

www.sintef.no



FORORD

Denne håndboken er resultatet av et samarbeidsprosjekt mellom everk, industri og myndigheter innen emnet elektromagnetisk puls (EMP). Prosjektet har vært et delprosjekt under hovedprosjektet Leveringskvalitet, som en del av Forskningsrådsprogrammet EFFEKT.

Arbeidet startet etter initiativ fra NVE, seinere kom Statnett med i forberedelsene av prosjektet. Følgende bedrifter og organisasjoner har støttet prosjektet økonomisk og deltatt i styringen av prosjektet (alfabetisk):

- ABB Kraft AS
- Bailey Norge AS
- BKK Produksjon AS
- Enfo
- Jernbaneverket, Bane Energi
- Lyse Kraft
- Nord-Trøndelag Elektrisitetsverk
- Norges Forskningsråd
- NVE
- SINTEF Energiforskning AS
- Skiensfjordens kommunale kraftselskap (SKK)
- Statnett SF
- Vest-Agder Energiverk
- Viken Energinett AS

Utførende prosjektgruppe og bidragsyttere har vært:

- | | |
|---|--|
| - SINTEF Energiforskning AS: | Nils Arild Ringheim (forfatter og redaktør)
Bjørn Gustavsen (forfatter)
Harald Kulbotten (forfatter)
Gunnar Klevjer (forfatter)
Jostein Huse |
| - Forsvarets forskningsinstitutt (FFI): | Karl-Ludvig Grønhaug (forfatter) |
| - SINTEF Elektronikk og kybernetikk: | Hans Berstad (medforfatter kap 3.2) |

Denne håndboken retter seg mot EMP-sikring av sivile kraftforsyningsanlegg, og viser generelle prinsipper og metoder. For lesere som ønsker høyere detaljeringsgrad på praktiske løsninger, anbefales "EMP-håndbok" utgitt av Forsvarets tele- og datatjeneste (FTD) i år 2000. Den sistnevnte håndboken konsentrerer seg om løsninger i forbindelse med skjerming av hele rom eller bygninger. (Kan lastes ned på nettet fra: <http://www.ftd.mil.no>)

INNHOLDSFORTEGNELSE

	Side	
0	INNLEDNING	1
0.1	MÅLGRUPPE	1
0.2	BAKGRUNN OG STATUS	1
0.3	INNHOLD	1
1	ULIKE TYPER EMP – GENERELL OVERSIKT	2
1.1	INNLEDNING	2
1.2	EMP I FØRHOLD TIL EMI OG ØVRIG EMC-PROBLEMATIKK	2
1.3	BESKRIVELSE AV EMP-FENOMENER	4
1.3.1	Elektromagnetisk puls fra lynkanal - LEMP	4
1.3.2	Kjernefysisk sprengning - NEMP	5
1.3.3	Radiofrekvente våpen - RFW	11
1.4	REFERANSER	12
2	EMP-PÅKJENNINGER I KRAFTFORSYNINGSANLEGG	15
2.1	INNLEDNING	15
2.2	LEMP	16
2.3	HEMP	17
2.4	RFW	21
2.5	PÅKJENNING FRA LYNUTLADNINGER KONTRA HEMP	22
2.6	UTSTYRS TÅLEEVNE OVERFOR ULIKE EMP-PÅKJENNINGER	23
2.6.1	Elkraftkomponenter	24
2.6.2	Kommunikasjons- og kontrollanlegg	25
2.6.3	Halvledere	27
2.7	REFERANSER	28
3	STRUKTURERING AV KRAFTFORSYNINGSANLEGG	29
3.1	INNLEDNING	29
3.2	SONEINDELING	30
3.2.1	Hvordan dele inn sonene?	30
3.2.2	Hvordan skal sonegrensene plasseres?	32
3.2.3	Skjermer med hull	33
3.2.4	Praktiske fordeler med soneinndeling	33
3.3	STRUKTURERING AV ANLEGG	34
3.3.1	Innledning	34
3.3.2	Utfyllende informasjon om kontrollanlegg	34
3.3.3	Eksempel på strukturering av kraftforsyningsanlegg	35
3.4	DIFFERENSIERT BESKYTTELSESnivå	36
3.4.1	Kommentarer til soneinndelingen	40
3.5	VURDERING AV DRIFTSBEREDSKAP	41
3.5.1	Innledning	41
3.5.2	Overordnede EMP-tiltak	41
3.5.3	Driftskonsekvenser av EMP	42
3.5.4	Vurdering av beskyttelsesstrategi	43
3.6	REFERANSER	45

4	BESKYTTELSESTILTAK.....	46
4.1	JORDING.....	46
4.1.1	Generelt om jording.....	46
4.1.2	Ulike jordingsstrategier for kraftforsyningsanlegg.....	46
4.1.3	Håndbokas valg av jordingsstrategi.....	49
4.1.4	Jordingsanlegget i kraftforsyningsanlegg.....	50
4.2	SKJERMING.....	51
4.2.1	Innledning.....	51
4.2.2	Teoretiske begreper.....	52
4.2.3	Ulike typer skjermingsmetoder.....	53
4.2.4	Kabelskjerming.....	58
4.3	TRANSIENTVERN, AVLEDNING OG FILTRERING.....	60
4.3.1	Innledning.....	60
4.3.2	Prinsipper for vern.....	60
4.3.3	Aktuelle typer vern.....	62
4.3.4	Kombinerte vern.....	65
4.3.5	Sammenstilling av ulike typer vern mht til anvendelsesområde og egenskaper.....	65
4.3.6	EMP-beskyttelse vha fiberoptikk.....	66
4.3.7	Eksempler på vern.....	67
4.4	REFERANSER.....	69
5	PRAKTISK UTFØRELSE AV EMP-SIKRING.....	71
5.1	INNLEDNING.....	71
5.2	GLOBAL BESKYTTELSE.....	71
5.3	DIFFERENSIERT BESKYTTELSE.....	72
5.3.1	Beskyttelsestiltak knyttet til de ulike sonene.....	73
5.4	ULIKE BESKYTTELSETILTAK.....	74
5.4.1	Beskyttelsestiltak sonегrense 1.....	74
	Ledere/kabler som alltid skal ha overspenningsavledere.....	75
	Ledere/kabler som bør ha overspenningsavledere.....	75
5.4.2	Beskyttelsestiltak sone 1.....	75
	Jording.....	75
	Skjerming.....	76
	Lederføring.....	76
	Oppsummering anbefalte beskyttelsestiltak.....	78
5.4.3	Beskyttelsestiltak sonегrense 2.....	78
5.4.4	Beskyttelsestiltak sone 2.....	80
	Jording.....	80
	Skjerming.....	81
	Lederføring.....	82
	Oppsummering anbefalte beskyttelsestiltak.....	84
	Eksempel på bruk av soneinndeling i eksisterende anlegg.....	84
5.4.5	Beskyttelsestiltak sonегrense 3.....	86
	Innføring i skap.....	86
5.4.6	Beskyttelsestiltak sone 3.....	88
	Jording.....	88
	Skjerming.....	88
	Lederføring.....	88
	Oppsummering anbefalte beskyttelsestiltak.....	88
5.5	KOMMENTARER TIL ANBEFALINGENE.....	89

5.6	REFERANSER.....	90
6	DOKUMENTASJON OG VERIFISERING AV EMP BESKYTTELSE	91
6.1	DOKUMENTASJON AV EMP-BESKYTTELSE	91
6.1.1	Informasjon som bør være med	91
6.2	VERIFISERING AV EMP-BESKYTTELSE	92
6.2.1	Testmetoder	92
6.2.2	Kontrollrutiner	93
6.3	REFERANSER.....	94
V1	VEDLEGG 1: DEFINISJONER OG TERMINOLOGI.....	95
V1.1	ALFABETISK LISTE.....	95
V1.2	ELEKTROMAGNETISKE FELT: NÆR- OG FJERNFELT	105
V1.2.1	Kort om størrelser	105
V1.2.2	Elektromagnetiske bølger i luft (vakuum).....	105
V1.2.3	Elektromagnetiske bølger i metaller.....	106
V1.3	DESIBEL SOM MÅLEENHET.....	108
V1.4	REFERANSER.....	109
V2	VEDLEGG 2: FORSKRIFTER, RETNINGSLINJER OG NORMER	111
V2.1	INNLEDNING	111
V2.2	NORSKE FORSKRIFTER OG RETNINGSLINJER.....	111
V2.3	INTERNASJONALE NORMER	113
V2.3.1	HEMP-relaterte normer	114
V2.3.2	EMC-relaterte normer	115
V2.3.3	Basisstandarder for elektriske relé	115
V2.4	REFERANSER.....	116
V3	VEDLEGG 3: VURDERING BESKYTTELSESSTRATEGI	117
V3.1	Metodikk.....	117
V3.2	Forutsetninger	117
V3.3	Kort om tegnbruk i figuren	118
V3.4	Resultater	118

0 INNLEDNING

0.1 MÅLGRUPPE

Denne håndboka er et hjelpemiddel for personer som skal planlegge nye eller endre eksisterende kraftforsyningsanlegg.

0.2 BAKGRUNN OG STATUS

Elektromagnetisk puls (EMP) er en samlebetegnelse for ulike typer feltkilder som kan påvirke elektriske og elektroniske installasjoner og systemer. Felles for EMP-kildene er at de i utgangspunktet er strålte, kortvarige, høyfrekvente elektromagnetiske felter med høy intensitet.

Dagens norske retningslinjer for sikring av kraftforsyningsanlegg mot EMP, pålegger en del anleggseiere å beskytte data- og sambandsrom samt viktig elektronisk utstyr. Fram til i dag har retningslinjene krevd at denne beskyttelsen utelukkende gjennomføres vha skjermede rom eller bygninger med en tilstrekkelig skjermvirkning.

Håndboka utvider beskyttelsesbegrepet i forhold til dagens retningslinjer: Skjermede rom eller bygninger kan være en del av beskyttelsesstrategien. En annen strategi for å oppnå tilsvarende EMP-sikring, kan være å beskytte utstyret lokalt vha skjermede skap, apparat med høyere egenimmunitet osv. Videre kan beskyttelsesstrategien omfatte alternative sikringstiltak som f eks reservelager og manuell operatørkontroll. Dermed oppnås større fleksibilitet på tiltakssiden, og disse kan i større grad tilpasses lokale forhold og gi en teknisk-økonomisk gunstig totalløsning.

0.3 INNHOLD

Denne dokumentasjonen ser spesielt på virkningene av EMP inn mot kraftforsyningsanlegg, og foreslår hvordan anlegg kan utformes for å redusere sannsynligheten for skader og forstyrrelser.

Boka gir først en oversikt over hvilke EMP-kilder som finnes, sammen med størrelsen på de elektromagnetiske feltene fra de ulike kildene (kap 1). Deretter viser boka hva slags EMP-påkjenninger de ulike truslene kan gi i et kraftforsyningsanlegg (kap 2).

Videre presenterer håndboka en metode for å systematisere den tradisjonelle EMP-beskyttelsen (jording, skjerming og avledning) i kraftanlegg. Metoden kalles soneinndeling og et generelt eksempel på inndeling av et kraftanlegg vises. I tillegg diskuteres alternative sikringstiltak, samt hvilke beredskapsmessige konsekvenser disse har. (Stikkord: Reservelager, manuell operatørkontroll osv.) (Kap 3.)

En teoretisk presentasjon av beskyttelsestiltakene jording, skjerming, avledning og filtrering blir deretter gjort (kap 4), før noen praktiske eksempler illustrerer prinsippene for EMP-beskyttelse i kraftanlegg (kap 5).

Til slutt gis det eksempel på hva dokumentasjon av et EMP-sikret anlegg bør inneholde, sammen med verifiseringsrutiner for EMP-godheten til anlegget (kap 6).

Definisjoner og terminologi, forskrifter og normer, samt en alternativ metode for vurdering av beredskapsstrategi blir presentert i egne vedlegg.

1 ULIKE TYPER EMP – GENERELL OVERSIKT

Dette kapitlet definerer begrepet EMP og klargjør grenseoppgangen mot tradisjonell EMC-problematikk og EMI. Videre blir fenomen som omfattes av samlebetegnelsen EMP beskrevet teoretisk, sammen med årsaken til at de oppstår. Målsetningen med kapitlet er å gi leseren en oversikt over hvilke EMP-kilder som eksisterer og deres karakteristika.

1.1 INNLEDNING

Elektromagnetisk puls (*electromagnetic pulse - EMP*) brukes i denne håndboken som en samlebetegnelse for strålte, kortvarige, høyfrekvente elektromagnetiske felter med høy intensitet ($f > 100$ kHz, $E \geq 1000$ V/m). Disse strålte kildene kan medføre skader og forstyrrelser i elektriske anlegg ved at feltene induserer transiente strømmer og overspenninger i anleggets ledere og komponenter. En viktig del av beskyttelsestiltakene blir derfor å beskytte installasjoner og anlegg både mot strålt og ledningsbundet støy.

Følgende EMP kilder eksisterer :

- Lynutladninger
 - elektromagnetiske felter fra lynkanalen (LEMP - Lightning EMP)
(Innmating av lynstrømmen etter direkte nedslag i luftledninger, kabler etc regnes ikke som en EMP-kilde i denne håndboken, se nedenfor.)

I forbindelse med krig og sabotasje vil kraftforsyningsanlegg også kunne bli utsatt for EMP fra

- Kjernefysisk sprengning (NEMP - Nuclear EMP), som inkluderer
 - HEMP- (High altitude nuclear EMP) kjernefysisk sprengning over atmosfæren (≥ 30 km over bakken)
 - SREMP - (Source Region EMP) sprengninger nær jordoverflata (kort avstand)
 - SGEMP - (System Generated EMP) sprengninger nær system, hvor innfallende røntgen- og γ -stråler skaper strømtettheter i systemets struktur gjennom direkte påvirkning
- Radiofrekvente våpen (RFW - Radio Frequency Weapon), herunder
 - MEMP (Man-made EMP) puls fra (mobil) EMP-generator
 - HPM (High Power Microwave) høyeffekt mikrobølgekilde

Direkte lynnedslag i luftledninger, kabler e l regnes ikke som en EMP-kilde i denne håndboken. Slike nedslag har likevel vært dimensjonerende for utføringen av jordingsanlegg og plasseringen av vern i eksisterende kraftforsyningsanlegg. Disse tiltakene vil også ha en viss beskyttelseeffekt mot en del av EMP-truslene. Håndboka forsøker derfor å ta utgangspunkt i dagens beskyttelsespraksis, og spesifisere hva som blir tilleggskrav ved EMP-sikring av anlegg.

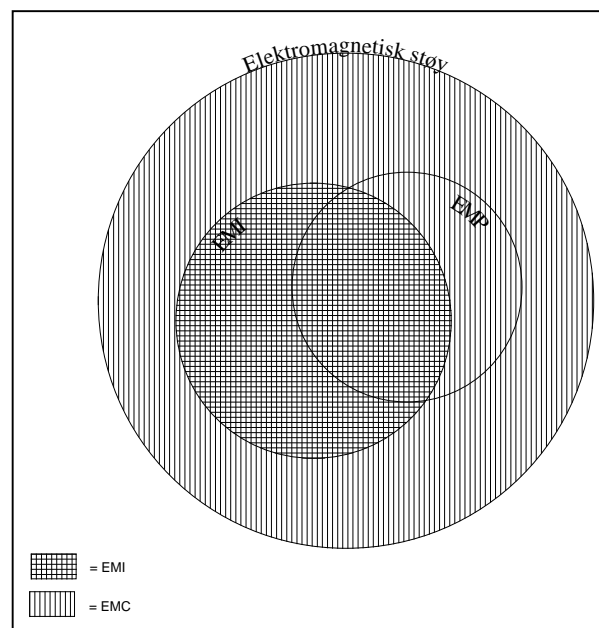
1.2 EMP I FORHOLD TIL EMI OG ØVRIG EMC-PROBLEMATIKK

Elektromagnetisk puls - EMP - omfatter som tidligere nevnt kortvarige, høyfrekvente elektromagnetiske fenomener med kraftige feltstyrker. Legg merke til at begrepet EMP ikke er begrenset til å omfatte enkeltpulser, men også omfatter sinusvarierende bølger som f eks HPM. For å plassere EMP inn i EMC-begrepet er det nødvendig med noen andre definisjoner først:

- Elektromagnetisk støy (*electromagnetic disturbance*) er ethvert fenomen som kan forringe funksjonen til en enhet, utstyr eller system. [1.1]
- Elektromagnetisk forstyrrelse (*electromagnetic interference - EMI*) er forringelse av funksjonen til en enhet, overføringskanal eller system forårsaket av elektromagnetisk støy. [1.1]

Legg merke til at elektromagnetisk støy og forstyrrelse blir hhv årsak og virkning med denne definisjonen. Merk også at elektromagnetisk forstyrrelse ikke nødvendigvis medfører noen permanent endret tilstand, men bare kan være en tidsavgrenset forringelse av funksjonen.

Med dette utgangspunktet vil elektromagnetisk puls inngå som en del av begrepet elektromagnetisk støy: EMP er et elektromagnetisk fenomen med potensiale til å forringe funksjonen til utstyr oa, tilsvarende definisjonen av elektromagnetisk støy. Avhengig av amplituden og frekvensen på støyen samt immuniteten til utstyret/systemet, kan EMP-påkjenninger noen ganger føre til en forringelse av funksjonen til elektrisk utstyr. Pulsen vil i så fall være en EMI-kilde. Dette er forsøkt illustrert i figuren nedenfor.



Figur 1.1. Skisse av sammenhengen mellom EMP og andre sentrale støybegreper.

Elektromagnetisk sameksistens - EMC - omfatter arealet utenfor EMI-sirkelen, men innenfor sirkelen som avgrenses av den elektromagnetiske støyen i fig 1.1. I dette EMC-området er apparat og utstyr elektromagnetisk kompatibel. Det betyr at amplituden på støyen (emisjonsnivået) ligger tilstrekkelig under immunitetsnivået til apparat og utstyr:

- Elektromagnetisk sameksistens eller kompatibilitet (*electromagnetic compatibility - EMC*) er utstyrs evne til å fungere tilfredsstillende i sitt elektromagnetiske miljø, uten å introdusere utålelig elektromagnetisk støy på noe som helst i dette miljøet. [1.1]

Med andre ord er et system elektromagnetisk kompatibelt dersom det ikke forstyrrer seg selv eller andre systemer, og heller ikke er mottakelig for støy fra sitt elektromagnetiske miljø.

Målsetningen med denne håndboka er å beskrive hvordan kraftforsyningsanlegg skal utformes for å unngå forstyrrelser fra eventuelle EMP-kilder. Dvs avpasse immunitetsnivået til det dagens trusselbilde av EMP-påkjenningsene krever.

1.3 BESKRIVELSE AV EMP-FENOMENER

1.3.1 Elektromagnetisk puls fra lynkanal - LEMP

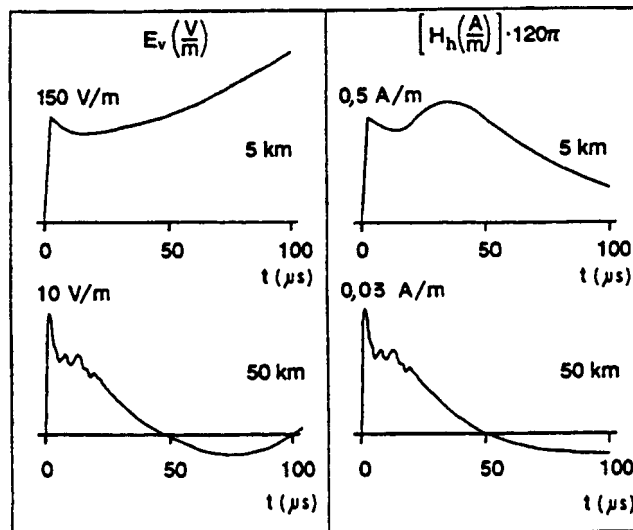
LEMP (lightning electromagnetic pulse) er elektromagnetiske felter som dannes fra strømmen i en lynkanal. Utladningene langs lynkanalen gir opphav til strålte elektriske (E) og magnetiske (B) felter som forplanter seg i alle retninger rundt denne. Disse feltene kan deles opp i nærfelt og fjernfelt (se vedlegg 1). Størrelse og varighet på den elektromagnetiske felpulsen vil avhenge av avstanden fra lynkanalen.

Karakteristika for den elektromagnetiske påvirkningen fra LEMP (betydelige variasjoner avhengig av avstanden fra lynkanalen og hvorvidt det er første eller etterfølgende delutladning):

- Maksimal elektrisk feltstyrke E varierer typisk mellom 100 V/m (5 km fra lynkanalen) og 100 kV/m (20 til 50 m fra lynkanalen) [1.2, 1.4, 1.17]
- Puls fronttid: Hundretalls nanosekunder [1.2, 1.19]. (Typisk 2,4 μ s for første utladning, 0,5 μ s for etterfølgende. [1.17])
- Puls varighet: Noen titalls mikrosekunder
- Bølgeimpedansen: Pulsen opptrer som en plan elektromagnetisk bølge (dvs fjernfelt) for avstander på typisk noen titalls kilometer. [1.2]
- Eksponeringsområde: Flere titalls kilometer fra lynutladningen, men skadelige effekter på kraftforsyningsanlegg i all hovedsak begrenset til en radius på ca 1 km fra lynkanalen. [1.17]

Dersom en betrakter feltbidraget fra et segment av lynkanalen, finner en at nærfeltene avtar med andre og tredje potens av horisontal avstand R fra lynkanalen, mens fjernfeltet avtar med første potens av R. Når R er stor, dvs i fjernfeltet, vil det resulterende feltet fra lynkanalen ha en frontsteilhet som er proporsjonal med lynstrømmens frontsteilhet og omvendt proporsjonal med R [1.2]. Nærfeltene er særlig viktige ved direkte lynnedslag i en stasjon eller dens nære omgivelser. Fjernfeltet vil være dominerende ved lynutladninger i avstander større enn typisk 10 km.

Undersøkelser viser at det resulterende felt fra lynutladninger er dominert ved B-feltens horisontale komponent og E-feltens vertikale komponent. Figur 1.2 viser eksempel på registrerte felter ved kunstig trigget lyn (etterfølgende utladning), i en avstand på henholdsvis 5 og 50 km fra nedslagsstedet. Feltene kan dekomponeres i en front- og en halekomponent, hvor frontkomponenten er sterkt assosiert med fjernfeltet. En ser at halekomponenten avtar vesentlig raskere med avstanden enn frontkomponenten.



Figur 1.2 Typisk form på vertikal komponent av E-felt og horisontal komponent av B-felt. (Kilde: [1.3].)

Beregninger [1.4] indikerer at i en avstand på 20 m fra nedslagsstedet vil en typisk etterfølgende delutladning gi en elektrisk feltstyrke med toppverdi i størrelsesorden 100 kV/m.

1.3.2 Kjernefysisk sprengning - NEMP

Som nevnt foran, kan NEMP (*nuclear electromagnetic pulse*) deles inn i

- HEMP - (*High altitude EMP*) kjernefysisk sprengning i ≥ 30 km høyde over bakkenivå [1.5]
- SREMP - (*Source Region EMP*) sprengninger nær jordoverflata (kort avstand)
- SGEMP - (*System Generated EMP*) sprengninger nær system på bakken eller i rommet

Et HEMP-beskyttet anlegg må ha immunitet mot de innkommende elektromagnetiske bølgene fra den kjernefysiske eksplosjonen. Fra SREMP og SGEMP vil påkjenningene i tillegg til elektromagnetiske felter, omfatte bl a varme- og trykkbølger samt ioniserende stråling. For denne håndboka er det ikke relevant å inkludere SREMP og SGEMP til trusselbildet som skal beskrives. Resten av håndboka vil derfor bare behandle HEMP-påkjenninger i forbindelse med kjernefysiske sprengninger.

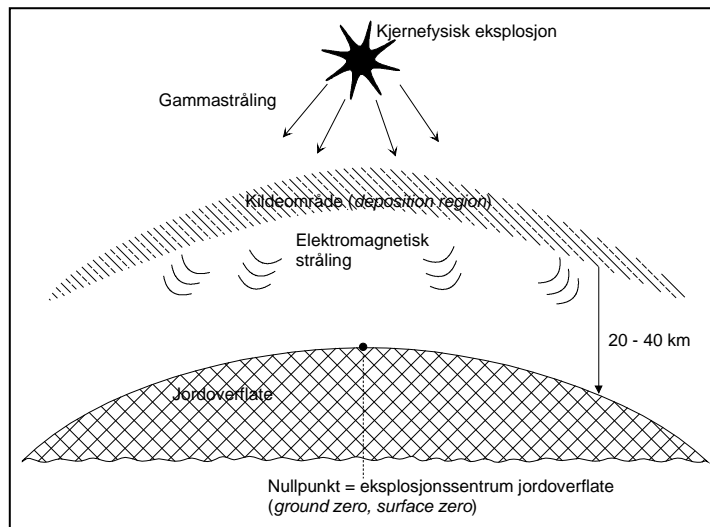
Ved en kjernefysisk sprengning i stor høyde over bakken (HEMP), vil et stort geografisk område på jordoverflaten bli eksponert for det innkommende feltet. Tre ulike typer elektromagnetiske pulser kan observeres ved jordoverflaten som følge av en HEMP-eksplosjon:

- HEMP type 1 (*early-time HEMP*) er en puls i ns-området
- HEMP type 2 (*intermediate-time HEMP*) er en puls i μ s-/ms-området
- HEMP type 3 (*late-time HEMP*) induserer spenningsforskjeller i jordskorpa av varighet minutt

HEMP type 1 , E_1 (*early-time HEMP*) [1.5, 1.6, 1.7, 1.8, 1.9,1.10]

Rundt den kjernefysiske eksplosjonen dannes umiddelbart en intens stråling (røntgen- og γ -stråling), som forplanter seg med lyshastigheten inn mot jordatmosfæren. I den komprimerte luften under eksplosjonsstedet, kildeområdet, blir elektroner revet løs fra luftmolekylene av γ -

strålingen (Compton effekt). Disse radielt rettede elektronstrømmene vil avbøyes pga jordmagnetfeltet og bevege seg i sirkulære spiralbaner langs magnetfeltlinjene. Dette er opphavet til en elektromagnetisk bølge som stråler ned mot jordoverflaten, se fig 1.3. For flere detaljer om fysikken, anbefales [1.6, 1.10].

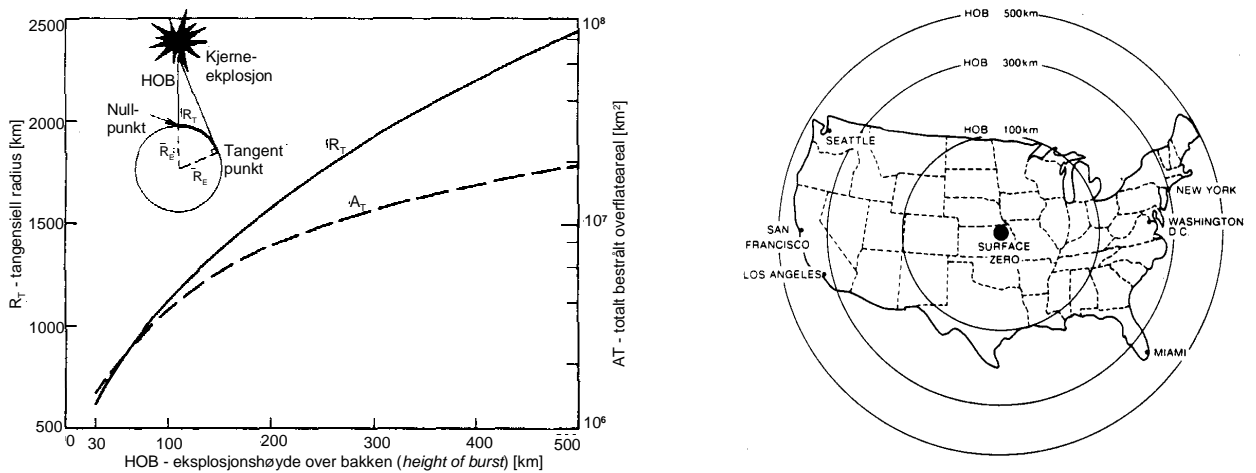


Figur 1.3 Skjematisk presentasjon av HEMP type 1 (*early-time HEMP*) fra en kjernefysisk eksplosjon i atmosfæren. Punktet på jordoverflaten rett under eksplosjonssentrum kalles nullpunkt. Skisse etter [1.5, 1.8].

Karakteristika for den innkommende elektromagnetiske bølgen på jordoverflata:

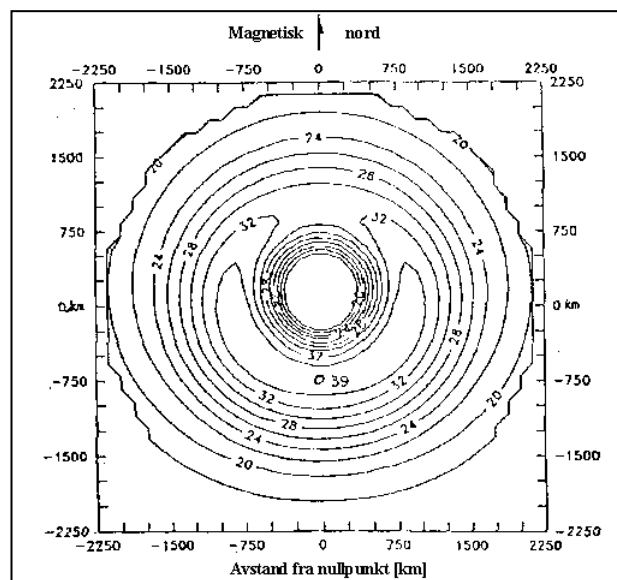
- Høy maks elektrisk feltstyrke E_1 . (Pga fysiske begrensninger, maks $E_1=50$ kV/m [1.11])
- Puls fronttid: noen få nanosekunder
- Puls varighet: noen titalls nanosekunder (opp til 100 ns)
- Bølgeimpedans på 377Ω , dvs en plan elektromagnetisk bølge (fjernfelt)
- Eksponeringsområde: Den synlige delen av jordoverflata sett fra eksplosjonsstedet.
- Elektrisk felpolarisasjon: Normalt på bevegelsesretningen og retningen til det jordmagnetiske feltet i kildeområdet.

Figur 1.4 viser hvordan arealet på det eksponerte området øker med økende eksplosjonshøyde over bakken.



Figur 1.4 Sammenheng mellom eksplonsjonshøyde over bakken (HOB) og eksponert område på jorda fra en HEMP. Til venstre er området uttrykt som lengden R_T mellom nullpunktet og punktet hvor HEMP-strålingen tangerer jordoverflata. (Kilde: [1.8].) Til høyre er eksponert område skissert som funksjon av noen utvalgte eksplonsjonshøyder på en kartskisse av USA. (Kilde: [1.8].)

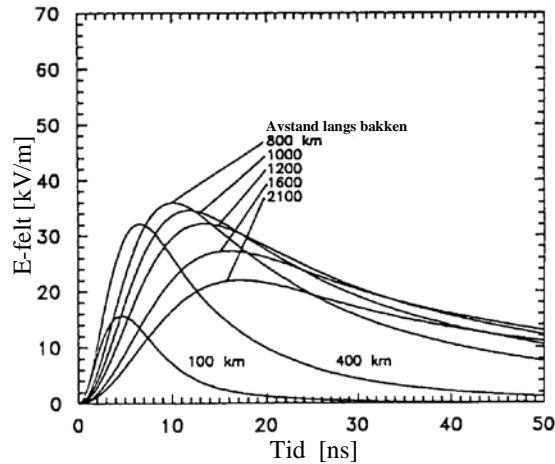
Fig 1.5 viser et beregningseksempel på hvordan den maksimale feltstyrken varierer over eksponeringsområdet ved sprengning av en bombe i 400 kilometers høyde [1.11]. Som det går fram, varierer den maksimale feltstyrken relativt lite over det eksponerte området: Det fås en maksimal feltstyrke på 39 kV/m like sør for eksplonsjonsstedet, mens feltstyrken i randen på det eksponerte kommer opp i 20 kV/m. Feltstyrken er forholdsvis lav rett under eksplonsjonsstedet (nullpunktet). Usymmetrien i feltbildet skyldes påvirkning fra jordas magnetfelt.



Figur 1.5 Variasjon i maksimal elektrisk feltstyrke over eksponert område. (Kilde: [1.11].)

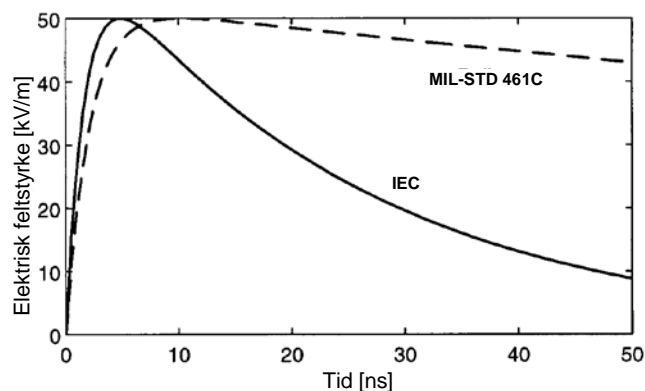
Den forholdsvis lave variasjonen i maksimal feltstyrke skyldes at jordatmosfæren er kilde til den elektromagnetiske bølgen over hele det eksponerte området. (Ved sprengning i lav høyde, SREMP, absorberes derimot γ -strålingen innenfor 1 – 3 km avstand, og det resulterende feltet avtar deretter som $1/R$ i en avstand R fra sprengningen).

Figur 1.6 viser beregnet tidsforløp for elektrisk feltstyrke, i ulike avstander vest for eksplosjonsstedet [1.12]. Som en ser varierer fronttiden (10%-90%) mellom ca 3 og 10 ns.



Figur 1.6 Feltstyrkens tidsforløp i ulike avstander vest for eksplosjonsstedet. Kilde: [1.12]

Fordi man ikke kan forutsi eksplosjonsstedet og dermed heller ikke størrelse og varighet på innkommende pulser, blir det vanskelig å forutsi påkjenningene fra en ev HEMP. IEC benytter en puls med stigetid 2,5 ns, halveringstid 23 ns og maks amplitude 50 kV/m i sine standarder for utstyrstesting . Denne pulsen ivaretar de korte stigetidene som kan opptre nær nullpunktet (se fig 1.3), samt maksimal amplitude på E-feltet som kan forekomme i eksponeringsområdet. Bølgeformen er vist i fig 1.7 [1.13]. Figuren viser også en alternativ bølgeform som har vært benyttet for typeprøving av militært utstyr (MIL-STD 461C). I forhold til kurvene i fig 1.6 har MIL-STD-bølgen for lang varighet og derved for høyt energiinnhold. Både IEC- og MIL-STD-kurveformen er dobbelteksponensielle funksjoner.



Figur 1.7 HEMP type 1 (E_1) kurveformer til prøving og testing av apparat og systemer. Kilde: [1.13]

HEMP type 2, E_2 (intermediate-time HEMP) [1.5, 1.7, 1.8]

Umiddelbart etter den første, raske transienten, vil gamma-stråler fortsette å samvirke med luftmolekyler i kilderegionen og via Compton elektroner danne elektromagnetiske felt av noe lavere intensitet. Forsinkelsen i tid skyldes gammapartikler (stråler) som gjenstår etter multiple

kollisjoner med molekyler i våpenet, samt gammastråler som først blir dannet i det nøytroner fra den kjernefysiske eksplosjonen når atmosfæren og kolliderer med luftmolekylene der.

Karakteristika for den innkommende elektromagnetiske bølgen på jordoverflata:

- Elektrisk feltstyrke E_2 : Typisk $E_2 = 10\text{-}100$ V/m
- Puls fronttid: Noen få hundretalls nanosekunder
- Puls varighet: Fra 100 nanosekunder til noen titalls millisekunder
- Bølgeimpedans på 377Ω , dvs en plan elektromagnetisk bølge (fjernfelt)
- Eksponeringsområde: Den synlige delen av jordoverflata sett fra eksplosjonsstedet.
- Elektrisk feltpolarisasjon: Samme som HEMP type 1 (Normalt på bevegelsesretningen og retningen til det jordmagnetiske feltet i kildeområdet.)

HEMP type 3, E_3 (late-time HEMP) [1.5, 1.6, 1.7, 1.8, 1.14]

Et annet navn på HEMP type 3 er magnetohydrodynamisk EMP (*magnetohydrodynamic EMP – MHD-EMP*). Pulsen gir en forstyrrelse i jordas magnetfelt, og et tilhørende induert elektrisk felt E_3 i jordoverflata parallelt med bakken. Årsaken til HEMP type 3 er ionisert luft og våpenrester som er i bevegelse i øvre del av atmosfæren pga eksplosjonen. For flere detaljer, se [1.7, 1.14].

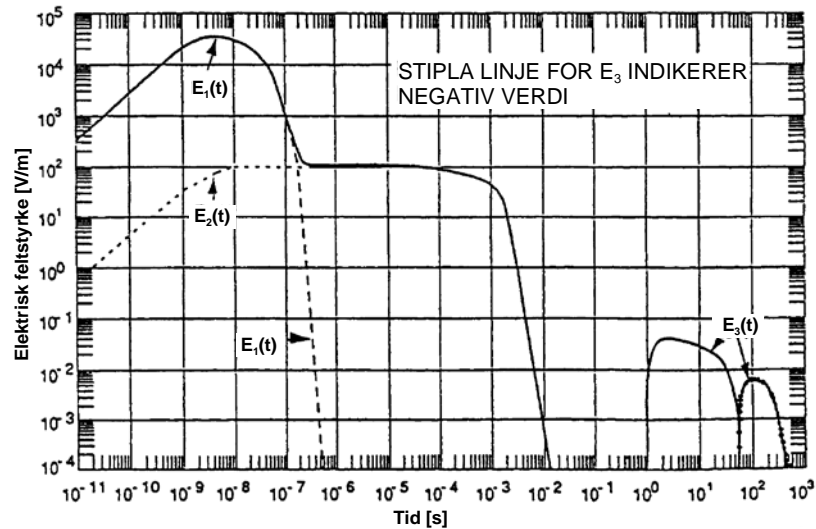
Karakteristika for det induerte elektriske feltet E_3 ved jordoverflata:

- Elektrisk gradient i jordskorpa: Typisk noen titalls V/km
- Puls fronttid: Typisk i området noen få sekunder
- Puls varighet: Typisk opp til 100 s
- Eksponeringsområde: Registrerbar over hele jorden

Fenomenet skaper forøvrig de samme virkningene som geomagnetisk forstyrrelse eller solstormer. Dette er variasjoner i jordas magnetfelt pga forstyrrelser fra ladede partikler slynget ut fra sola under solstormer. Se [1.2, 1.6, 1.7] for flere opplysninger. Sammenlignet med solstormer har HEMP type 3 noe høyere amplitude, men kortere varighet.

HEMP oppsummering [1.5]

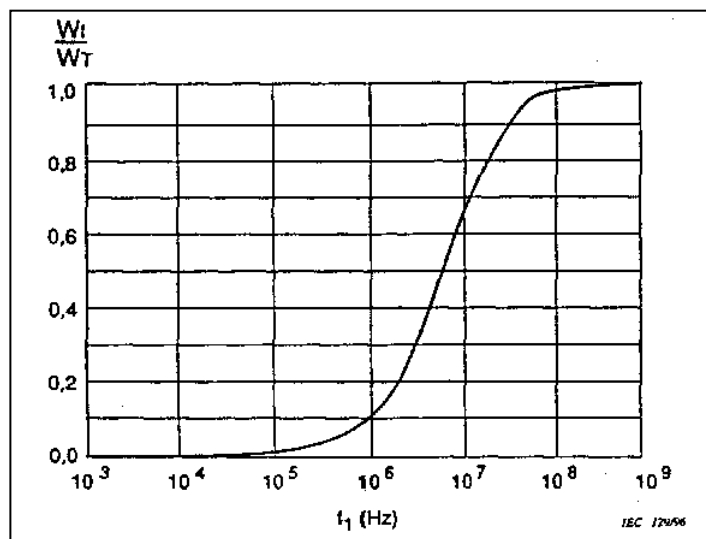
I fig 1.8 er størrelse og varighet for de elektromagnetiske pulsene fra HEMP vist i tidsplanet ($E_1 + E_2 + E_3$). Totalpulsen vil være den til enhver tid øvre kurven i figuren.



Figur 1.8 Typisk størrelse og varighet av de observerbare elektromagnetiske pulsene som inngår i HEMP-begrepet ($E_1 + E_2 + E_3$). Kilde: [1.5].

Det er grunn til å understreke at E_1 og E_2 er strålte, innkommende bølger, mens E_3 er effekten på bakken når virkningen av jorda er tatt med. På samme måte vil det skje en refleksjon fra jordoverflaten ved E_1 og E_2 , og det nye totalfeltet over bakken vil se annerledes ut enn det innkommende. Etter en ev puls vil virkningen fra jordsmonnet komme inn og påvirke totaleffekten av EMP-påkjenningene. De interesserte henvises til [1.5, 1.6]

En annen viktig parameter ved HEMP er energiinnholdet i pulsen som funksjon av frekvens. Fig 1.9 viser energiflyt pr flateenhet, W_f , som funksjon av frekvens for HEMP type 1. W_f er normalisert i forhold til den totale energiflyten pr flateenhet, W_T , fra E_1 . (W_T er omlag $0,114 \text{ J/m}^2$ for E_1 . Energiflyten fra E_2 og E_3 utgjør til sammenligning bare $0,013 \text{ J/m}^2$ summert [1.5].)



Figur 1.9 Energiflyt pr flateenhet, W_f , for standard puls HEMP type 1 mellom frekvensene $f = 1 \text{ kHz}$ og f_1 . Kurven er normalisert i forhold til den totale energiflyten, W_T , fra en standard puls HEMP type 1. Framstillingen er kumulativ: Verdien avlest på kurven for en gitt frekvens f_1 illustrerer W_f sin relative andel av W_T summert for alle frekvensene mellom 1 kHz og f_1 . Kilde: [1.5].

Som det går fram av figuren over, utgjør energiflyten summert fram til og med 100 kHz mindre enn 2 % av den totale energiflyten W_T . På samme måte er energiflyten omtrent 98 % for 100 MHz. Sagt på en annen måte, er 96 % av energiflyten mellom 0,1 og 100 MHz for HEMP type 1.

1.3.3 Radiofrekvente våpen - RFW

Radiofrekvente våpen (RFW) frambringer EMP ved konvensjonell teknologi, dvs uten bruk av kjernefysisk ladning. Hensikten med RFW-våpen er å lage en så kraftig EMP at en kan skade viktig elektronisk utstyr hos en fiende. Slike våpen kan bli benyttet i en krigssituasjon, men en kan også tenke seg slike våpen benyttet i fredstid ved sabotasje.

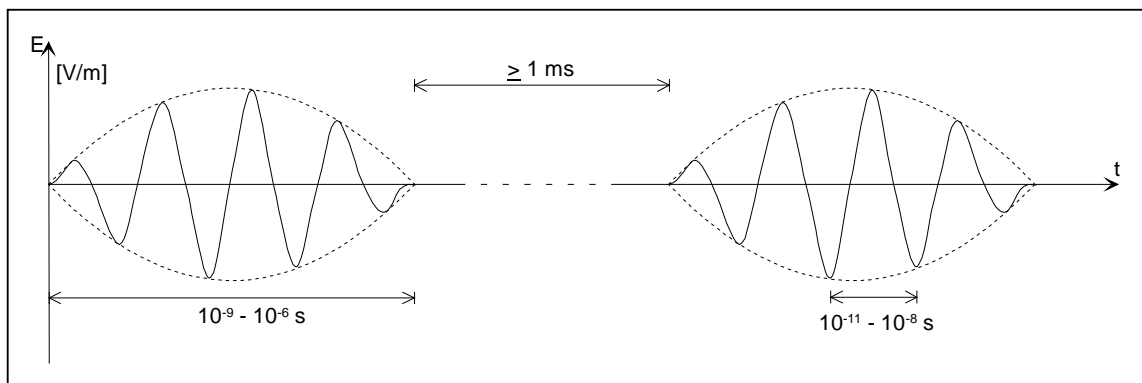
Avhengig av pulskilden skiller en mellom to typer RFW [1.15]:

- MEMP (Man-made EMP).
- HPM (High Power Microwave)

Ved MEMP frambringes en steil spenningsbølge på en transmisjonslinje ved bruk av hurtige svitsjer. De kortvarige enkeltpulserne kan ha stigetider på en brøkdel av et ns. Den resulterende bølgen fra linja blir reflektert vha et parabol speil, horn eller andre antenner, slik at pulsen kan siktes inn mot et mål. Denne type RFW er i prinsippet enkel å produsere og kan ha relativt lav vekt. (Kan anbringes i bærbar koffert.) Betegnelsen UWB (Ultra Wide Band) benyttes også for denne EMP, vanligvis for å beskrive en impuls/bredbåndsjammer

HPM frambringer en rettet puls på en lignende måte, men det benyttes her en mikrobølgekilde: En meget høyspent og pulset spenningskilde genererer pulser som ledes til et mikrobølgerør (magnetron e l). Det oppstår dermed en mikrobølge med mange svingninger. Denne type RFW kan generere modulerte pulser hvor energien er knyttet til utvalgte frekvenskomponenter. Dette øker sannsynligheten for å påføre skade på utstyr. I forhold til MEMP er at virkningsgraden er lavere ($\leq 50\%$), og en større og tyngre strømforsyning er påkrevet.

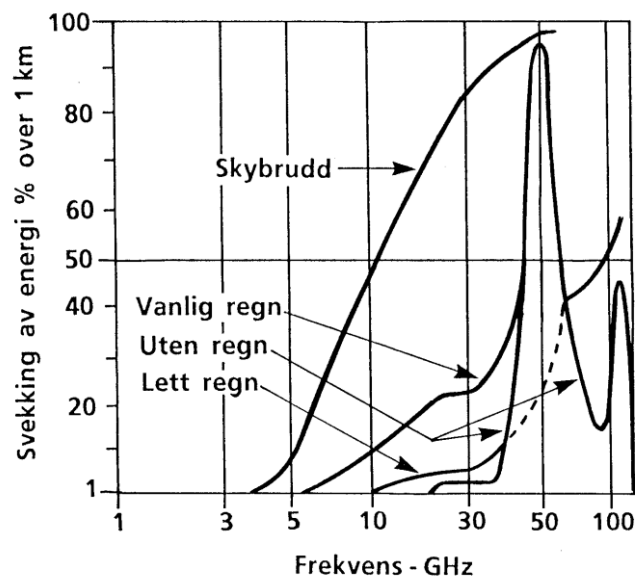
HPM våpen kan frambringe et tog av modulerte pulser, som skissert i fig. 1.10 [1.15]. Aktuelt frekvensområde for hver puls kan være 0.1-30 GHz. Den høye frekvensen medfører at koplingen til objekter (ledninger) med liten utstrekning blir høy. Maksimal kopling fås til objekter med en utstrekning lik bølgelengden. Eksempelvis gir en bølge med frekvens på ca 1 GHz optimal kopling til en 30 cm leder pga resonans. Grunnresonansene er de viktigste. Ved høyere frekvenser avtar antennevirkningen fordi retningsvirkningen blir mere markant. Frekvensen på HPM-våpenet vil ofte variere for at flest mulige ledninger skal komme i resonans. Alternativt kan det brukes kortvarige pulser med et bredt frekvensspekter.



Figur 1.10 Eksempel på HPM bølgeform. Kilde: [1.15].

Pga sin høye frekvens har mikrobølger også en evne til å trenge inn gjennom små åpninger i bygninger og sprekker i elektronikk kabinet. Målinger viser at koplingen til det elektromagnetiske miljøet inni et lukket rom er maksimal når bølgelengden er lik diameteren på en åpning i rommet.

Bruk av høy frekvens kan gi en meget direktiv stråle og dermed stor rekkevidde, men det er en grense for hvor høye frekvenser det er praktisk mulig å benytte pga svekkelse i regn eller tåke. Mulig frekvensområde er begrenset til 94 GHz, 30-35 GHz, samt under 18 GHz som vist i figur 1.11.



Figur 1.11 Svekkelse av energien fra mikrobølger i atmosfæren som funksjon av frekvens.

1.4 REFERANSER

- 1.1. IEC 50(161) International Electrotechnical Vocabulary. Electromagnetic compatibility.
- 1.2. CIGRE WG 36.04: Guide on EMC in power plants and substations. 1997 Version.

- 1.3 Y. T. Lin et al.: "Characterization of lightning return stroke electric and magnetic fields from simultaneous two-station measurement." *Journal of Geophysical Research*, vol 84, 1979, s 6307-6314.
- 1.4 M.J. Master et. al.: "Calculation of lightning return stroke electric and magnetic fields" *Journal of Geophysical Research*, vol. 86, s. 12127-12132, 1981.
- 1.5 IEC 61000-2-9:
IEC 61000: Electromagnetic compatibility. Part 2: Environment. Section 9: Description of HEMP environment – Radiated disturbance.
Basic EMC Publication. 1996.
- 1.6 Grønhaug, K.L.: *Elektromagnetisk puls. Håndbok* 1978.
Intern rapport F-657, Referanse 359 –F/136,
FFI (Forsvarets Forskningsinstitutt), 1978.
- 1.7 Reddoch T. W. et al: *HEMP Emergency Planning and Operating Procedures for Electric Power Systems*. Oak Ridge National Laboratory. ORNL/Sub/91-SG105/1.
- 1.8 NATO Communications and Information Systems Agency: *EMP Engineering practices handbook*. Second Edition. NATO File no 1460-3. 1989.
- 1.9 Bell Laboratories: *EMP Engineering and design principles*. Electrical Protection Department, Loop Transmission Division. 1976
- 1.10 Lee K. S. H. et al: *EMP Interaction: Principles, Techniques and Reference Data*. (A complete concatenation of technology from the EMP interaction notes). Report no DC-EH-1289. US Air Force Weapon Technology. 1979.
- 1.11 V. J. Kruse et al: *Flashover vulnerability of transmission and distribution lines to high-altitude electromagnetic pulse (HEMP)*.
IEEE Trans. on PWRD, vol 5, no. 2, 1164-1169, 1990.
- 1.12 C.L. Wagner, W.E. Ferro: "Recommended engineering practice to enhance the EMI/EMP immunity of electric power systems", report ORNL/Sub-91-SG913/1, Oak Ridge National Laboratory, December 1992. (87 sider).
- 1.13 M. Ianoz, B.I.C. Nicoara, W.A. Radasky: "Modeling of an EMP conducted environment", *IEEE Trans. EMC*, vol. 38, no. 3, s.400-413, august 1996.
- 1.14 Grønhaug, K.L.: *Elektromagnetisk puls*, vol 2. *Virkninger og vern*.
FFI/Rapport –82/3003. 1982.

