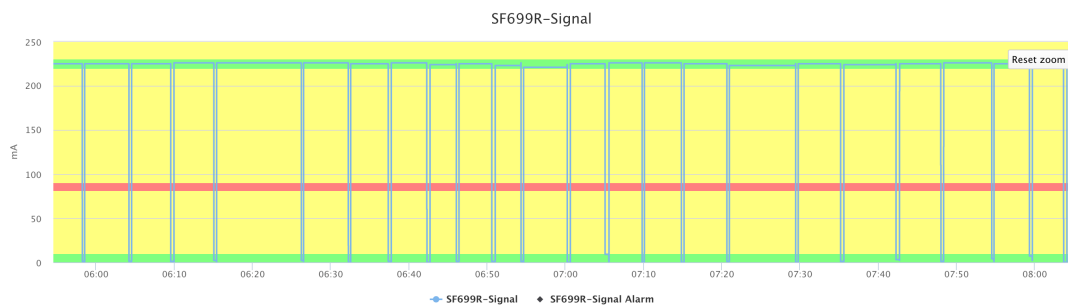
I det følgende sees utsnitt fra «Roadmaster», visningslaget til sporfeltovervåkingen, slik den er i dag. Legg merke til grønne, gule og røde soner som angir henholdsvis optimal, middels og forbudt sone.

4.1.1 Normal kjøring

Figur 4.1 viser to tilfeldige timer med normal operasjon av et sporfelt tilknyttet Nationaltheateret.



(a) Tilførselstrøm



(b) Returstrøm

Figur 4.1: Roadmasters visning av sporfeltstrømmen ved normal operasjon

4.1.2 Forstyrret sporfelt



Figur 4.2: Roadmasters visning av sporfelt med forstyrrelser i både tilførsel og retur

4.2 Simulering av sporfelt

4.2.1 Versjon 1 - Enkeltestående sporfelt uten banestrøm

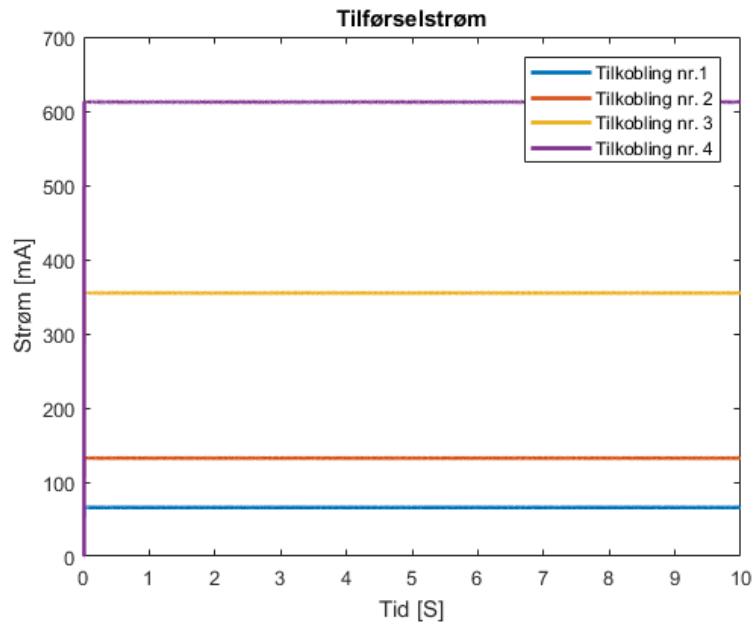
I det følgende kommer plott og resultater fra simulering på ett enkelt sporfelt uten banestrøm sett i figur 3.2.

Valg av tilkobling på tilførselstransformator

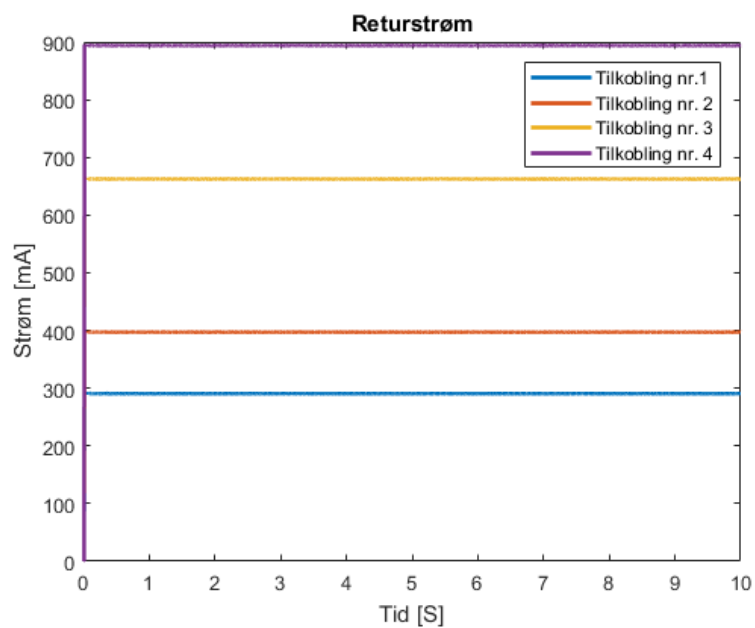
Som nevnt er er sporfeltets tilførselstransformator regulerbar. Det vil si at det finnes en rekke tilkoblingsmulighet som gir forskjellige vinkligningsforhold. Figur 4.3 viser hvordan strømmen i tilførsel og retur endres ved endring i vinkligningsforhold i tilførseltrafo. Måling av tilførselspenningen E_T ved tilkobling til de forskjellige tilkoblingspunktene på trafoen gir henholdsvis $V_1 = 10.4$, $V_2 = 14.7$, $V_3 = 23.9$ og $V_4 = 31.3[V]$

Togpassering med ulike shunt

Figur 4.4 simuleres togpassering med ulike shunt. De tre første shuntene kan klassifiseres som henholdsvis «typisk» shunt og «mest ugunstig tillatte» shunt for linjen og stasjonen. Den siste shunten har motstandsverdi over høyeste tillatte shunt. I alle andre simuleringer enn figur 4.4 benyttes «typisk» shunt.

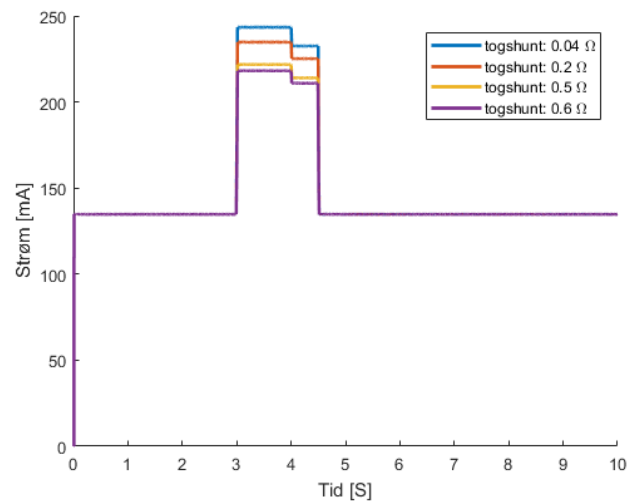


(a) Tilførselstrøm

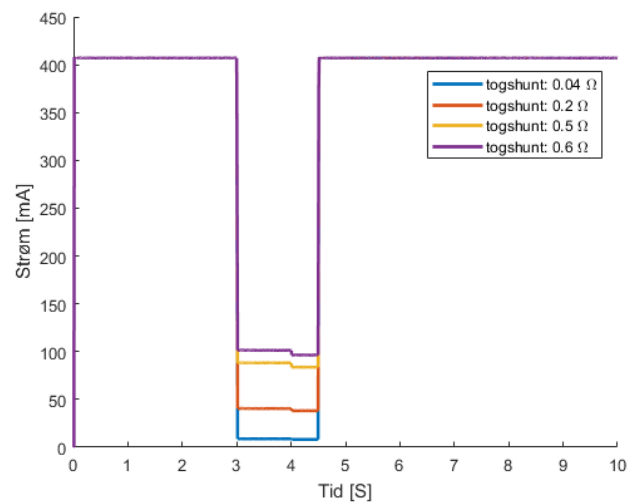


(b) Returstrøm

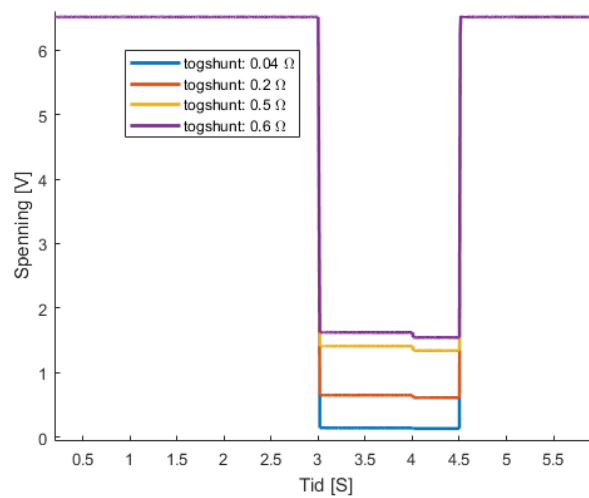
Figur 4.3: Plot av strøm i tilførsel- og returkrets ved forskjellige viklingsforhold



