

1	FORORD	3
2	FUNKSJONALITET FOR RELÈVERN I JERNBANEVERKET	4
2.1	Innledning	4
2.2	Vern i roterende omformerstasjoner	4
2.2.1	Vern av motor.....	4
2.2.1.1	Tilleggsvern som finnes på 7 og 10 MVA aggregat (både Nebb og ASEA):	5
2.2.1.2	Tilleggsvern som finnes på 10 MVA aggregater (Nebb og ASEA):	5
2.2.2	Vern av generator	5
2.2.2.1	Tilleggsvern som finnes på 7 og 10 MVA aggregat:	6
2.3	Vern av transformatorer	6
2.3.1	Enfasetransformator	6
2.3.2	50 Hz transformator/innkommende linje	7
2.4	Vern av samleskinner	7
2.5	Vern i statiske omformere.....	7
2.5.1	Vern av omformer	8
2.5.2	Vern av samleskinne/utgående linje.....	8
2.5.3	Vern av transformator	8
2.5.3.1	16 ² / ₃ Hz transformator	8
2.5.3.2	50 Hz transformator/innkommende linje.....	8
2.6	Vern av 15 kV ledninger	8
2.6.1	Distansevern	8
2.6.2	Overstrømsvern	9
2.6.3	Underspenningsvern.....	9
2.7	Sonegrensebrytere	9
2.8	Vern mot innkobling mot feil	10
2.9	Automatisk gjeninnkobling	10
2.10	Kommunikasjon	11
3	TEKNISK BESKRIVELSE AV RELÈVERN I JERNBANEVERKET	12
3.1	Distansevern	12
3.1.1	Generelt	12
3.1.2	Karakteristikker i impedansplanet	12
3.1.3	Typer distansevern.....	13
3.1.3.1	Sirkulær karakteristikk	14
3.1.3.2	Firkant karakteristikk.....	16
3.1.3.3	Mho karakteristikk.....	19
3.2	Overstrømsvern/kortslutningsvern	22
3.2.1	Momentant relé	22
3.2.2	Konstanttid relé	23
3.2.3	Inverse tid relé	23
3.2.4	Strømsprangrelé	24
3.2.5	Spesielle løsninger	24
3.2.5.1	Overstrømsvern som spenningsrelé.....	24
3.3	Minimal- og maksimalspenningsrelé	24
3.4	Differensialvern	25
3.5	Jordfeilrelé	25
3.6	Effektretningsrelé	25
3.7	Termiske vern	26
3.7.1	Lokale termiske vakter	26
3.7.2	Termisk vern for kontaktledning	26
3.8	Bryterfeilvern	26
3.9	Overspenningsbeskyttelse	26
4	KORTSLUTNINGSBEREGNINGER	27

4.1	Innledning	27
4.2	Forutsetninger	27
4.3	Beskrivelse av anleggskomponenter	28
4.3.1	Roterende omformere	28
4.3.1.1	Kortslutningsytelse fra Jernbaneverkets roterende omformeraggregater	30
4.3.1.2	Feilstrøm basert på frekvensplan analyse	38
4.3.2	Statiske omformere	39
4.3.3	Transformatorer	40
4.3.4	Kontaktledningsanlegg	41
4.3.5	Tog	41
4.4	Beregningsmetode	43
4.4.1	Representasjon av omformerstasjoner	43
4.5	Beregningseksempel	44
5	PRAKTISK UTFØRELSE AV SELEKTIVITETSANALYSER	46
5.1	Overgangsmotstand	46
5.2	Sideinnmating	47
5.3	Belastningsstrøm	48
5.4	Tidsmarginer	49
5.5	Innstilling av overstrømsvern	50
5.5.1	Generelt	50
5.6	Innstilling av distansevern	52
5.7	Eksempel på oppbygging av en reléplan	54
6	REFERANSELISTE	55
7	VEDLEGG	56

1 FORORD

Denne relevernhandboken er resultatet av et prosjekt initiert av Jernbaneverket Hovedkontoret og BaneEnergi. Arbeidet med å få frem en håndbok tok til med planlegging av oppgaven i august 2000 og ble avsluttet februar 2002. Bak håndboken ligger en utredning av flere aspekter ved jernbanestrømforsyningen og problemstillinger knyttet til relévern [1]. Bane Partner har hatt prosjektlederansvaret og stått for utarbeidelsen av utredningen og håndboken. BaneEnergi, spesielt Inge Skaale, har vært involvert i arbeidet med å beskrive de ulike relévernene i BaneEnergis omformerstasjoner og har engasjert seg i arbeidet med håndboken generelt.

Relevernhandboken er ment å være et hjelpemiddel for alle som skal utarbeide reléplaner for Jernbaneverket. Håndboken er derfor forsøkt utarbeidet slik at personer uten inngående kjennskap til jernbanestrømforsyningen kan få tilstrekkelig informasjon til å utarbeide velfungerende reléplaner. Håndboken er også ment å sikre ensartede reléplaner og medvirke til at valg av reléverninnstillinger er gjort på et entydig grunnlag.

Trondheim 2002-01-30

Frode Johannessen

2 FUNKSJONALITET FOR RELÉVERN I JERNBANEVERKET

2.1 Innledning

Det finnes flere ulike vern i jernbanestrømforsyningen, men det er bare noen av disse som vil være gjenstand for selektivitetsvurdering, d.v.s som skal innstilles med hensyn til hva andre vern er innstilt på. Også de vern som ikke deltar i selektivitetsanalysen kan være selektive på den måten at de skal fungere for en feil innenfor et spesielt avgrenset område av nettet.

Differensialvernet er et typisk eksempel, dette vernet vil løse for feil innenfor et område som er bestemt av lokaliteten til de matende strømtransformatorer, men vernet er helt autonomt dvs. at innstillingen er uavhengig av andre vern i nettet. Det er derfor ikke med i en selektivitetsanalyse, men vil være gjenstand for like stor oppmerksomhet ved innstilling som andre vern.

I de følgende avsnitt gis en kort oversikt over de viktigste vernereleé som finnes i jernbanestrømforsyning og deres funksjonalitet og rolle i den totale sammenhengen. Det finnes flere vern og reléer i omformerstasjonene enn de som er beskrevet her, samt at det finnes forskjeller fra stasjon til stasjon. Vernereléer som verner hovedkretser eller har andre viktige funksjoner er beskrevet. Av de mer perifere vern er noen nevnt mens andre er utelatt for lesbarheten sin skyld.

2.2 Vern i roterende omformerstasjoner

2.2.1 Vern av motor

- Overstrømsvern (Overstrøm motor). Dette er primærvern for motor mot overbelastning og kortslutning. Vernet er ikke retningsbestemt, det virker derfor også ved tilbakemating av effekt til trefasenettet i de stasjoner som er bygget om for å gjøre det, se bakeffektrelé, kapittel 2.2.2. Det vil i disse tilfeller være kortslutningsvern mot trefasenettet når motoren går som generator.
Normalinnstillinger (ref 6,3kV):
 - 3,1MVA: $I \geq 800$ A, $t(I) = 3$ s (invers tid)
 - 5,8MVA: $I \geq 960$ A, $t(I) = 4$ s (invers tid), $I_{\geq} = 3840$ A
 - 7 MVA: $I \geq 1600$ A, $t(I) = 2$ s (invers tid), $I_{\geq} = 6400$ A
 - 10MVA: $I \geq 1920$ A, $t(I) = 3$ s (invers tid), $I_{\geq} = 7680$ A
- Overstrømsvern magnetiseringskretser (Høy magnetisering motor). Dette er vern som hindrer for høy strøm i magnetiseringskretser. Ettersom magnetiseringen øker med økende belastning, blir det også reserve vern for overstrøm motor.
Normalinnstillinger (ref 110 V):
 - 3,1MVA: $I \geq 8$ A, $t = 6$ s (konstant tid)
 - 5,8MVA: $I \geq 3,5$ A, $t = 3$ s (konstant tid)
 - 7 MVA: $I \geq 15$ A, $t = 3$ s (konstant tid)
 - 10MVA: $I \geq 5$ A, $t = 8$ s (konstant tid)
- Minimalfrekvens 6 kV. Dette reléet løser ut dersom det er for lav frekvens på innkommende linje (trefaseforsyning). Normalt innstilt på 47Hz.
- Temperaturovervåking. Motoren er utstyrt med temperatursensorer i statorviklinger og i lager for å forhindre for høy temperatur ved overbelastning over tid eller feil/slitasje.
Målepunkter for:
 - Overtemp motorlagerlager
 - Overtemp motorviklingerOvertemperatur motorlager stanser omformeren. Overtemperatur motorviklinger gir feilsignal.

2.2.1.1 Tilleggsvern som finnes på 7 og 10 MVA aggregat (både Nebb og ASEA):

- Differensialvern motor. Relé som beskytter ved kortslutning mellom fasene. Reléet løser ut omformeren.
- Jordfeil magnetisering motor. Detekterer jordfeil i magnetiseringskretser i motor. Reléet gir feilsignal.
- Noen av 5,8MVA aggregater har gjennomgått en omfattende ombygging/revisjon av apparatutrustningen, og har en vernutrustning liknende 10MVA".

2.2.1.2 Tilleggsvern som finnes på 10 MVA aggregater (Nebb og ASEA):

- Viklingskortslutningsvern motor. Vern som beskytter ved kortslutning mellom viklinger i motor. Reléet løser ut omformeren.
- Noen av 5,8MVA aggregater har gjennomgått en omfattende ombygging/revisjon av apparatutrustningen, og har en vernutrustning liknende 10MVA".

2.2.2 Vern av generator

- Overstrømsvern (Overstrøm generator). Dette er primærvern for generator mot overbelastning og kortslutning.

Normalinnstillinger (ref 16kV):

3,1MVA: $I \geq 450A$, $t=3s$ (konstantid)

5,8MVA: $I \geq 625A$, $t(I) = 3s$ (inverse tid), $I \geq 1875A$

7 MVA: $I \geq 900A$, $t(I) = 3s$ (inverse tid), $I \geq 3400A$

10MVA: $I \geq 1250A$, $t=2s$ (konstant tid)

- Overstrømsvern magnetiseringskretser (Høy magnetisering generator). Som for motor.

Normalinnstillinger (ref 110 V):

3,1MVA: $I \geq 8A$, $t=6s$ (konstant tid)

5,8MVA: $I \geq 6A$, $t=3s$ (konstant tid)

7 MVA: $I \geq 15A$, $t=4s$ (konstant tid)

10MVA: $I \geq 8A$, $t=8s$ (konstant tid)

- Bakeffektrelé. Dette er et relé som skal forhindre at omformeren mater store effekter mot trefasenettet. Opprinnelig er omformeren utstyrt med et relé som løser ut omformeren dersom effekten som mates mot trefasenettet overstiger innstilt verdi på bakeffektreléet.

For de forskjellige omformerene tilsvarende dette:

Normalinnstillinger:

3,1MVA: ca.125kW, $t=10s$

5,8MVA: ca.200kW, $t=10s$

7 MVA: ca.275kW, $t=10s$

10MVA: ca.380kW, $t=10s$

Mange omformerstasjoner er imidlertid bygget om for å kunne mate effekt tilbake til nettet, ettersom flere og større tog benytter elektromekanisk brems. Den overskytende effekten som ikke distribueres i kontaktledningsanlegget kan da mates tilbake gjennom omformeren og distribueres i trefasenettet. Dette er oppnådd ved at bakeffektreléet er koblet sammen med jordfeilvernet på innkommende linje, og løser kun ut omformeren dersom det detekteres jordfeil i trefasenettet samtidig som det tilbakemates effekter større enn innstilt verdi på bakeffektrelé.

- Jordfeil (generator & transformator). Reléet løser ut ved jordfeil på generator eller på primærsiden av enfasetransformator. For 3,1MVA aggregat brukes spenningsrelé til å måle nullspenningen, mens de resterende bruker strømrelé til å måle nullstrømmen. Dette er mulig siden det er et tofase system mellom generator og enfasetransformator.

Normalinnstillinger:

3,1MVA: 15V, $t=0,2s$

5,8MVA: 0,1A, $t=0,5s$

7 MVA: 0,1A, t=0,5s

10MVA:0,1A, t=0,5s/2s* (ASEA: 0,5s. NEBB: 2s)

- Differensialvern (generator og transformator). Differensialvernets måletransformatorer er koblet til generatorviklingens midtpunkt og 16kV side av transformator. Det dekker derfor feil mellom disse punktene.
- Temperaturovervåking. Generatoren er som motoren utstyrt med temperatursensorer i statorviklinger og i lager. Det er i tillegg temperatursensorer for innkommende og utgående kjøleluft. For kald innkommende kjøleluft kan forårsake skader, mens for høy temperatur på utgående kjøleluft kan gi forvarsel om generell for høy temperatur på generatoren/for dårlig kjøling.

Det er målepunkter for:

- Overtemp generatorlager
- Overtemp generatorviklinger
- Overtemperatur utgående kjøleluft
- Undertemperatur innkommende kjøleluft

Overtemperatur generatorlager stanser omformeren. De resterende gir feilsignal.

2.2.2.1 Tilleggsvern som finnes på 7 og 10 MVA aggregat:

- Jordfeil magnetisering generator. Detekterer jordfeil i magnetiseringskretser i generator. Reléet gir feilsignal.

2.3 Vern av transformatorer

2.3.1 Enfasetransformator

- Gassvakt. Som vern omfatter gassvakt primært indre kortslutninger eller jordslutninger i transformatoren. Dette gir gassutvikling i oljen og gassvakten reagerer. Gassvakten kan i tillegg gi varsel om indre skader under utvikling, for eksempel dårlige kontakter, lokal oppvarming, tilstopping av oljekanaler etc. Gassvakten i JBV's omformertransformatorer gir utløsning ved høy gassutvikling (eks. indre kortslutning), men kun signal ved mindre gassutvikling (eks. dårlige forbindelser).
- Differensialvern (generator og transformator). Differensialvernets måletransformatorer er koblet til generatorviklingens midtpunkt og 16kV side av transformatoren. Det dekker derfor feil mellom disse punktene. Releet kobler ut omformer.
- Temperaturovervåking. Transformatoren er utstyrt med sensorer som måler temperatur i viklinger og i olje. Ettersom temperatursensorer ikke kan monteres direkte på transformatorviklinger, måles denne temperaturen via en kompensert sensor i en termometerlomme. Utrustningen består av et varmeelement som er montert i en oljefyllt termometerlomme i transformatorlokket. Varmeelementet oppvarmes av strømmen fra en strømtransformator som transformatorens belastningsstrøm, og temperaturen i termometerlommen vil bli lik summen av toppoljetemperaturen og tilleggstemperaturen fra varmeelementet. Ved å avpasse varmeelementets termiske tidskonstant med transformatorens data, kan en oppnå sikker kontroll av vikingstemperaturen.

Målepunkter for:

- Overtemp transformatorolje
 - Overtemp transformatorvikling
- Disse gir feilsignal

2.3.2 50 Hz transformator/innkommende linje

Ettersom noen omformerstasjoner har fast 50 Hz transformator, kan det være enkelte forskjeller i vernutrustningen for noen stasjoner.

- Overstrømsvern. Beskytter 50 Hz trafo og innkommende linje ved kortslutning som kan mates fra 50 Hz nettet og 50Hz nett ved tilbakemating. Innstilles selektivitet mot overstrømsvern for motor og generator, men maksimalinnstilling er oppgitt $I_{k,min}$ fra everket. Reléet står i den faste stasjonsutrustning. Gir utløseimpuls til innkommende linjebryter.
Normalinnstillinger for transportable transformatorer (ref 6,3kV):
3,1MVA: $I \geq 720A$, $t=4s$ (konstantid)
5,8MVA: $I \geq 1080A$, $t=4s$ (konstantid)
7 MVA: $I \geq 1760A$, $t=4s$ (konstantid)
10MVA: $I \geq 2160A$, $t=4s$ (konstantid)
- Differensialvern transformator. Differensialvernets måletrafoer er koblet til primærsiden og sekundærsiden av transformatoren. Det dekker derfor feil mellom disse punktene. Differensialvernet består av to vern; finvern og grovvern. Gir utløseimpuls til innkommende linjebryter. Differensialvern finnes ikke i alle stasjoner.
- Jordfeil. Jordfeilvern tilknyttet innkommende linje før transformatoren. Detekterer jordfeil i trefasenettet. I stasjoner som er bygget om for å kunne mate effekt tilbake til trefasenettet, er dette releet koblet i serie med bakeeffektrelé på generator. Releet kobler ut omformer.
- Gassvakt. Trefasetransformator er utstyrt med gassvakt.
- Temperaturutrustning. 50 Hz transformator er ikke tilknyttet temperaturutrustningen som kontrollerer omformer og $16^{2/3}$ Hz transformator. De fleste transformatorer er utstyrt med egen temperaturovervåkning, som er tilknyttet vifter for forsert kjøling ved behov.
- Jordfeil 6,3 kV. Reléet står i den faste stasjonsutrustning, og detekterer jordfeil fra transformatorens sekundærside til motor (6,3 kV). Releet gir feilsignal.

2.4 Vern av samleskinner

- Underspenningsvern. Minimalspenningsrelé for samleskinne. Kortslutningsvern, ved lavohmig feil synker spenningen. Normalinnstilling 4 kV.
- Distansevern. I noen stasjoner er distansevernets sone 3 rettet bakover for å detektere kortslutninger på samleskinnen. Distanseverninnstillingen vil være en del av en selektivetsplan.
- Lysbuevern benyttes i noen nyere stasjoner. Detekterer lysbue mellom skinneføringene.

2.5 Vern i statiske omformere

Statiske omformere inneholder mange komponenter som både er kostbare og ømfintlige for endringer av strøm og spenning utover det operasjonsområdet de er produsert for. De har derfor en omfattende vernutrustning for å sikre at parametre ikke overstiger grenser som kan medføre skade.

Styring og overvåkning av parametre er implementert i styringen av omformeren og holder kontinuerlig disse på optimalt nivå eller innenfor definerte grenser. Det meste av reléutrustningen som finnes i omformeren er dermed "reservevern" som trer i kraft dersom styringen svikter, eller det er feil som ikke kan detekteres av styringen.

Det er ikke hensiktsmessig å nevne alt av styringslogikk og vernutrustning her. Forskjellige leverandører leverer i tillegg forskjellige løsninger, slik at en helhetlig generell beskrivelse er vanskelig å gi. En del lokale vern, overvåkningssystemer og vakter for komponenter i

omformerstasjonen er derfor utelatt, og kun en overordnet, kort beskrivelse av vern i hovedkretsen er gitt.

Noen anleggsdeler som innkommende linjer/50 Hz transformator, og utgående linjer har forholdsvis lik vernutrustning som roterende omformerstasjoner, og kun forskjeller fra disse er beskrevet. Hovedforskjellen ligger i vern av omformer.

