

■ www.energy.sintef.no ■

**SINTEF****SINTEF Energiforskning AS**

Postadresse: 7465 Trondheim
Resepsjon: Sem Sælands vei 11
Telefon: 73 59 72 00
Telefaks: 73 59 72 50

www.energy.sintef.no

Foretaksregisteret:
NO 939 350 675 MVA

TEKNISK RAPPORT

SAK/OPPGAVE (tittel)

**Høgfrekvent støy i kraftforsyningsanlegg:
Forskrifter, måleresultat og simuleringar**

SAKSBEARBEIDER(E)

Nils Arild Ringheim *N.A. Ringheim*
Anngjerd Pleym (forfatter Vedlegg C)

OPPDRAAGSGIVER(E)

EBL Kompetanse

TR NR. TR A5737	DATO 2004-03-19	OPPDRAAGSGIVER(E)S REF. Annie Heieren	PROSJEKTNR. 12X222
ELEKTRONISK ARKIVKODE 030102nar10397		PROSJEKTANSVARLIG (NAVN, SIGN.) Helge Seljeseth <i>H. Seljeseth</i>	GRADERING Åpen
ISBN NR. 82-594-2400-2	RAPPORTTYPE 1, 2	FORSKNINGSSJEF (NAVN, SIGN.) Petter Støa <i>P. Støa</i>	OPPLAG SIDER 15 65
AVDELING Energisystemer	BESØKSADRESSE Sem Sælands vei 11	LOKAL TELEFAKS 73 59 72 50	

RESULTAT (samandrag)

"Beredskapsforskriften" (BfK) stiller generelle funksjonskrav til EMI og EMP i norske kraftforsyningsanlegg (klasse 2 og 3). I dag er myndighetskravet 30 dB demping opp til 1 GHz for driftssentraler, annan kontrollutrustning og sambandsinstallasjonar. Dette kravet er uavhengig av immuniteten til utstyret.

I eit laboratorieoppsett vart det injisert ein straumpuls med stigetid ~titals ns på kabelskjermen til 2 stk TXSE kablar (12 kV, 240 mm²), forlagt på 5 m x 8 m jordplan (maskenett med 100 mm x 100 mm rutenett, 3,4 mm trådtjukkheit). Basert på desse og tidlegare måleresultat, er den leidningsbundne delen av myndighetskravet sannsynlegvis oppfylt dersom kabelinnføringar blir avkopla til lokalt jordplan (i rom/bygningar) ev sentralt jordpunkt (i skap) med slangeklemme eller tradisjonell EMC-gjennomføring (type nytta her: Roxtec EMC modul). EMC-gjennomføring gav betre støydemping enn slangeklemme, og har i tillegg betre eigenskapar mht elektromagnetisk skjerming, branneigenskapar osv, men er eit dyrare alternativ. For store anlegg med mange kablar inn/ut, er slangeklemmealternativet vanskeleg å gjennomføre i praksis og tradisjonell EMC-gjennomføring eit betre teknisk og økonomisk alternativ. Resultata kan overførast til andre kabeltypar med tilsvarende skjermkabel (konsentrisk leiad utført som kopartrådar med motspiral av koparband), f eks PFSP og IFSI. Dempinga av dei høgfrekvente støypulsane pga jordplanet (maskenettet) sin nærleik til kabelen, gav inga målbar demping utan at kabelen samtidig var avkopla til jord i innføringspunktet.

Forsøk på å simulere forenkla modellar av måleoppsettet med maskenett, kablar og avkopling mislykkast: Basert på programvare som allereie vart nytta av fagmiljøa i tilgrensande arbeid, vart programma Concept II og CDEGS prøvde ut. Dei viste seg lite eigna for analyse av problemstillingar kring utforming av jordingsnett og kabelføring i kraftforsyningsanlegg.

Det er ein del uavklarte problemstillingar kring høgfrekvent støy og myndighetskrav. Handbøker oa legg opp til ein systematisering av tiltak vha soneinndeling for å møte dette kravet. Den reelle dempinga etter gjennomføring av tiltak er likevel usikker: Systematiske målerutinar for verifisering av anleggstilltak er fråverande. Sjølv om den leidningsbundne delen av myndighetskrava sannsynlegvis er tilfredsstillt, er den strålte delen langt meir uvisst og komplisert. Utfordringa for anleggseigar er derfor å veta kva for tiltak som er tilstrekkeleg i høve til krava som blir stilt anlegget. Dette krev meir kunnskap og undersøkingar.

For å auke kunnskapen, foreslår prosjektet ei vidareføring i ein simuleringsaktivitet. Basert på eksisterande labmodell og måleresultat, kan ein nytte ei kretsteknisk løysing (kombinasjon av analytisk og forenkla numerisk metodikk) for å auke forståinga av kva som påverkar støydempinga i anlegg med lokale jordplan (maskenett). Lengre fram kan dette legge grunnlaget for eit verktøy som både kan hjelpe til med riktig utforming av kraftforsyningsanlegg mht høgfrekvent støy og nyttast til verifisering og dokumentasjon av anlegg.

STIKKORD

EGENVALGTE	Høgfrekvent støy	Måling
	Forskrifter	Simulering

FORORD

Denne rapporten dokumenterer resultat frå delprosjektet ”Spenningskvalitet og støybeskyttelse”, som er ein del av EBL Kompetanse sitt prosjekt ”Leveringskvalitet i nettet”.

Bakgrunnen for prosjektaktiviteten er eit tidlegare treårig EMP-prosjekt i regi av EBL Kompetanse, der det vart laga ei handbok for EMP-sikring av kraftforsyningsanlegg. Under dette arbeidet såg vi ein del problemstillingar knytt til høgfrekvent støy som ikkje var tilfredsstillande avklart. Dette var td kjennskap til

- dempinga i kabelskjermen for typiske kablar nytta i kraftforsyningsanlegg
- effekten av parallellførte jordleiarar, kabelstigar mm på koplingsdempinga mellom kablar
- gode, eksisterande kabelskjermingar eller –gjennomføringar for skjerma kablar
- høgfrekvent vern (avleiarar mm)

Vidare var ein del prinsipielle spørsmål kring jordingssystematikk framleis uavklart.

Hovudvekta i denne rapporten blir lagt på problemstillingar kring jordingssystematikk: Med utgangspunkt i laboratoriemålingar, blir fornuftig utføring av jordnett og kabelføring med tanke på høgfrekvent støy undersøkt. Det blir vist ein oversikt over relevant litteratur nasjonalt og internasjonalt på dette emnet, inklusiv norske forskrifter. Rapporten foreslår også innspel til vidare prosjektaktivitet.

Utanom bedriftene som har støtta prosjektet direkte, ønskjer prosjektgruppa å takke Roxtec AS som vederlagsfritt gav oss EMC gjennomføringane som vart testa i prosjektet.

INNHALDSLISTE

	Side
1 ARBEID INNAN HØGFREKVENT STØYBESKYTTELSE.....	7
1.1 HØGFREKVENT STØY I KRAFTFORSYNINGSANLEGG	7
1.2 NASJONALT ARBEID	8
1.2.1 Regelverk.....	8
1.2.2 Handbøker.....	9
1.3 INTERNASJONALT ARBEID	10
1.3.1 IEC.....	11
1.3.2 CIGRÉ	12
1.4 REFERANSAR	12
2 MÅLINGAR	14
2.1 KORT OM MÅLEOPPSETT.....	14
2.2 RESULTAT.....	16
2.3 VIDARE ARBEID	17
2.4 REFERANSAR	18
3 SIMULERINGAR.....	19
3.1 INNLEIING.....	19
3.2 CONCEPT II	19
3.3 CDEGS.....	19
3.4 REFERANSAR	20
4 HØGFREKVENT STØY: UTFORDRINGAR.....	21
4.1 AKTØRAR VED UTFORMING AV KRAFTFORSYNINGSANLEGG	21
4.2 UTFORDRINGAR.....	22
VEDLEGG A: LITTERATUROVERSIKT	25
A.1 IEC.....	27
A.2 CIGRÉ	29
A.3 REFERANSAR	31
VEDLEGG B: MÅLINGAR.....	33
B.1 MÅLEOPPSTILLING	35
B.2 INSTRUMENTERING OG KOMPONENTAR.....	40
B.2.1 Instrumentering.....	40
B.2.2 Kabeltype.....	40
B.2.3 Støytiltak.....	40
B.3 DEFINISJON AV FIGURTEKSTAR.....	41
B.4 RESULTAT.....	43
B.4.1 Demping langsetter maskenettet.....	43
B.4.2 Summen av straumen i kabelskjerm og innerlaiar: Demping med ulike avkoplingar	44
B.4.3 Demping i innerleiar med ulike avkoplingar	46
B.4.4 Korte kablar (1m)	47
B.4.5 Verknaden av parallell potensialutjamningsleiar.....	49
B.5 BEREKNING AV KABELPARAMETRAR.....	56
VEDLEGG C: CDEGS PROGRAMVARE.....	57

C.1	SAMMENDRAG.....	59
C.2	INNLEDNING/BAKGRUNN.....	59
C.3	BEREGNINGSPROGRAMMET CDEGS.....	60
	C.3.1 Kort beskrivelse av programvaren og dens hovedanvendelsesområde.....	60
	C.3.2 Muligheter relatert til den aktuelle anvendelsen, og begrensninger	61
C.4	BEREGNINGSMODELL, BEREGNINGSFORSØK OG KONKLUSJON	62
	C.4.1 Beskrivelse av basismodellen	62
	C.4.2 Problemer i beregningene, reduksjon av modellen.....	62
	C.4.3 Konklusjon.....	63
C.5	REFERANSER.....	63

1 ARBEID INNAN HØGFREKVENT STØYBESKYTTELSE

Dette kapitlet gir ein oppdatert status over nasjonalt og internasjonalt arbeid innan temaet høgfrekvent støybeskyttelse i kraftforsyningsanlegg. Nasjonalt blir hovudvekta lagt på ein status av gjeldande retningslinjer og nye forskrifter, samt arbeid gjort dei siste åra i samband med handbøker. Internasjonalt blir det referert til arbeid utført i regi av IEC (SC 77C) eller CIGRE (WG 36.04).

1.1 HØGFREKVENT STØY I KRAFTFORSYNINGSANLEGG

I denne rapporten blir høgfrekvent støy nytta om støyfenomen med frekvensar over typisk 100 kHz. Både leidningsbundne og strålte fenomen inngår og omfattar td transientar frå direkte lynnedslag eller felt frå lynkanalar, transientar grunna koplingar i høgspenningsbrytarar, EMP (elektromagnetisk puls) osv.

For å handtere høgfrekvent støy tilfredsstillande i kraftforsyningsanlegg, er ein overordna jordingsstrategi svært viktig. Stikkord er soneinndeling med lokale jordnett (maskenett), felles innføringspunkt til kvar sone og systematisering av jording, skjerming, avleiing og filtrering ved alle soneovergangar. Jordingstiltak primært retta mot høgfrekvente fenomen, vil også auke immuniteten mot andre meir lågfrekvente forstyrringar.

Fenomena som opptrer i kraftforsyningsanlegga i dag er i stor grad dei same som for 10 - 20 år sidan. Kjeldene til støyen er derfor ganske like slik dei var for nokre år sidan, med unntak av større utbreiing av SF₆- anlegg og dermed fleire høgfrekvente eigengenererte støykjelder.

Den største endringa er skjedd på kontrollsida: Det blir i større grad nytta distribuerte kontrollanlegg i motsetnad til tidlegare sentraliserte kontrollanlegg. Det medfører at følsam elektronikk blir spreidd ut i større delar av anlegget, med tilsvarande høgare krav til lokal støydemping i ulike delar av anlegget.

Utfordringa i moderne anlegg blir å oppnå tilstrekkeleg støydemping til ein fornuftig kostnad. I tillegg er det ønskjeleg at anlegget skal kunne utvidast og endrast i framtida, samstundes som dei gode støyeigenskapane er lette å oppretthalde.

Oversikta vidare i kapitlet gir primært ein oppdatert status for nye dokument som er komen til etter at EBL Kompetanse si EMP handbok [1.1] vart gjeven ut i 2000. Det tyder at det i liten grad blir tatt med detaljar frå eldre dokument, fordi desse allereie er dekkja av handboka. Fokus er på høgfrekvente problemstillingar og spesielt retta mot utføringa av jordingsanlegget.

1.2 NASJONALT ARBEID

Det blir her gitt ei kortfatta oversikt over status for norsk arbeid innan høgfrekvent støy med relevans for kraftforsyningsanlegg.

1.2.1 Regelverk

Norsk regelverk som er relevant for tiltak mot høgfrekvente støyfenomen er:

- Beredskapsforskrift for kraftforsyningen (BfK) [1.2]
- Retningslinjer for sikring av kraftforsyningsanlegg (RSK) [1.3]
- Forskrift om EMP-beskyttelse av telekommunikasjonsanlegg (EMP-forskriften) [1.4]
- Forskrifter for elektriske anlegg – forsyningsanlegg (FEA-F) [1.5]
- Forskrift om elektrisk utstyr [1.6]

”Beredskapsforskrift for kraftforsyningen” gjeld frå 1. januar 2003, og omtalar EMP og EMI i §6.4 (d): *”EMP og EMI beskyttelse: Driftssentraler, annen kontrollutrustning og sambandsinstallasjoner i klasse 2 og 3 skal beskyttes mot elektromagnetisk puls (EMP) og elektromagnetisk interferens (EMI).”* Ut over dette generelle funksjonskravet, inneheld ikkje BfKen ytterlegare detaljering. Det skal etterkvart utarbeidast rettleiing til dei ulike delane BfKen omfattar, inklusiv EMP og EMI. Rettleiingane vil basere seg på relevante delar av RSKen, samt ein del nytt stoff.

”Retningslinjer for sikring av kraftforsyningsanlegg” vart gitt ut i 1997. RSKen gjeld parallelt med i BfKen, inntil RSKen ev blir oppheva. Dersom BfK og RSK ikkje stemmer overeins, gjeld ordlyden i BfK. RSKen har eit overordna krav til 30 dB demping mot elektromagnetiske felt opp til 1 GHz, og omfatta opphavleg følgjande anleggsdelar: *”Data-, sambands- og andre rom med elektronisk utstyr som har betydning for driften av anlegget skal beskyttes mot EMP/EMI.”* Denne formuleringa er no erstatta av ordlyden i BfK ovanfor. Beskyttelsen skal oppnåast vha skjerma rom/bygningar, og kjem i tillegg til ev eigenimmunitet i utstyr. NVE har munnleg gitt uttrykk for at dei ikkje lenger strengt følgjer ordlyden i RSKen med tanke på høgfrekvente støytiltak. Dei er med andre ord opne for å diskutere alternative utføringar av praktiske støytiltak med anleggseigar, td strategien som er valt i EMP-handboka [1.1]

”Forskrift om EMP-beskyttelse av telekommunikasjonsanlegg” var på høyring i 1999, men ligg framleis til behandling hos Samferdselsdepartementet. Forskrifta omfattar infrastruktur for etatar og verksemdar som leverer tenester innan telekommunikasjon eller data som er viktig for samfunnet ved krise, beredskap eller krig. Pga innspel i høyringsrunden frå bl a NVE, er det likevel usikkert om kraftforsyningsanlegg vil bli omfatta av ei framtidig forskrift. (Pr i dag er det også usikkert om forskrifta nokon gong kjem ut.) Dokumentet gir eit generelt funksjonskrav på 30 dB demping i frekvensområdet 100 kHz til 18 GHz. Telekommunikasjonsutstyr skal i tillegg ha ein eigenimmunitet i følgje EN 55105 (tilsvarar EN 50082-1; hushaldningsmiljø). Høgare eigenimmunitet for system og installasjonar gir tilsvarende reduksjon i det generelle beskyttelseskravet. Kravet er oppfylt dersom relevante standardar er oppfylte. Dokumentet ”Retningslinjer for beskyttelse av elektroniske installasjoner i totalforsvaret mot elektromagnetisk puls (EMP)” [1.7],

er retningslinjer til forskrifta. Publikasjonen gir ei kortfatta skildring av EMP-problematikken, og utfyller og argumenterer for forskrifta.

”Forskrifter for elektriske anlegg – forsyningsanlegg” (FEA-F) skal sikre forsvarleg elsikkerheit ved utføring av nye anlegg og utvidingar, drift, reparasjon og vedlikehald av eksisterande anlegg. Forskrifta omhandlar ikkje høgfrekvente fenomen, men definerer bl a funksjonsbaserte krav i høve til jordingsanlegget, og kan såleis legge føringar for utføringa av jordingsanlegget.

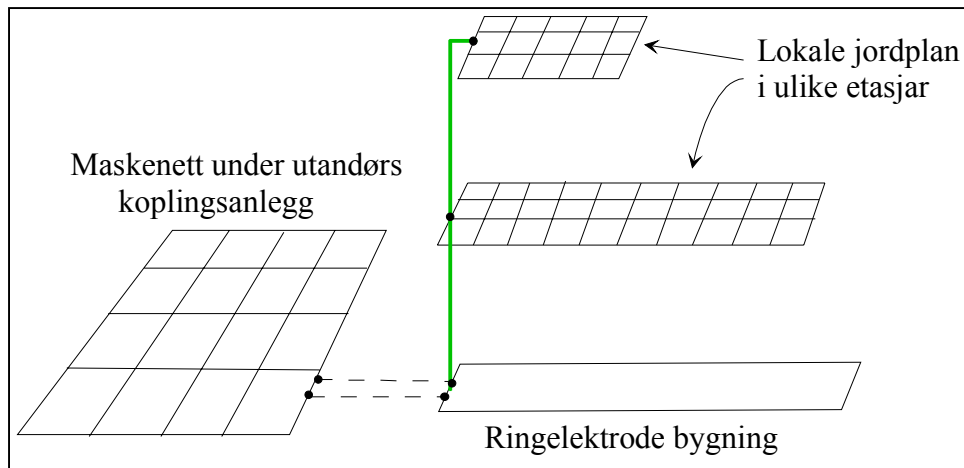
”Forskrift om elektrisk utstyr” sikrar gjennomføring av dei direktiv som er omfatta av EØS-avtala og gjeld elektrisk utstyr. Eitt av desse er EMC-direktivet.

1.2.2 Handbøker

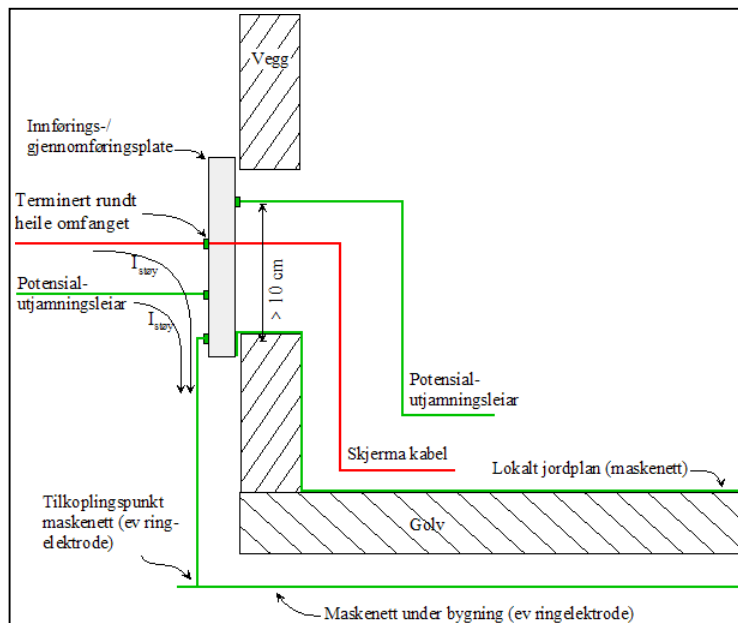
Det eksisterer to norske handbøker som omhandlar høgfrekvente problemstillingar med relevans for kraftforsyningsanlegg:

- EMP- sikring av kraftforsyningsanlegg. Håndbok. [1.1]
- EMP håndbok frå Forsvarets logistikkorganisasjon/Informasjons- og kommunikasjonstjenester [1.8].