(a) Tilførselstrøm



(b) Returstrøm

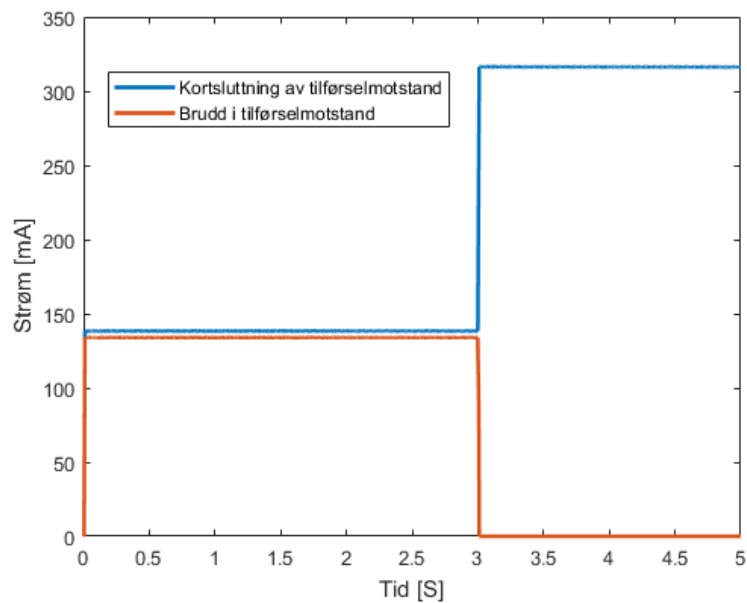


(c) Potensialforskjell i togskinne på retursiden

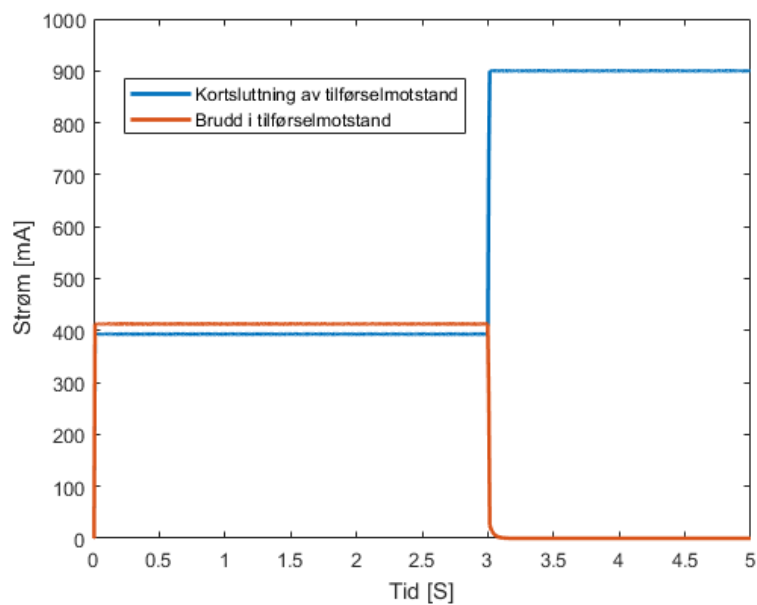
Figur 4.4: Strøm og spenning ved forskjellig verdier på togshunt

Feil i tilførsel- og retursresistorer

Figurene 4.5 og 4.6 viser sporfeltstrømmene ved feil på henholdsvis tilførsel- og retursresistorene. Legg merke til at alle *brudd* i motstander fører til vesentlig redusert strømføring i begge kretser ($I \approx 0$) bortsett fra i tilfellet hvor returmotstanden brytes. I dette tilfellet synker tilførselstrømmen vesentlig mindre. Videre ser vi at alle kortslutninger i resistorene fører til økt strømføring i begge kretser.

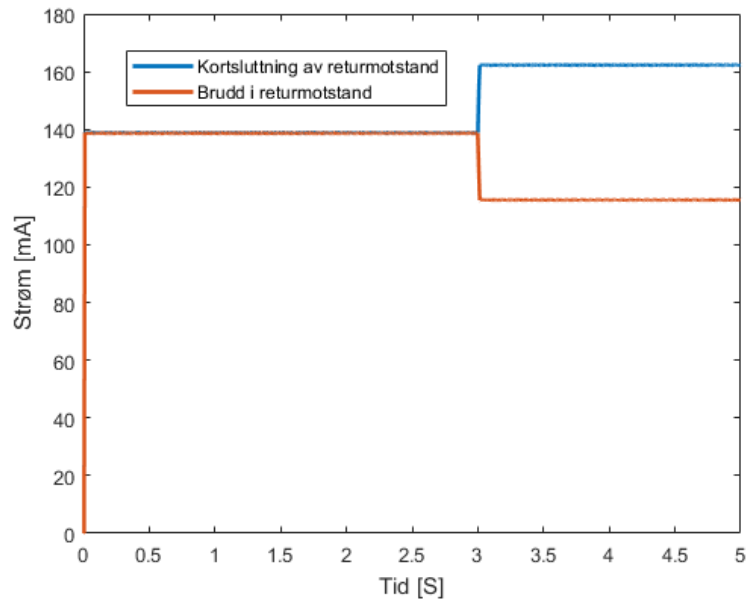


(a) Tilførselstrøm

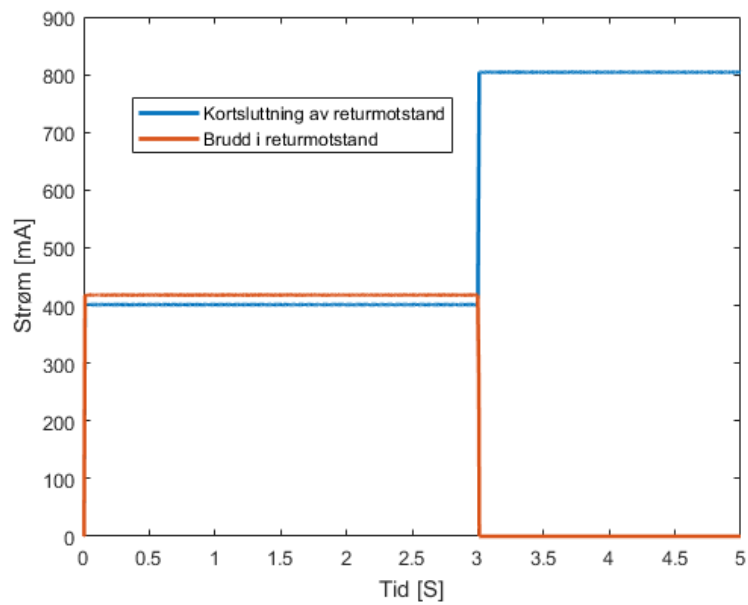


(b) Returstrøm

Figur 4.5: Plot av strøm i tilførsel- og returkrets ved feil på tilførselsmotstand



(a) Tilførselstrøm

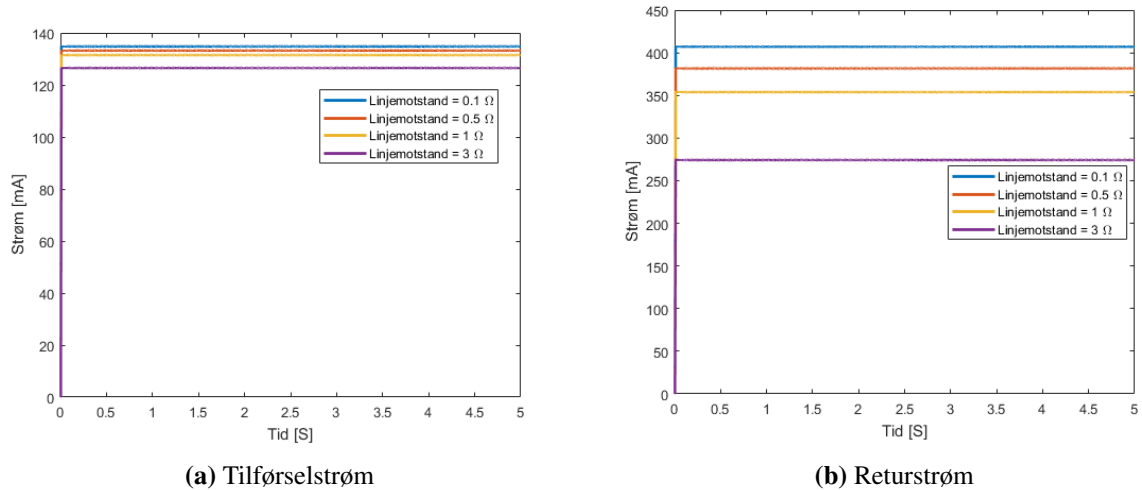


(b) Returstrøm

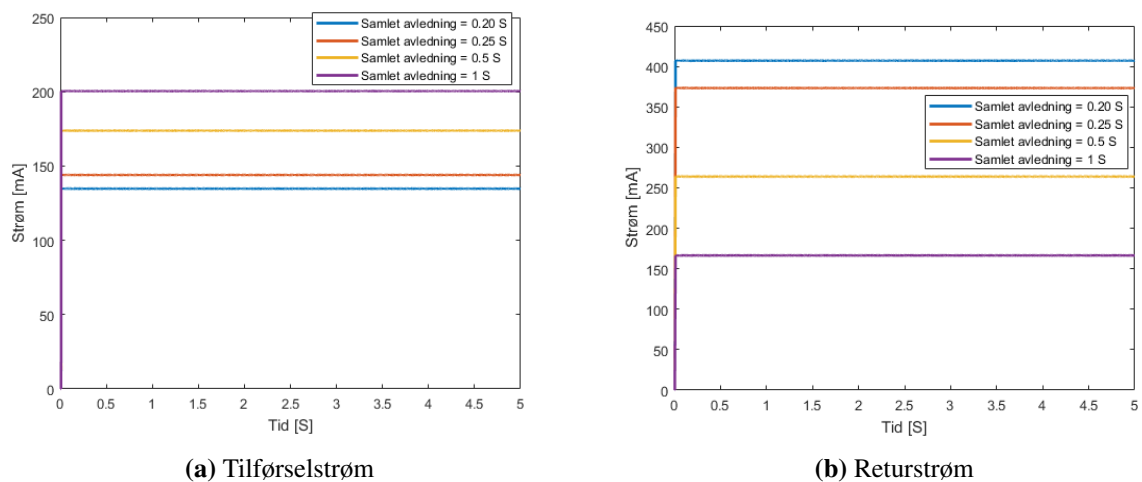
Figur 4.6: Plot av strøm i tilførsel- og returkrets ved feil på returmotstand

Variasjon i ledning og avledning i skinnene

Figurene 4.7 og 4.8 viser strømmene når ved varierende linjemotstand og avledning. Linjemotstanden er variert tilsvarende på begge skinnene. Ved økt linjemotstand sees redusert strømføring i begge kretser, men ved økt avledning øker tilførselstrømmen mens returstrømmen reduseres.