2.5.1 Vern av omformer

- Strømgrense. Statiske omformere har implementert strømgrense for å verne komponentene i omformereren mot overbelastning. Ved overbelastning og ved kortslutning trer strømgrensen i funksjon, og begrenser strømmen fra omformereren. Se kapittel 4.3.2. Dette kan skape problemer med selektivitet og reléfunksjoner for utgående linje. Dersom et aggregat jobber i eller nær strømgrense når en feil oppstår i sone 2 for distansevernet, vil ikke strømsprangfunksjonen i distansevernet detektere stort nok strømsprang til å frigjøre utløsning for sone 2. Dette er løst med en spenningssprangfunksjon i tillegg til strømsprangfunksjonen for frigjøring av sone 2 i distansevernet.
- Overstrøm omformer 50 Hz. Detekterer og kobler bort feil i omformereren for å forhindre skade på komponenter. Vernet er innstilt noe over tillatt overlast (strømgrense), og er reserve dersom denne svikter.
- Overstrøm omformer 16 ²/₃ Hz. Vern i flere nivåer som detekterer, begrenser og i siste instans kobler bort overstrømmer som overskrider strømgrensene for å forhindre skade på komponenter. Er reservevern dersom vern for utgående linje svikter.
- Filtervern. Statiske omformere har store filterkomponenter for å fjerne overharmoniske komponenter som oppstår ved likeretting og vekselretting. Større filterkomponenter er vanligvis vernet med overstrømsvern og differensialvern/ubalansevern for å detektere feil.
- Underspenningsvern. Reléet verner komponenter i omformereren mot overbelastning, kortslutning i omformereren, eller andre feil som kan gi for lav spenning, dersom styringen svikter.

2.5.2 Vern av samleskinne/utgående linje

Samme reléfunksjoner som for roterende omformerstasjoner.

2.5.3 Vern av transformator

2.5.3.1 16²/₃ Hz transformator

Transformator har tilsvarende vernutrustning som roterende omformere.

2.5.3.2 50 Hz transformator/innkommende linje

Transformator har tilsvarende vernutrustning som roterende omformere. I tillegg er statiske omformere utstyrt med overspenningsvern.

Statiske omformere inneholder kraftelektronikk og elektronikk som er ømfintlige for overspenninger. Kostbare komponenter kan ta skade ved spenninger høyere enn komponentene er beregnet for, og er derfor utstyrt med overspenningsrelé. Innstilles vanligvis ca. 10% over antatt maksimal kontinuerlig spenning.

2.6 Vern av 15 kV ledninger

2.6.1 Distansevern

Distansevernet utgjør det viktigste vernet av kontaktledning og kabler i jernbanesammenheng. Distansevernet måler strøm og spenning og vil på bakgrunn av dette bestemme impedansen i det nettverket som forsynes. Ved å benytte et impedansplan med fire kvadranter er vernet

retningsfølsomt, det vil si det måler retningen på strømmen gjennom strømspolen og kan stilles inn slik at det ikke reagerer på feil bak vernet.

Dersom det oppstår en kortslutning på linjen og impedansen underskrider en innstilt verdi, faller innenfor en sone i impedansplanet, vil vernet gi utløseimpuls.

Vernet har normalt to impedanssoner, sone 1 er momentan og er som regel innstilt til 85 % av kontaktledningsimpedansen frem til neste stasjon. Dersom denne innstillingen gir problemer med laststrømmer kan sonen reduseres ned mot 60 %.

Sone 2 er tidsforsinket (normalt 200 ms) og skal dekke hele strekningen frem til neste stasjon. For å sikre at vernet dekker hele strekningen er det stilt inn med en viss margin for å kompensere for unøyaktigheter. Sone 2 er utstyrt med strømsprangrelé for å hindre at de løser ut for laststrømmer. Dersom distansevernene står på strekninger forsynt fra statiske omformere med strømgrense blir strømsprangreléet komplettert med et spenningsprangrelé.

Distansereléet inngår i selektivitetsanalysen og skal være selektivt i forhold til vern i nabostasjonene.

2.6.2 Overstrømsvern

Et overstrømsvern løser ut dersom strømmen det måler overskrider innstilt verdi. Det finnes forskjellige typer relé med forskjellig funksjonenskarakteristikk mhp utløsetid. Disse kan grovt deles inn i følgende kategorier:

- I> Lavstrømstrinn Konstant eller inverstids forsinket
- I>> Høystrømstrinn, momentant overstrømsvern
- I>>> Kortslutningsvern, meget hurtig overstrømsvern for å koble ut store kortslutningsstrømmer hurtig

Overstrømsvernet skal inngå i selektivitetsanalyser og skal være selektivt overfor vern i nabostasjonene.

2.6.3 Underspenningsvern

Et underspenningsvern løser ut dersom spenningen det måler underskrider innstilt verdi. For utgående linje fungerer dette som et ekstravern som løser ut ved kortslutninger nær omformerstasjonen dersom verken distansevern eller overstrømsvern detekterer dette.

Normalt innstilt på 10 kV, tidsforsinkelse på 2 s.

Kan erstattes med underspenningsvernet på samleskinnen. Samleskinnevernet stilles i såfall opp fra 4 kV til ca. 9 kV og en tidsforsinkelse på 0,5 s.

2.7 Sonegrensebrytere

Sonegrensebryteren er en effektbryter som er innkoblet i en dødseksjon. Normalt er sonegrensebrytere innkoblet i kontaktledningen omtrent midt mellom to omformerstasjoner. Formålet med sonegrensebryteren er å gi øket sikkerhet for utkobling ved kontaktledningsfeil, redusere lengden på kontaktledning med bestående feil, og hjelpe til å gi selektiv utkobling av klnettet.

Sonegrensebryteren kobler automatisk ut ved følgende driftssituasjoner:

1. Ved minimal spenning. Dersom spenningen ved bryteren er under ca. 6 kV i 20 s.

2. Ved minimal spenning og høy strøm. Dersom spenningen er under 10 kV og strømmen gjennom bryteren over 300 A i 0,4 s.

Sonegrensebryterens tidsforsinkelser er "samkjørt" med effektbrytere i omformerstasjoner. Dersom det inntreffer en kortslutning mellom to samkjørende omformerstasjoner, vil effektbrytere i begge stasjoner løse ut. Utkobling av effektbrytere vil da starte automatisk gjeninnkobling av disse. (se kapittel 2.9).

Første gjeninnkoblingsforsøk skjer vanligvis etter 5 sekunder. Dersom dette forsøket mislykkes (feilen er der fremdeles), går det 30 sekunder før neste innkoblingsforsøk inntreffer. I tidsrommet mellom første og andre gjeninnkoblingsforsøk i omformerstasjonene, vil sonegrensebryteren koble ut for minimalspenningen, og dele opp nettet mellom omformerstasjonene.

Når effektbryterne i omformerstasjonene da prøver andre gjeninnkoblingsforsøk, vil kun den omformerstasjonen som mater mot den delen av kl-nettet som det er feil på løse ut igjen dersom feilen er bestående.

Sonegrensebryteren utkobles etter 0,4 sekunder ved en minimalspenning som skal være innstillbar mellom 6 - 12 kV, samt en maksimal strøm som er innstillbar mellom 250 - 850 A. Dette vil oppstå hvis en kortslutning er av en slik art at det bare er vernet i den ene matestasjonen som løser ut. Dette kan eksempelvis inntreffe ved tilbakemating av effekt fra elektrisk bremsende tog, da dette kan medføre at vern i den ene omformerstasjonen ikke detekterer feilen.

Sonegrensebryteren kobles automatisk inn etter 10 sekunder når spenningen på begge sider av bryteren er over en innstilt verdi mellom 6 - 12 kV og spenningsforskjellen ikke er over en innstilt verdi på 6 - 12 kV. Når disse kriteriene er oppfylt, er det en indikering at feilen i kl-nettet er borte og omformerstasjonene som mater mot sonegrensebryteren igjen mater som normalt.

Automatisk gjeninnkobling av sonegrensebrytere er under forutsetning av at bryteren er utkoblet av et vern beskrevet ovenfor, og det ikke er gitt utkoblingskommando til bryteren..

2.8 Vern mot innkobling mot feil

- Fasesperre. Minimalspenningsrelé som hindrer innkobling ved stor fasevinkel- eller spenningsforskjell når både hovedsamleskinne og utgående kabelavgang er spenningsatt. Normalinnstilling: 8 kV.
- Prøvebryter. Skal forhindre innkobling mot anleggsdeler hvor det er kortslutning. Dette utføres vanligvis med en prøvemotstand på følgende måte:
- For å avgjøre om det er kortslutning på linjen ved spenningssetting ut fra egen samleskinne, eller om det er kortslutning på egen samleskinne ved spenningssetting av denne fra nabomatestasjonen, kobler en prøvebryter (lastskillebryter) inn en prøvemotstanden på 640 Ω mot linjeavgangen. Prøvemotstanden begrenser feilstrømmen til maksimalt 25 A og brytes innen 2 sekunder ved at prøvebryteren legges ut.

2.9 Automatisk gjeninnkobling

Gjeninnkoblingsautomatikken kobles inn dersom utgående linjebryter faller for driftsvern, dvs. distansevern, overstrømsvern og underspenningsvern. Gjeninnkoblingsautomatikken kobles ikke inn dersom bryteren faller for andre vern og utløsefunksjoner. Utløsning av samleskinnevern, totalstopp eller nødfrakobling gir blokkering av gjeninnkoblingsautomatikken. Fasesperre eller høy temperatur på prøvemotstanden gjør at gjeninnkoblingsautomatikken går over til neste innkoblingsforsøk.

Et gjeninnkoblingsforløp inneholder inntil tre innkoblingsforsøk på bryteren. Tiden regnet fra bryterfallet til første innkoblingsforsøk er 5 s, til andre 30 s og til tredje 180 s. Dersom bryteren ikke holder inne etter 3 gjeninnkoblingsforsøk går bryteren i blokkade.

2.10 Kommunikasjon

Kommunikasjon mellom stasjoner og vern kan utføres på mange måter, med delvis forskjellig formål. Utforming og formål er beskrevet under:

- Hjelpekanalsamarbeid mellom distansevern: Hjelpekanalsamarbeid mellom distansevern innføres for å få sikker 1. sone utløsning på hele strekningen mellom to stasjoner. Sone 1 i stasjonene på begge sider av en strekning kobles sammen over kommunikasjon slik at dersom det ene vernet gir utløseimpuls i sone 1 får det andre vernet også utløseimpuls. Kjent løsning fra energiforsyningen [elektriske kraftsystemer del 2]
- Kommunikasjon mellom overstrømsvern: Kommunikasjon mellom overstrømsvern innføres for å kunne blokkere lavstrømstrinnet på overstrømsvernet slik at man kan tillate høyere laststrømmer på strekningen og samtidig ha redundans i vernutrustningen. Overstrømsvernets høystromstrinn må i så fall dekke over halve strekningen mellom to stasjoner. Det blokkerte lavstrømstrinnet må dekke hele strekningen mellom to stasjoner, men er blokkert inntil overstrømsvernet i tilstøtende stasjon gir utløseimpuls. Dette tiltaket medfører økt redundans dersom det er mulig å stille overstrømsvernet slik som beskrevet, dette kan dette imidlertid ofte være vanskelig i praksis. Banverket benytter denne løsningen på de strekninger der de har problemer med lave kortslutningsstrømmer

3 TEKNISK BESKRIVELSE AV RELÈVERN I JERNBANEVERKET

3.1 Distansevern

3.1.1 Generelt

Distansevern omtales også som impedansrelé. Distansevern brukt i Jernbaneverket er underimpedansrelé, dvs dersom den målte impedansen er mindre enn innstilt verdi, gir vernet utløsningsimpuls til aktuell bryter.

Grunnlaget for denne type vern bygger på at impedansen i kretsen (kontaktledningen) endres ved kortslutning. En belastning representerer en stor impedans som er forholdsvis resistiv, mens en kortslutning representerer en mindre impedans, som uten overgangsmotstand i feilstedet vil bli ca. 45° induktiv.

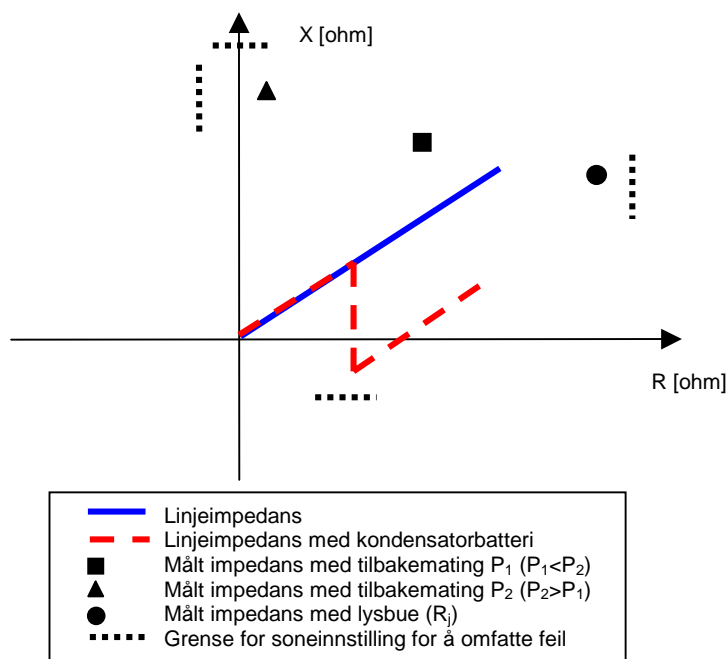
Distansevern har to eller flere soner som kan stilles inn uavhengig av hverandre. Disse brukes i Jernbaneverket til å overvåke forskjellige soner av linjelengden som skal vernes, der sone 1 overvåker første del av strekningen, mens sone 2 dekker resten av strekningen. Selektivitet oppnås ved at sone 2 tidsforsinkes i forhold til sone 1. Ettersom den variable belastningen som et tog representerer på noen strekninger kan gi høyere belastningsstrøm enn en kortslutningsstrøm, er distansevernene utstyrt med strømsprangfunksjon som frigivningsvilkår for sone 2. Denne forhindrer at sone 2 løser for belastningsstrømmer, dvs at sone 2 kun blir aktiv dersom en har et strømsprang over en viss størrelse innenfor rekkevidden til vernet. I statiske omformerstasjoner kompletteres strømspranget med et spenningsprang.

3.1.2 Karakteristikker i impedansplanet

Karakteristikken/innstillingssonene til distansevern kan representeres i impedansplanet (R/X-diagram). Vanlig operasjon befinner seg i første kvadrant, der linjeimpedansen representerer en økende impedans utover langs linjen. Se figur 1.1.

Sonen kan imidlertid bre seg i alle 4 kvadranter. Disse brukes som følger:

- 1. kvadrant; positiv resistans og positiv reaktans, representerer vanlig operasjonsområde med stigende resistans og reaktans utover langs linjen. Lysbuemotstand gir et resistivt tillegg til linjeimpedansen.
- 2. kvadrant; negativ resistans og positiv reaktans. Ved tilbakematende tog på linjen, vil vernet måle mindre R enn linjeimpedansen representerer. Målt resistans kan også bli negativ dersom toget mater tilbake effekt også mot omformerstasjonen. For å oppnå en sikkerhetsmargin mot dette, må sonen omfatte deler av 2. kvadrant.
- 3. kvadrant; negativ resistans og negativ reaktans. Dette er et "speilbilde" av 1. kvadrant, og representerer motsatt effektretning. Dersom en sone befinner seg i 3. kvadrant, måler det for feil motsatt retning av sonen som befinner seg i 1. kvadrant.
- 4. kvadrant; positiv resistans og negativ reaktans. Linjeimpedansen kan berøre denne sonen dersom det finnes kondensatorbatteri på strekningen.



Figur 1 Innstillingsoner i impedansplanet (R-X diagram)

Normalt benyttes den størst mulige vinkelutstrekning i impedansplanet som ikke fører til uselektivitet. For sone 1 medfører dette normalt at man, dersom vernet tillater det, kan velge en vinkeldekning mellom -45° og 135° . For sone 2 må man ta hensyn til lastskjerming og krav til overgangsmotstand (overgangsmotstand spesielt ved sirkulær karakteristikk) når man velger begrensende start vinkel. På vern som gir mulighet for det kan man, som et utgangspunkt, velge en startvinkel på 30° .

3.1.3 Typer distansevern

Det finnes ulike typer distansevern med forskjellige karakteristikker.

Følgende er bruk i Jernbaneverket i dag:

- Sirkulær karakteristikk (Siemens 7SA517)
- Firkant karakteristikk (ABB REL517)
- Mho-karakteristikk (ASEA RYZBB/RYZBE)

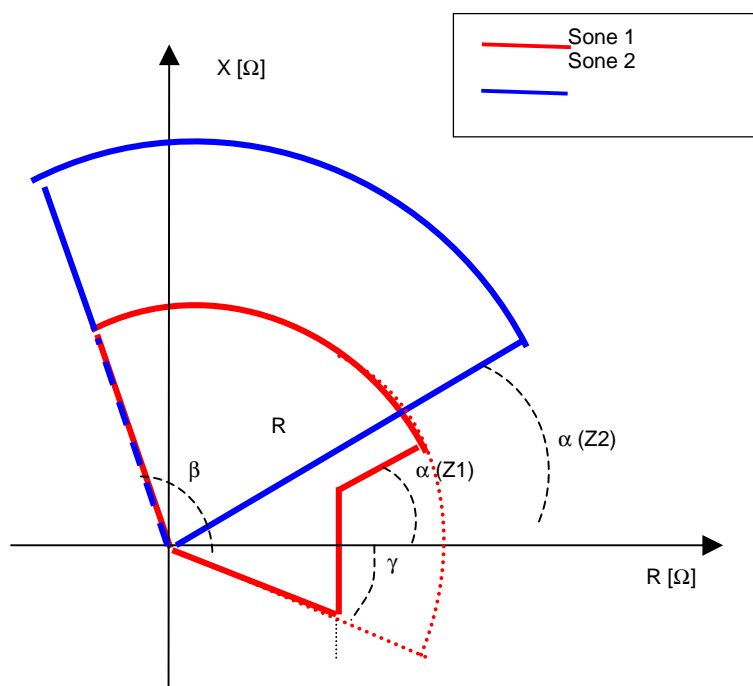
Siemens 7SA517 er multifunksjonsvern med mange funksjoner i tillegg til underimpedansfunksjon.

ABB REL517 er et numerisk modulbasert multifunksjonsvern. Det leveres i basisversjon kun med underimpedansfunksjonen, men andre funksjoner kan implementeres i vernet. Det er med andre ord mulighet for å kjøpe de funksjoner en har bruk.

Asea RYZBB og RYZBE er elektromekaniske relé som har sin opprinnelse fra 1950-tallet, og det er kun rekkevidden til sonene som kan justeres. Mange av Jernbaneloverkets matestasjoner har fortsatt disse gamle distansevernene i bruk.