- 1.15 K.L. Grønhaug, P. Thoresen: “Radiofrekvente våpen med høy effekt og energi”, Rapport FFI/NOTAT-92/4021, Forsvarets Forskningsinstitutt (21 sider).
- 1.16 H.K. Florig: “The future battlefield : a blast of gigawatts?”, IEEE Spectrum, Mars 1988, s. 50-54.
- 1.17 IEC 77C/58/CDV: Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 5: Installation and mitigation guidelines - Section 3: HEMP Protection concepts.
Project number 61000-5-3.
1998-04-10
- 1.18 C.L. Longmire :
“On the Electromagnetic pulse produced by nuclear explosions”,
IEEE Trans. EMC, vol. 20, no. 1, s. 3-13, februar 1979.
- 1.19 C.D. Weidman, E. P. Krider: Submicrosecond risetime in lightning return-stroke fields.
Geophysical Research Letters, vol 7, no 11, s 955-958, 1980.

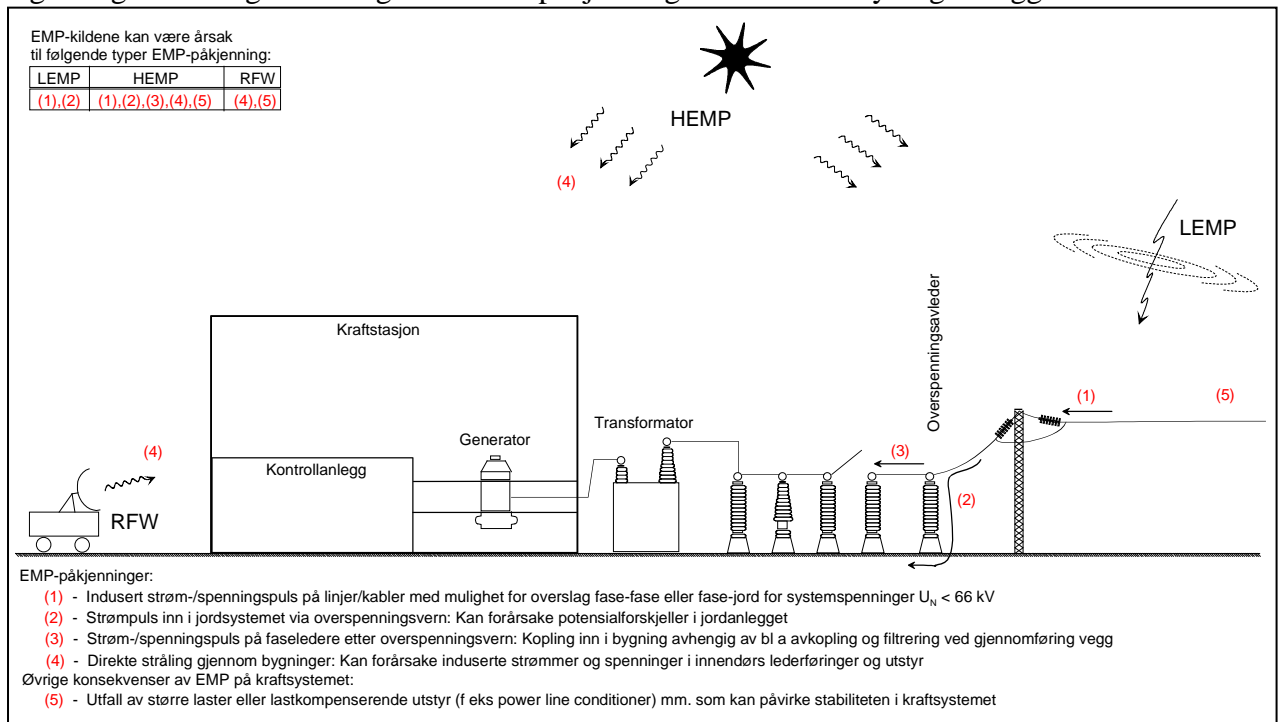
2 EMP-PÅKJENNINGER I KRAFTFORSYNINGSSANLEGG

Dette kapitlet gir en oversikt over virkningen EMP-påkjenninger kan ha for et kraftforsyningsanlegg. Den ledningsbundne støyen fra HEMP blir bl a sammenliknet med påkjenningene fra direkte lynnedslag som anleggene er dimensjonert for å tåle: Et poeng er å vise hva som er forskjellig for påkjenningene fra bl a HEMP kontra tradisjonell EMI. Tåleevnen til en del utsatte komponenter og utstyr blir vist.

Målsetningen med kapitlet er å gi leseren en oversikt over hvilke påkjenninger EMP kan gi kraftforsyningsanlegg, samt peke på hvilke komponenter og utstyr som er mest utsatt.

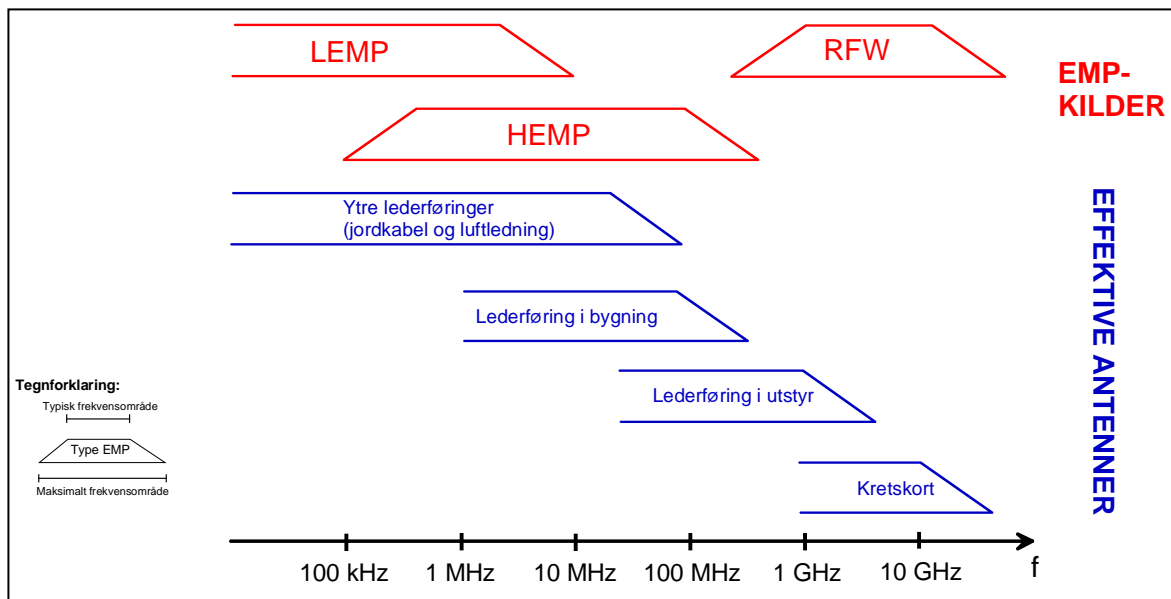
2.1 INNLEDNING

Fig 2.1 viser de ulike EMP-kildene som kan ramme et kraftforsyningsanlegg. I tillegg viser figuren grovt mulige virkninger av EMP-påkjenninger i et kraftforsyningsanlegg.



Figur 2.1 Prinsippskisse av ulike EMP-kilder og -påkjønninger som kan ramme et kraftforsyningsanlegg. Påvirkningsområdet er delvis antydnet med retningen på feltet.

Alle EMP-kildene lager i utgangspunktet strålte elektromagnetiske felt. Disse feltene kan igjen påvirke komponenter, utstyr og installasjoner i kraftforsyningsanlegg ved at det induseres kortvarige spenninger og strømmer som sekundæreffekter i ulike anleggsdeler. Funksjonsforstyrrelse eller varig skade kan oppstå dersom disse pulsene når fram til utstyr som ikke har tilstrekkelig immunitet overfor den tilførte energien. Hva som er de mest effektive mottakerantennene i anlegget, vil avhenge av type puls: LEMP, HEMP og RFW spenner over et stort frekvensområde, anslagsvis fra 10 kHz til 30 GHz. Koplingsgraden er bl a avhengig av lengden på de lederføringer som blir utsatt for denne strålingen. Figur 2.2 viser frekvensfordelingen for disse EMP-påkjønningene sammen med lederføringenes frekvensavhengighet som effektive mottakerantennener.



Figur 2.2 Grov skisse av aktuelle frekvensområder for ulike strålte EMP-påkjenninger, samt hvilke lederføringer som er effektive mottakerantenner for de ulike pulsene.

Underpunkt (5) i fig 2.1 antyder at en stor prosent av lasten i kraftnettet kan falle ut samtidig i tid pga EMP. (Dette gjelder kun for HEMP-påkjenninger, der E_1 -bølgen som kjent kan påvirke store geografiske områder samtidig.) All kraftelektronisk last, samt motorer og batterier vil være spesielt utsatt. Selv om dette ikke angår utførelsen av den konkrete EMP-beskyttelsen av et kraftforsyningsanlegg, vil det indirekte kunne påvirke stabiliteten kraftsystemet: I verste fall kan det føre til utfall av generatorer og linjer [2.3].

2.2 LEMP

Sammendrag:

- Koplingsvei: Lederføringer lengre enn 1 km (luftledninger og jordkabler)
- Forårsaker: Induserte spenninger og strømmer i lederne
- Mulige konsekvenser:

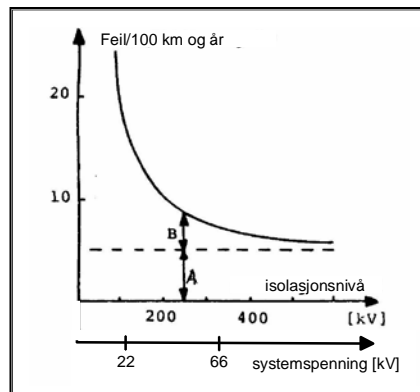
Utendørs luftledninger/kabler:

- Overslag fase-fase eller fase-jord for luftledninger med systemspenning $U_n < 66$ kV
- Mater inn strømmer i jordsystemet ved overspenningsavlederne. Kan igjen generere lokale potensialforskjeller i jordsystemet i kraftforsyningsanleggene.
- Mater inn spenningspulser i faselederne dersom avlederne ikke fungerer tilfredsstillende. Kan forårsake ødeleggelser i tilkoplede utstyr.

Som det går fram av fig 2.2, er LEMP først og fremst et problem for lengre lederføringer. Det betyr at det hovedsakelig er luftledninger og utendørs kabler som påvirkes. Induserte lynoverspenninger vil generelt være betydelig lavere enn ved direkte nedslag. En regner normalt med at for systemspenninger f.o.m 66 kV vil induserte lynoverspenninger ikke kunne gi overslag på linja. Størrelsen på den resulterende spenningsbølgen stiger med økende toppverdi på lynstrømmen og økende linjehøyde. Det antas at induserte lynoverspenninger på kraftledninger utgjør et vesentlig mindre EMC-problem i stasjonene enn nære tilbakeslag forårsaket av direkte nedslag. (Tilbake-

slag er overslag (jordslutning) mellom fase og jordline eventuelt fase og travers som er forårsaket av et direkte lynnedslag i jordline/travers.) På den annen side opptrer induerte lynoverspenninger med vesentlig større hyppighet enn det tilbakeslag gjør.

Fig. 2.3 viser hvordan antall isolasjonsfeil for ei linje varierer med isolasjonsnivå. Antall feil som skyldes induerte lynoverspenninger (B) avtar med økende isolasjonsnivå, mens feil som skyldes direkte nedslag bare endres i mindre grad (A). Figuren gjelder svenske forhold.



Figur 2.3 Skjematisk feilhyppighet som funksjon av nettets isolasjonsnivå [2.1]

2.3 HEMP

Den strålte elektromagnetiske pulsen HEMP kan i utgangspunktet induere kortvarige spenninger og strømmer i alle metallisk ledende strukturer, som f eks linjer, kabler, rør, kanaler osv. Det kan være hensiktsmessig å knytte virkningene i kraftforsyningsanlegg til de tre inndelingene av HEMP som ble gjort i kapittel 1.

HEMP type 1, E₁ (early-time HEMP) [2.2, 2.3]

Sammendrag:

- Koplingsvei: Alle metallstrukturer lengre enn 10 m (for utendørs linjer, kabler, rør e l)
- Forårsaker: Induserte spenninger og strømmer i metallstrukturene
- Mulige konsekvenser:

Utendørs luftledninger/kabler:

- Overslag fase-fase eller fase-jord for luftledninger med systemspenning $U_n < 66$ kV
- Mater inn strømmer i jordsystemet ved overspenningsavlederne. Kan igjen generere lokale potensialforskjeller i jordsystemet i kraftforsyningsanleggene.
- Spenningspulser mates inn mot anlegget etter avlederne. Dersom overspenningsavlederne ikke fungerer tilfredsstillende (f eks ikke raske nok), kan pulsene forårsake ødeleggelser i tilkoplede utstyr.

Metallstrukturer ført inn i bygninger (vann-, ventilasjonsrør e l)

- Fungerer som senderantennener for forstyrrelser fra utsiden til innsiden av skjermede bygninger dersom gjennomføring i vegg ikke er tilfredsstillende utført. Kan skape kraftige elektromagnetiske feltverdier ev også mate inn strøm-/spenningspulser i jordsystemet.

Utendørs kommunikasjonsanlegg (antennener, tele- og datakabler, ledere mm)

- Kan ødelegge tilkoplede utstyr pga strøm-/spenningspulser
- Kan fungere som senderantennener for uønsket støy på innsiden av skjermede bygninger
- Kan mate inn strømpulser i jordsystemet, med tilhørende potensialforskjeller i jordingsanlegget

Innendørs lederføringer:

- Induserer strøm-/spenningspulser direkte i innendørs lederføringer. Kan forårsake ødeleggelser i tilkoplede utstyr.

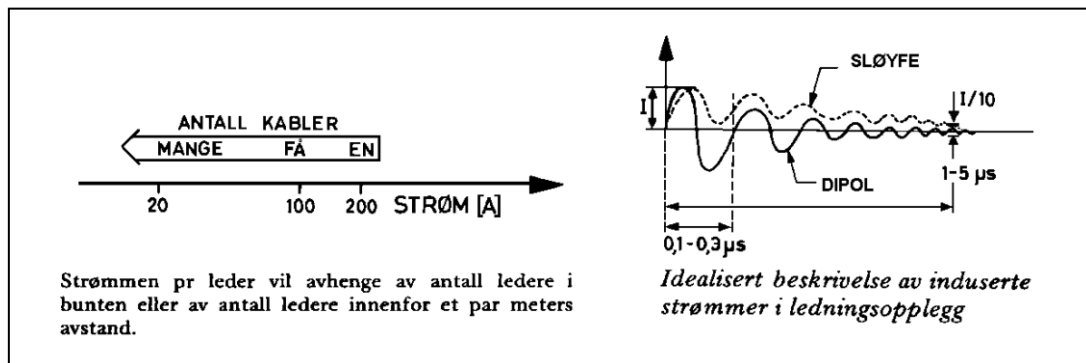
Koplingen til kraftforsyningsanlegg fra HEMP type 1 skjer i hovedsak gjennom utendørs luftledninger og kabler, antenner, ventilasjons- og vannrør av metall osv. Avhengig av godheten på skjermen i bygningen, kan pulsen også påvirke innendørs kabler og lederføringer direkte. Størrelsen på den induserte strømmen er avhengig av innfallsretningen til pulsen, lederens retning i forhold til magnetisk nord, høyde over/under bakkenivå og antall ledere. For innendørs ledere er koplingen svært komplisert.

Innkommende kraftkabler og -ledninger vil pga sin lange utstrekning være effektive antenner over store områder, og en alvorlig trussel med tanke på koplingsveier for E_1 inn mot kraftforsyningsanlegg. Basert på forenklete beregninger foretatt av FFI og sammenlikninger med ulike litteraturskilder [2.2, 2.4, 2.5], kan vi anta induserte strømmer av størrelsesorden 1 kA pr fase med varighet mindre enn 1 μ s for luftledninger. Denne innledende puls blir etterfulgt av mere langvarige oscillasjoner fra refleksjoner langs kablene inne i anlegget pga avgreininger, termineringer, tilkobling av utstyr e l.

Karakteristisk impedans for en luftlinje er i størrelsesorden 500 Ω og spenningen mot jord kan derfor bli typisk 500 kV. Luftlinjen kobles normalt til en kabel i et anlegg. Fordi den karakteristiske impedansen i en kabel er liten i forhold til en luftlinje, blir spenningen fase-jord tilsvarende redusert.

Størrelsen av indusert strøm i jordkabler er avhengig av jordsmonnets elektriske ledningsevne, dielektrisitetkonstant osv. Den karakteristiske impedansen og dermed den induserte spenningen er mindre enn for luftlinjer. Typiske strømstyrker kan være i området 50-400 A.

Kabelføringer i bygninger kan samlet få maksimalt 200 A indusert (for et antall ledere innenfor et par meters avstand), men strømmen pr leder kan bli vesentlig mindre. Målinger viser at strømmene blir oscillatoriske med frekvenser i området 1 – 20 MHz, avhengig av lengden på kablen (kursen). Er lederen åpen i enden blir forløpet av strømmen tilsvarende det som opptrer ved eksitasjon av en dipolantenne, dvs lite strøm og maksimal spenning nær enden. Danner kursen en lukket sløyfe blir responsen tilsvarende som for en sløyfeantenne, dvs sirkulerende strømmer. I en bygning kan mange slike dempede oscillasjoner fra forskjellige ledningskurser med forskjellige frekvenser og varigheter overlage hverandre og interferere. Figur 2.4 viser estimat av disse virkningene.



Figur 2.4 Estimert av induserte strømmer i ledningsopplegg i bygninger [2.6].

HEMP type 2, E_2 (intermediate-time HEMP) [2.2]

Sammendrag:

- Koplingsvei: Lederføringer lengre enn 1 km (utendørs luftledninger og jordkabler)
- Forårsaker: Induserte spenninger og strømmer i lederne
- Mulige konsekvenser:

Forventer normalt ingen problemer i kraftforsyningsanlegg [2.3, 2.7]. Noen litteraturkilder advarer mot å ignorere fenomenet i anlegg med lange overføringer. [2.8]

HEMP type 2 kopler bare effektivt til ledere lengre enn 1 km, dvs utendørs linjer og kabler. Fordi pulslengden er mye lengre enn HEMP type 1, varierer koplingen mye mindre med pulsens innfallsvinkel i forhold til bakken. På den andre siden spiller jordens ledningsevne en viktigere rolle for virkningen enn tilfellet er for HEMP type 1. I følge [2.3, 2.7] blir HEMP type 2 vanligvis neglisjert som trussel for kraftforsyningsanlegg, fordi man antar at anleggene tåler denne påvirkningen bra. (Den elektromagnetiske støyen tilsvarer for en stor del de interne transientene som kraftforsyningsanleggene selv genererer og allerede er immun mot. [2.9])

[2.2] gjør noen forenklete beregninger av maksimal strøm og kurveform fra HEMP type 2 for en enkelt leder: Kurveformen har typisk 25 μs fronttid og 1500 μs halvverditid. Avhengig av ledningsevnen i jord, kan en støystøm på mellom 200 og 800 A induseres i en luftlinje i følge litteraturkilden. (Når resistiviteten ρ i jordsmonnet varierer mellom 100 og 10000 Ωm .) For en kabel 1 m under bakken er tilsvarende verdi 50 til 450 A. I følge FFI er disse beregningene for unøyaktige: Verste-tilfelle beregninger med en mer nøyaktig modell foretatt av FFI, gir i stedet en maksimal støystøm på 100 A i en luftledning. (En blank leder med stort tverrsnitt i 10 m høyde, $\rho = 10000 \Omega\text{m}$). Strømmen blir den samme for kabler i bakken. (Ved flere parallelle ledere, f eks 3-fase, blir strømmen pr leder omlag $\frac{1}{3}$ av denne verdien.)

Disse verdiene støtter konklusjonen ovenfor om at E_2 kan neglisjeres som trussel for kraftforsyningsanlegg.

HEMP type 3, E₃ (late-time HEMP) [2.2, 2.3]

Sammendrag:

- Koplingsvei: Lange luftledninger der transformatorenes nøytralpunkt er jordet i hver ende av ledningene.
- Forårsaker: Injisering av likestrøm (egentlig strøm med frekvenser i mHz-området) i overføringsledningene via nøytralpunktet i stjernekoplete transformatorer. (Pga spenningsforskjeller mellom jordingspunktene til transformatorene, forårsaket av den elektriske feltstyrken i jordsmonnet.)
- Mulige konsekvenser: Permanente ødeleggelse forekommer sannsynligvis ikke, men forstyrrelser med utfall som ytterste konsekvens kan antagelig forekomme både i fordelingsnett og overføringsnett [2.9, 2.10]. Forstyrrelsene kan være
 - Skjevmetning av transformatorer med tilhørende metning. Medfører bl a:
 - Økt reaktivt effektforbruk med problemer å holde spenningen oppe
 - Generering av harmoniske strømmer
 - Tilhørende feilfunksjon i en rekke type vern (releer).
 - Feilfunksjon av statiske fasekompensatorer [2.11]
 - Feilfunksjon av jordete shuntkondensatorbatteri pga overstrøm i nøytralleder [2.11]
 - Risiko for feil i HVDC-anlegg pga mulig overstrøm i overharmoniske filter [2.11]

Litteraturkildene konkluderer noe forskjellig med hensyn til om HEMP type 3 kan gi utfall av kraftnettet eller ikke. Fenomenet er nær beslektet med geomagnetiske forstyrrelser, men har høyere amplitude og kortere varighet. Usikkerheten omkring virkningene av E₃ er relativt stor, fordi erfaringene naturlig nok er begrenset. I hovedsak overføres erfaringene fra virkningene av geomagnetiske forstyrrelser. Usikkerheten består bl a av om E₃-pulsene varer lenge nok til at transformatorer i overføringsnett kan gå i metning. Videre om amplituden er så kraftig at også større fordelingsnett kan få induert tilstrekkelig likestrøm til at transformatorene går i metning, noe som ikke skjer ved geomagnetiske stormer. (Fordelingstransformatorer nær fullast kan nå metning i løpet av få sekunder pga induert likestrøm av størrelsesorden 5 A [2.9, 2.10].)

Imidlertid er det en vesentlig forskjell mellom geomagnetiske stormer og HEMP type 3:

- Transformatorhavari pga overoppheting forekommer ikke ved E₃, fordi pulsvarigheten er for kort til at transformatorene kan ødelegges. (Dette kan derimot være et problem ved geomagnetiske stormer: Skjevmetning av transformatorer i opp til flere timer fører til kraftige magnetiseringsstrømmer, og forårsaker bl a store lekkfelt med tilhørende varmeutvikling pga induerte strømmer.)

I tillegg til kraftoverføringer er også lengre kommunikasjons- og telekabler utsatt for E₃.

Flere etterfølgende kjernefysiske eksplosjoner [2.11]

For å øke skadeeffekten av kjernefysiske eksplosjoner, kan man tenke seg å utløse flere eksplosjoner etter hverandre. Forutsetter i den videre diskusjonen at oppholdet mellom hver kjerneutladning er 1 s eller mer.

For HEMP type 1 blir hver puls en sekvensiell påkjenning av enkeltstående pulser: Hver E_1 -puls avsluttes innen den neste begynner. Pulsene kan derfor overlape hverandre geografisk, men ikke i tid. De samme argumentene kan benyttes for E_2 . For HEMP type 3 derimot, kan virkningene av pulsene overlages både geografisk og i tid: Under forutsetning av at de ulike E_3 -pulsene påvirker det samme geografiske området, vil effekten fra hver enkeltpuls addere seg opp og gi en sterkere totalvirkning, med andre ord en kraftigere elektrisk feltstyrke langs jordoverflaten.

En generell vurdering av virkningen fra etterfølgende eksplosjoner på kraftforsyningsanlegg, blir fort meget komplisert. Bl a vil strategien som er valgt for vern og koordinering mellom disse, påvirke vurderingen. Sannsynligvis vil flere etterfølgende kjernesprengninger øke områdene som ev faller ut, øke antallet komponenter som blir skadet og øke tiden det tar å få anleggene reparert og satt i drift. Likevel forventes det ikke at sentrale kraftkomponenter, som f eks transformatorer, havarerer.

2.4 RFW

Sammendrag:

- Koblingsvei: Direkte inn på korte lederføringer som f eks strømbaner på kretskort e l. (Strømbanens lengde i størrelsesorden en bølgelengde av påtrykt frekvens.)
- Forårsaker: Induserte spenninger og strømmer på lederføringene
- Mulige konsekvenser:
 - Funksjonsforstyrrelser (for feltstyrker i området $E = 10-1000$ V/m):
 - Bitfeil
 - Låsing av mikroprosessor
 - Varige skader (for feltstyrker i området $E = 10000$ V/m)
 - Elektronisk utstyr (radar eller kommunikasjonsanlegg, kontrollanlegg osv) der halvlederne kan bli ødelagt

I teorien kan alt elektronisk utstyr forstyrres eller ødelegges av RFW-våpen. Det gjør spesielt kommunikasjons- og kontrollutstyr i kraftforsyningsanlegg utsatt. RFW-våpen kan forårsake funksjonsforstyrrelser eller varige skader i elektronisk utstyr. Funksjonsforstyrrelsene er knyttet til mikroprosessorer, datautstyr og analoge kretser (operasjonsforsterkere mm), mens permanente skader hovedsakelig skjer i halvledermaterialet i elektronikkutstyret.

Ved RFW-våpen skilles det mellom "front door"- og "back door"-kobling:

- Ved "front door"-kobling fanges den skadelige energien opp av antennen til sambandsutstyr. Våpenet må da befinne seg i mottakerområdet til antennen, samt sende på frekvenser som antennen er virksom for. Dette gir overføring av energi med forholdsvis små tap. Radiolinje-, satellitt- og radarsystemer blir dermed sårbare siden halvlederne i mottakerne er spesielt følsomme her. Selv om utstyret til dels er beskyttet med gassavledere e l, virker disse for langsomt til å gi tilstrekkelig beskyttelse. Dermed kan relativt beskjedne ytre elektromagnetiske felt gjøre stor skade.

- "Back door"-kobling er direkte elektromagnetisk kobling til ledninger inne i eller nær utstyret. Ledningslengde og frekvens er viktige faktorer som avgjør hvor mye av energien i feltet som overføres. Ved frekvenser over 1 GHz er induksjon i lange ledninger utenfor utstyret av mindre betydning: Beregninger og målinger viser at styrken av de induerte strømmene reduseres og det opptrer store transmisjonstap langs ledningene. Disse tapene skyldes vesentlig tap i form av utsendt strålt støy fra de induerte strømmene.

2.5 PÅKJENNING FRA LYNUTLADNINGER KONTRA HEMP

Fordi alle kraftforsyningsanlegg har en eller annen form for lynbeskyttelse, er det interessant å sammenligne konvensjonelle lynpåkjenninger (LEMP og direkte lynnedslag) med antatte HEMP-påkjenninger. Dette kan anskueliggjøre hvilke tilleggsپåkjenninger HEMP bidrar til i kraftforsyningsanlegg. Kildene til dette delkapitlet er hentet fra [2.4] når ikke annet er nevnt.

Både lyn- og HEMP-påkjenninger kan som tidligere nevnt variere kraftig, og det blir derfor gjort en del forutsetninger for sammenligningene. Karakteristika for strømmen i lynkanalen er vist i tabell 2.1.

Tabell 2.1: Karakteristika for lynstrømmen som brukes til sammenligning av lynutladninger med HEMP

	Maksimal strøm [kA]	Fronttid [μ s]	Halverditid [μ s]
Første utladning	150 ¹⁾	10	350
Etterfølgende utladning	37,5 ¹⁾	0,25	100

1) Basert på beskyttelsesnivå 2 (protection level II) i IEC 61312-1: 95 % av lynene som opptrer skal være mindre eller lik denne verdien. Dette er derfor en langt høyere verdi enn den statistiske middelveiden av observerte lynstrømmer.

Strålt støy

Frekvensinnholdet for feltene:

- I hovedsak mellom 100 kHz og 100 MHz for HEMP type 1 (se kap 1.3.2)
- Typisk mindre enn 1 MHz for første lynutladning og mindre enn 5 MHz for etterfølgende

Total energiflyt pr flateenhet, W_T :

Ved beregning av total energiflyt pr flateenhet, W_T (se kap 1.3.2), får vi fra en LEMP:

- Første utladning: $W_T \approx 0,15 \text{ J/m}^2$ (600 m fra lynkanalen), $W_T \approx 5-6 \text{ J/m}^2$ (100 m fra lynkanalen)
- Andre utladning: $W_T \approx 0,04 \text{ J/m}^2$ (600 m fra lynkanalen), $W_T \approx 1-1,5 \text{ J/m}^2$ (100 m fra lynkanalen)

Til sammenligning har E₁ en total energiflyt pr flateenhet på $W_T = 0,114 \text{ J/m}^2$.

Ledningsbundet støy

I hovedsak er ledningsbundne påkjenninger sammenlignbare fra lyn og HEMP. Noen karakteristiske størrelser er nevnt spesielt nedenfor:

Maksimal spenningsderivert

- Maksimal spenningsderivert (dv/dt) for HEMP type 1 er antatt å være omlag 10 ganger høyere enn den er fra direkte lynnedslag.

Maksimal strømmplitude

- Strømpulser forårsaket av direkte nedslag har typisk 1 til 2 ganger høyere amplitude enn tilsvarende fra HEMP type 1
- Induserte strømpulser fra en lynkanal på 100 m avstand er i samme størrelsesorden som tilsvarende fra E_1

Maksimal strømderivert

- Maksimal strømderivert (di/dt) vil være høyere for E_1 enn for lyn: I følge beregninger vil med 90 % sannsynlighet den strømderivate for E_1 være mindre eller lik 150 kA/ μ s. Avledere for lyn i kraftforsyningsanlegg er dimensjonert for 100-200 kA/ μ s (avhengig av beskyttelsesnivået som er valgt), og vil dermed dekke denne trusselen.

Beregninger av en E_1 -puls på 4 kA viser at energitapet i en gassavleder blir omlag $W = 0,7$ mJ, mens tilsvarende tap for en $8/20$ μ s lynstrøm på 25 kA fra et direkte nedslag blir omlag $W = 12$ J.

Konklusjon:

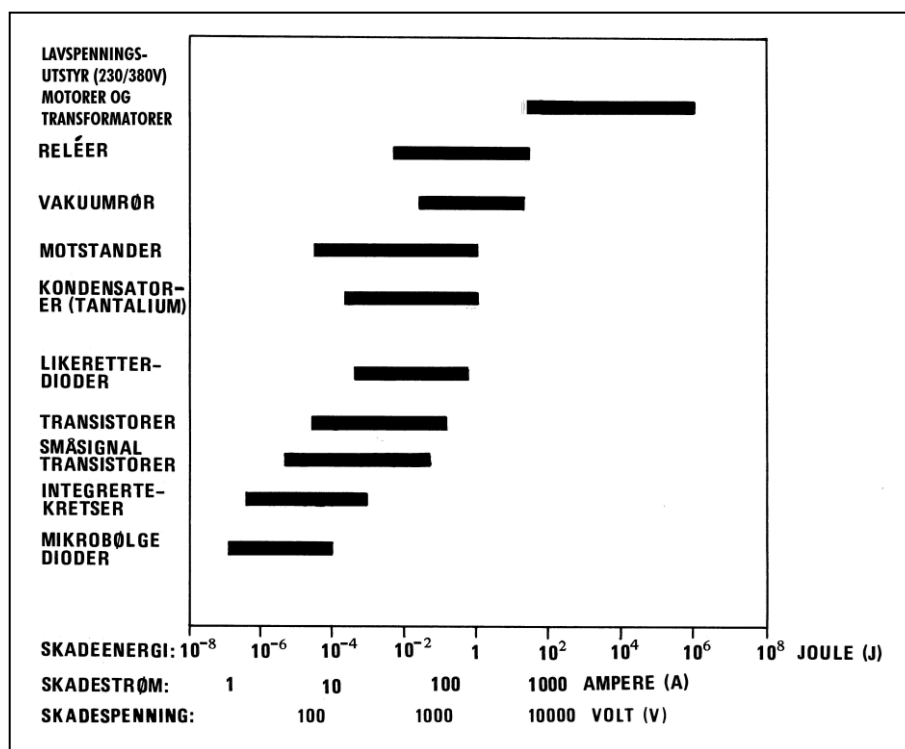
Mhp ledningsbundet støy representerer lyn (direkte + LEMP) en minst like kraftig påkjenning på kraftforsyningsanlegget som HEMP. Unntaket er de spennings- og strømderivate (dv/dt og di/dt), som blir høyere ved HEMP type 1. En stor utfordring blir derfor plasseringen og utføringen av konvensjonelle vern: Man må i større grad ta hensyn til muligheten for strålt høyfrekvent støy fra disse inn mot resten av kraftforsyningsanlegget. Mer om dette i kap 5.

2.6 UTSTYRS TÅLEEVNE OVERFOR ULIKE EMP-PÅKJENNINGER

Dette underkapitlet beskriver utstyrs tåleevne overfor ulike typer EMP-påkjenninger. Utstyret blir delt inn i elkraftkomponenter, kommunikasjons- og kontrollutstyr samt halvledere. Immuniteten til utstyr og styrken av EMP er utslagsgivende for den virkningen forstyrrelsen får. Det skilles mellom funksjonsforstyrrelse og varig skade.

Skade på utstyr oppstår pga gnistoverslag eller lokal oppvarming (strømskred) i komponenter. Energien blir dermed konsentrert i et lite volum der det kan opptre meget høy temperatur. Varig skade er derfor mulig, selv med meget små energier (10^{-7} - 10^{-3} J). En oversikt som viser spredningen i skadeparametre for forskjellige komponenter er vist i figur 2.5.

Skade kan også oppstå ved en trigget eller sekundær effekt. EMP kan gi et kortvarig gnistoverslag med liten energi som baner vegen for en energirik utladning med energi fra utstyrets strømforsyning. Gnistoverslaget kan også føre til en reduksjon av isolasjonsevnen slik at sekundær skade oppstår på grunn av langvarige følgestrømmer.



Figur 2.5 Grovt anslag over skadenivået for en del vanlige komponenter ved overslag. (Kilde: [2.6])

2.6.1 Elkraftkomponenter

Virkingen av lynpåkjenninger (LEMP og direkte nedslag) på elkraftkomponenter antas å være kjent fra før. RFW-pulser er ikke noen trussel for de tradisjonelle elkraftkomponentene nevnt nedenfor. Kommentarene vil derfor konsentrere seg om tåleevnen overfor E_1 - og E_3 -pulser, fordi dette er de eneste reelle HEMP-truslene. (Se kap 2.3.)

Overspenningsavledere [2.10]

Vil ikke ha noen problemer med å klare HEMP type 1. Tennspenningen for en avleder påkjent en E_1 -puls blir typisk 1,2 til 1,6 ganger høyere enn tilsvarende spenningsnivå ved lynpåkjenninger. I tillegg kommer ev spenningsfall i tilledningene, der lengden blir langt mer kritisk pga den raske stigetiden til E_1 ($U = L^{di}/dt$). I en tilsvarende norsk undersøkelse ble tallene noe høyere: 2,2 til 2,5 ganger den statiske tennspenningen (inkludert tilledningene til avlederen) [2.6].

Flere etterfølgende E_1 -pulser pga gjentatte kjernefysiske eksplosjoner er ikke en trussel for funksjonen til avlederne. E_3 -pulser representerer ikke noen belastning for avlederne.

Krafttransformatorer i overføringsnett [2.10]

Tester og beregninger indikerer at transformatorer ikke vil ha noe problem med E_1 når de er beskyttet med overspenningsavledere, og avledernes tilledninger utføres korte.

Som nevnt tidligere i kap 2.3, er virkningen av E_3 på transformatorer i overføringsnett noe usikker. Sannsynligvis kan metningsproblematikk med utfall som ytterste konsekvens forekomme, men noen permanent ødeleggelse av transformatoren vil ikke skje.

Krafttransformatorer i fordelingsnett [2.10]

Disse vil ikke ha noe problem med E_1 dersom de beskyttes med avledere. Selv uten beskyttelse med overspenningsavledere, vil kun en liten prosent av transformatorene bli ødelagt.

Kunnskapen om eventuelle effekter av E_3 er svært usikre for transformatorer i distribusjonsnett, se kap 2.3. En viss fare for utkopling eksisterer (spesielt etter flere etterfølgende kjernefysiske eksplosjoner), men permanent ødeleggelse er utelukket.

Generatorer og transformatorer i kraftstasjoner [2.10]

Vil ikke bli påvirket av E_1 -påkjenninger, pga sin beskyttede plassering i forhold til transientpåkjenningene i anlegget. (Se kap 3.4 for mer informasjon.)

2.6.2 Kommunikasjons- og kontrollanlegg

Denne delen av kraftforsyningsanleggene omfatter i utgangspunktet svært mange typer utstyr. Kommentarene nedenfor vil derfor gjelde elektronikkutstyr generelt. Utstyrs sårbarhet overfor EMP-påkjenninger vil avhenge av en rekke faktorer, bl a

- type EMP-påkjenning (LEMP, HEMP eller RFW)
- plassering (skjermet/uskjermet rom osv)
- utføring av tilkoblede kretser (jording, skjærmede kabler osv)

[2.10] sier f eks at relevern i kraftforsyningsanlegg vil fungere overfor en E_1 -puls, under forutsetning av at skjærmede kabler er benyttet og god jordingspraksis er fulgt. Den samme kilden uttrykker likevel usikkerhet om dette fortsatt vil bli tilfelle i kontrollanlegg, som i større grad enn tidligere bygges som distribuerte anlegg.

Det er vanskelig å oppgi eksakte immunitetsnivå overfor påtrykte EMP feltstyrker for de ulike utstyrgrupper. Noe lettere er det å generalisere hvilke induerte strøm- og spenningsnivå som ev kan gi elektromagnetiske forstyrrelser.

Ulike typer funksjonsforstyrrelse

Funksjonsforstyrrelse av elektronisk utstyr kan deles inn i

- blokkering
- bitfeil

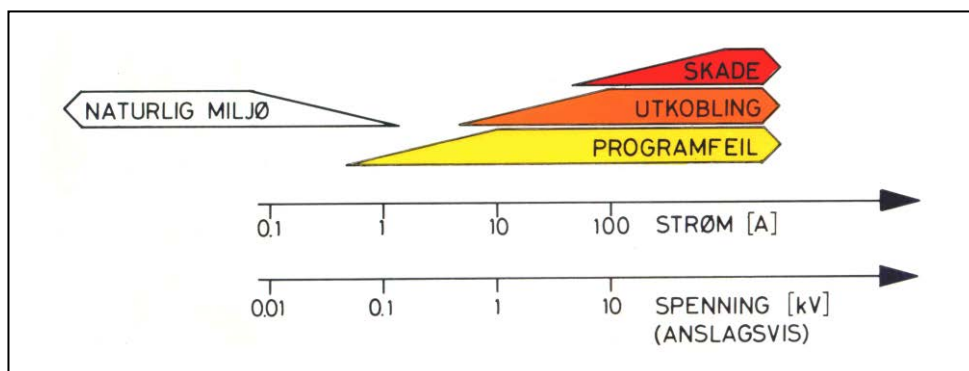
Blokkering opptrer i sambandsutstyr eller tilsvarende utstyr ved at forsterkere går i metning (overstyring). Det kreves en viss tid før metningen forsvinner. Varigheten er svært systemavhengig og kan reduseres ned til anslagsvis 1 ms. Et RFW-våpen må derfor gi minst 1000 pulser i sekundet for å oppnå en blokkeringstid på 1 s. (Regnes som minste effektive blokkeringstid av sambandsutstyr.) De mest langvarige blokkeringer kan dreie seg om sekunder. I et simuleringsforsøk ble f eks et ubeskyttet anlegg bestrålt med svak EMP. Der var én puls pr 4 s tilstrekkelig.

For datautstyr kan bitfeil gi funksjonsforstyrrelser. Innholdet (0 eller 1) i celler i arbeids-hukommelsen til mikroprosessen blir da forandret. Prosessoren kan dermed gi feil informasjon. En typisk virkning på utstyr (f eks PC) vil være at maskinen låser seg slik at den må startes på ny med å lese inn informasjon fra disk eller bånd. Det forekommer også at utstyr svikter ved at den innebygde kraftforsyning kobler seg ut (sikringer, vern). Dersom utstyr er ubetjent kan avbruddet bli langvarig. Det fins utstyr som restarter automatisk og dette er derfor en metode for beskyttelse som reduserer avbruddstiden

Sårbarhet overfor EMP-påkjenninger

En del elektronisk utstyr er blitt bestrålt med en E₁-puls [2.6]. Forsøkene har vist at utstyr i metallkabinetter uten noen ytre kabling er lite sårbart. Med ytre kabling kan halvledere (særlig CMOS) bli ødelagt på vilkårlige steder inne i elektronikken. Ved en etterfølgende analyse kan det være vanskelig å forklare hendelsesforløpet.

Basert på erfaring fra forsøk [2.6] er det laget et grovt estimat over skadelige nivå av strømmer i ytre kabler (signal og/eller kraftforsyning) som vist i fig 2.6. Som vist er det stor spredning.



Figur 2.6 Grovt estimat av størrelsen på felles modus (common mode) støyrstrøm i ledere som vil gi forstyrrelser i tilkoplede elektronisk utstyr. (Kilde: [2.6].)

Basert på erfaring fra testing av forskjellig utstyr med HEMP kan en estimere mulig sårbarhet for HPM og MEMP [2.12]. Dette gjelder utstyr uten spesiell beskyttelse mot EMP, men som tilfredstiller dagens EMC-krav. Et slikt estimat av skadelig nivå for ytre stråling er vist i tabell 2.2.

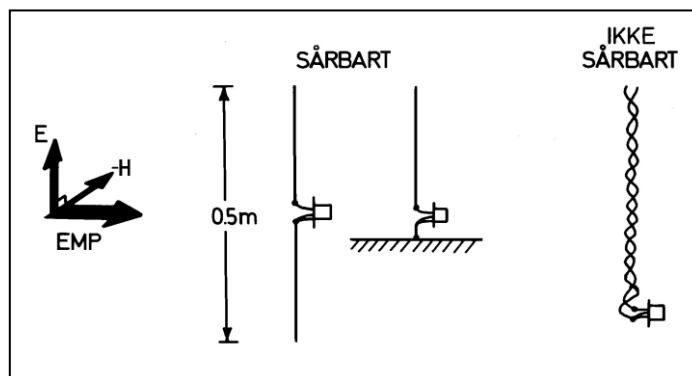
Tabell 2.2 Anslag over minimumsnivåer av ytre stråling for skade av elektronisk utstyr overfor HPM- og MEMP-påkjenninger.

Type feil	Feltstyrke [V/m]	Effekttetthet (pr 10 ns puls) [W/cm ²]	Energitetthet [J/cm ²]
Varige skader halvledere, mikroel.	10000	20	2×10^{-7}
Skade mikrobølgehalvledere	1000	0,2	2×10^{-9}
Funksjonsfeil			

2.6.3 Halvledere

Skade på halvledere opptrer når feltstyrken er stor nok til å gi overslag i kvartslag eller deplesjonslag inne i komponentene. En spenning på 100 til 1000 V er tilstrekkelig. Dernest kreves det en total energi på 0,1-10 μJ for at overslag skal kunne brenne en ledende kanal gjennom laget slik at komponenten blir ødelagt og utstyret slutter å funksjonere. I moderne halvledere er det meget tynne kvartslag ($< 1 \mu\text{m}$) som kan knuses. Meget hurtige svitsjer, hukommelseskretser, CPU'er, eller halvledere for mikrobølger er sårbare for energier ned til 0,1 μJ . Ved forsøk har det vist seg at bare én puls med slik energi kan være for lite til å gi momentan skade. Men holdfastheten kan være redusert slik at transienter fra strømforsyningen gir nye overslag. Dermed blir utstyret ødelagt etter en tids bruk.

Tilledningene blir meget viktig: Et forsøk med å bestråle en typisk transistor (UHF, MOS) med E_1 er vist i figur 2.7. Den kan ødelegges ved å anbringes på midten av en 0,5 m tråd. Selv med kortere ledere er halvledere sårbare overfor E_1 i denne konfigurasjonen. En gunstig lederforlegning er snodde (balanserte) ledere. Sløyfestrømmene kan reduseres med opptil 40 dB med denne lederkonfigurasjonen, kontra strømmene i to tilsvarende parallelle ledere (felles modus). Ledningen kan i så fall være flere m lang uten at skade opptrer.



Figur 2.7 E_1 -bestråling av transistor tilkoblet korte ledninger. I eksemplene til venstre kan transistoren (halvlederen) ødelegges, mens det ikke er tilfellet for oppkoplingen til høyre med snodde ledere. (Kilde: [2.6].)

Halvledere er mest sårbare for en skur av pulser. Den største trusselen blir derfor RFW-våpen. Nødvendig energi pr puls blir da mindre enn den totale energi som kreves for å gi momentan skade.

Halvlederkomponenter er plassert i plast- eller keramikkhus som ikke skjermer vesentlig. Det er fare for energioverføring til ledningsforbindelser inne i slike komponenter ved bruk av frekvenser på 30-100 GHz som har 3 - 10 mm bølglengde. For å gi skade trengs anslagsvis 1000 V over ca 10 mm ledning og dette vil kreve feltstyrker av størrelsesorden 10^5 V/m. Dernest må energien i den induserte strømpuls være tilstrekkelig og dette krever en varighet av strålingen på anslagsvis 10 ns. For å gi driftsforstyrrelser er det tilstrekkelig med anslagsvis 10 V og 10^3 V/m.

2.7 REFERANSER

- 2.1 Rein A. et al: Kompendium i høgspenningsteknikk. NTH. 1988.
- 2.2 IEC 61000-2-10:
IEC 61000: Electromagnetic compatibility. Part 2: Environment. Section 10: Description of HEMP environment – Conducted disturbance. 1998.
- 2.3 Reddoch T. W. et al: HEMP Emergency Planning and Operating Procedures for Electric Power Systems. ORNL/Sub/91-SG105/1. Martin Marietta Energy Systems Inc., Oak Ridge National Laboratory. 1993
- 2.4 IEC 77C/58/CDV: Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 5: Installation and mitigation guidelines – Section 3: HEMP protection concepts.
Project number 61000-5-3.
1998-04-10.
- 2.5 Bell Laboratories: EMP Engineering and design principles. Electrical Protection Department, Loop Transmission Division. 1976
- 2.6 Grønhaug, K L (1982): Elektromagnetisk puls Vol 2, Virkninger og vern, FFI/RAPPORT -82/3003.
- 2.7 J. R. Legro et al: Study to assess the effects on electric power systems – Phase I Final report. ORNL/Sub/83-43374/1/V1, Martin Marietta Energy Systems Inc., Oak Ridge National Laboratory, 1986.
- 2.8 IEC 61000-2-9:
IEC 61000: Electromagnetic compatibility. Part 2: Environment. Section 9: Description of HEMP environment – Radiated disturbance. 1996.
- 2.9 Barnes P. R. et al: Electric utility industry experience with geomagnetic disturbance. ORNL-6665, Martin Marietta Energy Systems Inc., Oak Ridge National Laboratory, 1991.
- 2.10 Wagner C. L. et al: Recommended engineering practice to enhance the EMI/EMP immunity of electric power systems. ORNL/Sub/91-SG913/1, Martin Marietta Energy Systems Inc., Oak Ridge National Laboratory, 1992.
- 2.11 Barnes P. R. et al: Electromagnetic pulse research on electric power systems: Program summary and recommendations. ORNL-6708, Martin Marietta Energy Systems Inc., Oak Ridge National Laboratory, 1993.
- 2.12 Grønhaug K-L, Thoresen P (1992): Radiofrekvente våpen med høy effekt og energi, FFI/NOTAT-92/4021

3 STRUKTURERING AV KRAFTFORSYNINGSSANLEGG

Dette kapitlet presenterer soneinndeling som metode til å plassere de støymessig likeverdige deler av kraftforsyningsanlegget inn i sine respektive soner. Videre blir en funksjonsbasert strukturering eller inndeling av kraftforsyningsanlegg vist. Disse to delkapitlene danner deretter grunnlaget for vurdering av differensierte beskyttelsesnivå i anleggene. Til slutt knyttes noen kommentarer til driftsberedskap mhp EMP.

Målsetningen med kapitlet er å presentere en metodikk som kan benyttes for å foreta en samlet vurdering av EMP-sikring i kraftforsyningsanlegg. Dette omfatter bl a å ha en overordnet strategi for hvordan sikringen av anleggene skal gjennomføres (f eks gjennom jording, skjerming og/eller lager av reservedeler, manuell styring osv), til fysisk plassering av de ulike vernetiltakene.