Figur 4.7: Plot av strøm i tilførsel- og returkrets ved varierende linjemotstand (0.1Ω er her det nominelle)



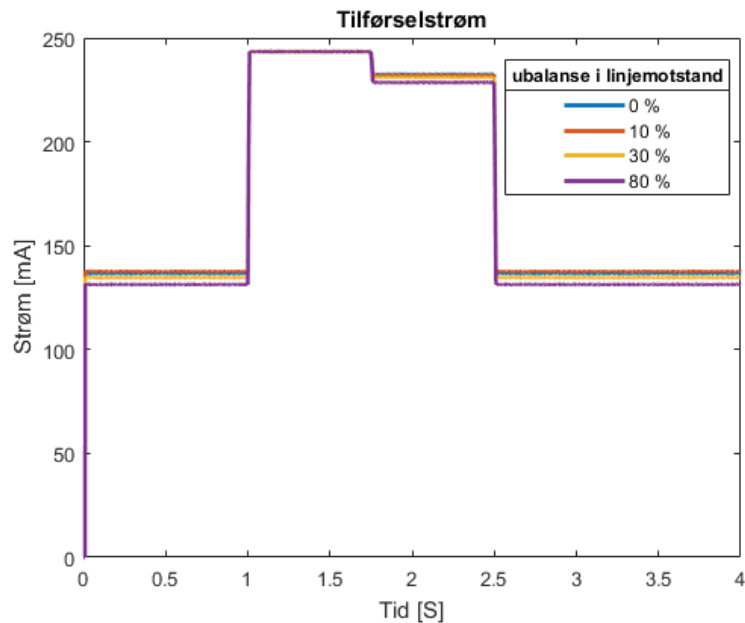
Figur 4.8: Plot av strøm i tilførsel- og returkrets ved varierende avledning mellom skinnene (0.20 S er her det nominelle)

4.2.2 Versjon 2 - Enkeltestående sporfelt med banestrøm

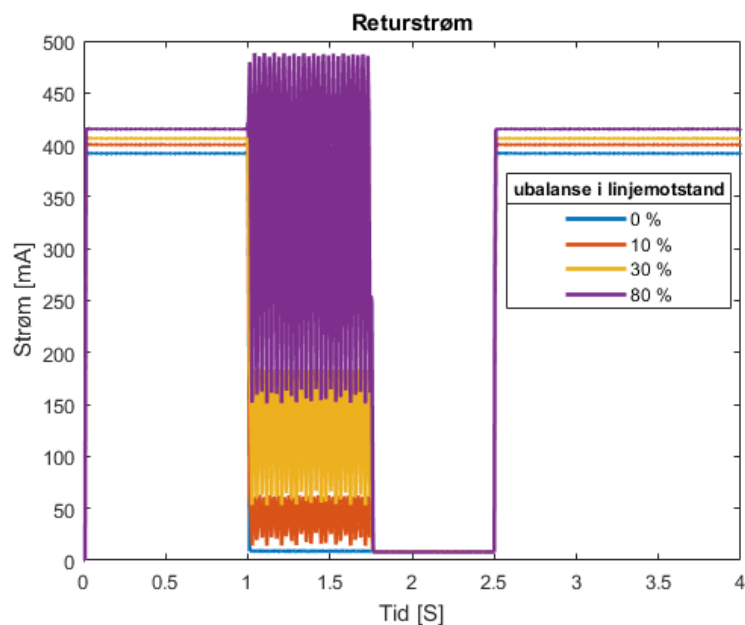
Denne seksjonene viser simuleringer på samme type sporfelt, denne gangen med KL-strømmen også tilstede. Felles for alle simuleringer er at toget og banestrømmen går fra venstre til høyre side av figuren. Altså banestrømmens jord, eller returvei, finnes til høyre i simuleringen. Alle sporfelt i modellen har også tilførsel på venstre side og retur på høyre.

Ubalansert banemotstand

Figur 4.9 viser sporfeltstrømmen ved innføringa varierende grad av ubalanse i linjemotstanden. Legg merke til at ved 0% ubalanse, opptrer ikke banestrømmen i verken tilførsel- eller returkretsen. Vi ser også at banestrømmen ikke påvirker sporfeltet når toget har kommet seg forbi linjemotstanden (etter 1,75 sekunder).



(a) Tilførselstrøm

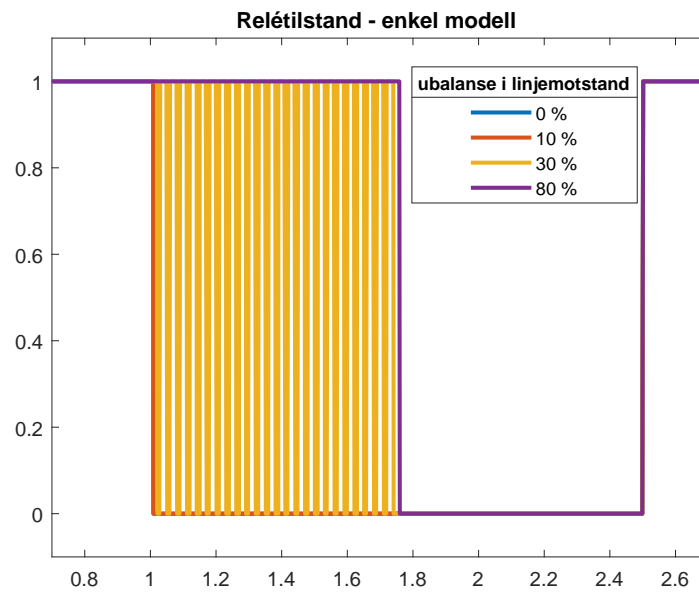


(b) Returstrøm

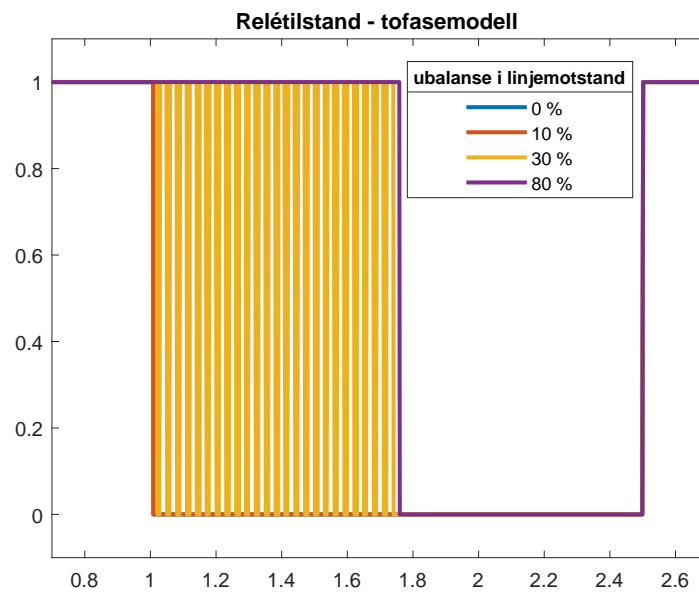
Figur 4.9: Strøm tilførsel- og returkrets med varierende grad av ubalanse i linjemotstanden

4.10 viser relétilstanden (1 for tiltrukket, 0 for frafalt) for de to forskjellige modellene. Verdt å merke seg er de at to modellene har samme oppførsel. Figurene viser det ikke så tydelig, men reléene er faller av på riktig tid for motstands ubalanse på mindre enn 30 % ubalanse, oscillerer ved 30 % og trekker til

ved høyere ubalanse.



(a) Relétilstand ved enkel relémodell

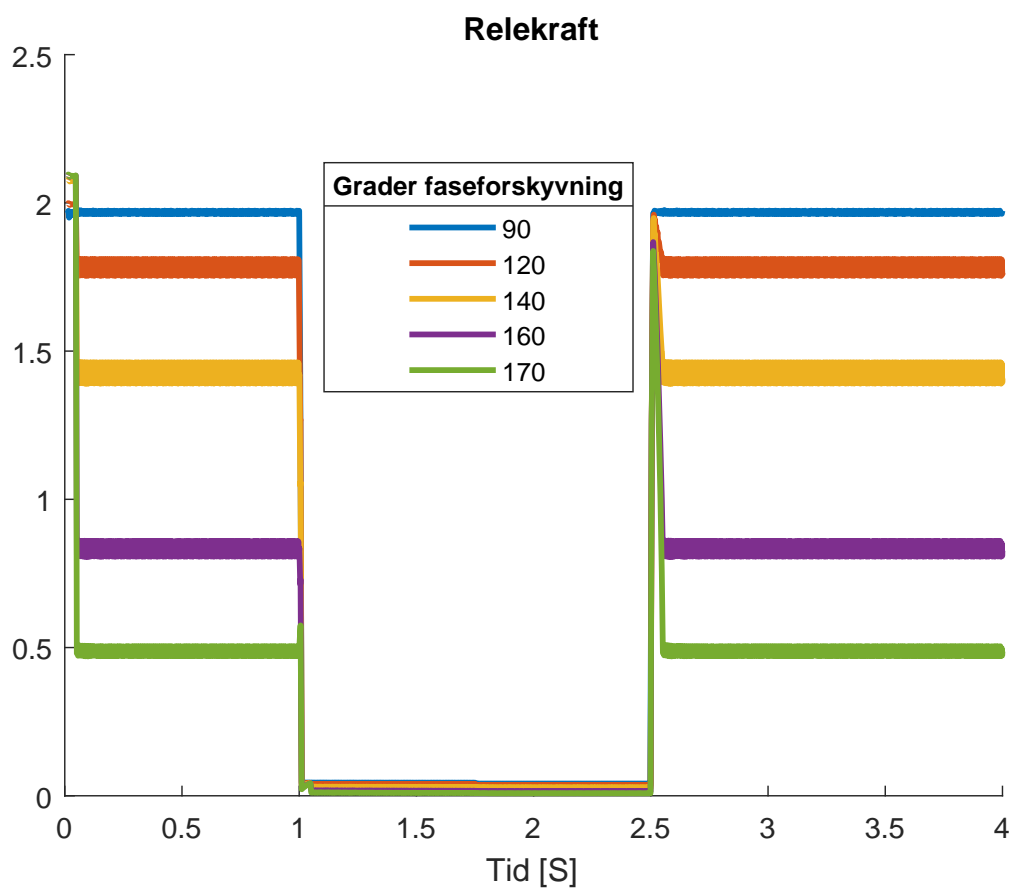


(b) Relétilstand ved matematisk to-fase-relé

Figur 4.10: Plot av relétilstand ved ulike grader av ubalanse i linjemetstand

Endring i faseforskjell mellom sporfase og lokalfase

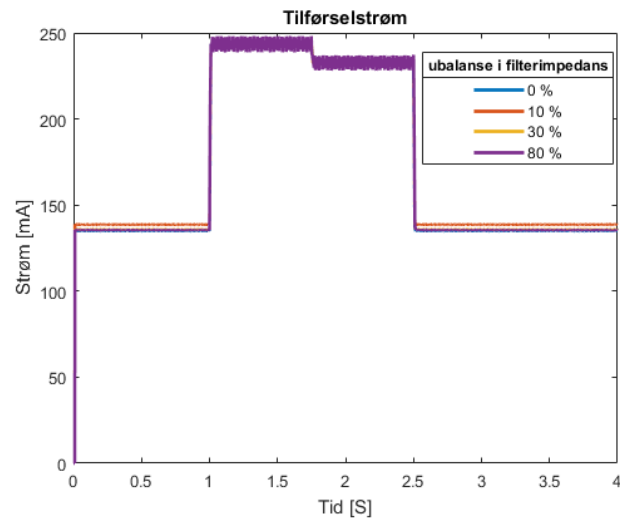
4.11 viser hvordan kraften på det matematiske to-fase-reléet blir påvirke av endring i faseforskyvning. Merk at krafterskelen når reléet trekker, er funnet til å være 0.49.