3.1.3.1 Sirkulær karakteristikk

Karakteristikken for denne typen distansevern er skissert i figur 1.5 nedenfor.



Figur 2 Sirkulær karakteristikk

Rekkevidden/utløsningsområdet for sone 1 og 2 består av sirkelsektorer som har senterpunkt i origo. Sirkelens diameter/utstrekning stilles inn ved å angi Z for sonene. Ved hjelp av vinkelbegrensninger (α , β , γ på figuren) kan sonenes utstrekning begrenses eller økes.

I figuren er tilleggfunksjonen som finnes i Siemens 7SA517 V3.2 inntegnet i sone 1, der en loddrett linje (begrensning av R) kan begrense utstrekningen og gi sonene en "sopplignende" form i 1. kvadrant som er skissert for sone 1. Sonens form uten bruk av denne funksjonen er stiplet i figuren.

Inntegnede vinkler (α , β , γ) representerer vinkelbegrensningene som kan justeres på Siemens 7SA517 V3.2.

Siemens7SA517:

Siemens 7SA517 er et numerisk multifunksjonsvern. Kun impedansfunksjonen er beskrevet, mens andre viktige funksjoner er nevnt.

Reléet har en selvovervåkende funksjon mot endel interne feil, og gir alarm dersom feil ved funksjonen detekteres.

Impedansfunksjonen i 7SA517 (V3.2) har 3 uavhengige soner med følgende følgende innstillingsmuligheter/innstillingsområder*:

- $Z = 0,04-50 \Omega$ ($0,2-250 \Omega$) ved $I_n=5A$ ($I_n=1A$)
- $\alpha = \pm 70^\circ-40^\circ$
- $\beta = 70^\circ-140^\circ$
- $\gamma = \pm 70^\circ - 40^\circ$
- $R = 0,01-50 \Omega$ ($0,05-250 \Omega$) ved $I_n=5A$ ($I_n=1A$)

* Innstillingsområdene er hentet fra brukermanual av oktober 1997 for versjon V.3.2. Det kan finnes eldre eller nyere modeller med andre innstillingsområder.

Sonene kan opereres retningsbestemt (foroverrettet eller bakoverrettet) eller ikke retningsbestemt. (ikke retningsbestemt gir speilvendning av karakteristikkkurven om R-aksen slik at sonene omfatter både 1. og 2. kvadrant og 3. og 4. kvadrant.). Det finnes to sett med innstillinger som kan settes til hver sone, slik at sone 1 og 2 enkelt kan stilles om fra Z_1 og Z_2 til Z_1' og Z_2' ut fra koblingsbildet i nettet.

Z_1 og Z_2 stilles etter ønsket rekkevidde for vernet ut fra impedans i ledning/kabel.

α -lastvinkel for sone 1 og 2 som kan innstilles uavhengig for hver sone. Gir mulighet for å avgrense utstrekningen til sone 1 og 2 i første kvadrant, eller øke utstrekningen inn i 4. kvadrant. I impedansplanet representerer denne en rett strek fra origo til der sonens sirkel "begynner". Kan omtales som "startpunkt" for sirkelen/sonens utstrekning.

β -vinkelbegrensning sone 1 og 2 (i første eller andre kvadrant) som kan innstilles uavhengig for hver sone. Gir mulighet for å avgrense sonenes utstrekning i 1.kvadrant eller øke denne inn i 2. kvadrant.

I impedansplanet representerer denne en rett strek fra origo til der sonens sirkel "slutter". Kan omtales som "sluttpunkt" for sirkelen/sonens utstrekning.

γ -vinkelbegrensning for sone 1 og 2 som kan innstilles uavhengig for hver sone. Denne vinkelen stilles inn i sammenheng med R-begrensning (se nedenfor). Gir mulighet for å gi sone 1 og 2 økt utstrekning (trapes karakteristikk i sammenheng med R-begrensning) i 4. kvadrant.

R -resistiv begrensning for sone 1 og 2 som kan innstilles uavhengig for hver sone. Gir mulighet for å gi sone 1 og 2 begrenset utstrekning i 4. kvadrant i forhold til innstilt vinkel γ .

Det er en forutsetning for bruk av R-begrensning at $\gamma < \alpha$ samt at $R < Z \cos \alpha$ og $R < Z \cos \gamma$.

Med henvisning til figur 1.5:

- Sone 2 har en innstilt verdi Z_2 som er avgrenset av α i første kvadrant, og β som avgrensning i 4. kvadrant.
- Sone 1 har en innstilt verdi Z_1 avgrenset av:
 - γ - vinkelbegrensning i 4. kvadrant frem til skjæringspunkt med R-begrensning.
 - R - resistiv begrensning som sammen med vinkelen γ gir trapes karakteristikk i 4. kvadrant. (R-begrensning "starter ved γ og slutter ved α .)
 - α - vinkelbegrensning i første kvadrant som bestemmer: "startpunkt" sirkel og "sluttpunkt" for R-begrensning i første kvadrant.

Strømsprangfunksjonen* måler kontinuerlig strømmen og beregner differansen mellom strømmens amplitude i siste halvperiode med snittet av amplitudene av de to foregående halvperiodene. Dersom differansen er større enn innstilt verdi, detekteres strømsprang, og utløsefunksjonen for sone 2 frigjøres.

Innstillingsområde: $0-1 I/I_n$, der I_n er måletransformatorens sekundære merkestrøm. $I_n = 5A$ (eller $1A$).

Spenningsprangfunksjonen* (negativt) måler kontinuerlig spenningen og beregner differansen mellom aktuell spenning og spenningen i forrige periode. Dersom differansen er større enn innstilt verdi, detekteres spenningssenkning, og utløsefunksjonen for sone 2 frigjøres.

Innstillingsområde: $0,5-1 U/U_n$ der $U_n = 110V$ (måletransformatorens sekundære merkespenning).

7SA517 er et multifunksjonsvern som er utstyrt med mange funksjoner i tillegg til underimpedansfunksjonen. De viktigste er nevnt nedenfor:

- Overstrømsvern (kortslutningsvern).
- Reserve overstrømsvern (UMZ overstrømsvern). Høystrømstrinn som kan aktiviseres automatisk dersom spenningsmålingen svikter, og distansevernet dermed ikke er operativt. Kan tidsforsinkes opp til 1 sekund.
- termisk overbelastningsvern (for kl)
- bryterfeilvern.

7SA517 har et internt minne som fortløpende lagrer de 8 siste hendelse. Data for hendelser kan avleses på displayet, og det finnes også kommunikasjonsmuligheter med PC som vha. programmet DIGSI gir mulighet for blant annet grafisk presentasjon av feilforløpet for analyse av hendelsesforløpet.

Det er ikke mulig å regne med overgangsmotstand i beregningene, ettersom dette påvirker hele sonens utstrekning ved innstilling av Z . De mange innstillingsmulighetene som finnes gjør imidlertid at dette kan løses ved å "skreddersy" sonens form (se figur 1.5) eller ved å øke sone 2s utstrekning ($>120\%$).

Regneeksempel for innstilling av vern er gitt i vedlegg 1.

3.1.3.2 Firkant karakteristikk

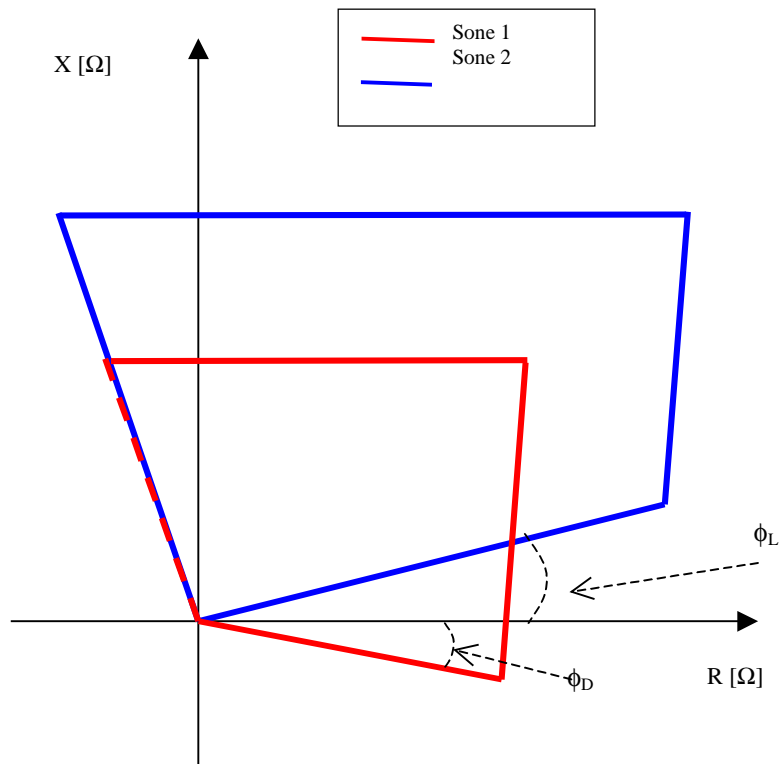
Karakteristikken for denne typen distansevern er skissert i figur 1.4 nedenfor.

Linjene som representerer innstilt rekkevidden/impedans for sone 1 og 2 består av rette linjer som stilles inn ved å angi R og X -verdi for sonene.

Karakteristikken kalles også trapeskarakteristikk eller polygonkarakteristikk.

I figuren er det skissert karakteristikken til ABB REL517, der vinkelen som sonene brer seg inn i 2. kvadrant er fast på 115° . Soneavgrensning i reaktiv retning er en rett linje, mens soneavgrensning i resistiv retning heller 9° i forhold til X -aksen.

Vinklene φ_L og φ_D representerer vinkelbegrensningene som kan justeres på ABB REL517 for å begrense eller øke sonenes utstrekning.



Figur 3 Firkant karakteristikk

ABB REL517:

ABB REL517 er et numerisk modulbasert multifunksjonsvern. Kun Impedansfunksjonen, som leveres i basisversjonen, er beskrevet. Andre viktige funksjoner som kan implementeres i vernet i tillegg er nevnt. Det er med andre ord mulighet for å kjøpe de funksjoner en har bruk for. Reléet har en selvovervåkende funksjon mot endel interne feil, og gir alarm dersom feil ved funksjonen detekteres.

Impedansfunksjonen i REL517 har 3 uavhengige soner med følgende innstillingsmuligheter/innstillingsområder ref. relé*:

- $R = 0,1-150 \Omega$
- $X = 0,1-150 \Omega$
- $\phi_L = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$ eller 45°
- $\phi_D = 15^\circ, 30^\circ$ eller 45°

* Innstillingsområdene er hentet fra brukermanual av juni 1997. Det kan finnes eldre eller nyere modeller med andre innstillingsområder.

Sonene kan programmeres til ønsket retning (motsatt retning gir speilvendning av karakteristikkkurven om R-aksen fra 1. og 2. kvadrant til 3. og 4. kvadrant.). REL517 kan forhåndsprogrammeres med fire sett med innstillinger, som kan settes til hver sone, slik at sonene enkelt kan stilles om fra normalinnstilling (R_1, X_1 og R_2, X_2) til alternative innstillinger (R_1', X_1' og R_2', X_2') ut fra koblingsbildet i nettet.

R og X stilles etter ønsket rekkevidde for vernet ut fra impedans i ledning/kabel.

ϕ_L -lastvinkel for sone 2, benyttes for å avgrense utstrekningen til sone 2 i resistiv retning for å unngå utløsning av vern ved store lastpåslag med trekkmateriell med dårlig effektfaktor, som kan bli oppfattet som kortslutning. Innstilling for avgrensning er en avveining mellom hvilken grad av lysbue som legges til grunn og av type trekkmateriell som trafikkerer strekningen.

ϕ_D avgrensning i 4. kvadrant, gir mulighet for å gi sone 1 økt utstrekning i 4. kvadrant dersom det finnes kondensatorbatteri på strekningen.

Med henvisning til figur 1.4:

- Sone 1 er avgrenset av innstilt verdi R_1 og X_2 samt vinkelbegrensning ϕ_D i fjerde kvadrant.
- Sone 2 er avgrenset av innstilt verdi R_2 og X_2 samt vinkelbegrensning ϕ_L i første kvadrant.

Strømsprangfunksjonen* måler kontinuerlig strømmen og beregner differansen mellom strømmens amplitude i siste halvperiode med snittet av amplitudene av de to foregående halvperiodene. Dersom differansen er større enn innstilt verdi, detekteres strømsprang, og utløsefunksjonen for sone 2 frigjøres.

Innstillingsområde: $0,2-2 \times I_n$ der $I_n = 1$ eller 5A (måletransformatorens sekundære merkestrøm.)

Spenningsprangfunksjonen* (negativt) måler kontinuerlig spenningen og beregner differansen mellom aktuell spenning og spenningen i forrige periode. Dersom differansen er større enn innstilt verdi, detekteres spenningssenkning, og utløsefunksjonen for sone 2 frigjøres.

Innstillingsområde: $0,2-2 \times U_n$ der $U_n = 100, 110, 115$ eller 120V (måletransformatorens sekundære merkespenning.)

* Medfølger ikke i basisversjon.

REL517 er som nevnt over et modulbasert multifunksjonsvern som kan utstyres med mange funksjoner i tillegg til underimpedansfunksjonen. De viktigste er nevnt nedenfor:

- overstrømsvern. $I >$ funksjon som kan tidsforsinkes (konstant tid) og $I >>$ som er momentant.
- maksimalspenningsvern som kan tidsforsinkes
- minimalspenningsvern som kan tidsforsinkes
- jordfeilvern
- termisk overbelastningsvern (for kl)
- bryterfeilvern.

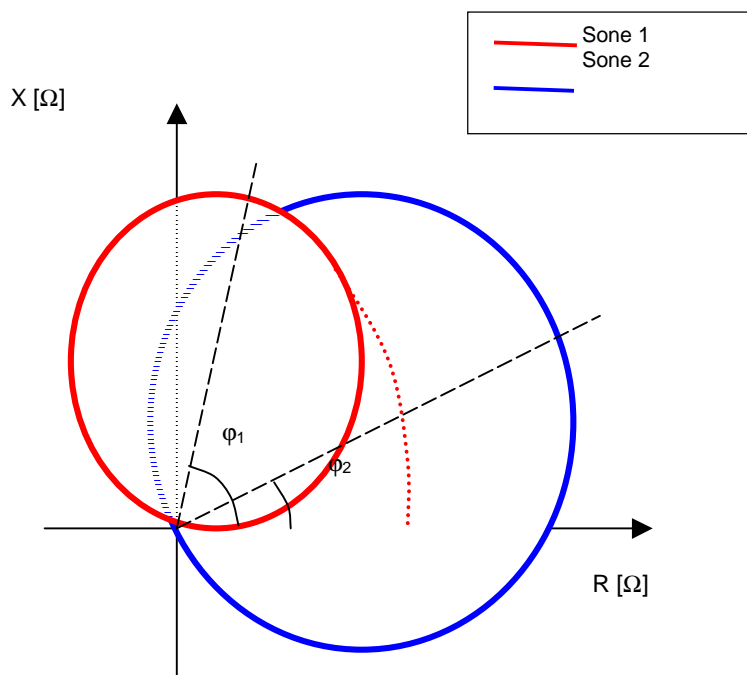
Funksjonene medfølger ikke i basisversjon.

REL517 har et internt minne som fortløpende lagrer de 10 siste hendelse. Data for hendelser kan avleses på displayet, og det finnes også kommunikasjonsmuligheter med PC som vha. programmet REVAL gir mulighet for blant annet grafisk presentasjon av feilforløpet for analyse av hendelsesforløpet.

Uavhengig innstilling av R og X gir mulighet for å regne med overgangsmotstand i feilsted ved beregning av innstilling, og dermed øke vernets følsomhet i resistiv retning for å omfatte denne.

3.1.3.3 Mho karakteristikk

Karakteristikken for denne typen distansevern er skissert i figur 1.2 nedenfor.



Figur 4 Mho-karakteristikk

Rekkevidden/utløsningsområdet for sone 1 og 2 består av sirkler som har sitt ytterpunkt i origo. Sirkelens diameter tilsvarer innstilt rekkevidde/impedans ved vinkelen φ_k (se nedenfor). Ettersom sirkelene passerer gjennom origo blir vernet retningsfølsomt.

Vinklene φ_1 og φ_2 representerer diagonalen til sirkelene, dvs den retning sirkelene øker/minsker når rekkevidden justeres på ASEA RYZBB/RYZBE.

Den stiplede rød linjen fra sone 1 mot R-aksen representerer en tilleggsfunksjon som finnes i ASEA RYZBB/RYZBE, se under.

RYZBB/RYZBE:

Ettersom det er et elektromekanisk instrument, har det ikke samme innstillingsfunksjonalitet som nyere elektroniske distanserelé. Det er kun rekkevidden til vernet (i form av større eller mindre sirkler i impedansplanet) som kan justeres.

Følgende verdier er faste, og påstemplet vernets skilt:

- φ_1 -vinkelen til diagonalen av sirkelen til sone 1, dvs den retning sirkelen som representerer sone 1s utstrekning vokser og minsker i fra origo i forhold til R-aksen. Vanligvis mellom 70 og 80 grader.
- φ_2 -vinkelen til diagonalen av sirkelen til sone 2, dvs den retning sirkelen som representerer sone 2s utstrekning vokser og minsker i fra origo i forhold til R-aksen. Vanligvis mellom 10 og 20 grader.
- φ_k -vinkelen der beregnet utstrekning av impedanssirkelen (sone 1 og 2) fremkommer i impedansplanet, (eksempel: beregnet P_1 (ut fra en ønsket strekningslengde) fører at sone 1 skjærer en linje med vinkel φ_k ved den gitte strekningslengden . Vanligvis er φ_k mellom 40 og 50 grader.
- Z_k -vernets interne impedans. Vanligvis mellom 0,8 og 4 ohm
- l_k -konstant som gjelder for reléet [km].*

* Denne er ofte påstemplet reléets skilt, men gjelder kun under forutsetning at linjeimpedansen (Z_{kl}) er 0,38 Ω /km ved vinkelen φ_k og at måletransformatorenes omsetning (VT_R og CT_R) er 16000/110V og 400/5A. Da dette sjelden er tilfelle, må denne beregnes til gjeldende linjeimpedans.