3.1 INNLEDNING

I et kraftforsyningsanlegg ønsker vi at en del sentrale funksjoner som direkte påvirker avbruddstiden, skal ha høyest mulig driftstid (opptid) innenfor gitte økonomiske og praktiske rammer. Andre mindre viktige funksjoner kan kortvarig tillates å falle ut, uten at dette fører til avbrudd i kraftforsyningen. Atter andre funksjoner tåler langvarige bortfall uten at dette får direkte konsekvenser mhp avbrudd. Videre vil forskjellig utstyr ha ulik følsomhet mot EMP-påkjenninger. På denne bakgrunn vil det være naturlig å velge ulik grad av beskyttelse for forskjellige deler av et kraftforsyningsanlegg. Dette kalles i denne håndboka for *differensiert beskyttelsesnivå*, og er nær knyttet til begrepet *soneinndeling*. Soneinndeling eller elektromagnetisk topologi er et hjelpemiddel i designfasen for systematisering av beskyttelsestiltakene jording, skjerming og avledning (filtrering).

De ulike funksjonene i et kraftforsyningsanlegg kan sikres mot EMP på ulike måter. Det kan f eks være gjennom jording, skjerming og avledning. En annen strategi kan være å ha reservedeler for deler av anlegget, og ikke utføre spesielle EMP-tiltak mhp jording, skjerming og avledning for disse delene. En tredje strategi er mulighet for å kunne gå over til manuell styring direkte på styrepanelene i kontrollanlegget vha operatører. Eventuelt kan strategien være en kombinasjon av disse.

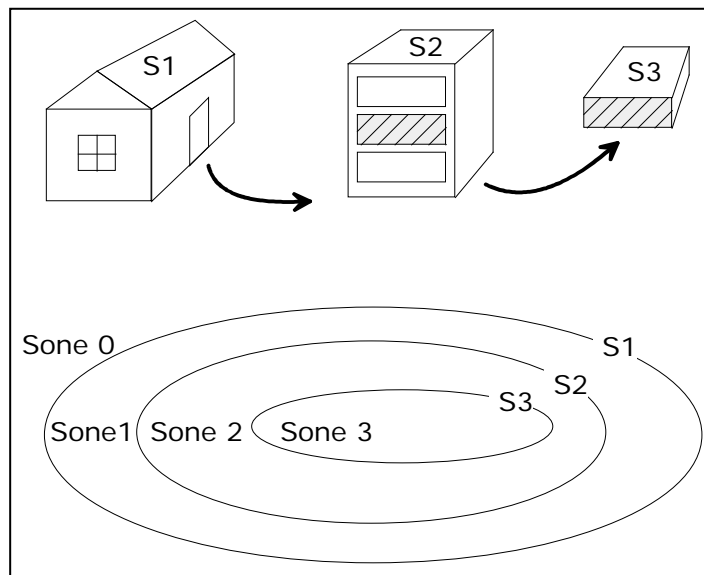
Det endelige valget av EMP-sikring vil være en kombinasjon av totalforsvarshensyn nedfelt i forskrifter/retningslinjer, samt totaløkonomiske vurderinger for de ulike alternativene. Her vil kostnadsvurderinger av bl a avbrudd i kraftforsyningen, reservelager, ev tilleggsinvesteringer for EMP-jording, -skjerming og -avledning spille inn. Kostnadene for de ulike alternativene bør i tillegg vurderes opp mot sannsynligheten for at en EMP-trussel inntreffer.

Disse vurderingene vil inngå som en del av eiernes beredskapsstrategi for kraftforsyningsanleggene. Denne håndboka vil skissere en aktuell metode for å systematisere valg av beskyttelsesstrategi, men vil ikke ta med økonomi eller vurdere sannsynligheten for at en EMP-trussel opptrer. I dette kapitlet dras disse vurderingene inn under overskriften *driftsberedskap*.

3.2 SONEINNDELING

Soneinndeling eller elektromagnetisk topologi deler områder av utstyret, systemet eller anlegget inn i støymessig likeverdige soner. Når en sonegrense skal passeres med en leder eller lignende, skal visse kriterier for jording, skjerming og avledning (filtrering) være oppfylt. Metoden er et aktuelt hjelpemiddel i designfasen for å gjennomføre en enhetlig strategi og systematisering av hhv jording, skjerming og avledning/filtrering.

3.2.1 Hvordan dele inn sonene?



Figur 3.1: Eksempel på soneinndeling. (S1, S2 osv tilsvare skjerm eller sonegrense 1, 2 osv.) [3.1, 3.2]

Fig 3.1 illustrerer hvordan en soneinndeling kan foretas. Flere inndelinger vil kunne fungere for ett og samme tilfelle, og antallet soner vil tilsvarende kunne variere. Hovedkriteriet ved soneinndeling er likevel alltid:

Sonegrensene plasseres slik at den elektromagnetiske koplingen mellom sonene er begrenset.

Det betyr i praksis å legge sonegrensene slik at

- de følger elektromagnetiske (metalliske) skjermmer
- avstanden mellom kretsene, apparatene eller systemene er tilstrekkelig til å unngå kopling
- nærheten til et jordplan danner en naturlig, avgrenset sone

De to siste kriteriene benytter seg av en såkalt virtuell (tenkt) skjerm, dvs en sonegrense (skjerm) som ikke nødvendigvis er en fysisk (metallisk) skjerm. Denne virtuelle skjermen kalles også en generalisert skjerm. En sonegrense kan f eks være husveggen i fig 3.1, som gjerne kan være av tre og dermed uten demping mot elektromagnetiske kilder. Likevel vil den være en begrensning for hvor nær ytre, mobile støykilder kan komme utstyret innenfor. Fordi feltet avtar med avstanden, kan veggen være en hensiktsmessig soneavgrensning i enkelte tilfeller. (Avhenger av type støy og støykilder.)

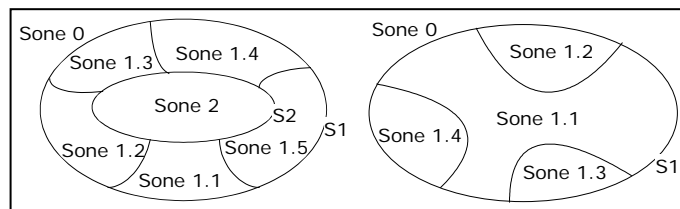
Den virtuelle skjermen er altså en mer eller mindre tett skjerm som omslutter utstyr og systemer med noenlunde ensartet elektromagnetisk miljø. Dempningen skjer ikke ved den virtuelle skjermen

eller på grunn av den: Skjermen representerer kun en koplingsdemping. Utbredelsen til den generaliserte skjermen er frekvensavhengig, og sonene må derfor velges slik at de er tilpasset frekvensområdene til støykildene som opptrer.

Sonegrensene har til hensikt å vise kontaktflatene mellom ulike soner og ikke hvordan de praktisk er utformet. Derfor beskrives ofte sonegrensen med enkle geometriske figurer. Det er likevel viktig å ha en oppfatning av sonegrensenes form og plassering i virkeligheten.

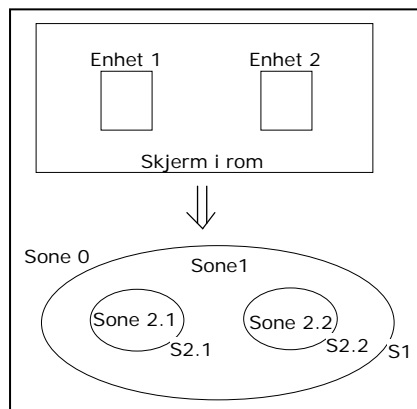
Ulike soneinndelinger

Ulike former for inndeling i soner er illustrert fortløpende i figurene 3.2 til 3.4.



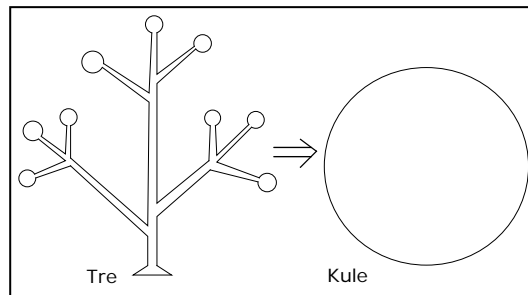
Figur 3.2: Soneinndeling med delvolum som har samme skjerming mot ytre kilder, men er skilt fra hverandre med f eks metallvegger. Felles indre sonegrense er skjerm S2 til venstre, mens den til høyre er en ufullstendig overflate som danner en blemme på ytterskjermen S1. [3.2]

Fig 3.2 er typisk inndeling for en del større systemer som bygninger og skap.



Figur 3.3: Soneinndeling med to skjermede delvolum (f eks skap) som ikke deler overflate med ytterskjermen (-sonegrensen) S1 eller med hverandres sonegrenser (S2.1 og S2.2). [3.2]

Soneinndelingen i fig 3.3 forekommer når elektronikkutstyr er plassert helt avkoplet fra hverandre. Langt mer vanlig er imidlertid volumer som er sammenkople via skjermede kabler, som sammen danner en felles sonegrense. Dette er vist i fig 3.4.

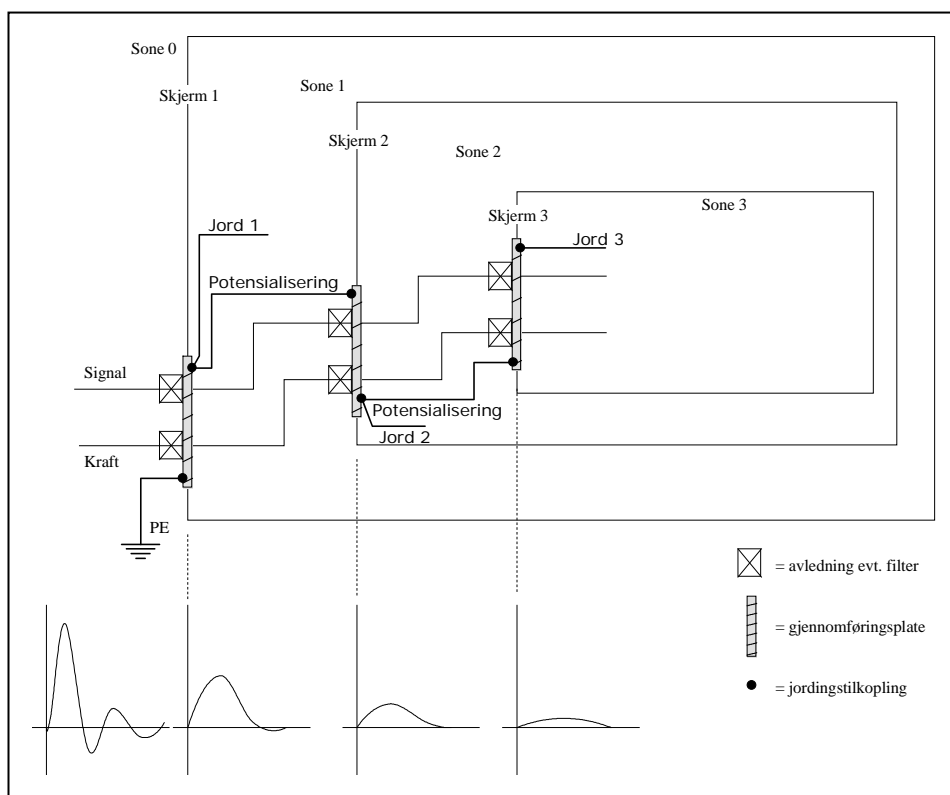


Figur 3.4: Volumer som er koplet sammen til en felles sone via f eks skjermede kabler, kan framstilles i en trestruktur (til venstre). Dette er ekvivalent med en mer generell kulefasong på sonegrensen (til høyre). [3.2]

3.2.2 Hvordan skal sonegrensene plasseres?

Fig 3.5 illustrerer noen viktige prinsipp ved soneinndeling:

- Alle lederføringer gjennom en sonegrense gjøres i en forsterkning av skjermen, en såkalt gjennomføringsplate eller felles innføringspunkt.
- Jordleder føres aldri direkte mellom to soner, men termineres på hhv innsiden og utsiden av gjennomføringsplaten (ev skjermen). Se fig 3.5. Jording i en sone er det samme som å kople seg elektrisk til den lokale skjermen (sonegrensen).
- Kraft- og signalkabler kan avledes og/eller filtreres i gjennomføringsplaten.



Figur 3.5 Prinsipiell skisse av hvordan ledninger føres mellom soner, og virkningen dette har på eventuelle støysignal [3.1]. Se ellers kap 4.2.3 og kap 5 for flere detaljer.

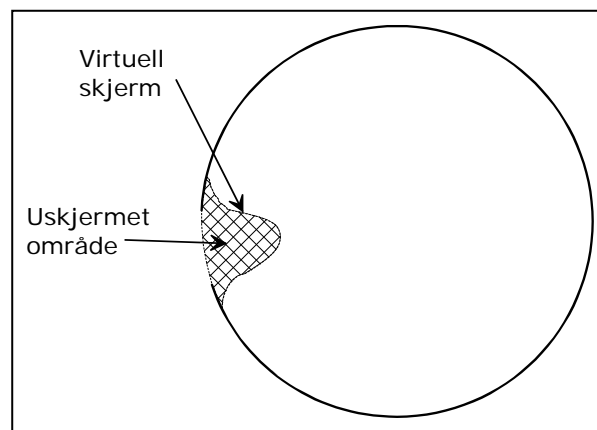
En felles innføringsplate hvor alle kabler og gjennomføringer tas inn, forhindrer at støystømmer flyter ukontrollert i soneskjermen. Forsterkningen av skjermens ledningsevne i

gjennomføringsplaten sikrer at strømmene langs kablene avledes. Ekstern jord (PE), alle filtre og kabelskjermer koples til platen.

Selv om det ikke er vist i fig 3.5, ivaretar metoden også gjennomføringer av ikke-elektriske bygningskonstruksjoner som f eks ventilasjonsrør, varme, drivstoff osv.

3.2.3 Skjermer med hull

En elektromagnetisk skjerm har som regel hull, åpninger (dører, vinduer, ventilasjon mm) eller svakheter som fører til reduksjon av skjermvirkningen for tilgrensende volum. Dette er forsøkt illustrert i fig 3.6 nedenfor.



Figur 3.6: Eksempel på metallisk skjerm med hull. (Støykilde på utsiden.) Den virtuelle skjermen bøyer inn i kuleskallet ved hullet, og det oppstår et uskjermet område (skravert).[3.1]

Med en støykilde på utsiden av kulen i fig 3.6, vil den virtuelle skjermen krumme seg inn i kuleskallet pga åpningen i metallskjermen. Det skraverte området representerer et forbudt område, hvor det ikke skal plasseres ømfintlig utstyr. F eks er det uklokt å plassere støyfølsomt utstyr rett innenfor døra i et skjermet rom, ev i nærheten av ventilasjonsåpninger i et kabinett.

Størrelsen på det skraverte området bestemmes av forholdet mellom bølgelengden på det ytre feltet og hullets størrelse. Når bølgelengden er stor sammenlignet med hullets dimensjoner, avtar koplingen gjennom åpningen raskt med økende avstand. Merk at utbredelsen av det skraverte feltet er uavhengig av skjermens tykkelse og dens elektromagnetiske egenskaper.

Dersom støykilden hadde vært på innsiden av kuleskallet, ville det skraverte området tilsvarende vendt utover som en blemme på kuleskallet.

3.2.4 Praktiske fordeler med soneinndeling

De praktiske fordeler med å foreta en inndeling i soner kan sammenfattes slik:

Pedagogisk:

Konstruktøren kan strukturert og metodisk identifisere koplingsveier og fysisk avhengighet mellom systemdeler. Kompliserte elsystemer og -installasjoner kan beskrives tilstrekkelig oversiktlig slik at andre bransjer uten spesialkunnskaper kan forstå og ta hensyn til det elektromagnetiske miljøet. Dette forenkler kommunikasjonen mellom f eks arkitekter, byggeledere, mekaniske konstruktører, montører og installatører.

Systematisk:

Informasjonsmengden som beskriver system, koplingsveier og dempingskrav kan sorteres på en metodisk måte.

Sikkerhet:

All installasjon som krysser sonegrenser sorteres inn på rett sted og utføres med foreskrevet beskyttelse og avledning.

3.3 STRUKTURERING AV ANLEGG

Dette delkapitlet presenterer en funksjonsbasert strukturering av kraftforsyningsanlegg. Inndelingen er generell, men ikke komplett: Bare de viktigste funksjonene med hensyn på EMP blir vist. Selv om anleggene normalt er distribuerte, vil ikke dette gå fram av illustrasjonene som blir benyttet.

3.3.1 Innledning

Den funksjonsbaserte struktureringen skal danne et hensiktsmessig underlag for bl a å illustrere systemoppbygningen av kraftforsyningsanlegg: Inndelingen skal gi en tilstrekkelig oversikt over delsystemene og -anleggene som inngår og som har relevans for EMP-problematikken. Videre skal struktureringen være et utgangspunkt for å rangere de ulike funksjoners betydning for opprettholdelse av kraftforsyningen og å unngå avbrudd. Denne rangeringen skal være grunnlaget for valg av sonegrenser og dermed de differensierte beskyttelsesnivå som til slutt velges. Det er et mål for håndboka at inndelingen er så generell at den kan brukes for de fleste anleggstyper.

3.3.2 Utfyllende informasjon om kontrollanlegg

Kontrollanlegg utfører en rekke funksjoner i kraftforsyningsanlegg, f eks vern, styring, regulering, overvåking, melding og måling. Distribuerte kontrollanlegg blir mer og mer vanlig i moderne anlegg. For at informasjonen i fig 3.7 på neste side skal bli lettere tilgjengelig, blir en del begreper og sammenhenger forsøkt forklart.

Lokal kontroll brukes som et samlebegrep for

- stasjonskontroll
- feltkontroll (= objekt kontroll)

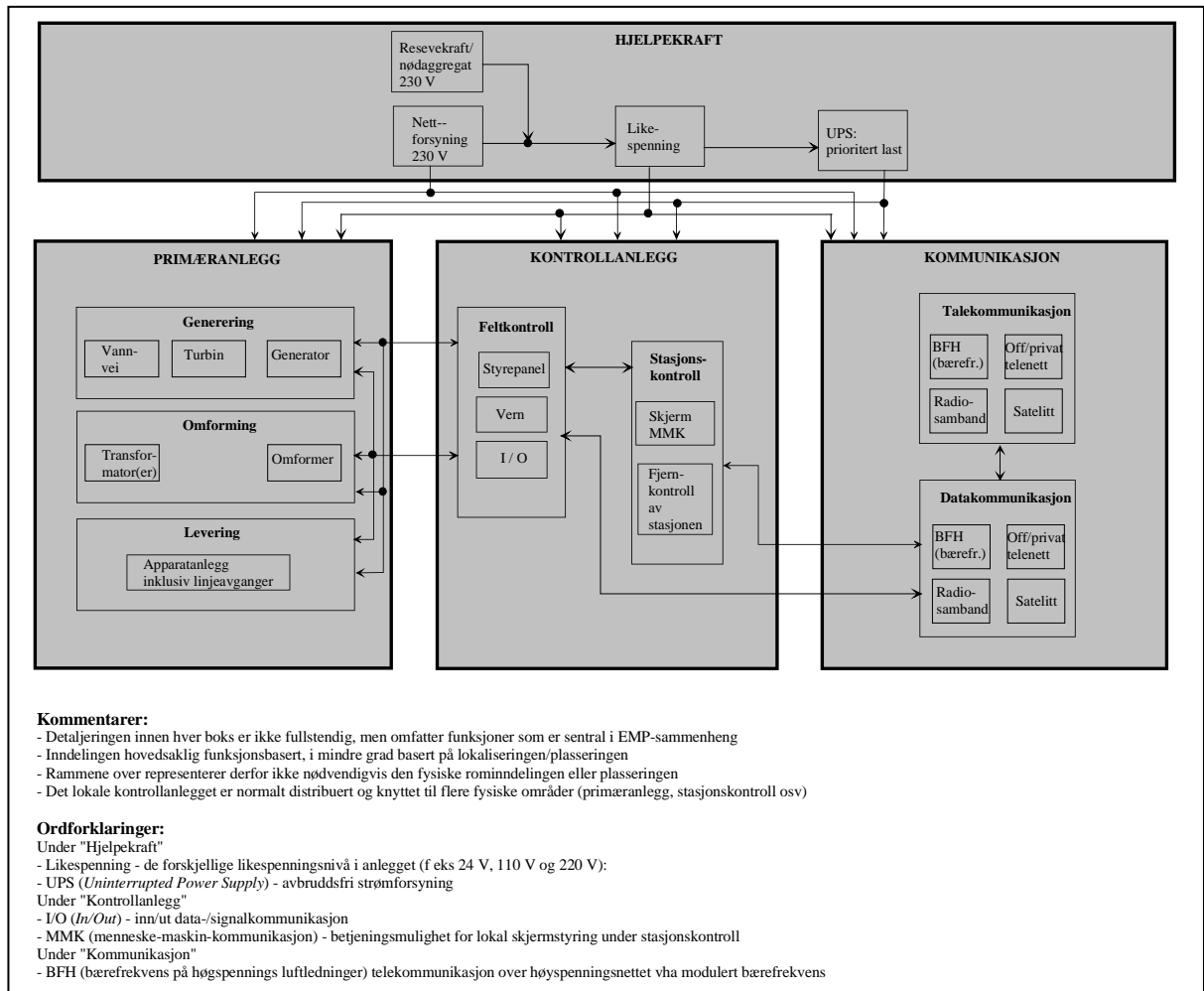
Vernefunksjonene er i hovedsak realisert på feltnivå, mens fjernkontroll og telekommunikasjon realiseres på stasjonsnivå. En del funksjoner som styring, finnes på begge nivåer, mens eventuelle forriglinger i tilknytning til styringen er utført på feltnivå. Under normal drift kan man styre fra

- en driftssentral (fjernstyring)
- en skjerm/tastatur i et lokalt kontrollanlegg
- et styrepanel i relé-/feltskap
- direkte styring

Fjernstyring og lokal skjermstyring forutsetter at både stasjonsdatamaskinen og felt-/objektdata-maskinen virker samtidig. Styring fra feltnivå er uavhengig av stasjonsdatamaskinen, og ofte fins

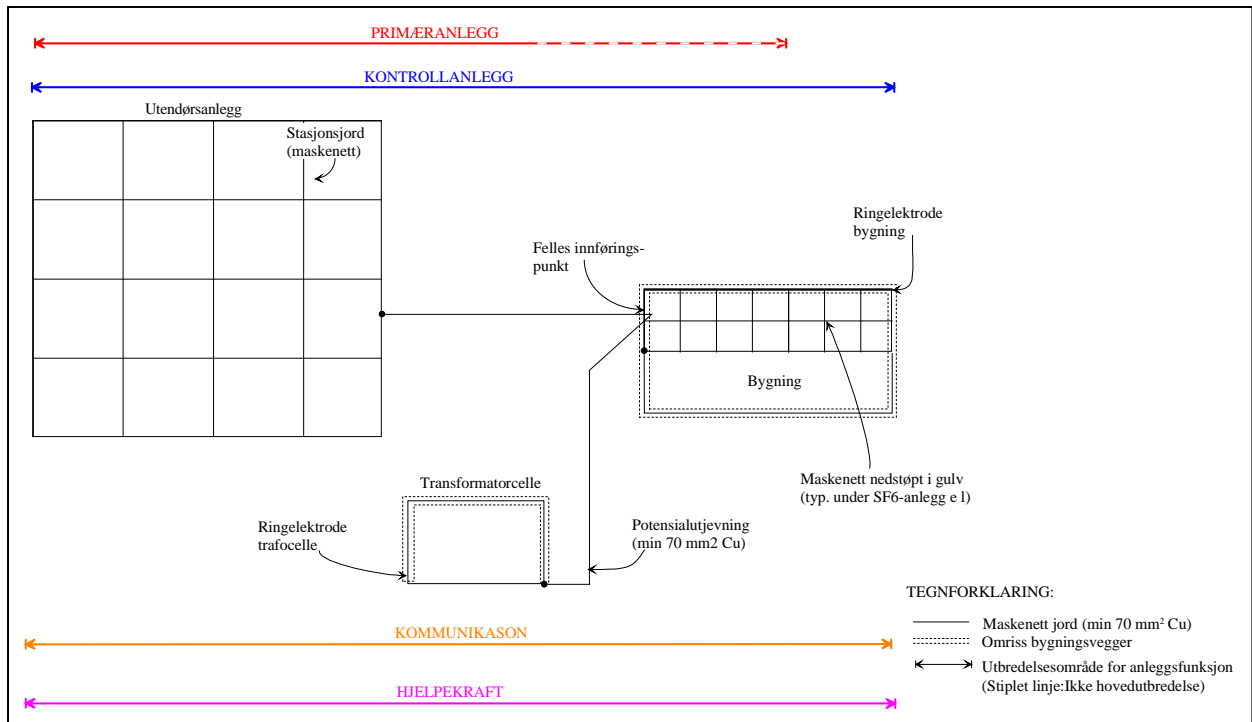
det styringsmulighet på feltnivå selv når feltmaskinen er nede. Tilsvarende sammenhenger gjelder for melding og måling.

3.3.3 Eksempel på strukturering av kraftforsyningsanlegg



Figur 3.7 Skisse av inndeling/strukturering av kraftforsyningsanlegg.

I fig 3.8 på neste side er terminologien som er benyttet i figuren over plassert inn i et tenkt eksempel på et kraftforsyningsanlegg. Figuren viser en skisse av jordingens hovedstruktur, dvs maskenett og ledere for potensialutjevning i anlegget. Hovedmålet med figuren er å synliggjøre den distribuerte plasseringen av de ulike funksjonene. Den samme figuren vil i kap 5 bli benyttet som underlag for å illustrere et praktisk eksempel på utføring av EMP-sikring i kraftforsyningsanlegg.



Figur 3.8 Skisse av jordingssystemet i et tenkt kraftforsyningsanlegg.

3.4 DIFFERENSIERT BESKYTTELSESNIVÅ

Med basis i figur 3.7 og 3.8, forsøker dette delkapitlet å illustrere begrepet differensiert beskyttelsesnivå. Utgangspunktet er en erkjennelse av at noen deler av kraftforsyningsanlegget er mere sentrale enn andre med tanke på å unngå avbrudd. For å systematisere arbeidet med et differensiert beskyttelsesnivå, benyttes soneinndeling som metode.

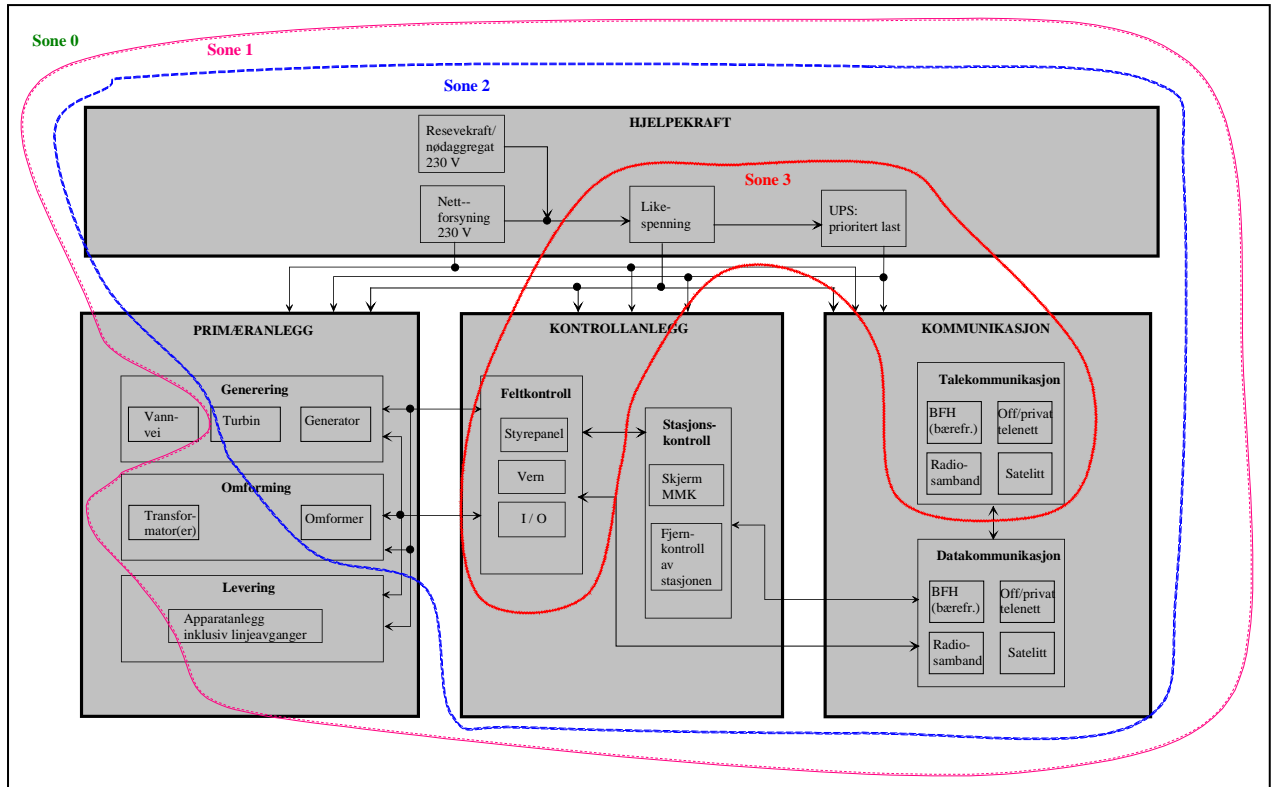
Det er viktig å forstå at soneinndeling bare er et hjelpemiddel til å systematisere en enhetlig strategi mht jording, skjerming og avledning (filtrering). Apparatene og utstyret som benyttes i anleggene er de samme som før: Den økte immuniteten overfor høyfrekvente forstyrrelser i kraftforsyningsanleggene oppnås vha den overordnede strategien for utføring av jording, skjerming og avledning.

Fig 3.9 på neste side skisserer grovt hvordan soneinndeling kan utføres for et kraftforsyningsanlegg. Det er grunn til å understreke at dette bare er et eksempel på soneinndeling: Andre alternative sonevalg kan gi like bra resultat og være like riktig. Hovedhensikten med eksemplet er å få fram tankegangen som ligger til grunn for valg av inndeling. Nedenfor knyttes en del kommentarer til hva som inngår i de ulike sonene og hvorfor.

Sone 0:

- Omfatter alt utstyr som er plassert ubeskyttet i friluft utenfor anleggets jordplan (dvs utenfor jordmaskenettets utbredelse). Her er EMP-påkjenningene de kraftigste, og tilsvarer maksimalfeltet som kan forekomme.
- Kommentar til fig 3.9:
 - Vil typisk omfatte de delene av primæranleggene som ligger utenfor jordinganlegget.

- Eksempel: Omfatter innkommende og utgående luftledninger og kabler fra kraftforsyningsanlegget, f eks høyspennings luftledninger, ev 230 V forsyning og tele-/kommunikasjonskabler



Figur 3.9 Skisse av soneinndeling i et kraftforsyningsanlegg basert på funksjonsinndelingen i fig 3.7.

Sone 1:

- Omfatter utstyr og apparater som pga nærhet til jordplan (maskenett) har en demping i forhold til sone 0.
- Kommentar til fig 3.9:
 - Omfatter utendørs apparatanlegg plassert på maskenett eller nær jordledere (f eks transformatorcelle), hvor en viss EMP-demping oppnås i forhold til sone 0 først og fremst for ledningsbundet støy.
 - Den strålte feltstyrken kan bli av samme størrelsesorden som i sone 0.

Sonegrense mellom sone 0 og 1:

- Dette er en virtuell (tenkt) skjerm som illustrerer skillet mellom de komponenter som ikke har eller har nærhet til jordsystemet i anlegget (se fig 3.8 eller 3.10)

Sone 2:

- Omfatter utstyr og apparater som vha skjerming, jording og/eller avledning har en EMP-demping i forhold til sone 1
- Kommentar til fig 3.9:

- Omfatter utstyr som inngår i funksjonsinndelingene hjelpekraft, kontrollanlegg og datakommunikasjon, samt turbin, generator og omformer i primæranlegg.
- Eksempel: Omfatter bl a alt innendørs utstyr. (Disse får mer eller mindre skjermndemping fra yttervegger og tak mot strålte feltstyrker. Videre vil det ofte være bedre potensial-utjevning innenfor disse områdene enn for komponenter plassert utendørs osv)

Sonegrense mellom sone 1 og 2:

- Dette kan være en virtuell skjerm eller en metallskjerm. Vegger, tak og gulv i bygninger med armering (bindtråd) vil typisk være virtuelle skjermer. (Dersom armeringen er sveist, regnes den som en metallisk skjerm.) Rom eller bygninger som er skjermet med netting, folie eller plater er metalliske skjermer. Det samme er også skap eller kapsling av metall omkring utstyr plassert utendørs. En virtuell skjerm illustrerer typisk effekten av avstand til ytre kilder og/eller nærhet til jordplan (maskenett), og dermed økt støyavkopling til jord.

Sone 3:

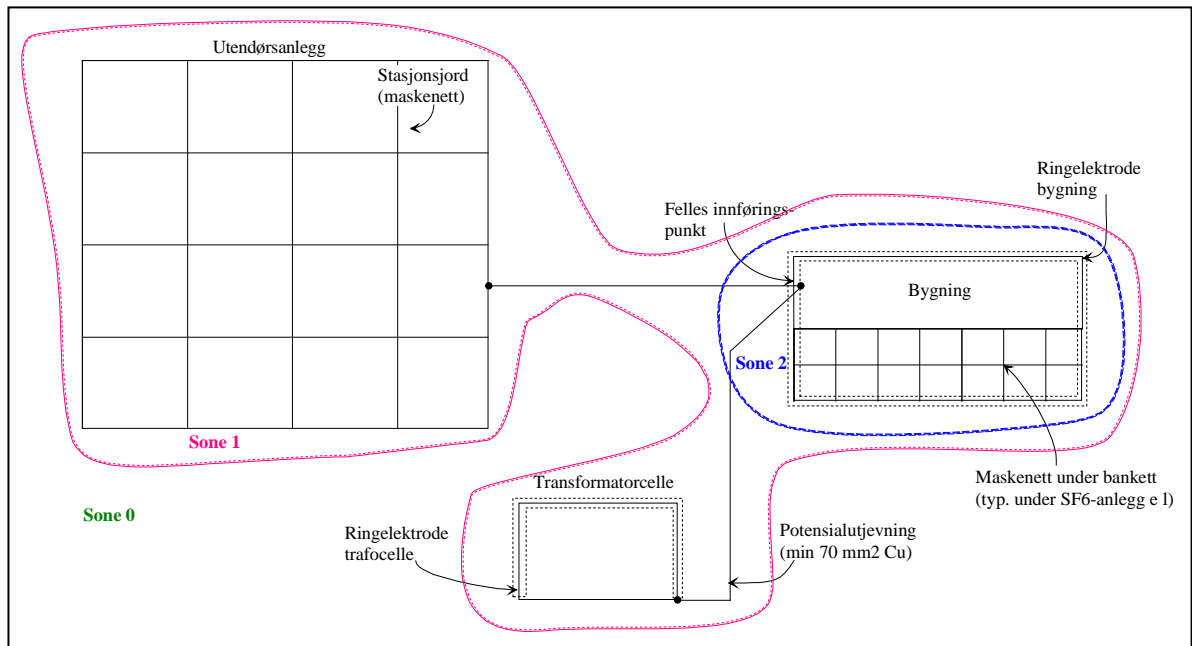
- Omfatter utstyr og apparater som vha skjerming, jording og/eller avledning har en EMP-demping i forhold til sone 2.
- Kommentar til fig 3.9:
 - Ønskelig at dette minimum omfatter feltkontroll under "Kontrollanlegg", UPS og likespenning under "Hjelpekraft", samt taledelen av "Kommunikasjon".
 - Dette er de funksjonene i anlegget med høyest prioritet mht å fungere etter en ev EMP-påkjenning, og omfatter typisk følsomt og/eller viktig elektronikkutstyr som er sentralt for opprettholdelse av kraftleveringen.
 - Eksempel: Utstyr oppnår normalt en ekstra støydemping i forhold til sone 2 i form av skap eller kapslinger av metall.

Sonegrense mellom sone 2 og 3:

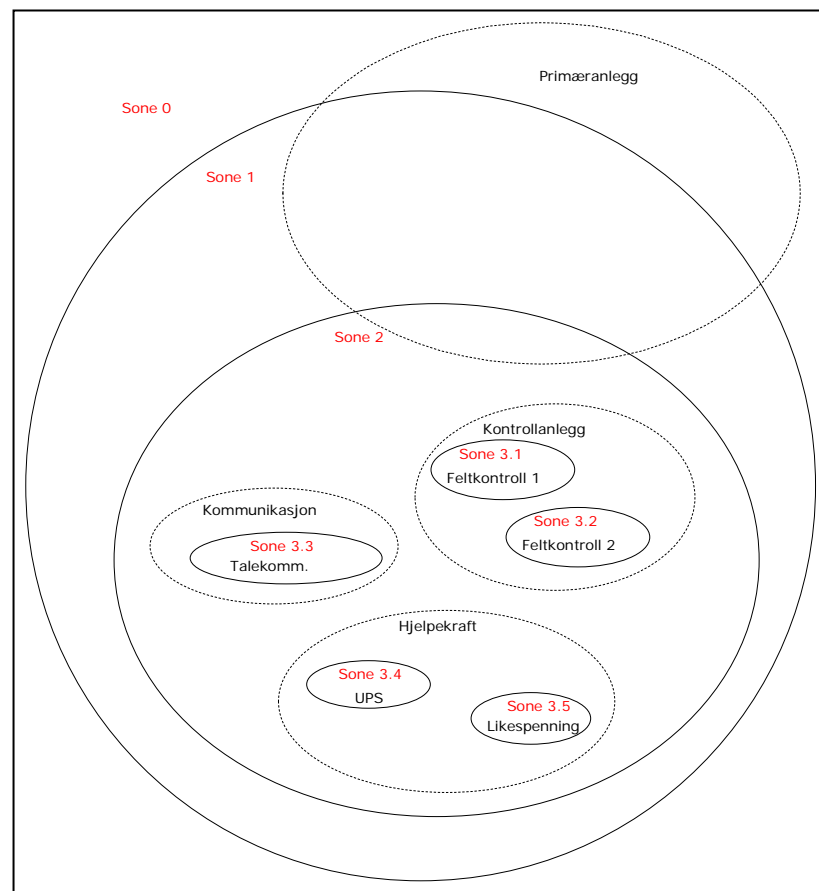
- Denne sonegrensa representerer typisk støydempingen som en metallisk skjerm gir i forhold til sone 2. I praksis er sonegrensa et skap eller kapsling av metall med god kopling til jordpotensial.

I tillegg til sonene nevnt foran, vil det ofte være en fjerde sone: Denne representerer metallbokser e l som produsenter av utstyr benytter rundt spesielt følsomt utstyr inne i skap (mikroprosessorer e l). Dette blir ikke tatt med i denne oversikten, fordi det vil være en løsning produsenten av utstyret ev velger selv.

I fig 3.10 er sonene 0, 1 og 2 tegnet inn på skissen av jordingssystemet til kraftforsyningsanlegget tidligere vist i fig 3.8. Figur 3.11 viser sammenhengen mellom sonevalg og funksjonsinndeling i en mer generell presentasjon



Figur 3.10 Skisse av sone 0, 1 og 2 sammen med jordingsystemet i et tenkt kraftforsyningsanlegg. Sone 3 er ikke vist, men vil typisk utgjøre en del av området innenfor bygningen. I enkelte tilfeller vil deler av sone 3 (f eks feltkontrollen), være plassert direkte i utendørsanlegget, som er sone 1.



Figur 3.11: Generell illustrasjon av soneinndeling i kraftforsyningsanlegg. Legg merke til at det kan være flere, uavhengige sone 3 innen f eks kontrollanlegg. (Kan f eks oppnås med optisk fiber som galvanisk skille. Se ellers fig 3.3 og 3.4 foran.)

3.4.1 Kommentarer til soneinndelingen

En måte å betrakte soneinndelingen på, er f eks at det elektromagnetiske miljøet i sone 2 skal tilsvare industrimiljø i dagens normer. Dette er veldefinerte grenseverdier med tanke på tillatt utsendt støy (emisjon) og immunitet. Når vi kjenner de ytre, påtrykte feltpåkjenningene (strålt og ledningsbundet), kan vi derfor beregne oss til nødvendig demping summert over de to sonegrensene utenfor sone 2. Avhengig av utstyrets tåleevne kan tilsvarende vurderinger gjøres for sone 1.

I en videreføring av denne tankegangen, blir sone 3 en ytterligere demping i forhold til sone 2 for å ivareta:

- støyfølsomt utstyr
- ekstra margin i forhold til ytre påkjenninger på utstyr som er viktig for å unngå avbrudd i kraftnettet

Alternativt kan sonegrense 3 betraktes som et nødvendig skille for å ivareta elektromagnetisk kompatibilitet mellom utstyr som ellers ville bli plassert i samme sone (sone 2).

Eksemplet foran viser den generelle metodikken. Avhengig av de lokale forhold og hva som skal oppnås, kan dempingen i en eller flere sonegrenser settes til null. Det betyr at antallet soner reduseres tilsvarende. Det er viktig å forstå at antall sonegrenser ikke sier noe om hvilken demping som totalt oppnås. Soneinndeling er bare en metode for systematisering av beskyttelsestiltak, der brukeren kan gjøre mer eller mindre fornuftige valg mht inndeling i soner. Det er den praktiske kombinasjonen av jording, skjerming og avledning (filtrering) som bestemmer støydempingen. Teoretisk kan man derfor klare seg med bare en sonegrense, der alle beskyttelsestiltak gjøres over denne sonegrensen. (Se f eks global skjerming i kap 5.2.)

Det blir derfor misvisende å hevde at utstyr med den høyeste EMP-beskyttelsen alltid skal plasseres i sone 3. I eksemplet foran stemmer riktignok dette. Generelt vil dette imidlertid avhenge av den overordnede strategien som er valgt for beskyttelsestiltakene i kraftanlegget. Det sentrale blir derfor å fokusere på hvilket elektromagnetisk miljø man ønsker og hvordan dette skal oppnås, i stedet for å telle antall sonegrenser.

Noen ganger kan det også være vanskelig å gjennomføre logikken som soneinndelingen opprinnelig legger opp til. Det er f eks ikke alltid mulig å plassere utstyr med like høy prioritet til EMP-beskyttelse i samme hovedsone. Et eksempel er feltdatamaskiner i utendørs feltskap, som det er ønskelig å gi samme beskyttelse som feltkontrollen innendørs. I eksemplet foran er innendørs feltkontroll plassert i sone 3. Feltskapet utendørs står imidlertid i sone 1, og sonen inne i skapet blir strengt tatt sone 2. Problemstillingen er nevnt i figurteksten på fig 3.10 foran. Uansett sonenummer må dempingen i utendørs feltskap gjøres tilstrekkelig i forhold til omgivelsene.

3.5 VURDERING AV DRIFTSBEREDSKAP

Målsetningen med dette delkapitlet er å skissere en struktur for vurdering av EMP beskyttelsesstrategi. En del overordnede sikringstiltak som kan anvendes mot EMP blir presentert, for å synliggjøre hvilke valg som finnes og ev beredskapsmessige konsekvenser disse har. Dette delkapitlet vil ikke omfatte økonomiske betraktninger eller vurdere sannsynligheten for at ev EMP-trusler opptrer.

3.5.1 Innledning

Det er en nærmest umulig oppgave å gjøre et kraftforsyningsanlegg 100 % EMP-sikkert. Til det er variasjonene i de mulige påkjenningene fra kildene alt for stor, samtidig som anleggene er svært komplekse. Spesielle forhold kan f eks gjøre at påkjenningene blir langt sterkere enn de normerte testpulsene nevnt i kap 2. Dersom viktige kraftanlegg skal dimensjoneres slik at de tåler alle tenkelige påkjenninger, blir anleggskostnadene raskt uoverkommelige. En overordnet målsetning med beskyttelsestiltakene er derfor å redusere sannsynligheten for skader og forstyrrelser til et akseptabelt nivå. Dette kan oppnås både vha anleggstekniske løsninger og ulike beredskapsrutiner. Elementene som inngår i en slik vurdering vil bli belyst i dette delkapitlet. Målsetningen er å skissere en enhetlig, overordnet beskyttelsesstrategi mot ytre EMP-påkjenninger, som kan inngå i arbeidet med å gi anleggene et tilfredsstillende vern til en akseptabel pris.

Flere forhold vil være med på å bestemme EMP-beskyttelsen som til slutt velges i kraftanleggene:

- Myndighetene ivaretar hensynet til totalforsvaret gjennom forskrifter eller retningslinjer. Dette omfatter bl a vurderinger av
 - Beredskapsmessige og samfunnsøkonomiske konsekvenser ved avbrudd i kraftforsyningen, satt opp mot tilleggsinvesteringene som kreves for å gjennomføre EMP-sikring. (F eks tiltak som utvidet reservelager, ev forsterket utføring av jording, skjerming og avledning osv.)
 - Kost-nytte vurdering av sikringstiltakene mot EMP i forhold til sannsynligheten for at en EMP-trussel vil inntreffe
- Eierne av kraftforsyningsanlegget skal
 - Oppfylle myndighetenes (funksjons)krav for kraftanleggene mht EMP
 - Gjøre teknisk-økonomiske vurderinger av hvilke tiltak eller kombinasjoner av tiltak som skal velges. Vurderingene bør også inkludere den økonomiske gevinsten som en antatt reduksjon av EMC-problemer vil medføre i et EMP-sikret kraftanlegg. (Pga generelt økt immunitetsnivå mot tradisjonelle EMI-kilder som direkte lynnedslag, koplings-overspenninger osv).

3.5.2 Overordnede EMP-tiltak

Sikring mot EMP inngår som en del av beredskapsstrategien til eierne av kraftforsyningsanleggene. Oversikten nedenfor skiller mellom hvorvidt en EMP-trussel er ventet på forhånd eller ikke: Det kan f eks tenkes politiske situasjoner der myndighetene vurderer sannsynligheten for sabotasje- eller krigshandlinger mot kraftforsyningsanlegg som høy. I slike tilfeller kan de som er ansvarlig for driften av kraftforsyningsanleggene varsles for ev å øke EMP-beredskapen.

Følgende tiltak er tilgjengelig for å redusere sårbarheten overfor en ev EMP-trussel:

- Normal EMP-beredskap, dvs ingen spent politisk situasjon e l som krever økt beredskap:
 - Tradisjonell EMP-sikring vha jording, skjerming og avledning (filtrering)
 - Global beskyttelse/skjerming (Hele bygninger eller rom omsluttet metallisk med én skjerm (dvs ett soneskille), og ev avledning (filtrering) gjøres i det soneskillet passerer. Hele støydemperingen mot ytre forstyrrelser utføres i dette soneskillet.)
 - Differensiert beskyttelse/skjerming (Ulik grad av beskyttelse benyttes for forskjellige deler av anlegget og fordeles typisk over flere soneskiller (virtuelle eller metalliske skjerm). Ev avledning (filtrering) gjøres i det soneskillet passerer.)
 - Reserverlager
 - Kan redusere avbruddstiden betraktelig fordi komponenter og utstyr raskt kan settes i stand (unngår produksjons- og/eller leveringstid)
 - Rutiner for manuell styring av operatør (lokal styring av lokal stasjonsdatamaskin, på styrepanel i relé-/feltskap eller direkte styring)
 - Tilstrekkelig avsperring av området omkring kraftforsyningsanlegget (f eks vha gjerde)
 - Reduserer sannsynlighet for RFW-trussel fra håndholdte generatorer/sendere pga økt avstand
- Økt EMP-beredskap, f eks pga spent politisk situasjon:
 - Som ovenfor, men med følgende tillegg:
 - Innstilling av produksjon og last i kraftnettet med tanke på bedre stabilitetsmargin [3.3]
 - Alt avhengig av tid fram til forventet forstyrrelse, kan dette innebære å sette anlegg under revisjon klar for drift igjen, legge ut kondensatorbatteri pga antatt sårbarhet overfor HEMP type 1 osv. (Gjøre anlegget mer robust i forhold til plutselige utfall av produksjon, overføring eller last. Se fig 2.1, punkt (5).)
 - Varsling eller innkalling av personell til lokal, manuell betjening av kraftforsyningsanlegg [3.3]

3.5.3 Driftskonsekvenser av EMP

Dersom et kraftforsyningsanlegg blir utsatt for en EMP-påkjennning, er det prinsipielt to utfall av dette:

- Ingen avbrudd i kraftforsyningen
- Avbrudd i kraftforsyningen

I det første tilfellet kan utstyr være ødelagt, selv om kraftanlegget fortsatt fungerer. Alt avhengig av hvor mye disse skadene påvirker leveringspåliteligheten i kraftanlegget, vil reparasjonene gis ulik prioritering.

I tilfellet med avbrudd i kraftforsyningen, vil virkningen på utstyr og apparat kunne variere mellom:

- Ikke noe utstyr er permanent ødelagt, anlegget har samme funksjonsevne som før etter ny oppstart eller innkopling
- Mindre viktig utstyr er ødelagt. Dette må repareres, men anlegget kan fungere i mellomtiden
- Viktig utstyr er ødelagt, og reparasjoner er nødvendig før anlegget vil fungere igjen

Kravene som pålegges et anlegg i forhold til konsekvensene skissert ovenfor, vil påvirke EMP-sikringen som velges. Dersom enhver driftsforstyrrelse som fører til avbrudd er sterkt uønsket, må tradisjonell EMP-sikring (jording, skjerming og avledning) vektlegges høyt. Er derimot kortere avbrudd og utkoplinger akseptable, blir f eks et reservelager av viktige komponenter mer aktuelt.