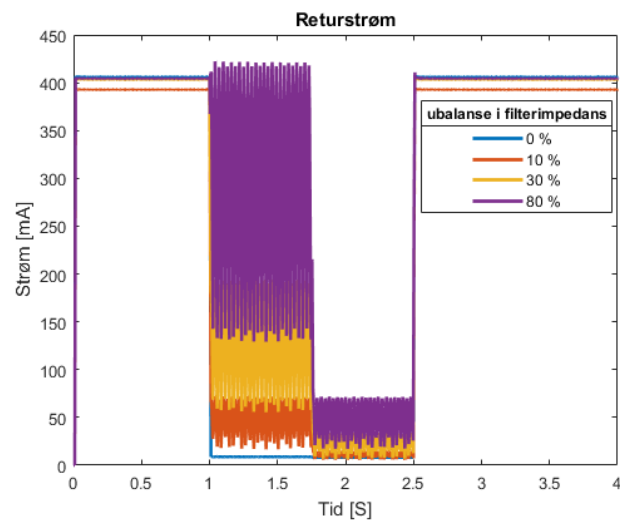
Figur 4.11: Kraften på reléet ved forskjellig faseforskyvning

Ubalansert filterimpedanser

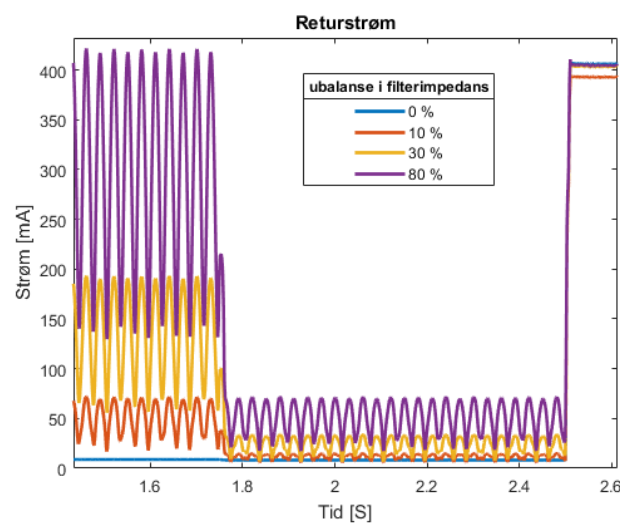
Figur 4.12 viser sporfeltstrømmen ved innføringa varierende grad av ubalanse i filterimpedansenes induktans. Legg merke til ubalansen minsker desto nærmere toget kommer den feilfungerende filterimpedansen. På *figur 4.12c* sees tydelig hvordan banestrømmens RMS-verdi alternerer på grunn av fremmedstrømmen.



(a) Tilførselstrøm



(b) Returstrøm



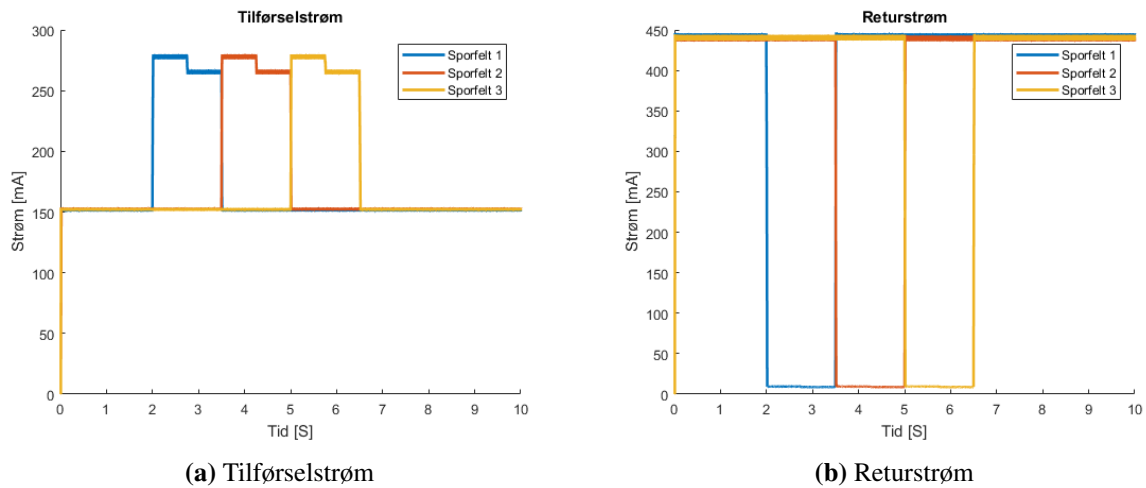
(c) Returstrøm zoomet inn

Figur 4.12: Strøm tilførsel- og returkrets med varierende grad av ubalanse i filterimpedans

4.2.3 Versjon 3 - Sammenhengende sporfelt

Normal kjøring

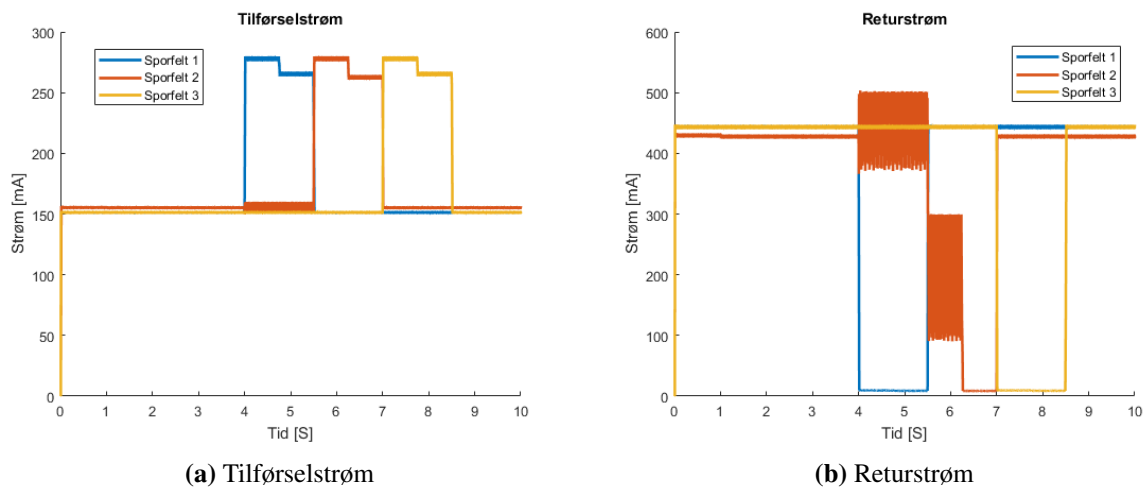
Figur 4.13 viser sporfeltstrøm ved togets passering gjennom tre sporfelt som ligger etter hverandre. Som tidligere sees ingen forstyrrelse fra banestrøm selv om det enkelt kan 1000 ganger så mye banestrøm en sporfeltstrøm i skinnene.



Figur 4.13: Plot av strøm i tilførsel- og returkreter ved tre sammenkoblede sporfelt

Ubalanse i linjemotstand på ett sporfelt

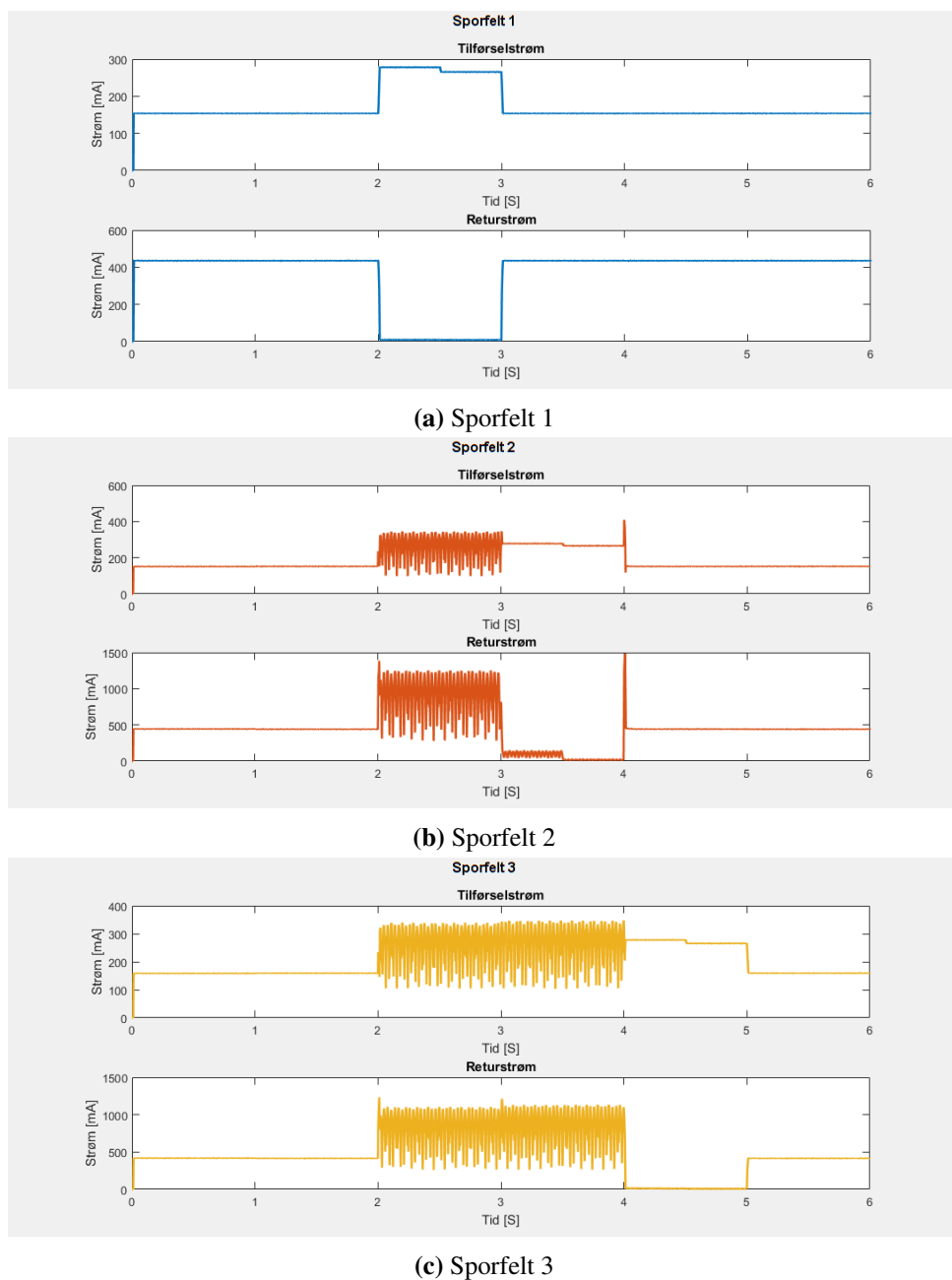
Figur 4.14 viser sporfeltstrøm ved togets passering gjennom tre sporfelt som ligger etter hverandre, med 50% høyere linjemotstand i øvre mot nedre skinne i sporfelt 2.