EMP-handboka for kraftforsyningsanlegg opnar for fleksibilitet ved val av beskyttelsstrategi: Global beskyttelse i form av skjerma rom eller bygningar, ev differensiert beskyttelse (ulik grad av beskyttelse for ulike delar av anlegget) vha skjerma kabinett, skap, apparat med høgare eigenimmunitet osb. Alternativt kan sikringstiltaka omfatte reservelager, manuell operatørkontroll og/eller fysisk avgrensing for uvedkomande kring anlegg. Dei tradisjonelle tiltaka (jording, skjerming, avleiing og filtrering) blir systematisert vha soneinndeling. Resultatet blir ein jordingsstrategi som nyttar lokale jordplan (maskenett) bunde saman av potensialutjammings-leiarar. Ved innføring av kablar til eit lokalt jordplan, nyttast innføringsplate og avkopling til jord (ev også filtrering). Prinsippet er vist i Figur 1.1 og Figur 1.2. Handboka viser først og fremst prinsippa for å oppnå støybeskyttelse i kraftforsyningsanlegg, medan detaljeringa av løysingane ikkje blir vist. Slik sett bør strategien kunne tilpassast relativt ulike krav mht til demping. Sjølv om tittelen på handboka har EMP som hovudoverskrift, er boka først og fremst ei lærebok i installasjonspraksis for den høgfrekvente delen av EMC-problematikken i kraftforsyningsanlegg.



Figur 1.1 Prinsippskisse for jordingsstrategien som er valt i EMP-handboka for kraftforsyningsanlegg.



Figur 1.2 Skisse av anbefalt praksis i EMP-handbok for kraftforsyningsanlegg ved innføring av kablar på lokalt jordplan (maskenett).

Den andre handboka [1.8], viser høg detaljeringsgrad for dei skisserte løysingane. Hovudfokus er utforming av skjermrom og detaljar knytt til dette. Til ei viss grad vil derfor dei to bøkene utfylle kvarandre.

1.3 INTERNASJONALT ARBEID

Målsetjinga med denne undersøkinga, var å fange opp ev nye forslag til utføring av jordingsanlegg, samt ev korrigere eksisterande strategi som er valt i EMP-handboka for kraftforsyningsanlegg.

Kort fortalt er det ingen opplysningar som endrar grunnleggjande på jordingsstrategien som er valt i EMP-handboka, sjå Figur 1.1. Viser likevel ein oversikt nedanfor som syner til eit utval av dokumenta som er gått gjennom.

1.3.1 IEC

IEC sin underkomite SC 77C, kalla "High Power Transient Phenomena", har mange relevante publikasjonar i høve til høgfrekvente problemstillingar. VEDLEGG A: viser ei fullstendig oversikt over desse dokumenta. Som vedlegget syner, er det ein stor aktivitet internasjonalt på dette området. I tillegg til problemstillingar kring HEMP (high altitude electromagnetic pulse), er også HPEM (high power electromagnetic) påkjenningar ein del av miljøet. (HPEM er samlenamn på menneskeskapte truslar og tilsvarar radiofrekvente våpen nytta i EMP-handboka). Også IEC 77B, kalla "High frequency phenomena", arbeider naturleg nok med publikasjonar som er interessant for kraftforsyningsanlegg og høgfrekvente problemstillingar.

I høve til oversikta over relevante IEC publikasjonar som allereie finst i EMP-handboka for kraftforsyningsanlegg, er tre nye publikasjonar påbegynt i regi av SC 77C. Dette er

- IEC 61000 Electromagnetic compatibility – Section 1: General – Part 5: High power electromagnetic (HPEM) effects on civil systems
- IEC 61000 Electromagnetic compatibility – Section 2: Environment – Part 13: High power electromagnetic (HPEM) environments – Radiated and conducted
- IEC 61000 Electromagnetic compatibility – Section 4: Test and measurement techniques – Part 33: Methods and means of measurements of high power transient parameters

61000-1-5 gir bakgrunnsinformasjon om verknaden av HPEM på sivile system, samt motivasjon for introduksjon av standardar (god fenomenskildring, eksempel på måleresultat og konsekvensar av ulike pulspåkjenningar). Med omsyn til tiltak, nemner dokumentet stort sett kjent metodikk frå tidlegare. Unntak: Overvaking av det elektromagnetiske miljøet i kombinasjon med manuell eller automatisk innkopling av avleiarar. (Sannsynlegvis mest tenleg ved repeterande menneskeskapte påkjenningar retta mot antenneinngangar.)

61000-2-13 omhandlar miljø og fenomenskildring, og definerer terminologi og begrep knytt til samlenamnet HPEM miljø. Spesielt for HPEM truslar er at dei dempar seg raskt med avstanden frå kjelda. I høve til eksisterande EMP-handbok, går IEC-publikasjonen mykje lenger i detaljering kring dette, og viser bl a eksempel på generatorar og deira karakteristika.

61000-4-33 viser eigna måle- og testmetodikk for høgfrekvente problemstillingar. Høge frekvensar stiller store krav til måleteknikk og instrumentering, og publikasjonen er eit nyttig underlag for alle som skal gjera høgfrekvente strålte eller leidningsbundne målingar.

Nemner i tillegg IEC 61000-6-6, som no er utgjeven. Dette er ein generisk immunitetsstandar mot HEMP truslar for innandørs utstyr. Det er med andre ord mogleg å nytte ein eksisterande internasjonal standard for å sikre tilstrekkeleg utstyrsimmunitet mot HEMP og tilsvarande høgfrekvente og energirike påkjenningar.

1.3.2 CIGRÉ

Den mest relevante komiteen i CIGRÉ inn mot høgfrekvente støypåkjenningar er studiekomite 36 (SC 36), kalla "Power System Electromagnetic Compatibility" (no nytt namn: C4 "System Technical Performance"), og spesielt arbeidsgruppe 36-04 (WG 36-04: EMF and EMC. General aspects, no kalla: C4.04 "EMC and EMF general aspects"). Når det gjeld systematisering av jording og jordingsstrategi, som er mest interessant for denne rapporten, har dei ikkje publisert arbeid på dette i det siste.

Gir i staden eit kort utdrag frå ein artikkel [1.9] der det er gjort EMI målingar i transformator- og koplingsstasjonar frå 110 kV til 720 kV systemspenning. Publikasjonen skil mellom luftisolerte og gassisolerte anlegg, og resultata eignar seg som underlag for oversikt over EMI fenomen som opptrer. I Tabell 1.1 er dei dominerande frekvensområda for EMI fenomen trekt ut.

Tabell 1.1 Dominerande frekvensområde for strålt og leidningsbunde EMI fenomen i eit utval luft- og gassisolerte transformatorstasjonar og koplingsanlegg. Utdrag frå [1.9]. (Eining: [typisk maks. verdi i MHz | høgaste registrerte maks. verdi i MHz]).

Type fenomen	Luftisolerte anlegg [MHz]	Gassisolerte anlegg [MHz]
Leidningsbundne (U og I)	5 20	50 115
Strålt (E og H felt)	20 30	50 140

Ein skal vera litt forsiktig med å overføre direkte resultata ovanfor til norske tilhøve (ulik systemspenning osv). Likevel bør tala vera representativ for typisk frekvensområde for EMI-fenomener i anlegga, pga f eks koplingar osv. Det er verd å merke seg at det er ein stor avstand til frekvenskrava i dagens forskrifter og retningslinjer (30 dB opp til 1 GHz i RSKen, 30 dB mellom 100 kHz og 18 GHz for EMP-forskriften). Samtidig er det viktig å understreke at tabellen ikkje seier noko om amplituden på forstyrringa, noko som sjølvstøtt er ein sentral parameter.

1.4 REFERANSAR

- 1.1. Ringheim et al: "EMP-sikring av kraftforsyningsanlegg. Håndbok"
Enfo (I dag: EBL Kompetanse). Publikasjon nr: 445-2000. ISBN 82-436-0405-7.
2000.
- 1.2 Forskrift om beredskap i kraftforsyningen.
NVE. 2002.
- 1.3 Retningslinjer for sikring av kraftforsyningsanlegg (RSK).
NVE. 1997.
- 1.4 Forskrift om EMP-beskyttelse av telekommunikasjonsanlegg (EMP-forskriften).
Høyringsutkast med følgjebrev datert 1999-07-21. Høyringsrunde avslutta 1999-10-29.
(Ikkje tatt i bruk etter høyringsrunde, ligg til behandling i Samferdselsdepartementet.)

- 1.5 Forskrifter for elektriske anlegg Forsyningsanlegg 1995.
Elektrisitetstilsynet, 1994.
- 1.6 Forskrift om elektrisk utstyr
Produkt- og Elektrisitetstilsynet, 1995.
- 1.7 Retningslinjer for beskyttelse av elektroniske installasjoner i totalforsvaret mot
elektromagnetisk puls (EMP).
Samferdselsdepartementet, 24. mars 1999.
- 1.8 EMP håndbok. 2. utgåve. Forsvarets logistikkorganisasjon/Informasjons- og
kommunikasjonstjenester (FLO/IKT). 2003..
- 1.9 Imposimato, C. et al: EMI characterization of HVAC substations – updated data and
influence on immunity assessment. CIGRE Session 2002, 36-08.

2 MÅLINGAR

Dette kapitlet gir ei kort oversikt over måleoppstillinga som er nytta, samt viser eit samandrag av resultata i tabellform. Vidare blir dei viktigaste resultata kommentert, saman med konsekvensane dette bør få på utføringa av kabelforlegning i kraftforsyningsanlegg. Til slutt blir det foreslått ei vidareføring av arbeidet, med utgangspunkt i måleresultat som ikkje kan forklarast tilfredsstillande.

2.1 KORT OM MÅLEOPPSETT

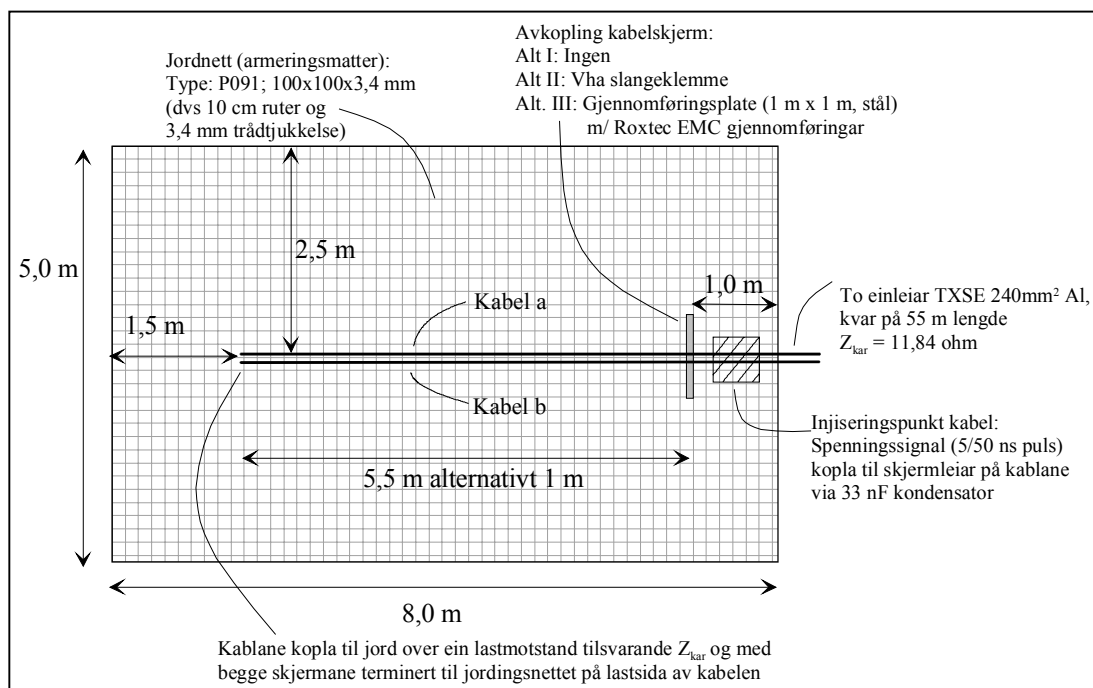
Målingane er utførde på to parallelle, einleiar kablar som er lagt direkte oppå eit jordplan (maskenett). I måleoppstillinga blir høgfrekvente støypulsar injisert på kabelskjermene. Resulterande straum langs kablane blir målt på innerleiar (målepunkt 4) eller som summen av straumen i innerleiar og kabelskjerm (målepunkt 3). Målsetjinga med målingane er å talfeste verknaden av ulike typar høgfrekvente støytiltak for kabelinnføring i eit anlegg med jordplan (maskenett), der det blir nytta ein kabeltype som har ein ytre skjerm med relativt tradisjonelle skjermingsegenskapar. Sjå Figur 2.1 og Figur 2.2 på neste side.

Måleoppsettet som er valt, liknar til ei viss grad påkjenninga ein kabel kan bli påtrykt ved innmating av høgfrekvente støystraumar i jordingssystemet (frå overspenningsavleiar el.) Dette kan føre til lokale spenningsstigningar i jordnettet, med tilhøyrande straum i kabelskjermar, jordleiarar osb. Det er også likskap til koplinga strålte elektromagnetiske fenomen som f eks LEMP (elektromagnetisk puls frå lynkanal) og HEMP (High altitude electromagnetic pulse) gjer til kablar. Normalt vil desse fenomena i tillegg ha indusert støypulsar på innerleiaren av kablane (felles modus eller common mode støy) før avkoplingspunktet, noko som i mindre grad er tilfelle i vårt måleoppsett.

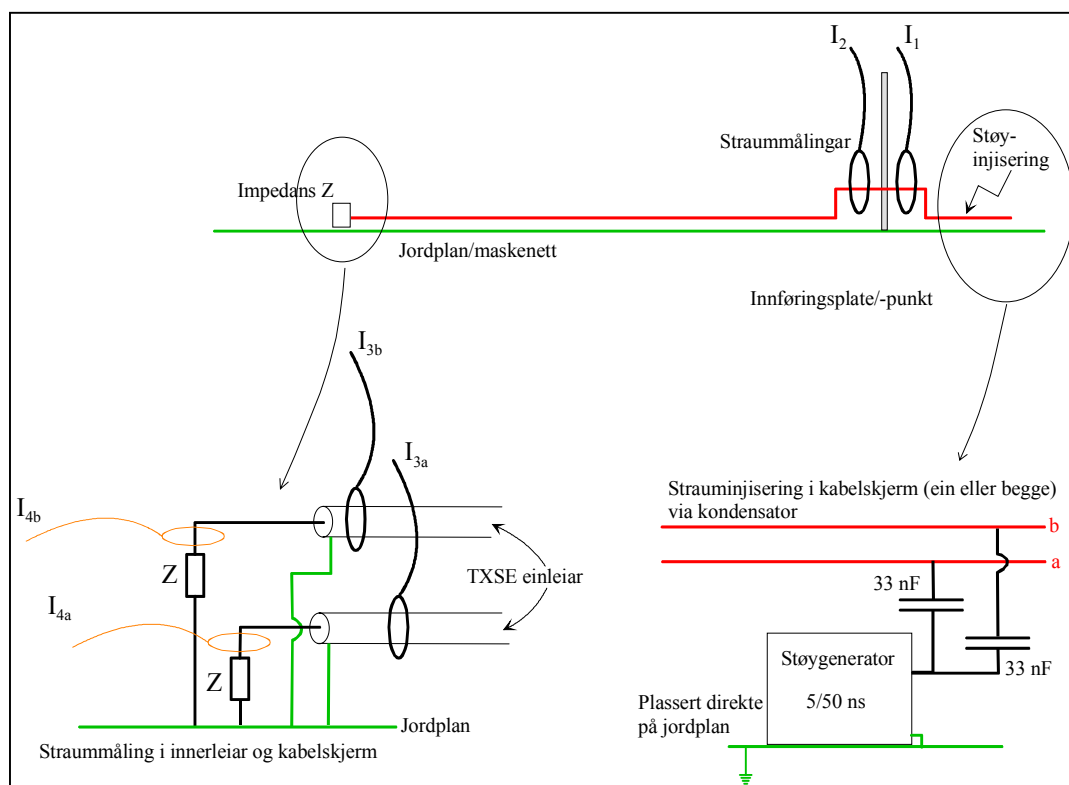
Trass i at måleoppsettet ikkje nøyaktig tilsvarar tilhøva i eit reelt anlegg, kan resultata likevel nyttast til å vurdere ulike alternativ for kabelavkopling mot jordnett opp mot kvarandre med tanke på høgfrekvente støypåkjenningar.

PFSP er ein kabel som er mykje nytta i norske kraftforsyningsanlegg. TXSE, som vart brukt i målingane, tilsvarar PFSP med tanke på oppbygging av kabelskjerm (konsentrisk leiar): Begge har skjermar bygd opp av kopartrådar med motspiral av koparband (relativt glissen skjerm). Resultata i støymålingane bør derfor kunne generaliserast til å omfatte PFSP med skjermkabel av kopartråd og andre tilsvarande kabeltypar (td IFSI). Prinsippa bør også gjelde for fleirleiar PFSP, dersom desse har kopartrådsjerm med motspiral. (På ein fleirleiar ville den støystraumen vi har målt på innerleiaren av TXSE-kabelen bli fordelt likt mellom kvar enkelt innerleiar. Dvs bli n gonger mindre for ein n-leiar kabel.) Resultata kan derimot ikkje overførast til kablar der skjermen (konsentrisk leiar) er utført som aluminiumsband. (Dette er bl a tilfelle for skjermen på ein del fleirleiar PFSP 750 V kablar.)

Viser til VEDLEGG B: for fleire detaljar om måleoppstilling, instrumentering, komponentar og kabelparametrar.



Figur 2.1 Skisse av måleoppsett .



Figur 2.2 Forenkla skisse av målepunkt og -indeksar for straummålingane som er utførte. (Målepunkt 1 vist med indeks 1 på straummålinga, målepunkt 2 med indeks 2 osv.)

Avkoplinga i Figur 2.2 er skissert med gjennomføringsplate, men vart også utført med slangeklemme og heilt utan avkopling. I tillegg vart effekten av ein parallell utjammingsleiar prøvd ut ($150 \text{ mm}^2 \text{ Cu}$). Det finst derfor mange variasjonar i måleoppsettet. I kapittel 2 blir berre ei oversikt over måleoppstilling gitt, saman med eit samandrag av resultata. Fleire detaljar om måleoppstilling og -resultat finst i VEDLEGG B:.

2.2 RESULTAT

I Tabell 2.1 er det vist eit samandrag av resultata av målingane. Tala må nødvendigvis bli noko tilnærma ved samanlikning av demping, bl a fordi det kan vera stor forskjell på dempinga i første del av pulsen kontra siste delen. For dei interesserte finst detaljerte utskrifter av måleresultat i vedlegg B.4, der slike forskjellar vil kome betre fram.

Tabell 2.1 Samandrag av måleresultat: Demping av støypuls med ulike avkoplingsteknikkar. (Eining: [Antal gonger demping relativt til referansemåling | dB demping relativt til referansemåling] = $[I_{\text{straum}}/I_{\text{straum ref}} | 20 \log(I_{\text{straum}}/I_{\text{straum ref}})]^{1)}$).