Hvilket utstyr som skal inngå i et ev reservelager, vil avhenge av den totale beskyttelsesstrategien som velges for de ulike kraftanlegg. I praksis vil det kun være sentrale komponenter i et kraftforsyningsanlegg som er aktuelle å ha på lager. Kapittel 2.6.1 konkluderte med at typiske elkraftkomponenter (f eks generatorer og transformatorer) ikke skades permanent av HEMP, under forutsetning av at transformatorene beskyttes med avledere. (E_1 vil kunne ødelegge ubeskyttede transformatorer plassert i overføringsnettet, samt en liten prosent av de i fordelingsnettet.) RFW er ikke noen trussel for elkraftkomponenter. LEMP-trusselen er noe anleggene alltid har måttet leve med, og trusselen ivaretas allerede gjennom dagens driftsberedskap for kraftanleggene. Et EMP reservelager for elkraftkomponenter ut over det LEMP-trusselen krever, er derfor ikke påkrevet i anlegg hvor transformatorene er beskyttet med avledere. Sentrale komponenter og utstyr som inngår i kommunikasjons- eller kontrollanlegg, kan derimot være aktuelle å ha i et reservelager. Det er i så fall viktig å lagre disse slik at de er minst mulig utsatt for ytre, strålte påkjenninger. (Se under overskriften ”Sårbarhet overfor EMP-påkjenninger” i kap 2.6.2)

3.5.4 Vurdering av beskyttelsesstrategi

Fig 3.12 forsøker å illustrere sammenhengen mellom valg og konsekvenser av ulike EMP sikringstiltak vha et flytdiagram. EMP-problemstillingen er kraftig forenklet i figuren, og det blir gjort en rekke forutsetninger. Likevel bør tenkemåten bak metodikken komme fram for leseren. De viktigste forutsetningene er:

- Global beskyttelse betegner en metallisk skjerm rundt hele innendørsanlegget. Videre forutsettes at denne skjermingen er vellykket utført, slik at anlegget er tilstrekkelig beskyttet. (Dette er ingen selvfølgelighet: Det er kostbart å føre inn og ut alle lederne uten å forringe kvaliteten på sonegrensen.)
- Differensiert beskyttelse er et anlegg med soneinndeling som beskrevet foran i kap 3.4. (Se også kap 5.3 for flere detaljer.) Også denne beskyttelsesstrategien er vellykket utført. Alt utstyr er ikke like mye beskyttet, derfor aksepterer man at mindre vitalt utstyr blir ødelagt, og at reparasjon er nødvendig for å oppnå full funksjonalitet igjen. Videre at full styrbarhet av anlegget krever manuell operatørbetjening.

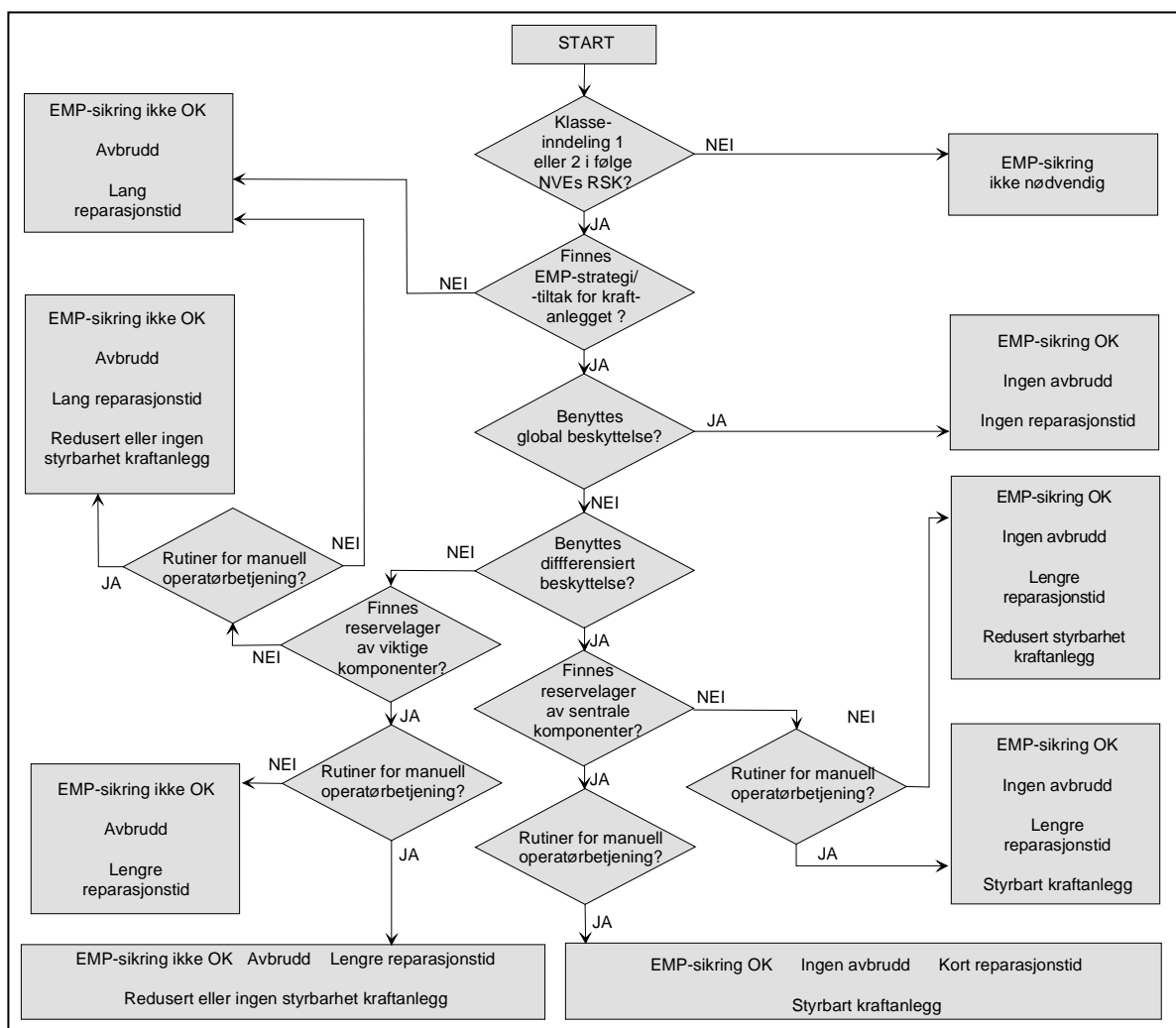
Flytdiagrammet er unyansert med tanke på at EMP-truslene (LEMP, HEMP og RFW) er relativt ulike av natur:

- LEMP og RFW er bare en lokal trussel, dvs skadeområdet er begrenset geografisk til typisk ett anlegg eller deler av ett anlegg. Dette har bl a betydning for reservedeler: Det vil være mulig å skaffe reservedeler eksternt etter en LEMP og RFW-påkjenning.
- HEMP berører et større geografisk område, slik at eksterne reservedeler ikke kan skaffes. (Forutsetter egentlig at eksternt lagrede reservedeler ikke har hatt tilstrekkelig beskyttelse, og

derfor er ødelagt av HEMP-påkjeningen. Ev at etterspørselen er så stor at den ikke kan dekkes.)

- LEMP er et vanlig naturfenomen som kraftanlegg ofte utsettes for. RFW og HEMP er fenomener som sjelden eller aldri vil opptre i levetiden til et kraftanlegg. Dette bør påvirke vurderingen av tiltakene i den grad de ikke er sammenfallende for alle fenomenene.

På denne bakgrunn kan en argumentere for å ha ett flytdiagram for LEMP, et annet for HEMP og et tredje for RFW. Selv med tre ulike flytdiagram ville likevel framstillingen blitt svært forenklet, og leseren måtte uansett tilpasset diagrammet sine rammevilkår og begrensninger. Målsetningen med figuren er derfor å illustrere en mulig metode for å analysere konsekvenser av EMP-tiltak, og vise hvilke parametre som bør inngå i en slik vurdering.



Figur 3.12 Eksempel på underlag for å vurdere ulike EMP-tiltak og deres driftsmessige konsekvenser vha et flytdiagram.

En annen tilnærming til problemstillingen er vist i vedlegg 3. Her er en trestruktur som normalt benyttes ved beslutningsstøtteteori skissert. Vha denne metoden kan man få fram alternativene som eksisterer og konsekvensene de fører til.

3.6 REFERANSER

- 3.1. Berstad, H.: Elektromagnetisk topologi.
Kap. 5 i EMC-kurs. (EEU-kurs ved SEVU 1995)
- 3.2. Vance, E. F.: Electromagnetic interaction with large systems.
Electromagnetics 6, 1986. pp 61-72.
- 3.3. Reddoch T. W. et al: HEMP Emergency Planning and Operating Procedures for Electric Power Systems. ORNL/Sub/91-SG105/1. Martin Marietta Energy Systems Inc., Oak Ridge National Laboratory. 1993.

4 BESKYTTELSESTILTAK

Dette kapitlet beskriver beskyttelsestiltakene jording, skjerming, avledning og filtrering med spesiell vekt på EMP-relevante opplysninger. Kapitlet gir en kort teoretisk oversikt, med hovedvekt på prinsippene for metodene.

Målsetningen med kapitlet er å gi et generelt teoretisk fundament for utføring av vellykket EMP-sikring av et kraftforsyningsanlegg, samt skissere ulike alternativ for en del av tiltakene.

4.1 JORDING

Dette delkapitlet viser først ulike generelle strategier for jording av elektriske anlegg. Deretter presenteres jordingsstrategien som er valgt i håndboka. Til slutt gis det noen generelle råd knyttet til utføringen av jordingsanlegget.

4.1.1 Generelt om jording

Jordingsanlegget i et kraftforsyningsanlegg har flere oppgaver. Hovedhensikten er å trygge personsikkerheten (unngå berøringsfare) og beskytte apparater og anlegg mot skader (fra f.eks. lynnedslag, koplingsoverspenninger, feil e.l.). I tillegg skal jordingsanlegget hindre EMC-problemer i kraftforsyningsanlegget ved å være en returvei for strømmen mellom støykilde og følsomme apparater, samt en spenningsreferanse for beskyttelseskomponenter som vern, filtre o.l. [4.2].

De ulike oppgavene påvirker og bestemmer utformingen av jordingsanlegget [4.2]:

- Personsikkerhet og lynpåkjenninger bestemmer jordelektrodens utforming
- Personsikkerhet og beskyttelse av installasjon bestemmer jordledernes tverrsnitt
- Kravene til EMC-oppførsel bestemmer utformingen (forlegningen) av jordingsnettverket

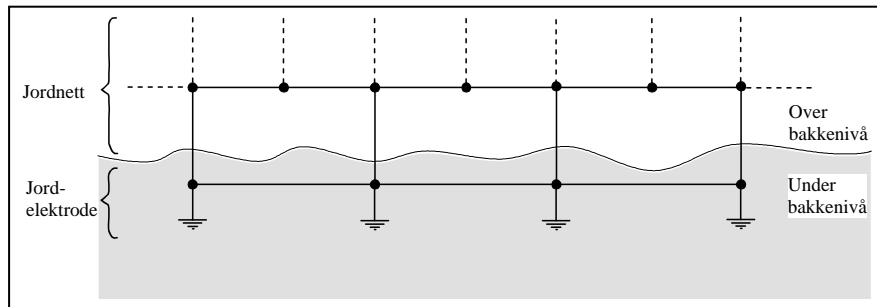
Ved utformingen av jordingsanlegget kan det oppstå motstridende ønsker mht personsikkerhet og EMC-relaterte egenskaper. I slike tilfeller skal alltid sikkerhetsaspektet prioriteres foran ev. EMC-dpendende tiltak.

Generelle krav til jording av det elektriske anlegget i kraftforsyningsanlegg er gitt i "Forskrifter for elektriske anlegg – Forsyningsanlegg" (1995) [4.3]. Jording av utstyr/komponenter/apparater skal tilknyttes hovedjord, som også er beskyttelsesjord i anlegget. Hovedjord omfatter ledere som forbinder jordelektroder og bygninger i anlegget. Ofte legges disse langs kabelføringer som isolerte eller uisolerte ledere, og forbinder de ulike jordskinner/-lasker/-skruer i apparater og utstyr til jordingsanlegget. I denne håndboka kalles disse jordlederne ofte for potensial-utjevningsledere.

4.1.2 Ulike jordingsstrategier for kraftforsyningsanlegg

Det eksisterer mange ulike strategier for jordingsutformingen av et kraftforsyningsanlegg. Flere kan i prinsippet fungere tilfredsstillende mht jordingsanleggets oppgaver inklusiv EMP-beskyttelse.

Dette underkapitlet presenterer to ulike strategier for jording av kraftforsyningsanlegg, sammen med kommentarer knyttet til fordeler og ulemper. (Flere detaljer og andre strategier er vist i [4.2].) I denne beskrivelsen er det hensiktsmessig å skille mellom hhv jordelektroden og jordnettet av et jordingsanlegg. Dette er illustrert i fig 4.1. (Jordelektrodens utførelse er lik for begge strategiene og tilsvarer dagens norske praksis for jordelektroden i kraftforsyningsanlegg.)



Figur 4.1 Skisse av jordingsanlegg med jordelektrode og jordnett inntegnet. (Kilde [4.2].)

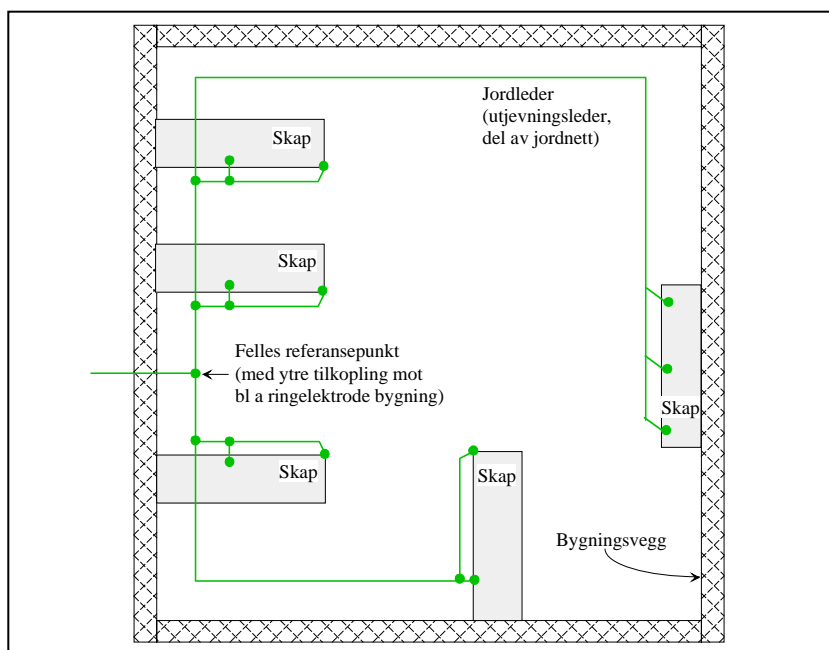
Jordnett utført som strålenett

Jordelektroden:

Jordelektroden er et nedgravd maskenett under og omkring bygninger og utendørsanlegg. (Maskenettet under bygninger vil ofte være erstattet av en ringelektrode.) Ofte er maskenettet komplettert med radielle kabler og/eller jordspyd ved tilkoplingspunktet fra lynavledere, høyspenningsapparater eller andre apparater med høye feilstrømmer i jordingsanlegget [4.2]. Fysisk separerte maskenett og/eller ringelektroder blir bundet sammen av isolerte eller uisolerte kopperledere i bakken. Disse kopperlederne legges inntil øvrige kabelføringer (–grøfter).

Jordnettet:

Et felles jordingspunkt opprettes i bygninger e l. Denne jordreferansen kan ha flere tilkoplinger mot jordelektroden, men bare en tilkopling videre inn mot de ulike deler av installasjonen. Se fig 4.2. Det blir forsøkt å unngå sløyfer i jordnettet.



Figur 4.2 Skisse av jordnett utført som strålenett i bygning.

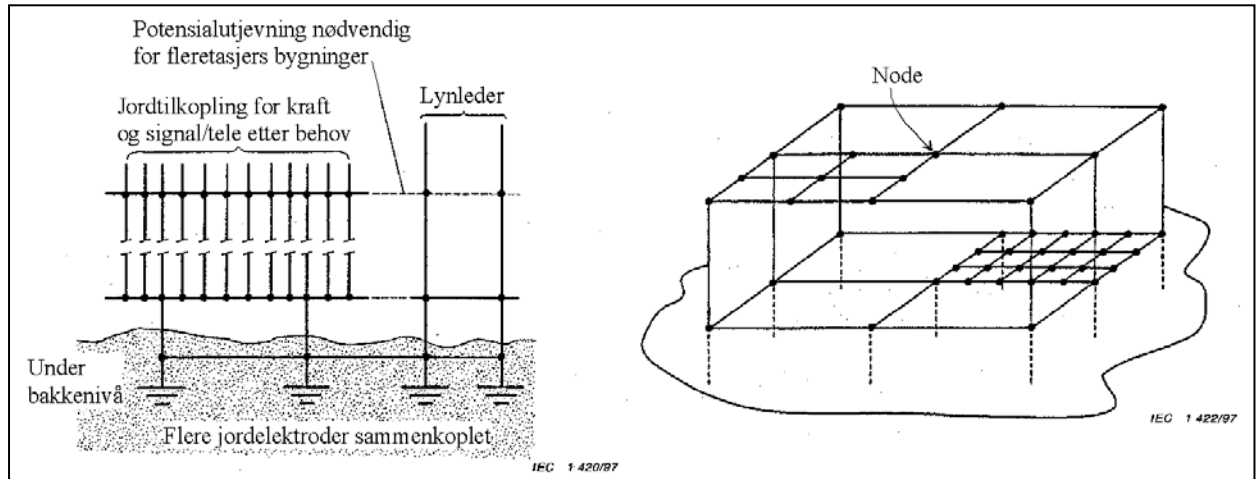
Jordnett utført som maskenett

Jordelektroden:

Som for strålenett ovenfor.

Jordnettet:

Det etableres et (tredimensjonalt) maskenett i bygninger og lignende anlegg, se fig 4.3.



Figur 4.3 Skisse av jordelektrode sammen med jordnett utført som maskenett. (Kilde: [4.2].) Jordelektroden samsvarer med fig 4.1. Jordnettet i venstre delen av figuren er egentlig et tredimensjonalt maskenett som er illustrert mer detaljert i figuren til høyre. Alle maskenett skal ha minimum to forbindelser til andre maskenett/jordelektrode. Minimum to lynledere benyttes for å redusere impedansen, begrense strømmen i én leder samt oppnå redundans mot brudd. Ved høye bygninger (mange etasjer) potensialutjevnes lynlederne til maskenettet for å redusere faren for utladninger pga spenningsforskjeller mellom lynlederne og jordete apparater i nærheten.

I hvert rom eller område skal potensialutjevning for apparater, skap, kabelstiger, vann- eller ventilasjonsrør osv koples til noder i maskenettet lokalt. Videre anbefales det lokale forsterkninger av maskenettet ved f eks støyfølsomme apparater (eksempel: elektronisk utstyr) eller høyeffekt apparater (eksempel: krafttransformatorer) o l. Avstanden mellom følsomt og støyende utstyr maksimeres, og det opprettes soneinndeling for samme typer utstyr, f eks elektronikkutstyr, brytere, kraftkomponenter som transformatorer osv. En eller flere utjevningsledere føres parallelt med kabelføringene i installasjonen. Fra [4.2].

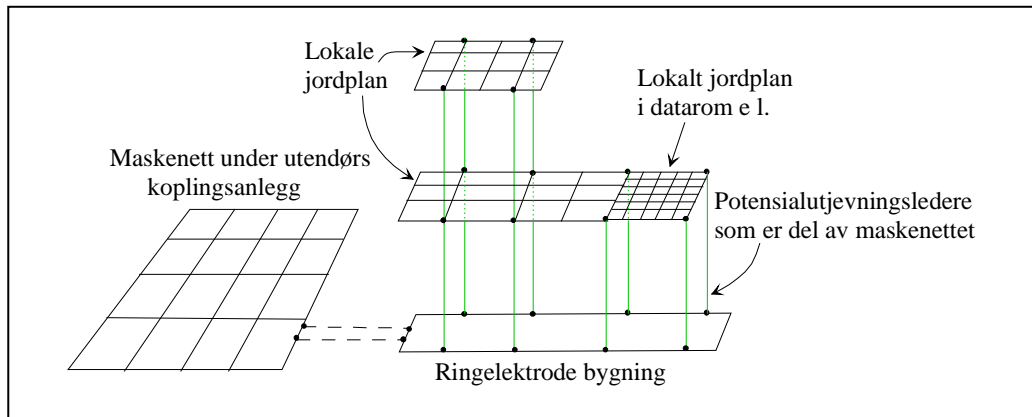
Strålenett kontra maskenett

Strukturen i strålenettet gjør det sårbart for resonansproblemer med tilhørende høy impedans i returleder til jord ved enkelte frekvenser. Strålenett krever en enhetlig gjennomføring mht installering og vedlikehold: Det er f eks en fare for uønsket jordforbindelse mellom to geografisk atskilte apparater via en skjermet kabel, slik at ev høyfrekvente, transiente potensialforskjeller i jordingsanlegget gir støyrømmer i kabelskjermen. Med en kompetent teknisk avdeling som administrerer alle endringer i anlegget, kan imidlertid slike problemer unngås.

Maskenett [4.2] har en struktur som gjør det lettere å oppnå god beskyttelse mot person- og apparatskade samt tilfredsstillende EMC-kravene. Dette fordi selve oppbygningen er robust mot spenningsforskjeller: Riktig utført oppnår den en meget god potensialutjevning av anlegget, og de mange parallelle jordtilkoplingene reduserer faren for resonanser med tilhørende høy impedans i returleder til jord ved enkelte frekvenser. En fare med maskenettet er imidlertid at store jord-

strømmer fra apparater kan løfte potensialet til f.eks. følsomt elektronikkutstyr pga felles impedans i jordnettet. Dette problemet reduseres ved at apparatene koples direkte til maskenettets noder i stedet for mellom nodene, og at utstyret separeres tilstrekkelig.

Et eksempel på maskenett i et tenkt kraftforsyningsanlegg er vist i fig 4.4.

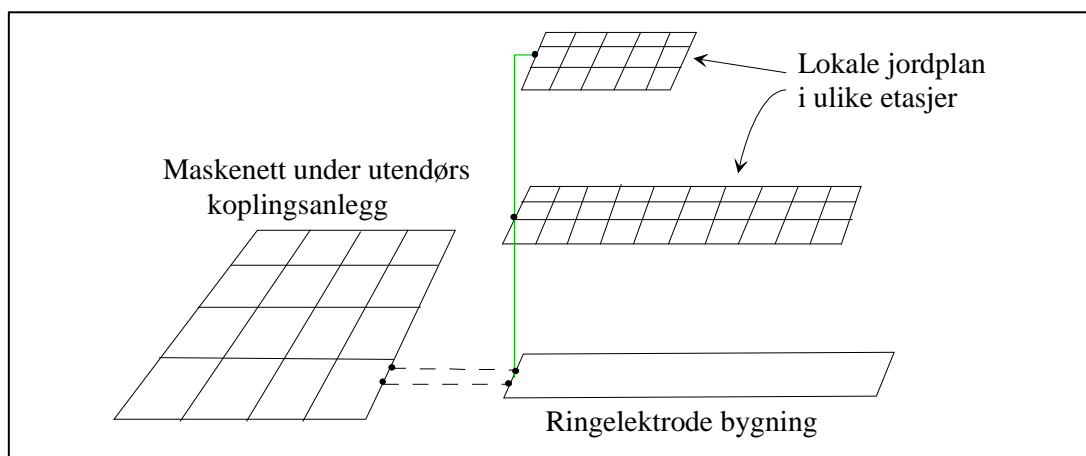


Figur 4.4 Grov skisse av jordingssystemet i et kraftforsyningsanlegg der jordnettet er et tredimensjonalt maskenett.

4.1.3 Håndbokas valg av jordingstrategi

I denne håndboka er det valgt å benytte en modifisert versjon av jordnett utført som strålenett. Det er flere grunner til dette. Håndbokas forslag til jordingstrategi ligger nær opp til dagens praksis i norske kraftforsyningsanlegg. I tillegg passer strategien godt sammen med metoden for soneinndeling av apparater og utstyr, som er nærmere beskrevet i kap 3.2. Sist men ikke minst, er det en metode som kan ivareta jordingssystemets oppgaver mht sikkerhet, beskyttelse og EMC inklusive EMP-påkjenninger. Strategien forutsetter likevel at prinsippene med avkopling i et felles innføringspunkt følges av de som planlegger og vedlikeholder anlegget.

Fig 4.5 viser eksempel på jordingstrategien som er valgt i håndboka.



Figur 4.5 Grov skisse av jordingstrategien som er valgt i håndboka.

Strategien er en modifisert versjon av jordnett utført som strålenett: Et maskenett plasseres på gulv som et lokalt jordplan. De lokale jordplanene koples sammen med en eller flere parallelle utjevningsledere, som termineres ved inngangen på de ulike maskenettene. Dette termineringspunktet blir et felles innføringspunkt/jordreferanse for alle kabler o.l som føres inn i området. I tillegg til maskenettet føres separate utjevningsledere parallelt med alle kabelføringer i anlegget.

Hovedforskjellene mellom fig 4.4 og 4.5 foran, er antallet tilkoplingspunkt mellom maskenettene. I tillegg anbefaler håndboka kun én størrelse på maskenettet innendørs, uavhengig av type utstyr som er plassert der. (Anbefalt maskevidde ca 8 cm.) Se ellers kap 4.2.3 (fig 4.13).

Utføringen av jordingsstrategien blir behandlet nærmere i kap 5. Håndboka gir imidlertid ikke detaljer omkring utforming, plassering og dimensjonering av jordelektroder. I stedet henvises leseren til spesielle jordingshåndbøker for denne type informasjon.

4.1.4 Jordingsanlegget i kraftforsyningsanlegg

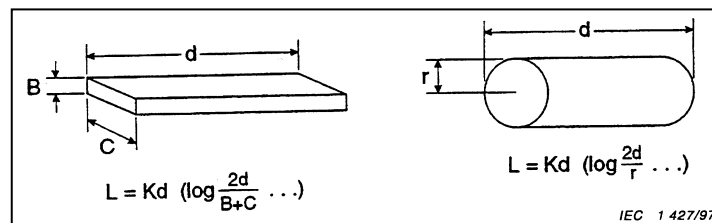
Oppgaven til jordingsanlegget er som nevnt å avlede uønskede lav- og høyfrekvente strømmer og minske spenningsforskjeller internt i anlegget. Det er derfor viktig at impedansene både i selve jordingsanlegget og tilkoplingene til dette holdes så lave som mulig. Nedenfor følger noen generelle regler for å oppnå løsninger med lav impedans (stikkord):

Utendørs:

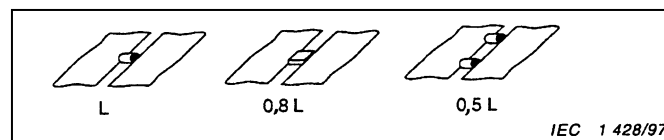
- Massive ledere er å foretrekke framfor flertrådede (pga korrosjonsproblemer)
- Sveiste lederskjøter er gunstigere enn skrudde/klamrete (pga korrosjonsproblemer)

Generelt:

- Alle jordtilkoplinger gjøres så korte som mulig (til apparater, vernekomponenter o l). Spesielt er dette viktig for alle typer vern: Med høy impedans i tilledningene, fungerer ikke vernene tilfredsstillende overfor de meget høyfrekvente EMP-påkjenningene.
- Flate (rektangulære) ledere er i utgangspunktet bedre egnet til høyfrekvens utjevningsledere enn runde ledere, se fig 4.6. Legg ellers merke til at en enda bedre effekt kan oppnås med flere parallelle ledere (fig 4.7) [4.2].



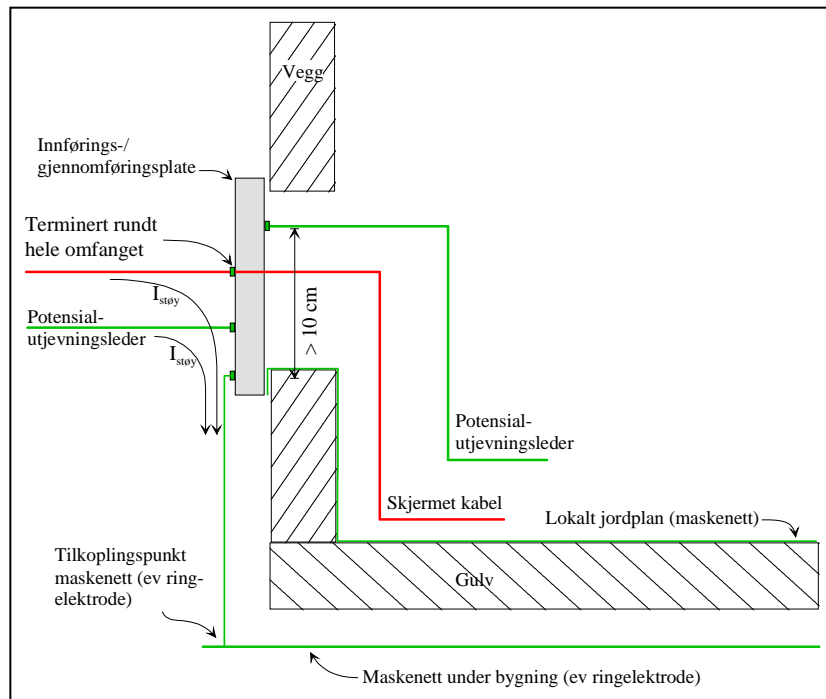
Figur 4.6 Forenklet formel for relativ induktans L i en flat kontra en rund leder. Uttrykket for L til venstre blir alltid mindre enn uttrykket til høyre, dersom lederne har samme tverrsnitt. (Kilde: [4.2].)



Figur 4.7 Relativ induktans L for hhv en rund, en flat og to parallelle, runde ledere. Alle lederne i figuren har det samme tverrsnittet. (Kilde: [4.2].)

- Alle termineringer av utjevningsledere, kabelskjermer og øvrige jordledere utføres slik at de har så liten impedans som mulig, også ved høye frekvenser. Dette innebærer f eks at alle skjermede kabler anbefales terminert rundt hele omfanget av jordskjermen til termineringspunktet. Se fig 4.8.

- Avkopling til jord ved felles innføringspunkt anbefales utført vha en innførings- eller gjennomføringsplate som termineres til det lokale jordplanet (maskenettet). (Denne innføringsplaten benyttes både ved skjermede og uskjermede rom eller bygninger.) Se fig 4.8.



Figur 4.8 Skisse av felles innføringsplate og prinsippene for terminering av skjermede kabler (rød), utjevningsledere (grønn), leder til jordelektrode (maskenett) samt lokalt jordplan.

Jordtilkoplingene på begge sider av innføringsplata bør ikke stå rett overfor hverandre, men forskyves med minimum 10 cm avstand.

- Alle kabelføringer skal ha en eller flere potensialutjevningsledere ført parallelt. Utjevningslederne har flere hensikter. Foruten personsikkerhet, apparatbeskyttelse og utjevning av spenningsforskjeller i anlegget, bidrar de også til å redusere industert spenning mellom kabel og jord. Dette krever imidlertid at avstanden mellom kabler og utjevningslederen reduseres så mye som mulig. Se forøvrig ”Lederføringer” under kap 5.4.2.
- Utjevningslederne og jordledere for øvrig termineres i hver ende. Når de koples til apparater, skap e l, skal de i tillegg koples til det lokale jordplanet (maskenettet) [4.2]. Lange utjevningsledere kan med fordel koples til maskenettet i flere punkter langs lederne. Se også fig 4.12.

4.2 SKJERMING

Delkapitlet gir først en kort innføring i skjermingsteori. Deretter blir ulike metoder for skjerming presentert, sammen med en antatt demping ved de ulike metodene.

4.2.1 Innledning

En elektromagnetisk skjerm som beskytter et område mot EMP skal:

- Redusere feltstyrken på innkommende strålte elektromagnetiske felter
- Avlede innkommende ledningsbundne strømmer til jord

Hvilke skjermingstiltak som er nødvendig vil variere fra et kraftforsyningsanlegg til et annet. Utforming og plassering kan variere svært mye avhengig av anleggstype, bygningsår, antatt viktighet innen totalforsvaret osv. Mens noen anlegg hovedsakelig er i fjell, ligger andre åpne i dagen. Et anlegg med god overdekning i fjell vil ha et enklere utgangspunkt for å oppnå den samme EMP-beskyttelsen som et tilsvarende utendørsanlegg, se for øvrig kap 4.2.3.

Det blir opp til de som konstruerer anlegget å kombinere de ulike skjermingsmetodene, slik at EMP-kravene til anlegget tilfredsstilles. Resten av delkapitlet vil gi informasjon om forventet demping som ulike metoder og konstruksjoner kan gi.

Det er verdt å merke seg at den totale dempingen i et skjermet bygg eller rom ikke begrenses alene av ledningsevne, magnetisk permeabilitet eller tykkelse på skjermmaterialet. I stedet vil åpninger, skjøter og ikke minst hvordan ledere føres inn gjennom skjermveggen, påvirke sterkt den totale skjermvirkningen [4.9]

4.2.2 Teoretiske begreper

Dempingen S (også kalt skjermingseffektiviteten) i en elektromagnetisk skjerm, kan generelt uttrykkes ved (alle størrelser i desibel):

$$S = R + A + B$$

- R er dempingen som skyldes refleksjon fra en overflate. Denne er en funksjon av skjermmaterialet, frekvensen og den type felt en har.
- A er absorpsjonstapene, som er en funksjon av materialet og frekvensen, men er uavhengig av type felt.
- B representerer interne refleksjoner (multipel refleksjon). Dersom absorpsjonstapene, A , er større enn 10 dB, blir B vanligvis neglisjert. Dvs B er bare av interesse for meget tynne skjermer.

Når vi har å gjøre med transiente forløp for støybildet, som i elektromagnetiske pulser, brukes diffusjonstiden for å beskrive skjermingseffektiviteten. Diffusjonstiden, τ_d , er et mål på den tiden en puls bruker for å trenge gjennom en metallskjerm;

$$\tau_d = \mu_r \cdot \mu_o \cdot \sigma \cdot d^2$$

- μ_r er relativ permeabilitet
- μ_o er permeabilitet i vakuum
- σ er ledningsevnen for skjermmaterialet
- d er skjermens tykkelse.

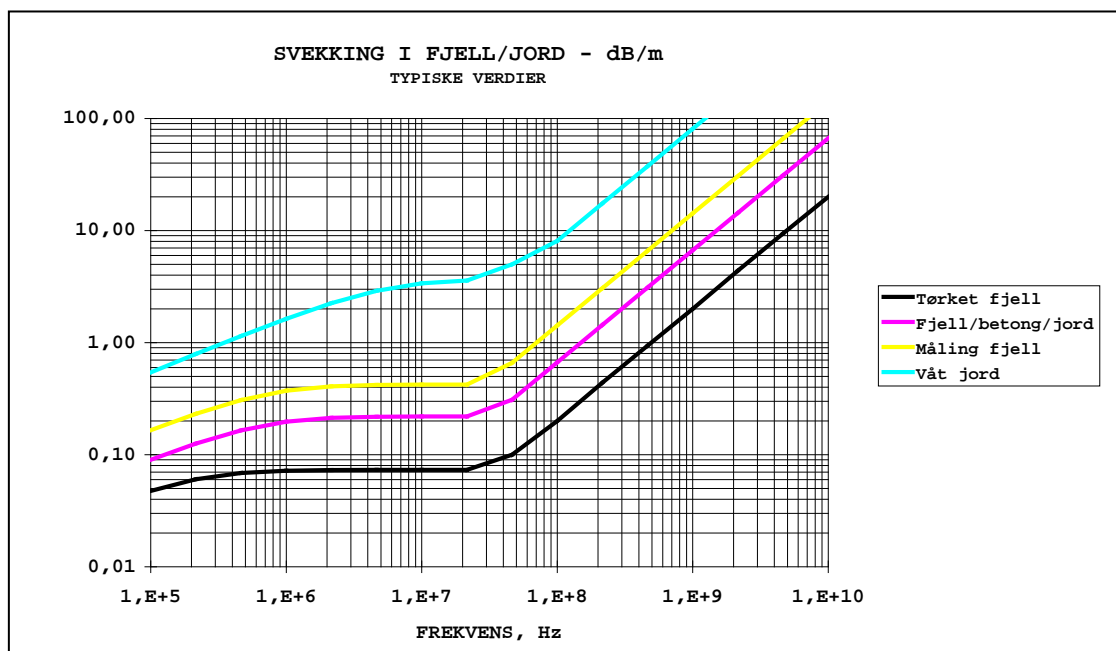
Diffusjon gjennom metaller går svært langsomt. Dette betyr at skjermingseffektiviteten er god selv for tynne skjermer. F.eks. er diffusjonstiden ca. 2 μ s for 0,2 mm aluminiumsfolie. Sett i forhold til en puls i ns-området, gir dette en meget god demping. Målinger og beregninger på den samme aluminiumsfolien viser at for frekvenser over 100 MHz er skjermingseffektiviteten bedre enn 80 dB.

4.2.3 Ulike typer skjermingsmetoder

Overdekning i fjell

Anlegg i fjell vil ha en beskyttelse mot strålte EMP-påkjenninger fordi de elektromagnetiske bølgene svekkes nedover i bakken. Høye frekvenser svekkes mer enn de lave. Med andre ord vil pulsamplituden reduseres, mens stigetiden og pulsvarigheten øker etterhvert som pulsen forplanter seg ned i bakken. Dempingen avhenger av jordsmonnets elektriske egenskaper, foruten avstanden under bakkenivå. Amplituden til HEMP reduseres med typisk 30 dB med 10 m overdekning når $\sigma = 100 \Omega\text{m}$. Dersom spesifikk motstand øker til $\sigma = 1000 \Omega\text{m}$, blir dempingen bare ca 5 dB ved 10 m overdekning. Øker spesifikk motstand til $\sigma = 10000 \Omega\text{m}$, er dempingen med 10 meter overdekning kun ca 0,8 dB. (Fra [4.6].)

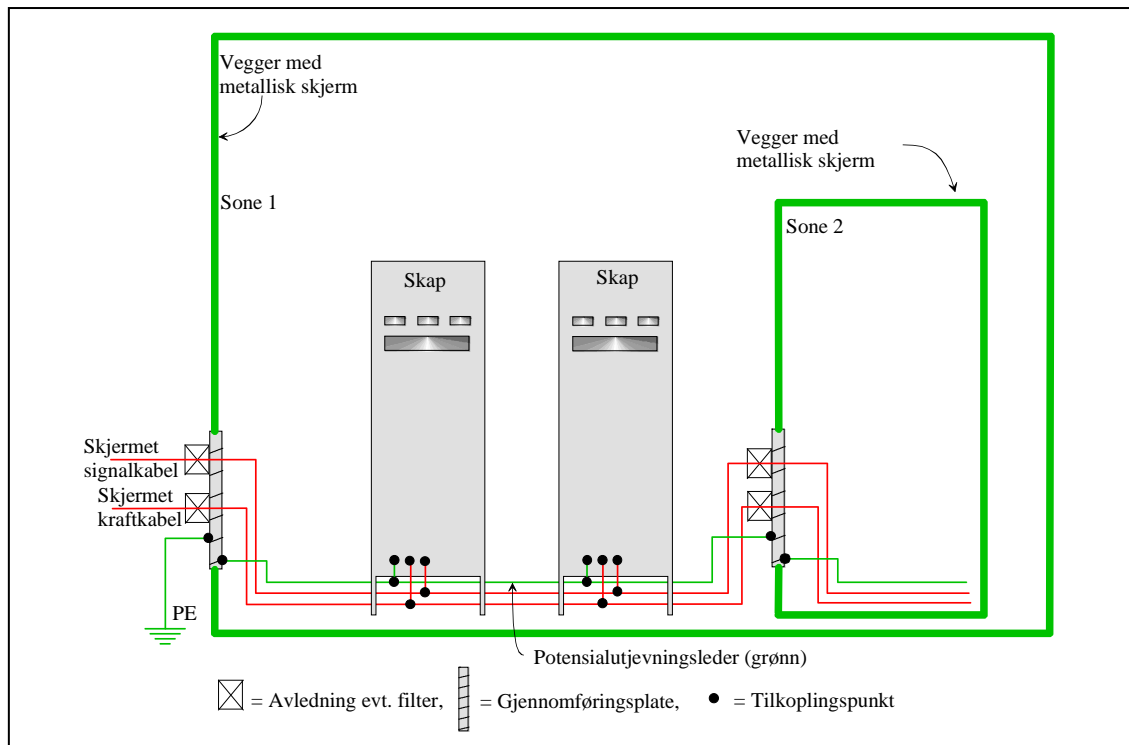
Fordi dempingen øker med høyere frekvens, vil anlegg i fjell ha tilstrekkelig demping mot trusler fra RFW-våpen. En illustrasjon av den frekvensavhengige dempingen for ulike typer overdekning er vist i fig 4.9 nedenfor.



Figur 4.9 Demping av elektromagnetiske bølger i ulike typer overdekning som funksjon av frekvens i dB/m. (Kilde: Basert på regneprogram fra FFI, verifisert mot enkelte målinger.)

Skjerming av rom og bygninger

Metallisk skjerm

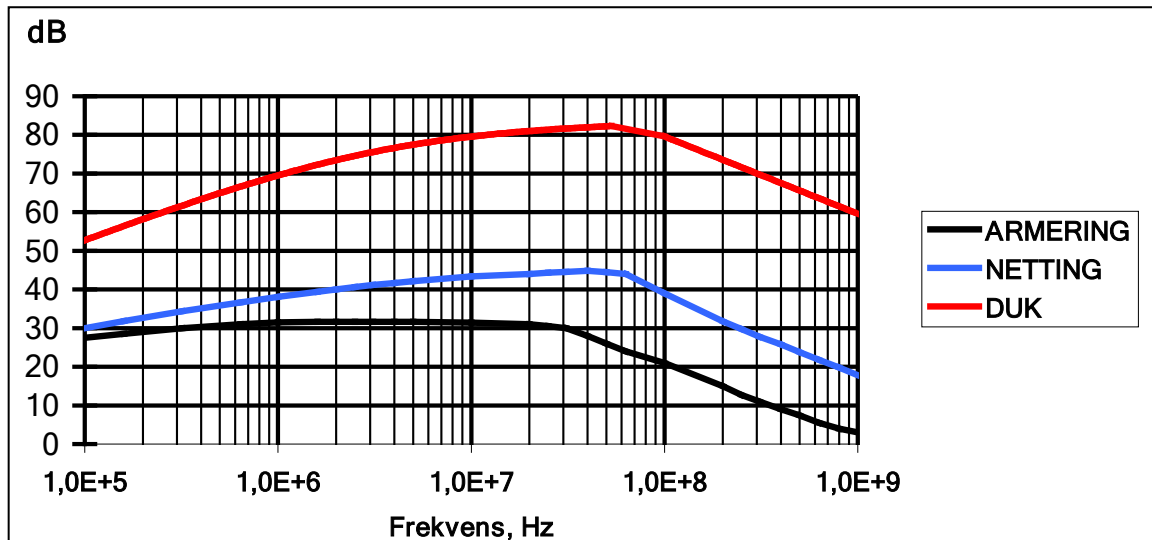


Figur 4.10 Prinsippskisse for skjerming av rom og bygninger vha metallisk skjerm.

Fig 4.10 viser prinsippet for skjerming vha en metallisk skjerm rundt hele området som skal skjermes. Følgende typer skjermmer kan f eks benyttes:

- Armert betong
 - Demping : Opp til 20 dB med sveist armering, typisk 10 dB med bindtråd (Frekvens: 20 MHz, armeringsjern 8 mm, lysåpning 100 mm.) [4.10].
Andre kilder viser opp mot 30 dB for sveist utføring, og 20 dB for bindtråd. Se fig 4.11.
 - Utføring: Viktig å sveise de krysspunktene av armeringsjernene som utgjør ytterkantene i kubene. (Overgangene vegg/golv og vegg/tak). Krysspunkt for øvrig bindes etter behov. [4.4]
- Tapsstoffer i betong (kan f eks være metallpartikler/-fibre eller -oksyder):
 - Demping: 20-30 dB
- Ulike typer netting:
 - Demping: Kyllingnetting (0,6 mm tråd, maskevidde 13 mm) og minknetting (0,55 mm tråd, maskevidde 6,5 mm) gir 30-40 dB demping, se fig 4.11. (Større demping kan oppnås med to lag netting. Refleksjonstapene er den dominerende effekten ved skjerming vha netting. Økende ledningsevne i skjermmaterialet gir derfor generelt høyere demping.)
 - Utføring: Kan f eks legges inntil betongvegg bak en indre kledning. Kan syes sammen i skjøtene med metalltråd eller foldes med overlapp [4.4]. (Se fig 5.10 kap 5.4.4 for nærmere detaljer.)
- Metallfolie eller -duk:

- Damping: 50-80 dB avhengig av frekvens, se fig 4.11.
- Utføring: Kan klebes til gipsplater e l. Alle skjøter foldes med overlapp, se fig 5.10 [4.4].

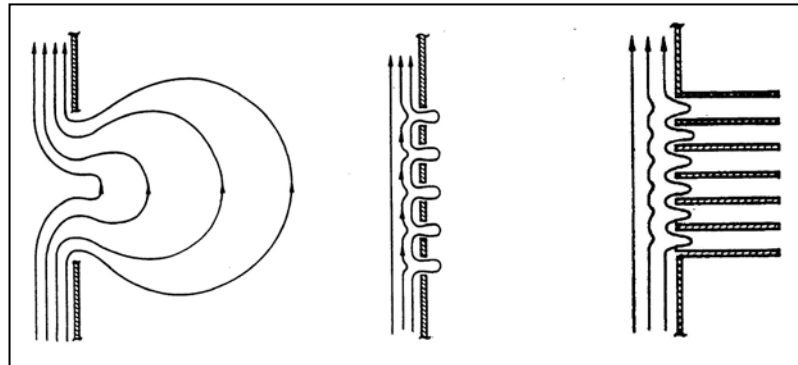


Figur 4.11 Eksempel på demping i ulike typer skjermingsmaterial (Kilde: Basert på regneprogram fra FFI, verifisert mot enkelte målinger.) Beregnet/målt på et 3x3x3 m³ rom.
 Type netting: Kyllingnetting (0,6 mm tråd, maskevidde 13 mm).
 Type duk: Messingduk nr 60 (antall tråder pr tomme).
 Armering: Sveist i alle krysspunkt som utgjør ytterkantene i kuben. (Se forklaring ovenfor.)

- Metallplater:
 - Damping: Ved å avpasse materialvalg og tykkelse, kan man oppnå godt over 100 dB demping i selve skjermingsmaterialet. I sammenheng med kraftforsyningsanlegg og kravene til EMP-sikring der, blir dette mindre relevant.
 - Utføring: Mest relevant for skap og kabinetter til apparatet. Viktig å ha god elektrisk kontakt i skjøtene, f eks må lakk eller annen isolerende overflatebehandling fjernes før sammenføring.

Generelle kommentarer knyttet til skjerming med metallisk skjerm (fig 4.10):

- Gjennomføringsplaten
 - er en lokal forsterkning av skjermen som dimensjoneres for å kunne avlede alle aktuelle strømmer.
 - koples til ytre jord/jordelektrode på utsiden
 - er referanse for jord og potensialutjevning på innsiden
 - må termineres rundt hele omfanget med god elektrisk kontakt til den metalliske skjermen
- Alle metalliske innføringer som skal passere sonergrensen, skal avkoples til gjennomføringsplaten utside rundt hele omfanget. Gjelder f eks alle skjermede kabler, ventilasjonsrør og vannrør av metall osv.
- Ev vern eller filter plasseres ved sonergrensen.
- Åpninger pga dører, vinduer, ventilasjon osv, gir lokal reduksjon i skjermen. Dette må tas hensyn til ved plassering av følsomt utstyr på innsiden. (EMC-pakninger i døråpninger er ikke nødvendig. Åpninger bør begrenses til et minimum: Unngå f eks vinduer dersom det ikke er et reelt behov.)



Figur 4.12 Prinsippskisse av ulike løsninger for ventilasjonsåpninger i apparat, skap eller rom (Kilde: [4.11].)

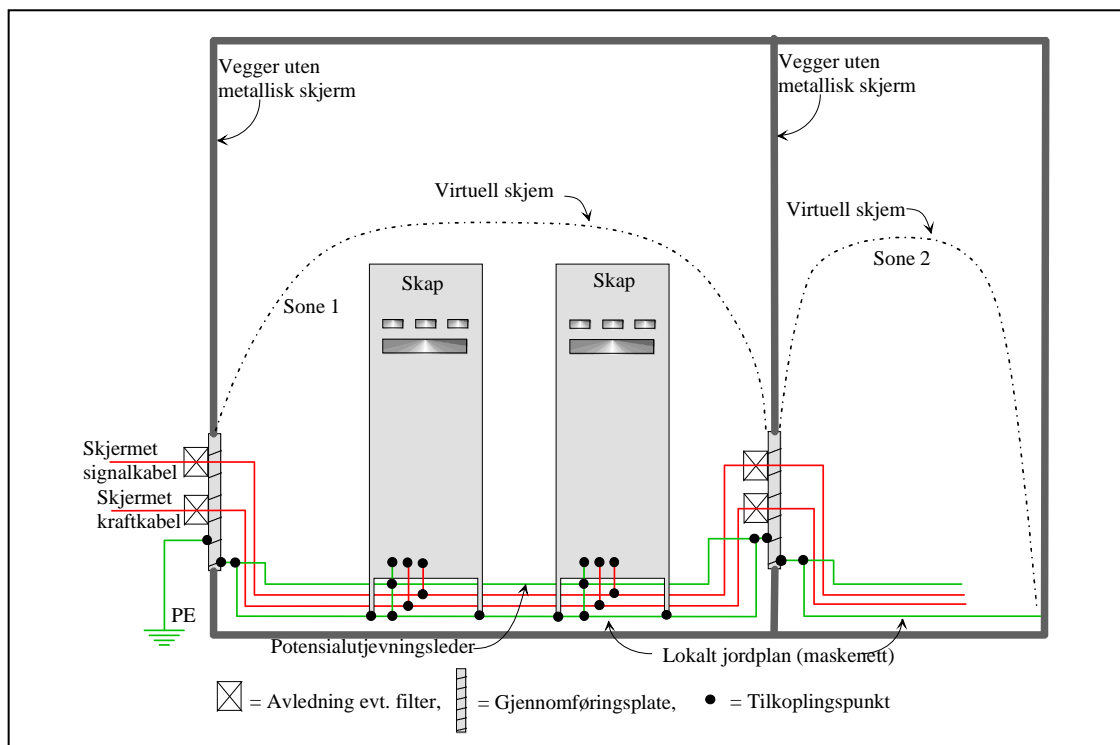
Venstre bilde : Uheldig løsning

Midtre bilde : Bedre løsning

Høyre bilde : Løsning for skjermrom med meget høye krav til skjerming (*honeycomb*)

- Den største dimensjonen i åpningen bør ikke være større enn $\lambda/2$, der λ er bølgelengden til frekvensene som det skal skjermes mot. (Kan f eks legge gitter/netting over åpningen til venstre. Får dermed løsningen på det midtre bildet.)
- Lengst til høyre er kanaler satt på åpningene for å redusere lekkasjen ytterligere. (En rektangulær kanal med bredde a , vil med en lengde på $4a$ gi en demping på over 100 dB.)