Figur 4.14: Strøm i tilførsel- og returkreter ved tre sammenkoblede sporfelt og ubalanse i midtre, grunnet motstandsbalanse

Kortslutning i én isolert skinnerkjøt

Figur 4.15 viser sporfeltstrøm ved togets passering gjennom tre sporfelt som ligger etter hverandre, med en 100Ω «kortslutning». Vi antar her at effekten kommer godt nok frem ved så høy motstand som 100Ω da dette medfører en vesentlig ubalanse i de to skinnene. Med en «skikkelig» kortslutning med $R_{skinnerkjøet} \approx 0$ vil strømmen her bli så stor at plottet ikke viser noe godt bilde av situasjonen. Dette både på grunn av at ekte transformatorer antas å gå i metning og motstander blir brent av. Dette skjer naturlig nok ikke i simuleringen, da transformatorerene er ideelle og motstandene ikke går i stykker ved høy strøm.



Figur 4.15: Plot av strøm i tilførsel- og returstrøm ved kortsluttet i isolert skinnerkjøt mellom spor 2 og 3

Virkning av motsatt fase i nabo-sporfelt

De isolerte skinnereskjøtene skal som nevnt i *seksjon 2* sørge for at sporfeltstrømmen fra et sporfelt ikke flyter til nabo-sporfelt. For å opprettholde «fail-safe»-egenskapene til sporfelt er det motsatt fase på nabo-sporfelt, slik at ved eventuell overflyt, skal den ikke føre til sikkerhetsfeil.

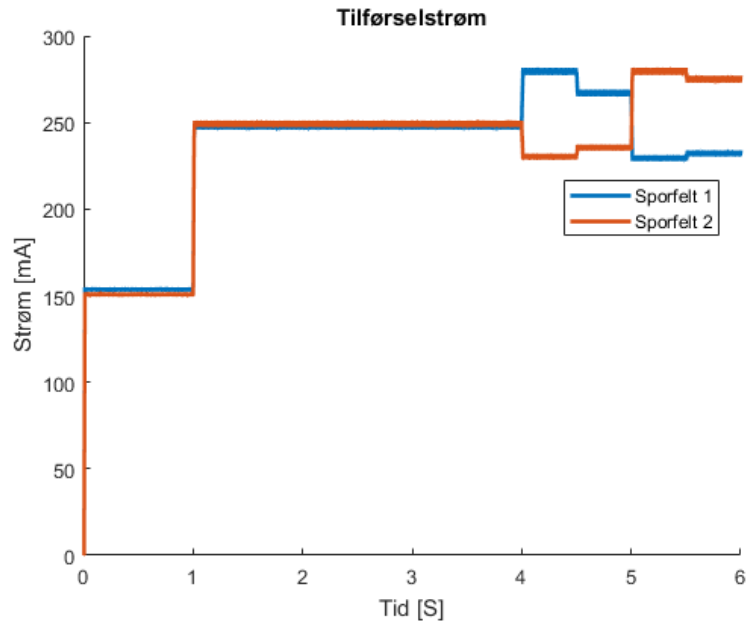
Strømmen flyter over ved at den elektriske motstanden i *begge* skinnereskjøtene settes svært lav. På denne måten vil det ikke oppstå ubalanse i sporet, og derfor vil ikke banestrømmen komme til syne, men sporfeltstrømmen får anledning til å migrere over skjøten. Kortslutningsmotstanden er her satt til 0.5Ω og den slår inn ett sekund inn i simuleringen.

Det sees av *figur 4.16* og *figur 4.17* at kortslutningen har motsatt virkning på tilførsel- og returstrømmen. Videre ser vi at strøm med motsatt fortegn *ikke* bidrar til økning i returstrømmen.

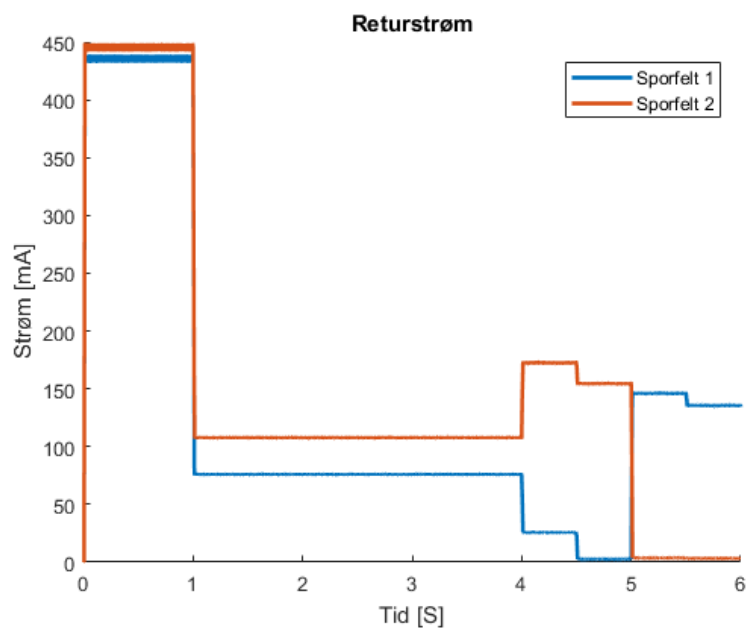
4.3 FMEDA

FMEDA-formatet er som nevnt tidligere ikke veldefinert, men finnes i forskjellige varianter. Formatet på denne tabellen er inspirert av en provisorisk feilmodioversikt utarbeidet av Ben Tollefsen. Merk at parametrene knyttet til feilrater er byttet ut til fordel for utvidede «virkning»-kolonner. Siden den nåværende sporfeltovervåkingen og denne oppgavens sporfeltsimulering tar utgangspunkt i måling av strømmen i tilførsel- returkretsen er det naturlig at virkningen på disse to beskrives. I tillegg er sporfeltreléet tilstand med. I diagnostikk-feltet er det forslag til hvordan dette kan fanges opp av tilstandsovervåkingssystemet slik det er implementert i dag, fortrinnsvis med automatiske rutiner, ikke manuell undersøkelse av grafer. Kritikalitet-kolonnen er omdøpt til «Type» hvor *type 1* betegner sikkerhetsfeil og *type 2* betegner sikkerhetsfeil.

Her følger den resulterende FMEDA-tabellen.

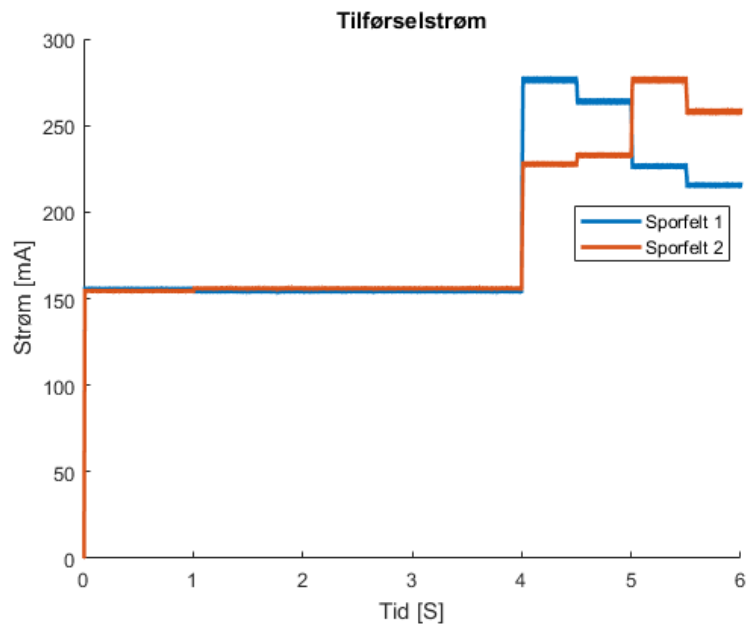


(a) Tilførselstrøm til sporfelt 1 og 2

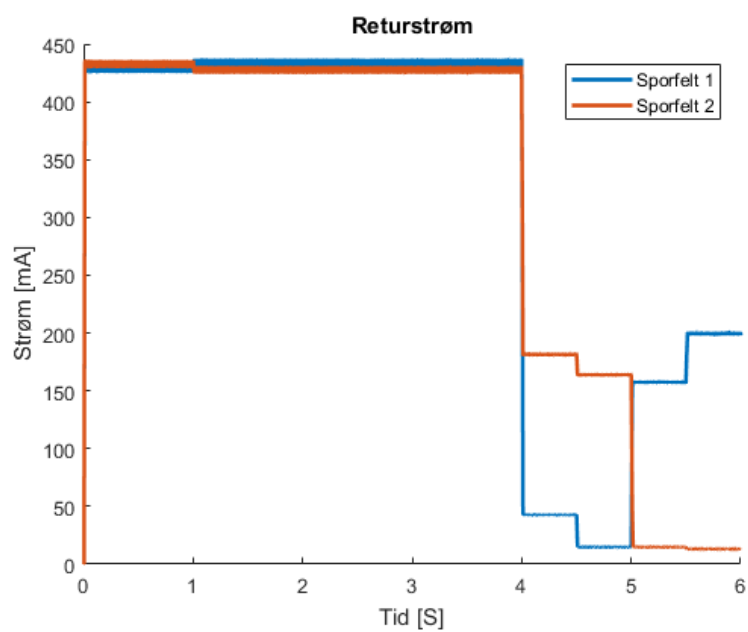


(b) Returstrøm til sporfelt 1 og 2

Figur 4.16: Strøm i tilførsel- og returkrets ved kortslutning i isolert skinneskjot mellom spor 2 og 3, motsatt fase på sporfeltene)