Rekkevidde for sone 1 og 2 i φ_k retning innstilles vha. parametrene P_1 og P_2 etter følgende formler:

$$P_1 = \frac{a \cdot 100 \cdot l_k}{L_1}, \text{ og } P_2 = \frac{a \cdot 100 \cdot l_k}{L_2}, \text{ der}$$

- a er en parameter som angir strømspolenes (i distansevernet) kobling. $a=1$ for parallellkoblede strømspoler, $a=2$ for seriekoblede strømspoler.
- L_1 er lengden for sone 1 [km]
- L_2 er lengden for sone 2 [km]

For å kompensere for at φ_k ikke nødvendigvis er lik impedansvinkelen til strekningen og dermed oppnå den ønskede utstrekning i strekningslengden, justeres P_1 og P_2 med et tilleggsledd:

$$P_1' = P_1 \times (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_{kl}) / (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_k)$$

$$P_2' = P_2 \times (\cos \varphi_2 - \cos \varphi_{kl}) / (\cos \varphi_2 - \cos \varphi_k)$$

Generelt gjelder at en ønsker P_1 og P_2 høyest mulig, for å oppnå best mulig nøyaktighet og kortest mulig reaksjonstid. Dette endres ved hjelp av parameteren a (strømspolens kobling). Dersom man beregner P_1 eller P_2 til under 50 for å oppnå ønsket L_1 eller L_2 , bør man velge seriekobling ($a=2$) istedenfor parallellkobling på strømspolen, og beregne P_1 og P_2 på nytt.

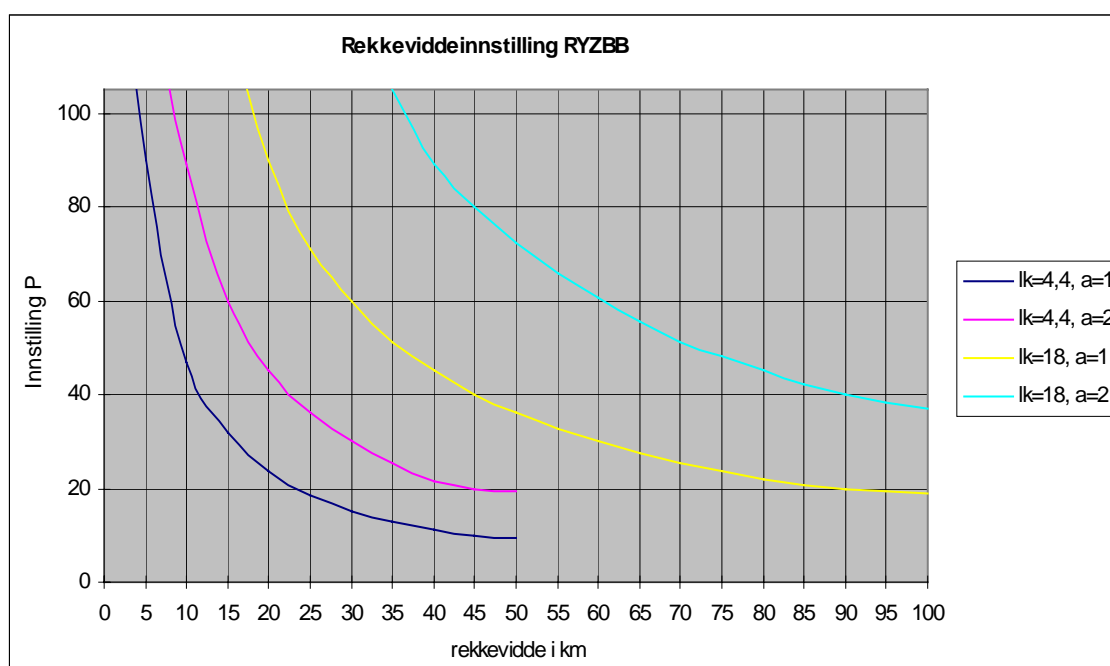
Konstanten l_k beregnes etter følgende formel:

$$l_k = \frac{Z_k}{Z_{kl}} \cdot \frac{VT_R}{CT_R}, \text{ der}$$

- Z_k er reléets interne impedans [Ω]
- Z_{kl} er kontaktledningsimpedans [Ω /km]
- VT_R er spenningstranformatorens omsetning

- CT_R er stømtransformatorens omsetning

Rekkevidden til vernet er altså avhengig av konstanten I_k , rekkevidden varierer derfor fra vern til vern, og valg av vern er derfor avhengig av lengden på linjestrekningen. For å oppnå korrekt rekkevidde innenfor innstillingsområde, som er P_1 og $P_2 = 0-105$, kan interne strømspoler i vernet kobles som serie eller parallellkobling ($a=1$ eller $a=2$ i formel). Dette er illustrert i figur 1.3 nedenfor, der innstillingen, P , er skissert som funksjon av rekkevidden, L , med I_k og a som parametre.



Figur 5 Rekkeviddeinnstilling RYZBB

Rekkevidden til et vern med $I_k = 4,4$ begrenser seg til ca. 50 km, mens et vern med $I_k = 18$ ikke kan stilles kortere enn ca. 17 km.

Det er vanskelig å inkludere overgangsmotstand i beregning av innstillingene.

For sone 1 finnes det imidlertid en funksjon som forskyver sonегrensen mot R-aksen ved transiente forandringer. Denne er representert ved stiplet rød linje i figur 1.1. Funksjonen øker følsomheten i resistiv retning for sone 1, og gir dermed bedre dekning for eventuell lysbuemotstand.

Sone 2 gir på grunn av sin karakteristikk, der sirkel for sone 2 strekker seg i en vinkel mellom 10 og 20 grader med R-aksen, økt følsomhet i resistiv retning og dermed bedre dekning for eventuell lysbuemotstand ved å øke sonens utstrekning (>120%).

Sone 1 økes ikke utover 85%, da dette kommer i konflikt med selektiviteten.

Med henvisning til figur 1.2:

- Sone 2 er avgrenset av innstilt verdi P_2 . Dette tilsvarer en Z_2 som har utstrekning tilsvarende innstilt verdi ved vinkelen φ_k .
- Sone 1 er avgrenset av innstilt verdi P_1 . Dette tilsvarer en Z_1 som har utstrekning tilsvarende innstilt verdi ved vinkelen φ_k .

Strømsprangfunksjonen for frigivning av utløsefunksjonen for sone 2 stilles inn ved å angi d_i og d_t direkte. Innstillingsområde for d_i er 175, 200, 225 eller 250A, for d_t 5-500 ms.

Regneeksempel for innstilling av vern er gitt i vedlegg 2.

3.2 Overstrømsvern/kortslutningsvern

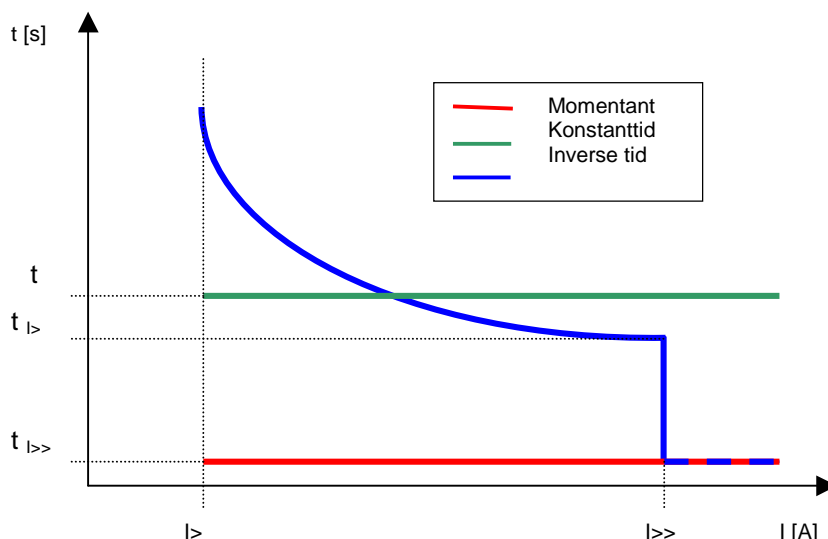
Et overstrømsvern løser ut dersom strømmen det måler overskrider innstilt verdi.

Det finnes forskjellige typer relé med forskjellig anvendelsesområder.

Disse kan grovt deles inn i følgende kategorier:

- $I >$ Lavstrømstrinn Konstant eller inverstids forsinket
- $I >>$ Høystrømstrinn, momentant overstrømsvern
- $I >>>$ Kortslutningsvern, meget hurtig overstrømsvern for å koble ut store kortslutningsstrømmer hurtig

De ulike begrepene invers-, konstant- og momentan- karakteristikk er skissert i et strøm-tid diagram i figur 1.6.



Figur 6 Karakteristikk for overstrømsvern

3.2.1 Momentant relé

Et momentant overstrømsrelé har kun mulighet for innstilling av utløsestrøm. Dersom strømmen overstiger denne verdien vil vernet løse ut. Dette gjør at denne type vern ofte er brukt som kortslutningsvern, ettersom det raskt og sikkert løser ut ved innstilt strømverdi. Reléet er lite egnet som lavstrømstrinn, da det er vanskelig å oppnå selektivitet mot andre vern.

En løsning som er utbredt i eldre anlegg, er momentant overstrømsrelé tilknyttet et eget tidsrelé. Dette gir samme funksjonalitet som et konstantid relé.

3.2.2 Konstanttid relé

Et konstanttid overstrømsrelé har mulighet for innstilling av strøm og en tidsforsinkelse. Dette gjør at det er lettere å oppnå selektivitet mot andre vern, men dersom det er store kortslutningsytelser i anlegget, kan det by på problemer at innstilt tidsforsinkelsen er konstant uansett hvilken strøm reléet måler.

En løsning er å bruke ett konstanttidrelé som lavstrømstrinn, og et momentant relé som høystrømstrinn.

3.2.3 Inverse tid relé

I et invers-tid overstrømsrelé er tidsforsinkelsen avhengig av strømverdi reléet måler. Dette gjør vernet egnet der det er store variasjoner i feilstrømmer, der kortvarige høye belastninger (utnytte "overlastbarhet") eller innkoblingsstrømmer (motorstart) er vanlige, samt at det gjør det enklere å oppnå selektivitet.

Reléene har to eller flere innstillingstrinn for strøm. Mest vanlig er å bruke lavstrømstrinn ($I>$) for å løse ut overbelastningsstrøm, og et høystrømstrinn ($I>>$) for å løse ut kortslutningsstrømmer. $I>$ er tidsforsinket, mens $I>>$ vanligvis er momentant.

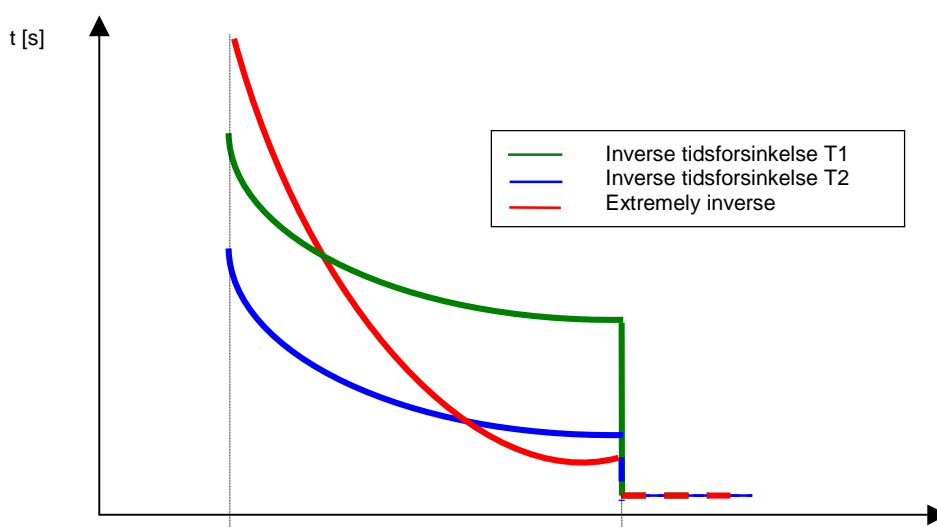
Det finnes flere "typer" karakteristikk som har forskjellig "form" på utløsekurven.

Nyere relé har vanligvis mulighet for valg av karakteristikk. Standardiserte typer omfatter bla:

- Normal inverse
- Very inverse
- Extremely inverse
- Long time

Forskjellen mellom normal inverse, very inverse og extremely inverse er "helningen" på kurven. Long time inverse har samme karakteristikk (helning på kurven) som very inverse, men med mye lengre tidsforsinkelse, og kan anses som en "utvidet skala" for very inverse.

For å illustrere forskjellene mellom tidskarakteristikkene, er det i figur 1.7 skissert kurver for karakteristikkene extremely inverse, og to kurver for inverse (forskjellig tidsinnstilling).



Figur 7 Invers og extremely invers karakteristikk

Startverdi for lavstrømstrinnet ($I_{>}$) angis vanligvis direkte i ampere, eller som en faktor av I_n (måletransformatorens sekundære merkeverdi).

Tidsforsinkelsen avgjøres av valgt karakteristikk og innstilt tid. Tiden innstilles vanligvis vha. tidsfaktoren k . Denne velges ut fra kurver i datablad for reléet for å oppnå den tidsforsinkelse en ønsker samt oppnå selektivitet.

Startverdi for høystrømstrinnet ($I_{>>}$) angis vanligvis direkte i ampere, eller som en faktor av I_n . Eventuell tidsforsinkelse for $I_{>>}$ angis som konstanttid i ms.

Av de mest brukte overstrømsreléene i omformerstasjoner og koblingshus finnes:

- ASEA/ABB: RRIL, RRIG, RXIL, RXIG, RXIK, RXIB
- ASEA/ABB: RRMJ 3, RRMJ 4
- ASEA/ABB RRIDE, RRTIE
- ASEA/ABB: RI, RIDA, RIRA
- AEG: RSBY
- ABB SPAJ 131C / spcj 3C3
- Brown Boweri: Rbmax, St, IRX, RIW

3.2.4 Strømsprangrelé

Et strømsprangrelé reagerer som navnet antyder på strømsprang, dvs strømforløpets stigetall di/dt .

Grunnlaget for reléet er at feilstrømmer øker raskere enn vanlig belastningsstrøm. Feilstrømmer har en stor di/dt , dvs strømmen stiger raskt med en viss størrelse. Normal belastningsstrøm gir ikke like stor di/dt , og reléet reagerer ikke på dette.

Vernet stilles vanligvis inn med strøm og tid (di/dt direkte), eller ved å angi prosentvis stigning for amplitude som godtas fra en periode (eller halvperiode) til neste. Dersom vernet måler eksempelvis en strømstigning på over 200 A over en tidsperiode på 200ms, eller amplituden for målt verdi er mer enn 30% større enn den forrige, løser vernet ut.

Vernet er i JBV mest brukt som frigivningsvilkår for sone 2 i distansevern. Distansevernets sone 2 blir kun aktivt dersom det er et strømsprang over innstilt verdi innenfor dekningen til sone 2.

3.2.5 Spesielle løsninger

3.2.5.1 Overstrømsvern som spenningsrelé

Det finnes også noen spesielle løsninger enkelte steder der overstrømsrelé måler strøm via en måleverdiomformer for å detektere hvilken spenning det er på måleobjektet.

3.3 Minimal- og maksimalspenningsrelé

Spenningsreléer skiller mellom minimalspenningsrelé og maksimalspenningsrelé. Et minimalspenningsrelé reagerer når spenningen synker under innstilt verdi, mens maksimalspenningsrelé reagerer når spenningen overstiger innstilt verdi.

I JBV er begge typer brukt både som beskyttelse av anlegg og i automatikk.

Av bruksområder kan f.eks nevnes:

- Jordfeildetektering
- Kontrollfunksjon/vernefunksjon for at en anleggsdel er feilfri, dvs har riktig spenning.
- Kontrollfunksjon på at en tilstand er oppnådd. Eks. oppnådd synkronisme.

De fleste relé brukt i JBV er momentane relé, og i mange sammenhenger brukt i kombinasjon med eget tidsrelé.

Av de mest brukte reléene i omformerstasjoner og koblingshus finnes:

- ASEA/ABB: RREL, RREG, RXEL, RXEG
- ASEA/ABB: RRMJ 3, RRMJ 4
- ASEA/ABB RRCLA 2

- ABB SPAU 320C / spcu 1C1
- Brown Boweri: CU, CUHO, Cue, RBGmin, RGBmax

3.4 Differensialvern

Et differensialvern reagerer som navnet antyder på differanse. Dette oppnåes ved bruk av to strømtransformatorer, en på hver side av objektet eller området som skal vernes, og et strømrelé som fører strømdifferansen mellom to. Reléet reagerer når differansen overskrider innstilt verdi. Reléet er fullstendig stedsselektivt ettersom det kun reagerer på feil mellom de to målepunktene. Av de mest brukte reléene i omformerstasjoner og koblingshus finnes:

- ASEA/ABB: RRID
- ASEA/ABB: RRMJ 3, RRMJ 4
- ASEA/ABB RYDHA, RADSJ
- ASEA/ABB RMJ 2
- ASEA/ABB RBA, RBI
- Brown Boweri D2

3.5 Jordfeilrelé

Det finnes flere måter å detektere jordfeil på, og dermed også flere typer relé som brukes til dette formålet, og også kalles jordfeilrelé.

Jordfeil kan detekteres vha nullspenningen, nullstrømmer, nullstrømeffekt eller transient strømforløp (wisherrelé).

Det mest brukte i Jernbaneverket er strømrelé og spenningsrelé til å måle nullspenning og nullstrømmen. Disse måler henholdsvis strøm eller spenning mellom systemets/komponentens nullpunkt og jord. Dersom det oppstår jordfeil, vil det flyte en strøm mellom feilsted og jord, som vil generere en spenningsforskjell mellom disse punktene. Reléet reagerer når henholdsvis strøm eller spenning overstiger innstilt verdi.

Av de mest brukte reléene i omformerstasjoner og koblingshus finnes:

- ASEA/ABB: RIRA
- ASEA/ABB: RRMJ 4
- ASEA/ABB RMJ 2
- ASEA/ABB RRIL, RXIG, RXIL
- ASEA/ABB RXPG4
- ASEA/ABB RRP
- Strømberg SPAU
- NEBB BGQ

3.6 Effektretningsrelé

De fleste vern i roterende omformere er av type ASEA RPB 10 eller ASEA RPB 8. Disse fungerer ved at reléet måler strøm, spenning og fasevinkel. Når produktet av strøm og spenning er over innstilt verdi ved samtidig som vinkelen mellom dem tilsier at effektretningen har snudd, løser vernet ut.

3.7 Termiske vern

3.7.1 Lokale termiske vakter

Roterende omformere er utstyrt med omfattende temperaturovervåkning av kritiske komponenter for å forhindre omfattende skader på disse ved overbelastning eller feil/slitasje.

Motorer og generatorer er utstyrt med resistanstermometere, som har en resistans som er proporsjonal med temperaturen. Disse er tilknyttet et temperaturovervåkningssystem som måler denne, og gir alarm eller utkobling når innstilte grenser overskrides.

De vanligste resistanstermometre er Pt 100 og Pt 250.

Den mest utbredte temperaturovervåkningssentralen er ABB RANVB.

Transformatoren er utstyrt med sensorer som måler temperatur i viklinger og i olje. Ettersom temperatursensorer ikke kan monteres direkte på transformatorviklinger, måles denne temperaturen via en kompensert sensor. Sensoren er tilknyttet med varmespiral som igjen mates med strøm via en måletransformator. Varmespiralen oppvarmes da avhengig av belastning, og sensoren måler temperatur tilsvarende viklingens varmeste punkt.

Statiske omformere er utstyrt med omfattende kjølesystem og tilhørende overvåkningssystem, som overvåkes automatisk av en PLS.

- Væskeskjølesystem. Komponenter i omformeren er tilknyttet et kjølesystem med sirkulerende væske. Det finnes sensorer for temperatur, trykk, kjølevæsknivå etc. Systemet reguleres automatisk, og gir alarm dersom grenseverdier overskrides, og løser ut omformeren dersom maksimal tillatte verdier overstiges, eller ved feil.
- Luftkjølesystem. Systemet kjøler komponenter som ikke er tilknyttet væskeskjølesystemet samt omformerrom generelt. Systemet reguleres automatisk, og gir alarm dersom grenseverdier overskrides, og løser ut omformeren dersom maksimal tillatt temperatur overstiges.

-

3.7.2 Termisk vern for kontaktledning

For å forhindre overoppheting av kontaktledning ved langvarig høy belastning kan det benyttes termisk vern. Dette reléet beregner kontaktledningens antatte temperatur ut fra målt utetemperatur og strømmens effektivverdi som hentes fra et internt minne. Det finnes vanligvis to innstillingsmuligheter; en for å gi alarm, og en for å gi utløsning. Reléet er/kan vanligvis tidsforsinket/tidsforsinkes.

Reléet er lite brukt i JBV i dag. Det antas stor unøyaktighet mellom målt verdi og faktisk verdi, og de vern som har blitt testet har aldri gitt utløsningssignal.

Reléet finnes både som separate enheter og som en funksjon/modul i multifunksjonvernene ABB REL517 og Siemens 7SA517.

3.8 Bryterfeilvern

Reléet benyttes til å overvåke at bryter løser ut når et relé har gitt utløseimpuls. Finnes som separate relé og som funksjon i ABB REL517 Siemens 7SA517. Reléet måler strømmen i kretsen og et tidsrelé starter når utløseimpulsen blir gitt. Dersom kortslutningsstrømmen innen innstilt tid ikke har sunket til "akseptabelt nivå" (bryter har ikke løst ut), gis en utløseimpuls til Back-up utløsefunksjon på bryteren.

3.9 Overspenningsbeskyttelse

Omformerstasjoner er beskyttet mot overspenninger på innkommende linje fra nettselskap og utgående linjer mot kontaktledning. Mest brukte overspenningsavleder er metalloksidavlerer (MOA). En overspenningsavleder fungerer som en uendelig motstand ved normal driftspenning, og slipper igjennom energi ved overspenninger.

4 KORTSLUTNINGSBEREGNINGER

4.1 Innledning

Ved utarbeidelse av reléplaner må man bestemme kortslutningsstrømmene i nettet ved ulike feilsituasjoner. Kortslutningsstrømmene i jernbanenettet vil variere mye ut fra hvor stor ytelse som er i drift i omformerstasjonene ved feiltidspunktet og avstanden mellom omformerstasjonene. Avstand mellom stasjonene og installert ytelse varierer ut fra trafikkbelastningen på strekningen. Derfor vil strømmene i Oslo området være betydelig høyere enn på en fjernstrekning som for eksempel Sørlandsbanen.

De ulike feilstrømnivåene har forskjellig anvendelse i reléplanene. Maksimal kortslutningsstrøm beregnes ved utarbeidelse av reléplaner for å sikre at vernenes innstilling ikke fører til at de får for lang rekkevidde og blir uselektive. Minimal kortslutningsstrøm beregnes for å sikre at verninnstillingene gir den ønskede rekkevidde.

4.2 Forutsetninger

Minimal kortslutningsstrøm beregnes med minimal tilgjengelig ytelse og systemet i tomgang.

Maksimal kortslutningsstrøm beregnes med all tilgjengelig ytelse og systemet i fullast. Med fullast menes her den doble merkebelastning for roterende omformerstasjoner.

Belastningen før feil har betydning for magnetiseringen av de roterende omformerne og antall aggregater innkoblet i de statiske omformerstasjonene og dermed for kortslutningsytelsen fra omformerstasjonene rett etter en kortslutning. Belastningsstrømmen kan imidlertid sees bort fra etter at kortslutningen har inntruffet slik at man ikke trenger regne med denne når man beregner feilstrømmens størrelse.

Vinkelforskjeller på omformernes indre spenninger ses bort fra ved håndberegninger. Bidrag fra stasjoner bortenfor nærmeste stasjon kan normalt også ses bort fra. Ved beregning av kortslutningsstrømmen rett ved en omformerstasjon tas allikevel bidraget fra nabostasjonen bortenfor stasjonen med.

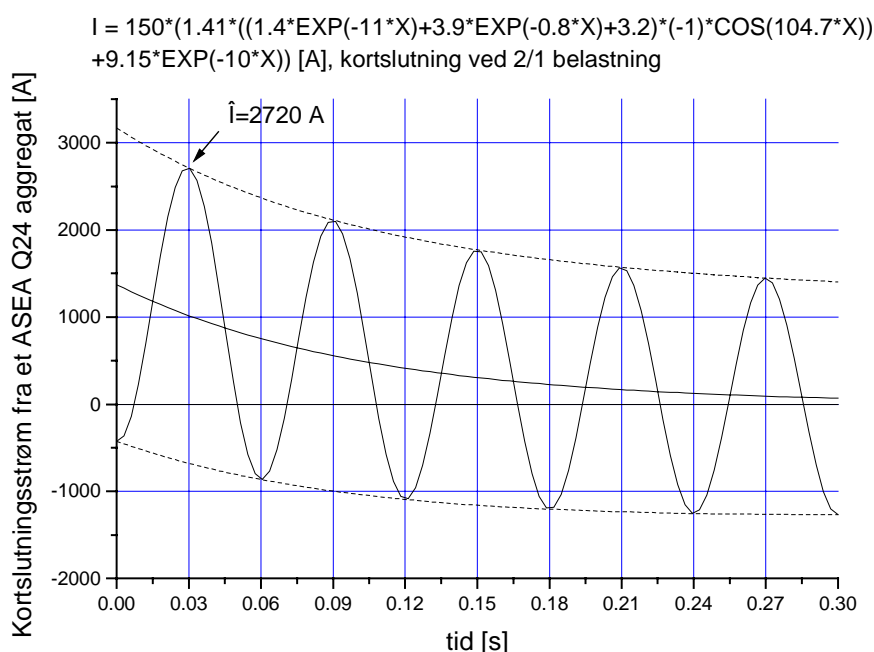
I beregninger som krever overgangsmotstand i feilstedet (minimal kortslutningsstrøm) benyttes en lysbuespenning på 2,5 kV/m og en lysbuelengde på 1 m.

4.3 Beskrivelse av anleggskomponenter

4.3.1 Roterende omformere

Kortslutningsstrømmen vil for roterende omformere, dersom man ser bort fra spenningsreguleringen, avta med tiden etter at kortslutningen har inntruffet. Dette skyldes at feltviklingen i generatoren motsetter seg hurtige forandringer og at fluksen som kortslutningen driver derfor går i lekkreaktanser utenom rotoren. Lekkreaktansene har lavere impedans enn fluksen som går gjennom rotoren slik at impedansen i feilkretsen blir lavere rett etter kortslutningen enn etter en tid når fluksen igjen går gjennom rotoren. Størrelsen av bidraget fra de ulike kildene i nettet er avhengig av om det er kortslutning nært eller fjernt fra kildene. Bakenforliggende netts kortslutningsytelse har ingen betydning for kortslutningsytelsen fra generatorene rett etter kortslutningen på grunn av treghet i det mekaniske systemet (aksling og roterende masser).

Det er vanlig å representere generatorene ved tre forskjellige reaktanser for å få frem det karakteristisk avtakende forløp av kortslutningen. Dette gir tre forskjellige tidsintervaller/perioder av strømmen. På figur 8 er vist et prinsipielt forløp av kortslutningsstrøm fra en generator (ASEA Q24). De er følgende karakteristika som gjelder for strømmen:



Figur 8 Kortslutningsstrøm for et ASEA Q24 aggregat på 16 kV siden

1. Den subtransiente periode med reaktans X_d'' for generatoren gir subtransient kortslutningsstrøm I_k'' (symmetrisk effektiv verdi). Denne strømmen inntreffer umiddelbart etter kortslutningen. Varigheten av denne perioden er bestemt av maskinkonstruksjonen og hvor i nettet kortslutningen inntreffer, typisk varighet fra 30 – 80 ms.
2. Den transiente periode med reaktans X_d' gir transient kortslutningsstrøm I_k' (symmetrisk effektivverdi), som avløser den subtransiente periode. Denne reaktansen er normalt noe

større ($>1,5$) enn den subtransiente reaktans, og varigheten av det transiente forløpet er typisk i sekund området.

3. Den stasjonære periode med reaktans X_d og stasjonær kortslutningsstrøm I_k (effektivverdi) avløser den transiente periode. Det er denne strømmen som forårsakes av et stasjonært magnetiseringsfelt. I virkeligheten vil spenningsregulering medføre at magnetiseringsfeltet forandres og øker strømmen til en verdi som er høyere enn I_k .
4. Likestrømsledd. Ved en momentan kortslutning i en vekselstrømskrets vil strømmen inneholde en likestrømskomponent, som angitt i figur 8. Dette gjelder ikke hvis feilen skjer ved strømmens nullgjennomgang. Dette kan forklares ved følgende sammenhenger: Ved kortslutning nær matende generator vil seriereaktansen normalt være vesentlig større enn serieresistansen (på grunn av stor reaktans i generatoren). Strømmen i denne kretsen vil da være nesten 90° etter spenningen. Inntreffer kortslutningen ved spenningens nullgjennomgang, får vekselstrømsleddet av strømmen momentant sin maksimalverdi ($\sqrt{2} \cdot I_k''$). Men fordi strømmen i kretsen (ingen diskontinuitet gjennom en induktivitet) må være kontinuerlig, fås i tillegg til $\sqrt{2} \cdot I_k''$ et likestrømsledd som sørger for at den resulterende strøm tilfredstiller de fysikalske betingelser. I det nevnte tilfellet må begynnelsesverdien av likestrømsleddet være lik og motsatt rettet av den subtransiente strømmens maksimalverdi (amplitudeverdi). Likestrømsleddet vil avta mot null med en tidskonstant som er bestemt av dempningen i kortslutningskretsen.

Ofte brukes også betegnelsen asymmetrisk subtransient strøm (total effektivverdi), denne er gitt ved:

$$I_A = \sqrt{I_{vs}^2 + I_{ls}^2} \quad \text{Formel 1}$$

der

I_{vs} : Vekslestrømskomponentens effektivverdi

I_{ls} : Likestrømskomponenten

5. Usymmetrifaktor. Ved en liten dempning i kretsen ($R \ll X$, $\cos \varphi \sim 0$) er likestrømsleddet nesten like stort som momentanverdien av I_k'' og de to strømmene har samme retning. Ved kortslutning nær generatorklemmene er maksimalverdien av strømmen (støtstrømmen), $i_p \sim 2\sqrt{2} I_k''$. Ved en stor dempning i kretsen ($R > X$, $\cos \varphi \rightarrow 1$) vil støtstrømmens verdi nærme seg $i_p \sim \sqrt{2} I_k''$.

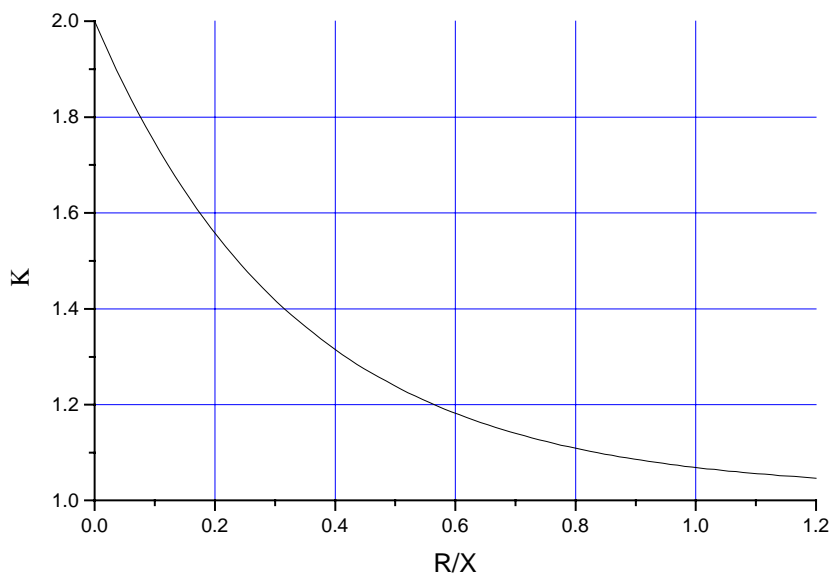
Det er vanlig å angi støtstrømmen slik:

$$i_p = \kappa \sqrt{2} \cdot I_k'' \quad \text{Formel 2}$$

Denne maksimale verdi av strømmen (i_p) inntreffer ved spenningens nullgjennomgang en halv periode etter kortslutningen. Se også figur 8 der toppverdien er markert ved 30 ms som er en halv periode etter kortslutningen.

Faktoren κ er avhengig av dempningen (R/X) i kortslutningskretsen. Figur 9 viser denne avhengigheten.

Faktoren κ kalles ofte usymmetrifaktoren.



Figur 9 Faktor κ for seriekretser som en funksjon av forholdet mellom R og X

4.3.1.1 Kortslutningsytelse fra Jernbaneverkets roterende omformeraggregater

Kortslutningsstrømmen fra et roterende omformeraggregat kan som nevnt deles opp i subtransient, transient og stasjonær strøm samt et likestrømsledd. Uttrykket for kortslutningsstrømmens vekselstrømsledd er gitt i formel 8.

$$i_{vs} = (Ik'' - Ik') \cdot e^{-\frac{t}{T_d''}} + (Ik' - Ik) \cdot e^{-\frac{t}{T_d'}} + Ik \quad [A] \quad \text{Formel 3}$$

Kortslutningsstrømmen likestrømsledd er gitt av

$$i_{ls} = \sqrt{2} \cdot Ik'' \cdot e^{-\frac{t}{T_a}} \quad [A] \quad \text{Formel 4}$$

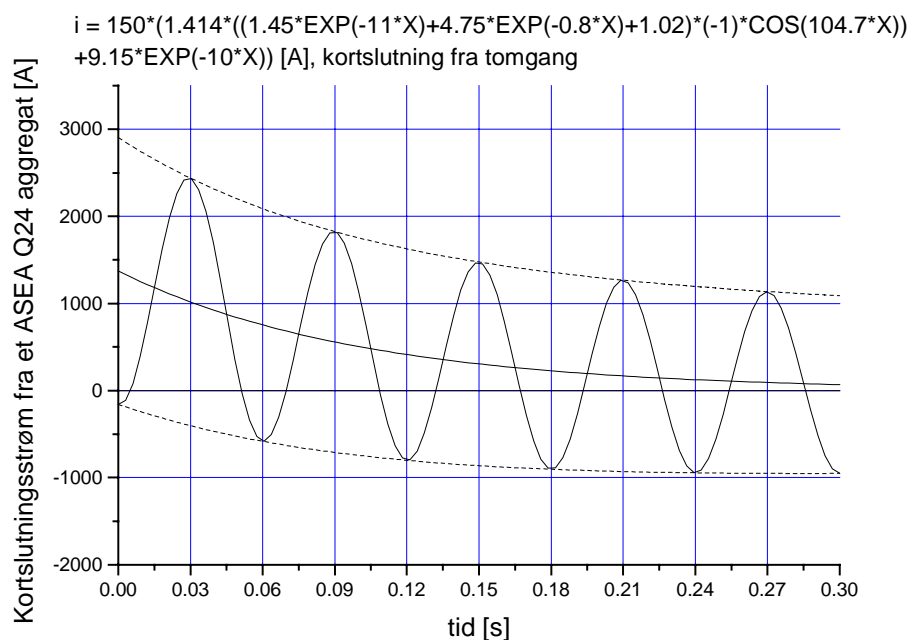
Merk at Ik'' , Ik' og Ik kan erstattes med henholdsvis Un/X_d'' , Un/X_d' og Un/X_d .

ASEA Q24 (3,1 MVA)

Figur 10 viser kortslutningsstrømmen fra et Q24 aggregat i tomgang, målt på 16 kV siden. Typiske verdier for generatoren alene kan beregnes på bakgrunn av kurveformen til:

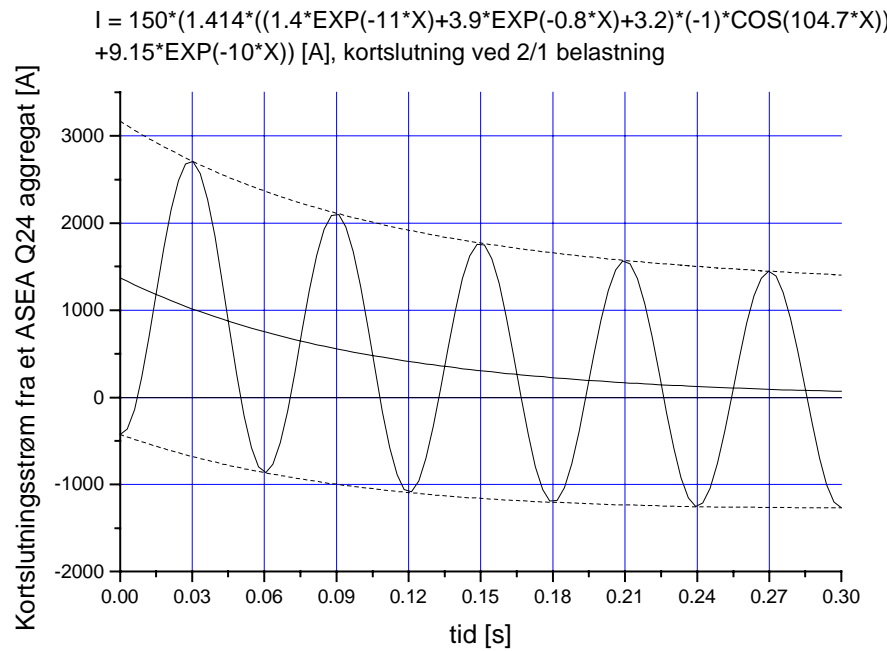
Tabell 4-1 Typiske parametere for ASEA Q24 generator (g1810)

X_d''	9,41 %
X_d'	12,9 %
X_d	94,3 %
T_d''	1/11 s
T_d'	1/0,8 s
T_a	1/6,7 s



Figur 10 Kortslutningsstrøm fra et Q24 aggregat i tomgang

Det er i vedlegg 1 også gjort målinger på aggregater i fullast siden dette vil gi maksimal kortslutningsstrøm. Figur 11 viser dette forløpet for et Q24 aggregat på 16 kV siden.



Figur 11 Kortslutningsstrøm fra et Q24 aggregat i fullast

Basert på figur 11 er de viktigste kortslutningsverdiene for maksimal kortslutningsstrøm på samleskinnen beregnet:

Tabell 4-2 Strømverdier for ASEA Q24 aggregat

I_p [A]	I_k'' [A]	I_{vs} [A]	I_{ls} [A]	I_A [A]
2720	1270	1140	750	2380

I_p Toppverdien av strømmen ved full usymmetri, 30 ms etter kortslutningsøyeblikket (amplitudeverdi)

I_k'' Subtransient kortslutningsstrøm (symmetrisk effektivverdi)

I_{vs} Vekselstrømskomponentens effektivverdi etter en periode (60 ms)

I_{ls} Likestrømskomponenten etter en periode

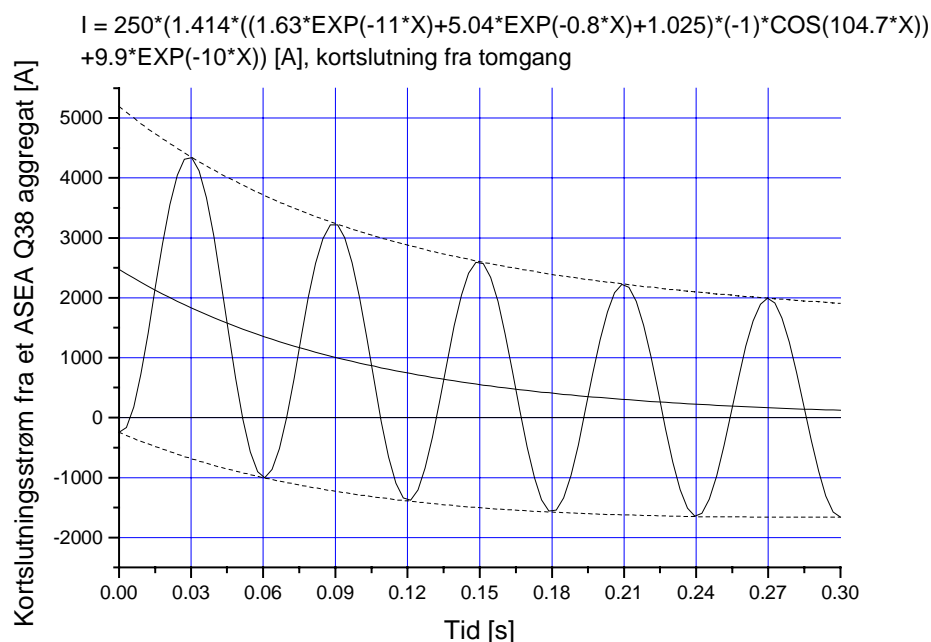
I_A Asymmetrisk effektivverdi etter en periode

ASEA Q38 (5,8 MVA)

Figur 12 viser kortslutningsstrømmen fra et Q38 aggregat i tomgang, målt på 16 kV siden. Typiske verdier for generatoren alene kan beregnes på bakgrunn av kurveformen til:

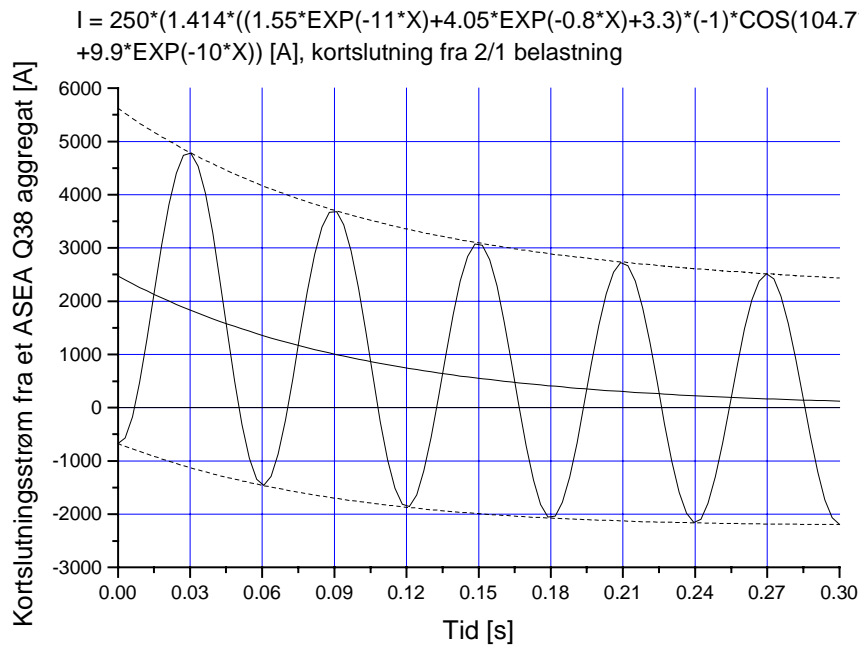
Tabell 4-3 Typiske parametere for ASEA Q38 generator (g1814)

X_d''	9,7 %
X_d'	13,2 %
X_d	94,0 %
T_d''	1/11 s
T_d'	1/0,8 s
T_a	1/6,7 s



Figur 12 Kortslutningsforløp fra et Q38 aggregat ved kortslutning i tomgang

Det er i vedlegg 1 også gjort målinger på aggregater i fullast siden dette vil gi maksimal kortslutningsstrøm. Figur 13 viser dette forløpet for et Q38 aggregat på 16 kV siden.



Figur 13 Kortslutningsforløp fra et Q38 aggregat ved kortslutning fra fullast

Basert på figur 13 er de viktigste kortslutningsverdiene for maksimal kortslutningsstrøm på samleskinnen beregnet:

Tabell 4-4 Strømverdier for ASEA Q38 aggregat

I_p [A]	I_k'' [A]	I_{vs} [A]	I_{ls} [A]	I_A [A]
4785	2225	1988	1350	2403

I_p Toppverdien av strømmen ved full usymmetri, 30 ms etter kortslutningsøyeblikket (amplitudeverdi)

I_k'' Subtransient kortslutningsstrøm (symmetrisk effektivverdi)

I_{vs} Vekselstrømskomponentens effektivverdi etter en periode (60 ms)

I_{ls} Likestrømskomponenten etter en periode

I_A Asymmetrisk effektivverdi etter en periode

ASEA Q48 (10,0 MVA)

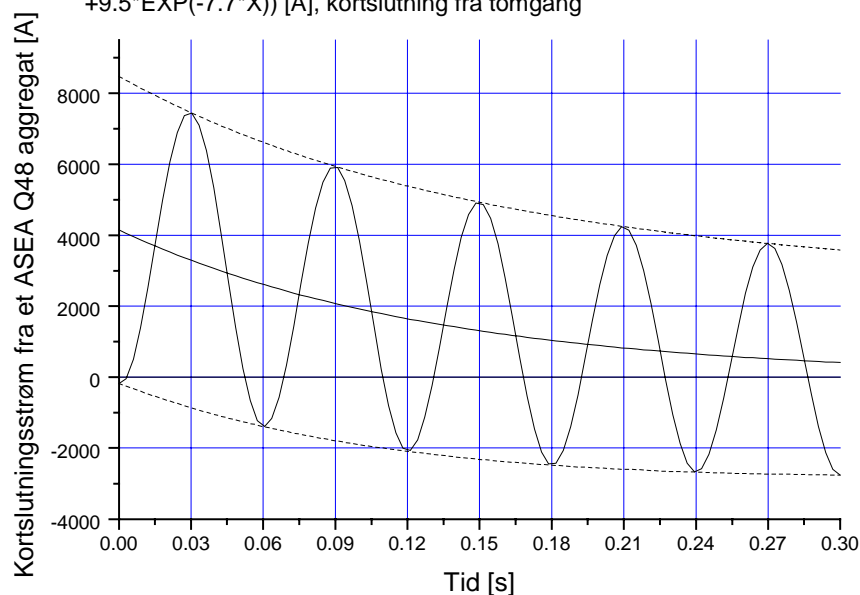
Tabell 4-5 angir typiske parametre for generator g1916 som er benyttet i ASEAs Q48 omformervogn.

Tabell 4-5 Typiske parametre for ASEA Q48 generator (g1916,)

Xd''	14,0 %
Xd'	21,9 %
Xd	134,7 %
Td''	1/3,9 s
Td'	1/0,44 s
Ta	1/5,0 s

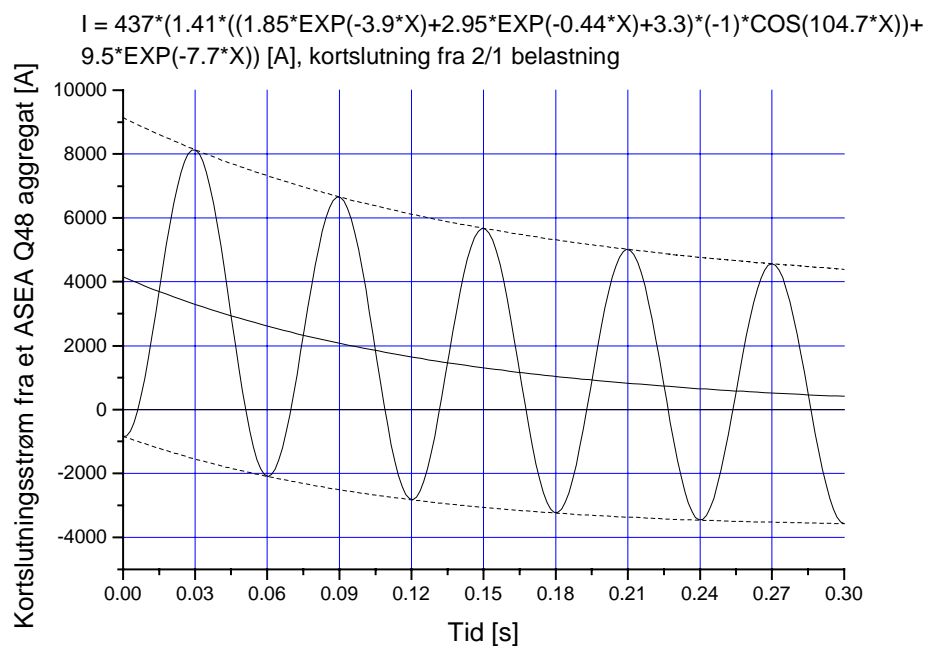
Figur 14 viser kortslutningsstrømmen fra et Q48 aggregat i tomgang, målt på 16 kV siden.

$$I = 437 * (1.414 * ((2.0 * \text{EXP}(-3.9 * X) + 4.0 * \text{EXP}(-0.44 * X) + 1.02) * (-1) * \text{COS}(104.7 * X)) + 9.5 * \text{EXP}(-7.7 * X)) \text{ [A]}, \text{ kortslutning fra tomgang}$$



Figur 14 Kortslutningsforløp fra et Q48 aggregat ved kortslutning i tomgang

Figur 13 viser forløpet for et Q48 aggregat ved kortslutning på 16 kV siden fra dobbel grunnlast.



Figur 15 Kortslutningsforløp fra et Q48 aggregat ved kortslutning fra fullast

Basert på figur 15 er de viktigste kortslutningsverdiene for maksimal kortslutningsstrøm på samleskinnen beregnet:

Tabell 4-6 Strømverdier for ASEA Q48 aggregat

I_p [A]	I_k'' [A]	I_{vs} [A]	I_{ls} [A]	I_A [A]
8140	3539	3335	2603	4230

I_p Toppverdien av strømmen ved full usymmetri, 30 ms etter kortslutningsøyeblikket (amplitudeverdi)

I_k'' Subtransient kortslutningsstrøm (symmetrisk effektivverdi)

I_{vs} Vekselstrømskomponentens effektivverdi etter en periode (60 ms)

I_{ls} Likestrømskomponenten etter en periode

I_A Asymmetrisk effektivverdi etter en periode

Nebb 7 MVA

Typiske parametere for 7 MVA Nebb aggregater satt opp i tabell 4-7.

Tabell 4-7 Typiske parametre for Nebb 7 MVA generator

Xd''	17 %
Xd'	23 %
Xd	137,5 %

Transformatorreaktansen er oppgitt til tilnærmet $e_k = 3,4$ %.

Nebb 10 MVA

Data for Nebb 10 MVA aggregat er angitt i Tabell 4-8:

Tabell 4-8 Typiske parametre for Nebb 10 MVA generator

Xd''	25,9 %
Xd'	30,4 %
Xd	97,8 %
Td''	1/10,753 s
Td'	1/0,625 s
Ta	1/3,058 s

e_k for transformatoren er oppgitt til å være enten 8 % eller 4 % avhengig av type.

Beregnete strømverdier ved kortslutning fra 2/1 belastning er beregnet ut fra data i tabell 4-8:

Tabell 4-9 Maksimale strømverdier for Nebb 10 MVA aggregat

I _p [A]	I _{k''} [A]	I _{vs} [A]	I _{ls} [A]	I _A [A]
6619	2674	2518	2119	3290

I_p Toppverdien av strømmen ved full usymmetri, 30 ms etter kortslutningsøyeblikket (amplitudeverdi)

I_{k''} Subtransient kortslutningsstrøm (symmetrisk effektivverdi)

I_{vs} Vekselstrømskomponentens effektivverdi etter en periode (60 ms)

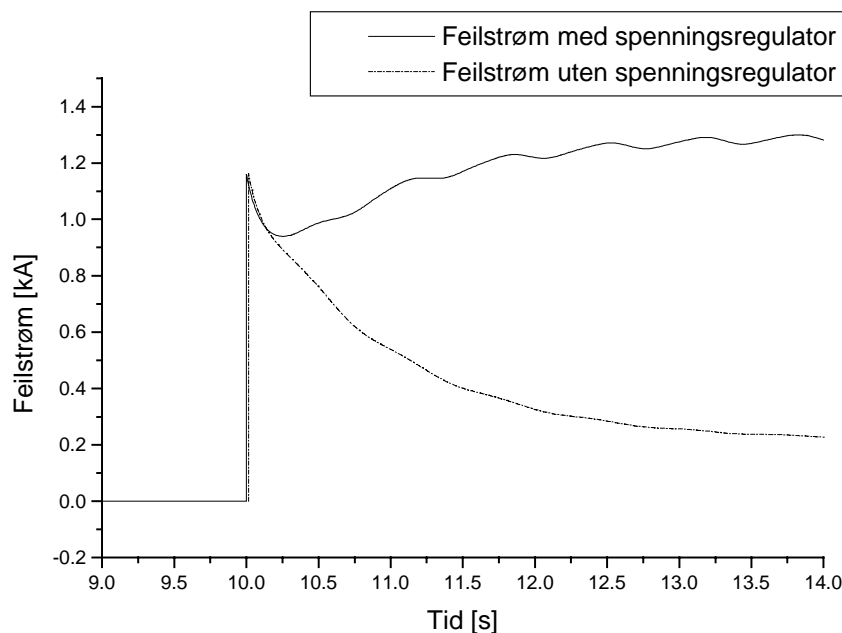
I_{ls} Likestrømskomponenten etter en periode

I_A Asymmetrisk effektivverdi etter en periode

4.3.1.2 Feilstrøm basert på frekvensplan analyse

Ved beregning av feilstrømmen i forbindelse med utarbeiding av selektivitetsplaner er det vanlig å basere seg på frekvensplan analyse. Man ser da bort fra likestrømskomponenten og de overharmoniske komponentene i feilstrømmen og benytter kun de symmetriske komponentenes rms verdi (X_d'' , X_d' og X_d). Normalt vil vernene ha filter slik at det kun er komponenten med grunnharmonisk frekvens som måles, det er derfor riktig å legge denne til grunn ved innstilling av vernene.

På grunn av at generatorene er utstyrt med spenningsregulering vil stasjonær strøm kunne være høyere enn subtransient strøm og uansett høyere enn stasjonær strøm beregnet uten hensyn til spenningsregulatorne. Figur 16 viser et simulert forløp for et Q38 aggregat med en kortslutning på kontaktledningen i en viss avstand.



Figur 16 Simulert forløp for symmetrisk feilstrøm fra et roterende omformeraggregat

Man kan se av den heltrukne linjen i figur 16 at feilstrømmen i de første periodene etter kortslutningen er sammenfallende med feilstrømmen uten spenningsregulator. Dette skyldes at regulatorne trenger tid til å magnetisere opp generatoren på grunn av tidskonstantene i magnetiseringskretsen. Etter en viss tid øker regulatorne magnetiseringsspenningen og dermed feilstrømmen ut fra omformereren

For kortslutningsberegninger med det formålet å utarbeide selektivitetsplaner benytter man X_d'' (subtransient forløp) for de raskeste vernene som skal løse ut i løpet av noen få perioder. I enkle nett kan man regne for hånd med en Thevenin modell for omformerstasjonen som består av en indre spenning bak den subtransiente reaktansen. For de tregere vernene (noen sekunder) og beregning av stasjonære verdier bør man ikke regne for hånd siden man da ikke får med spenningsregulatorenes innvirkning. Transiente og stasjonære verdier bør derfor beregnes med avanserte regneprogrammer med detaljerte modeller av maskinene og magnetiseringskretsene.

Det henvises spesielt til programvaren Simpow/Simtrac som Jernbaneverket har lisens på, til slike beregninger.

4.3.2 Statistiske omformere

Statistiske omformerstasjoner har implementert strømgrenser i mykvaren for å hindre at stasjonen overbelastes. Den tregeste strømgrensen skal verne stasjonen mot høye belastningsstrømmer og fungerer ved å senke spenningen ut fra stasjonen slik at strømmen ikke overstiger et bestemt nivå.

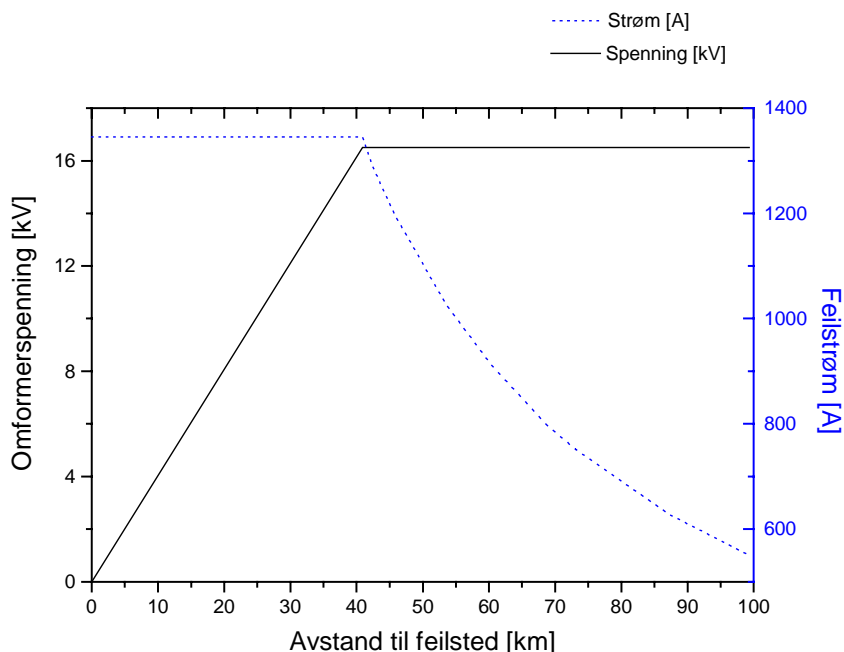
For å beskytte stasjonen mot overbelastning på grunn av kortslutninger finnes det hurtige strømbegrensere som klipper strømmen når den overstiger en viss forhåndsinnstilt grenseverdi. Denne klippingen av strømmen fører til at kurveformen på strømmen nærmer seg firkantform. Effektivverdien av strømmen øker derfor i forhold til amplitudeverdien sammenlignet med en sinusformet strøm.

I tillegg til den hurtige strømbegrensningen som er implementert i mykvaren finnes det også en momentan strømbegrenser i hardvaren som friserer strømmen dersom den overstiger en innstilt verdi. Den siste skansen er et momentant overstrømsvern som kobler bort omformeren dersom innstilt verdi overstiges.

På grunn av disse ulike strømgrensene vil man på samme måte som for roterende omformere få et avtagende forløp på kortslutningsstrømmen over tid. Imidlertid fører ikke spenningsregulatorene i statiske omformerstasjoner til at kortslutningsstrømmen stiger en viss tid etter kortslutning men medfører heller at strømmen synker. Tidskonstanten for den trege spenningsregulatoren ligger typisk i området 1 – 4 s.

Kortslutningsstrømmen ut fra en statisk omformerstasjon er betydelig lavere enn for en roterende omformerstasjon av samme størrelse. Som eksempel har omformerstasjonene på Lillestrøm, Jessheim og Smørbekk en hurtig strømgrense som gir en rms strøm på anslagsvis 1345 A pr. aggregat. Et 10 MVA roterende aggregat fra ASEA har i henhold til kapittel 4.3.1.1 en subtransient kortslutningsstrøm på 3540 A (symmetrisk rms verdi)

Strømgrensene som ligger i statiske omformerstasjoner medfører at spenningen ut fra stasjonen vil synke ved feil nær stasjonen. Spenningen ut fra stasjonen vil da være gitt av ohms lov $U=I*Z$ der I er strømgrensen og Z er impedansen frem til feilstedet. Dersom impedansen overstiger merkeimpedansen gitt av $Z_{base}=U_n^2/S_{kn}$ (S_{kn} er her kortslutningsytelsen basert på den hurtige strømgrensen) er feilstrømmen begrenset av impedansen i kontaktledningen og spenningen holdes konstant. Figur 17 viser denne karakteristiske oppførselen for et aggregat stilt inn på samme måte som eksempelvis Lillestrøm omformerstasjon.



Figur 17 Feilstrøm og spenning fra et statisk omformeraggregat

Til bruk i kortslutningsberegninger anbefales det i de fleste tilfeller at man benytter den hurtige strømgrensens rms verdi. Dette begrunnes med at de aller fleste vern måler en form for rms verdi. Dette bør allikevel kontrolleres opp mot vernkonstruktøren i hvert enkelt tilfelle.

4.3.3 Transformatorer

Kortslutningsimpedansen for en toviklingstransformator $Z_T = R_T + jX_T$ kan beregnes fra merkedata:

$$Z_T = \frac{e_k}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} \quad \text{Formel 5}$$

e_k : merkekortslutningsspenning i prosent

U_n : merkespenning for transformatoren

S_n : merkeytelse for transformatoren

Ved kortslutningsanalyser er det vanlig å se bort fra resistansen i transformatoren siden denne er svært liten i forhold til reaktansen. Man benytter derfor ofte forenklingen:

$$X_T = \frac{e_k}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} \quad \text{Formel 6}$$

4.3.4 Kontaktledningsanlegg

Impedansen i det positive system for linjer og kabler

$$Z_l = R_l + jX_l$$

Formel 7

Bestemmes av oppgitte data (normalt gitt pr. lengdeenhet). Impedansen i kl anlegget varierer noe fra strekning til strekning selv for tilsynelatende likt anlegg slik at målte strekningsspesifikke data må etterstrebes.

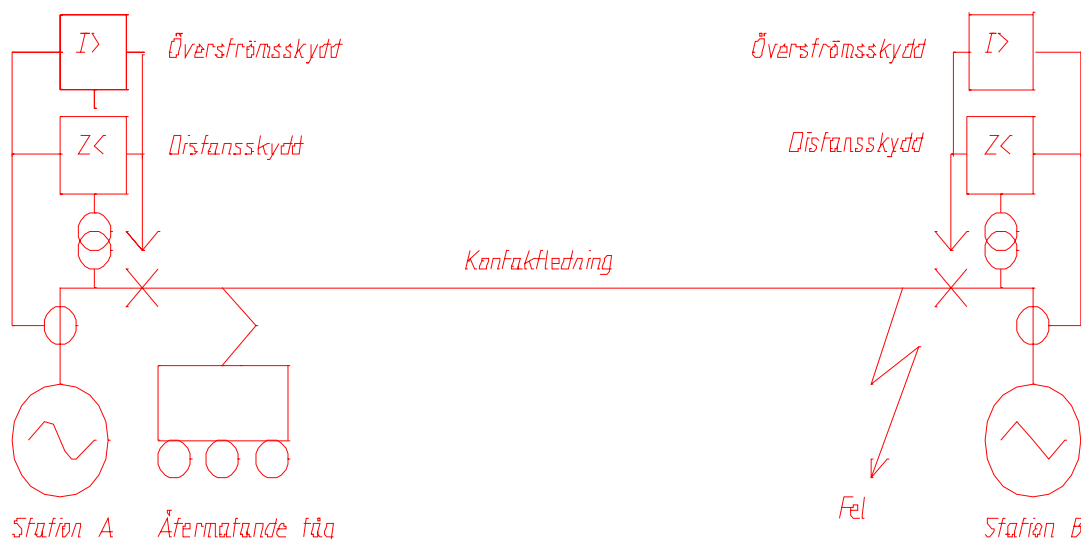
4.3.5 Tog

Tog som kjører som en last i systemet ser man bort fra i kortslutningsberegninger for selektivitetsanalyser. Derimot vil tog som har mulighet til regenerativ bremsing påvirke kortslutningsstrømmene og vernenes evne til å detektere feil og må derfor tas hensyn til i beregningene, se kapittel om sideinnmating (kapittel 5.2)

Et tog som genererer effekt ved bremsing kan fremstilles som en variabel spenningsavhengig admittans med negativt fortegn, eller som en innmating av effekt i systemet. Hvor stor effekt toget kan generere avhenger av typen lok, det samme gjør effekt faktoren og spenningsavhengigheten.

For å analysere virkningen av tog med regenerativ brems må man på grunn av spenningsavhengigheten ty til regneprogrammer som kan analysere systemet dynamisk.

Verste tilfelle er i studier [8] funnet å være situasjonen i figur 18. For vernene i stasjon A er det vanskeligst å detektere en feil når det oppstår en kortslutning ved samtidig tilbakemating når toget befinner seg ved stasjon A og feilen er i motsatt enden av strekningen.



Figur 18 Verste situasjon for tilbakemating ved samtidig kortslutning

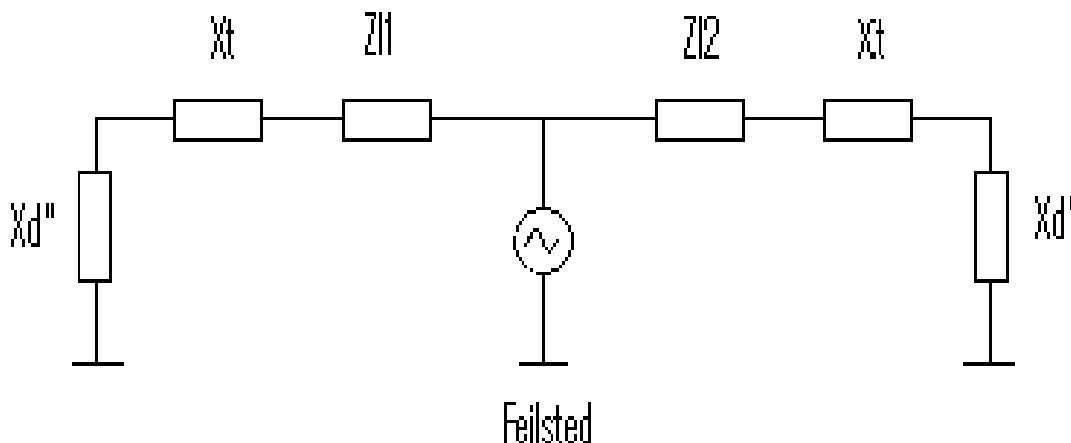
På strekninger med sonegrensebryter vil sonegrensebryteren detektere kortslutningen som en kombinasjon av høy strøm (>300 A) og lav spenning (<10 kV). På disse strekningene tillater man derfor opp til 10 MW tilbakematet effekt.

I beregninger regnes det som tilstrekkelig å benytte en tilbakematet effekt gitt av toget med størst kapasitet som kan tenkes å trafikkere strekningen.

På strekninger uten sonegrensebryter må man beregne maksimal tilbakematet effekt ut fra maksimal innstilling av distansevernene.

4.4 Beregningsmetode

Ved beregninger for hånd kan kortslutningsstrømmen bestemmes ved hjelp av en ekvivalent spenningskilde på feilstedet som angitt i figur 19.



Figur 19 Prinsippkisse for feilstrømsberegning (Thevenin ekvivalent)

Den ekvivalente spenningskilden på feilstedet velges til 16,5 kV, eventuelt lavere for $I_{k_{min}}$. Den ekvivalente spenningskilden er den eneste aktive kilden i kretsen, alle andre kilder (omformerstasjoner) er kortsluttet bak sin indre impedans. Ved beregningene er virkningen av belastninger neglisjert. Den ekvivalente kortslutningsimpedansen Z_k representerer den resulterende impedansen sett fra feilstedet.

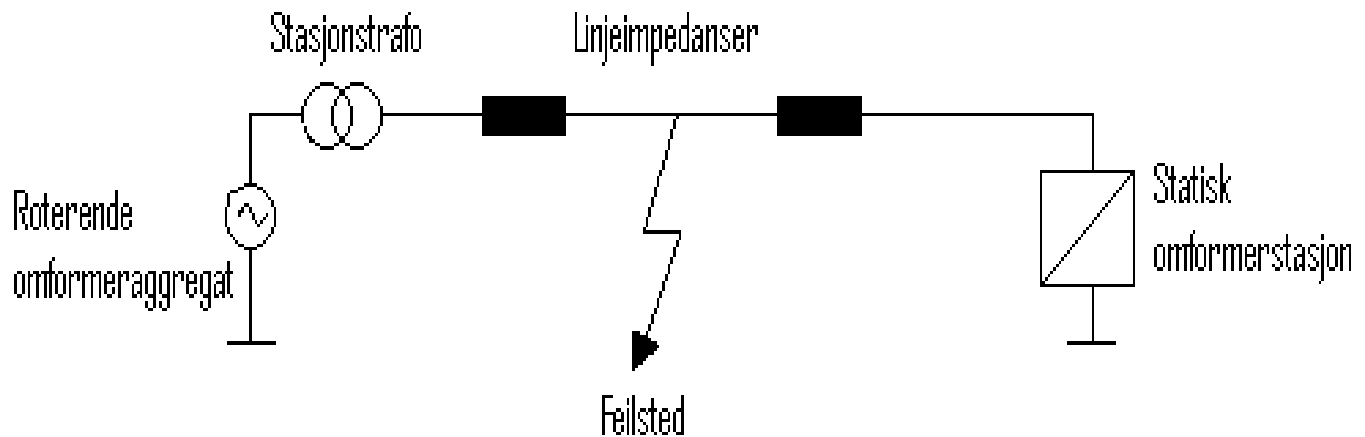
4.4.1 Representasjon av omformerstasjoner

Alle linjer og transformatorer representeres slik som beskrevet i kapitlene foran. Når det gjelder synkrongeneratorene må man være oppmerksom på at man ved denne metoden ikke benytter den subtransiente spenningen i maskinen. Man må derfor justere den indre impedansen i generatorene til spenningskilden i feilstedet. Ved beregning av minste kortslutningsstrøm antar man at systemet er i tomgang, den indre spenningen i generatoren vil da tilsvare spenningskilden i feilstedet og den indre impedansen skal ikke justeres. Ved beregning av maksimal kortslutningsstrøm må man i motsetning til tomgangstilfellet ta hensyn til at den indre spenningen er høyere enn spenningskilden i feilstedet. Normalt benyttes en indre spenning i generatorene gitt ut fra at belastningen rett før feilen oppstår er 2/1 ganger grunnlasten. Dersom man vet I_k'' for stasjonen ved dobbel grunnlast kan man finne en justert impedans basert på ohms lov $X_d'' = U_n / I_k''$ der $U_n = 16,5$ kV. For enkelte aggregater kan man også i prøveprotokoller finne X_d'' oppgitt ved kortslutning fra dobbel grunnlast og 16,5 kV etter 60 ms (ASEA aggregater).

Statiske omformerstasjoner har ikke en indre impedans på samme måte som roterende aggregater. Her må man ta hensyn til den hurtige strømgrensens i stasjonen. Dersom impedansen i kretsen sett fra omformerstasjonen underskriver merkeimpedansen gitt ved $Z_{base} = U_n^2 / S_{kn}$, der S_{kn} er gitt av rms verdien til den hurtige strømgrensens, er strømmen fra stasjonen konstant lik strømgrensens rms verdi. Dersom impedansen sett fra omformerstasjonen overskriver Z_{base} er feilstrømmen gitt av $I_k = U_n / Z_{feil}$, det vil si at spenningen holdes konstant lik 16,5 kV og omformerstasjonen kan erstattes med en kortslutning i Thevenin ekvivalenten.

4.5 Beregningseksempel

I avsnittene under vises et eksempel på hvordan kortslutningsanalysene utføres. Flere eksempler finnes i vedlegg 1.



Figur 20 Eksempel på nettkonfigurasjon

Data for nettet i figur 20:

Roterende omformerstasjon (inkludert stasjonstransformatoren), 2 * ASEA Q38 (5,8 MVA)

Maksimal ytelse I_k'' : 4450 A (fra tabell 4-4)

Minimal ytelse I_k'' : 1923 A (fra figur 12, ett aggregat)

Linjeimpedanser

Fra roterende omformer til feil: $60 \text{ km} * (0,21 + j0,21) \text{ ohm/km} = 10,5 + j10,5 \text{ ohm}$

Fra statisk omformerstasjon til feil: $10 \text{ km} * (0,21 + j0,21) \text{ ohm/km} = 2,1 + j 2,1 \text{ ohm}$

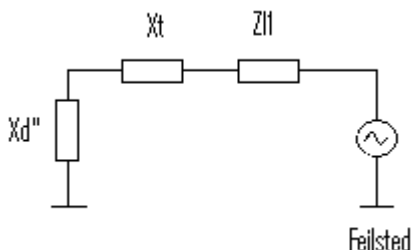
Statisk omformerstasjon: 2*13 MVA

Maksimal ytelse I_k'' (rms-verdi av den hurtige strømgrensen): 2690 A

Minimal ytelse I_k'' (rms-verdi av den hurtige strømgrensen): 1345 A

Maksimal kortslutningsstrøm fra den roterende omformerstasjonen:

Siden man har en ren kortslutning uten overgangsmotstand i feilstedet kan man benytte superposisjonsprinsippet til å dele opp kretsen i to uavhengige kretser. Feilstrømmen fra den roterende omformerstasjonen kan da finnes fra kretsen i figur 21.



Figur 21 Kortslutningskrets for den roterende omformereren

X_d'' og X_t i figur 21 erstattes med X_{omf} som beregnes ut fra stasjonens kortslutningsstrøm i fullast ved kortslutning på samleskinnen.

$$X_{omf} = 16500 \text{ V} / 4450 \text{ A} = 3,71 \text{ ohm}$$

I_{kmaks} fra den roterende omformereren blir da:

$$I_{kmaks} = \frac{16500V}{(10,5 + j14,2)ohm} = 934 \angle -53,5^\circ \text{ A}$$

Maksimal kortslutningsstrøm fra den statiske omformerstasjonen

Merkeimpedansen til den statiske omformerstasjonen ved maksimal kortslutningsytelse er

$$Z_{base} = \frac{16500kV}{2690A} = 6.1\Omega$$

Siden merkeimpedansen er større enn kontaktledningsimpedansen vil omformereren mate ut maksimal strøm begrenset kun av strømgrensen på 2690 A. Vinkelen til kortslutningsstrømmen fra den statiske omformerstasjonen er bestemt av vinkelen på feilimpedansen, i dette tilfellet kontaktledningsimpedansen.

$$I_{kstat} = 2690 \angle -45^\circ \text{ A}$$

5 PRAKTISK UTFØRELSE AV SELEKTIVITETSANALYSER

5.1 Overgangsmotstand

På feilstedet oppstår det normalt en lysbue som kan oppfattes som en ren resistans gitt av en fast lysbuespenning på 2,5 kV/m. Lysbuelengden vil variere men anbefalt lengde i beregningene er 1 meter. Maksimal lysbuemotstand kan beregnes/itereres ut fra

$$R = \frac{U \cdot L}{I_{k \min}} \quad \text{Formel 8}$$

der

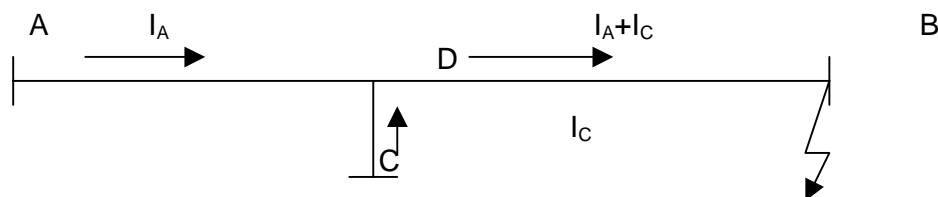
- U = Lysbuespenningen gitt ved 2,5 kV/m
- L = Avstanden mellom elektrodene [m]
- $I_{k \min}$ = Minste kortlutningsstrøm på feilstedet [kA]

5.2 Sideinnmating

Sideinnmating kan enten være i form av en T-avgreining på kontaktledningen eller tilbakematende tog på strekningen. Denne sideinnmatingen må tas hensyn til i selektivetsplanene siden de vil påvirke vernenes evne til å registrere feil på strekningen mellom to stasjoner.

Sideinnmating i form av regenerativ bremsing fra tog beregnes ut fra et tenkt verste tilfelle som beskrevet i kapittel 4.3.5.

Årsaken til at vernene måler feil ved sideinnmating kan illustreres med følgende eksempel:



Figur 22 Prinsippskisse av sideinnmating

Om man har en linjekonstellasjon som vist i figur 22 vil Kirchoffs lov kunne brukes til å sette opp en ligning som beskriver systemet slik:

$$U_A - I_A Z_{AD} - (I_A + I_C) Z_{DB} = 0 \quad \text{Formel 9}$$

Impedansen som distansevernet i A måler er gitt av Ohms lov $Z=U/I$, formel 9 gir da:

$$Z_{m_A} = \frac{U_A}{I_A} = Z_{AD} + Z_{DB} + \frac{I_C}{I_A} Z_{DB} \quad \text{Formel 10}$$

Uten sideinnmating fra C ville vernet målt $Z_{m_A} = Z_{AD} + Z_{DB}$. Reléet i A måler feilen med sideinnmating lenger ute i impedansplanet, med et tillegg $I_C/I_A * Z_{DB}$. Den aktuelle sonen vil ikke rekke frem til B om den er innstilt på $Z_{AD} + Z_{DB}$. Om den imidlertid innstilles på å nå frem til B ved sideinnmating vil vernet se for langt dersom sideinnmatingen faller bort. Legg også merke til at målt impedans er strømvhengig, tillegget til linjeimpedansen avhenger av forholdet mellom strømmene I_A og I_C , jo større I_C er i forhold til I_A , jo større blir tillegget til linjeimpedansen.

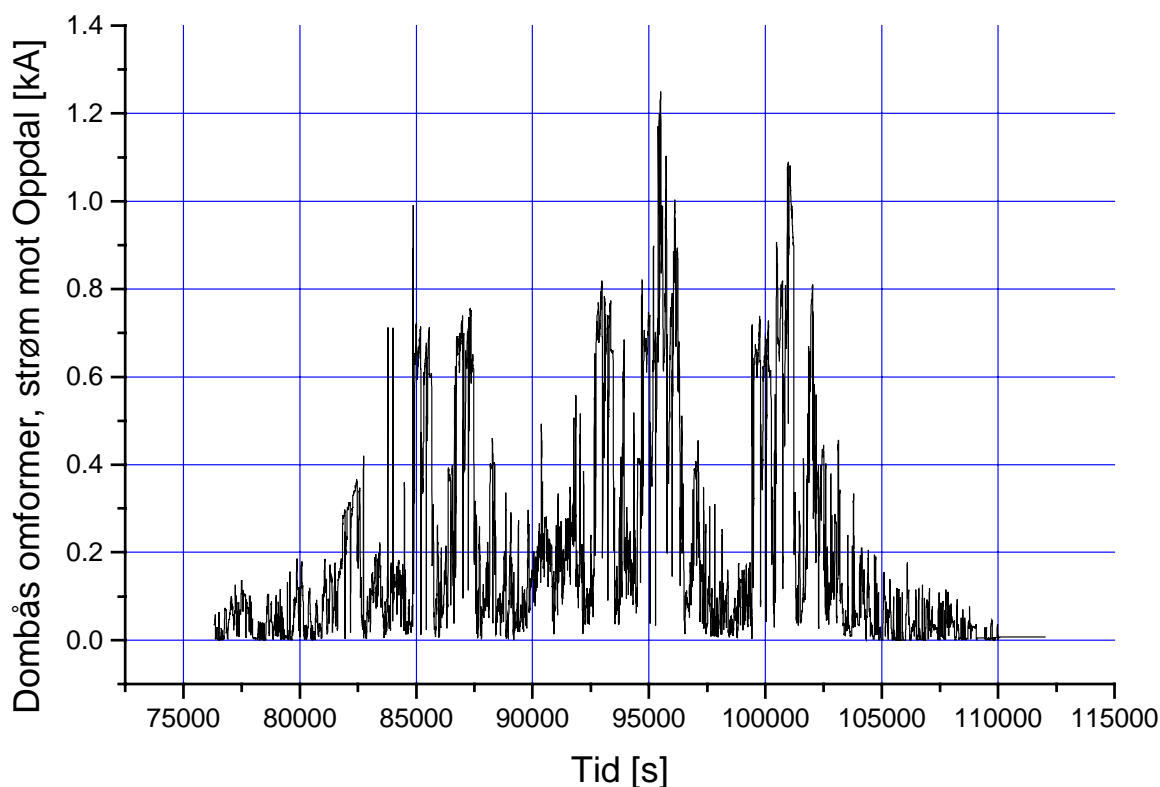
På samme måte som sideinnmating påvirker impedansmålingen i distansevernene påvirker den også kortslutningsstrømmen som omformerstasjonene leverer. Kortslutningsstrømmen fra en omformerstasjon dersom det er sideinnmating på linjen mellom stasjonen og en kortslutning vil følgelig reduseres. Dette må tas hensyn til ved beregning av minste kortslutningsstrøm dersom overstrømsvernet skal dekke hele strekningen frem til neste stasjon.

5.3 Belastningsstrøm

Belastningsstrømmen i jernbanesammenheng er meget intermitterent. Varigheten på toppbelastningene er som regel lengre enn 10 sekunder men betydelig høyere og av kortere varighet enn gjennomsnittlig belastning over seks minutter, time, døgn og uke. Kortvarig belastningsstrøm er ofte høyere enn strømføringssevnen til kontaktledningsanlegget som er 600 A kontinuerlig for normalt kontaktledningsanlegg.

For innstilling av relévern vil en dimensjonerende laststrøm på minimum 800 A være tilstrekkelig på strekninger med normal trafikk og kontaktledningsanlegg. Relévern på strekninger som er godkjent for multipelkjøring med for eksempel EI 16 må minimum innstilles etter en laststrøm på 1000 A ofte opp mot 1200 A.

Som et eksempel på belastningsstrømmer er det tatt frem et diagram fra simulering av multipel EI 16 kjøring på Dovrebanen. Figur 23 viser strømmen på utgående linje fra Dombås mot Oppdal.



Figur 23 Belastningsstrøm utgående linje på Dombås mot Oppdal

5.4 Tidsmarginer

Tidsselektivitet anses oppnådd dersom forskjellen i funksjonstid (egentid i vernet + innstilt forsinkelse) Δt oppfyller:

$$\Delta t \geq t_b + t_t + t_{\text{marg}}$$

Formel 11

der:

t_b = Brytertiden

t_t = Reléets tilbakegangstid

t_{marg} = Sikkerhetsmargin (100 ms)

Som en hovedregel kan man redusere funksjonstiden og benytte

$\Delta t = 200$ ms for elektroniske reléer

$\Delta t = 300$ ms for mekaniske reléer

5.5 Innstilling av overstrømsvern

Jernbaneverket krever at det alltid skal være montert overstrømsvern på utgående linjer i matestasjonene. Det kreves imidlertid ikke at overstrømsvernet dekker hele strekningen som det er installert på. Årsaken til dette er at forholdet mellom laststrøm og feilstrøm i jernbanenettet ikke gir den ønskede selektivitet på lange strekninger med lav kortslutningsytelse (fjernstrekninger).

Overstrømsvernet kan derfor betraktes som et kortslutningsvern som skal begrense høye kortslutningsstrømmer nær stasjonen. Overstrømsvernet skal allikevel stilles så lavt som mulig uten å komme i konflikt med laststrømmen. Overstrømsvernet skal ikke stilles høyere enn at produktet frakoblingstid \times innstilt utløsestrøm ikke overskrider 1200 As. Dersom dette ikke kan oppfylles på grunn av høye kortslutningsstrømmer må utkoblingstiden reduseres på andre måter for eksempel gjennom kommunikasjon mellom distansevernens sone 1 på strekningen.

På korte strekninger med høy installert ytelse kan kortslutningsstrømmen selv nær enden av strekningen være så høy at distansevernets sone 2 ikke gir rask nok utkobling (300 ms gir 4 kA kortslutningsstrøm etter grensen på 1200 As). I slike tilfeller bør overstrømsvernene utstyres med invers tidskarakteristikk og innstilles for å dekke hele strekningen frem til neste stasjon.

Innstilt startverdi for reléet (forsinket utkobling) etter formel

$$1,2 \cdot \frac{I_{bel}}{\eta} \leq I_s \leq 0,75 \cdot I_{k\ min} \quad \text{Formel 12}$$

Momentanverdien innstilles etter formel

$$I_{mom} \geq 1,2 \cdot k_t \cdot I_{kmaks} \quad \text{Formel 13}$$

I_{kmaks} : Maksimal kortslutningsstrøm på enden av strekningen (uten overgangsmotstand)

k_t : Strømreléenes transiente overregningsfaktor ($k_t > 1$)

Dersom formel 12 og 13 ikke kan oppfylles på grunn av lave kortslutningsstrømmer i forhold til laststrømmen kan overstrømsvernet være i form av et momentanrelé uten tidsforsinkelse.

Momentanstrømmen innstilles etter formelen:

$$1,2 \cdot \frac{I_{bel}}{\eta} \leq I_s \geq 1,2 \cdot k_t \cdot I_{kmaks} \quad \text{Formel 14}$$

5.5.1 Generelt

Ved flere utgående linjer må selektivitet mellom overstrømsvernene på de ulike linjeavgangene vurderes. Dette gjelder spesielt i koblingshus med få avganger. I tilfeller der kortslutningsstrømmen ved feil bak et overstrømsvern er høyere enn ønsket innstilt startverdi for vernet kan overstrømsvern med invers tidskarakteristikk gi den nødvendige selektivitet. Dette må imidlertid vurderes i hvert enkelt tilfelle.

5.5.2 Dekningsgrad

Som nevnt kreves det ikke at overstrømsvernet dekker hele strekningen som det er installert på. Årsaken til dette er at forholdet mellom laststrøm og feilstrøm i jernbanenettet ikke gir den ønskede selektivitet på lange strekninger med lav kortslutningsytelse (fjernstrekninger). Den prosentvise delen av strekningen som laveste innstilte verdi for overstrømsvernet I_s (det vil si lavstrømstrinnet dersom dette finnes) dekker, kalles for dekningsgraden (p).

Dekningsgraden defineres som feilimpedansen sett fra vernet i forhold til hele matestrekningens impedans som vist i formel 15.

$$p = \frac{Z_{feil}}{\sqrt{(R_L^2 + X_L)^2}} \quad \text{Formel 15}$$

Hvor feilimpedansen (Z_{feil}) mellom vernet og feilen kan finnes ved differansen mellom impedansen i strømkretsen ved feil rett utenfor vernet/matestasjonen den totale impedansen i strømkretsen ved feil som gir kortslutningsstrøm lik innstilt utløsestrøm som vist i formel 16.

$$I_s = \frac{U_n}{Z_{k \text{ maks}} + Z_{feil}} \Rightarrow Z_{feil} = \frac{U_n}{I_s} - Z_{k \text{ maks}} = \frac{U_n}{I_s} - \frac{U_n}{I_{k \text{ maks}}} \quad \text{Formel 16}$$

5.6 Innstilling av distansevern

Distansevernet har to eller flere impedanssoner med ulik tidsforsinkelse. Sone 1 er momentan og dekker normalt 85 % av strekningen mellom to omformerstasjoner. Man bør imidlertid ikke stille sone 1 ut over ca. 65 km siden man da kan komme i konflikt med laststrømmen. For Jernbaneverkets strekninger gir det derfor en anbefalt innstilling for distansevernetenes sone 1 mellom 60 og 85 % av avstanden til neste stasjon. Sone 1 skal være momentan, tidsforsinkelse benyttes ikke.

Sone 2 skal stilles inn for å gi sikker dekning av hele strekningen frem til neste stasjon. Normalt er en innstilling på 120 % av strekningen tilstrekkelig for at vernet sikkert skal dekke hele strekningen inkludert usikkerheter. For at distansevernet skal kunne detektere feil selv med en viss tilbakemating fra tog på strekningen kan det være ønskelig å stille distansevernets sone 2 enda høyere. Imidlertid skal man normalt ikke stille sone 2 så langt at den når ut over neste streknings momentanområde dersom sideinnmatingen fra stasjonen mellom bortfaller. Tidsforsinkelse for sone 2 innstilles normalt på 200 ms.

Sone 2 på strekningen A-B skal derfor stilles inn etter følgende impedanser:

Krav 1: Sone 2 skal være større enn $1,2 (Z_{ab} + R_{lysbue})$

Krav 2: Sone 2 skal være mindre enn $0,87 Z_{ab} + 0,74 b_1$ (b_1 er her rekkevidden for momentansonen på neste strekning). Krav 2 sikrer at det er 15 % margin (begge veier) mot at sone 2 overskrider sone 1 på neste strekning.

Krav 1 er viktigst dersom kravene ikke kan forenes. Krav to kan unngås dersom man tar hensyn til sideinnmating eller benytter tidsselektivitet.

Eks 1: Strekning A-B er på 80 km og neste strekning B - C er også på 80 km.

Krav 1 gir: sone 2 innstilles høyere enn $1,2(80 * Z_{kl} + R_{lysbue}) = 96 \text{ km} * Z_{kl} + 1,2 * R_{lysbue}$, (Z_{kl} er impedansen pr. km)

Krav 2 gir: sone 2 innstilles lavere enn $(0,87 * 80 + 0,74 * (0,85 * 80)) * Z_{kl} = 120 * Z_{kl}$, (=150 % av strekningen A-B)

Her benytter man krav 2 og oppnår en innstilling på 150 % av strekningen A - B

Eks 2: Strekning A - B er på 90 km og neste strekning er på 40 km.

Krav 1 gir: sone 2 innstilles høyere enn $1,2 * (90 * Z_{kl} + R_{lysbue}) = 108 \text{ km} * Z_{kl} + 1,2 * R_{lysbue}$

Krav 2 gir: sone 2 innstilles lavere enn $(0,87 * 90 + 0,74 * (0,85 * 40)) * Z_{kl} = 103 \text{ km} * Z_{kl}$

Her kan man se at krav 2 motstrider krav 1 men uansett må man her benytte krav 1 for å ha tilstrekkelig dekning av strekningen. Normalt vil man ikke få uselektivitet siden man har sideinnmating fra stasjonen som står i B. Her ender man altså opp med en innstilling på 120 % av strekningen A - B.

Ved innstilling av distansevernet må det også tas hensyn til sideinnmating på strekningen. Dersom det er problemer med å kunne tillate den ønskede tilbakematingseffekt fra tog på strekningen kan man benytte seg av kommunikasjon mellom distansevernene på begge sider av en strekning (hjelpekanalsamarbeid, se kapittel 2.10) eller en 3. impedanssone.

Sone 3 benyttes i noen stasjoner som samleskinnevern. Sonen er da rettet bakover slik at den detekterer feil rett bak vernet.

I forbindelse med problemer knyttet til sideinnmating på strekningen kan også en eventuell sone 3 vurderes benyttet med en lang tidsforsinkelse på minimum 0,5 s. I så tilfelle bør forsinkelsen på eventuell sonegrensebryter på strekningen og påfølgende strekning økes fra 0,4 s til 0,7 s for å Sone 2 og en eventuell sone 3 er utstyrt med strømsprangrelé for å hindre at de løser ut for laststrømmer. Dersom distansevernene står på strekninger forsynt fra statiske omformere med strømgrense blir strømsprangreléet komplettert med et spenningsprangrelé.

Moderne distansevern har en reservefunksjon dersom spenningsmålingen faller bort eller spenningen blir så lav at impedansmålingen blir usikker. I slike tilfeller skal distansevernet gå over til en tidsforsinket overstrømsfunksjon. Denne overstrømsfunksjonen erstatter distansevernfunksjonen og må derfor ha samme dekningsområde som distansevernet. Normalt bør derfor dette reserve-overstrømsvernet innstilles etter kortslutningsstrømmen i distansvernets sone 2' med margin,

$$I_{>>} = 0,8 \times I_k(Z2')$$

Siden Z2' normalt innstilles på 120 % av distansen frem til stasjonen bortenfor nærmeste stasjon kan denne strømmen bli så lav at den umuliggjør togfremføring. I slike tilfeller kan man vurdere å benytte en innstilling på

$$I_{>>} = 0,75 \times I_k(Z2)$$

man må da gjøre oppmerksom på at reserve-overstrømsfunksjonen ikke gir tilfredsstillende dekning i alle tilfeller. Dette kan allikevel godtas siden Z2' kun benyttes i unntakstilfeller. I enkelte nyere stasjoner faller også utgående effektbryter direkte dersom spenningen til distansevernet forsvinner. I disse stasjonene har derfor reserve-overstrømsvernet ingen funksjon.

5.7 Eksempel på oppbygging av en reléplan

Eksemplet under viser et forslag til oppbygging av en selektivitetsplan for en stasjon eller strekning. Oppbyggingen er i hovedsak hentet fra [4]. Vedlegg 1 inneholder en reléplan for strekningen Krossen – Gandal basert på anbefalingene i denne håndboken.

Arbeidets omfang

Enlinje skjema

Generelle kriterier for innstilling og marginer

Kortslutningsberegninger

Tid-strøm- og impedansplan- diagrammer

Tabeller over alle vern og innstillinger

Kommentarer til tid-strøm- og impedansplan- diagrammer

Sammenstilling og konklusjon

6 REFERANSELISTE

- | | |
|--|---|
| 1. Vernstudie, teoretiske undersøkelser | Jernbaneverket, februar 2002 |
| 2. Teknisk regelverk JD 546.5.12 | Jernbaneverket Hovedkontoret |
| 3. Personikkerhet ved kortslutninger | A. Schei, EFI Teknisk rapport nr. 1984, jan. 1976 |
| 4. Selektivitet i elektriske anlegg | Tapir, ISBN 82-519-0782-9 |
| 5. Selektivplaner for elanleggningskydd | Kursdokumentasjon, STF kurs nr. 816:23 |
| 6. Krav til Vern i hovednettet (KtV) | Utgitt av StatnettSF, dok.id.205830 |
| 7. Etteropplæringskurs for maskinister | NSB Hk/Engineering |
| 8. Lärobok i elektroteknikk för Statens Jernvägars personal, | |
| 9. Del IV Omformarstationer | Byrådirektör Rune Lundberg, Stockholm 1959 |
| 10. Utredning av vernfunksjonen ved tilbakemating | Jernbaneverket Hovedkontoret, 2000 |
| 11. Reläskyddshandboken 16 2/3 Hz | Banverket, elkraftsystem, 1996 |
| 12. Beregningsmodeller for jernbanens roterende omformere | Fordypningsprosjekt NTNU des. 2001, Steinar Danielsen |

7 VEDLEGG

Vedlegg 1 Reléplan for strekningen Krossen – Gandal