Virtuell skjerm



Figur 4.13 Prinsippskisse for skjerming av rom og bygninger vha virtuell skjerm. (Kilde: [4.4] s 147-148.) Den virtuelle skjermen er en følge av det lokale jordplanet, og utbredelsen av den virtuelle skjermen vil være avhengig av frekvensen på støyen.

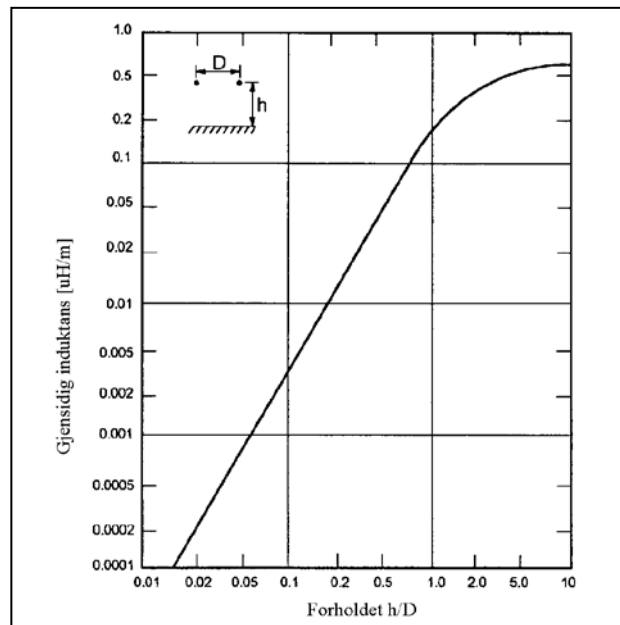
Fig 4.13 illustrerer prinsippet med å skjerme kabler og apparater vha nærhet til et jordplan.

Dersom anbefalingene i fig 4.13 følges opp, vil en demping i området 25 til 30 dB kunne oppnås for frekvensområdet som EMP-truslene omfatter. I tillegg kommer ev egenimmunitet i utstyr og apparat. En mer detaljert presentasjon av metodikken blir presentert i kapittel 5. Se også kap 3.2.1.

Generelle kommentarer knyttet til skjerming med virtuell skjerm i fig 4.13:

- Skjermingseffekten oppnås pga nærheten til et lokalt jordplan. Utstrekningen av den virtuelle skjermen over jordplanet vil være frekvensavhengig. (Anbefalt utforming av det lokale jordplanet: Vanlig armeringsnett med maksimum 8 cm maskevidde, se ellers kap 5.)
- Gjennomføringsplaten
 - er et felles inntakspunkt som dimensjoneres for å kunne avlede alle aktuelle strømmer
 - skal gi innkommende ledningsbundne forstyrrelser en lavimpedans avledning til jord, og hindre at disse trenger videre inn i anlegget
 - koples til ytre jord/jordelektrode på utsiden
 - er referanse for lokalt maskenett, potensialutjevningsledere, kabelstiger og øvrige jordforbindelser på innsiden
- Alle metalliske innføringer som skal passere sonegrensen, skal avkoples til gjennomføringsplaten utside rundt hele omfanget. Gjelder f eks alle skjermede kabler, ventilasjonsrør og vannrør av metall osv.
- Ev vern eller filter plasseres ved sonegrensen.
- Potensialutjevningsledere føres parallelt med alle kabelføringer inne i rommet, og legges nærmest mulig det lokale maskenettet. (Minst mulig sløyfeareal mellom lederne og jordplan.)
- Skap, apparater osv koples til det lokale maskenettet i tillegg til utjevningsledere som følger kabelføringer

Fig 4.14 viser hvordan den magnetiske koplingen reduseres mellom to parallelle ledere over et jordplan (med felles retur i dette ideelt ledende jordplanet) som funksjon av avstanden til jordplanet.



Figur 4.14 Gjensidig induktans mellom to parallelle, rette ledere over et jordplan som funksjon av avstanden til jordplanet. Lederne har felles retur i dette ideelt ledende jordplanet. (Kilde: [4.11].)

Merk: For $h/D > 10$ øker den gjensidige induktansen relativt sakte. Ved $h/D = 100$ er den gjensidige induktansen ca $1 \mu H/m$.

4.2.4 Kabelskjerming

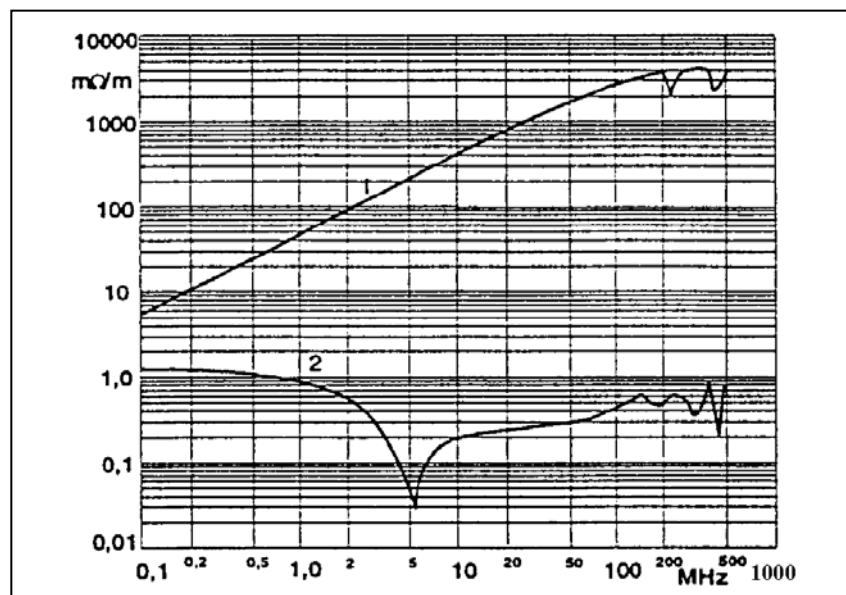
Ved siden av skjermingseffektiviteten S , er transferimpedansen eller overføringsimpedansen Z_T en egnet mål på dempingsegenskapene i en kabelskjerm. Den oppgis normalt i ohm pr lengde-enhet, typisk [$m\Omega/m$]. Den er gitt som forholdet mellom induisert spenning pr. lengdeenhet kabel og skjermstrømmen. Desto lavere overføringsimpedans, jo bedre er skjermingsegenskapene til kabelen.

Dempingsegenskapene for en kabelskjerm er sterkt avhengig av forholdene ved termineringene av skjermen. Impedansen ved termineringene vil dermed ha betydning for skjermingseffektiviteten.

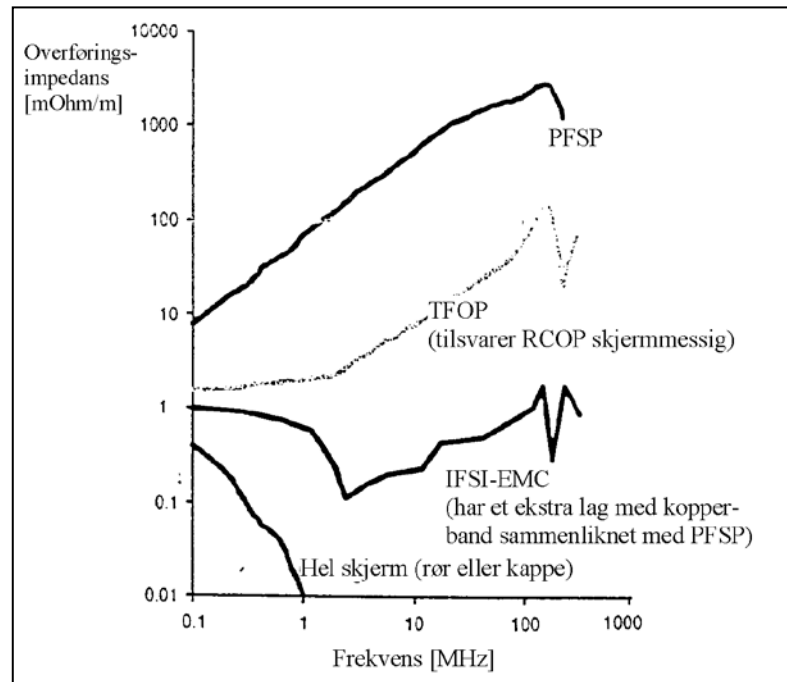
Demping i ulike kraftkabler

PFSP er mye brukt i kraftforsyningsanlegg. PFSP-kabler kan gi tilstrekkelig skjerming under spesielle forhold, se fig 4.15 og 4.16. Dempingen kan forbedres gjennom forlegningsmåten som benyttes. Ved å parallellføre kabelen tett inntil utjevningssledere, kabelstiger og/eller lokalt jordplan, vil en PFSP-kabel kunne gi god EMP-demping. For mindre tverrsnitt ($<2,5 \text{ mm}^2$) gir sannsynligvis PFSP-kabler tilstrekkelig demping uten nærføring til lokalt jordplan [4.13]. (Disse kablene har Al-bånd (folie), ikke koppertrådsjerm slik PFSP $>2,5 \text{ mm}^2$ har. En tilfredsstillende demping forutsetter likevel at kabelen kan termineres rundt hele omfanget uten at folien ødelegges.)

Terminering av kabel/kabelskjerm er svært viktig for å oppnå en god skjermvirkning. Eventuelle impedanser ved terminering bidrar direkte til den totale overføringsimpedansen, og reduserer dermed skjermingseffekten. Overføringsimpedansen for en del kjente kabeltyper er vist nedenfor.



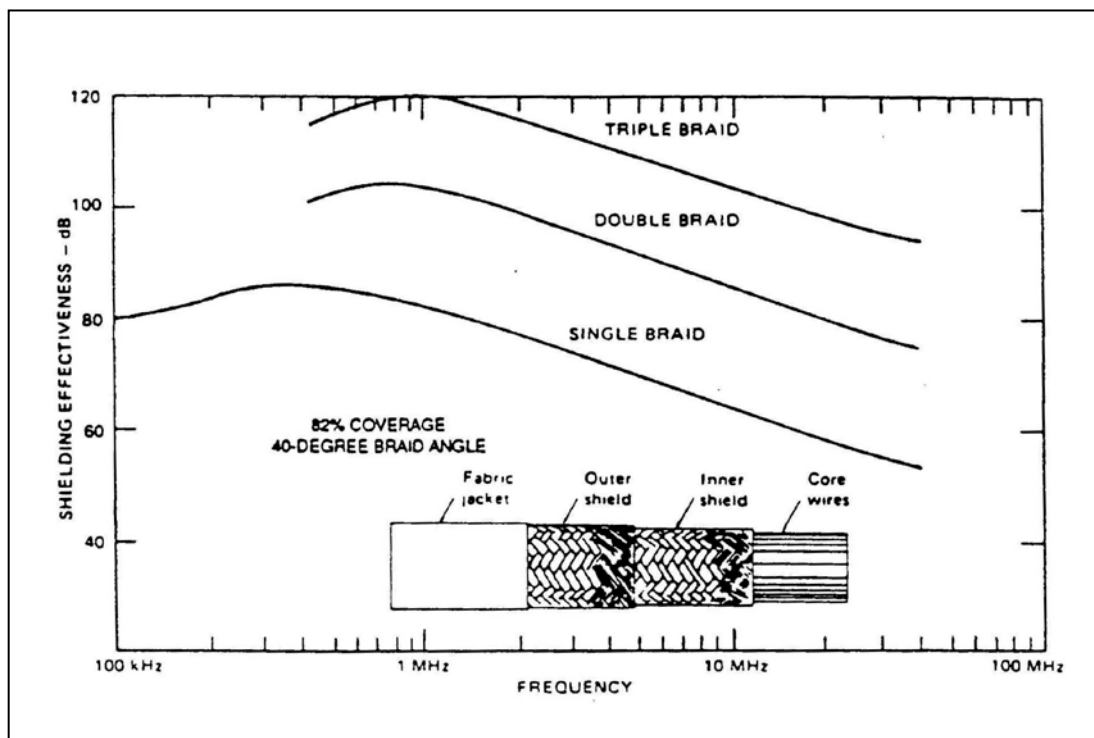
Figur 4.15 Overføringsimpedans Z_T for PFSP (øverst) og IFSI-EMC (nederst) (Kilde: [4.12].) Sistnevnte kabel er spesialkabel med et ekstra lag kopperbånd sammenlignet med PFSP.
 Kabeltype 1: PFSP 1 kV $3 \times 50 \text{ mm}^2$
 Kabeltype 2: IFSI-EMC 1 kV $3 \times 35 \text{ mm}^2$



Figur 4.16 Overføringsimpedans Z_T for ulike typer kabler. (Kilde: [4.12].)

Demping i ulike koaksialkabler

Koaksialskjerner kan ha flere lag med flettede kopperskjerner. Dette vil kunne gi bedre demping i kabelskjermen, som vist på figur 4.17.



Figur 4.17 Skjermingseffekt i flettet koppersjerm med flere skjermag. Optisk tetthet er 82% og 40° slagvinkel for skjermtrådene. (Kilde: [4.5].)

4.3 TRANSIENTVERN, AVLEDNING OG FILTRERING

Dette delkapitlet gir en oversikt over ulike typer vern som er aktuelle mht EMP-bekyttelse.

- Prinsipp for vern
- Aktuelle typer vern
- Egenskaper for ulike typer vern kontra anvendelsesområde
- Eksempler på kombinerte vern for ulike anvendelser

4.3.1 Innledning

Skjerming- og jordingstiltak alene vil ikke alltid gi tilstrekkelig beskyttelse av anlegg mot EMP. Det kan derfor være nødvendig å utstyre anlegg med egnet overspenningsvern for å unngå skade/funksjonsfeil på komponenter/utstyr. Vernets oppgave er å redusere toppverdi/varighet av innkommende ledningsbunden EMP til et akseptabelt nivå.

Ved valg av vern må en bl a ta stilling til:

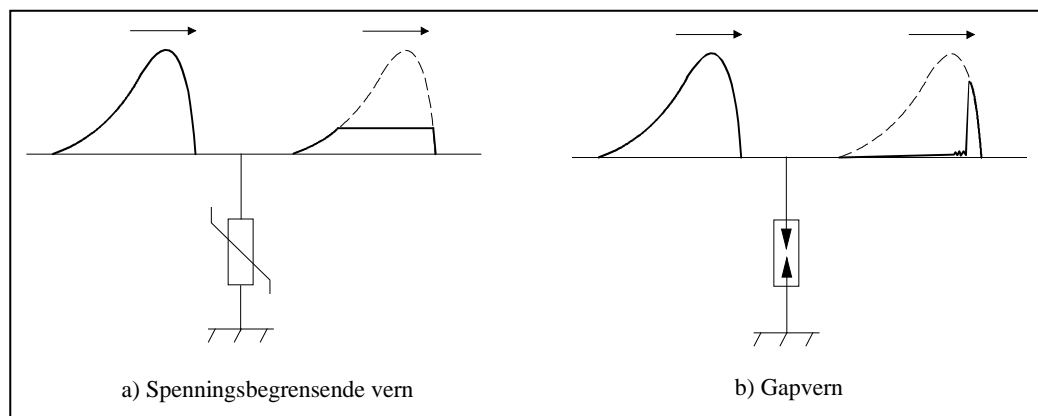
- tålegrensen for det utstyr som skal beskyttes mht EMP
- i hvilken grad vernet vil redusere påkjenningene i forhold til utstyrets tålegrense
- hvor mye energi, effekt eller strøm fra EMP som kan absorberes av vernet uten at dette skades
- i hvilken grad vernet kan påvirke normal driftsfunksjon av anlegget

Dette kapittel omhandler aktuelle typer vern for kraft-, signal- og kommunikasjonsanlegg. (Vern for høyspenningsanlegg blir bare sporadisk omtalt). Plassering av vern i kraftforsyningsanlegg er beskrevet i kapittel 5.

4.3.2 Prinsipper for vern

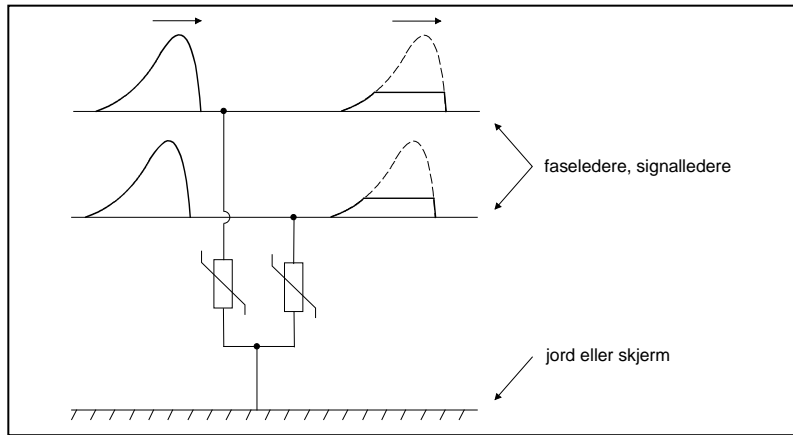
De fleste typer vern er basert på *avledning*, dvs at den innkommende spenningsimpulsen "kortsluttes" hvis spenningen blir tilstrekkelig høy. Slikt vern omtales ofte som avledere. Det finnes to hovedkategorier avledere som her vil bli omtalt som h.h.v. *spenningsbegrensende vern* og *gapvern*.

Spenningsbegrensende vern har en sterkt ulineær strøm/spenningskarakteristikk som medfører at spenningen "klippes" når spenningen over vernet overskrider en viss grense. Gapvern er basert på elektrisk overslag, noe som medfører at spenningen bryter sammen til en lav verdi. Virkningen av de to vernene på en EMP-puls er illustrert i fig 4.18.



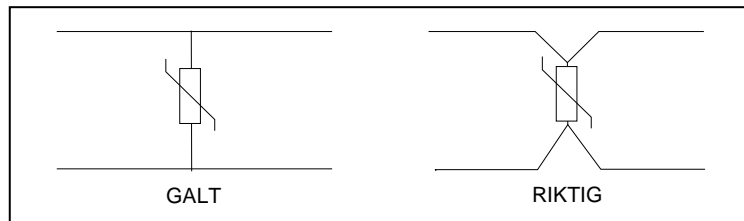
Figur 4.18 Vern mot ledningsbunden spenningspuls

EMP påkjenningene vil som hovedregel opptre common mode, dvs mellom faser/signalledere og jord (skjerm), mens påkjenningen mellom faser er beskjedne. Vernet skal derfor plasseres mellom faser og jord, slik som illustrert i fig 4.19.



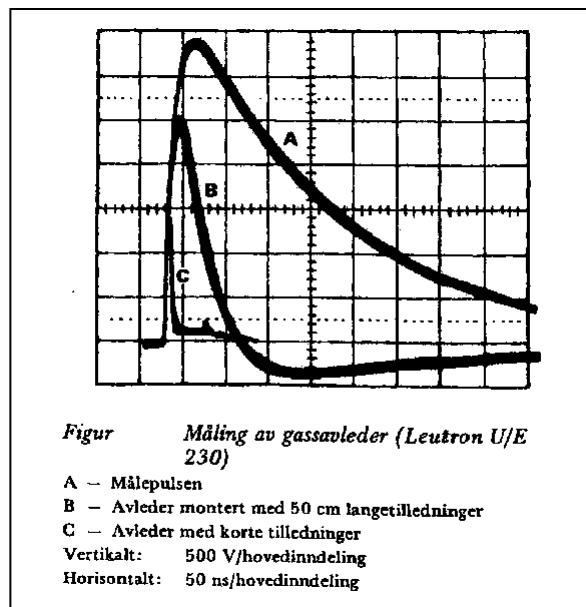
Figur 4.19 Vernet skal først og fremst gi beskyttelse mellom faser og jord.

Innkommende spenningsbølge (EMP) vil kunne ha meget stor steilhet. Det er derfor viktig at vernet tilkoples med korte tilledninger. I motsatt fall vil tilledningene gi et induktivt spenningsfall som reduserer vernets spenningsbegrensende virkning.



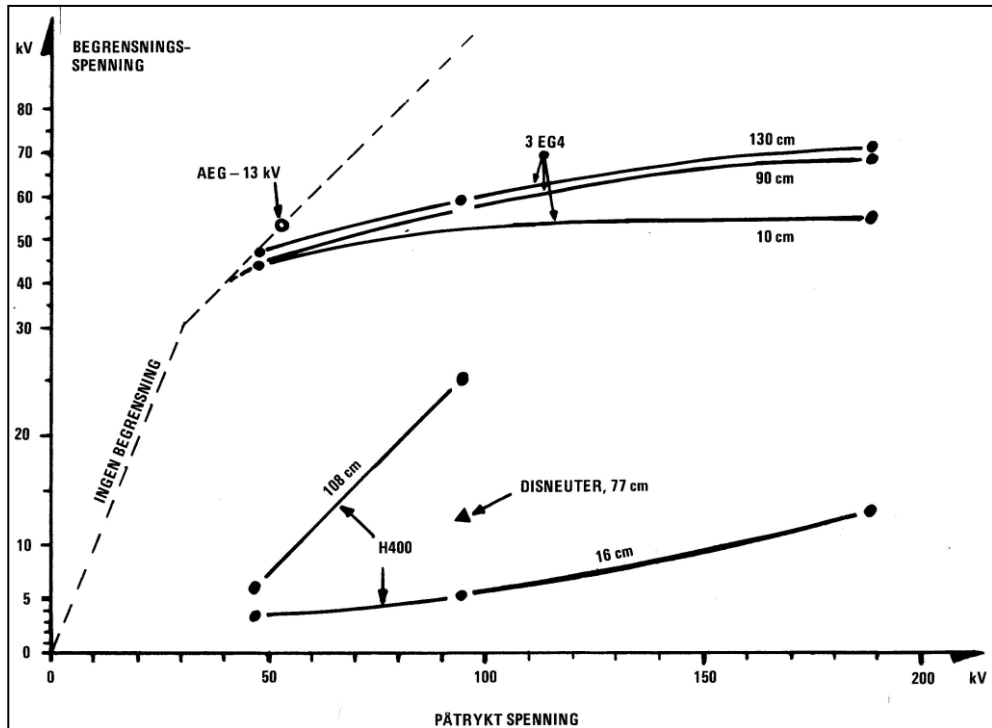
Figur 4.20 Vernet skal tilkoples med kortest mulig tilledninger.

Fig 4.21 viser en måling av hvordan størrelsen på en steil og kortvarig EMP-puls som passerer en gassavleder avhenger av tilledningenes lengde.



Figur 4.21 Betydningen av lengden på en gassavleders tilledninger ved reduksjon av EMP. (Kilde: [4.4].) Viser gassavleder som typisk benyttes for kommunikasjons- og signallinjer.

Fig 4.22 viser målinger av hvordan begrensningsspenningen for ulike avledere i kraftnettet påvirkes av lengden på tilledningene. Som det går fram av figuren, bør lengden på tilledningene begrenses til omlag 1 m. Dersom det er helt nødvendig, kan denne lengden økes ved høyere systemspenninger.



Figur 4.22 Begrensningsspenning som funksjon av påtrykt spenning på avledere ved forskjellige lengder av tilledningene. (Kilde: [4.4].)

Stigetid påtrykt spenning: 40 ns. Pulsform: MIL-STD 461 C. (Se fig 1.6.) Begrensningsspenning er det spenningsnivået som avlederen klarer å begrense innkommende spenningspuls til.

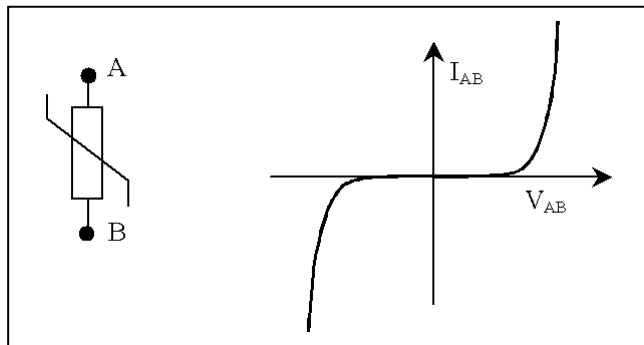
Type avledere:	3 EG4	-	SIEMENS 3 EG4 (Nominell spenning 12 kV)
	H400	-	SIEMENS H400 (Nominell spenning 250 V)
	Disneuter	-	E.I.D. Soulé 3-fase disneuter med nullpunkt (230 V)

4.3.3 Aktuelle typer vern

Spenningsbegrensende vern

Metalloksydavledere (varistorer)

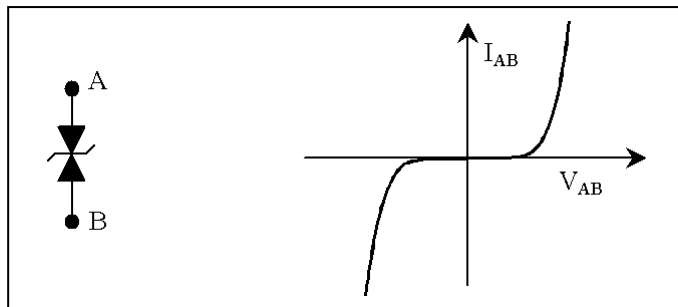
En metalloksydavledere (MOA) er et ulineært element som består av sintrede metalloksydkorn. Den beskyttende virkning oppstår ved at elementet går over fra en isolerende tilstand til en godt ledende tilstand når spenningen øker over et visst nivå. Overgangen skjer mykt uten at det genereres transienter. Når spenningen synker går avlederen over til å bli isolerende. Strøm/spenningskarakteristikken er illustrert i fig 4.23. MOA kan enkelt tilpasses ulike spenningsnivåer og krav til energioptak ved å endre hhv lengde og tverrsnitt på metalloksydblokka.



Figur 4.23 Strøm/spenningskarakteristikk for MOA (idealisert).

Beskyttelsesdioder

To zenerdioder i antiserie (fig 4.24) gir en komponent som er isolerende inntil zenerspenningen nås. En ytterligere økning av spenningen gir en stor økning av strømmen. Beskyttelsesdioder kan tilpasses ulike spenningsnivåer ved seriekopling av flere enheter. Normalt anvendelsesområde er 6V–250V.

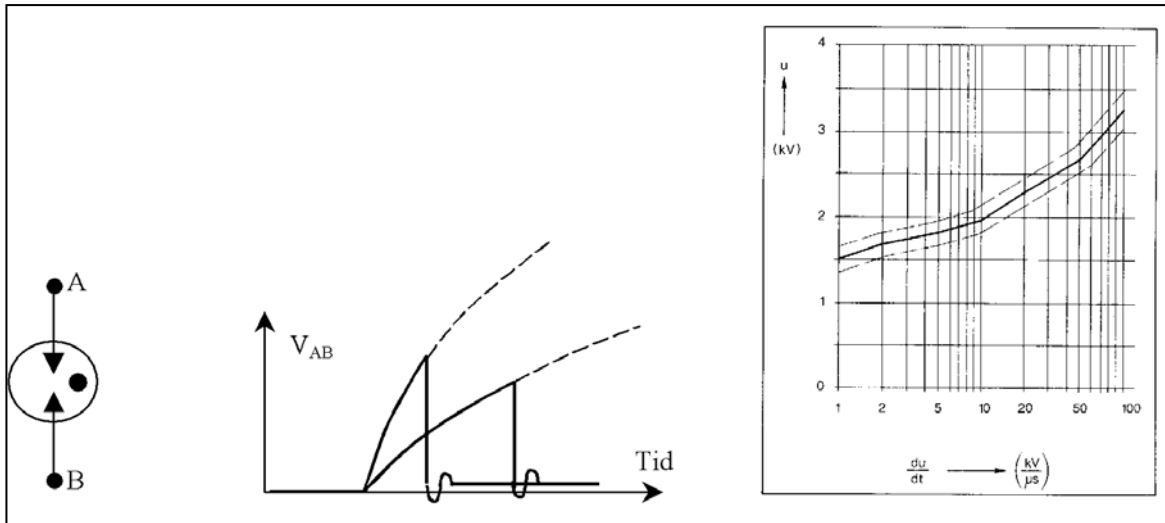


Figur 4.24 Beskyttelsesdiode (idealisert).

Gapvern

Gassavledere

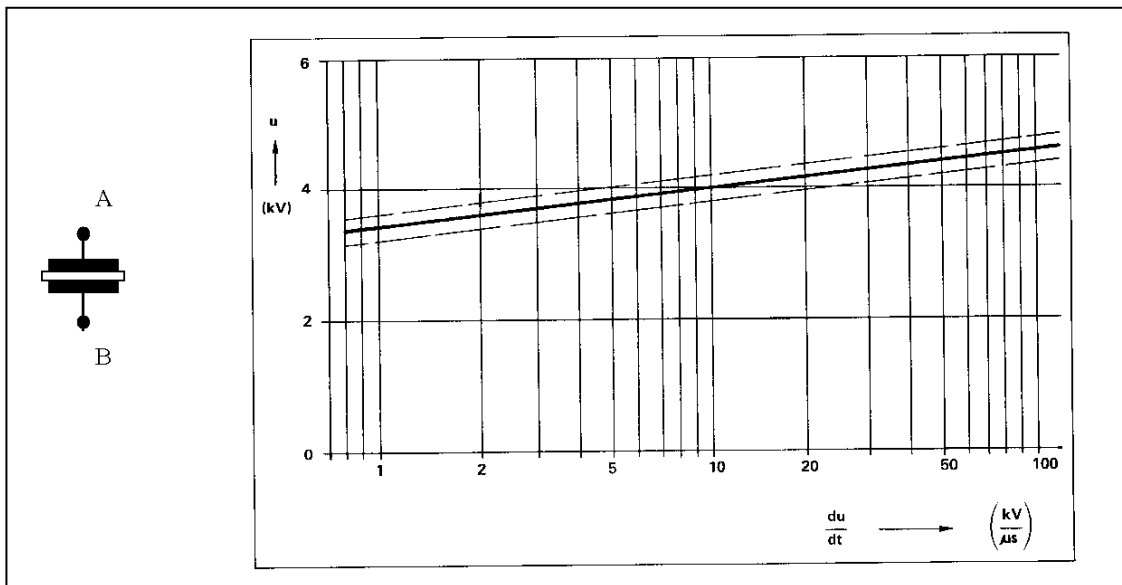
Gassavledere består av ett eller flere gap mellom to eller tre elektroder, som er plassert i et gassfylt rør. Når spenningen når over en kritisk grense (tennspenningen) fås overslag gjennom gassen og vernets resistans reduseres til en meget lav verdi i løpet av mindre enn ett ns. Tennspenningen øker med økende steilhet for innkommende bølge. Fig 4.25c) viser tennspenningen som funksjon av steilhet for en gitt gassavleder. For 230V gassavledere er tennspenningen ved 1kV/ns typisk 8-15 ganger høyere enn tennspenningen ved DC [4.1]. Avlederens isolasjonstilstand gjenopprettes noen mikrosekunder etter at impulsen er avledet, forutsatt at kretsen ikke vil drive en kontinuerlig strøm gjennom avlederen.



Figur 4.25 Symbolet for en gassavleder er vist til venstre, figuren i midten skisserer typisk egenskap mht tenntidspunkt og steilhet, mens karakteristikken er illustrert til høyre. (Kilde: [4.7].)

Selvslukkende gnistgap

Selvslukkende gnistgap består av et isolerende materiale anbragt mellom to elektroder i en spesiell utforming. Slike gap har god evne til å slukke en evt følgestrøm fra nettet. I forhold til gassavledere er tennspenningen betydelig høyere, men tennspenningen er mindre avhengig av steilhet på innkommende EMP. Fig 4.26 viser eksempel på karakteristikk for et selvslukkende gnistgap.

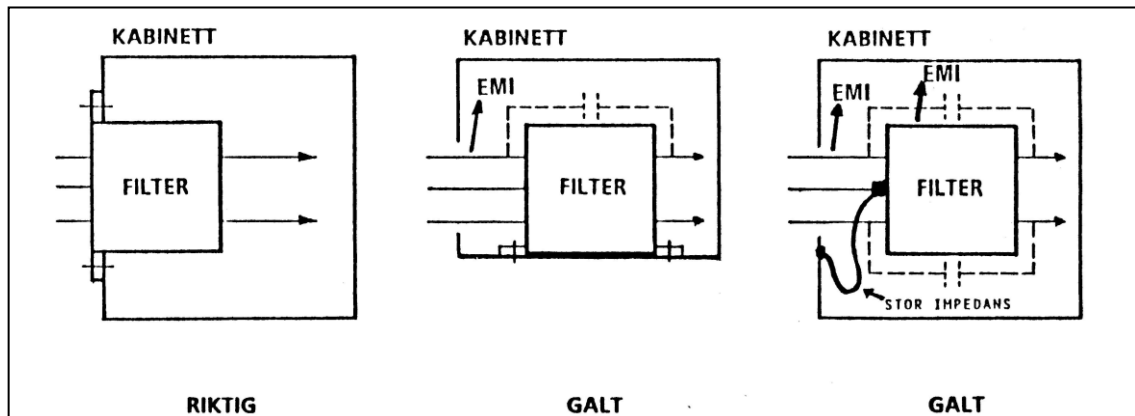


Figur 4.26 Selvslukkende gnistgap. Symbol til venstre. Karakteristikken til høyre er hentet fra [4.7].

Filtre

Et filter er en krets med gitt frekvensrespons. Den beskyttende virkning oppnås ved at filteret kortslutter (ev blokkerer) bestemte frekvensområder i signalet (spenningen). Filtre benyttes ofte som EMP-beskyttelse i kombinasjon med andre typer vern, i det filteret kan dempe ut spenningsimpulser som passerer vernet. F eks et lavpassfilter i serie med et annet vern.

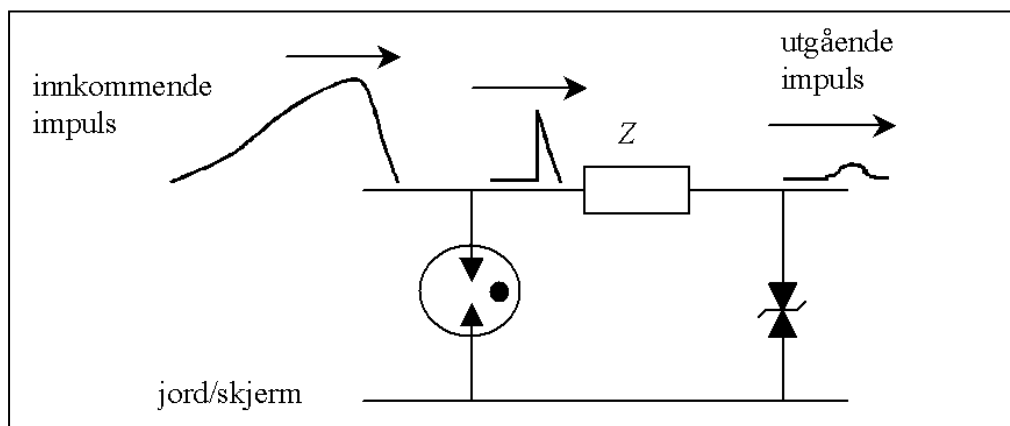
Det kan noen ganger være nødvendig å benytte nettfiler på kraftforsyningsenheten til sambands- og datautstyr for å beskytte mot EMP. Filterbeholderen bør anbringes i direkte kontakt med felles innføringsplate eller jordskinne. Prinsippskisse for montasje av filter er vist i fig 4.27.



Figur 4.27 Prinsipp for montasje av nettfiler i kabinett, skap eller skjermet rom.
 (Kilde: 4.14].)

4.3.4 Kombinerte vern

Økt beskyttelse mot EMP kan oppnås ved å kombinere flere vern til en enhet. Fig 4.28 viser eksempel på kombinert vern for signalanlegg som består av gassavleder og beskyttelsesdiode. Beskyttelsesdioden begrenser spenningspulsen som passerer gassavlederen, mens gassavlederen hindrer at beskyttelsesdioden havarerer pga høy energipåkjenning. Serieimpedansen Z bidrar til at spenningen over gassavleder blir tilstrekkelig høy til at tenning oppnås.



Figur 4.28 Kombinert gassavleder og beskyttelsesdiode (idealisert).

4.3.5 Sammenstilling av ulike typer vern mht til anvendelsesområde og egenskaper

For beskyttelse av høyspenningssystem (12kV-420kV) benyttes metalloksydavledere som plasseres mellom faser og jord.

For beskyttelse av kraftforsyning og utstyr (230V AC, DC strømforsyning) er metalloksydavledere (MOA) velegnet både som grovvern ved inntak, og som ev mellom- og finvern lenger inn i anlegget. Vernet bør være forsynt med egen fraskillingsmekanisme (sikring, brytere e l) som kopler bort vernet ved ev havari av dette. Gassavledere er lite anvendelig i slike

anlegg pga dårlig evne til å slukke følgestrøm, og beskyttelsesdioder vil lett kunne havarere som følge av EMP-påkjening.

For beskyttelse av signalledere i kontroll- og kommunikasjonsanlegg blir gassavledere mye benyttet. Ved steile impulser vil imidlertid beskyttelsen kunne bli utilstrekkelig pga lang reaksjonstid. Ytterligere beskyttelse kan derfor være nødvendig i form av beskyttelsesdioder eller filtre. Beskyttelsesdioder (filtre) vil dessuten være påkrevd i situasjoner hvor gassavledere vil ha for høy tennspenning i forhold til tålegrensen til det utstyr som skal beskyttes. En må være oppmerksom på at vern i form av beskyttelsesdioder eller filtre kan påvirke den kretsen som skal beskyttes.

Radiolinje-samband vil via antennen kunne påvirkes av strålt EMP eller av direkte lynnedslag. Ved vern av slikt anlegg er det spesielt viktig å påse at vernet ikke påvirker signalet. Gassavleder (plassert i koaksial holder) er best egnet pga sin lineære oppførsel og lave kapasitans. Ytterligere beskyttelse (mot strålt EMP) kan oppnås vha kvartbølge stub-line filter. Dette er en koaksial T-avgrening som gir kortslutning for frekvenser som er et multiplum av avgreningens egenfrekvens.

En sammenstilling av ulike typer vern mht viktige egenskaper er gitt i tabell 4.1. Hver kolonne i tabellen angir en positiv egenskap, mens tallkoden rangerer de ulike type vern mht til denne egenskapen.

Tabell 4.1 Egenskaper for ulike vern mht EMP-beskyttelse [4.8]

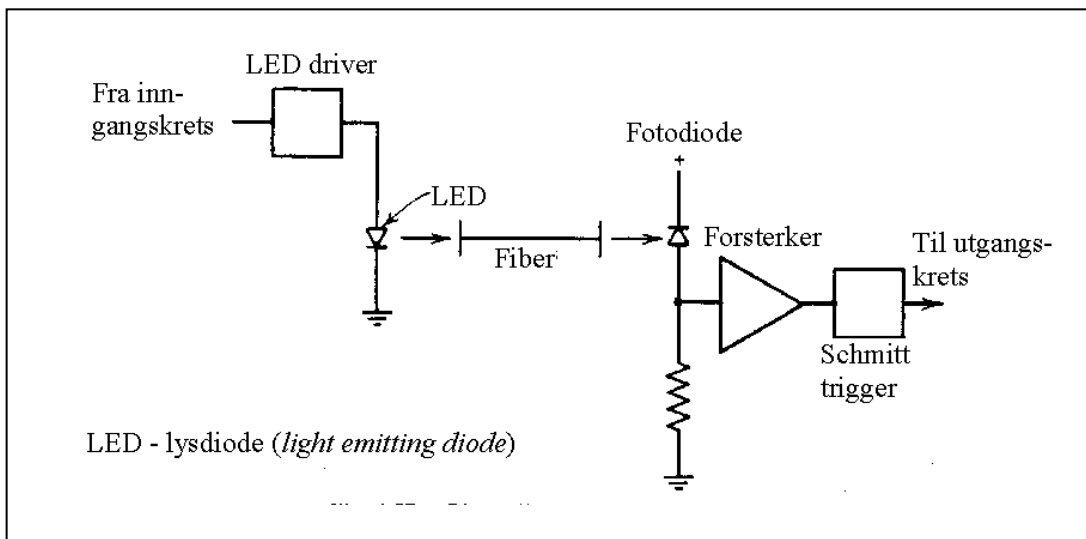
Vern	Evne til å avlede store EMP- strømmer > 500 A	Hurtig respons for steil EMP	Lav elektrisk kapasitans	Høy isolasjons- motstand
	Gassavleder	1	3	1
Beskyttelsesdiode	3	1	3	2
Metalloksyavleder	2	2	2	3

Vern	Kan benyttes i anlegg med lavt spenningsnivå < 50 V	Kan benyttes i anlegg med høyt spenningsnivå > 400 V	Evne til å slukke følgestrøm i DC-systemer	Lineær oppførsel (ved normal drift i anlegget)
	Gassavleder	3	1	3
Beskyttelsesdiode	1	3	2	2
Metalloksyavleder	2	2	1	3

1 = best egnet; 3 = dårligst egnet.

4.3.6 EMP-beskyttelse vha fiberoptikk

I moderne stasjoner blir fiberoptikk benyttet i økende omfang til signal- og dataoverføring. Bruk av fiberoptikk er svært gunstig i EMP-sammenheng, i det fiberen er isolerende. Derved vil en impuls ikke kunne forplante seg langs ledere. Bruk av fiberoptikk gjør det mulig å føre signal mellom ulike EMP-soner uten spesielle tiltak. Strålt HEMP vil ikke påvirke signaloverføringen i kablet [4.8].

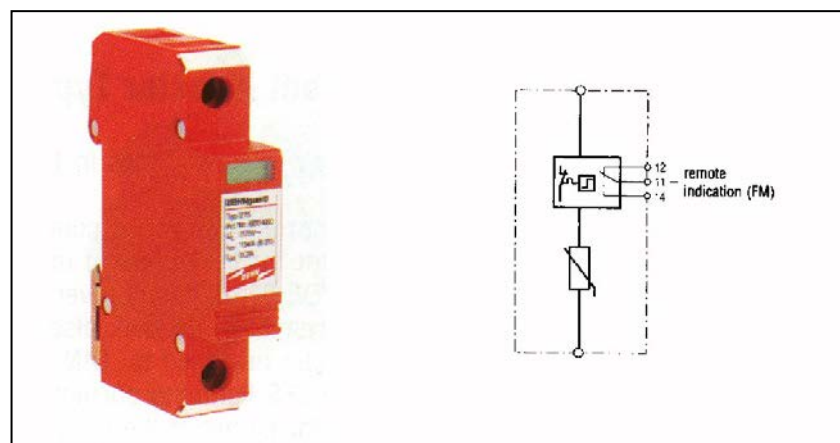


Figur 4.29 Fiberoptisk system (Kilde: [4.8])

4.3.7 Eksempler på vern

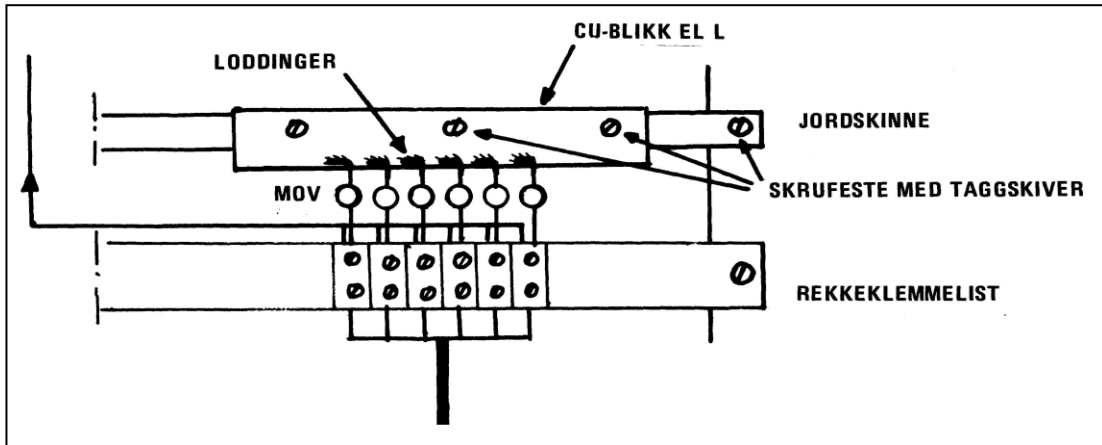
Moderne vern består ofte av et antall enkeltvern som gir beskyttelse både mot jord og mellom faser. Slike vern er tilgjengelig i et stort antall utførelser.

Fig 4.30 viser et eksempel på vern for 230V AC, beregnet for plassering i rekkeklemme. Vernet består av en varistor som koples mellom fase og jord, og det er forsynt med en termisk frakoplingsmekanisme med signalangivning. Det vil være nødvendig å montere tre slike vern for å oppnå beskyttelse av alle tre faser. Denne type vern vil være egnet både som grovvern og finvern i stasjoner.



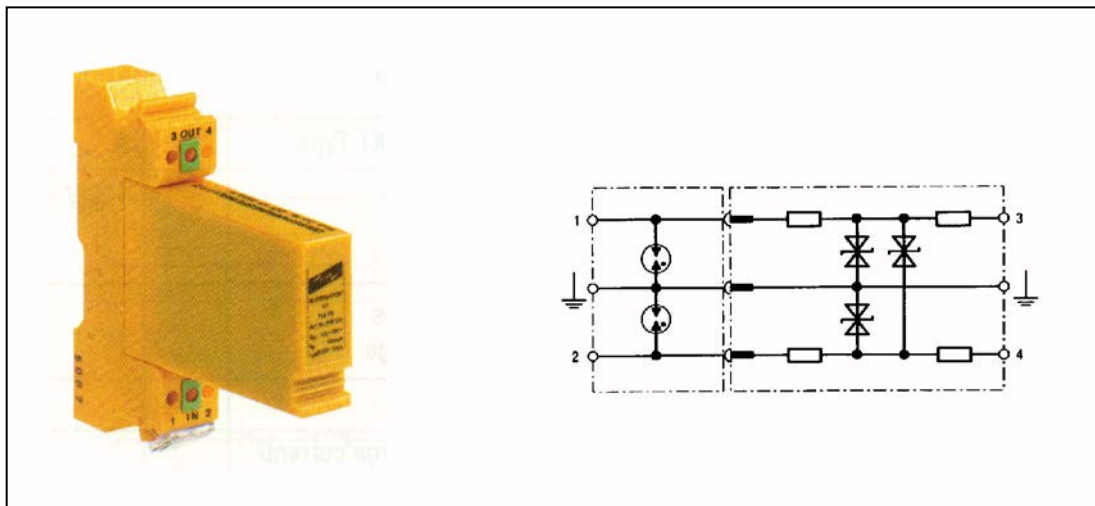
Figur 4.30 Eksempel på vern for 230V AC.

En prinsippskisse for en annen utføring av samme type vern er vist i fig 4.31.



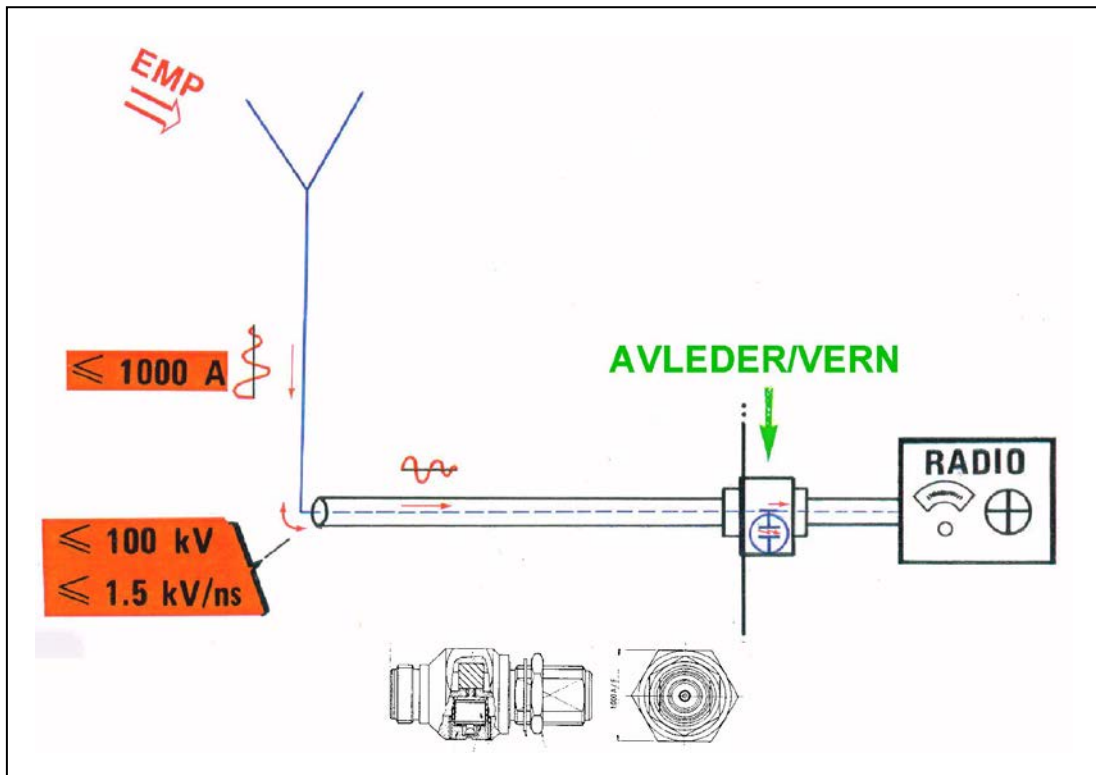
Figur 4.31 Prinsipp for montasje av metalloksydavleder (MOA; kalt MOV i figuren over) i apparattavle. (Kilde: [4.4])

Fig 4.32 viser eksempel på vern for beskyttelse av kommunikasjonskabel, beregnet for plassering i rekkeklemme. På den EMP-utsatte siden består vernet av gassavledere som er plassert fase-jord, mens vernet på motsatt side består av beskyttelsesdioder som er plassert både mellom faser og fase-jord. De to delene er adskilt med en dekoplingsimpedans.