(a) Tilførselstrøm til sporfelt 1 og 2



(b) Returstrøm til sporfelt 1 og 2

Figur 4.17: Strøm i tilførsel- og returstrøm ved kortslutning i isolert skinneskjot mellom spor 2 og 3, samme fase på sporfeltene)

Navn	Funksjon	Feilmodus	Årsak	Virkning tilf.	Virkning ret.	Virkning SF-retå	Type	Diagnostikk	Bemerkninger
Tilførsel-motstand	Beskytter kretsen og regulerer strømmen	Kortslutning Brudd	Ukjent Brent pga. varmegang el.	Strømmen øker mye Reduseres til $\approx 0\text{mA}$	Strømmen øker mye Reduseres til $\approx 0\text{mA}$	Potensielt alltid tiltrukket Frafalt	1 2	Alarm ved strøm over satt terskel begge steder Alarm ved lave verdier begge steder	Bemerkninger
Returmotstand	Sørger for motstand nok til reléfall ved belegg og regulerer strømmen	Kortslutning Brudd	Ukjent Brent motstand på grunn av varmegang eller ligende	Strømmen øker noe Strøm reduseres noe	Strømmen øker mye Reduseres til $\approx 0\text{mA}$	Potensielt alltid tiltrukket Frafalt	1 2	Alarm ved strøm over satt terskel begge steder Alarm ved lave verdier begge steder	Strøm øker mer i retur enn tilførsel
Isolert skinneskjøt	Holder sporfeltstrømmen isolert til eget sporfelt	Kortslutning enkel	Jernspol eller lignende på skjøt	Fremmedstrøm i kretsen (Når bane-strøm finnes)	Fremmedstrøm i kretsen (Når bane-strøm finnes)	Frafalt (potensielt på begge sider av skjøt) Frafalt potensielt på begge sider	2	Høyt antall events på to nabospor Alarmverdi for begge sider av sporfelt	
Filterimpedans	Leder banestrøm over isolerte skjøter	Brudd/degenerert spole	Varmegang eller lignende	Liten påvirkning (noe fremmedstrøm/støy)	Mye fremmedstrøm	Frafalt	2	Antall events høyt på retur	
Løkefase	Supplerer fase til sporfeltnelé	Feil fasefor-skyvning Brudd i lokalfase-kretsen	Ukjent Ukjent	Ingen påvirkning Ingen påvirkning	Ingen påvirkning Ingen påvirkning	Frafalt Frafalt	2 2	Ingen Ingen	

Tabell 4.1: FMEDA-tabell

Diskusjon

5.1 Observerte feil på Nationaltheateret

Selv om gjennomgang av sporfeltdataen fra Nationaltheateret ikke har vært av denne oppgavens største fokus er det én situasjon som har vært verdt å merke seg i perioden. *Figur 4.2* viser forstyrrelser i både sporfeltets tilførsel- og returkrets. Denne denne forstyrrelsen var i følge Jørgen Torgersen i Bane NOR ikke tilstede i perioder uten banestrøm i skinnene. Det aktuelle sporfeltet er dobbeltisolert av samme type som er simulert i denne oppgaven. Feilen viste seg å være at kun én av to skinnestrenger var koblet til jord. Dette førte til at det var impedansubalanse i de to skinnestrengene og banestrømmen fikk da anledning til å opptre i sporfeltkretsen. Etter utbedring hvor skinnen ble jordet, forsvant feilen.

Jording av skinnene er et tema som ikke er belyst i denne oppgaven og som er ett av temaene i følge Jørgen Torgersen som for få har en forståelse for hvordan spiller inn på sporfeltet. Ved en utvidelse av feilmodioversikt og simuleringen vil dette også være et moment som kan innføres. Dette er et tydelig eksempel på hvordan erfaringsbasert kunnskap sammen med nye verktøy gjør en i stand til å løse problemer mer effektivt. Samtidig vil data om feilens innvirkning på sporfeltet være tilgjengelig å lære av i fremtiden, til forskjell for slik det var før det ble innført. Dette kan brukes i arbeidet med nye simuleringer, mer sofistikert tilstandsovervåkning og for kompetanseheving også på område hvor det tidligere kun har vært ansatte med lang fartstid som har innsikten som trengs. Det bemerkes at ingenting tyder på at feilen har utgjort noe problem for jernbanetrafikken men hensyn på forsinkelser foreløpig. I dette tilfellet var man i stand til å utbedre feilen før den førte til forsinkelse, som langt på vei er motivasjonen bak innføringa av tilstandsovervåkning av sporfelt.

5.2 Sporfeltsimulering

5.2.1 Innstilling av sporfelt

Sporfeltsimuleringen er stilt inn ved hjelp av de samme kravene som gjøres på virkelige sporfelt, med oppførsel som forventes fra vanlige sporfelt ved normal operasjon. Dette viser at selv med en enkel enkle simuleringsoppsett fåes verdier som er like de vi kan forvente i virkeligheten. Dette er spesielt tydelig i *figur 4.4c* hvor det kan sees at spenningsnivået på retursiden ved togshunt på 0.6 Ω er på rett over 1.5 V. Dette passer veldig godt med at dårligste tillatte shunt for stasjonen (spesifisert i *tabell 3.4*) er 0.5 Ω , og at sporfeltet skal falle ved spenning mellom linjene $U_R \leq 1.5$.

5.2.2 Simulering av tofaserelé

Simulering at sporfelt er gjort med to grader av kompleksitet, som en enkel terskel eller med en konstruksjon som simulerer den matematiske ekvivalenten som er nevnt i kildematerialet. Ved normal operasjon vil disse to fungere på samme måte, som demonstrert i *seksjon 4.2.2*. Ved endring i faseforskjell mellom lokal- og sporfase, men ingen endring ellers vil man få at den sistnevnte modellen viser frafalt relé. Dette er i seg selv en god egenskap, for det samsvarer med virkeligheten selv om feilen i faseforskyvning måtte være vesentlig. Det er dog svært uvanlig, i følge Jørgen Torgersen i Bane NOR at det er noe i veien med lokalfasen eller at faseforskyvningen er det eneste som er galt. Derfor vil nok ikke denne mer kompliserte enheten føre til noen store fordeler på dette.

Andre mer interessante tilfeller er ved banestrøm i sporfeltkretsen. Selv med sistnevnte relémodell kan en ikke være sikkert på at modellen oppfører seg som den fysiske, uten å gjøre større tester på det fysiske reléet med forskjellige strømarter. Ben Tollefsen erfarer at ikke banestrømmen i seg selv skaper problemer for reléet, men heller hvordan det påvirker transformatoren. Dette må undersøkes nærmere hvis en ønsker å lage en bedre modell for sporfeltreléet. I tester med to-fase-relé i denne oppgaven ble det funnet at den økte strømverdien betød så mye for relékraften at fluktueringene i faseforskyvningen ikke gjorde så reléet falt. Dette er ikke i samsvar det faglitteraturen sier, og det antas at den matematiske modellen som baserer seg kun på *ligning 2.1* ikke er god nok for å emulere kete oppførsel.

Forfatter anser det likevel som viktigere at strømmene som måles i tilførsel- og returkretsen i simuleringen samsvarer med tilsvarende i virkeligheten. Grunnen til det er at ikke-normal operasjon som synes på i overvåkningssystemet er et symptom på at noe er galt, og dermed er det mindre viktig å kunne emulere akkurat ved hvilken grad av feil reléet faller av. På den annen side er en simulering mer verdifull for demonstrasjon av hvordan ting fungerer hvis flest mulig av de aktuelle komponentene har en oppførsel nær virkeligheten.

5.2.3 Strømmåling i simulering i forhold til virkeligheten

I den fysiske overvåkingen på Nationaltheateret måles RMS-verdien av de aktuelle strømmene. Det samme gjelder i simulatoren. Én forskjell er allikevel at i målingsregimet som en implementer på Nationaltheateret sammenlignes hver måling med den forrige for å avgjøre om det skal verdien skal sendes videre til visningslaget. I simuleringen måles signalet ved faste mellomrom, med svært høy frekvens uten ta hensyn til hvor mye endring det er mellom hver måling. Simulink-blokken som regner ut RMS-verdien til det innkommende signalet, basert på en fundamental frekvens, altså den forventede frekvensen. Det er ikke gitt at disse to målingene gir ut samme verdi ved påtrykking av frekvens som er utenfor den frekvensen RMS-utregningen er basert på. Det er rimelig å anta at de blir like ved normal operasjon med ensartet frekvens i henhold til den «forventede», men mer usikkert med fremmedstrøm.

5.2.4 Ideelle motstander, spoler og transformatorer

I denne oppgavene er flere av komponentene som er benyttet å betrakte som «ideelle». I mange tilfeller vil det være hensiktsmessig å benytte ideelle versjoner av komponenter. Det kan være flere grunner til dette, for eksempel fordi man ikke har nok innsikt eller data om hvor annerledes den ideelle modellen de faktiske komponentene er. En annen grunn kan være fordi man ønsker å se på hypotetiske situasjoner som normalt er utenfor det komponentene er ment for å tåle. Et eksempel på dette kan være mengden strøm som går gjennom tilførsel- eller returmotstander. Den nominelle effekten til motstanden beskriver som kjent hvor høy effekt en motstand skal kunne tåle uten at den bryter sammen. Det kan likevel være nyttig å undersøke hva som skjer i kretsen med en hypotetisk høy strøm, uten å måtte bekymre seg for om

enkelte komponenter ville tålt det i virkeligheten. Dette er også en fordel med nettopp datasimulering. Disse poengene gjelder også spolene i kretsen, de kan ikke lede uendelig strøm uten å ta skade.