Type avkopling		Ingen		Slangeklemme		Roxtec EMC gjennomføring	
Målt på		Kabelskjerm + innerleiar	Innerleiar	Kabelskjerm + innerleiar	Innerleiar	Kabelskjerm + innerleiar	Innerleiar
Lang kabel 2)	Maskenett ³⁾	1 0	1 0	~2 6	- - ⁴⁾	~2,8 9	- - ⁴⁾
	Utan PU ⁵⁾	1 0	1 0	40-80 32-38	~5 14	85 38,6	~5 14
	Med PU ⁵⁾	- - ⁴⁾	- - ⁴⁾	- - ⁴⁾	- - ⁴⁾	0,5 -6	1 0
Kort kabel 6)	Utan PU ⁵⁾	- - ⁴⁾	- - ⁴⁾	1 0 ⁷⁾	1 0 ⁷⁾	~6 15,5 ⁷⁾	~11 21 ⁷⁾
	Med PU ⁵⁾	- - ⁴⁾	- - ⁴⁾	1 0 ⁷⁾	1 0 ⁷⁾	1 0 ⁷⁾	1 0 ⁷⁾

1) Dempinga normalt gitt som det inverse av forholdet vist her: Dvs ved reell demping, blir forholdet eit tal mindre enn 1, og dette uttrykt i eininga dB er eit negativt tal.

2) Ca 5,5 m kabel etter avkopling.

3) Ser på dempinga langs maskenettet mellom målepunkt 2 og 3, sjå Figur 2.2.

4) Har ikkje målingar tilgjengeleg for desse kombinasjonane.

5) PU tyder parallell potensialutjæmningsleiar

6) Ca 1 m kabel etter avkopling.

7) Merk: Brukar slangeklemme som referanse for desse målingane. (Manglar målingar for kort kabel utan avkopling.)

Følgjande konklusjonar kan gjerast ut frå måleresultata (For informasjon om plassering av målepunkt: Sjå Figur 2.2):

- Demping av 5 m kabel forlagt på eit maskenett er (målt som sum straum av innerleiar og kabelskjerm mellom målepunkt 2 og 3, sjå Figur 2.2)
 - tilnærma null utan avkopling (tvert i mot to gonger forsterking for første pulsflanken (6 dB)). Sjå Figur B.8.
 - mellom 1,3 til ~ 2 gonger for første del av pulsen med slangeklemme som avkopling (2,5 til 6 dB). Siste del av tidsforløpet tilnærma inga demping. Sjå Figur B.9.
 - mellom 1,2 for første del av pulsen til 2,8 gonger seinare i tidsforløpet med Roxtec EMC gjennomføring som avkopling (~1,6-9 dB). Sjå Figur B.10.
- Slangeklemme som avkopling (lang kabel) gir 40-80 gonger demping i målepunkt 3 samanlikna med tala utan avkopling (32-38 dB). Tilsvarende tal for innerleiar (målepunkt 4) er ca 5 gonger demping (~14 dB). Sjå Figur B.11 til Figur B.15.
- Roxtec EMC gjennomføring (lang kabel) gir minimum 85 gonger demping (38,6 dB) i målepunkt 3 samanlikna med tal utan avkopling. Tilsvarende tal for innerleiar med Roxtec løysing er identisk med slangeklemme alternativet, dvs ca 5 gonger demping (~14 dB).
- Med kort kabel aukar dempinga med Roxtec EMC gjennomføring i høve til slangeklemme-alternativet: Tilnærma 3-6 gonger for målepunkt 3 og om lag 11 gonger for målepunkt 4 (innerleiar).

- Potensialutjammingsleiaren (PU) var ikkje optimalt kopla til avkoplingspunktet, og gav derfor ikkje forventa forbetring i dempinga: For kort kabel blir det ikkje ekstra demping pga parallell PU. Det same gjeld for målingar på innerleiar med lang kabel (berre utført med Roxtec EMC gjennomføring). Med Roxtec løysing og lang kabel i målepunkt 3 gir dette tiltaket i staden om lag ei dobling av støypulsen samanlikna utan avkopling.

Følgjande kommentarar kan knyttast til resultata:

- Lokalt jordplan i form av maskenett gir ikkje åleine tilfredsstillande demping mot høgfrekvent støy ($f > 100$ kHz). Dvs at maskenettet må nyttast i kombinasjon med metodar for avkopling av skjermkablar mot jord.
- Dersom ein nyttar avkopling med slangeklemme eller EMC-gjennomføring, er mykje gjort med tanke på den leidningsbundne delen av krava frå myndigheitene. (Gjeldane krav stilt til kraftforsyningsanlegg i retningsliner (RSK) [2.1] er 30 dB for frekvensar opp til 1 GHz. EMP-forskriften [2.2] som er til behandling i Samferdselsdepartementet, foreslår eit krav på 30 dB for frekvensar mellom 100 kHz og 18 GHz.) Dette må også sjåast i samanheng med at norske utandørs kraftforsyningsanlegg med jordnett utført som strålenett har ei demping i området 25 til 40 dB for leidningsbundne pulsar i ns-området [2.3].
- Slangeklemme eller tilsvarende avkopling vil i dei fleste tilfelle gi ei tilstrekkeleg avkopling mot høgfrekvent leidningsbunde støy. Gjennomføringar som f eks Roxtec har likevel ein del andre eigneskapar i tillegg, som kan aktualisere slike løysingar. Td elektromagnetisk tette gjennomføringar mot strålte fenomen, eigenskapar i høve til brann osv.

2.3 VIDARE ARBEID

Resultata i vedlegg B.4 er ikkje forstått fullt ut. Ein del viktige spørsmål står enno usvarde, f eks: Kvifor blir dempinga i innerleiar lik med lange kablar for både slangeklemme og Roxtec løysing, medan Roxtec er 11 gonger betre ved korte kablar? Det er ikkje ein tilsvarende demping i målepunkt 3 med korte kablar som kan forklare denne reduksjonen.

Fordi dette er eit såpass sentralt punkt i forståinga av parametraner som påverkar støynivået i systemet, bør vi bruke måleresultata til ein vidare simuleringsaktivitet: Basert på den eksisterande labmodellen, kan ein ta utgangspunkt i ein kretsteknisk løysing som nyttar ein kombinasjon av analytisk og forenkla numerisk metodikk. Målsetjinga med denne aktiviteten er å auke forståinga for kva som påverkar støynivået og –dempinga i eit system med lokalt jordnett (maskenett). I tillegg bør ein vurdere kva for avgrensing denne metodikken ev har i høve til generalisering og overføring til andre, liknande problemstillingar.

2.4 REFERANSAR

- 2.1 Retningslinjer for sikring av kraftforsyningsanlegg (RSK). NVE. 1997.
- 2.2 Forskrift om EMP-beskyttelse av telekommunikasjonsanlegg (EMP-forskriften). Høringsutkast med følgebrev datert 1999-07-21. Høringsrunde avslutta 1999-10-29. (Ikkje tatt i bruk etter høringsrunde, ligg til behandling i Samferdselsdepartementet.)
- 2.3 Ringheim, N.A.: Demping av injiserte, høyfrekvente strømpulser i jordingsanlegget til Gimse transformatorstasjon. AN 99.13.23, SINTEF Energiforskning AS, Trondheim. 1999.

3 SIMULERINGAR

Dette kapitlet oppsummerar kort to forsøk på å modellere og simulere ein forenkla modell av laboratorieoppsettet vha to kommersielle programvarer. Målsetjinga var å samanlikne og verifisere simuleringane opp mot måleresultata. På bakgrunn av dette skulle det vurderast om programma eigna seg til å vurdere høgfrekvente støytiltak i kraftforsyningsanlegg.

3.1 INNLEIING

Valet av simuleringsprogram var noko tilfeldig: Utgangspunktet var to program som det involverte fagmiljøet hadde erfaring med frå tidlegare, tilgrensande arbeid: Concept II (brukt ved FFI) og CDEGS (nytta ved SINTEF Energiforskning).

3.2 CONCEPT II

Concept II (**C**ode for **N**umerical **C**omputation of **E**lectromagnetic **P**rocesses for **T**win Wire and **T**hin Shell Structures including dielectrics) er ei programvare for numeriske berekningar av elektromagnetiske stråling og spreiding [3.1]. Programsystemet baserar seg på momentmetoda og er utvikla ved det Tekniske Universitetet i Hamburg-Harburg. Programmet har vore nytta ved FFI i Noreg sidan 1994, som nyttar det bl a til berekning av felt kring ulike geometriar, optimering av antenneplassering, evaluering av EMC-løysingar, analyse av skjermingstiltak osv.

Relativt raskt møtte programmet problem med å modellere oppstillinga vår: Kabelskjermen kunne ikkje koplart til korkje gjennomføring (dvs slangeklemme ev Roxtec EMC gjennomføring) eller pulskjelde. (Pulskjelder kunne berre koplart til innerleiarane.) Som ei følgje av dette, kunne ikkje kabelbiblioteket og tilhøyrande funksjonar nyttast. Vi vurderte ei stund å modellere kabelen frå botnen av, men pga tidlegare dårleg erfaring med dette, vart vi i samråd med FFI (utførande part) einige om å avslutte arbeidet med programmet.

Concept II eignar seg altså mindre godt til vår konkrete måleoppsett. FFI har likevel god erfaring med programmet til å berekne eksterne felt, utstråling, innkopling på kablar frå eksterne felt osv.

3.3 CDEGS

CDEGS (**C**urrent **D**istribution, **E**lectromagnetic **F**ields, **G**rounding and **S**oil Structure Analysis) er ei programpakke som består av 8 modular, og som typisk kan nyttast ved studie av jording, elektromagnetiske felt, elektromagnetisk støy/kopling, inkludert tiltak mot støy, samt ulike problemstillingar ved katodisk beskyttelse [3.2]. Berekningsmodulane arbeider i frekvensplanet, men ein FFT-modul gjer at ein kan påtrykke og få ut resultat i tidsplanet. HIFREQ i kombinasjon med FFTSES var dei aktuelle modulane for dette prosjektet. (HIFREQ: Verktøy for analyse av straumfordeling, potensial og elektromagnetiske felt kring leiarar over og under bakken. Input er

leiarens plassering, fysiske dimensjonar og materialeigenskapar. FFTSES: Modul for konvertering mellom tids- og frekvensplan.)

Programmet modellerer leiarar som punktstraumar, og deler vidare leiarane opp i segment i lengderetninga. Lengda på desse segmenta må ikkje vera lengre enn ein viss prosentdel av minste bøljelengde som blir undersøkt. Kabelskjerm (koaksial) blir representert som ei samling av enkeltleiarar. Programmet har ei avgrensing i talet på segment til maksimalt 5000.

Maksimalt tillatne segment vart fort ei avgrensing for modelleringa av laboppsettet. Etter fleire forenklingar i samråd med programvareprodusenten, lykkast det til slutt å koma under denne grensa. Då havarerte likevel programmet grunna dei konsentrerte impedansane i kabelavsluttinga (karakteristisk impedans). Etter dette vart arbeidet stoppa.

Programpakka CDEGS er derfor mindre eigna til vurderingar av høgfrekvente støytiltak i kraft-forsyningsanlegg, fordi talet på kablar over bakken er for høgt til å koma under avgrensinga på totalt 5000 segment. Programmet er likevel aktuell for analyse av jordingsanlegg med eit avgrensa tal på kablar over og under bakken.

For meir utfyllande informasjon om CDEGS og modelleringa av laboratorieoppsettet, sjå VEDLEGG C:.

3.4 REFERANSAR

- 3.1 http://www.tet.tu-harburg.de/en_EN/en_concept.php
(FFI nyttar i dag versjon 9.1.6 for Unix arbeidsstasjonar.)
- 3.2 CDEGS product description: <http://www.sestech.com/>

4 HØGFREKVENT STØY: UTFORDRINGAR

Dette kapitlet viser først dei viktigaste aktørane og deira oppgåver ved utforming av kraftforsyningsanlegg. Deretter blir det peikt på viktige anleggsutfordringar mht høgfrekvent støy, og vidare kva for kunnskapsunderlag og informasjon som enno manglar.

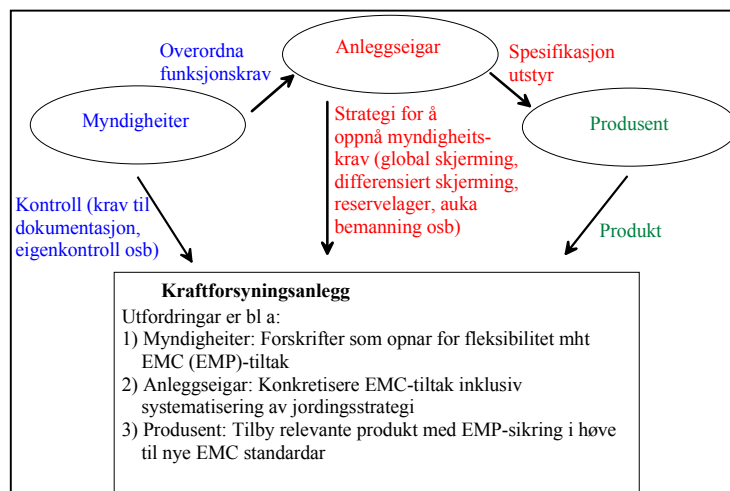
4.1 AKTØRAR VED UTFORMING AV KRAFTFORSYNINGSANLEGG

Tre aktørar er tungt involvert ved utforming av nye eller ombygging av eldre kraftforsyningsanlegg: Myndigheiter, anleggseigar og produsentar. Deira interesser er ikkje nødvendigvis samanfallande til ei kvar tid, men dei er alle tre med på å påverke utviklinga for morgondagens kraftforsyningsanlegg med tanke på høgfrekvente eigenskapar.

Gjennom forskrifter og retningslinjer stiller myndigheitene krav til anleggseigar, indirekte også til produsentane. Krava er basert på ei totalforsvars vurdering, og skal dekkje behova i fredstid, kriser og krig. Medan trusselbiletet endrar seg kontinuerleg avhengig av bl a den verdspolitiske situasjonen, teknologisk utvikling osv, ligg kraftforsyningsanlegga relativt urørde når dei først er bygde, med ei forventa levetid på fleire tiår. Utfordring: Balansere dagens og morgondagens trusselbilette opp mot samfunnsøkonomiske vurderingar.

Anleggseigar har ei eigeninteresse av å ha elektromagnetisk kompatibilitet i sitt anlegg: Daglegdase elektromagnetiske fenomen som anten er eigengenerert (td EMI frå koplingar i anlegget) eller naturlege (f eks lynnedslag), skal normalt ikkje påverke viktige funksjonar til anlegget. Samtidig har eigaren eit økonomisk motiv for å redusere kostnadene til anlegget. Utfordring: Oppnå høgast mogleg driftstid (oppetid) for sentrale funksjonar i anlegget, innanfor gitte økonomiske og praktiske rammer.

Produsentane utviklar og tilbyr nye løysingar, som over tid kan endre dramatisk på både anleggsutforming og/eller elektromagnetisk miljø. Eitt døme er dagens distribuerte kontrollanlegg kontra dei sentraliserte løysingane som var vanleg tidlegare. Eit anna er gassisolerte koplingsanlegg (høgare frekvens på eigengenerert støy), eit tredje introduksjon av optisk kommunikasjon på fiberkabel (støyimmunitet). Motivet for utviklinga er ofte ein kombinasjon av å utnytte og ta i bruk ny teknologi for å forbetre funksjonen og tilby rimelegare produkt. Alle produkt må tilfredsstille ei rekke produktstandardar, bl a innan EMC. Utfordring: Tilby nye tekniske løysingar med standardiserte grensesnitt til konkurransedyktige prisar.



Figur 4.1 Oversikt over aktørar som påverkar utforminga av kraftforsyningsanlegg.

4.2 UTFORDRINGAR

Myndigheiter og anleggseigar har felles interesse av at mest mogleg er avklart med tanke på sikringstiltak som kan nyttast. Det er derfor viktig at myndigheitene sine retningslinjer til BfKen snart kjem ut. Vidare at retningslinjene opnar for fleksibilitet mht korleis kraftforsyningsanlegg i klasse 2 og 3 skal oppfylle dei generelle funksjonskrava til EMI og EMP. Td med utgangspunkt i strategien som er nytta i EMP-handboka for kraftforsyningsanlegg.

Ein ny IEC produktstandard er komen som muleggjer EMP-sikra produkt i høve til denne standarden. Forventar at produsentar på førespurnad kan teste relevante produkt etter denne standarden. Anleggseigar har dermed etterkvart EMP-sikra utstyr som eitt av fleire alternativ ved utforming av sin EMC strategi.

Norske myndigheiter set i dag eit generelt krav til 30 dB demping opp til 1 GHz for ”drifts-sentraler, annen kontrollutrustning og sambandsinstallasjonar i klasse 2 og 3...” Dette er ein god del høgare enn frekvensane som er vist i fenomenoversikta for transformator- og koplingsanlegg i vedlegg A.2. Forskjellen er eit uttrykk for at trusselbiletet inneheld ein del støyfenomen med høgare frekvens enn dei tradisjonelle. Td radiofrekvente våpen, HEMP osv.

For å handtere høgfrekvent støy tilfredsstillande i kraftforsyningsanlegg, er ein overordna jordingsstrategi den viktigaste faktoren for å lykkast. Stikkord er soneinndeling med lokale jordnett (maskenett), felles innføringspunkt til kvar sone og systematisering av jording, skjerming og avleiing (samt filtrering ved behov) ved alle soneovergangar. Desse tiltaka vil auke immuniteten i anlegget ovanfor høgfrekvente forstyrringar.

Utforminga av anlegg med maskenett kontra tradisjonelle anlegg der jordingsanlegget er utført som strålenett, kan tilsynelatande verke stor. Det er den ikkje. Det handlar i stor grad om å systematisere og samordne tiltak og bygningstekniske detaljar som allereie blir utførte. Det treng

derfor ikkje bli spesielt kostnadskrevjande ved nyanlegg i forhold til tradisjonelle utforming. Utfordringa for anleggseigar blir å veta kva som er tilstrekkeleg i høve til krava som blir stilt. Og her kjem behovet for meir kunnskap inn: Det manglar i stor grad tal som viser kva demping dei ulike metodane gir. Det gjeld alt frå kabeleigenskapar, gode nok termineringsmetodar, raske nok overspenningsavleiarar og effekten av parallell potensialutjammingsleiar, til utføringa av det lokale jordnettet.

Med betre kunnskapar på desse områda, vil anleggseigar kunne tilpasse tiltaka til det som er godt nok. Dvs at det ligg eit potensiale i å spare kostnader her. Dempinga i norske utandørs kraft-forsyningsanlegg med strålenett som jordnett, ser ut til å ha ei demping i området 25-40 dB for støypulsar i ns-området, sjå [2.3]. Vidare viser målingane i denne rapporten at dempinga i det same frekvensområdet for kablar forlagt på maskenett og avkopla til jord ved inntakspunktet, er i området 30-40 dB for skjermstraumar. Den leidningsbundne delen av utfordringa ser derfor ut til å vera ivaretatt. Uvissa knyter seg derfor i høg grad til dei strålte fenomena og deira kopling til utstyr og leiarføringar.

Ei annan kompleks problemstilling gjeld verifikasjon av ferdige anlegg: Korleis kan dette gjerast innanfor ei fornuftig økonomisk ramme? Og kva for testar er det ev fornuftig å nytte? I dag er dette nærast heilt fråverande, utanom enkle impedanstestar og visuelle kontrollar. Bruk av simuleringar i kombinasjon med enkle målingar kan kanskje utviklast og lette arbeidet med dokumentasjon og verifikasjon. Ikkje minst for myndigheitene som skal kontrollere anlegga burde dette vera ei svært interessant problemstilling. Før det kan gis fornuftige svar på spørsmåla ovanfor, krevst det meir kunnskap og undersøkingar, og dette illustrerer behovet for vidare FoU-innsats på området.

VEDLEGG A: LITTERATUROVERSIKT

VEDLEGG A: LITTERATUROVERSIKT

A.1 IEC

Omfang/arbeidsområde for IEC SC 77C (sitat frå deira heimeside):

”Standardization in the field of electromagnetic compatibility to protect civilian equipment, systems and installations from threats by man-made high power transient phenomena including the electromagnetic fields produced by nuclear detonations at high altitude.