Figur 4.32 Eksempel på vern for kommunikasjonskabel.

Et vern for koaksiale radiofrekvenssamband (HF, VHF og UHF) er til slutt vist i fig 4.33.



Figur 4.33 Gassavleder montert i plugg til koaksialleder for radiofrekvenssamband (øverst) (Kilde: [4.15]). Koaksialplugg i detalj (nederst). (Kilde: [4.16])

4.4 REFERANSER

- 4.1 IEC 77C/58/CDV: Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 5: Installation and mitigation guidelines – Section 3: HEMP protection concepts. Project number 61000-5-3. 1998-04-10.
- 4.2 IEC 61000-5-2: Electromagnetic compatibility – Part 5: Installation and mitigation guidelines – Section 2: Earthing and cabling. Technical Report. 1997.
- 4.3 NEK/Produkt- og Elektrisitetstilsynet.: Forskrifter for elektriske anlegg. Forsyningsanlegg. 1994. (ET-1995-FEA-F).
- 4.4 Grønhaug, Karl-Ludvig: Elektromagnetisk puls vol.2. Virkninger og vern. FFI-rapport nr. 82/3003. 1982.
- 4.5 NATO EMP Engineering Practices Handbook (“Green Book”). NATO File No. 1460-3.
- 4.6 Grønhaug, Karl-Ludvig: Elektromagnetisk puls. Håndbok 1978. FFI, Referanse 359-F/136, september 1978.

- 4.7 Peter Hasse, "Überspannungsschutz von Niederspannungsanlagen", Verlag TÜV Rheinland, GmbH, Köln, 1987.
- 4.8 L.W. Ricketts, J.E. Bridges, J. Miletta, "EMP radiation and protective techniques", John Wiley & Sons, 1976.
- 4.9 Chatterton P.A., Houlden M.A.: EMC Electromagnetic theory to practical design. John Wiley & Sons, New York. 1992.
ISBN 0-471-92878-X
- 4.10 IEC 77C/84/CD: Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 5: Installation and mitigation guidelines – Section 6: Mitigation of external EM influences. Project number 61000-5-6 TR. 1999.
- 4.11 Jackson G.A.: The achievement of electromagnetic compatibility.
ERA Report 90-0106. 1990
- 4.12 ABB Industry Oy: EMC compliant installation and configuration for a power drive system. Technical guide no. 3. ACS 601/ACS 301. s 29-30.
- 4.13 Delresultat fra ikke-dokumenterte målinger fra et prosjekt finansiert av Forskningsrådet utført av NEMKO.
- 4.14 Grønhaug, Karl-Ludvig.: Praktiske eksempler på elektromagnetisk støy og vernetiltak. NIF kurs: "Elektriske forstyrrelser i elektronisk utrustning", 1987.
- 4.15 Grønhaug, Karl-Ludvig. Figur hentet fra FFIs EMP-kurs.
- 4.16 "Type 87 Series GEC Bulkhead Mount with Type 65 Fast Surge (EMP) Arrester"
Brosjyre fra "The M-O Valve Company Ltd."

5 PRAKTISK UTFØRELSE AV EMP-SIKRING

Målsetningen med dette kapitlet er å illustrere hvordan EMP-sikring i kraftforsyningsanlegg kan utføres ved hjelp av jording, skjerming og avledning (filtrering). Hovedsakelig er det generelle prinsipper og metoder som blir belyst, og bare i mindre grad vises detaljerte tekniske løsninger. Hovedinndelingen gjøres mellom global og differensiert beskyttelse. Deretter blir den prinsipielle utførelsen av de ulike beskyttelsestiltakene presentert.

5.1 INNLEDNING

Jording, skjerming og avledning (filtrering) er hovedelementene i en vellykket EMP-sikring av anlegget. Ulike prinsipper for utførelse kan legges til grunn, noe som vil påvirke og gi forskjellige løsninger. I denne håndboka benytter vi soneinndeling som hovedprinsipp. Dersom denne metodikken skal gi et tilfredsstillende resultat, må den gjennomføres konsekvent. Dersom en eller flere soner utilsiktet punkteres ved at ledere føres direkte gjennom sonegrensen uten avledning, bryter strategien sammen.

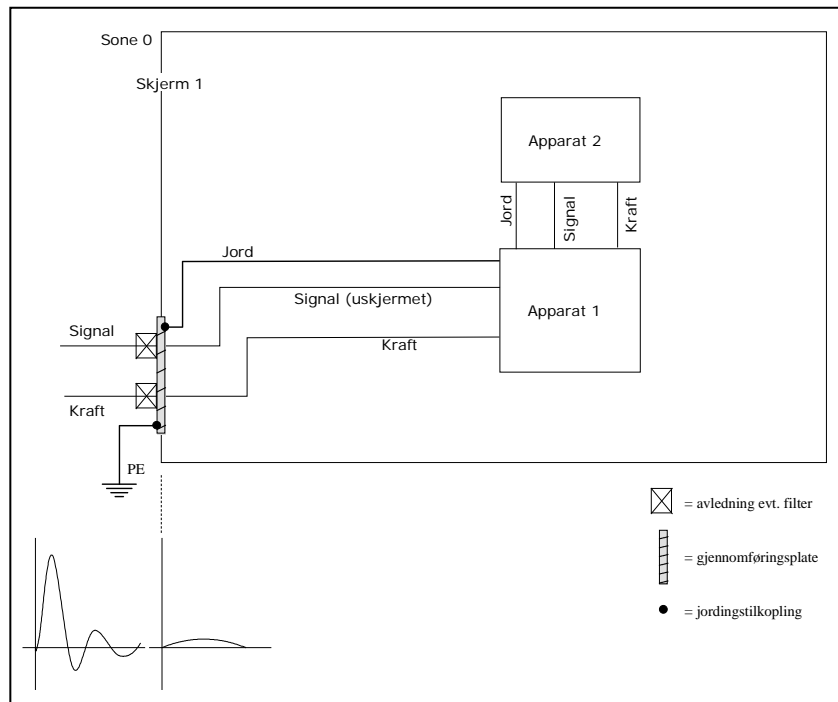
Dette kapitlet framstiller EMP-sikring av kraftforsyningsanlegg som en systematisering og forlengelse av beskyttelsestiltakene som allerede blir benyttet i norske kraftanlegg. Med utgangspunkt i soneinndelingen i kap 3.3, viser kap 5 hvor ulike beskyttelsestiltak kan settes inn og hvordan disse bør utføres.

For en del beskyttelsestiltak blir det presentert flere alternative løsninger, som gir ulik grad av EMP-sikring. Dersom det er relevant, oppgis forventet støydemping til det alternativet som anbefales. Det blir opp til de som planlegger anleggene å kombinere tiltakene slik at gjeldende myndighetskrav blir ivaretatt. Dagens krav fra myndighetene finnes i NVEs RSK, se vedlegg V2.2, der EMP-sikring skal oppnås vha skjermede rom/bygninger. Dette tilsvarer *global beskyttelse*, se kap 5.2. *Differensiert beskyttelse* er en alternativ framgangsmåte for å oppnå tilsvarende sikring, og presenteres i kap 5.3.

Utstyr som benyttes i kraftforsyningsanlegg, vil minimum ha en immunitet mot elektromagnetiske fenomener tilsvarende kravene i standarden NEK-EN 50082-1 (omfatter bl a husholdningsutstyr). Hovedmengden av utstyret i anleggene vil imidlertid oppfylle immunitetskravene i den langt strengere NEK-EN 50082-2 (industrimiljø). Dempingen fra den globale eller differensierte beskyttelsen vil komme i tillegg til denne apparatimmuniteten. (Se vedlegg 2.)

5.2 GLOBAL BESKYTTELSE

Global beskyttelse er illustrert i figur 5.1. I prinsippet er dette soneinndeling med bare ett soneskille, der all skjerming og avledning (filtrering) gjøres i det soneskillet passerer. (Se kapittel 3.2.2.) Dette tilsvarer f eks å skjerme hele bygninger, rom eller skap, og dimensjonere skjermen slik at tilstrekkelig beskyttelse legges i denne ene sonegrensen.



Figur 5.1 Skisse av prinsipp for global skjerming sammen med antydnet støydemping i sonegrensen. Alle inngående ledere føres gjennom et felles innføringspunkt (gjennomføringsplate), som er en forsterkning av skjermen.

Global beskyttelse kan være en egnet metode for å EMP-sikre anlegg eller deler av anlegg som har begrenset kompleksitet i grensesnittet mot verdenen utenfor og begrensede fysiske dimensjoner. Et typisk eksempel hvor metoden kan være godt egnet er radiolinjestasjoner.

Alle apparater og utstyr har en viss egenimmunitet som kommer i tillegg til dempingen fra den globale skjermingen. Det kan derfor være fornuftig å operere med et soneskille innenfor det vist i fig 5.1, som da vil illustrere immuniteten til apparatene. Hovedprinsippet er imidlertid at den ytre sonen tar hovedpåkjenningen, og at man innenfor denne kan benytte vanlig installasjonspraksis og utstyr. Utstyrets totale beskyttelse vil være summen av dempingen i den ytre sonegrensen og utstyrets egen immunitet.

5.3 DIFFERENSIERT BESKYTTELSE

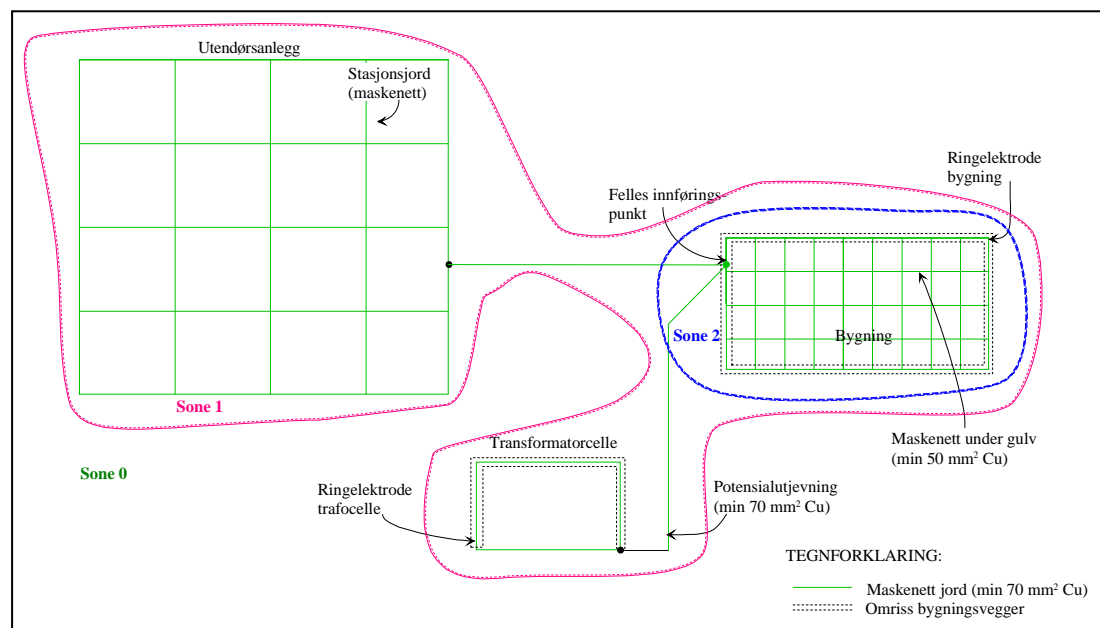
Differensiert beskyttelse^{5.1} innebærer å benytte ulik grad av beskyttelse for forskjellige deler av anlegget. Soneinndeling benyttes som metode for å systematisere dette arbeidet, og en innledning til problemstillingen er gitt i kap 3.2 og 3.4. Se ellers fig 5.2.

^{5.1} IEC benytter andre definisjoner for beskyttelse: Global beskyttelse tilsvarer definisjonen i håndboka, men IEC operer også med *global beskyttelse med multiple sonegrenser*. Denne betegnelsen benyttes når det er flere sonegrenser innenfor hverandre (f eks tilsvarende fig 3.5). Videre definerer IEC distribuert beskyttelse (*distributed protection*) som et anlegg hvor deler av systemet er beskyttet, mens andre deler er ubeskyttet. Se [5.1]. Differensiert beskyttelse slik den benyttes i håndboka, er derfor en kombinasjon av IECs definisjoner på global beskyttelse med multiple sonegrenser og distribuert beskyttelse.

Med differensiert beskyttelse er det mulig å plassere dempetiltakene på ulike steder i kraftforsyningsanlegget, avhengig hva som er teknisk og økonomisk hensiktsmessig i det enkelte anlegg. Antallet soner kan variere. Det sentrale er at utstyret har tilstrekkelig beskyttelse, enten dette skjer vha en, to eller flere soner. (Soneinndeling er bare en metode for systematisering av beskyttelsestiltak. Det er den praktiske kombinasjonen av jording, skjerming og avledning (filtrering) som bestemmer støydempingen.)

Utstyrets totale beskyttelse vil være summen av utstyrets egenimmunitet og dempingen i sonegrensene som omgir utstyret. Dersom man øker apparatimmuniteten, kan man gjøre en tilsvarende reduksjon av dempingen i sonegrensene utenfor. Det sentrale er at summen av beskyttelsestiltakene tilfredsstillende støydempingen de ulike apparatene eller anleggsdelene må ha i forhold til beskyttelsesstrategien som er valgt.

Fig 5.2 illustrerer begrepet soneinndeling i et tenkt kraftforsyningsanlegg. Her vises også to av sonegrensene. Denne figuren vil være utgangspunktet for seinere beskrivelse av aktuelle tiltak. Se ellers kap 3.4 og 3.10 for flere detaljer om soneinndeling.



Figur 5.2 Skisse av jordingsystemet (grønt) i et tenkt kraftanlegg sammen med skisse av sone 0, 1 og 2. Sone 3 er ikke vist, men vil typisk utgjøre en del av området innenfor bygningen.

5.3.1 Beskyttelsestiltak knyttet til de ulike sonene

Med utgangspunkt i fig 5.2, kan man sette opp en forenklet oversikt over typiske tiltak ved hver sonegrense og innenfor de forskjellige soner. Det vil vanligvis ikke være nødvendig å gjennomføre alle tiltakene nedenfor samtidig. F eks vil det sjelden bli benyttet felles inntaksplate ved mer enn en av sonegrensene. Det blir opp til de som planlegger anleggene å kombinere de nødvendige beskyttelsestiltakene for å oppnå tilstrekkelig beskyttelse i forhold til pålagte krav og beskyttelsesstrategien som er valgt.

Beskyttelse ved sonegrense 1:

- Avledere (om mulig føres ledere inn og avledes i et område av anlegget hvor avstanden til følsomt utstyr er stor)

Beskyttelse i sone 1:

- Jording (maskenett i utendørsanlegg og ringelektrode/maskenett under gulv i bygninger, samt ledere for potensialutjevning)
- Skjerming (skjermede kabler, ev global skjerming)

Beskyttelse ved sonegrense 2:

- Felles innføringspunkt eller –plate
- Avledning (filtrering) utført i gjennomføringsplate

Beskyttelse i sone 2:

- Jording (lokale jordplan (maskenett) på gulv i bygninger, ledere for potensialutjevning)
- Skjerming (skjermede kabler, virtuell skjerming fra lokale jordplan)

Beskyttelse ved sonegrense 3 (ikke vist i fig 5.2; typ skjermede apparat, skap eller rom inne i bygninger):

- Felles innføringspunkt eller –plate, ofte kombinert med metallisk skjerm
- Avledning (filtrering) i gjennomføringsplate

Beskyttelse i sone 3:

- Vil være et område som er godt beskyttet fra ytre påvirkninger. Prøver likevel å bruke prinsippene fra sone 2 i størst mulig grad.

Selv om det ikke er nevnt spesifikt ovenfor, vil signaloverføring via optiske fibre generelt redusere muligheten for uønskede koplinger over sonegrensene. Med tanke på EMP-sikring, er det derfor ønskelig å ta i bruk optisk signaloverføring i størst mulig grad, etterhvert som teknikken blir tilgjengelig for en større og større del av kontroll- og kommunikasjonssignalene i kraftforsyningsanleggene.

Dempingen som oppnås mellom ytre påkjenninger og sone 3, vil være summen av dempingen over sonegrensene 1 til 3. I tillegg kommer utstyrets egenimmunitet. Som tidligere nevnt kan en eller flere sonegrenser utelates. Minimum antall sonegrenser er 1, og dette tilsvarer prinsippet for global skjerming. Denne ene sonegrensen trenger ikke nødvendigvis legges til yttervegg av bygninger, men kan i stedet erstattes av et felles innføringspunkt i rom eller skap. Med andre ord eksisterer det flere valgmuligheter med hensyn til å benytte en eller flere gjennomføringsplater i anlegget og plasseringen av disse.

5.4 ULIKE BESKYTTELSETILTAK

Metodene som blir vist i dette underkapitlet vil være egnet for å oppnå både global og differensiert beskyttelse. Utføringen av tiltakene vil i prinsippet være lik i begge tilfellene.

5.4.1 Beskyttelsestiltak sonegrense 1

Disse tiltakene omfatter lederne som går mellom kraftforsyningsanlegget og resten av verden. Et naturlig tiltak er overspenningsbeskyttelse på de ledere som føres inn i anlegget.

Ledere/kabler som alltid skal ha overspenningsavledere

- inn- eller utgående kommunikasjonskabler av metall (tele eller data)
- inn- eller utgående lavspenningsledere (400/230 V)
- ev andre signal- eller kontrollkabler eller -ledere som går ut fra kraftanlegget til andre installasjoner eller anlegg

Ledere/kabler som bør ha overspenningsavledere

- inn- eller utgående høyspenning luftledninger ved
 - overgang til kabler
 - terminering til transformator eller andre komponenter
- inn- eller utgående kabler ved
 - kabelavslutninger
 - terminering til transformator eller andre komponenter

I følge kap 2.6.1 har krafttransformatorer i overføringsnettet ikke problemer med å klare en E₁-puls (HEMP), under forutsetning av at transformatoren er beskyttet med tradisjonelle overspenningsavledere med korte tilledninger [5.2]. Dersom dette ikke er oppfylt, er det ikke sikkert at transformatoren vil klare påkjenningen. Det er derfor svært viktig at avlederen plasseres tettest mulig inntil komponenten den skal beskytte, f eks direkte på en transformator.

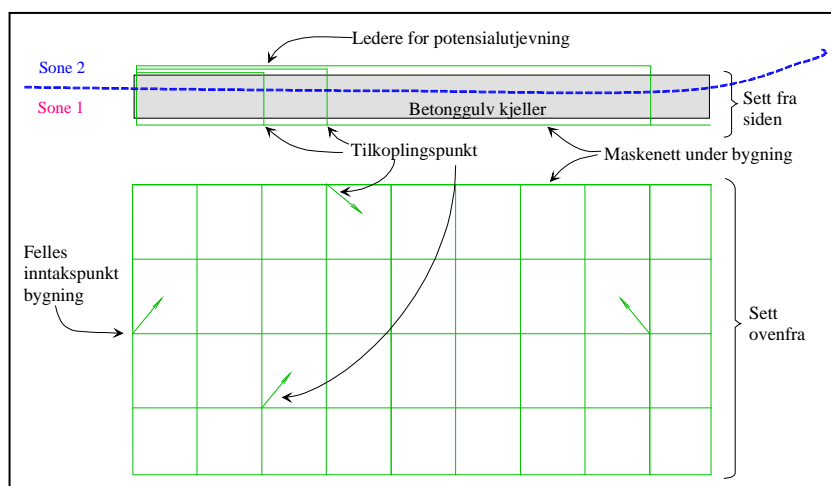
5.4.2 Beskyttelsestiltak sone 1**Jording**

Fig 5.2 foran viser ulike maskenett og ringelektroder bundet sammen med ledere. Disse lederne er forbindelser for potensialutjevning (engelsk: *bonding*), og skal sørge for at de interne spenningsforskjellene i anlegget begrenses.

Anlegget er tradisjonelt utført med maskenett under utendørsanlegget og ringelektroder omkring transformatorcelle og bygning. (Følger dagens praksis i norske kraftforsyningsanlegg.) Under bygningens grunnflate anbefales det i tillegg å benytte et maskenett som forsterkning av ringelektroden rundt bygningen. Fordi dette er en del av jordelektroden, velger denne håndboka å definere dette maskenettet som en del av sone 1. Maskenettet graves ned i bakken under gulvet i bygningen. (Maks 2m x 2m ruter med minimum 50 mm² Cu.)

Hensikten med dette maskenettet under bygningen er å bedre den høyfrekvente potensialutjevningen. Støyrømmene vil dermed få flere og kortere veier tilbake til jord. Foruten at dette reduserer sannsynligheten for brudd i jordleder (pga økt redundans), reduseres også sjansen for resonansfrekvenser med tilhørende økt impedans i jordveien i forhold til å ha bare en jordleder som returveg. Et maskenett i tillegg til tradisjonell ringelektrode blir derfor spesielt viktig ved større bygninger, som får store dimensjoner og dermed relativt lange returveger til jord.

Fig 5.3 viser hvordan utføringen av maskenettet under bygningen skal utføres. Potensialutjevningsledere føres fra tilkoplingene i maskenettet og gir jordreferanse for apparatanlegg nær tilkoplingspunktene (stasjonstransformator, bryteranlegg osv) i sone 2. I tillegg føres de videre og termineres til felles inntakspunkt for bygning.



Figur 5.3 Skisse av maskenett under bygning. Potensialutjevningsledere føres fra tilkoplingene i maskenettets noder og gir jordreferanse for apparatanlegg nær tilkoplingspunktene (stasjonstransformator, bryteranlegg osv). I tillegg føres de videre og termineres til felles inntakspunkt for bygning.

Skjerming

I utgangspunktet skal det kun benyttes skjermede kabler i hele anlegget og disse skal jordes i begge ender. For kraftkabler viser målinger [5.3] at PFSP-kabler alene ikke gir tilstrekkelig demping mot EMP. Dersom de benyttes nær inntil potensialutjevningsledere, kabelkanaler e l, vil de ytre påkjenningene dempes tilstrekkelig. Dette gjelder spesielt for større tverrsnitt enn 2,5 mm², mens PFSP-kabler $\leq 2,5$ mm² sannsynligvis er gode nok alene [5.4]. (Disse kablene har skjerm av Al-bånd (folie), ikke koppertrådsjerm. Under forutsetning av at kabelskjermen kan avsluttes tilfredsstillende uten å ødelegge folien, er PFSP-kabler $\leq 2,5$ mm² akseptable uten spesiell forlegning.) For flere detaljer om hvilke kabler som kan benyttes, se kap 4.2.4.

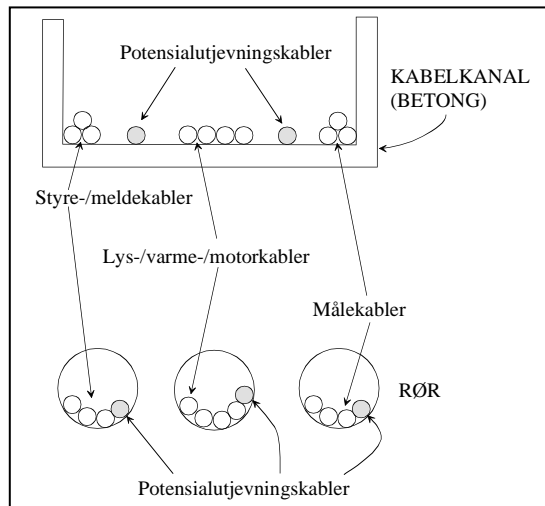
Lederføring

Utendørs lederføring mellom installasjonene i sone 1 kan ligge i en støpt kabelgrøft, i plastrør eller direkte i bakken. En eller flere ledere for potensialutjevning skal plasseres i alle kabelgrøftene (uisolert Cu).

Ett felles innføringspunkt tilstrebes i alle deler av anlegget: Dette gjelder f eks inn mot maskenettet i utendørsanlegg, ringelektroder rundt transformatorcelle og bygning osv. Utjevningslederne skal koples til disse felles innføringspunktene og kabelskjerner skal jordes. Se fig 5.3.

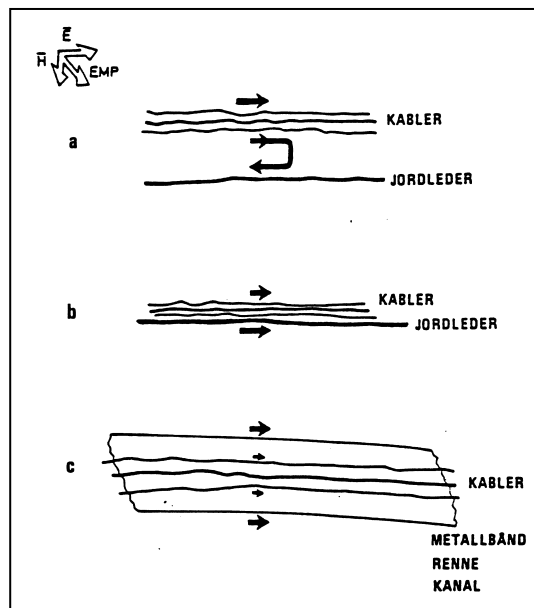
En viss separasjon av ulike kabeltyper er fornuftig for å minske den magnetiske koplingen mellom kablene. Dette kan gjøres med å bunte samme type kabler inntil hverandre. Alternativt kan kablene som antas å være mest utsatt for EMP-påkjenninger plasseres sammen, og lengst mulig fra de antatt mest støyfølsomme kablene. Eksempel på separering av kabler og plassering av utjevningsleder er vist i fig 5.4.

Ubenyttede ledere i flerlederkabler jordes i begge ender.



Figur 5.4 Eksempel på kabelkanal eller -rør i utendørs kabelgrøft.

Det er svært viktig å redusere avstanden mellom utjevningssleder og kabler til et minimum, fordi dette vil redusere induerte spenninger og strømmer mellom jord og kabler, se fig 5.5 [5.5].



Figur 5.5 Effekten av jording/skjerming av kabler utsatt for EMP. (Kilde: [5.5].)

- a) Uheldig utførelse: Jordleder reduserer i liten grad strøm induert i kablene. Jordleder virker som returleder og det opptrer spenninger mellom kabler og jord.
- b) God utførelse: Induseres spenning i parallell jordleder, som setter opp strøm som reduserer strømmen induert i kablene. Spenninger mellom jord og kabler vesentlig redusert.
- c) Best utførelse: Jordleder (kanal) overtar en stor del av induert strøm. Spenninger mot jord små.

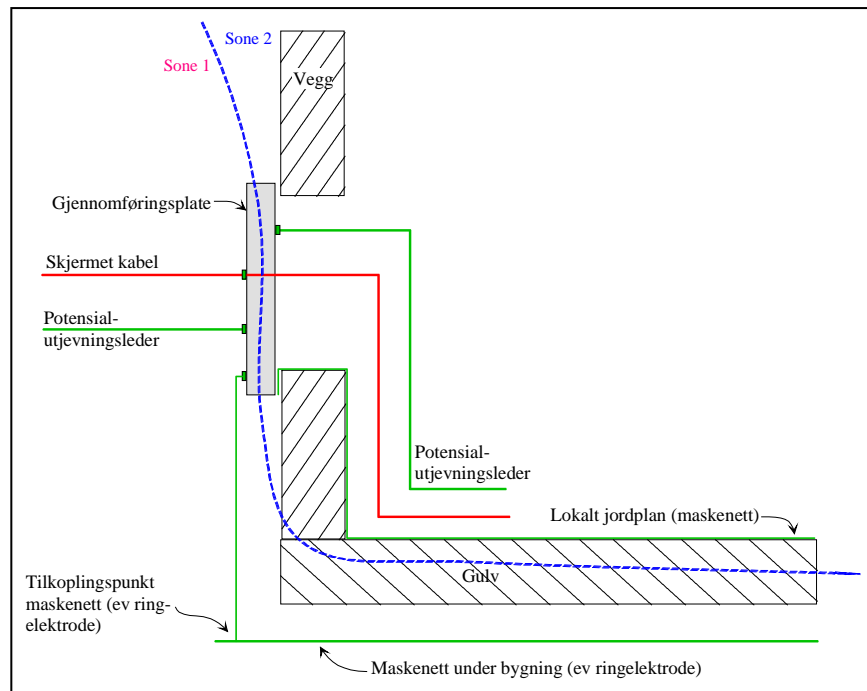
Oppsummering anbefalte beskyttelsestiltak

Kort oversikt over tiltak i sone 1. Kursiv viser tiltak som er tilleggskrav i forhold til dagens praksis i anlegg:

- *Maskenett under gulv i grunnetasje av bygninger som del av jordelektroden.*
- En eller flere ledere for potensialutjevning føres mellom alle installasjonene. Avstand mellom utjevningsleder(e) og kabler må være liten.
- Kun skjermede kabler tillatt. Disse skal jordes i begge ender.
- Separasjon av ulike typer kabler ønskelig ved parallellføring i kabelgrøft.
- Ubenyttede ledere i flerlederkabler jordes i begge ender.
- *Ett felles innføringspunkt for kabler skal benyttes, hvor alle skjermede kabler skal jordes og potensialutjevningsledere termineres.*

5.4.3 Beskyttelsestiltak sonegrense 2

Dette er tiltak som typisk vil omfatte felles innføringspunkt til bygninger, rom e l. Fig 5.6 viser prinsippet med innføringsplate og lokalt jordplan (maskenett).



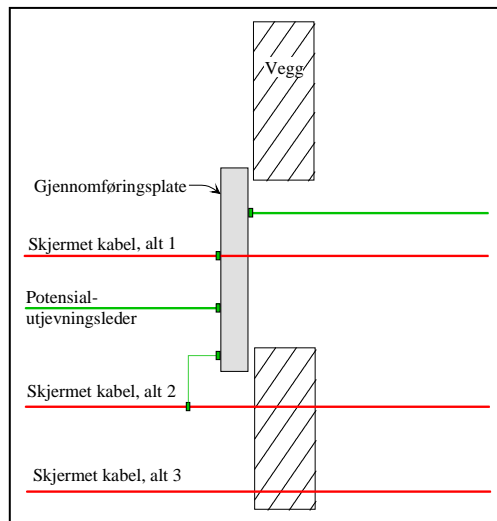
Figur 5.6. Skisse av felles innføringspunkt (gjennomføringsplate) med tilkobling til maskenett under bygningen og lokalt jordplan (maskenett). Prinsipp for terminering av skjermet kabel (rød) og potensialutjevningsleder (grønn) er illustrert.

En felles gjennomføringsplate er helt nødvendig for å lykkes med støydempingen i et metallisk skjermet rom eller bygning. Også med en virtuell skjerm som vist i fig 5.6 (lokalt jordplan), vil en innføringsplate ha svært gunstig virkning på støyen. Figuren viser både et maskenett som jordelektrode og et lokalt jordplan i form av et maskenett. En kombinasjon av begge er støymessig det beste alternativet. Imidlertid vil anleggets støyimmunitet fortsatt være tilfredsstillende dersom jordelektroden under bygningen bare består av en ringelektrode og dette kombineres med et lokalt jordplan oppå gulvet.

Viktig for at gjennomføringsplaten skal virke etter hensikten:

- Platen plasseres i eller nær yttervegg slik at støystrømmer tidligst mulig avkoples til jord for å unngå at de kommer inn i anlegget og forstyrrer dette.
- Gjennomføringsplaten termineres i maskenettet under bygningen med så korte ledere som mulig (min 50 mm² Cu), og helst til flere ulikt plasserte tilkoplingspunkter.
- Alle ledere må avkoples i platen. Gjelder bl a leder for potensialutjevning og skjermede kabler der skjermen jordes rundt hele omfanget. Se fig 5.6.
- Dersom et stort antall ledere skal føres inn, kan det bli nødvendig med to eller flere gjennomføringsplater. Disse må plasseres så nær hverandre som praktisk mulig, og koples elektrisk sammen med flere korte Cu ledere (min 50 mm²) eller skinner for potensialutjevning. (Disse potensialutjevningslederne kommer i tillegg til ev skjerm dersom denne ikke er av massivt metall med tilstrekkelig ledningsevne.)

Fig 5.7 viser ulike alternativ for innføring av skjermede kabler forbi et felles inntakspunkt.

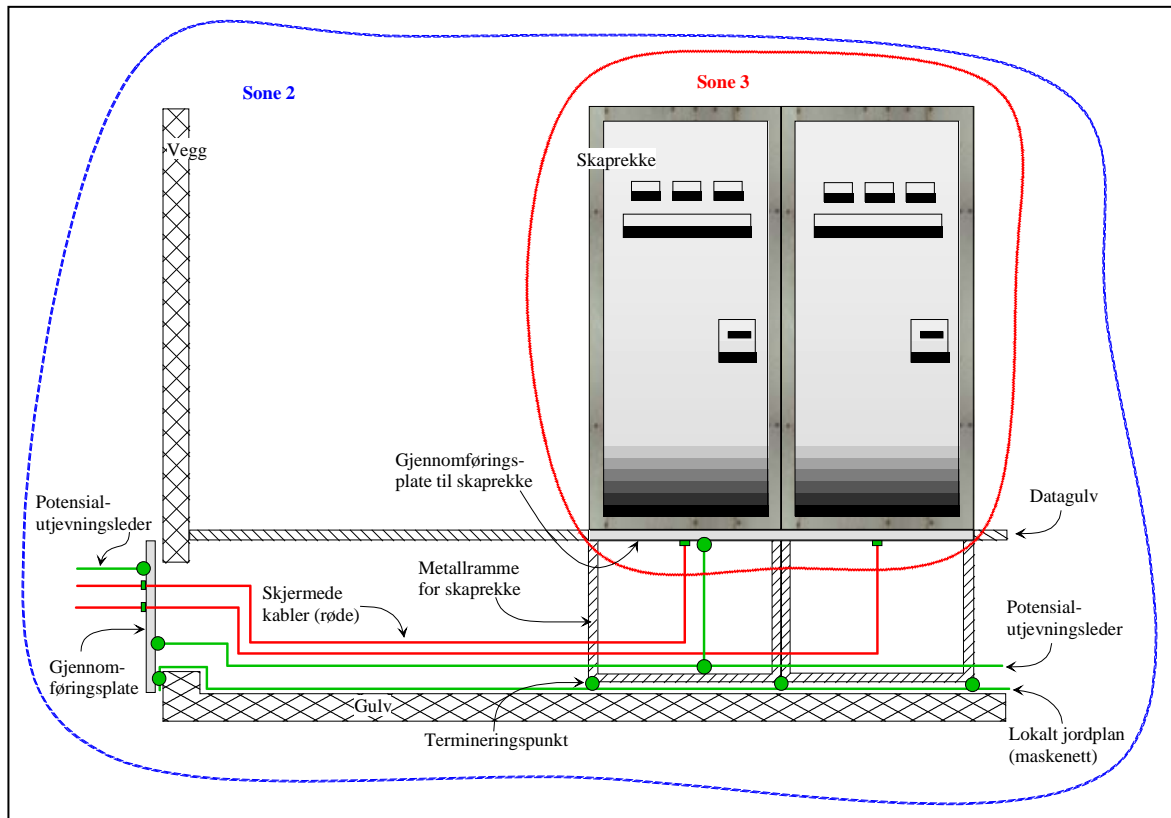


Figur 5.7 Skisse av ulike alternativ for innføring av skjermede kabler forbi gjennomføringsplate. (Prinsippet gjelder alle typer kabler, dvs kraft-, signal-, telekabler osv.)

- Alt 1: Anbefalt: Skjermen på kabelen koples til gjennomføringsplaten rundt hele omfanget.
 Alt 2: Akseptabel: En klave legges rundt hele kabelskjermen og koples med korte ledninger til innføringsplaten.
 Alt 3: Ikke anbefalt: Kabelen føres rett inn i bygget uten avkopling.

Overspenningsvern, overspenningsvern i kombinasjon filter eller filter alene kan være relevant å benytte ved innføring av ledere i bygninger. (Filter vil være mest aktuelt for kraftforsyningen til deler av kontroll- og kommunikasjonsanlegget, der det utstyret finnes med høyest prioritet til å fungere etter en ev EMP-påkjønning. Se forøvrig fig 3.9.) Vern eller filter må i så fall kombineres med en gjennomføringsplate. Det er viktig at disse vernekomponentene koples elektrisk til utsiden av gjennomføringsplaten, ev er en del av selve gjennomføringsnippelen. Husk at vernekomponenter kan få meget steile strømforløp med høy strømmplitude: Utforming og plasseringen av vern bør derfor vurderes nøye for å redusere ev strålt støy fra avlederstrømmen mot resten av anlegget.

5.4.4 Beskyttelsestiltak sone 2



Figur 5.8 Skisse av ulike beskyttelsestiltak i sone 2. Alle tilkøplingene til det lokale jordplanet bør gjøres i noder (kryssningspunkt) i maskenettet. (Se også fig 4.3.)

Jording

I skissen av beskyttelsestiltak i fig 5.8, er det vist et lokalt jordplan (maskenett) på gulvet. (Anbefalt armeringsnett med maksimum maskevidde 8 cm.) Dette maskenettet bedrer høyfrekvenssegenskapene til potensialutjevningen lokalt, samtidig som det gir en virtuell skjerm. Det er ikke noen erstatning for den separate potensialutjevningsslederen, som føres fram til skap og utstyr tilsvarende dagens praksis: Kortslutningsstrømmer og sikkerhetsjording ivaretas av den separate utjevningsslederen, som koples til hhv inn- og utsiden av gjennomføringsplaten i det den føres inn på det lokale jordplanet. I tillegg avkoples den ved innføring til skap e l.

Gjennomføringsplaten må ha god elektrisk kopling til lokale jordplanet (maskenettet), og bør aller helst sveises direkte på ev termineres med korte ledere. Skapene i fig 5.8 er tegnet med metallrammer som står direkte på det lokale jordplanet. Dette er ikke vanlig praksis: Vanligvis står disse direkte på datagulvet. Imidlertid vil den skisserte løsningen gi en gunstig terminering av skaprekken til jord med tanke på høyfrekvent støy, og anbefales å bli benyttet i framtidige anlegg. Høyden mellom det lokale jordplanet og datagulvet bør gjøres så lav som praktisk mulig.

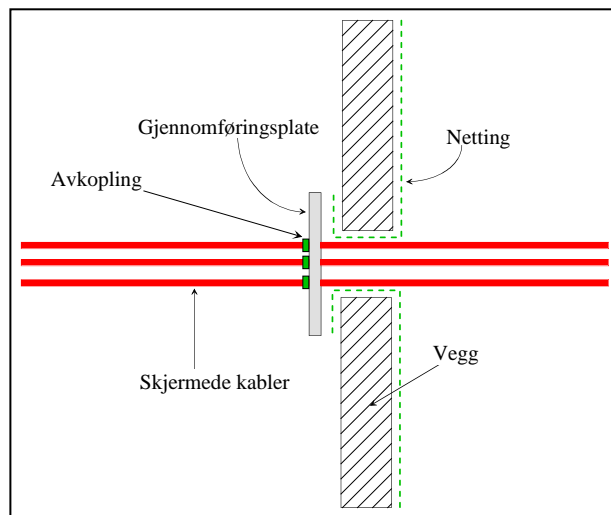
Den bærende konstruksjonen (rammene) for datagulvet jordes med en separat potensialutjevningssleder til innføringsplaten. Alternativt kan de koples til det lokale jordplanet med flere tilkoplingspunkt.

Skjerming

Elektromagnetisk skjerming av rom og bygninger kan oppnås både med virtuell og metallisk skjerm. Med et lokalt jordplan på gulv i bygninger som vist i fig 5.8, kan det oppnås en virtuell skjerming av rommet på opp til 25-30 dB i frekvensområdet fra noen hundretalls kHz til noen GHz. I tillegg kommer apparatenes egenimmunitet. Dette forutsetter imidlertid at alle kabler avkoples i et felles innføringspunkt som vist i figuren.

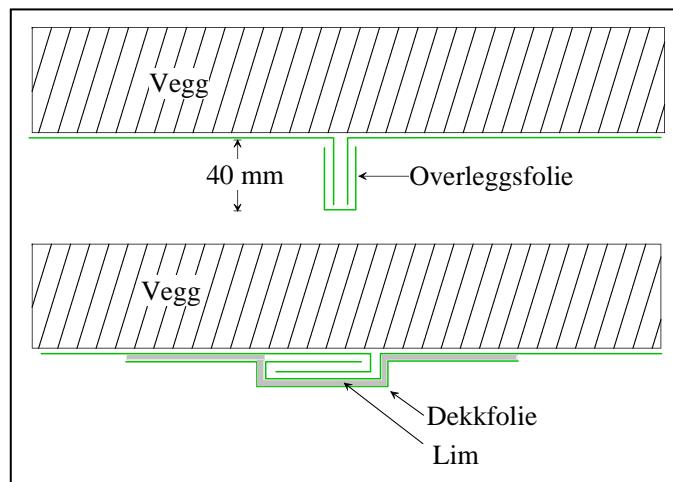
Prinsippet med lokale jordplan skal benyttes i alle etasjer/rom hvor det skal plasseres elektronisk utstyr i en bygning. Det ideelle er å benytte prinsippet med gjennomføringsplate ved innføringen på alle disse, men dette er ikke realistisk. Som et minimum må potensialutjevningslederne termineres ved innføringen på de lokale jordplanene.

Dersom det benyttes metallisk skjerm i bygning eller rom, kan man teoretisk oppnå den dempingen man ønsker ved å variere skjermingsmaterial og tykkelse. Det er viktig å kople skjermen godt til gjennomføringsplaten. Dette må gjøres rundt hele omfanget til platen som vist på fig 5.9. Dersom gjennomføringsplaten skal fungere etter formålet, bør det bare benyttes skjermede kabler som avkoples i platen.



Figur 5.9 Prinsipp-skisse for terminering av gjennomføringsplate til nettingskjerm. Prinsippet blir tilsvarende for andre skjermtyper enn netting (som f eks folie, plater e l)

For å sikre god elektrisk kontakt i sammenføyninger, skjøter osv, benyttes ulike teknikker for forskjellige materialer. Se for øvrig kap 4.2.3 som beskriver ulike materialtyper egnet for skjerming. Fig 5.10 viser aktuelle skjøtemetoder ved bruk av folie eller netting som skjermingsmaterial. Nettingen kan også sys eller knyttes sammen med metalltråd i skjøtene [5.5]



Figur 5.10 Mulig skjøtemetode ved bruk av folie eller netting som skjermingsmaterial. (Kilde: [5.5])

Dører må ha den samme skjermingen som resten av rommet, men man trenger ikke gjøre spesielle skjermingstiltak i spalte mellom dør og karm (som f.eks. EMC-pakninger e.l.). Unngå likevel å plassere utstyr og lederføringer inntil slike uregelmessigheter i skjermen: En avstand på ca 2 m mellom apparater og dørspalter/mindre åpninger vil være tilstrekkelig for å unngå problemer. Problemstillingen er omtalt i kap 4.2.3 og vist i fig 4.12. (Se for øvrig fig 3.6.)

Også ved bygningsutforming bør man tenke skjerming: Selv om det ikke planlegges metallisk skjerming av bygget, bør åpninger i vegger begrenses der det er mulig. F.eks. er vinduer ikke nødvendig i rom/bygninger hvor det normalt ikke oppholder seg personer. Videre er viktig å plassere rom som innkommende kabler først føres til (bryterrom, stasjonstransformator ol) nærmest mulig et felles innføringspunkt. Dette er spesielt viktig dersom man ikke avkople innkommende kabler til sone 2 i en gjennomføringsplate: Unngå f.eks. å føre kraftkabler gjennom hele bygningen før de kommer til f.eks. bryterrom, hvor kabelskjermen blir jordet.

Skjermvirkningen i en kabelskjerm bestemmes bl.a. av skjermens egenskaper i kombinasjon med nærhet til ev. potensialutjevningssledere, lokalt jordplan e.l. Kabelens skjermvirkning må være tilpasset den øvrige støydempingen i anlegget: Passerer f.eks. en kabel en metallisk skjerm (sonegrense) med 30 dB demping, må kabelskjermen (i kombinasjon med forlegning) gi en tilsvarende demping for at sonegrensen skal opprettholde støydempingen. Dersom kabelen ikke gir denne dempingen, bør man i tillegg benytte filter ved innføringspunktet. Filter er mest aktuelt for kraftforsyningen til deler av kontroll- og kommunikasjonsanlegget, der det utstyret finnes med høyest prioritet til å fungere etter en ev. EMP-påkjenning. (Se også fig 3.9)

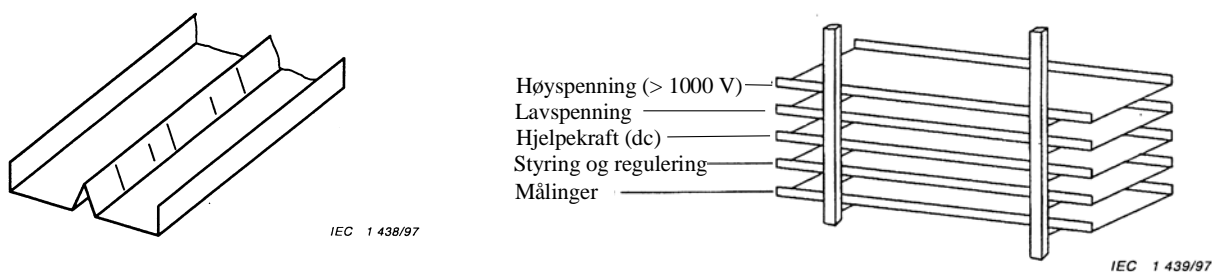
Lederføring

Lederføringen innendørs i sone 2 vil normalt ligge i kabelstiger. Kabelstigene (ev. –kanalene) bør om mulig legges direkte på det lokale jordplanet med god elektrisk kontakt. Dersom dette ikke er praktisk mulig, bør avstanden holdes på et minimum.

Som tidligere nevnt benyttes kun skjermede kabler. Kabelskjermene jordes i begge ender, dvs. ved felles innføringspunkt. Det samme gjelder separat potensialutjevningssleder. Kabelstigene skal

også jordes til innføringsplatene i hver ende. Ved fysisk avstand mellom det lokale jordplanet (maskenettet) og kabelstigene, bør egne lasker terminere kabelstigene til maskenettet. (F eks med 5-10 m mellomrom.) I tillegg skal den separate potensialutjevningslederen føres nær kablene, se fig 5.4. Begge disse tiltakene vil redusere induisert spenning mellom leder og jord, jf kap 5.4.2.

Det er som tidligere nevnt gunstig å benytte kabelseparasjon for å redusere støykoplingen mellom ulike typer kabler. I kabelføringene forsøker man å separere ledere som antydnet i fig 5.4 foran. Et annet eksempel på separasjonen er vist i fig 5.11 med kabelkanaler, men de samme prinsippene gjelder for kabelstiger.



Figur 5.11. To løsninger for separasjon av kabler i kabelkanaler. (Kilde: [5.6].)

Ubenyttede ledere i flerlederkabler jordes i begge ender.

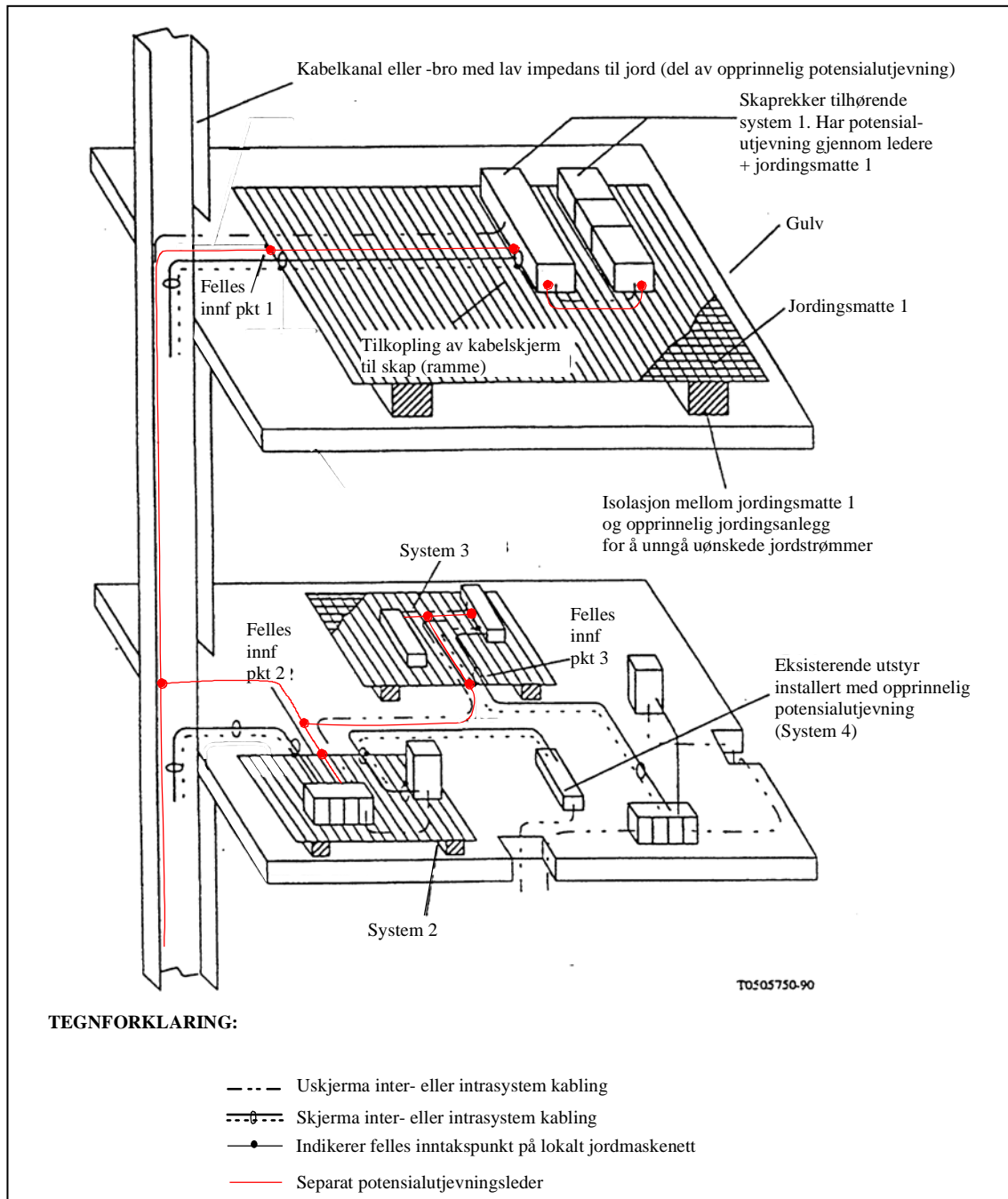
Oppsummering anbefalte beskyttelsestiltak

Kort oversikt over tiltak i sone 2. Kursiv viser tiltak som er tilleggskrav i forhold til dagens praksis i anlegg:

- *Lokalt jordplan (maskenett) benyttes på gulv i bygning, ev bare i de rom hvor det er plassert elektronisk utstyr.*
- *Det lokale jordplanet (maskenettet) termineres til gjennomføringsplaten, som er felles inntakspunkt for alle ledere og øvrige metallinnføringer.*
- *Alle termineringer til det lokale jordplanet gjøres i noder eller krysningspunkt i maskenettet.*
- *Kabelstiger (ev kanaler) plasseres med god elektrisk kontakt direkte på det lokale jordplanet (maskenettet) og jordes i tillegg i begge ender. (Blir en parallell leder til den separate utjevningslederen og maskenettet.)*
- *Kun skjermede kabler tillatt. Kabelskjermer termineres til gjennomføringsplaten rundt hele omfanget av kabelen.*
- *Ubenyttede ledere i flerlederkabler jordes i begge ender.*
- *Potensialutjevningsleder(e) jordes til innsiden av gjennomføringsplaten og føres fram til skap og utstyr. Avstand mellom utjevningsleder(e) og kabler minimaliseres. Separasjon av ulike typer kabler er ønskelig ved parallellføring på kabelstiger.*
- *Skaprammene forlenges og plasseres direkte på det lokale jordplanet (maskenettet) hvor de termineres til jord.*
- *Avstanden mellom lokalt jordplan (maskenett) og datagulv reduseres så mye som praktisk mulig.*
- *Bærekonstruksjon (ramme) for datagulv jordes til innsiden av innføringsplaten ev til lokalt jordplan (maskenett).*

Eksempel på bruk av soneinndeling i eksisterende anlegg

Beskrivelsene ovenfor er spesielt rettet mot nyanlegg, der en har frihet til å tilpasse løsningene i henhold til prinsippene for soneinndeling. Et annet eksempel er illustrert i fig 5.12, som viser hvordan metodikken kan kombineres med eldre, eksisterende installasjoner uavhengig av jordingsmetodikken som er benyttet tidligere. Her er felles innføringspunkt (*single entry*) rendyrket i kombinasjon med lokale jordplan (maskenett).



Figur 5.8 Lederføring og bruk av lokale jordplan (maskenett) i eksisterende installasjoner. (Også kalt *hybrid-bonding concept*.) (Kilde: [5.7])

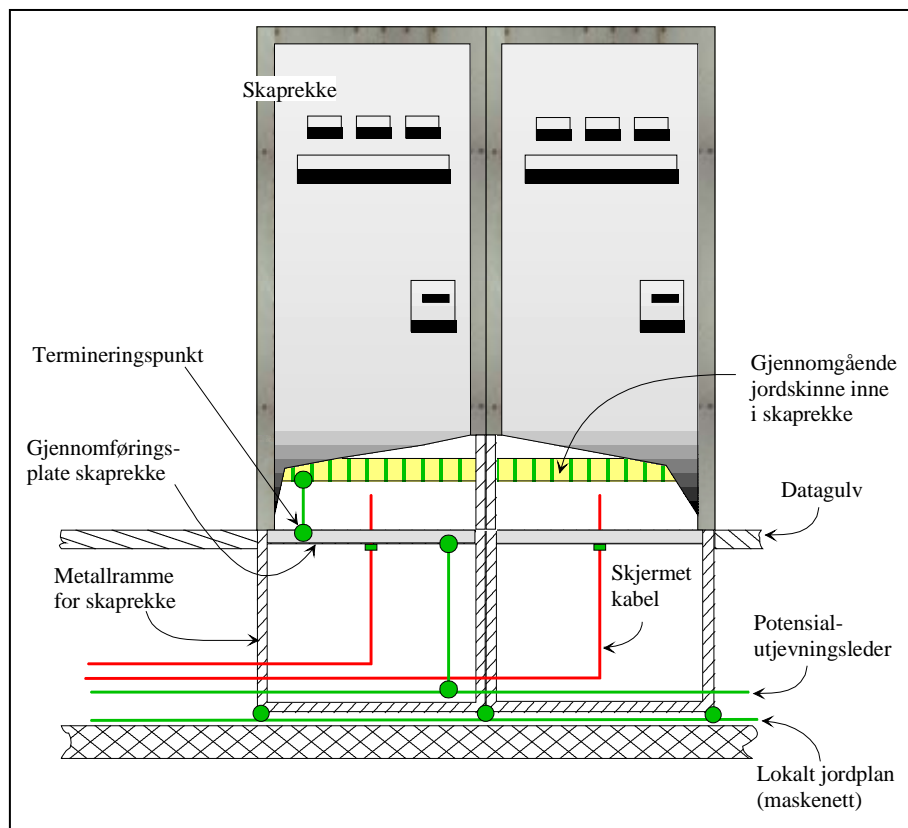
System 1, 2 og 3 er nye installasjoner, mens system 4 er gammelt. Felles innføringspunkt (felles innf pkt) er eneste metalliske forbindelse mellom jord i gammel og ny installasjon. Alle kabler til system 1, 2 og 3 føres inn i dette punktet. Alle ledere som direkte eller indirekte koples til jordplanet (maskenettet) lokalt, skal koples til dette felles innføringspunktet (kabelskjermer e l).

5.4.5 Beskyttelsestiltak sonegrense 3

Tilsvarende som for sonegrense 2, vil gjennomføringsplaten være en sentral del av beskyttelsestiltakene for sonegrense 3. Denne sonegrensen vil typisk være et helskjernet rom, et eller flere skap av metall ev apparat med metallchassis. Merk at anlegget i prinsippet kan dimensjoneres slik at gjennomføringsplaten i sonegrense 2 utelates, og at hele anleggsdempingen i prinsippet plasseres i sonegrense 3 (dvs i skap e l).

Innføring i skap

To alternative utføringer er vist i fig 5.11 og 5.14.

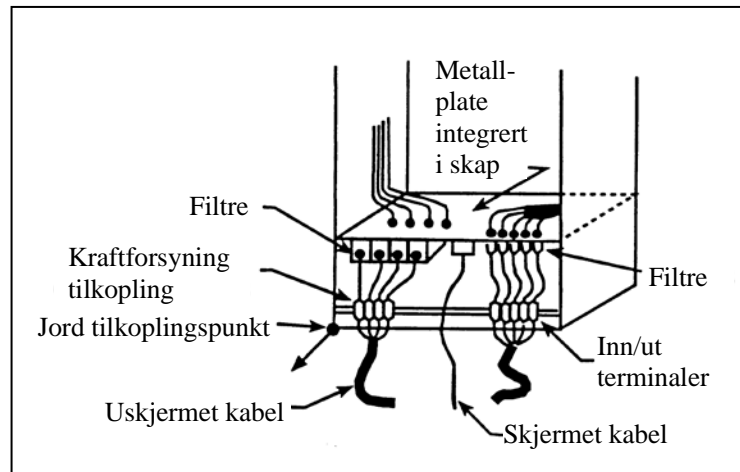


Figur 5.11: Prinsipp-skisse som viser innføring i skap med gjennomføringsplate.

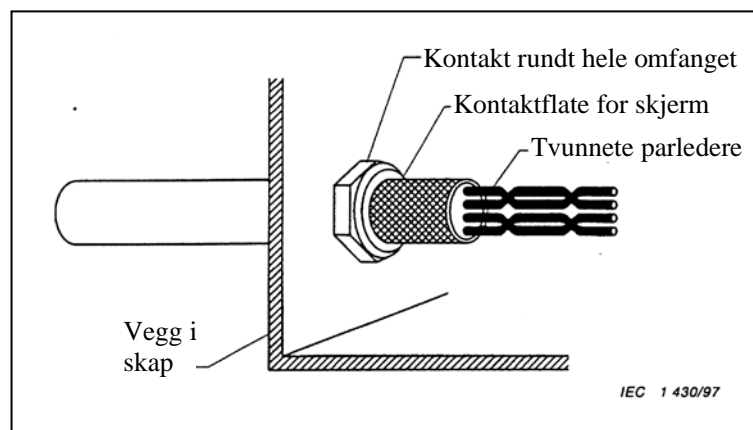
Utførelsen i fig 5.11 kan gi meget gode skjermingsegenskaper. I praksis kan hele støydemningen i anlegget legges til metallskapet med innføringsplate. Dette forutsetter at det benyttes skjermede kabler som alene (eller vha nærhet til potensialutjevnsleder, kabelkanaler og/eller lokalt jordplan) gir tilstrekkelig demping, samt at riktige retningslinjer for gjennomføringer følges. Dersom kabelskjerm i kombinasjon med forlegning ikke gir den nødvendige dempingen, bør man i tillegg benytte filter. Filter er mest aktuelt for kraftforsyningen til deler av kontroll- og kommunikasjonsanlegget, der det utstyret finnes med høyest prioritet til å fungere etter en ev EMP-påkjenning. (Se også fig 3.9).

En mer detaljert løsning av gjennomføringer er vist i fig 5.12 og 5.13. Prinsippene er generelle og vil kunne overføres til gjennomføringsplater generelt.

I fig 5.12 er det bl a vist hvordan uskjermede kabler kan føres inn i et skap, samtidig som EMP-sikringen opprettholdes, i dette tilfellet ved filtrering. Dette er bare ment som en illustrasjon av prinsippet for EMP-sikring av gjennomføringen, og ikke en oppfordring om å benytte uskjermede kabler.



Figur 5.12 Skisse av detaljer rundt gjennomføringsplate i skap. (Kilde [5.8].) Detaljer for uskjermede kabler er også vist, selv om dette i utgangspunktet ikke skal benyttes.

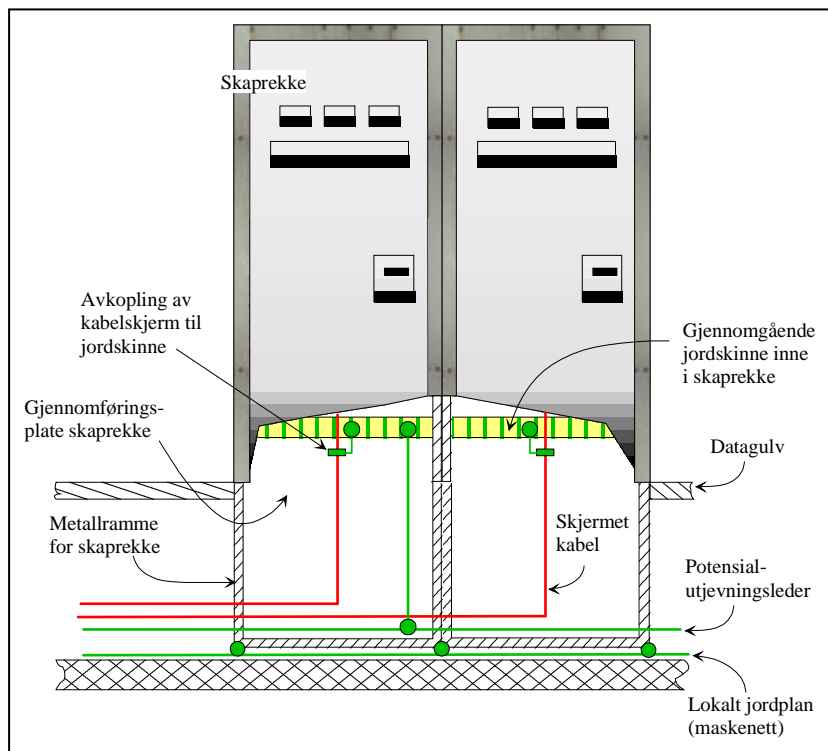


Figur 5.13 Prinsippkisse for terminering av skjernet kabel i skapvegg, gjennomføringsplate e l. (Kilde: [5.6].)

Fig 5.13 viser hvordan kabelskjermen koples rundt hele omfanget til gjennomføringsplaten. Det er viktig at kableten avisoleres tilstrekkelig, slik at gjennomføringsnippelen får god kontakt med kabelskjermen. Kabelskjermen skal ikke kuttes, men føres ubrutt gjennom sonegrensen.

Et annet alternativ er vist i fig 5.14. Her er gjennomføringsplaten utelatt, og kopperskinnen i nedkant av skapet fungerer som lokal jordreferanse for kabelskjerm, potensialutjevnersleder osv. Her blir dempingen langt dårligere, men metoden vil være tilstrekkelig i kraftforsyningsanlegg: Kombinert med et lokalt jordplan, og forutsatt at avkoplingen ved foregående innføringspunkt er utført tilfredsstillende, kan en demping på vel 25-30 dB forventes.

Et uheldig alternativ vil være å føre innkommende ledere høyt opp i skapet før kabelskjermen koples til jord. Dette bør unngås.



Figur 5.14 Innføring i skap med terminering av skjernet kabel til jordingsskinnen i skapet.

5.4.6 Beskyttelsestiltak sone 3

Sone 3 vil være en sone som er relativt godt beskyttet mot ytre støy. Vanlig god EMC-praksis kan derfor følges mht jording og skjerming. Så langt som mulig bør prinsippene fra sone 2 videreføres

Jording

Lederføringer for potensialutjevning bør holdes korte og skal termineres mot innsiden av gjennomføringsplaten. (Ev felles jordskinne dersom gjennomføringsplate er utelatt.)

Skjerming

Skjermede kabler anbefales, og disse avkoples i gjennomføringsplate, ev til felles jordskinne. Ytterligere skjerming normalt bare nødvendig ut fra interne EMC hensyn (intra-støy) i sone 3. (Typisk vurdering som utstyrsleverandør foretar: Inngår normalt ikke i stasjonseiers vurderinger.)

Lederføring

Som tidligere nevnt, bør lederføringer om mulig ha minimal avstand til potensialutjevningsleder eller andre jordplan (metallchassis e l). Ubenyttede ledere i flerlederkabler jordes i begge ender.

Oppsummering anbefalte beskyttelsestiltak

Kort oversikt over tiltak i sone 3. Kursiv viser tiltak som er tilleggskrav i forhold til dagens praksis i anlegg:

- Skjermede kabler benyttes og *avkoples ved gjennomføringsplate* (ev felles jordskinne).
- Potensialutjevningsledere termineres mot *innsiden av gjennomføringsplate* (ev felles jordingsskinne) og føres så nær lederføringene som mulig.
- Ubenyttede ledere i flerlederkabler jordes i begge ender.

5.5 KOMMENTARER TIL ANBEFALINGENE

De anbefalte tiltakene mht EMP-beskyttelse foran, må ses på som ideelle løsninger. Enkelte ganger kan økonomi eller andre praktiske hensyn føre til at utføringen av kraftforsyningsanlegget må modereres i forhold til disse forslagene. Det er likevel svært viktig å prøve og følge prinsippene presentert foran.

I praksis vil spesielt kravet til avkopling av alle skjermede kabler ved innføring i bygninger eller mot lokale jordplan (maskenett) være vanskelig å etterleve. Dette gjelder for alle typer kabler, f eks kraftkabler og styre- og meldekabler. Dersom dette ikke gjøres, er det som nevnt viktig og fortsatt benytte prinsippene fra metodikken foran:

- Før om mulig alle kabler inn ved det samme felles innføringspunktet (i bygning eller rom med jordplan e l).
- Innføring av kraftkabler i bygning som ikke avkoples ved innføringspunkt:
 - Forsøk å plassere rommene kablene først føres til (bryterrom, stasjonstransformator e l) nærmest mulig innføringspunktet. (Unngå å føre lederne gjennom hele bygningen før de kommer til f eks bryterrom hvor kabelskjermen alltid blir jordet.)
 - La kablene ligge nærmest mulig potensialutjevningsslederen. (Separat utjevningssleder ev i kombinasjon med kabelstige og/eller lokalt jordplan.)
- Innføring av styre- eller meldekabler som ikke avkoples ved innføringspunkt:
 - Forsøk å redusere avstanden til potensialutjevningsslederen til et minimum. (Separat utjevningssleder ev i kombinasjon med kabelstige og/eller lokalt jordplan.)
 - Forsøk å separere kabler for å minske koplingen mellom antatt støyfølsomme kabler fra de som er antatt å være mest utsatte for EMP-påkjønning.

Et kraftforsyningsanlegg som følger prinsippene foran med lokale jordplan og minimum en innføringsplate, vil sannsynligvis ha en demping i størrelsesorden 25 til 30 dB i det aktuelle frekvensområdet for EMP-kildene presentert i håndboka. Dette garanterer ikke at anlegget er immun mot EMP-truslene, men det vil ha en betydelig redusert risiko i forhold til EMP-påkjønninger.

Anlegg som bare delvis følger anbefalingene vist foran, har ikke den samme dempingen i hele frekvensområdet. Det er imidlertid grunn til å anta at dempingen i jordingsanlegget i norske utendørs kraftanlegg er i området 25 til 40 dB for ledningsbundne pulser i ns-området [5.9]. Mye av den ledningsbundne trusselen kan derfor allerede være ivaretatt, under forutsetning av at avledernes plassering og utføring er tilfredsstillende. Usikkerheten vil derfor først og fremst knytte seg til de strålte påkjønningene og virkningen av dette.

Noe av trusselen fra strålte påkjønninger kan reduseres med enkle og rimelige midler: Bærbare RFW-våpen har en begrenset rekkevidde, pr i dag ca 50-100 m. Vha gjerder i tilstrekkelig avstand fra den sårbare delen av kraftanlegget, kan derfor noe av RFW-trusselen enkelt reduseres.

5.6 REFERANSER

- 5.1 IEC 61000-5-1: Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 5: Installation and mitigation guidelines – Section 1: General considerations. 1996.
- 5.2 Wagner C.L. et al: Recommended engineering practice to enhance the EMI/EMP immunity of electric power systems. ORNL/Sub/91-SG913/1, Martin Marietta Energy Systems Inc., Oak Ridge National Laboratory, 1992
- 5.3 ABB Industry Oy: EMC compliant installation and configuration for a power drive system. Technical guide no 3. ACS 601/ACS 301. s. 29-30. 1997.
- 5.4 Delresultat fra ikke-dokumenterte målinger fra et prosjekt finansiert av Forskningsrådet utført ved NEMKO.
- 5.5 Grønhaug, K. L.: Elektromagnetisk puls, vol 2. Virkninger og vern. FFI-rapport –82/3003. Forsvarets Forskningsinstitutt. 1982.
- 5.6 IEC 61000-5-2: Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 5: Installation and mitigation guidelines – Section 1: Earthing and cabling. 1997.
- 5.8 IEC 77C/84/CD Foreløpig arbeidsdokument for IEC 61000-5-6: Electromagnetic compatibility – Installation and mitigation guidelines – Mitigation of external influences. Basic EMC publication. 1999.
- 5.7 Montandon E.: Bonding and routing practice with respect on lightning protection and EMC. Proceedings, 21st ICLP, Berlin, September 1992.
- 5.9 Ringheim, N.A.: Demping av injiserte, høyfrekvente strømpulser i jordingsanlegget til Gimse transformatorstasjon. AN 99.13.23, SINTEF Energiforskning AS, Trondheim. 1999.

6 DOKUMENTASJON OG VERIFISERING AV EMP BESKYTTELSE

Dette kapitlet gir en oversikt over sentrale moment ved dokumentasjon og verifisering av EMP-sikrede anlegg. På bakgrunn av innholdet skal leseren være i stand til å sette opp en plan for hvordan dokumentasjon og verifisering kan organiseres.

6.1 DOKUMENTASJON AV EMP-BESKYTTELSE

Dokumentasjon av EMP-tiltak i konkrete kraftforsyningsanlegg er å betrakte som sensitiv informasjon. Rutiner omkring oppbevaring og spredning av denne dokumentasjonen må gjenspeile dette, og informasjonen skal vurderes gradert som minimum "Begrenset" i henhold til sikkerhetsloven med forskrift. Dette er spesielt viktig ifm klasse 1 anlegg

I tillegg til interne rutiner for beskyttelsesgradering av dokumenter, skal tilsvarende rutiner kreves av leverandører og produsenter. Dette gjelder spesielt ved korrespondanse og oppbevaring av EMP-relevant dokumentasjon. På denne måten kan en viktig informasjonskanal sikres mht dokumentasjonsspredning.

6.1.1 Informasjon som bør være med

Følgende stikkord beskriver hva dokumentasjonen bør inneholde [6.1]:

- Skisser og/eller tegninger av kraftanlegg med
 - jordingssystemet inntegnet
 - beskyttelseskomponenters plassering tegnet inn
 - prinsippskisse for jording av skjermede kabler (hvor og hvordan de jordes i anlegget)
 - ev skjermede rom inntegnet sammen med angivelse av
 - gjennomførings plassering og utføring
- I tillegg til skissene nevnt ovenfor, en tilhørende beskrivelse av [6.1]
 - hva som utgjør jordingssystemet (ledere ev armering osv, inklusiv opplysninger om kvadrattykkelse, material osv)
 - type og data for beskyttelseskomponenter (vern)
 - skjermtype kabler
 - type material og kvalitet i ev metallskjerm i rom, bygninger osv

For antatt viktige rom eller bygninger kan det være naturlig med høyere oppløsning på detaljene. Her kan følgende opplysninger være relevante [6.2]:

- hva brukes rommet til (type utstyr plassert i rommet)
- bygningskonstruksjon (vegger, tak, gulv, dører, vindu: Plassering, dimensjoner og utførelse inkl materialtype. Ev skjerming og gjennomføringsplate. Vekt på framstilling av EMP-relevante egenskaper)
- detaljer om plassering av elektrisk utstyr og installasjoner inkl ev vernetiltak
- lederføring i rommet (kabelbroer, ev separasjon av kabler osv)
- detaljer fra innføring i skap

6.2 VERIFISERING AV EMP-BESKYTTELSE

Dette underkapitlet er delt inn i testmetoder og kontrollrutiner. Gode rutiner for å forebygge og oppdage ev endringer i EMP-sikringen av anlegget er en meget viktig del av anleggskontrollen, enten benyttet alene eller som et supplement til de elektriske testmetodene.

Dersom eier av anlegget har et etablert kvalitetssystem, bør disse rutinene legges inn i internkontrollen.

6.2.1 Testmetoder

Generelt skal testmetoder verifisere anleggets godhet overfor EMP-påkjenninger. Ved f eks HEMP (men delvis også ved LEMP), vil hele kraftanlegget bli påkjent samtidig i tid av de elektromagnetiske feltene. Det betyr at alle skjermer (soneskiller), gjennomføringer, åpninger og kabler påtrykkes en elektromagnetisk støypuls samtidig. En slik støypuls kan bare simuleres med en fullskala EMP-test av hele anlegget. Systemresponsen vil da også inkludere effekten av de ulineære vernekomponentene. For sivile kraftforsyningsanlegg vil imidlertid en fullskala EMP-test være helt uaktuell pga kostnader og kompleksitet i målingene.

De aktuelle testene må derfor nødvendigvis bli forenklinger i forhold til virkelige EMP-påkjenninger. Hvilke tester som skal gjennomføres vil avhenge av flere moment. EMP-tester av system eller utstyr kan være kostbare, fordi noen testmetoder krever en del spesielt måleutstyr, betydelig bearbeiding av måledata osv. Ønsket om å verifisere kraftanleggets EMP-egenskaper må derfor veies opp mot bl a økonomi, anleggets viktighet i totalforsvaret, hva som ev er nødvendig å teste, hvilke resultater som kan forventes å komme ut fra testene, samt hvor nøyaktig måleresultatene skal være [6.4].

Standardene som er nevnt nedenfor, gir eksempler på tester som kan gjennomføres i kraftanlegg. Enkelte metoder nevnes spesielt, selv om de inngår i dokumentene som det henvises til. Presentasjonen deler inn oversikten i hhv komponenter/utstyr/systemer og rom/bygninger. Utstyr- og systemtestene vil først og fremst kunne verifisere eller komplettere leverandørers produktdata. (Avhengig av om disse allerede omfatter EMP-relevante tester.) Testene for rom og bygninger, vil i større grad være en verifisering av den utførte EMP-sikringen i anlegget.

Komponenter, utstyr og systemer

Utstyr og systemer kan testes for både strålt og ledningsbundet påkjenning. Eksempler på dette er beskrevet i IEC-standarden 61000-4-25, som viser HEMP testmetoder (immunitet) av utstyr og systemer [6.6]. Aktuelle testprosedyrer blir omtalt for både laboratoriemålinger og for utstyr plassert i anlegg. Testnivåene defineres avhengig av hvilket miljø utstyret skal stå i.

Vern og/eller filter kan testes både med tanke på transmisjons- og dempeegenskaper før de blir installert [6.3]. IEC 61000-4-24 viser f eks aktuelle testmetoder for vern mot ledningsbundet HEMP-påkjenninger [6.5]

Skjermet rom eller bygning

Også her kan testobjektet testes mot både strålt og ledningsbundet påkjenning. IEC 61000-4-23 omtaler testmetoder for skjermede objekt som f eks rom, bygninger, skap, kabelskjermer, skjermingsmaterialer (maling, netting, folie mm) og ventilasjonsåpninger [6.4]. Anbefalte testnivåer kan finnes i IEC 61000-4-25 [6.6], se avsnittet ovenfor.

Metoder for anleggsverifisering:

- Kontroll av utføringen av skjermingen i et rom eller bygning umiddelbart etter bygging, men før kabler eller andre innføringer er installert. Åpninger til kabelgjennomføringer tettes først med en metallplugg e l. Flere alternative testmetoder eksisterer, bl a:
 - benytte eksisterende standarder for skjermingseffektivitet, f eks MIL-STD 285
 - måle det elektromagnetiske feltet fra nærliggende radio- og TV-stasjoner f eks vha frekvensanalysator og antenne: Sammenligne feltet nær inntil og inni det skjermede rommet.
 - sette opp en senderantenne i nærheten av anlegget og sende sinusvarierende felt i det aktuelle frekvensområdet. Sammenligne feltet som kan måles nær inntil og inni det skjermede rommet.

På denne måten kan ev svakheter i skjermen tidlig detekteres og utbedres til en forholdsvis lav kostnad.

- Etter at også kabler er ført inn, kan feltet fra radio- og TV-stasjoner eller en nærliggende aktiv antenne igjen måles. Sammenligninger mellom feltet nær inntil og inni det skjermede rommet kan vise om det elektromagnetiske feltet blir tilstrekkelig dempet. (Pga ulinearitet i vern ol, vil en del av støyen med lav energi kunne følge lederne inn i det skjermede rommet uten at f eks overspenningsvern trer i kraft.)
- Lokal strøminjisering langs kabelskjermer kan gjøres nær felles innføringspunkt, sonegrenser o l. Vil kunne detektere hvor stor del av induserte spenninger og strømmer som kopler inn i anlegget, og om gjennomføringsplater, vern e l fungerer tilfredsstillende.
- Enkle resistans-målinger (dc) for å kontrollere at potensialutjevningsledere, jordledere, kabelskjemer e l er tilfredsstillende terminert.

6.2.2 Kontrollrutiner

Visuell inspeksjon [6.3]

Periodisk visuell inspeksjon av installasjoner er et verdifullt supplement til elektriske tester. Dette er spesielt interessant i forbindelse med skjermede rom eller gjennomføringer inn mot skap eller felles inntakspunkt. Bør som et minimum etableres som fast rutine etter nybygging og endringsarbeid i anlegget.

Uheldige rutiner ved langvarige modifikasjoner i anlegget er f eks å fjerne deksel fra vern e l under endringsarbeid, og først sette dekselet på plass igjen når hele arbeidet er fullført. Dersom dette ikke er nødvendig for å gjennomføre det daglige endringsarbeidet, bør det ikke skje. (Kan lett oppdages vha visuell inspeksjon.)

Administrative rutiner [6.3]

Gode administrative rutiner er svært viktig for å opprettholde EMP-sikringen av anlegg. Dette kan f eks være:

- Rutiner for å fange opp hvilke hendelser som har påvirket EMP-beskyttelsen i anlegget, slik at dette kan unngås ved tilsvarende hendelser eller arbeid i framtida
- EMP-ansvarlig(e) person(er) utpekt på forhånd for anlegget. Denne (disse) personen(e) har fullmakt til bl a å
 - godkjenne endringer som kan påvirke EMP-sikringen i anlegget. F eks ved ny gjennomføring i skjermet rom, utskifting av ødelagte vernekomponenter (må ikke erstattes av komponenter med dårligere EMP-egenskaper enn tidligere) osv.
 - kreve visuelle inspeksjoner eller testing av EMP-sikringen i anlegget (når vedkommende måtte finne det nødvendig)
 - kontrollere adgangen til hele eller deler av anlegget, spesielt i forhold til arbeid som skal gjøres. (Alt arbeid bør klareres på forhånd.)
 - utbedre ev skader så raskt som mulig

6.3 REFERANSER

- 6.1 Forskrift om EMP-beskyttelse av telekommunikasjonsanlegg (EMP-forskriften). Høringsutkast. Sendt ut fra Samferdselsdepartementet 1999-07-21.
- 6.2 IEC 61000-5-1 Ed 1:
Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 5: Installation and mitigation guidelines – Section 5: General considerations - Basic EMC publication.1996.
- 6.3 Protection of civil telecommunications networks against electromagnetic pulse (EMP) effects.
NATO - Civil communications planning committee - EMP group of experts. AC/121-N/447(Revised). 1993.
- 6.4 IEC 77C/68/CDV: Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4: Testing and measurement techniques – Section 23: Test methods for protective devices for HEMP and other radiated disturbances.
Project number 61000-4-23.
1998-12-11.
- 6.5 IEC 61000-4-24: Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4: Testing and measurement techniques – Section 24: Test methods for protective devices for HEMP conducted disturbances – Basic EMC publication. 1997.
- 6.6 IEC 77C/81/CD: Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4: Testing and measurement techniques – Section 25: HEMP immunity test methods for equipment and systems.
Project number 61000-4-25.
1999-09-10.

V1 VEDLEGG 1: DEFINISJONER OG TERMINOLOGI

Dette vedlegget gir en oversikt over definisjoner og terminologi som blir benyttet innen fagområdet EMP. En del av begrepene og forkortelsene nedenfor er ikke benyttet i håndboken, men likevel tatt med fordi de ofte benyttes i annen EMP-litteratur.

V1.1 ALFABETISK LISTE

asymmetrisk spenning (<i>assymmetrical voltage</i>):	Se "fellesspenning"
balansert krets:	Krets der ledere eller inn- og utgangsterminaler har samme impedans til jord. Signalspenningen er en tverrspenning, og i det ideelle tilfellet er kretsen upåvirket for støy fra fellesspenninger.
beskyttelsesjord (<i>protective earth</i>):	Skal verne liv mot farlig strømgjennomgang ved berøring med utsatt del av det elkrafttekniske systemet. Skal utføres slik at berøringsspenningens nivå og varighet er under gitte grenseverdier
bølgeimpedans (<i>wave impedance</i>):	Forholdet mellom E- og H-feltet ($Z_b = E/H$ [Ω]) for en elektromagnetisk bølge med feltkomponenter vinkelrett på forplantningsretningen. I fjernfeltet er bølgeimpedansen for vakuum lik $Z_0 = (\mu_0/\epsilon_0)^{1/2} = 120 \pi \approx 377 \Omega$, dvs lik den karakteristiske impedansen til forplantningsmediet vakuum.
CMR-faktor i apparater (<i>Common Mode Rejection Factor, Common Mode Rejection Ratio</i>):	I en krets som ikke er ideelt symmetrisk, vil en del av den forstyrrende fellesspenningen opptre som en uønsket tverrspenning som overlager signalspenningen. CMR er forholdet mellom de to førstnevnte spenninger. Jo større CMR er, jo mindre følsom er kretsen overfor fellesmodus støyspenninger (fellesspenninger).
CMRF (<i>Common Mode Rejection Factor</i>):	Se "CMR-faktor"
CMRR (<i>Common Mode Rejection Ratio</i>):	Se "CMR-faktor"
Compton-effekt (<i>Compton effect</i>):	Effekten av en kollisjon mellom et gamma-foton og et elektron i atomstrukturen i et materiale. Elektronet kan få nok energi til å forlate sin bane og bli et fritt elektron som vil kunne bevege seg gjennom materialstrukturen som en negativ strømbærer
demping (<i>attenuation</i>):	Reduksjonen i det elektriske/magnetiske feltet, strømmen eller spenningen som en følge av absorpsjon eller spredning ved refleksjon, vanligvis gitt i dB

differensiert beskyttelse:	I denne håndboka: Å benytte ulik grad av EMP-beskyttelse for forskjellige deler av anlegget.
driftsberedskap:	I denne håndboka: Vurdering av hvilke tiltak som er nødvendig (f eks mht anleggsutforming, personellrutiner og reservelager) for at myndighetenes og egne funksjons- og sikkerhetskrav skal tilfredsstilles.
E ₁ (<i>early-time HEMP</i>):	Det første intervallet (opp til 100 ns) av den elektromagnetiske virkningen fra en kjernefysisk eksplosjon over atmosfæren (HEMP), se dette. Karakterisert ved en elektromagnetisk puls med stigetid i ns-området og feltstyrke opp til 50 kV/m.
E ₂ (<i>intermediate-time HEMP</i>):	Det andre intervallet (fra noen hundretalls ns opp til titalls ms) av den elektromagnetiske virkningen fra en kjernefysisk eksplosjon over atmosfæren (HEMP), se dette. Karakterisert ved en elektromagnetisk puls med stigetid på noen hundretalls ns og feltstyrke på 10-100 V/m.
E ₃ (<i>late-time HEMP</i>):	Det tredje intervallet (opp til typ 100 s) av den elektromagnetiske virkningen fra en kjernefysisk eksplosjon over atmosfæren (HEMP), se dette. Virkningen ved jordoverflaten er karakterisert ved en forstyrrelse av jordas magnetfelt, og et tilhørende elektrisk felt i jordoverflata på typ noen titalls V/km.
ekvipotensialforbindelse (<i>equipotential bonding</i>):	Se "utjevningsforbindelse"
elektromagnetisk emisjon (<i>electromagnetic emission</i>):	Fenomenet når elektromagnetisk energi strømmer ut fra en kilde [V1.1]
elektromagnetisk forenlighet (<i>electromagnetic compatibility</i>):	Se "elektromagnetisk sameksistens"
elektromagnetisk forstyrrelse ¹ (<i>electromagnetic interference - EMI</i>):	Forringelse av funksjonen til en enhet, overføringskanal eller system forårsaket av elektromagnetisk støy [V1.1]
elektromagnetisk miljø (<i>electromagnetic environment</i>):	De totale elektromagnetiske fenomen som eksisterer på et gitt sted [V1.1]
elektromagnetisk puls – EMP (<i>electromagnetic pulse – EMP</i>):	Strålte, kortvarige høyfrekvente elektromagnetiske felter med høy intensitet (I denne håndboken: $f > 100 \text{ kHz}$, $E \geq 1000 \text{ V/m}$)

1

Elektromagnetisk støy og elektromagnetisk forstyrrelse er i disse definisjonene henholdsvis årsak og virkning.

elektromagnetisk sameksistens
(*electromagnetic compatibility - EMC*):

Utstyrs og apparaters evne til å fungere tilfredsstillende i sitt elektromagnetiske miljø, uten å introdusere utålelig elektromagnetisk støy på noe som helst i dette miljøet [V1.1]

elektromagnetisk skjerm
(*electromagnetic screen*):

Skjerm av ledende material med hensikt å redusere inntrengningen av varierende elektromagnetiske felt i et bestemt område [V1.1]. Se også "skjerm"

elektromagnetisk stråling
(*electromagnetic radiation*):

1. Når energi i form av elektromagnetiske bølger strømmer fra en kilde ut i rommet.
2. Energi overført i rommet i form av elektromagnetiske bølger [V1.1]

elektromagnetisk støy²
(*electromagnetic disturbance*):

Ethvert elektromagnetisk fenomen som kan forringe funksjonen til en enhet, utstyr eller system [V1.1]

elektromagnetisk topologi:

Se "soneinndeling"

elektrostatisk utlading
(*electrostatic discharge – ESD*):

Overføring av elektrisk ladning mellom materialer med ulikt elektrostatisk potensial ved direkte kontakt eller nærhet [V1.1]

elkraftteknisk systemjord:

Forholdet mellom jord og de strømførende ledere i fordelingssystemet, som kan være direkte jordet i et punkt eller isolert fra jord.

EMC
(*electromagnetic compatibility – EMC*):

Se "elektromagnetisk sameksistens"

EMI
(*electromagnetic interference*):

Se "elektromagnetisk forstyrrelse"

emisjonsgrense
(*emission limit*):

I EMC-standarder: Det maksimalt tillatte emisjonsnivået (fra en elektromagnetisk støykilde) [V1.1]

emisjonsnivå
(*emission level*):

I EMC-standarder: Nivået fra en gitt elektromagnetisk støy utsendt fra et spesielt utstyr eller system, og som er målt på en spesifisert måte [V1.1]

EMP
(*EMP*):

Se "elektromagnetisk puls"

EMPP
(*Electro-Magnetic Pulse Protection – EMPP*):

Beskyttelsestiltak mot EMP som bl a omfatter jording, skjerming, avledning og filtrering

ENDO-EMP
(*Endo-Atmospheric EMP – ENDO-EMP*):

Elektromagnetiske felt som er produsert av en kjernefysisk innretning som er detonert innenfor atmosfæren

ESD

(*electrostatic discharge*):

Se "elektrostatisk utladning"

EXO-EMP

(*Exo-Atmospheric EMP – EXO-EMP*):

Elektromagnetiske felt generert av en kjernefysisk innretning detonert utenfor atmosfæren, dvs > 30 km høyde over bakken. Synonymer: HAEMP og HEMP (se disse)

EUT

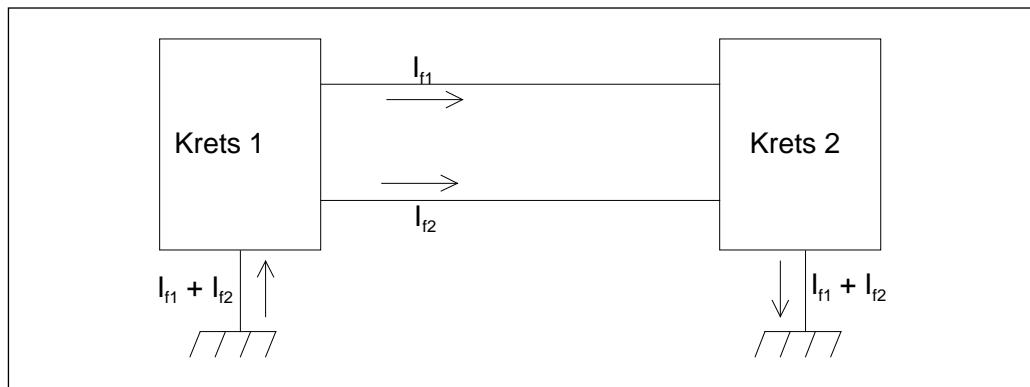
(*equipment under test*):

I EMC-standarder: Utstyr under test, testobjektet

fellesspenning

(*common mode voltage, asymmetrical voltage*):

Middelverdien av viser-spenningene som opptrer mellom hver leder og en spesifisert referanse, vanligvis jord eller chassis [V1.1]. Se fig.V1.1 for illustrasjon av fellesmodus støyrstrømmer.



Figur V1.1 Skisse av retningen for fellesmodus støyrstrømmer. Satt opp av f.eks. langsspenninger, se dette.)

feltstyrke

(*field strength*):

Et generelt uttrykk som vanligvis betyr størrelsen på den elektriske feltvektoren E med enhet [V/m] eller den magnetiske feltvektoren H med enheten [A/m]

fjernfelt

(*far field*):

Fjernfeltet defineres som avstanden fra den elektromagnetiske kilden, hvor $\lambda/2\pi > 1$ (der λ er feltets bølgelengde). I fjernfeltet står de elektriske og magnetiske feltvektorene vinkelrett på hverandre og på bevegelsesretningen, og er av samme størrelsesorden (dvs. $\approx 377 \Omega$ i vakuum)

følsomhet:

Se "mottakelighet"

galvanisk kopling:

Overføring av elektromagnetisk støy pga felles impedans

gjennomføring

(*penetration*):

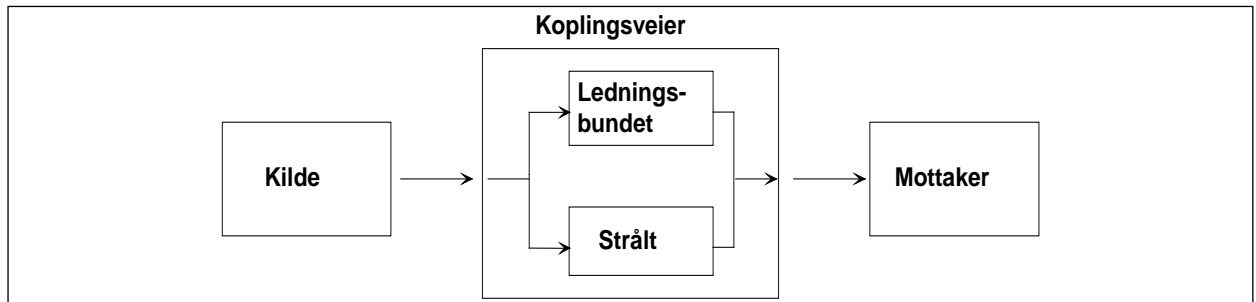
Fysisk føring gjennom en skjerm for kabel, ledning, kanal, rør som tillater overføring av elektromagnetisk energi fra et elektromagnetisk miljø til et annet (f.eks mellom ulike soner)

gjennomføringsplate:	Fysisk metallplate (ofte en forsterkning av en rom- eller bygningsskjerm) ved en sonegrense. Alle innføringer (skjermede kabler, potensialutjevningsledere, rør av metall osv) gjennom denne sonegrensen termineres til gjennomføringsplaten. Hensikten med platen er å avlede alle støystrømmer til jord ved sonegrensen, og avgrense området hvor disse strømmene flyter.
HAEMP (<i>High Altitude EMP</i>):	Se "HEMP"
harmonisk komponent (<i>harmonic component</i>):	En komponent med høyere orden enn 1 av Fourier-rekka av en periodisk størrelse [V1.1]
harmoniske spenninger (<i>harmonic voltages</i>):	Sinusformede spenninger med frekvens et helt antall ganger grunnfrekvensen til spenningen
HEMP (<i>High Altitude EMP</i>):	Den elektromagnetiske pulsen som lages ved en exo-atmosfærisk kjernefysisk eksplosjon, dvs en kjernefysisk detonasjon over atmosfæren.
HEMP type 1:	Se "E ₁ "
HEMP type 2:	Se "E ₂ "
HEMP type 3:	Se "E ₃ "
HOB (<i>height of burst</i>):	Eksplosjonshøyde over bakken for kjernefysisk eksplosjon i atmosfæren
hovedjord:	Alle ledninger, materiell og jordelektroder som har til oppgave å redusere anleggets jordingsmotstand og de interne potensialdifferanser som kan opptre i anlegget
HPM (<i>High Power Microwave</i>):	Høyeffekt puls fra en mikrobølgegenerator
IEMP (<i>Internal EMP</i>):	Intern EMP, se "SGEMP"
immunitet (<i>immunity</i>):	Utstyrs eller systems evne til å virke uten redusert funksjonsevne i nærvær av elektromagnetisk støy [V1.1]
immunitetsgrense (<i>immunity limit</i>):	I EMC-standarder: Det minimalt påkrevde immunitetsnivået [V1.3]
immunitetsnivå (<i>immunity level</i>):	I EMC-standarder: Maksimalt nivå av en gitt elektromagnetisk støy som kommer inn på et spesielt utstyr eller system uten at redusert funksjonsevne opptrer [V1.3]
induktiv kopling:	Kopling mellom kretser som oppstår gjennom magnetisk felt

jord (<i>earth</i>):	Det ledende jordsmonn hvis elektriske potensial pr definisjon overalt blir betraktet lik null [V1.2, V1.12]
å jorde (<i>earthing</i>):	Det å sammenkople utsatte deler av apparater, systemer og installasjoner til jordelektroden eller andre deler av jordsystemet [V1.11]
jordelektrode (<i>earth electrode</i>):	En eller flere ledende deler i direkte kontakt med jordgrunnen og som gir elektrisk forbindelse til denne [V1.10]
jordnett (<i>earth network</i>):	Ledere i jordsystemet som ikke er i kontakt med jordgrunnen, men som sammenkople apparater, systemer eller installasjoner til jordelektroden eller andre deler av jordsystemet [V1.11]
kapasitiv kopling (<i>capacitive coupling</i>):	Kopling av elektrisk felt over strøkapasiteter (parasittkapasiteter) mellom atskilte kretser
karakteristisk impedans (<i>characteristic impedance, intrinsic impedance</i>):	Impedansbegrep for mediet som en plan elektromagnetisk bølge forplanter seg i. Uttrykkes som forholdet mellom E- og H-feltet, og er generelt en kompleks størrelse: $Z = E/H = k/(\omega\epsilon - j\sigma) = \omega\mu/k$, der k er bølgetallet. ($k^2 = \omega^2\epsilon\mu(1 - j(\sigma/\omega\epsilon))$). I ikke-ledende materialer blir uttrykket en reell størrelse, og for vakuum forenkler formelen seg til $Z_0 = E/H = (\mu_0/\epsilon_0)^{1/2} = 120 \pi \approx 377 \Omega$, som er lik bølgeimpedansen Z_b for en plan elektromagnetisk bølge i vakuum.
kompatibilitetsnivå (<i>compatibility level</i>):	I EMC-standarder: Det spesifiserte støynivået hvor en akseptabel, høy sannsynlighet for elektromagnetisk sameksistens (kompatibilitet) eksisterer [V1.3]
kontinuerlig bølge (<i>continuous wave - CW</i>):	Elektromagnetisk signal eller bølge som er sammenhengende/kontinuerlig i tidsplanet
kopling (<i>coupling</i>):	Gjensidig påvirkning mellom elektromagnetiske felt og elektriske systemer, hvor feltets energi delvis blir overført til systemet. Kopling kan skje direkte gjennom ledning, resistivt gjennom en motstand, induktivt via en transformator, en spole eller ved gjensidig induksjon, ev kapasitivt via kondensatorer eller strøkapasiteter mellom ledere

koplingsveier:

Ulike typer elektromagnetisk kopling, se fig V1.2.



Figur V1.2 Skjematisk skisse for elektromagnetisk kopling, enten gjennom strålt eller ledningsbundet støy, eventuelt som en kombinasjon av begge.

langsspenning

(longitudinal voltage):

Spenning mellom to geografisk adskilte ender av en leder. Oppfattes av tilknyttet apparat som en fellesspenning; se dette.

ledningsbundet elektromagnetisk støy

(conducted electromagnetic disturbance):

Elektromagnetisk energitransport bundet til en leder som kan forringe oppførselen til en enhet, utstyr eller system

lekkasjested

(point-of-entry – POE):

Det fysiske stedet i en elektromagnetisk skjerm (se dette) hvor elektromagnetisk energi kan komme inn eller ut fra et definert elektromagnetisk miljø ("sone"), hvis det ikke er iverksatt tiltak for å hindre dette. Slike steder kan være i form av hull (*aperture POEs*) eller via ledere, dvs. ledningsforårsaket lekkasjested (*conductive POEs*), se disse. Slike steder kan også være klassifisert avhengig av teknisk disiplin (arkitekt/ maskin/entreprenør/elektro) som forårsaker et slikt lekkasjested. [V1.13]

LEMP

(Lightning EMP – LEMP):

I denne håndboken: Elektromagnetiske felter generert av strømmen i en lynkanal

magnetohydrodynamisk EMP

(magnetohydrodynamic EMP – MHD-EMP):

 Se "E₃"

MEMP

(Man-made EMP – MEMP):

EMP fra en (mobil) pulsgenerator (ikke-kjernefysisk detonasjon)

MHD-EMP

(magnetohydrodynamic EMP – MHD-EMP):

 Se "E₃"

 mottakelighet³

(susceptibility):

Utstyrs eller systems manglende evne til å virke uten redusert funksjonsevne i nærvær av elektromagnetisk støy [V1.1]

3

Legg merke til at mottakelighet (susceptibilitet) er definert som mangel på immunitet.

<p>MOA (<i>Metal Oxide Varistor – MOV</i>):</p>	<p>Metalloksyd avleder; Ulineær motstand som brukes i beskyttelseskretser for bl a EMP</p>
<p>MOV (<i>Metal Oxide Varistor – MOV</i>):</p>	<p>Se ”MOA”</p>
<p>MTBF (<i>Mean Time Between Failures – MTBF</i>):</p>	<p>Midlere funksjonstid mellom to påfølgende feil i et utstyr</p>
<p>NEMP (<i>Nuclear EMP – NEMP</i>):</p>	<p>Alle typer EMP produsert av en kjernefysisk eksplosjon [V1.4]</p>
<p>nullpunkt (<i>ground zero, surface zero</i>):</p>	<p>Ekspløsjonssentrum ved jordoverflaten for en HEMP, dvs punktet på jordoverflaten med minst avstand til den nukleære eksplosjonen i atmosfæren</p>
<p>overflateimpedans (til en leder) (<i>surface impedance</i>):</p>	<p>Forholdet mellom de tangensielle komponentene av E- og H-feltet på lederoverflaten: For en god leder kan forholdet uttrykkes som: $E_t/H_t = (1/(\sigma\delta))(1+j)$</p>
<p>overflate overføringsimpedans [av en koaksialkabel] (<i>surface transfer impedance</i>):</p>	<p>Forholdstallet mellom induisert spenning pr lengdeenhet i koaksialkabelens senterleder og strømmen på ytterdelen av koaksialkabelens overflate [V1.1]. Se også "overføringsimpedans"</p>
<p>overføringsimpedans [av en skjermet krets] (<i>transfer impedance</i>):</p>	<p>Forholdet mellom spenningen som opptrer mellom to spesifiserte punkt i den skjermede kretsen og strømmen i et definert snitt av skjermen [V1.1]. Se også "overflate overføringsimpedans"</p>
<p>overspenning:</p>	<p>Unormal spenning mellom to punkter i et system eller apparat som er større enn den høyeste verdi som forekommer mellom de samme to punkter under normale driftsbetingelser. Slik spenning kan skade eller ødelegge komponenter</p>
<p>potensialutjevning(sleder) (<i>bonding</i>):</p>	<p>Se ”utjevningsforbindelse”</p>
<p>radiofrekvente forstyrrelser (<i>radio frequency interference</i>):</p>	<p>Forstyrrelse av mottakingen av et ønsket signal forårsaket av radiofrekvent støy. [V1.1]</p>
<p>radiofrekvent støy (<i>radio frequency disturbance</i>):</p>	<p>Elektromagnetisk støy med frekvenskomponenter i det radiofrekvente (RF) området. [V1.1]</p>
<p>reduksjonsfaktor:</p>	<p>Mål for skjermvirkning for kabler som angis av forholdet $\frac{U_{\text{leder-jord for skjermet kabel}}}{U_{\text{leder-jord for uskjermet kabel}}}$</p>
<p>RFI (<i>radio frequency interference</i>):</p>	<p>Se "radiofrekvente forstyrrelser"</p>

RFW (<i>radio frequency weapon</i>):	Radiofrekvente våpen som lager EMP ved konvensjonell teknologi, dvs uten bruk av kjernefysisk ladning. (Samlebetegnelse for MEMP- og HPM-våpen, se dette.)
SGEMP (<i>System Generated EMP – SGEMP</i>):	Systemgenerert EMP som kan oppstå på innsiden av et system når systemet blir utsatt for ioniserende stråler (røntgenstråling, γ -partikler) [V1.5]
sikkerhetsjord:	Skal beskytte personer som arbeider direkte på de elektriske anleggene. Utføres som en fast ledende forbindelse mellom alle faseledere og jord på arbeidsstedet
skjerm (<i>screen, shield</i>):	Innretning benyttet for å redusere inntrengningen av et felt i et bestemt område [V1.1]. Se også "elektromagnetisk skjerm"
sonelinndeling:	Metode for å gjennomføre en enhetlig strategi og systematisering av sentrale EMC beskyttelsestiltak: Støy-messig likeverdige deler av utstyr, system eller anlegg (dvs områder som har de samme elektromagnetiske miljøene) plasseres i felles soner. Når en sonегrense passeres med en leder e l, skal visse kriterier for jording, skjerming og avledning (filtrering) oppfylles for å ivareta EMC-egenskapene i anlegget.
spenningsholdfasthet:	Største spenning som et apparat eller en anleggsdel tåler uten at komponenter ødelegges eller skadelig overslag inntreffer
SREMP (<i>Source region EMP – SREMP</i>):	EMP fra en kjernefysisk sprengning på bakkenivå [V1.4]
stigetid (<i>rise time</i>):	Vanligvis definert som tidsintervallet mellom de tidspunkt hvor momentan amplitude av en puls når spesifisert lav og høy grenseverdi, dvs. hhv. 10 og 90 % av maksimal amplitude [V1.13]
strøminjeksjon (<i>current injection</i>):	En prosess hvor en generert elektrisk strøm påtrykkes i en forutbestemt elektrisk krets. For EMP-tester vil dette innebære strømtransienter/ -pulser som påtrykkes en komponent, krets eller system for å bestemme terskel for forstyrrelse eller ødeleggelse
stråling [elektromagnetisk] (<i>radiation [electromagnetic]</i>):	¹⁾ Fenomenet når energi i form av elektromagnetiske bølger strømmes fra en kilde og ut i rommet. ²⁾ Energi transportert gjennom rommet i form av elektromagnetiske bølger [V1.1]
strålt elektromagnetisk støy (<i>radiated electromagnetic disturbance</i>):	Energi transportert gjennom rommet i form av elektromagnetiske bølger som kan forringe oppførselen til en enhet, utstyr eller system

susceptibilitet
 (*susceptibility*):

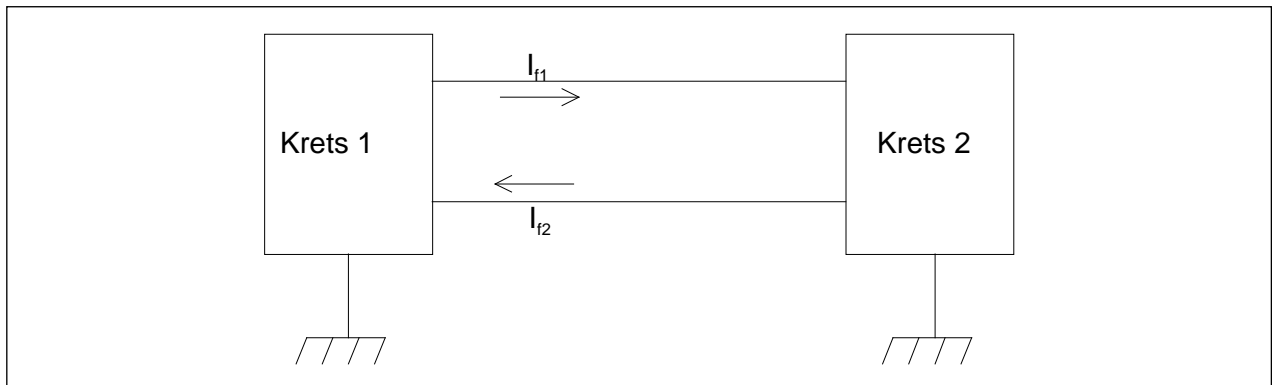
Se "mottakelighet"

symmetrisk krets:

Se "balansert krets"

symmetrisk spenning
 (*symmetrical voltage*):

Se "tverrspenning"



Figur V1.3 Skisse av retningen på tverrmodus støystrømmer. (Satt opp av tverrspenninger, se dette.)

transferimpedans
 (*transfer impedance*):

Se "overføringsimpedans"

tverrspenning
 (*differential mode voltage, symmetrical voltage*):

Spenningen mellom to vilkårlige ledere av en samling aktive ledere [V1.3]

ubalansert krets:

Krets som ikke er symmetrisk. Anleggsdeler (f.eks. kabler) eller apparater hvor en av lederne eller en av inn- og utgangene er direkte forbundet med jord, er av denne type

usymmetrisk krets:

Se "ubalansert krets"

utjevningsforbindelse
 (*equipotential bonding*):

Elektrisk forbindelse mellom ulike utsatte deler og andre ledende deler slik at disse holdes på tilnærmet samme potensial [V1.2]

V1.2 ELEKTROMAGNETISKE FELT: NÆR- OG FJERNFELT

V1.2.1 Kort om størrelser og enheter

Elektromagnetiske felt er satt sammen av en elektrisk (E) og en magnetisk (H) feltkomponent. Enheten for den elektriske feltstyrken E er V/m (volt/meter). Den magnetiske feltstyrken H har enheten A/m (ampere/meter), og kan også uttrykkes som magnetisk flukstetthet B med enheten T (tesla). Sammenhengen mellom B- og H-felt er

$$B = \mu_0 \mu_r H = \mu H$$

der - μ_0 er magnetisk permeabilitet i vakuum ($4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m (Henry/meter))
 - μ_r er relativ permeabilitet
 - μ er $\mu_0 \mu_r$

Forholdet mellom E- og H-feltet har enheten Ω (ohm), og kalles bølgeimpedansen Z_b for elektromagnetiske bølger med feltkomponenter vinkelrett på forplantningsretningen. ($Z_b = E/H$.)

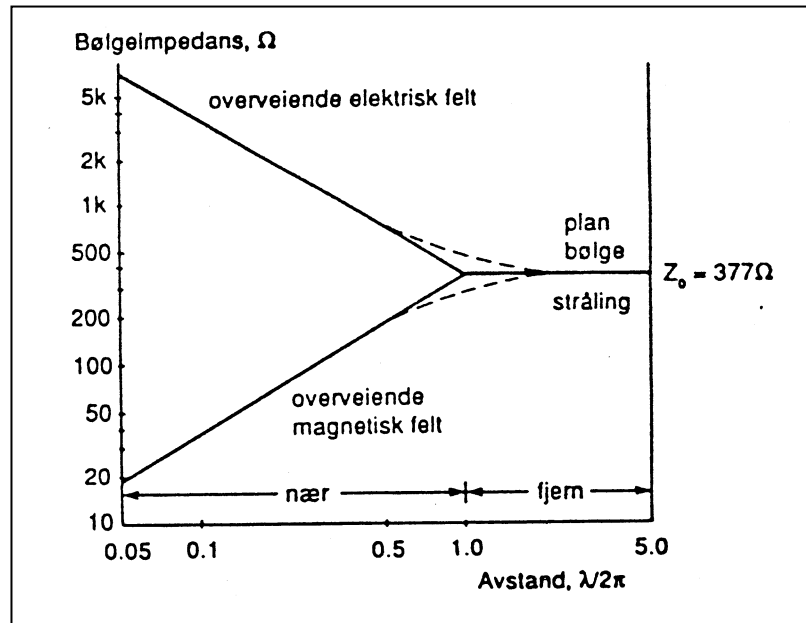
V1.2.2 Elektromagnetiske bølger i luft (vakuum)

Egenskapene til et elektromagnetisk felt bestemmes bl a av sammenhengen mellom avstanden til kilden og bølgelengden for feltet, foruten materialegenskapene til mediet hvor bølgeforplantningen foregår: Nær inntil kilden bestemmes feltet hovedsakelig av kildens egenskaper, mens det langt fra kilden hovedsakelig er forplantningsmediets egenskaper som påvirker feltegenskapene. Det er derfor vanlig å dele området omkring en feltkilde i et nærfelt og et fjernfelt [V1.6].

Fjernfeltet er definert for avstander større enn $\lambda/2\pi$ fra kilden ($\lambda = c/f = \text{lyshastighet/frekvens}$). I fjernfeltet står den elektriske og magnetiske feltkomponenten vinkelrett på hverandre og vinkelrett på bevegelsesretningen. Det elektromagnetiske feltet blir ofte omtalt som en plan elektromagnetisk bølge i fjernfeltet. I nærfeltet er ikke vinkelen mellom feltkomponentene konstant.

I nærfeltet vil ofte enten den elektriske eller den magnetiske feltkomponenten dominere, avhengig av feltkildens egenskaper. En måte å karakterisere et elektromagnetisk felt på er vha bølgeimpedansen Z_b (se ovenfor): Dersom det elektriske feltet dominerer i nærfeltet vil impedansen bli stor (høyohmig kilde). Tilsvarende vil et dominerende magnetiske felt i nærfeltet gi en liten impedans (lavohmig kilde). Den plane elektromagnetiske bølgen i fjernfeltet vil ha en konstant bølgeimpedans i vakuum på $Z_b = Z_0 = \approx 377 \Omega$.

Fig. V1.4 illustrerer sammenhengen mellom bølgeimpedansen og avstanden fra kilden for det elektromagnetiske feltet i vakuum.



Figur V1.4 Illustrasjon av bølgeimpedansen Z_b [Ω] for en elektromagnetisk bølge i luft (vakuum) som funksjon av avstanden referert til $\lambda/2\pi$.

Avstanden $\lambda/2\pi$ for luft (vakuum) som funksjon av noen valgte frekvenser (med tilhørende bølgelengde) er vist i tabell V1.1.

Tabell V1.1. Bølgelengde og avstand $\lambda/2\pi$ for noen frekvenser i luft (vakuum).

Frekvens	50 Hz	10 kHz	100 kHz	1 MHz	100 MHz	1 GHz
Bølgelengde λ	6000 km	30 km	3000 m	300 m	3 m	0,3 m
$\lambda/2\pi$	955 km	4,8 km	477 m	48 m	0,48 m	0,048 m

Tilsvarende som en innfører en impedans for å beskrive egenskaper ved elektromagnetiske bølger, kan en innføre et impedansbegrep for materialer som bølgene forplanter seg i. Neste delkapittel vil se nærmere på dette. For flere detaljer anbefales referansene [V1.6, V1.7, V1.8 og V1.9].

V1.2.3 Elektromagnetiske bølger i metaller

Bølgeimpedansen for en plan elektromagnetiske bølge er en materialkonstant som avhenger av de elektriske og magnetiske egenskapene til forplantningsmediet. Denne impedansen kalles ofte karakteristisk impedans (Z) for materialet. For vakuum og ikke-ledende materialer er Z reell og uavhengig av frekvensen, mens den for metaller er frekvensavhengig og kompleks.

Det generelle uttrykket for karakteristisk impedans Z er

$$Z = E/H = k/(\omega\varepsilon - j\sigma) = \omega\mu/k \quad [\Omega]$$

- der
- k er bølgetallet ($k^2 = \omega^2\varepsilon\mu(1 - j(\sigma/\omega\varepsilon)) = \omega^2\varepsilon_0\mu_0\varepsilon_r\mu_r(1 - j(\sigma/\omega\varepsilon))$)
 - ω er vinkelfrekvensen ($2\pi f$)
 - ε er dielektrisitetetskonstanten for materialet ($= \varepsilon_0 \varepsilon_r$, dvs produktet av dielektrisitetetskonstanten for vakuum (ε_0) og relativ dielektrisitetetskonstant (ε_r)) [F/m]
 - σ er ledningsevnen til materialet [S/m].

For luft (vakuum) forenkler formelen seg til $Z = Z_0 = E/H = (\mu_0/\epsilon_0)^{1/2} = 120 \pi \approx 377 \Omega$. For gode ledere (metaller) kan uttrykket for den karakteristiske impedansen forenkles til:

$$Z = E/H \approx ((j\omega\mu)/\sigma)^{1/2} = (1/(\sigma\delta))(1+j) = (\rho/\delta)(1+j) \quad [\Omega]$$

der - δ er inntrengningsdybden (elektromagnetisk) [m]
 - ρ er resistiviteten til materialet [Ωm]

Inntrengningsdybden kan uttrykkes som

$$\delta = (2/(\sigma\mu_0\mu_r\omega))^{1/2} = (2\rho/(\mu\omega))^{1/2} \quad [\text{m}]$$

Tabell V1.2 viser noen eksempler på tallverdier av inntrengningsdybden og karakteristisk impedans for kopper og aluminium.

Tabell V1.2: Inntrengningsdybde δ og karakteristisk impedans Z for kopper (Cu) og aluminium (Al).

Frekvens [Hz]	Cu ($\rho = 0,0178 \cdot 10^{-6} \Omega\text{m}$)		Al ($\rho = 0,03 \cdot 10^{-6} \Omega\text{m}$)	
	δ [mm]	Z [Ω]	δ [mm]	Z [Ω]
16	16,8	$1,5 \cdot 10^{-6}$	21,8	$1,9 \cdot 10^{-6}$
50	9,5	$2,7 \cdot 10^{-6}$	12,3	$3,4 \cdot 10^{-6}$
$1 \cdot 10^3$	2,1	$1,2 \cdot 10^{-5}$	2,8	$1,5 \cdot 10^{-5}$
$1 \cdot 10^4$	0,67	$3,7 \cdot 10^{-5}$	0,87	$4,9 \cdot 10^{-5}$
$1 \cdot 10^5$	0,21	$1,2 \cdot 10^{-4}$	0,28	$1,5 \cdot 10^{-4}$
$1 \cdot 10^6$	0,067	$3,7 \cdot 10^{-4}$	0,087	$4,9 \cdot 10^{-4}$
$1 \cdot 10^7$	0,021	$1,2 \cdot 10^{-3}$	0,028	$1,5 \cdot 10^{-3}$
$1 \cdot 10^8$	0,067	$3,7 \cdot 10^{-3}$	0,0087	$4,9 \cdot 10^{-3}$

Ved overgangen mellom to medier, eksempelvis luft og en metallskjerm, er bølgeimpedansene grunnlag for beregning av refleksjon i grenseflaten. Den innkommende plane bølgen vil trenge inn i metallskjermen, men sterkt redusert. I forhold til luft ($Z = Z_0 \approx 377 \Omega$), er E/H for denne bølgen vesentlig lavere. I metallet er E-feltet årsak til en strøm

$$\mathbf{J} = \sigma\mathbf{E} = \mathbf{E}/\rho$$

der \mathbf{J} er strømtetthet [A/m^2]
 (**uthevet** skrift betyr at størrelsen er en vektor)

Den elektromagnetiske bølgen i metallet dempes pga den induerte strømmen (absorpsjonsdemping). For en tykk, plan skjerm avtar både E, J og H eksponentielt, dvs som

$$H(x) = H_0 e^{-x/\delta}$$

der x er avstanden fra grenseflaten
 H_0 er magnetfeltet i grenseflaten

Når en metallisk leder påtrykkes en strøm med høy frekvens, vil magnetfelt og strømtetthet innover i materialet variere på samme måte som beskrevet ovenfor. I et idealisert, plant tilfelle kan en definere (forutsetter godt ledende materiale)

$$Z_i = \rho/\delta(1+j) \quad [\Omega/\square]$$

der Z_i er lederens indre impedans
 \square er et (likegyldig) kvadrat av overflaten

Den indre impedansen Z_i er referert et kvadrat (likegyldig hvor stort) av overflaten. Denne størrelsen kalles også overflateimpedansen for en leder. For en god elektrisk leder tilsvarer den ledermaterialets karakteristiske impedans.

V1.3 DESIBEL SOM MÅLEENHET

I støysammenheng er det vanlig å oppgi forholdet mellom to tall i desibel (dB). Desibel er i utgangspunktet brukt for å tallgi forholdet mellom to effekter:

$$\text{antall dB} = 10 \log P_2/P_1$$

der P_2 også kan være større enn P_1 .

$$\text{Forsterkning } P_2 > P_1 \quad (\text{positiv})$$

$$\text{Demping } P_2 < P_1 \quad (\text{negativ})$$

Hvis en i stedet for å kjenne P_1 og P_2 måler U og I , må en huske på at effekten er proporsjonal med disse størrelsene i kvadrat, dvs at

$$\text{antall dB} = 10 \log P_2/P_1 = 20 \log U_2/U_1$$

eller

$$\text{antall dB} = 10 \log P_2/P_1 = 20 \log I_2/I_1$$

og tilsvarende for det elektriske feltet E og magnetfeltet H . Ligningene forutsetter at impedansen er identisk for de to størrelsene.

I utgangspunktet innebærer demping at angivelsen i dB er negativ, men hvis det ikke kan misforstås, sløyfes ofte fortegnet. Tabell V1.3 viser hva noen typiske verdier for demping i dB betyr.

Tabell V1.3. Eksempel på hvilke forholdstall som tilsvarer noen valgte verdier i desibel.

dB	0	10	20	40	60	100	200
U_2/U_1	1	0,3	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-5}	10^{-10}

Desibel brukes også til å målsette absolutte, fysikalske verdier. Det kan da for eksempel brukes

1 W eller 1 mW

1 V eller $1 \mu\text{V}$

1 A eller $1 \mu\text{A}$

som referanse.

Desibel referert i 1 W betyr da

$$\text{dB}_W = 10 \log P(W)/1(W) = 10 \log P(W) - 10 \log 1(W) = 10 \log P(W)$$

Tilsvarende desibel referert i 1 mW

$$\text{dB}_{mW} = 10 \log P(W)/1(mW) = 10 \log P(mW) = 10 \log (P \cdot 10^3)W = 30 + 10 \cdot \log P(W)$$

og desibel referert $1 \mu\text{V}$

$$\text{dB}_{\mu V} = 20 \log U(\mu V)/1(\mu V) = 20 \log U(\mu V) = 20 \log (U \cdot 10^6)V = 120 + 20 \cdot \log U(V)$$

For eksempel vil 5 V med $1 \mu\text{V}$ som referanse gi

$$\text{dB}_{\mu V} = 120 + 20 \cdot \log 5 = 134$$

og med 1 V som referanse

$$\text{dB}_V = 20 \cdot \log 5 = 14$$

10 dB kan alternativt kalles 1B, dvs at Bel = B = $\log P_2/P_1$.

En av fordelene med å benytte dB-systematikken f eks ved beregning av demping, er at påfølgende demping kan adderes for å finne den resulterende. Hvis for eksempel refleksjonen er 20 dB og absorpsjonen for den samme skjermen er 30 dB, blir den resulterende dempingen 50 dB.

V1.4 REFERANSER

- V1.1 IEC 60050(161): International Electrotechnical Vocabulary.
Chapter 161: Electromagnetic compatibility. First edition, 1990.
- V1.2 Norges Vassdrags- og Energiverk: Forskrifter for elektriske bygnings-installasjoner m.m. (FEB -91).
§ 201 Definisjoner av termer
Oslo, 1990.
- V1.3 IEC 61000-1-1. Electromagnetic compatibility (EMC).
Part 1: General.
Section 1: Application and interpretation of fundamental definitions and terms.
1992.
- V1.4 IEC 61000-2-9. Electromagnetic compatibility (EMC).
Part 2: Environment.
Section 9: Description of HEMP environment – Radiated disturbance. –Basic EMC publication.
1996.
- V1.5 Lee, K.S.H.et al: EMP interaction: Principles, techniques and reference data (A complete concatenation of technology from the EMP interaction notes) EMP interaction 2-1.
Dikewoods Industries, Inc. New Mexico, USA.
1981.
- V1.6 Ott H. W.: Noise reduction techniques in electronic systems. 2nd ed.
New York: John Wiley & Sons, 1988.
ISBN 0-471-85068-3
- V1.7 Chatterton P. A., Houlden M.A.: EMC - Electromagnetic theory to practical design.
New York: John Wiley & Sons, 1991.
ISBN 0-471-92878-X

- V1.8 Paul C. R.: Introduction to electromagnetic compatibility.
New York: John Wiley & Sons, 1992.
ISBN 0-471-54927-4
- V1.9 Lorrain P. et al: Electromagnetic fields and waves. Third edition.
New York: W. H. Freeman and Company, 1988.
ISBN 0-716-71823-5
- V1.10 IEC 60050(826): International Electrotechnical Vocabulary.
Chapter 826: Electrical installations of buildings. 1982.
Amendment 1: 1990
Amendment 2: 1995
- V1.11 IEC 61000-5-2. Electromagnetic compatibility (EMC).
Part 5: Installation and mitigation guidelines.
Section 2: Earthing and cabling
1997.
- V1.12 Produkt og Elektrisitetstilsynet: Forskrifter for elektriske anlegg – Forsyningsanlegg 1995.
(PE-1995-FEA-F) Oslo, 1994.
- V1.13 IEC 61000-2-10. Electromagnetic compatibility (EMC).
Part 2: Environment.
Section 10: Description of HEMP environment – Conducted environment.
1998.

V2 VEDLEGG 2: FORSKRIFTER, RETNINGSLINJER OG NORMER

Dette vedlegget gir en oversikt over norske forskrifter og internasjonale normer som har relevans for EMP-problematikken i kraftforsyningsanlegg. Målsetningen er å gi leseren en orientering om hvilke publikasjoner som gjelder pr dato, og hvor utfyllende informasjon kan finnes.

V2.1 INNLEDNING

Forskrifter, retningslinjer og normer forandrer seg over tid. Dette kapitlet kan derfor bare gi et øyeblikksbilde av dagens situasjon. Dette gjelder spesielt normdelen, som er i mer eller mindre kontinuerlig utvikling.

De interesserte henvises derfor til å kontakte kildene som dette vedlegget viser til for en oppdatert oversikt.

V2.2 NORSKE FORSKRIFTER OG RETNINGSLINJER

Forskrifter for elektriske anlegg - forsyningsanlegg

Produkt og elektrisitetstilsynet (PE) sin "Forskrifter for elektriske anlegg – forsyningsanlegg - 1995" (FEA-F) [V2.1] gjelder for "... elektriske forsyningsanlegg omfattende produksjon, overføring og fordeling av elektrisk energi, samt visse elektriske installasjoner i kraft og – transformatorstasjoner og høyspenningsinstallasjoner i industribedrifter og lignende."

Forskriften skal sikre forsvarlig elsikkerhet ved utførelse av nye anlegg og ved utvidelser, forandringer, drift og reparasjon/vedlikehold av bestående anlegg. Den sier ingen ting spesifikt om tiltak i forhold til EMP eller andre transiente forstyrrelser. Derimot definerer den funksjonsbaserte krav i forhold til f eks jordingsanlegget, og legger dermed føringer for utførelsen av jordingsanlegget. Indirekte kan det derfor påvirke utførelsen av EMP-tiltakene.

Retningslinjer for sikring av kraftforsyningsanlegg

Pr i dag gjelder NVEs "Retningslinjer for sikring av kraftforsyningsanlegg (RSK)" for norske kraftforsyningsanlegg [V2.2]. RSKen deler kraftforsyningsanleggene inn i klasser avhengig av anleggets betydning for totalforsvaret. De som klassifiseres som klasse 1 og 2 skal EMP-sikres.

EMP-sikringen omfatter i følge RSKen at "Data-, sambands- og andre rom med elektronisk utstyr som har betydning for driften av anlegget skal beskyttes mot EMP/EMI". Retningslinjene krever at denne beskyttelsen gir minimum 30 dB demping for frekvenser opp til 1 GHz. Denne beskyttelsen skal oppnås vha skjermede rom/bygninger, og kommer i tillegg til ev egenimmunitet i utstyr.

Utstyrsimmuniteten skal være i henhold til CENELEC sin generiske immunitetsstandard 50082, men det spesifiseres ikke om det er husholdningsmiljø (50082-1) eller industrimiljø (50082-2) som kreves. En relativt detaljert beskrivelse av hvilke beskyttelsestiltak som skal gjennomføres

blir gjort i RSKen. (Skjermtypen, inntaksplater, gjennomføringer, ventilåpninger osv.) Videre beskrives kort krav til dokumentasjon og merking.

Forskrift om EMP-beskyttelse av telekommunikasjonsanlegg (EMP-forskriften)

En forskrift med tittelen "Forskrift om EMP-beskyttelse av telekommunikasjonsanlegg (EMP-forskriften)" [V2.3] er til behandling i Samferdselsdepartementet. Høringsrunden ble avsluttet 1999-10-29. NVE har avgitt uttalelse. I høringsutkastet er det gitt åpning for at det i særlige tilfeller kan gjøres unntak fra bestemmelsene i forskriften. Sluttbehandling av EMP-forskriften vil bli behandlet sammen med TIFKOM-prosjektet (telesikkerhet og -beredskap i et fritt konkurransemarked) og sannsynlig opprettelse av en ny tilsynsmyndighet i forbindelse med beredskap og sikkerhet for offentlige tilbydere av teletjenester ol. Høringsrunden for TIFKOM-prosjektet ble avsluttet 2000-06-16. Retningslinjene for EMP-sikring vil inntil videre være som før.

Under forutsetning av at ordlyden i EMP-forskriften godkjennes i følge høringsutkastet, gjelder følgende kommentarer:

Forskriften omfatter infrastruktur for etater og virksomheter som leverer tjenester innen telekommunikasjon eller data (IT) som har betydning for samfunnet ved krise, beredskap eller krig. (Publikasjonen aksepterer kortvarige avbrudd uten varige skader.)

Eieren plikter å gjøre en risiko- og sårbarhetsanalyse for å avdekke behov og omfang for beskyttelse mot EMP. (Internkontrollprinsippet.) Disse skal inngå som en del av dokumentasjonen av anlegget, sammen med bl a tegninger, oversikt over type skjermingsmaterial som er benyttet, vernekomponenters type og plassering, ev testdokumentasjon osv. EMP kontrollen av anlegget skal tas inn som en del av kvalitetssikringsrutinene til eierne.

Det generelle tekniske kravet til beskyttelse er 30 dB demping i frekvensområdet 100 kHz til 18 GHz. Telekommunikasjonsutstyr skal i tillegg ha en egenimmunitet i følge EN 55105 (tilsvarende den generiske immunitetsnormen EN 50082-1, dvs husholdningsmiljø). Høyere egenimmunitet for systemer og installasjoner, gir en tilsvarende reduksjon i det generelle tekniske beskyttelseskravet.

Beskyttelseskravet over anses å være oppfylt dersom relevante standarder er fulgt. Relevante standarder er definert som (i prioritert rekkefølge):

- harmoniserte standarder i EU/EØS (CENELEC-standarder offentliggjort i De Europeiske Fellesskaps Tidende)
- standarder fastsatt av europeiske standardiseringsorganer som ETSI (European Telecommunication Standards Institute) og/eller CEN (Comité Européen de Normalisation)/CENELEC (Comité Européen de Normalisation Electrotechnique)
- internasjonale standarder fastsatt av ITU (Den internasjonale teleunion), ISO (Den internasjonale standardiseringsorganisasjon) eller IEC (Den internasjonale elektrotekniske installasjon)
- nasjonale standarder eller spesifikasjoner

I forbindelse med utarbeidelsen av forskriften ovenfor, gav arbeidsgruppen i TRSTI (Totalforsvarets råd for sikring av tele- og informasjonssystemer) også ut noen retningslinjer.

Dette dokumentet heter ”Retningslinjer for beskyttelse av elektroniske installasjoner i totalforsvaret mot elektromagnetisk puls (EMP)” [V2.4]. Publikasjonen gir en kortfattet beskrivelse av EMP-problematikken, og utfyller og argumenterer for EMP-forskriften.

Forskrift om elektrisk utstyr

”Forskrift om elektrisk utstyr” [V2.5] skal ”...sikre gjennomføringen av de direktiver som omfattes av EØS-avtalen og som gjelder elektrisk utstyr....” Ett av disse direktivene er EMC-direktivet [V2.6] med seinere endringer. Kapittel IV i forskriften (§25-§30) behandler EMC-bestemmelsene. (Forskriften benytter elektromagnetisk forenlighet som norsk oversettelse av ordet EMC.)

EMC-direktivet er ett av flere produktdirektiver i EU. Produktdirektivene omfatter de rettslige forholdene og gir rammene for HMS- (helse-, miljø- og sikkerhets-) relaterte forhold ved produktet vha funksjonskrav [V2.7]. De retter seg mot produsenter, importører og forhandlere av produkt som kan volde skade. Når et produkt kommer inn under ett eller flere produktdirektiv med funksjonskrav, kreves det CE-merking av produktet. Et CE-merket produkt har tilgang til hele EU/EØS-markedet, mens et produkt uten CE-merke er forbudt å markedsføre innenfor EU/EØS.

EMC-direktivet gir ingen detaljerte tekniske spesifikasjoner. I stedet gir det generelle funksjonskrav og juridiske retningslinjer.

§27 formulerer de sentrale (funksjons-) kravene i EMC-direktivet:

”Apparater..... skal være konstruert på en slik måte at de ikke frembringer elektromagnetisk forstyrrelse som overstiger et nivå der radio og telekommunikasjonsapparater og andre apparater kan funksjonere etter sin hensikt. Apparater skal være utført med en indre immunitet overfor elektromagnetiske forstyrrelser, som gjør at de kan funksjonere etter sin hensikt.
.....”

§28 sier at kravene i §27 er oppfylt dersom apparatene

- samsvarer med harmoniserte standarder (EN normer laget av CENELEC og offentliggjort i ”De Europeiske Fellesskaps Tidende”)
- (dersom det ikke finnes harmoniserte standarder:) samsvarer med relevante, nasjonale standarder som oppfyller kravene i §27, og er offentliggjort i ”De Europeiske Fellesskaps Tidende”
- ikke eller bare delvis samsvarer med standarder, men i stedet dokumenterer at kravene i §27 er oppfylt gjennom teknisk underlagsdokumentasjon

Forskriften omfatter ikke EMP problemstillinger. EMP-tester er derfor ikke en del av immunitetskravene i de harmoniserte EN-normene. Oppfyllelse av forskriften alene vil derfor ikke være tilstrekkelig i forhold til apparatimmunitet mot EMP. Kravene til støyfenomenene som inngår i immunitetsstandardene er likevel med på å øke apparatenes immunitet for EMP-relevante påkjenninger. Dette gjelder f eks fenomener som raske, repeterende transienter (fast transients), elektrostatisk utladning (ESD) og ulike strålte, elektromagnetiske felt.

V2.3 INTERNASJONALE NORMER

Den mest betydningsfulle internasjonale standardiseringsorganisasjonen innen elektroteknikk er IEC. Standarder fra IEC utgjør i dag hovedstammen i de fleste nasjonale standarder. CENELEC, som er den tilsvarende vest-europeiske harmoniseringsorganisasjonen, er ansvarlig for å utarbeide standarder for EU-/EØS-området. Når CENELEC skal lage nye standarder, benytter de om mulig eksisterende IEC-normer. På grunn av IECs sentrale rolle i internasjonalt standardiseringsarbeid, viser oversikten nedenfor bare normer fra IEC med relevans for EMP-problematikken.

V2.3.1 HEMP-relaterte normer

Underkomite IEC SC 77C (High Power Transient Phenomena) har laget en rekke standarder som omhandler EMP. En oversikt blir gitt nedenfor, slik at de interesserte kan finne flere detaljer i disse kildene. I Norge kan disse standardene bestilles fra NEK (Norsk Elektroteknisk komite).

Utgitte standarder:

IEC 61000-2-9 Ed 1:

Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 2: Environment – Section 9: Description of HEMP environment – Radiated disturbance - Basic EMC publication. 1996

IEC 61000-2-10 Ed 1:

Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 2: Environment – Section 10: Description of HEMP environment – Conducted disturbance - Basic EMC publication. 1998.

IEC 61000-4-24 Ed 1:

Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4: Testing and measurement techniques – Section 24: Test methods for protective devices for HEMP conducted disturbance - Basic EMC publication. 1997.

IEC 61000-5-3 Ed 1:

Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 5: Installation and mitigation guidelines – Section 3: HEMP protection concepts - Basic EMC publication. 1999.

IEC 61000-5-4 Ed 1:

Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 5: Installation and mitigation guidelines – Section 4: Immunity to HEMP – Specification for protective devices against HEMP radiated disturbance - Basic EMC publication. 1996.

IEC 61000-5-5 Ed 1:

Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 5: Installation and mitigation guidelines – Section 5: Specification for protective devices for HEMP conducted disturbance - Basic EMC publication. 1996.

Standarder under arbeid:

IEC 61000-1-3:

Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 1: General - Section 3: The effects of high altitude EMP (HEMP) on civil equipment and systems.

IEC 61000-2-11:

Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 2: Environment - Section 11: Classification of HEMP environments.

IEC 61000-4-23:

Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4: Testing and measurement techniques – Section 23: Test methods for protective devices for HEMP and other radiated disturbance

IEC 61000-4-25:

Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4: Testing and measurement techniques – Section 25: HEMP immunity test methods for equipment and systems.

IEC 61000-4-32:

Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4: Testing and measurement techniques –
Section 25: HEMP simulator compendium.

IEC 61000-5-6:

Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 5: Installation and mitigation guidelines –
Section 6: Mitigation of external EM influences.

IEC 61000-5-7:

Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 5: Installation and mitigation guidelines –
Section 7: Degrees of protection provided by enclosures against electromagnetic
disturbances (EM code).

IEC 61000-6-6:

Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 6: Generic standards – Section 7: HEMP
immunity for indoor equipment.

V2.3.2 EMC-relaterte normer

Generelt finnes en rekke interessante dokumenter i IECs 61000-serie Electromagnetic compatibility. (Tidligere IEC 1000-serien.) Denne samlingen av dokumenter inneholder både standarder og tekniske rapporter. De sistnevnte er mer å betrakte som lærebøker.

IEC 61000-serien har følgende hovedinndeling:

Del 1 (<i>Part 1</i>)	:	Generelt (<i>General</i>)
Del 2 (<i>Part 2</i>)	:	Miljø (<i>Environment</i>)
Del 3 (<i>Part 3</i>)	:	Grenseverdier (<i>Limits</i>)
Del 4 (<i>Part 4</i>)	:	Test- og måleteknikker (<i>Test and measurement techniques</i>)
Del 5 (<i>Part 5</i>)	:	Retningslinjer for installasjon og dempetiltak (<i>Installation and mitigation guidelines</i>)
Del 6 (<i>Part 6</i>)	:	Generiske standarder (Generic standards)
Del 9 (<i>Part 9</i>)	:	Diverse (<i>Miscellaneous</i>)

I tillegg til dokumentene nevnt under kap V.2.3.1, vil vi spesielt trekke fram to tekniske rapporter fra 61000-serien:

IEC 61000-5-1:

Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 5: Installation and mitigation guidelines –
Section 1: General considerations

IEC 61000-5-2:

Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 5: Installation and mitigation guidelines –
Section 2: Earthing and cabling

V2.3.3 Basisstandarder for elektriske relé

IEC 60255 er en standardserie for bl a ulike typer reléer som benyttes i kraftforsyningsanlegg. Disse basisstandardene beskriver EMC-testene som skal utføres (fenomenbeskrivelse, måleoppstilling og vurderingskriterier for testresultat). Fordi det ikke eksisterer harmoniserte EMC produktstandarder for reléer, benyttes hovedsakelig grenseverdiene i de generiske immunitetsstandardene. Dermed er det ikke noen spesielle skiller mellom immunitetsnivået til et

relé og vilkårlig utstyr testet etter generiske EMC-normer i industrimiljø. (Noen flere tester er definert for relé, bl a en 1 MHz burst test.)

V2.4 REFERANSER

- V2.1 Forskrifter for elektriske anlegg Forsyningsanlegg 1995.
Elektrisitetstilsynet, 1994.
- V2.2 Retningslinjer for sikring av kraftforsyningsanlegg (RSK).
NVE. 1997.
- V2.3 Forskrift om EMP-beskyttelse av telekommunikasjonsanlegg (EMP-forskriften).
Høringsutkast med følgebrev datert 1999-07-21.
- V2.4 Retningslinjer for beskyttelse av elektroniske installasjoner i totalforsvaret mot elektromagnetisk puls (EMP).
Samferdselsdepartementet, 24. mars 1999.
(Finnes på <http://odin.dep.no>)
- V2.5 Forskrift om elektrisk utstyr
Produkt- og Elektrisitetstilsynet, 1995.
- V2.6 Rådsdirektiv av 3. mai 1989 om tilnærming av medlemstatenes lovgivning om elektromagnetisk kompatibilitet (89/336/EØF).
- V2.7 Røyset, Solfrid Engene: Innføring i helse-, miljø- og sikkerhetslovgivning i EØS med hovedvekt på maskindirektivet. Forprosjektrapport.
Trondheim: SINTEF, Sikkerhet og pålitelighet, 1994.
(STF75 A94010, ISBN 82-595-7197-9)

V3 VEDLEGG 3: VURDERING BESKYTTELSESSTRATEGI

Dette vedlegget viser en metode for å vurdere beskyttelsesstrategien med vekt på konsekvenser og opprettholdelse av funksjonaliteten i kraftanlegget etter en EMP-påkjønning. Denne metoden er et alternativ til flytdiagrammet i fig 3.12 i kap 3.

V3.1 Metodikk

Fig V3.1 presenterer en metode for å vurdere konsekvensene av de ulike sikringstiltakene mot EMP. Det er valgt en trestruktur som ofte benyttes i beslutningsstøteteori. Egentlig skal man tallfeste sannsynligheten for de ulike hendelsene som kan inntreffe. Kjenner en i tillegg kostnadene forbundet med de ulike tiltakene, kan de økonomisk gunstigste sikringstiltakene beregnes.

I denne håndboken skal trestrukturen imidlertid bare benyttes som en metode for å systematisere og synliggjøre sammenhengen mellom valg og konsekvenser i en evaluering av beskyttelsesstrategi mot EMP.

V3.2 Forutsetninger

For å forenkle presentasjonen, gjør vi en rekke forutsetninger tilsvarende kap 3.5.4. Dermed reduseres antall variable og presentasjonen i trestrukturen blir mer oversiktlig. Tankegangen bak metodikken bør likevel komme fram for leseren, slik at den enkelte bruker kan detaljere og tilpasse metoden til sin virkelighet.

Følgende forutsetninger blir gjort:

- Kraftanlegget er i utgangspunktet sikret mot lyn og andre tradisjonelle EMI-kilder. Antar videre at kraftforsyningsanlegget ikke er tilstrekkelig beskyttet mot HEMP og RFW: Disse påkjønningene vil skade en del sentralt utstyr, og medføre avbrudd i kraftforsyningen. Reparasjon er nødvendig for å oppnå full funksjonalitet igjen i anlegget. Dette tilsvarer betegnelsen ikke (EMP-)sikret anlegg i fig V3.1.
- Global beskyttelse betegner en metallisk skjerm rundt hele (innendørs)anlegget. Videre forutsettes at denne skjermingen er vellykket utført, slik at anlegget er tilstrekkelig beskyttet. (Dette er ingen selvfølgelighet: Det er kostbart å føre inn og ut alle lederne uten å forringe kvaliteten på sonegrensen.)
- Differensiert beskyttelse er et anlegg med soneinndeling som beskrevet foran i kap 3.4. (Se også kap 5.3 for flere detaljer.) Også denne beskyttelsesstrategien er vellykket utført. Alt utstyr er ikke like mye beskyttet, derfor aksepterer man at mindre vitalt utstyr blir ødelagt, og at reparasjon er nødvendig for å oppnå full funksjonalitet igjen. Unngår imidlertid avbrudd.
- Ser bare på tre diskrete utfall av EMP-hendelser:
 - RFW-påkjønning (påkjønning fra radiofrekvente våpen)
 - HEMP-påkjønning
 - ingen EMP-påkjønning i det hele (ut over tradisjonelle EMI-kilder)

- RFW er bare en lokal trussel, dvs skadeområdet er begrenset geografisk til typisk ett anlegg eller deler av ett anlegg. Dette har bl a betydning for anskaffelse av reservedeler: Antar at det er mulig å skaffe reservedeler eksternt etter en RFW-påkjenning.
- HEMP berører et større geografisk område, slik at eksterne reservedeler ikke nødvendigvis kan skaffes. (Forutsetter egentlig at eksternt lagrede reservedeler ikke har hatt tilstrekkelig beskyttelse, og derfor kan være ødelagt av HEMP-påkjenningen. Ev at etterspørselen er så stor at den ikke kan dekkes.) Legger derfor inn en egen test i diagrammet om reservedeler etter en HEMP-påkjenning kan skaffes.

V3.3 Kort om tegnbruk i figuren

Fig V3.1 benytter seg bl a av symbolene fra boolsk algebra. Følgende sammenhenger gjelder:

\vee = eller (boolsk)

\bar{a} = nei (strek over ord tilsvarer boolsk negasjon, dvs "ikke ja")

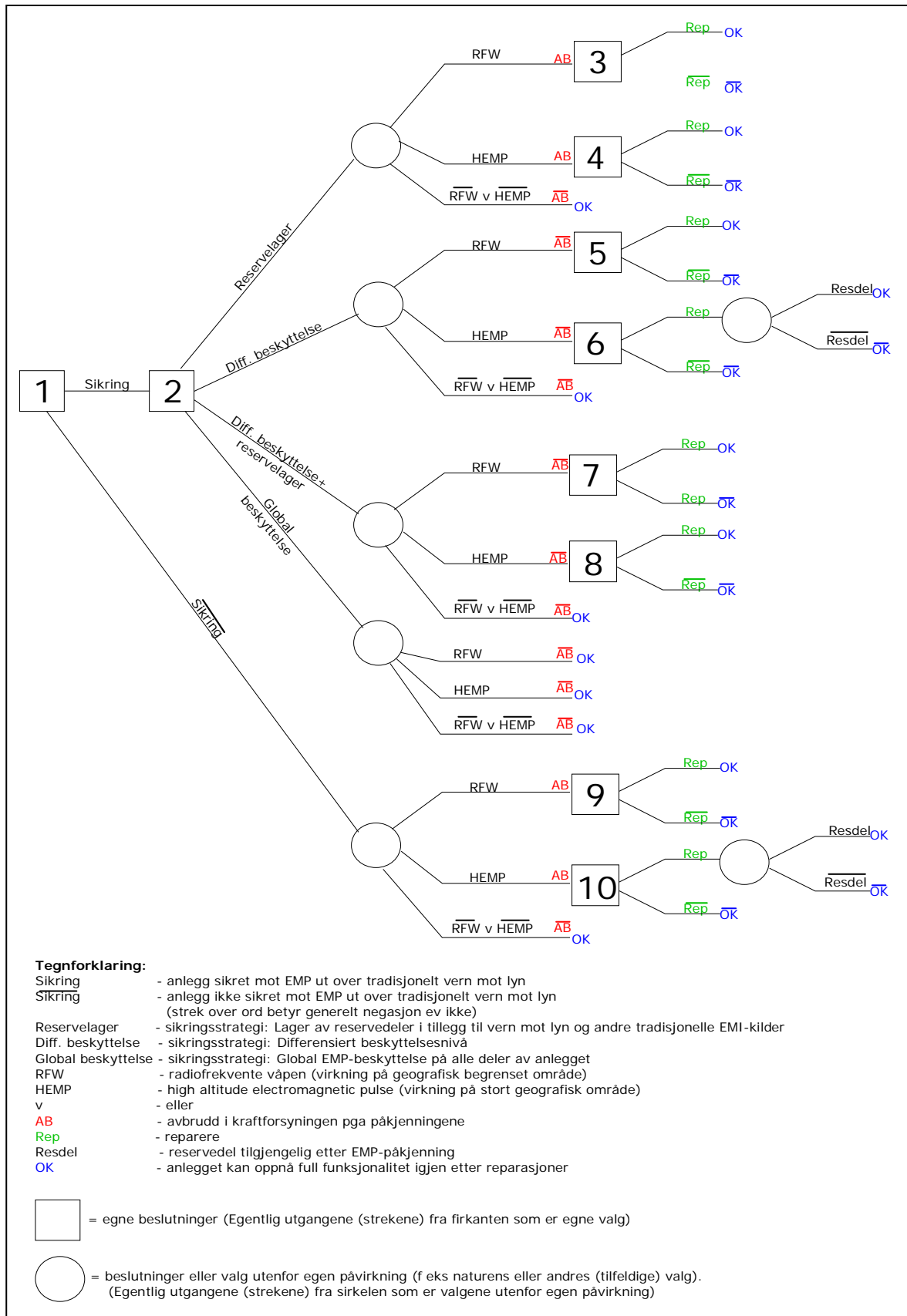
Se ellers tegnforklaringen i figuren.

V3.4 Resultater

Tabell V3.1 viser et sammendrag av resultatene i fig V3.1. Fordi figuren i utgangspunktet er en forenklet framstilling, blir tabellen et tilsvarende grovt hjelpemiddel. Imidlertid viser tabellen en del prinsipielle konsekvenser ved de ulike valgene.

Tabell V3.1: Informasjon om konsekvenser av ulike sikringsstrategier basert på fig V3.1. Der det eksisterer to alternativ, viser det første RFW og det andre HEMP (RFW/HEMP).

Sikringsstrategi	Avbrudd?	Reservedeler tilgjengelig umiddelbart?	Reparasjon nødvendig?		Kostnad for	
			Korttids-perspektiv	Langtids-perspektiv	Sikring	Normalt operativt anlegg etter HPM-/HEMP-påkj.
Ingen sikring	ja/ja	ja/nei	ja/ja	ja/ja	0	høy til svært høy
Reservelager	ja/ja	ja/ja	ja/ja	ja/ja	høy	middels
Differensiert beskyttelse	nei/nei	ja/nei	nei/nei	ja/ja	lav til middels	middels til høy
Diff. beskyttelse + reservelager	nei/nei	ja/ja	nei/nei	ja/ja	middels til høy	liten til middels
Global beskyttelse	nei/nei	-	nei/nei	nei/nei	høy til svært høy	0



Figur V3.1 Beslutningstre som viser ulike alternative EMP sikringstiltak og konsekvenser av disse med hensyn på avbrudd i levert kraft og om anlegget kan oppnå full funksjonalitet igjen etter EMP-påkjenningen.

SINTEF Energi AS
SINTEF Energy Research

No-7465 Trondheim
Telephone: + 47 73 59 72 00

energy.research@sintef.no
www.sintef.no/energy