Den forenklingen som kanskje utgjør størst forskjell i forhold til virkeligheten er transformatoren, og da særlig returtransformatoren. En ideell transformator har to viktige egenskaper som er verdt å trekke frem som den reelle transformator ikke har. Det første er at den induserer alle frekvenser like godt. Det er kjent at en klassisk transformator består av to elektriske spoler som typisk er tvunnet rundt en felles jernkjerne. Disse spolene har en gitt induktans på samme måte som en hvilken som helst annen spole. Det medfører at spenningen som induseres over spolene er ulik basert på hva slags frekvens den påtrykte strømmen har. Returtransformatoren er i følge Ben Tollefsen laget tilpasset den aktuelle sporfeltefrekvensen, altså at trafoen i dette tilfellet har lettest for å indusere spenning av frekvens rundt 100 Hz. Med utgangspunkt i dette er det rimelig å anta at mindre av banestrømmen vil vise seg i sporfeltekretsen i virkeligheten enn det som er tilfelle i simuleringene i denne oppgaven. Det bemerkes at fluktueringene som er observert på de virkelige sporfeltene ikke har vært av samme størrelse som det som er observert i *figur 4.9b* med kun noen Ohm i motstands forskjell mellom linjene.

Videre har ikke ideelle transformatorer evnen til å gå i metning. Altså vil konstant økende påtrykt spenning på primærsiden føre til konstant økende spenning på sekundærspolen. Dette er som nevnt i *seksjon 2.2.1* ikke tilfelle for virkelige spoler. Det er regnet som en kjent sak dette kan føre til reléfall på grunn at fluktueringene i strømmen som trengs for å utviklet nok kraft i reléet uteblir fordi transformatoren er mettet (av banestrøm). Databladet tilførsel- og returtransformator er lagt ved i denne rapporten som for referanse til den interesserte leser.

5.2.5 Valg av simuleringsverktøy

MATLAB med Simulink/Simscape har fungert godt til kretssimuleringen i denne rapporten. Simuleringen antas å være enda mer verdt hvis parametre, og situasjoner slik som innkjøring av tog på linjen kan bestemmes under simulering. På denne måten kan man enklere eksperimenterer med forskjellige situasjoner uten å forlate simuleringen.

Videre arbeid

Dette kappitelet inneholder forslag til videre arbeid innenfor simulering og feilgjenkjenning av sporfelt, som ikke er blitt arbeidet med her, på grunn av rapportens tidsbegrensning.

Ved videre utvikling av simulering bør det legges fokus på å kunne simulere sporfelttransformatorene med nærmere den faktiske oppførselen ved innslag av banestrøm. I tillegg finnes det flere komponenter som er koblet på sporfelt som ikke er tatt tak i i denne rapporten. Dette inkluderer sugetransformator, og jording av sporfeltet da dette tydeligvis er noe som innvirker ved feil, ref *seksjon 4.1.2*.

Videre bør det undersøkes hvordan banestrøm påvirker *selve* måleenheten med det utstyret som benyttes i dag, slik at eventuelle simuleringer kan emulere dette, slik som diskutert i *seksjon 5.2.3*.

For å kunne fastslå alle feilmodi og deres innvirkninger på overvåkningssystemet bør feilmodioversikt, for eksempel på formatet foreslått i denne rapporten, sammen med tilsvarende simuleringssituasjoner og eventuelle rapporterte feil samles og gjøres lett tilgjengelig, slik at denne innsikten kan finne et bredere publikum. Ved å systematisere dette vil man også få et bedre utgangspunkt for automatisering av feildeteksjon.

Valg av simuleringsverktøy bør også evalueres, forfatter benyttet Simulink til dels fordi det var et kjent miljø, men om Simulink er rette verktøy eller om det finnes andre mer egnede vites ikke, og bør være gjenstand for undersøkelse ved videre utvikling av simulatoren.

Bibliografi

- [1] Bane NOR teknisk regelverk. <https://trv.jbv.no/wiki/Forside>. Besøkt mars 2017.
- [2] Bane NOR teknisk regelverk: Justeringsregler for vekselstrømsporfelt 95/105 hz. https://trv.jbv.no/wiki/Signal/Bygging/Togdeteksjon/Vedlegg:_Justeringsregler_for_vekselstr%C3%B8msporfelt_95/105_Hz. Besøkt april 2017.
- [3] Bane NOR teknisk regelverk: Togdeteksjon. <https://trv.jbv.no/wiki/Signal/Prosjektering/Togdeteksjon>. Besøkt april 2017.
- [4] MathWork simulink overview. <https://se.mathworks.com/products/simulink.html>. Besøkt april 2017.
- [5] Bane NOR Prosjekter: ERTMS. Bane NOR ertms. <http://www.banenor.no/Prosjekter/prosjekter/ertms/>. Besøkt mai 2017.
- [6] Rolf Gillebo. Teori (læremateriell) i sporfeltforståelse. Upublisert bok.
- [7] William M. Goble and Harry Cheddie. *Safety Instrumented System Verification*. ISA - The Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2004.
- [8] Anders S. Helmen. Tilstandsovervåking av sporfelt ved pilotprosjekt på heimdal stasjon. Master's thesis, NTNU, 2016.
- [9] Henning Johansen. *Arbeid på Signalanlegg 1*. Yrkesforlaget, 2001.
- [10] Olav Kallerud. Feilanalyse og tilstandsovervåking av togdeteksjonssystemer. Master's thesis, NTNU, 2016. Tilgjengelig på https://brage.bibsys.no/xmlui/bitstream/handle/11250/2396355/Olav_Kallerud_masteroppgave_red.pdf?sequence=1.
- [11] Bane NOR Teknisk regelverk: Definisjon: Sugetransformator. Bane NOR teknisk regelverk: Definisjon: Bt-system. <https://trv.jbv.no/wiki/Definisjon:BT-system>. Besøkt april 2017.
- [12] Bane NOR Teknisk regelverk: Definisjon: Sugetransformator. Bane NOR teknisk regelverk: Definisjon: Sugetransformator. <https://trv.jbv.no/wiki/Definisjon:Sugetransformator>. Besøkt april 2017.
- [13] Bane NOR Teknisk regelverk: Dobbeltisolerte sporfelt for stasjon og linjen (Type 3). Bane NOR teknisk regelverk: Togdeteksjon/vedlegg: Justeringsregler for vekselstrømsporfelt 95/105 hz. https://trv.jbv.no/w/index.php?title=Fil:JD551_07a_fig005.png&filetimestamp=20101122084922&. Besøkt mars 2017.
- [14] Bane NOR Teknisk regelverk: Illustrasjon av sporfeltets virkemåte. Bane NOR teknisk regelverk:

Togdeteksjon. https://trv.jbv.no/w/index.php?title=Fil:JD550_07_fig003.png&filetimestamp=20101122085021&. Besøkt mars 2017.

[15] Susan A. Riedel and James W. Nilsson. *Electric Circuits*. Pearson, 2011.

MATLAB-kode (eksempel) benyttet til kjøring av simulering og plott

```

1 clear
2 close all
3
4 %Dette skriptets hensikt er aa simulere et enkelt sporfelt type 3 med
5 %KL-koblet til. Baade med balansert skinnemotstand og ikke.
6
7 simuleringstid = 4; % sekunder
8
9 %KL-verdier
10 spenning_KL = 15e3* sqrt(2); %Kilo Volt Peak-to-peak som tilsvareer 15.000 RMS
    Volt
11 frekvens_KL = 16.666; %Hz
12 motstand_togmotor = 100; % Ohm
13 %Tilforselverdier
14 sporfelt_tilforsel = 220 * sqrt(2); % V Peak-to-peak som
15                                     % tilsvareer 220 RMS Volt
16 %Transformatorverdier
17
18 viklingsforhold_tilforsel_trafo = 359/24;
19 viklingsforhold_retur_trafo     = 3/5;
20
21 %Kapasitanser
22 kapasitans_mellom_skinner = 1e-6; %F
23
24 %Motstandsverdier
25 isolert_skinneskjoet      = 4e3; %4 kOhm
26 tilfoersel_motstand      = 4; % Ohm
27 retur_motstand           = 6; % Ohm
28
29 avledning_mellom_skinner= 5;   % Ohm I en linje paa rundt 400 m
30 linje_motstand           = 0.1; % Ohm
31 motstand_togaksling      = 1;   % Ohm

```

```

32 kabelmotstand_retur      = 10;    % Ohm
33
34 %ubalanse = 0; %
35 ubalanse = 0.1*linje_motstand;
36
37 %Shunt
38 togshunt                  = 0.02; % Typisk togshunt
39
40 %Nominell ytelse (Power rating) motstander
41 power_rating_R_R          = 100;% Watt
42 power_rating_R_T          = 300;% Watt
43 power_rating_R_K          = 10; % Watt
44
45 %Induktanser
46 induktans_filterimpedanser = 100; %mH
47 induktans_i_linje         = 10e-6; % H
48 ubalanseImp = 0;
49
50 %Passeringstid
51 ankomst_i_sporfelt       = 1; % Sekunder ut i simulering
52 tid_i_sporfelt           = 1.5; %sekund
53 pulsbredde               = 0.5*100*tid_i_sporfelt/simuleringstid; %prosent av simuleringstid
54
55
56 %%
57 ubalanse_vektor = [0 0.1 0.3 0.8]*linje_motstand;
58
59 for i=1:length(ubalanse_vektor)
60     ubalanse = ubalanse_vektor(i);
61     E_T_vektor = [];
62     sim('enkleste_sporfelt_med_KL_fancy_rele')
63     RMS_tilf_vector = RMS_tilf.Data;
64     RMS_tilf_vector = RMS_tilf_vector*1000;
65     RMS_ret_vector = RMS_ret.Data;
66     RMS_ret_vector = RMS_ret_vector*1000;
67     figure(1)
68     plot( RMS_tilf.Time, RMS_tilf_vector, 'LineWidth',2);
69     hold on
70     figure(2)
71     plot( RMS_ret.Time, RMS_ret_vector, 'LineWidth',2);
72     hold on
73
74 end
75
76 figure(1)
77 title('Tilforselstrom')
78 xlabel('Tid [S]') % x-axis label
79 ylabel('Strom [mA]') % y-axis label
80 h1 = legend('0 %', '10 %', '30 %', '80 %')
81     v = get(h1, 'title');

```

```
82     set(v,'string','ubalanse i linjemotstand');
83 figure(2)
84 title('Returstrom')
85 xlabel('Tid [S]') % x-axis label
86 ylabel('Strom [mA]') % y-axis label
87 h2 = legend('0 %','10 %','30 %','80 %')
88 v = get(h2,'title');
89 set(v,'string','ubalanse i linjemotstand');
```