Note: High power conditions are achieved when the peak incident electromagnetic field exceeds 100 V/m.”

Tabell A.1 viser IEC-dokumenta som SC 77C har utarbeida eller overteke vedlikehaldet for.

Tabell A.1: Oversikt over IEC SC 77C sine publikasjonar med relevans for høgfrekvente problemstillingar. *Kursiv* tyder: Publikasjon var ferdig etter at EMP-handboka var avslutta, men er referert til i handboka som eit arbeidsdokument.

IEC publikasjon	Tittel
61000-1-3	<i>Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 1: General – Section 3: The effects of high-altitude EMP (HEMP) on civil equipment and systems</i>
61000-2-9	Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 2: Environment - Section 9: Description of HEMP environment - Radiated disturbance. Basic EMC publication
61000-2-10	Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 2: Environment - Section 10: Description of HEMP environment - Conducted disturbance
61000-2-11	<i>Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 2: Environment - Section 11: Classification of HEMP environments</i>
61000-4-23	<i>Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4: Testing and measurement techniques - Section 23 Test methods for protective devices for HEMP and other radiated disturbances</i>
61000-4-24	Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4: Testing and measurement techniques - Section 24: Test methods for protective devices for HEMP conducted disturbance - Basic EMC Publication
61000-4-25	<i>Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4: Testing and measurement techniques - Section 25: HEMP immunity test methods for equipment and systems</i>
61000-4-32	<i>Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4: Testing and measurement techniques - Section 32: High-altitude electromagnetic pulse (HEMP) simulator compendium</i>
61000-5-1 ¹⁾	Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 5: Installation and mitigation guidelines - Section 1: General considerations - Basic EMC publication
61000-5-2 ¹⁾	Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 5: Installation and mitigation guidelines - Section 2: Earthing and cabling
61000-5-3	Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 5: Installation and mitigation guidelines - Section 3: HEMP protection concepts
61000-5-4	Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 5: Installation and mitigation guidelines - Section 4: Immunity to HEMP - Specifications for protective devices against HEMP radiated disturbance. Basic EMC Publication
61000-5-5	Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 5: Installation and mitigation guidelines - Section 5: Specification of protective devices for HEMP conducted disturbance. Basic EMC Publication
61000-5-6	<i>Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 5: Installation and mitigation guidelines - Section 6: Mitigation of external EM influences</i>
61000-5-7	<i>Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 5: Installation and mitigation guidelines - Section 7: Degrees of protection provided by enclosures against electromagnetic disturbances (EM code)</i>
61000-6-6	<i>Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 6: Generic standards - Section 6: HEMP immunity for indoor equipment</i>
61000-1-5 ²⁾	Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 1 General - Section 5: High power electromagnetic (HPEM) effects on civil systems
61000-2-13 ²⁾	Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 2: Environment - Section 13: High-power electromagnetic (HPEM) environments - Radiated and conducted
61000-4-33 ²⁾	Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4: Testing and measurement techniques - Section 33: Measurement methods for high power transient parameters

1) IEC SC 77B utarbeidde dokumenta , medan SC 77C no har ansvaret for vedlikehaldet av desse dokumenta,

2) Dokument under arbeid, ikkje referert til i EMP-handboka

Omfang/arbeidsområde til IEC SC 77B er vist nedanfor. 77B utarbeider standardar for testing av apparat og utstyr mot ei rekke høgfrekvente fenomen (emisjon og immunitet). I tillegg har

komiteen forfatta bl a den tekniske rapporten IEC 61000-5-2 (Installation and mitigation guidelines - Earthing and cabling), som er ei svært god lærebok som kan anbefalast alle med interesse for fagfeltet.

Omfang/arbeidsområde for 77B (sitat frå deira heimeside):

Standardization in the field of electromagnetic compatibility with regard to high frequency continuous and transient phenomena (ca > 9 kHz, see Note).

Note: This limit frequency can be adapted toward a lower or higher frequency according to the phenomena or equipment.

A.2 CIGRÉ

Dei to neste tabellane er henta frå ein CIGRE SC 36 artikkel i 2002 [A1], og viser bl a dominerande frekvensar for strålte og leidningsbundne fenomen i transformator og koplingsanlegg.

Tabell A.2 Oppsummering over EMI fenomen målt i luftisolerte transformatorstasjonar og koplingsanlegg. [A1]. Raud ramme kring verdiane som er mest interessante.

Table I – Air-Insulated Substation EMI (Peak) Data⁽ⁱ⁾

Reference and Comments	Data type ⁽ⁱⁱ⁾	Transient fields				Dominant frequencies		Rep. Rate	U and I in VT or CT secondary circuits						U and I in other secondary circuits			
		Magnetic field H		Electric field E					Poor to no EMI shield		CCVT shielded		Inductive CT or VT shielded		Poor to no EMI shield	Shielded	Good shield	Shield current
		At 0 m	At 10 m	At 0 m	At 10 m	H or E	I or U		Ucm	Ucm	I wire	Ucm	I wire	I shield	Ucm	Ucm	Ucm	I shield
		A/m	A/m	kV/m	kV/m	MHz	MHz		kHz	kV	kV	A	kV	A	A	kV	kV	kV
Eriksson [8]	X, 1						0.2 - 5						0.1 - 1.5					
Wiggins [1]	A, 1	26 / 36	/ 5.1	7 / 9.3	/ 1.8	2 - 3	1 - 5	0.1-40				/ 0.9	/ 0.25	/ 0.6			4.4 / 32	
Pretorius [7]	A, 2			/ 6.6		/ 1.8												
Wong [15]	A, 2						0.2 - 1		1-4						1-24	0.1-0.5		
Naumov [3]	B, 2											/ 0.32						
Wiggins [1]	B, 1	50 / 60	/ 15	5.5 / 7	/ 1.7	1 - 2		> 0.1	/ 3		/ 1.5		/ 0.6				3.6 / 40	
Gavazza [14]	B, 3								1.5-3.7	0.4		0.85		90	1			
Pretorius [7]	C, 2			/ 6 break		/ 3.3												
Pretorius [7]	C, 2			/ 2.4 disc		/ 1.2										0.008	/ 7	
Pretorius [7]	C, 2						/ 4.4										/ 6	
Stewart [10]	C, 2	/ 3		/ 0.9		0.5 - 26	0.04 - 2	0.3-2				0.2	3.6	1				
Stewart [10]	C, 2	/ 2		/ 1.3		0.6 - 18	0.002 - 1	0.3-2				0.07	0.7					
Stewart [10]	C, 2						0.005 - 5		3.5				5	4.2				
vDeursen [12]	D, 4													40				
Naumov [3]	D, 2								/ 3.5			0.13 / 1						
Pretorius [7]	D, 2	/ 16		/ 7.6		/ 3												
Pretorius [7]	D, 2						/ 6.8										/ 15	
Stewart [10]	D, 2	/ 66		/ 20		0.4 - 30	0.5 - 11	0.3-2	9.5 ⁽ⁱⁱⁱ⁾				12	40				
Feser [4]	D, 2			5		0.1												
Wiggins [1]	E, 1	113 / 151	/ 27	14 / 16	/ 6.6	0.5	0.2 - 20	> 0.1	/ 3.9	/ 2.4	/ 0.8		/ 10				/ 40	
Wong [15]	E, 2						0.2 - 1.6								1-15	0.1-1.2		

Notes for Tables I and II:

- (i) Four choices for peak values in the table: x = one value reported; x/y = typical max. value/highest max. value; /y = highest max. value; or x-y = range of values.
- (ii) Substation voltages: A = 110 to 150 kV, B = 220 to 230 kV, C = 275 kV, D = 380 to 420 kV, E = 500 kV, F = 765 kV, X = 40 to 400 kV.
Weight of measurements: from 1 (large measurement campaign and/or detailed reporting) to 4 (few data available).
- (iii) Measured in the marshalling kiosk.

Tabell A.3 Oppsummering over EMI fenomen målt i gassisolerte transformatorstasjoner og koplingsanlegg. [A1]. Raud ramme kring verdiane som er mest interessante.

Reference and Comments	Data type ⁽ⁱⁱ⁾	Transient fields				Dominant frequencies		Rep. rate	U and I in VT or CT secondary circuits						U and I in other secondary circuits			
		Magnetic field H		Electric field E					Poor to no EMI shield	CCVT shielded		Inductive CT or VT shielded		Poor to no EMI shield	Shielded	Good shield	Shield current	
		At 0 m	At 10 m	At 0 m	At 10 m	H or E	I or U		U _{cm}	U _{cm}	I wire	U _{cm}	I wire	I shield	U _{cm}	U _{cm}	U _{cm}	I shield
		A/m	A/m	kV/m	kV/m	MHz	MHz		kV	kV	A	KV	A	A	kV	KV	kV	A
Eriksson [8]	X, 1					0.1 - 5.5						0.2 - 2.6						
Blaum [2]	A, 3			0.2 / 0.6		40 - 70	14 - 50					0.4						
Harvey [6]	A, 3			0.3 - 0.6		20 - 25												
Feser [4]	A, 2			/ 2		/ 70	6 - 20					/ 0.8	/ 0.5	/ 0.5				
Bauer [5]	A, 4						/ 140					1.5 / 2						
Tabara [9]	A, 3	/ 13		1.3 / 2	< 0.1	/ 100	/ 100					0.1		8 to 20		0.2		
Hoeffelman [11]	A, 3	15 / 25	0.5 / 1.2	/ 1.5	/ 0.3	0.3 - 50	0.3 - 50					0.4		/ 12	/ 2	0.02		
Wiggins [1]	B, 1	/ 57		/ 3.6		40 - 115	1 - 20						/ 7.4		/ 2.9	/ 8.1		
Wong [15]	B, 2						1 - 4							0.2-4	0.1-0.2			
Blaum [2]	D, 3						11 - 26					0.4 / 0.65						
vDeursen [13]	D, 4											0.06		6				
Stewart [10]	D, 2		/ 3		/ 0.3	0.4 - 8	0.02 - 25	0.8-3				0.15	0.5	0.7				
Stewart [10]	D, 2		/ 10		/ 2.5	0.4 - 20	2.5 - 23	0.8-3	6				25	8.5				
Feser [4]	D, 2			/ 10		/ 20												
Wiggins [1]	E, 1	/ 79		/ 5		10 - 20	6 - 10			/ 1.6	/ 12	/ 0.8	/ 4.5		/ 2			
Feser [4]	F, 2			/ 30		/ 10												

Comments for Tables I and II (comment numbers are the same as bibliography numbers):

[1] EMI levels from breakers were lower than those from disconnectors but could involve higher frequencies. Field levels in the tables were at ground level; E field increased by a factor of 2 at 1 m height. Highest shield currents were from a 26 m test cable under the bus.

[4] High E field measurements were made very close to the GIS enclosure (10 cm) or near SF6-air bushings. Installation of a metallic mesh connected to the GIS enclosure reduced E field values in Table II by a factor of 10.

[6] Measurements made close to air-insulated buses terminating at the SF6 section; E field dropped off at a rate of 3/2 power with distance.

[7] Field levels measured between 1 and 2 m above ground. Isolator closing operations produced higher field levels than opening operations, but currents were ~20% higher with opening. Breaker operations caused fields larger in magnitude (up to a factor of 4) than isolator operations.

[9] Currents in CT secondary circuits were higher in amplitude and frequency than those in VT secondary circuits. Sheath currents were global CM currents. E field decreased by a factor of 5 within the first meter from the source and more slowly afterwards.

[10] Highest field levels and frequencies were from breaker closing operations.

[11] Other circuit: 50 m of telecom cable under the bus, shielded with a double copper braid ($Z_0 = 0.1 \text{ m}\Omega/\text{m}$ at 300 kHz) earthed at both ends.

[12] Global CM currents through cables (with well mounted cable feedthrough in the walls) measured outside of field cubicle; measured values inside were 200 times smaller.

[13] CM currents measured outside of cubicle, and voltages inside of cubicle.

[14] Parallel ground conductors could reduce noise on unshielded cable by ~50 to 60%. Noise from capacitive/inductive coupling inside CT/VT is less than field and common impedance coupling.

[15] Induced voltages from in-service cables laid in cable trench were lower than those from unloaded test cables laid on top of cable trench or gravel.

A.3 REFERANSAR

- A.1 Imposimato, C. et al: EMI characterization of HVAC substations – updated data and influence on immunity assessment. CIGRE Session 2002, 36-108.

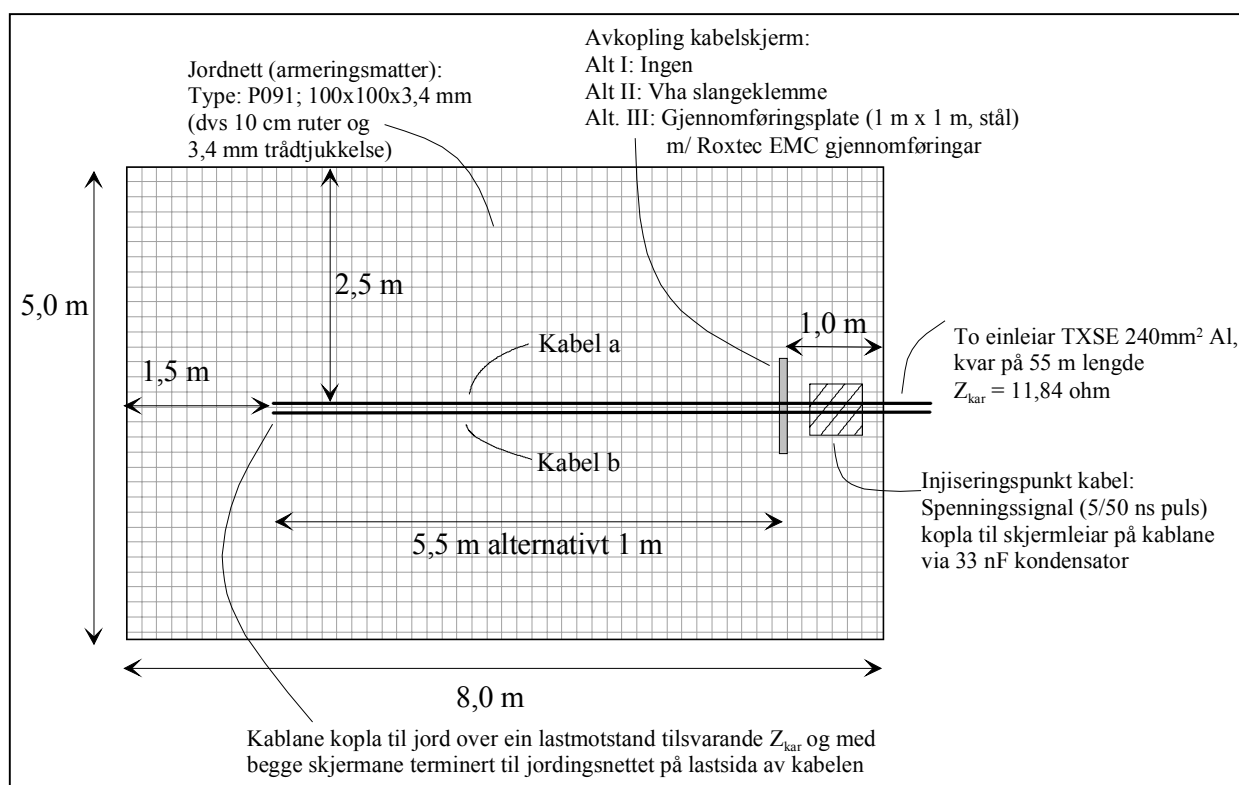
VEDLEGG B: MÅLINGAR

VEDLEGG B: MÅLINGAR

Målingane er utførde på to parallelle, einleiar kablar som er lagt direkte oppå eit jordplan (maskenett). Sjølve oppsettet injiserar høgfrekvente støypulsar inn på kabelskjermene, og måler resulterande straum langs kablane (på innerleiar eller som summen av innerleiar og kabelskjerm). Målsetjinga med måleoppsettet er å talfeste verknaden av ulike typar høgfrekvente støyttiltak for kabelinnføring i eit anlegg med jordplan (maskenett), der det blir nytta ein kabeltype som har ein ytre skjerm med relativt tradisjonelle skjermingseigneskapar.

B.1 MÅLEOPPSTILLING

Figur B.1 viser ei oversiktsteikning av oppstillinga som er nytta i målingane, medan Figur B.2 viser bilete av det same.

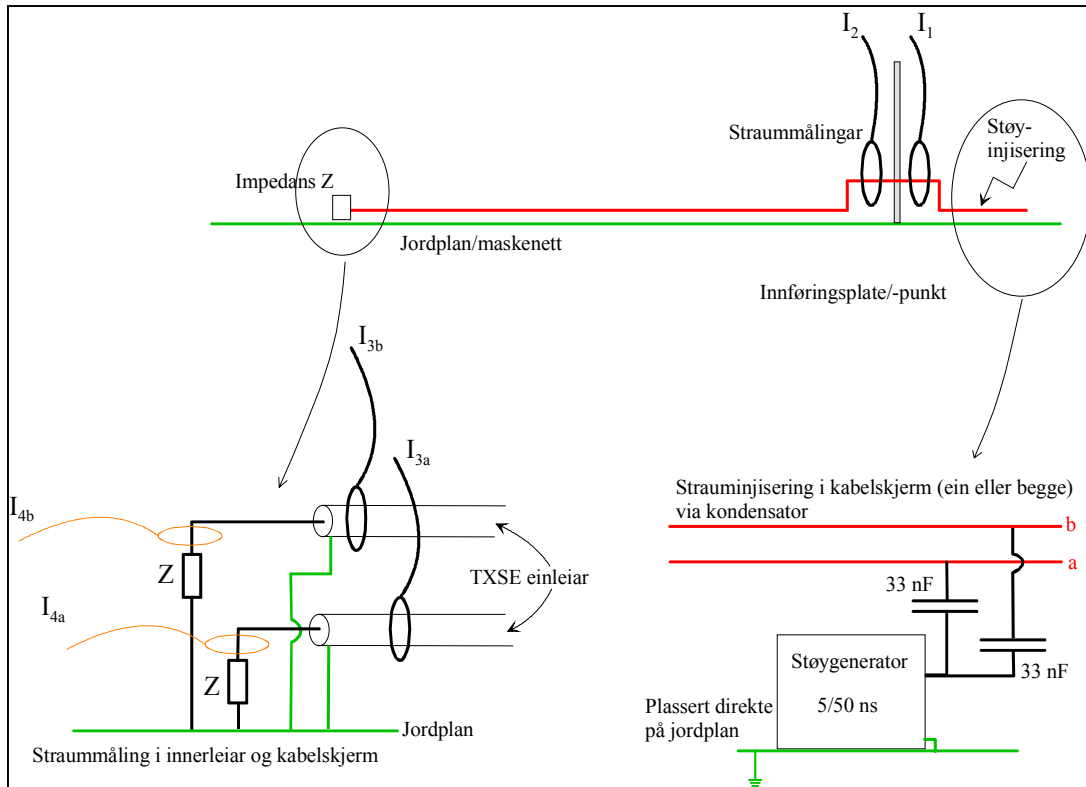


Figur B.1 Oversiktsteikning av måleoppstillinga som vart nytta i laboratoriet.



Figur B.2 Oversiktsbilde av måleoppsett. Avkopling utført med gjennomføringsplate.

Indekserer strømmålingane med 1, 2, 3 og 4 avhengig kor målingane er gjort langs kabelen, sjå Figur B.3. Kallar vidare dei to kablane for høvesvis a og b. I_{3b} er derfor straum i kabel b ved målepunkt 3, I_{2a} straum i kabel a ved målepunkt 2 osv. Dersom det ikkje blir nytta avkopling, er målepunkt I_1 og I_2 i praksis den same staden.



Figur B.3 Forenkla skisse av målepunkt og –indeksar for straummålingane som er utførte. (Målepunkt 1 vist med indeks 1 på straummålinga, målepunkt 2 med indeks 2 osv.) Avkopling er her skissert med gjennomføringsplate, men vart også utført med slange-klemme og heilt utan avkopling.

Støysignalet frå generatoren blir kopla til ytterskjermen på kablane via ein kondensator i ein filterboks. (Dette for å lette tilkoplinga mellom støygenerator og kabel.) Når begge kablane er tilkopla, blir det ei impedansdeling av støysignalet som vist i Figur B.3. Dersom ein kabel er tilkopla generatoren, blir derfor amplituden på støypulsen ut frå filteret ca dobbelt så stor som når to kablar er tilkopla.

Den elektriske kretsen for støysignalet går frå generatoren, gjennom ytterskjermen på kablane, deretter til jordplanet og tilbake til generatoren. Nærleik til jordplanet vil gi kapasitiv avkopling langsetter kabelen mot maskenettet. Vi måler summen av straumen i kabelskjerm og innerleiar i målepunkta 1, 2 og 3, samt innerleiar i målepunkt 4, sjå Figur B.3.

Når ikkje anna er nemnd, er følgjande felles for alle målingane som det er vist til i denne rapporten:

- All støyinjiserings blir gjort tilsvarende Figur B.3 enten i kabel a, b eller begge med ei spenningsamplitude på 2 kV inn mot kondensatoren
- Kablane ligg nærast mogleg kvarandre og nærast mogleg jordplanet. Unntak: Kabel kring gjennomføringsplate blir løfta litt opp frå jordplanet ved gjennomføringspunktet.
- Kvar kraftkabel er terminert i lastenden med sin karakteristiske impedans mellom innerleiar og skjerm (for å unngå refleksjonar av den påtrykte støypulsen)
- I tillegg er begge kabelskjermene terminert til jordplanet i lastenden vha ei jordingsklemme som omsluttar kabelskjermen samt ein tråd i jordingsnettet

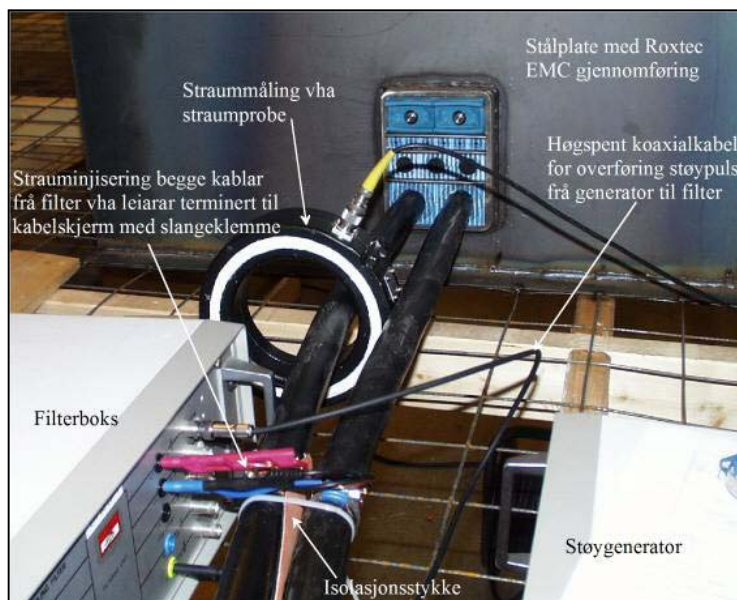
- Andre enden av kablane ligg open i ein kabelkveil på om lag 50 m: Kabellengda (kveilen) sørgjer for at refleksjonen frå desse kabelendane blir så forseinka at dei ikkje forstyrrar målingane
- Ved avkoplingspunktet vart følgjande variasjonar prøvd:
 - I Inga avkopling
 - II Avkopling vha slangeklemme til jordnett
 - III Avkopling vha Roxtec EMC gjennomføring montert i 1000mm x 1000mm x 3 mm varmvalsa stålplate (kvalitet St 37-2)

To ulike lengder på kablane vart nytta på jordnettet under målingane: I eine tilfellet var det om lag 5,5 m kabel mellom avkoplingspunktet og lastenden. I alternativ to var lengda redusert til ca 1 m. Dette skal illustrera problemstillingar knytt til alternativt kabelinnføring i rom (5,5 m kabel) eventuelt innføring i skap (1 m).

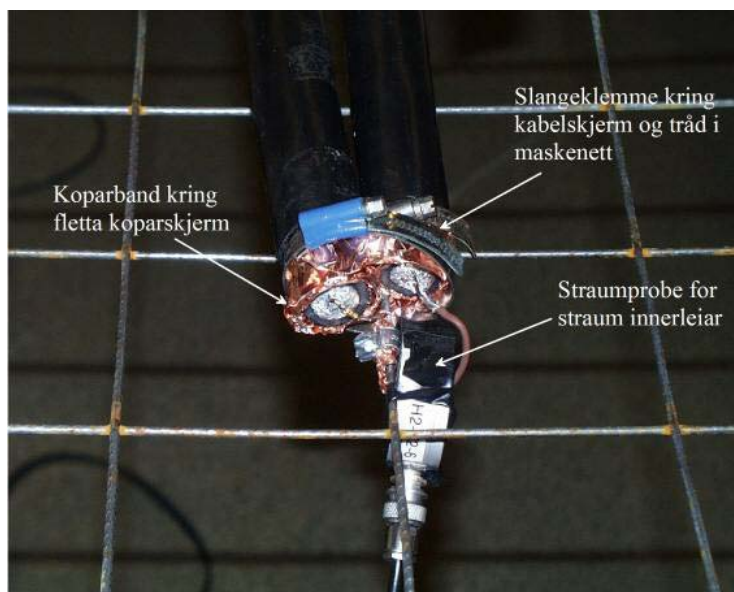
I tillegg vart det ved enkelte målingar lagt ein parallell potensialutjammingsleiar (150 mm² Cu) inntil leiarane frå avkoplingspunktet fram til enden av kablane (lasten). Denne potensialutjammingsleiaren var ikkje optimalt kopla til avkoplingspunktet, men alltid festa med slangeklemme til jordnettet i begge endane. Ideelt skulle den f eks ved bruk av Roxtec EMC gjennomføring vore sveist eller godt elektrisk kopla til stålplata.

Nedanfor følgjer ein del bilete av løysingane skildra ovanfor.

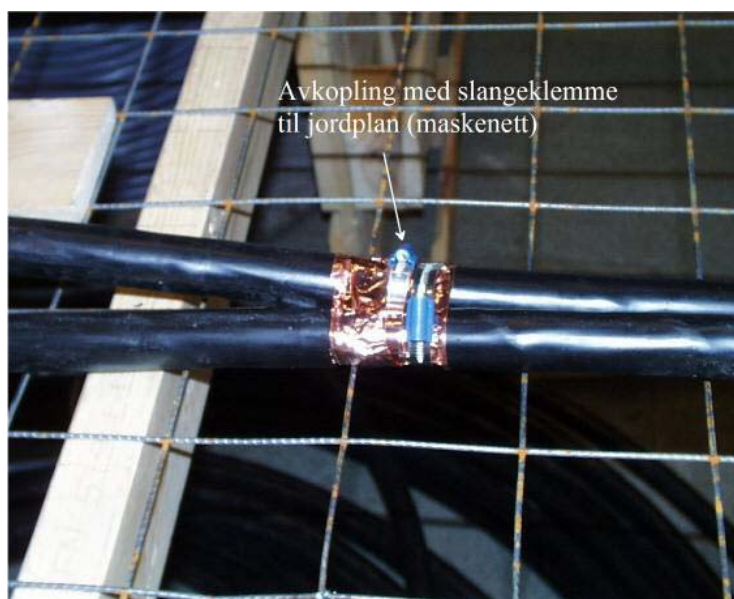
Figur B.4 Utføring av tilkopling støysignal, straummåling og avkopling vha Roxtec EMC gjennomføringer. Kabelisolasjonen er avisolert ved injeksjonspunktet for støypulsen, og Cu-band (tape) er lagt over koparflettinga i kabelskjermen. Nyttar slangeklemme for å kople leiarane med støypulsen til kabelskjermen. (Støypulsen på 2 kV går inn på filteret og fordeler seg anten på ein eller to kondensatorar i parallell, avhengig av om det blir injisert på ein eller to kablar. Dvs at amplituden på utgangspulsen frå filteret er ca dobbelt så stort ved injisering på ein kabel som på to kablar.)



Figur B.5 Detaljar frå lastenden av kablane. Ytterskjermen er terminert til jordplanet (maskenettet) vha slangeklemmer. Innerleiaren er avslutta med ein motstand (karakteristisk impedans) mot jord, via ein tynn leiar der straummålinga blir gjort.



Figur B.6 Bilete av avkopling vha slangeklemme. Kabelisolasjonen er fjerna og det er lagt eit Cu-band (tape) kring kopartrådane i kabelskjermen. Utanpå dette koplar to slangeklemmer skjermene til ein tråd i jordnettet.



Figur B.6 viser korleis slangeklemme vart nytta til avkopling av kablane i målingane. Vha av koparbandet aukar kontakta mellom kabelskjermen og slangeklemma. I eit kraftforsyningsanlegg blir slangeklemma brukt utan koparband. Måleresultata med slangeklemme i denne rapporten kan derfor ha kome noko betre ut enn tilfellet ville vore i eit reelt anlegg. Dvs at samanlikningane som er gjort med Roxtec EMC-gjennomføring sannsynlegvis favoriserer alternativet med slangeklemme.

B.2 INSTRUMENTERING OG KOMPONENTAR

B.2.1 Instrumentering

Tabell B.1 Oversikt instrumentering i målingane.

Type instrument	Produsent	Modell	Kommentar
Straumprobe	Rohde&Schwarz	ESV-Z1	$Z_T = 10$; $f_{\text{måleområde}} = 20\text{-}300\text{ MHz}$; $I_{\text{maks}} = 50\text{ A}$ (nytta på målingar av straum innerleiar)
Straumprobe	Tegam	94606-1	$Z_T=5$; $f_{\text{måleområde}}=10\text{ kHz-}100\text{ MHz}$; $I_{\text{maks}}=100\text{ A}$ (nytta på målingar av straum kabelskjerm)
Oscilloskop	Tektronix	TDS-540	Digitalt, 4 kanalar; $f_{\text{måleområde}} = \text{DC-}500\text{ MHz}$
Dempefilter	Rohde&Schwarz	ESH2 Z11	20 dB, 50 Ω , 0-1 GHz, 10 W
Støygenerator (burst)	Haefely	PEFT.1, PHV41.1	5/50 ns generator for $U=0,125\text{-}4\text{ kV v/ } 50\text{ }\Omega$ last
Koplingsfilter støygenerator	Haefely	FP 16/3-1	0-415V/10A; $f = 100\text{ kHz-}300\text{ MHz}$

B.2.2 Kabeltype

To stk 12 kV TXSE 240 mm² Al, kvar på ca 55 m lengde.

Det store kvadratet på kabelen er valt fordi dette var ein dimensjonen vi hadde tilgjengeleg for prosjektet. Kabeltypen har ein kabelskjerm (konsentrisk leiar) av kopartrådar med motspiral av koparband. Med omsyn til skjermoppbygging, svarar dette bl a til PFSP, som er ein kabeltype som er mykje nytta i kraftforsyningsanlegg. Tekniske opplysningar om TXSE 240 mm² Al:

Tabell B.2 Dimensjonar for TXSE-kabelen som er brukt.

Tverrsnitt [mm ²]	Leiardiam. [mm]	Isolasjonstjukkileik [mm]	Diam. over isolasjon [mm]	Tverrsnitt Cu- skjerm [mm ²]	Tjukkileik ytre kappe ca [mm]	Ytre tjukkileik ca [mm]
1x240	18,2	3,4	26,3	35	2,0	34

B.2.3 Støytiltak

Slangeklemmer (tradisjonell slangeklemme lagt rundt kabelskjerm og ein tråd i jordnett).

Type: ABA galvanisert stål 9 eller 12 mm brei

EMC gjennomføring

Roxtec S frame 4x1 sveist inn i ei stålplate på 1000x1000x3 mm, kvalitet St 37-2. Følgjande

Roxtec modular vart nytta:

- 2 stk Roxtec RM 60 ES (Brukt for kabelgjennomføring av TXSE 240 mm²)
- 3 stk Roxtec RM 40 ES (Ingen kabelgjennomføring i desse)
- 6 stk Roxtec RM 20 ES (Ingen kabelgjennomføring i desse)

Roxtec wedge cover ES vart ikkje nytta i vår oppstilling, sjå Figur B.7 nedanfor. Wedge cover ES skulle eigentleg vore nytta til å dekkje ekspansjonsdelen (øvtst) i Figur B.7



Figur B.7 Roxtec EMC gjennomføring vart nytta i avkoplingspunktet for kablane i ein del av målingane.

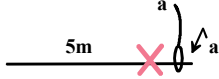
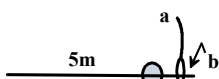

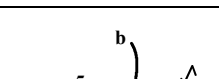
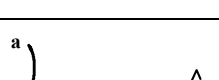
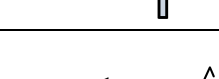
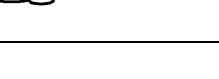
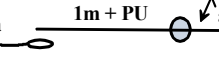
B.3 DEFINISJON AV FIGURTEKSTAR

Det er nytta ein kombinasjon av tekst og illustrasjon for synleggjere tilhøva som dei ulike målingane er tekne under. Nedanfor følgjer ei forklaring av indekseringa som er nytta.

Tabell B.3 Variasjonar i måleoppsett og tilhøyrande indeksering av kurvenamn i måleresultata.

Hovud-variasjonar i måleoppsett	Injisering kabel			Avkopling			Målepunkt								Lengde kabel etter avkopling [m]	
							1		2		3		4			
Kombinasjonar	a	b	a & b	Ingen	Slange-klemme	Roxtec	a	b	a	b	a	b	a	b	5,5	1
Figur-indeksering	inj(a)	inj(b)	inj(ab)	0	SK	RT	I(1a)	I(1b)	I(2a)	I(2b)	I(3a)	I(3b)	I(4a)	I(4b)	5m	1m

Tabell B.4 Eksempel på kombinasjonar i måleoppsettet og tilhøyrande indeksering og illustrasjon for kurveresultat.

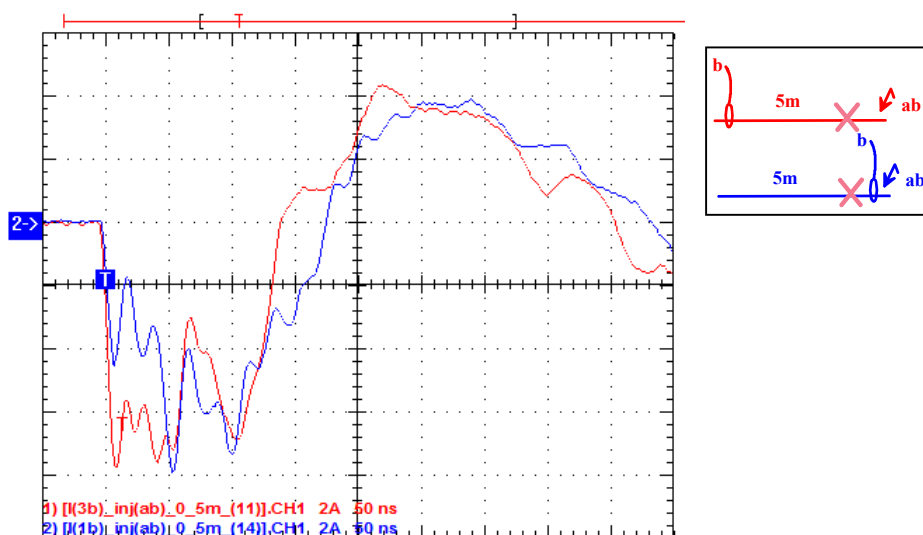
Indeksar	Illustrasjon	Forklaring
I(1a)_inj(a)_0_5m_		Målepunkt 1, kabel a Støyinjisering kabel a Ingen avkopling 5,5 m kabellengde etter avkopling
I(1a)_inj(b)_SK_5m_		Målepunkt 1, kabel a Støyinjisering kabel b Avkopling vha slangeklemme 5,5 m kabellengde etter avkopling
I(1a)_inj(ab)_RT_1m		Målepunkt 1, kabel a Støyinjisering kabel a og b Avkopling vha Roxtec EMC-gjennomføring 1 m kabellengde etter avkopling
I(2b)_inj(a)_SK_5m		Målepunkt 2, kabel b Støyinjisering kabel a Avkopling vha slangeklemme 5,5 m kabellengde etter avkopling
I(3a)_inj(b)_RT_5m		Målepunkt 3, kabel a Støyinjisering kabel b Avkopling vha Roxtec EMC-gjennomføring 5,5 m kabellengde etter avkopling
I(4a)_inj(ab)_SK_1m		Målepunkt 4, kabel a Støyinjisering kabel a og b Avkopling vha slangeklemme 1 m kabellengde etter avkopling
I(4a)_inj(ab)_SK_1m_PU		Målepunkt 4, kabel a Støyinjisering kabel a og b Avkopling vha slangeklemme 1 m kabellengde etter avkopling Parallell potensial utjammingsleiar (PU): 150 mm ² Cu
I(3pu)_inj(ab)_RT_1m_PU		Målepunkt 3, målt på potensialutjammingsleiar (PU) Støyinjisering kabel a og b Avkopling vha Roxtec EMC gjennomføring 1 m kabellengde Parallell potensialutjammingsleiar (PU) : 150 mm ² Cu

B.4 RESULTAT

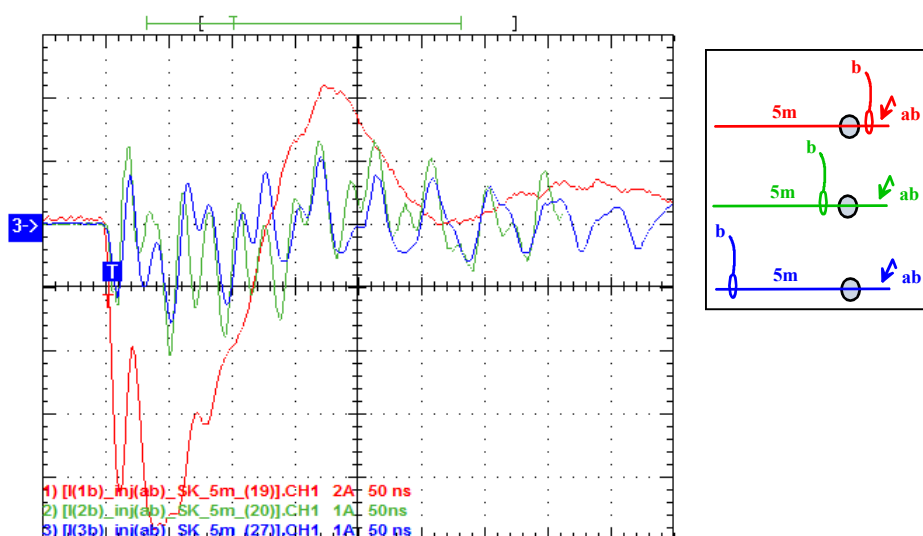
Figurane nedanfor viser kurver for målepunkta skissert i Figur B.3: Y-aksen viser amplituden på støystraumen, medan x-aksen viser tida. Skalaen for y- og x-aksen kan lesast av på teksten nedst i venstre hjørnet: Dei to siste opplysningane på kvar line gir høvesvis ampere pr rute og tidseining pr rute. Merk at ulike kurver i same figur kan ha forskjellig oppløysing i amplituda (y-aksen). Kurver i same figur er sett saman frå ulike målingar, og kurvene er ikkje referert til same triggetidspunkt. Det tyder at ev forseinkingar mellom dei ulike signala som følgje av gangtida i kabelen ikkje går fram av figurane.

B.4.1 Demping langsetter maskenettet

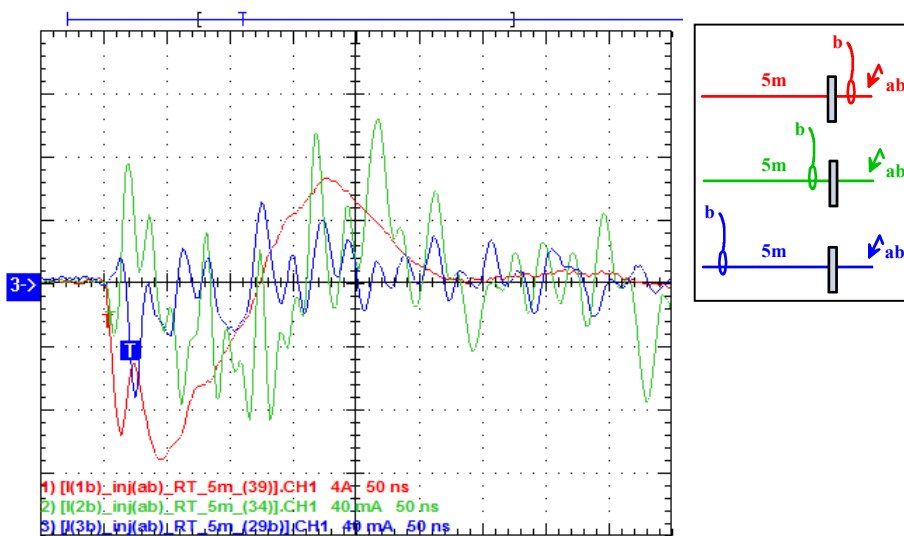
Bileta nedanfor samanliknar dempinga ein oppnår langs maskenettet målt på ulike stader for ein 5,5 m lang leiår:



Figur B.8 Sum straum i skjermkabel og innerleiar målt langs eine kabelen utan avkopling.



Figur B.9 Sum straum i skjerm- og innerleiar målt langs eine kabelen med slangeklemme som avkopling.

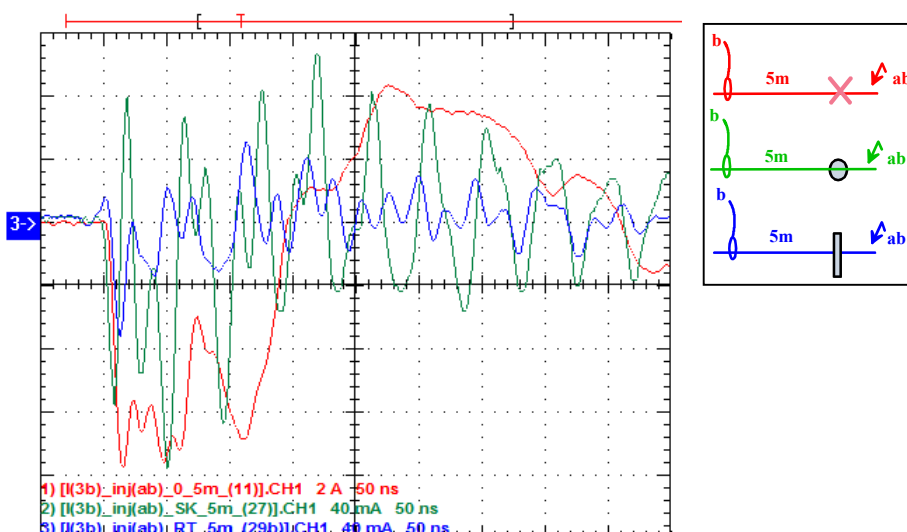


Figur B.10 Sum straum skjermkabel og innerleiar målt langs eine kabelen med Roxtec EMC-gjennomføring som avkopling

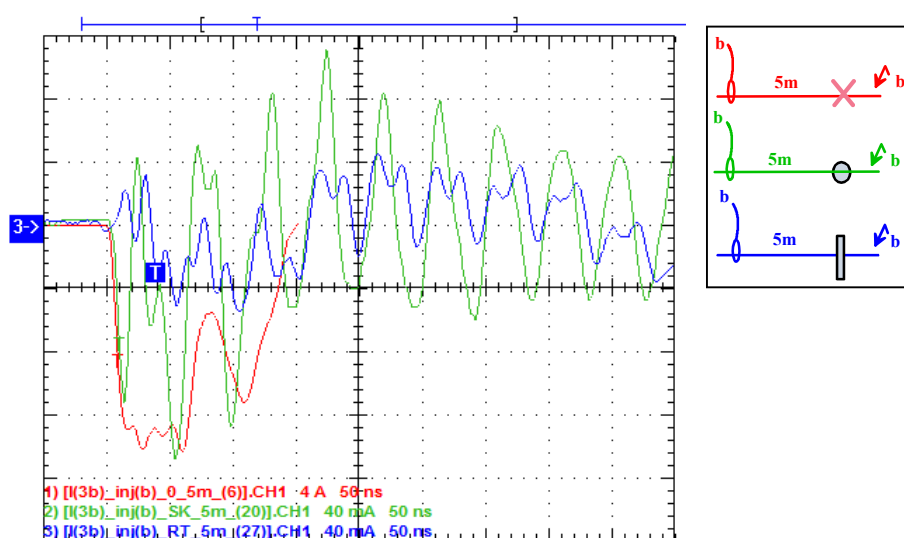
Resultata viser at det ikkje er målbar demping frå maskenettet utan avkopling (Figur B.8). Med slangeklemme som avkopling, er det ei viss demping til stades, spesielt i første delen av tidsintervallet ($\leq 5-6$ dB, dvs ~ 2 gonger demping av pulsen mellom målepunkt 2 og målepunkt 3, sjå Figur B.9). Med Roxtec EMC-gjennomføring, blir dempinga langs kabelen litt større: Opp til ca 7 til 9 dB (2,3 til 2,8 gonger) mellom målepunkt 2 og 3, sjå Figur B.10. Refleksjonar ved avkoplinga aukar frekvensen på svingingane i pulsen frå typisk 4 MHz før avkoplinga til 10-20 MHz etter.

B.4.2 Summen av straumen i kabelskjerm og innerleiar: Demping med ulike avkoplingar

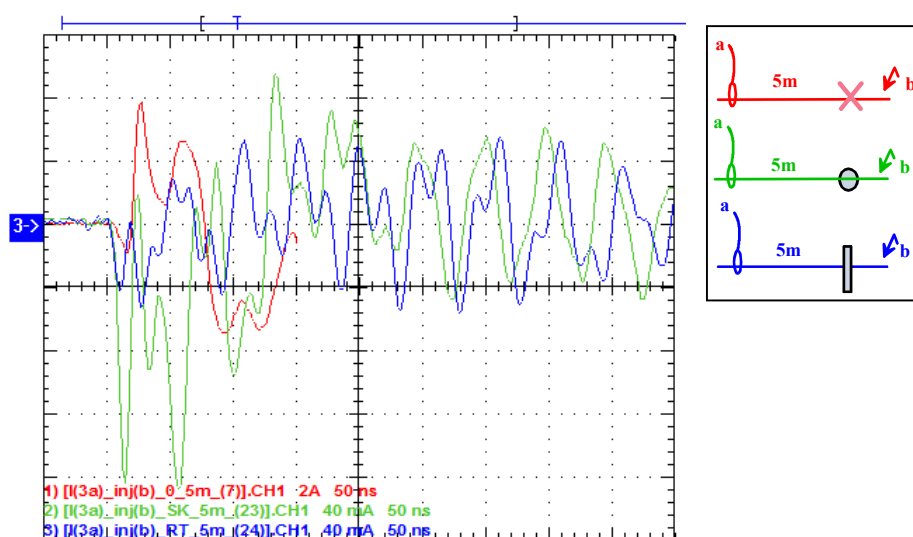
Bileta nedanfor samanliknar dempinga for ulike avkoplingsteknikkar for summen av straumen i kabelskjerm og innerleiar i kabelen. Alle målingane er gjort i målepunkt 3.



Figur B.11 Sum straum av skjerm- og innerleiar i målepunkt 3 på ein kabel med ulik type avkopling. Injisering på begge kablane.



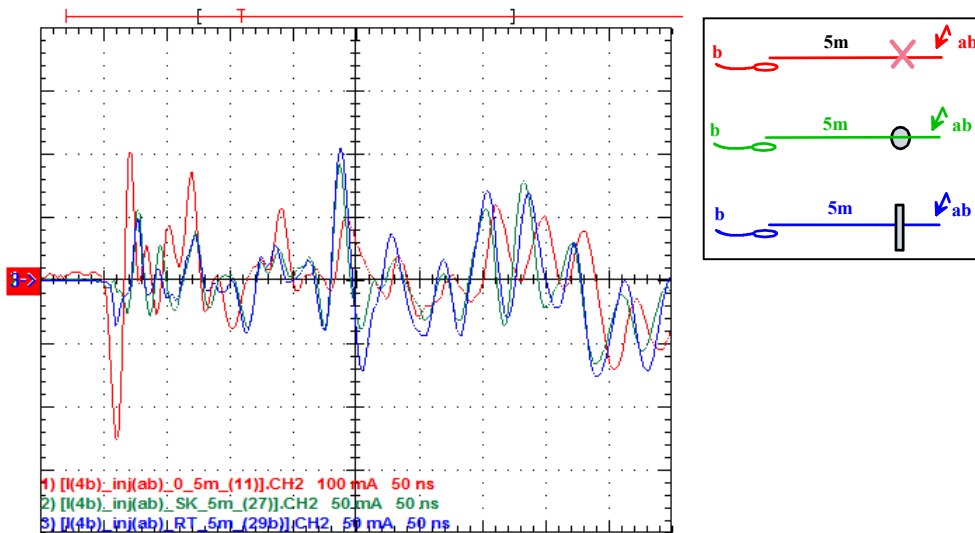
Figur B.12 Sum straum av skjerm- og innerleiar i målepunkt 3 på ein kabel med ulik type avkopling. Injisering på eine kabelen, måling på den same. Merk: Kurva for tilfellet utan damping er berre vist i om lag 200 ns.



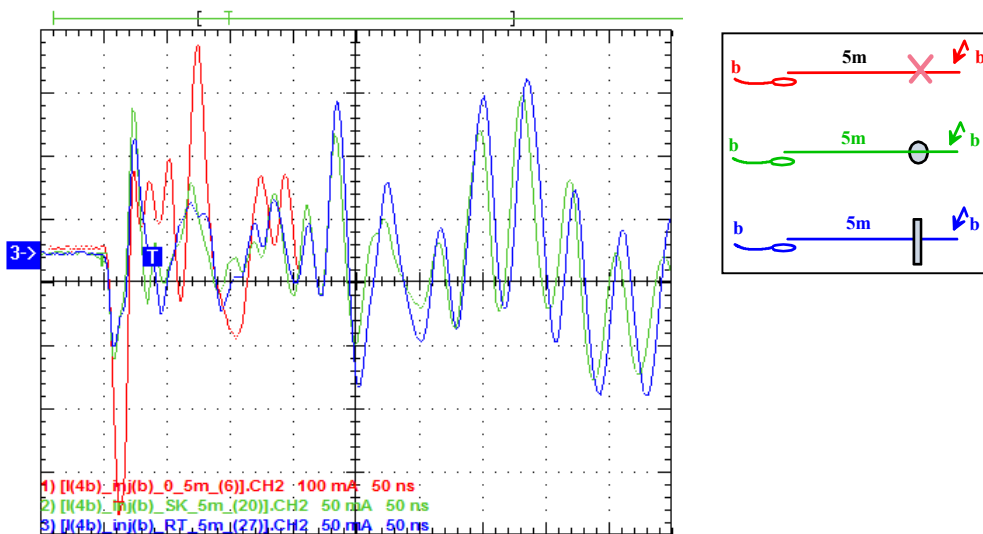
Figur B.13 Sum straum av kabelskjerm og innerleiar i målepunkt 3 på ein kabel med ulik type avkopling. Injisering på eine kabelen, måling på den andre. Merk: Kurva for tilfellet utan damping er berre vist i om lag 200 ns og for Roxtec EMC gjennomføring i ca 400 ns.

Resultata viser at dempinga med injisering på begge kanalar er om lag 40 til 80 gonger (32-38 dB) for slangeklemme og om lag 85 gonger (38,6 dB) for Roxtec EMC gjennomføring, sjå Figur B.11. Fordi resultata med injisering på ein kanal manglar tilstrekkeleg måleunderlag for tilfellet utan avkopling, blir nøyaktige tal for demping tilsvarande usikre. Likevel ser det ut til at dempinga blir den same relativt uavhengig av om signalet er injisert på ein eller to kanalar. (Med injisering på ein kabel og måling på den same, vart dempinga for slangeklemme ~90 og Roxtec ~230 gonger). Sjå Figur B.12 og Figur B.13. Frekvensen på svingingane i støypulsen blir typisk 8 til 10 gonger raskare i målepunkt 2 og 3, samanlikna med målepunkt 1. Dvs aukar frå typisk 2,5 MHz til 20 MHz. (Unntak når injisering og måling blir gjort på ulike kablar: Då blir auken i frekvens typisk 3-4 gonger, dvs aukar frå ~6-7 MHz til 25 MHz).

B.4.3 Damping i innerleiar med ulike avkoplingar



Figur B.14 Samanlikning av støypuls målt på innerleiar med ulike avkoplingsteknikkar. Injeksjon straum begge kanalar.

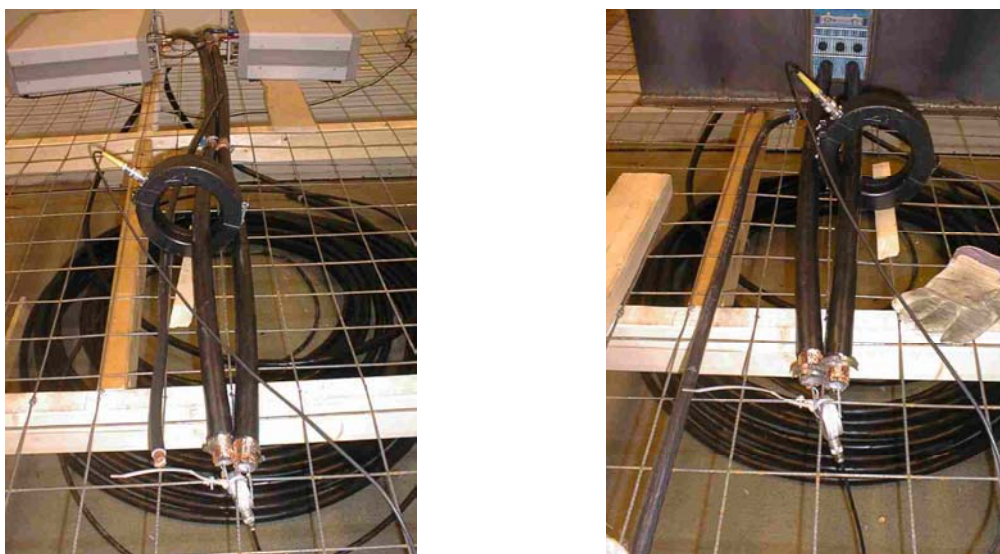


Figur B.15 Samanlikning av støypuls målt på innerleiar med ulike avkoplingsteknikkar. Injeksjon straum på ein kanal. Kurva for tilfellet utan damping er berre vist i om lag 200 ns.

Både slangeklemme og Roxtec EMC gjennomføring gir om lag den same dempinga i innerleiaren. Dampinga er størst i første delen av pulsen (typisk 5 gonger, dvs $\sim 14,0$ dB), medan ho seinare er blir mindre (dempar typisk mellom 1 og 2 gonger (0-6 dB) samanlikna med tilfellet utan avkopling). Dampinga er relativt uavhengig av om injiseringa skjer på ein eller to kablar.

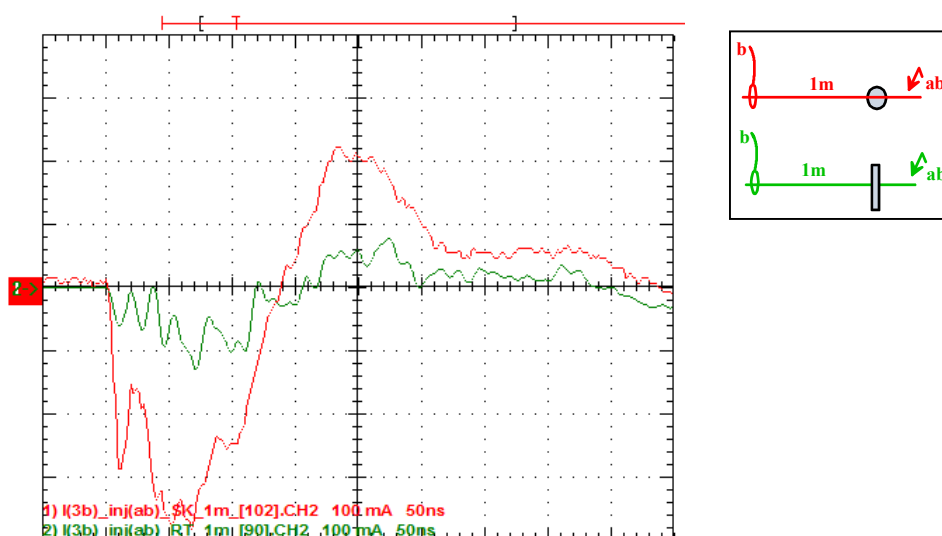
B.4.4 Korte kablar (1m)

Figur B.16 viser to oppsett med korte kablar på ca 1 m etter avkoplingspunktet.

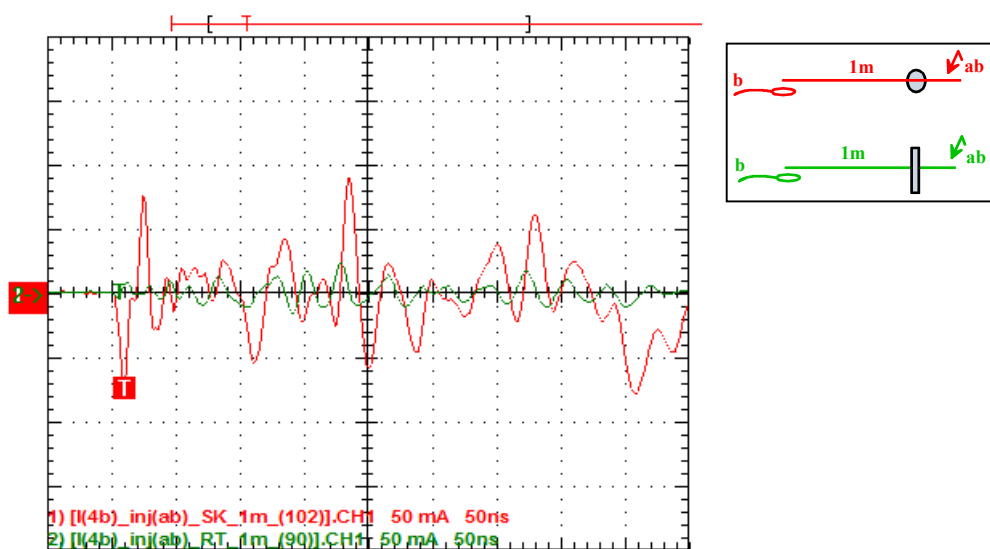


Figur B.16 Måleoppsett med korte kablar: Avkopling med slangeklemme til venstre, avkopling med Roxtec EMC-gjennomføring til høgre. Kabellengde ca 1 m etter avkoplingspunkt.

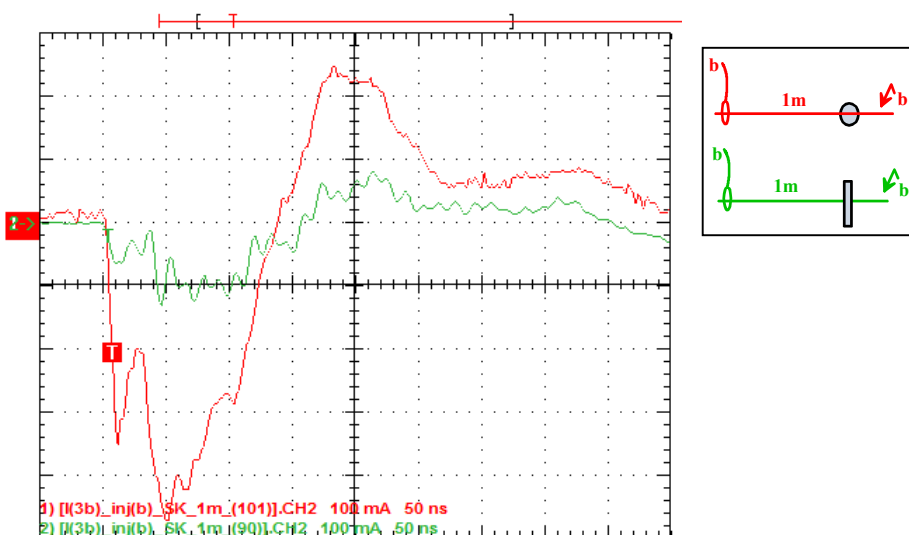
Resultata nedanfor viser samanlikningar mellom slangeklemme og Roxtec EMC-gjennomføring som avkopling med 1 m kabel etter avkoplingspunktet. Oppsettet skal illustrere forholda ved gjennomføring til skap: Kabelskjermen blir enten avkopla med slangeklemme til jord ved innføring til skapet (skap utan botnplate), eller ført gjennom EMC tett skap med komplett EMC-gjennomføring (skap med botnplate). Den 1 m lange kabelen er enden som går inn i skapet etter avkoplinga.



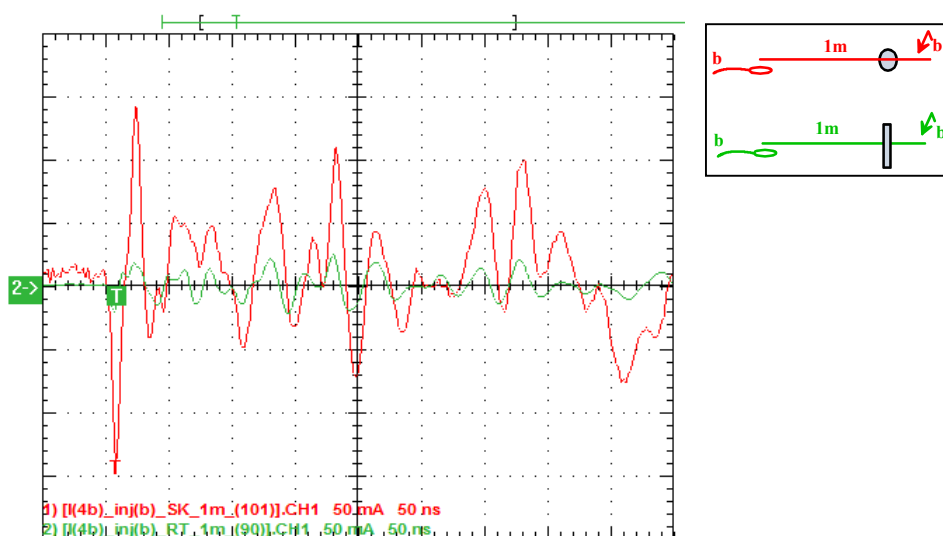
Figur B.17 Samanlikning av støypuls i målepunkt 3 med hhv slangeklemme og Roxtech EMC gjennomføring. Kabellengde 1 m, injeksjon i to kablar og straum målt som summen av straum i innerleiar og kabelskjerm.



Figur B.18 Samanlikning av støypuls i innerleiar med slangeklemme og Roxtec EMC-gjennomføring. Kabellengde 1m og injeksjon i to kablar.



Figur B.19 Samanlikning av støypuls i målepunkt 3 med hhv slangeklemme og Roxtech EMC-gjennomføring. Kabellengde 1 m, injeksjon i berre ein kabel og straum målt som summen av straum i innerleiar og kabelskjerm.

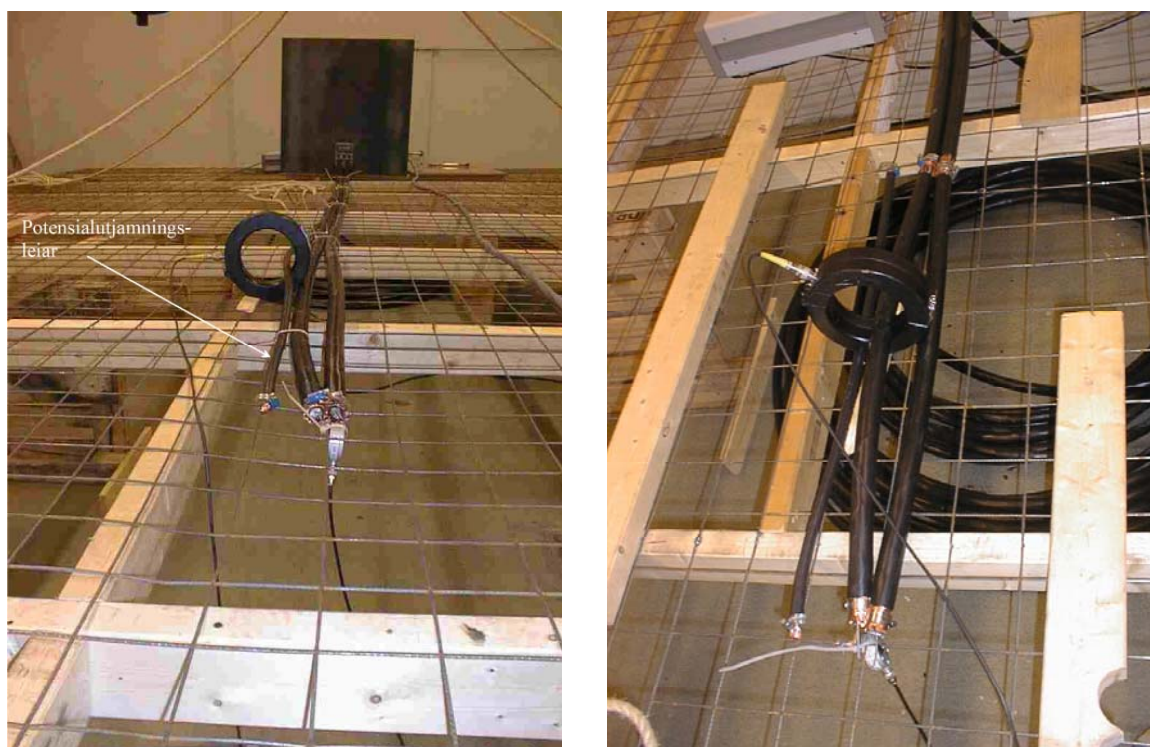


Figur B.20 Samanlikning av støypuls i innerleiar med slangeklemme og Roxtec EMC-gjennomføring. Kabellengde 1m og injeksjon på berre ein kabel.

Målingane med 1m kabel inkluderer ikkje alternativet kabel utan avkopling, som er nytta som referanse for tidlegare samanlikningar. Resultata avgrensar seg derfor til samanlikningar mellom slangeklemme og Roxtec EMC-gjennomføring. Dempinga av støypulsen målt som ein sum av kabelskjerm og innerleiar (målepunkt 3) blir for Roxtec gjennomføring om lag 6 gonger høgare ($\sim 15,5$ dB) enn ved bruk av slangeklemme (for første delen av pulsen). Sjå Figur B.17 og Figur B.19. Vidare blir dempinga på innerleiar om lag 11 gonger høgare (~ 21 dB) for Roxtec gjennomføring enn med slangeklemme (for første delen av pulsen). Sjå Figur B.18 og Figur B.20. Dette siste er forskjellig i høve til målingane på 5,5 m lange kablar, der støypulsen vart dempa likt anten det vart nytta slangeklemme eller Roxtec gjennomføring. Om lag den same dempinga vart registrert uavhengig av om injiseringa vart gjort på ein eller to kablar.

B.4.5 Verknaden av parallell potensialutjamningsleiar

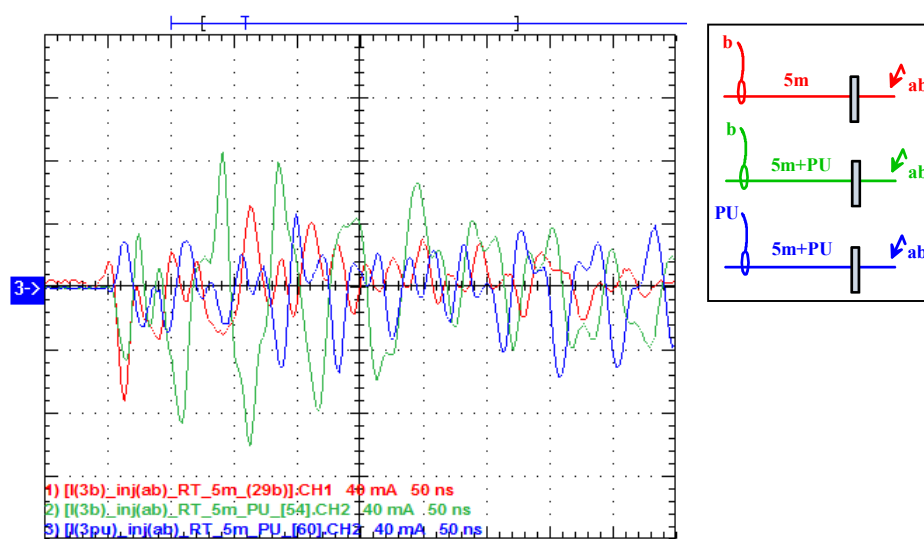
Verknaden av parallell potensialutjamningsleiar vart prøvd ut med ein 150 mm^2 Cu-kabel. Pga av tidspress for å rive måleoppsettet, vart ikkje termineringa til avkoplingspunktet for kabelen vektlagt tilstrekkeleg. Dette gav ei uheldig utføring, dvs at impedansen vart for stor i termineringspunktet, og den forventa effekten av utjamningsleiaren fall bort. Viser nokre resultat frå desse målingane på dei neste sidene.



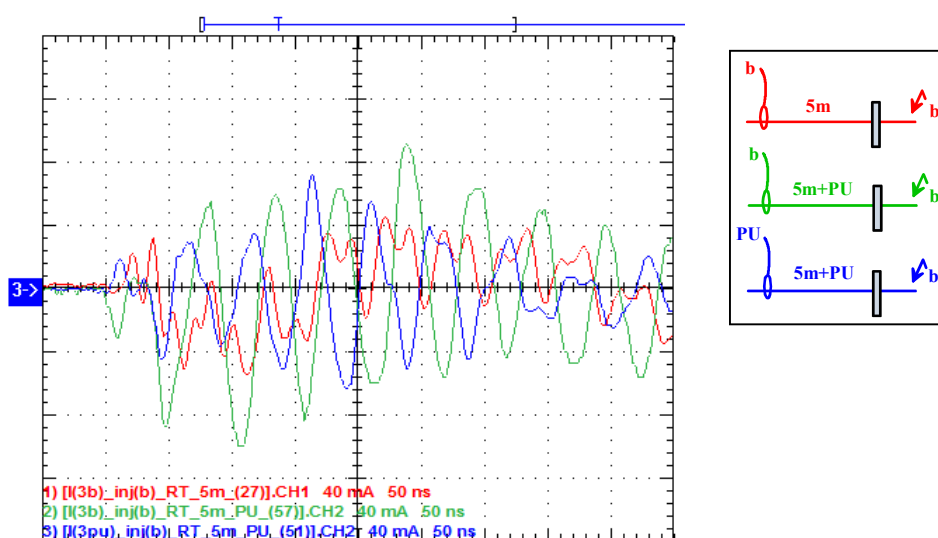
Figur B.21 Eksempel på målingar med parallell potensialutjammingsleiar ($150 \text{ mm}^2 \text{ Cu}$) ved hhv lange kablar og Roxtec EMC gjennomføring (til venstre) og korte kablar (til høgre). Den separate Cu-leiaren blir terminert til jordnettet vha slangeklemmer.



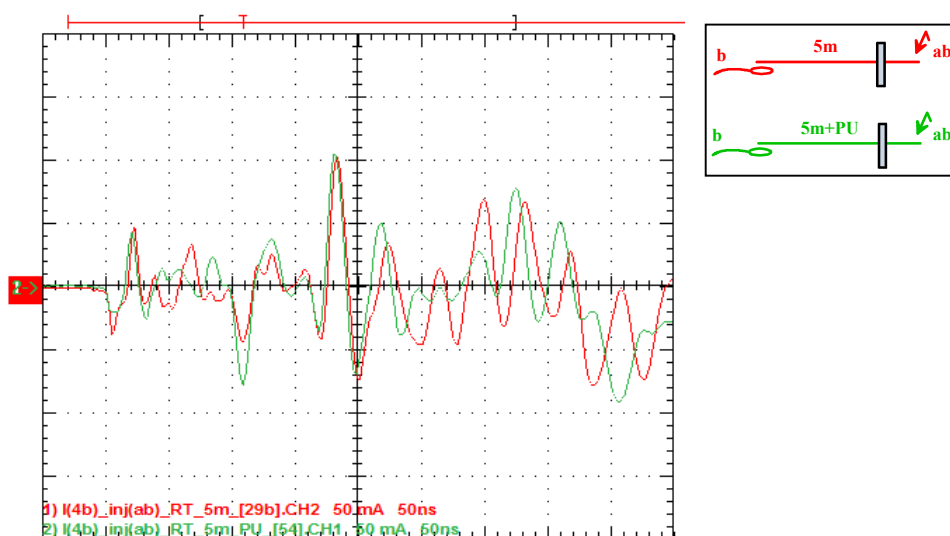
Figur B.22 Detaljar frå terminering av potensialutjammingsleiar mot gjennomføringsplate.



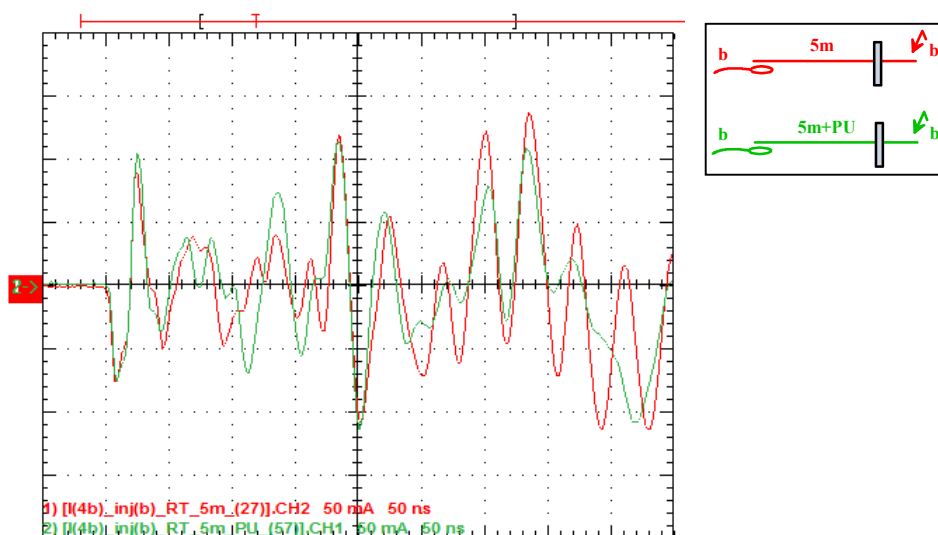
Figur B.23 Målepunkt 3 med lang kabel og Roxtec EMC gjennomføring. Samanlikning med og utan potensialutjamningsleiar. Injisering på to kablar.



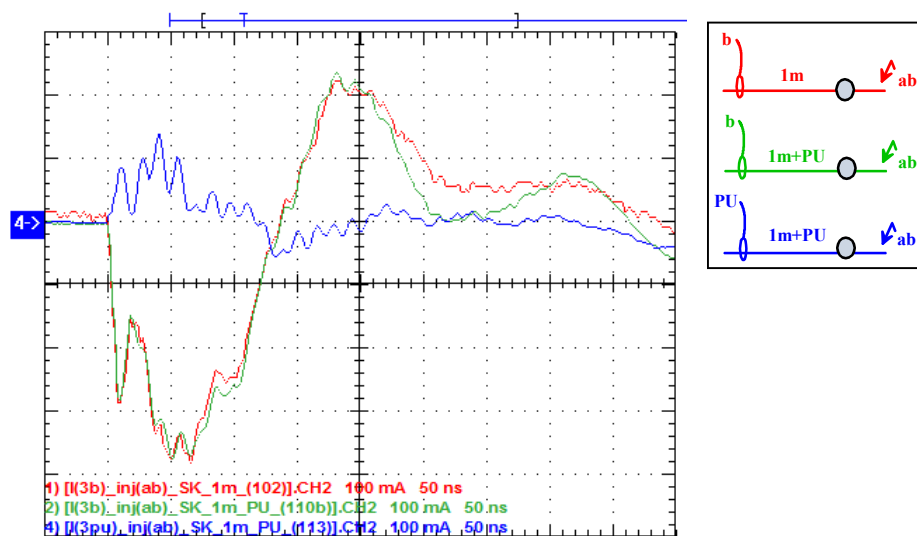
Figur B.24 Målepunkt 3 med lang kabel og Roxtec EMC gjennomføring. Samanlikning med og utan potensialutjamningsleiar. Injisering på ein kabel.



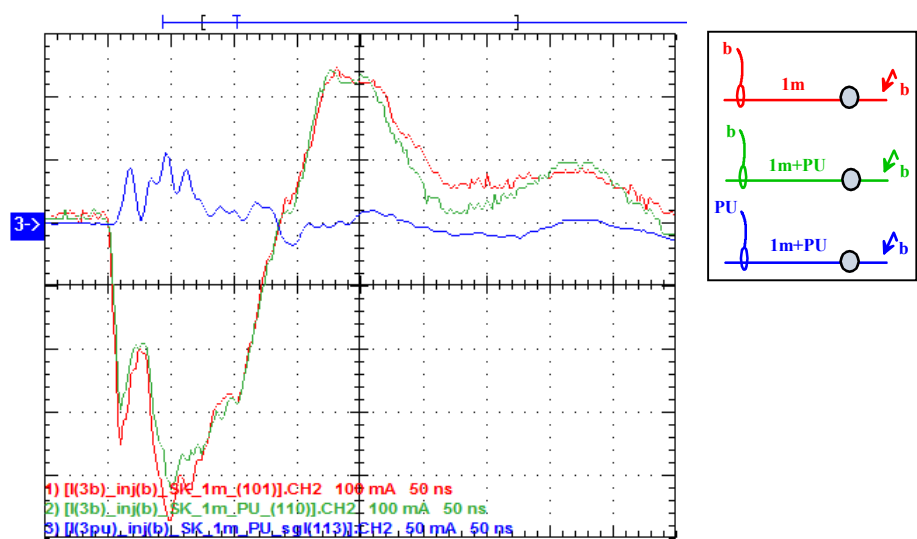
Figur B.25 Måling innerleiar med lang kabel og Roxtec EMC gjennomføring. Samanlikning med og utan potensialutjamningsleiar. Injisering på to kablar.



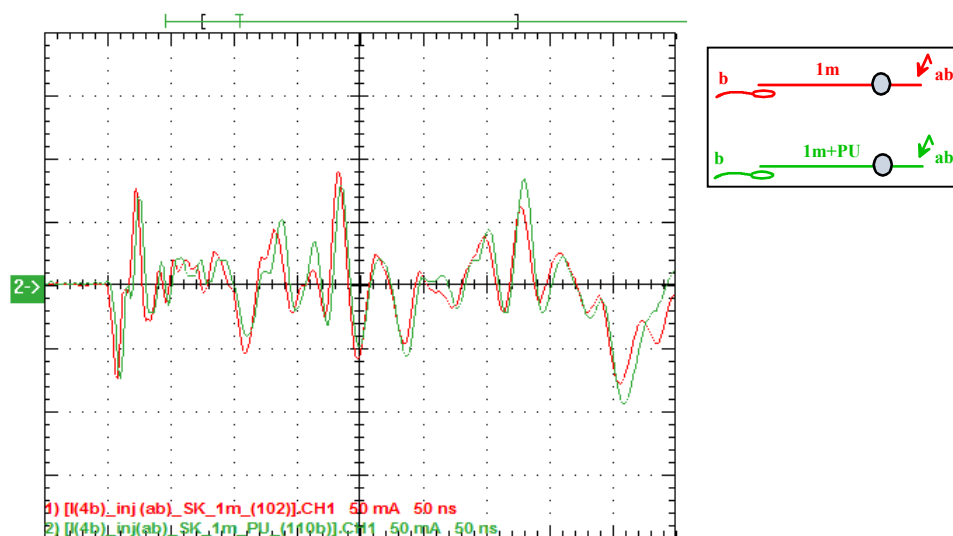
Figur B.26 Måling innerleiar med lang kabel og Roxtec EMC gjennomføring. Samanlikning med og utan potensialutjamningsleiar. Injisering på ein kabel.



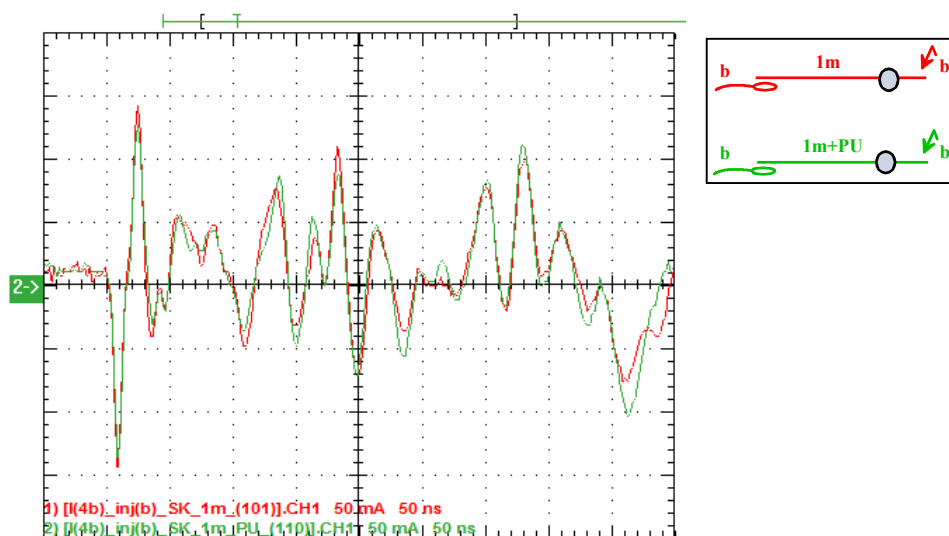
Figur B.27 Målepunkt 3 med kort kabel og slangeklemme. Samanlikning med og utan potensialutjammingsleiar. Injisering på to kablar.



Figur B.28 Målepunkt 3 med kort kabel og slangeklemme. Samanlikning med og utan potensialutjammingsleiar. Injisering på ein kabel.



Figur B.29 Måling innerleiar med kort kabel og slangeklemme. Samanlikning med og utan potensialutjammingsleiar. Injisering på to kablar.



Figur B.30 Måling innerleiar med kort kabel og slangeklemme. Samanlikning med og utan potensialutjammingsleiar. Injisering på ein kabel.

Oppsummering av resultat for parallell potensialutjammingsleiar (PU): Ser at dempinga for kort kabel (1m) med slangeklemme og PU, gir om lag null demping i forhold til målingar utan parallell PU. Dei same resultata ser ein også for målingar på innerleiaren med lang kabel (5,5 m) og Roxtec EMC gjennomføring: I målepunkt 3 (sum straum innerleiar + kabelskjerm) med lang kabel derimot, er det litt meir komplisert: I første del av utsnittet er forholdet mellom amplitudane om lag 1:1 (utan:med), medan straumpulsen seinare blir høgare med enn utan parallell PU. (Forhold typisk 1:2 (utan:med)). Sjå Figur B.23 og Figur B.24. Hadde forventa at alle straumpulsane skulle bli dempa med bruk av PU. Antar grunnen til avviket kjem av den noko uheldige oppkoplinga som vart gjort av potensialutjammingsleiaren. Sjå Figur B.22.

B.5 BEREKNING AV KABELPARAMETRAR

Permeabilitet for vakuum:

$$\mu_0 := 4\pi 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}} \quad \mu_0 = 1.257 \times 10^{-6} \frac{\text{H}}{\text{m}}$$

Permittivitet for vakuum:

$$\epsilon_0 := 8.854 \cdot 10^{-12} \frac{\text{F}}{\text{m}}$$

Relativ dielektrisitetstkontant

$$\epsilon_r := 2.3$$

Ytterdiameter kabel (innerleiar + isolasjon):

$$d_1 := 0.263 \cdot \text{m}$$

Diameter kabel innerleiar (inklusive halvleiarleide belegg):

$$d_2 := 0.195 \cdot \text{m}$$

Kapasitet kabel:

$$C := \frac{(2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r)}{\ln\left(\frac{d_1}{d_2}\right)} \quad \mu\text{F} := 10^{-6} \cdot \text{F} \quad \mu\text{H} := 10^{-6} \cdot \text{H}$$

$$C = 0.428 \frac{\mu\text{F}}{\text{km}}$$

Karakteristisk impedans for koaksialkabel:

$$Z_{\text{kar}} := \left(\frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}}\right) \cdot \ln\left(\frac{d_1}{d_2}\right) \cdot \Omega$$

$$Z_{\text{kar}} = 11.835 \Omega$$

Lyshastighet:

$$c := 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$L := \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{d_1}{d_2}\right)$$

$$L = 0.06 \frac{\mu\text{H}}{\text{m}}$$

Definerer relativ permeabilitet:

$$\mu_r := 1$$

Uttrykk for bølgehastigheten i kabelen:

$$v := \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0 \epsilon_r \mu_r}}$$

$$v = 1.977 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Kabellengde L_{kabel} fra injiseringspunkt til open ende og attende:

$$L_{\text{kabel}} := 2.45 \text{m}$$

$$L_{\text{kabel}} = 90 \text{m}$$

Tida $t_{\text{refleksjon}}$ det tek for støypulsen å vandre kabellengda t/r :

$$t_{\text{refleksjon}} := \frac{L_{\text{kabel}}}{v} \quad \text{ns} := (10^{-9} \text{s})$$

$$t_{\text{refleksjon}} = 455.283 \text{ns}$$

Dvs at støyimpulsen nyttar om lag 455 ns på å returnere frå den opne enden av kabelen, og tidsutsnitt mindre enn dette vil ikkje bli påverka av refleksjonsbølga.

VEDLEGG C: CDEGS PROGRAMVARE

VEDLEGG C: CDEGS PROGRAMVARE

C.1 SAMMENDRAG

Datasimuleringer er et verktøy som ønskes benyttet for å undersøke effekten av ulike tiltak for støyskjerming i elkraftanlegg. Innledningsvis ønsker en å finne fram til egnede simuleringsverktøy blant kommersielt tilgjengelig programvare. Programpakken CDEGS er ett verktøy som ønskes testet. Dette notatet omhandler arbeidet med å teste ut CDEGS [B.1].

For å prøve ut om programvaren er egnet til den typen analyser som ønskes gjennomført i prosjektet, er det laget en simuleringsmodell som svarer til den enkle laboratoriemodellen som er bygget opp. Tanken er å regne på det samme oppsettet og sammenligne målte og beregnede verdier.

For å i det hele tatt få en kjørbart modell i HIFREQ (del av CDEGS) måtte den enkle laboratoriemodellen forenkles kraftig. Dersom en tenker videre til simuleringer av reelle kraftanlegg vil situasjonen både med hensyn til jordledere, antall kabler etc være mye mer komplisert, og en ser ikke for seg at modellering og simulering med HIFREQ vil kunne gi noe godt resultat.

Det er derfor konkludert med at programvaren ikke er aktuell for anvendelser der alle ledere i utgangspunktet er over bakken og der antallet ledere er stort. Den vil imidlertid være aktuell for problemer der jordingsanlegg bestående av et begrenset antall ledere over og under bakken er involvert. Dette gjelder også ved høye frekvenser.

C.2 INNLEDNING/BAKGRUNN

Et av delmålene i prosjektet Spenningskvalitet og støybeskyttelse er å finne praktiske løsninger for hvordan kostnadseffektiv sikring mot høyfrekvent støy kan gjennomføres ved hjelp av riktig anleggsutforming og komponentvalg. En hovedidé har vært å undersøke om bruken av tre-dimensjonale jordnett kan erstatte eller forenkle bruk av inntaksplate og således forenkle utførelsen av elkraftinstallasjoner.

Datasimuleringer er et verktøy som ønskes benyttet for å undersøke effekten av ulike tiltak. Innledningsvis ønsker en å finne fram til egnede simuleringsverktøy blant kommersielt tilgjengelig programvare. Programpakken CDEGS er ett verktøy som ønskes testet. Dette notatet omhandler arbeidet med å teste ut CDEGS.

For å prøve ut om programvaren er egnet til den typen analyser som ønskes gjennomført i prosjektet, er det laget en simuleringsmodell som svarer til den enkle laboratoriemodellen som er bygget opp. Tanken er å regne på det samme oppsettet og sammenligne målte og beregnede verdier.

C.3 BEREGNINGSPROGRAMMET CDEGS

C.3.1 Kort beskrivelse av programvaren og dens hovedanvendelsesområde

Programpakken CDEGS, som består av 8 ulike moduler, er et verktøy som kan benyttes for studier av jording, elektromagnetiske felt, elektromagnetisk støy/kobling, inkludert begrensning av/tiltak mot slik støy, samt ulike aspekter ved katodisk beskyttelse. Hovedslagordet ”When your currents are no longer confined in your phase conductors, then it’s CDEGS’ business” sier mye om hovedanvendelsesområdet for programvaren. Det er knyttet opp mot tilfeller der en har strømmer i jord eller andre ledende medier i tillegg til strømmer i definerte, metalliske ledere. De metalliske lederne kan være over eller under bakken, og trenger ikke ha direkte kontakt med jord, selv om analyse av jordstrømmer og forhold ved jordfeil generelt har vært en drivende kraft bak utviklingen av programvaren.

Beregningsmodulene er verktøy for analyser i frekvensplanet. Imidlertid er det en egen FFT-modul inkludert slik at en kan starte med et påtrykk i tidsplan (for eksempel en lynimpuls) og få ut resultater som en funksjon av tid.

De 8 beregningmodulene er:

- RESAP – som finner egnede jordmodeller basert på målinger av jordresistivitet.
- MALT – som er et verktøy for beregning av strømfordeling, potensialer og elektromagnetiske felt i forbindelse med ledere under jordoverflaten. Modulen behandler kun lavfrekvente på trykk (50/60 Hz), men har et stort utvalg av avanserte jordmodeller.
- FCDIST – som er et enkelt verktøy for analyse av strømfordeling mellom faseledere og jordliner på en kraftledning ved jordfeil. Det forutsettes like spennlengder, like linjeparametre i hvert spenn og like jordmotstander i hvert spenn for kraftledningen.
- TRALIN – som er et verktøy for beregning av linjeparametre (med retur i jord) basert på fysiske dimensjoner og materialelegenskaper.
- SPLITS – som er et verktøy for analyse av feilstromfordeling på flerfase kraftledninger samt elektromagnetisk (induktiv) kobling mellom kraftledninger og andre nærførte strukturer. Alle spenn i kraftlinjer kan ha ulike lenger, parametre og jordingsmotstand, og jordfeil kan plasseres vilkårlig. Analysen er basert på kretsteknikk.
- MALZ – som er et verktøy tilsvarende MALT, men med kapasitet til å håndtere høye frekvenser.
- HIFREQ – som er et verktøy for å analysere strøfordeling, potensialer og elektromagnetisk felt i og rundt ledere over og under bakken. Verktøyet kan håndtere frekvenser over et stort spekter. Analysen er basert på potensialberegninger, og er bygget opp rundt det som på engelsk kalles ”thin wire assumption”. Input til verktøyet er lederes plassering, fysiske dimensjoner og materialelegenskaper.

- FFTSES – som er modulen for fremover og bakover FFT. Denne modulen er spesialtilpasset for overføring av resultater til og fra de øvrige modulene.

I tillegg til selve beregningsmodulene inneholder programvaren et greit grensesnitt for input og slagkraftige verktøy for visualisering av resultater.

C.3.2 Muligheter relatert til den aktuelle anvendelsen, og begrensninger

I arbeidet med å modellere/simulere laboratorieoppsettet benyttet i prosjektet, vil HIFREQ i kombinasjon med FFTSES være de aktuelle modulene. Det vil være snakk om å modellere ledere som befinner seg over bakken og uten kontakt med jord, og påtrykket har høy frekvens. HIFREQ er den modulen som gir størst frihet til å modellere ledere med tilfeldig plassering, og som kan håndtere ledere over bakken ved høye frekvenser.

Som nevnt i avsnitt C.3.1 er modulen HIFREQ basert på den såkalte ”thin wire assumption”. I korte trekk betyr dette at ledere anses som punktlede uten utstrekning annet enn i lengderetningen. Når en i input til programmet oppgir lederens posisjon oppgir en koordinater for lederens sentrum, og lederen plasseres i dette punktet. Denne måten å gjøre det på har betydning for modellering av koaksiale ledere siden kun en ledere kan finne seg i ett punkt. Lederens fysiske utstrekning i andre retninger enn lengderetningen ivaretas i beregningene gjennom parametre internt i programmet. Disse forutsetningen kan ha direkte innvirkning i forbindelse med modellering av kablene i den aktuelle modellen. Se nærmere beskrivelse i avsnitt C.4.1.

Metoden benyttet i HIFREQ forutsetter at ledere deles opp i mindre segmenter. Langsgående strømmer i ledere, lekkstrømmer til jord, indre impedans og potensialer knyttes opp mot disse segmentene. Segmentenes lengde må ikke overskrider en viss andel av den korteste bølglengden som er involvert i problemet. Brukeren må selv dele opp lange ledere i segmenter, noe som gir mulighet for styring av beregningene til en viss grad. I tillegg vil programmet automatisk segmentere ledere i krysningspunkter. En begrensning i programmet er at det maksimalt kan håndtere 5000 segmenter. Dette kan representere en reell begrensning i det aktuelle problemet.

I det aktuelle problemet inngår magnetiske materialer (stålet i armeringsnettet). Materialegenskapene for stålet vil variere med frekvens og strømstyrke, men slik variasjon er det ikke mulig å ta hensyn til i programmet. En utfordring er derfor å velge representative verdier for parametrene, spesielt den ulineære relative permeabiliteten (μ_r). Det er i utgangspunktet vanskelig å få tak i gode parameterverdier for armeringsnett. Elektriske parametre er vanligvis ikke spesielt aktuelle for vanlig bruk av slike.

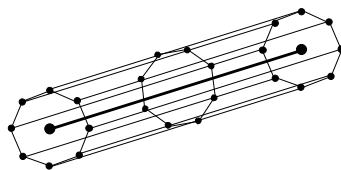
C.4 BEREGNINGSMODELL, BEREGNINGSFORSØK OG KONKLUSJON

C.4.1 Beskrivelse av basismodellen

I det aktuelle problemet skal en studere to parallelle ledere over et relativt finmasket armeringsnett. Oppstillingen er plassert over jord. Oppsettet er skissert i Figur B.1, se denne.

Modellering av armeringsnettet er relativt rett fram, med unntak av parameterverdier. Det er forsøkt å finne representative verdier for resistivitet og permeabilitet. Lederne i armeringsnettet er lagt inn med koordinater som i laboratorieoppsettet.

Kablene i måleoppsettet har skjerm og representerer en utfordring modelleringsmessig. Siden ledere ikke kan ha samme senterpunkt må skjermen representeres med et sett av ledere lagt rundt innerlederen. Lederne som utgjør skjermen må knyttes sammen med jevne mellomrom. I den første modellen som ble konstruert, er det valgt å representere skjermen med 8 delledere forlagt som vist i Figur C.1. Lederens dimensjon er valgt slik at det totale skjermtvversnittet for lederen er lik summen av tvversnittene for de 8 dellederne.



Figur C.1 Modell av kabel med skjerm, skjerm som 8 delledere.

I den opprinnelige modellen er dellederne i kabelskjermen knyttet sammen hver hele meter. Kablene har en total lengde på 55 m, så hver kabel har 56 sammenknytningspunkter.

I laboriemodellen er kablene koblet til armeringsnettet med en impedans lik kabelens karakteristiske impedans. Dette er i modellen løst ved å benytte en leder med gitt, konsentrert impedans, noe programvaren åpner for.

I laborieforsøkene er støy koblet inn på skjermen via injeksjon på ytterleder. Det ble derfor valgt å starte med injeksjon av et langsgående strømsignal i en kort del av kabelskjermen på det stedet i modellen der signalet er injisert i laboriet.

C.4.2 Problemer i beregningene, reduksjon av modellen

Som nevnt i avsnitt C.3.2 har programvaren en begrensning på 5000 segmenter i modellen. Med det finmaskede armeringsnettet som er benyttet og en kabelmodell som resulterer i svært mange ledere på grunn av 8 delledere med sammenkobling for hver meter ble resultatet at modellen hadde ca 10 000 segmenter og ikke var kjørbart i programmet.

Modellen ble redusert ved at antallet delledere i de to kabelskjermene ble redusert fra 8 til 4, samt at antallet tverrforbindelser ble redusert fra 56 til 29, altså en tverrforbinder hver 2. meter. Dette bidro til å redusere antallet segmenter noe, men på langt nær nok til at modellen ble kjørbær.

Etter diskusjon med personell hos programvareutvikleren kom en fram til en løsning der alle ledere i armeringsnettet med unntak av de lederne som er i umiddelbar nærhet av kablene og lederne som utgjør randen av nettet ble fjernet. Dette er i og for seg en kraftig reduksjon av modellen, men ved så høye frekvenser som det er snakk om her vil stort sett bare de deler av nettet som er nærmest kabelen være aktivt, så en slik modell skulle kunne være representativ.

I modellen er kablene avsluttet med en konsentrert impedans lik kabelens karakteristiske impedans. Når modellen var krympet til et nivå der den kunne kjøres ut i fra størrelse, havarerte kjøringen på grunn av disse impedansene. Det ble da valgt å avslutte arbeidet med modellering/simulering av det aktuelle problemet i HIFREQ.

C.4.3 Konklusjon

For å i det hele tatt få en kjørbær modell i HIFREQ måtte den enkle laboratoriemodellen forenkles kraftig. Dersom en tenker videre til simuleringer av reelle kraftanlegg vil situasjonen både med hensyn til jordledere, antall kabler etc være mye mer komplisert, og en ser ikke for seg at modellering og simulering med HIFREQ vil kunne gi noe godt resultat.

Det er derfor konkludert med at programvaren ikke er aktuell for anvendelser der alle ledere i utgangspunktet er over bakken og der antallet ledere er stort. Den vil imidlertid være aktuell for problemer der jordingsanlegg bestående av et begrenset antall ledere over og under bakken er involvert. Dette gjelder også ved høye frekvenser.

C.5 REFERANSER

B.1 CDEGS product description: www.sestech.com.

SINTEF Energiforskning AS
Adresse: 7465 Trondheim
Telefon: 73 59 72 00

SINTEF Energy Research
Address: NO 7465 Trondheim
Phone: + 47 73 59 72 00