Kapittel **B**

Datablad for sporfelttransformatorer

PRIMÆR.: 220(+/-10%, 95-105Hz)	359 Tørn pri	VOLT, 1.486	AMP.
SEKUNDÆR-1: 10-14-23-30	17-24-39-51	VOLT, 10	AMP.
SEKUNDÆR-2:		VOLT,	AMP.
SEKUNDÆR-3:		VOLT,	AMP.
SEKUNDÆR-4:		VOLT,	AMP.
SEKUNDÆR-5:		VOLT,	AMP.
SEKUNDÆR-6:		VOLT,	AMP.
TYPE TRANSFORM.: Standard		EFFEKT: 300	VA
FREKVENNS: 95	Hz	FASE: 1	
UTFØRELSE: Moulded		KLASSE:	
KOBL./GRUPPE:		LAST: 100	%
I HENNHOLD TIL: EN-61558-2-6		TEMP KLASSE: B = 80	°C
OMGIVELSESTEMP: 40	°C	KALK.T.STIGN.: Δ t	68 °C
BLIKK DIM: EI-96		BLIKK KVALITET: 1.1W VM 111-35	0.35mm
BLIKK AREALE: 18.15	cm²	BLIKK VEKT: 2.76	KG.
INDUKSJON: .8005	TESLA	FE TAP VED: 4.47	W/KG.
STR.TETTHET PRI: 3.36	A/mm²	,-SEKUNDÆR: 3.93	A/mm²
CU TAP/95°C: 20.59	WATT	CU TAP: Δ t	19.63 WATT
FE TAP: 4.47	WATT	TOTAL TAP: Δ t	24.101 WATT
Er/95°C: 6.86	%	Er: Δ t	6.54 %
Ex: 4.32	%	Ez: Δ t	7.84 %
Ez/95°C: 8.11	%	VOLT/VIND: .613	VOLT
INDUKTANS-PRI: 1114	mH	,-SEKUNDÆR: 22.5	mH
KORT.STRØM.PRI: .0183	KA Δ t	,-SEKUNDÆR: .1233	KA Δ t
START STRØM: 26.91	x nom.str.	EDDY CURRENT: 0	W
EFFEKT V.1/1 LAST: 92.18	%	EFFEKT V.3/4 LAST: 93.22	%
EFFEKT V.1/2 LAST: 93.8	%	EFFEKT V.1/4 LAST: 92.46	%
CU VEKT-PRI: .322	KG.	TERM.KORT.STRØM: .049	KA/2s
CU VEKT-SEK.: .279	KG.	DIM FOR MEK.K.STRØM:	KA/2s
CU VEKT-TOTAL: .6005	KG.	TOTAL VEKT, FE+CU: 3.36	KG.
DIMENSJON: 108x125x98	mm	TOTAL VEKT: 4.0	KG.

TYPE: LF96CH-708419520

SIDE 2 av 2

SERIE/WARE. NR.: 3-080-000083

MERKING, 1:
SKILT 1050
000083.080

TILFØRSELSTRANSFORMATOR TYPE LF96CH-708419520 300VA IP21

Noratel AS - Norway

Art.no.: 3-0080-000083

I henhold til EN 61558-2-6 ta=40°C

PRI.

95-105Hz

0 - 220V

SEC.

Max load: 10 Amp.

0 - 10V - 14V - 23V - 30V



MERKING, 2:

Spesielle krav:
Max 60mA Tomg. strøm
ved 220V-95Hz

TESTPROSEDYRE:

ISOLASJONSTEST FRA SEPARAT SPENNINGSKILDE !

MELLOM INN OG UT-VIKL.: 4 KV AC RMS / 2 SEK.

MEL. VIKLINGER OG KJERNE: 1.75 KV AC RMS / 2 SEK.

MEL. VIKLINGER OG SKJERM: 0 KV AC RMS / 2 SEK.

INDUSERT OVERSPENNINGSTEST !

VED 2 X MERKE-FREKVENNS: .4 KV AC RMS / 2 SEK.

MÅLT EZ: 0 VOLT VED 20°C

MÅLT KOBBER-TAP: 0 WATT VED 20°C

MÅLE FAKTOR: 100 %

TOLERANSE: Standard		Ø.BEMERK.:	
INN (1-2): 220		VOLT VED: 95	HZ
TOMG.TAP(+R*1²): 4.484		WATT / MAKS: 5.829	WATT
TOMGANGSTRØM: 53.22		mA / MAKS: 69.18	mA
TAPPING/PRI.: 220(+/-3%)		VOLT, 3.288(+/-10%)	OHM
UTGANG/SEK-1: 10.42-14.71-23.9-31.25(+/-3%)		VOLT, .02857-.04034-.06555-.08572(+/-10%)	OHM
UTGANG/SEK-2:		VOLT,	OHM
UTGANG/SEK-3:		VOLT,	OHM
UTGANG/SEK-4:		VOLT,	OHM
UTGANG/SEK-5:		VOLT,	OHM
UTGANG/SEK-6:		VOLT,	OHM
DATO: 26.02.2001	KONSTR.: R.P./B.G.	DATO: 27.06.2003	REV.: 02/L.H.
		DATO: 12.09.2003	GODKJENT: B. Gommerud
		DOK. NR.:	



Noratel AS - Norway

PRODUCTION SHEET PAGE 2

CUSTOMER:
ORDER NO.:
DEL. TIME..:

PRIMARY:	5(3V, 90-110Hz)	VOLT, 12.18	AMP.
SECONDARY-1:	3.33-5-11.67(2-3-7V)	VOLT, 2.999(5A)	AMP.
SECONDARY-2:	Kalkulert ved metning	VOLT,	AMP.
SECONDARY-3:	5VAC - 16.67Hz	VOLT,	AMP.
SECONDARY-4:		VOLT,	AMP.
SECONDARY-5:		VOLT,	AMP.
SECONDARY-6:		VOLT,	AMP.
TYPE OF TRANSF.:	STANDARD	POWER:	35 VA
FREQUENCY:	16.67 Hz	PHASE:	1
DESIGN:	Moulded	CLASS:	
COUPL./GROUP:		LOAD:	100 %
ACC. TO:	EN-61558-2-6	TEMP CLASS:	B = 95 °C
AMBIENT TEMP.:	40 °C	CALC. T. RISE: Δt	22.5 °C
CORE DIM.:	C-CORE HWR70/32	CORE QUALITY:	0.97W VM97-30 A 0.30mm
CORE AREA:	7.79 cm ²	CORE WEIGHT:	1.72 KG.
INDUKTION:	1.032 TESLA	FE LOSS AT:	.24 W/KG.
CUR.DENS. PRI:	2.21 A/mm ²	,-SECONDARY:	1.321 A/mm ²
CU LOSS/95°C	12.81 WATT	CU LOSS: Δt	10.28 WATT
FE LOSS:	.24 WATT	TOTAL LOSS: Δt	10.523 WATT
Er/95°C	36.6 %	Er: Δt	29.38 %
Ex:	.75 %	Ez: Δt	29.39 %
Ez/95°C	36.61 %	VOLT/WIND:	.06 VOLT
INDUCTANCE-PRI:	12.2 mH	,-SECONDARY:	66.5 mH
SH.C.CUR.PRI:	.0333 KA Δt	,-SECONDARY:	.0082 KA Δt
INRUSH CURRENT:	22.18 times n.c.	EDDY CURRENT:	.95 W
EFF. AT 1/1 LOAD:	72.71 %	EFF. AT 3/4 LOAD:	77.75 %
EFF. AT 1/2 LOAD:	83.38 %	EFF. AT 1/4 LOAD:	89.12 %
CU WEIGHT-PRI.:	.671 KG.	THERM. W. CURRENT:	.618 KA/2s
CU WEIGHT-SEC.:	.756 KG.	MECH. S/C W.CURRENT:	KA/2s
CU WEIGHT-TOT.:	1.4265 KG.	TOT. WEIGHT, FE+CU:	3.1421 KG.
DIMENSIONS:	108x124x98 mm	TOT. WEIGHT:	4.0 KG.

42 Tomu pr
29-42-98

TYPE: **FR120B-S.48239** PAGE 2 of 2 SERIAL/ART. NO.: **3-080-000085**

MARKING 1:
SKILT 1050
000085.080

RETURTRANSFORMATOR
TYPE FR20B-S.48239 35VA IP 21

Noratel AS - Norway
Art.no.: 3-080-000085

JBV F.NR. 708.419.700
I henhold til EN 61558-2-6 $t_a=40^\circ\text{C}$

PRI.	SEC.
90-110Hz	Max last: 5 Amp.
0 - 3V	0 - 2V - 3V - 7V

MARKING 2:

Spesielle krav:
Max 150mA Tomg. strøm ved 3V-100Hz(1.5V-50Hz)
Metning 5V-16.67Hz

TESTPROCEDURE:
SEPARATE SOURCE VOLTAGE WITHS TEST !
BETW. INPUT & OUTPUT: 4 KV AC RMS / 2 SEC.
BETW. I/O-COIL & CORE: 1 KV AC RMS / 2 SEC.
BETW. I/O-COIL & SCREEN: 0 KV AC RMS / 2 SEC.
INDUCED OVERVOLTAGE WITHSTAND TEST !
AT 2 X RATED FREQUENCY: 0 KV AC RMS / 2 SEC.
MEASUREMENT EZ: 0 VOLT AT 20°C
MEASUREMENT CU-LOSS: 0 WATT AT 20°C
MEASUREMENT FACTOR: 100 %

TOLERANCES:	Standard	F. REMARKS:	
INPUT (1-2):	5	VOLT AT:	16.67 HZ
NO L. LOSS(+Rxl ²):	.239	WATT / MAX:	.311 WATT
NO LOAD CURR.:	71	mA / MAX:	92.04 mA
OUTPUT/PRI.:	5(+3%)	VOLT,	.0422(+10%) OHM
OUTPUT/SEC-1:	3.27-4.94-11.67(+3%)	VOLT,	.1805-.2006-.2808(+10%) OHM
OUTPUT/SEC-2:		VOLT,	OHM
OUTPUT/SEC-3:		VOLT,	OHM
OUTPUT/SEC-4:		VOLT,	OHM
OUTPUT/SEC-5:		VOLT,	OHM
OUTPUT/SEC-6:		VOLT,	OHM
DATE:	CONSTR.:	DATE:	REV.:
01.03.2001	R.P.	06.07.2016	02/L.H.
		DATE:	APPROVED:
		06.07.2016	lautte
		DATE:	DOC. NO.: