
Kapittel 3 Elektromagnetisk topologi

Av Hans Berstad

3.1 Historikk

Under de første amerikanske kjernevåpensprengninger ble det iaktatt at noe fra detonasjonene sannsynlig ødela så vel målinger som elektronisk utrustning. Dette "noe" kjent som den elektromagnetiske puls, forkortes EMP, er et intensivt tidsvarierende elektromagnetisk felt som emitteres fra den kjernefysiske reaksjonen. Primærkilden for de fleste typer EMP er gammastråling fra det superhete plasma i ildkulen etter eksplosjonen. I neste fase påvirker strålingen atomer i atmosfæren og river løs elektroner etter den såkalte Compton effekten. Påvirket av jordens eget magnetfelt setter de frie Compton elektronene opp strømmer på flere kA pr. kvadratmeter av atmosfæren og genererer den elektromagnetiske puls. Varigheten av pulsen er sjelden mer enn et fåtall mikrosekunder der hovedmengden av EMP energien frigjøres innenfor en brøkdel av et mikrosekund.

Studier av EMP generelt og beskyttelsestiltak spesielt, ble en sentral del av kjernevåpenprogrammene i så vel USA, UK som i det tidligere USSR. Forskningen var strengt klassifisert da kunnskaper om pulsens signatur var antatt å kunne avsløre våpenets isotopiske sammensetning. Den informasjon som tilfeldig lekket ut var ufullstendig og til dels villedende. Fra omkring 1962-63 ble imidlertid teknisk informasjon om EMP gjort offentlig tilgjengelig. Et viktig resultat av studiene er teorien om den elektromagnetiske topologi lansert og senere formalisert av Carl E. Baum, Air Force Weapons Lab. I dag er teorien et av de viktigste verktøyene for generell EMC analyse.

De første topologiske modelleringer ble utført for store og komplekse systemer beskrevet av differensialligninger, integraler og transferfunksjoner. Modellene krevde betydelig datamaskinkraft og matet ut enorme datamengder som forutsatte avansert kompetanse for manuell evaluering og anvendelse. Slik modellering er praktisk talt ubrukelig og for resurskrevende for generelle EMC anvendelser.

Går vi imidlertid tilbake til basistanken bak den elektromagnetiske topologi så går den i korthet ut på å dele større systemer opp i mindre og gjensidig uavhengige sub-systemer eller soner avhengig av systemets opprinnelige

geometriske utforming eller struktur (topologi). En sone inneholder normalt en samling komponenter, moduler og enheter med gitt affinitet til hverandre omsluttet av en lukket sonegrense. Sagt på en annen måte velges sonegrensen slik at det avgrensede volum består av elektriske elementer med støyimmunitet som motsvarer det elektriske miljøet definert for sonen. For EMC ingeniøren har en topologisk soneinndeling tre vesentlige fordeler:

- Pedagogisk: Ingeniøren beskriver systemet på grunnlag av en strukturert og metodisk analyse og identifiserer koplingsveier og fysisk avhengighet mellom systemdelene.
- Systematisk: Informasjonsmengden som beskriver system, koplingsveier og dempningskrav forenkles med metodisk sortering.
- Sikkerhet: Da det alltid arbeides med lukkede soner tas hensyn til alle koplingsveier slik at installasjoner som krysser sonegrenser rutes automatisk inn på rett sted med nødvendig beskyttelse og avledning.

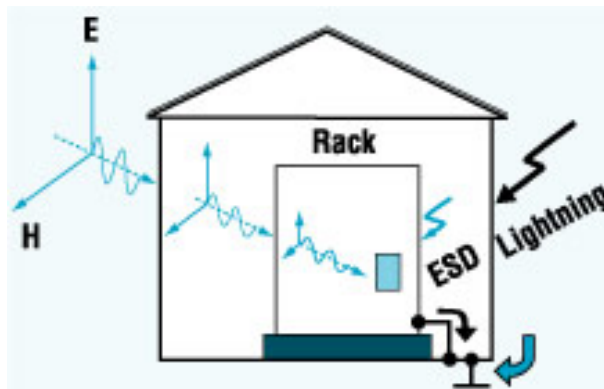
3.2 Det topologiske konsept

Et elektroteknisk system består vanligvis av en bygning, et rom eller et avlukke der et utvalg av elektroniske enheter, apparater og sensitive komponenter er montert i skap, hyller, konsoll og skjermbokser sammenkoplet av et kabelnett og eksponert av eksterne elektromagnetiske støykilder. Potensielle støykilder er for eksempel radiosendere og industrielle høyfrekvensgeneratorer, atmosfæriske og elektrostatiske utladninger, elektriske og elektroniske systemer i umiddelbar nærhet. I tillegg vil elektromagnetisk støyenergi trenge inn i systemomgivelsene via kraft- signal- og kommunikasjonskabler, samt ikke elektriske installasjoner så som vann-, kloakk- og gassrør. God topologisk planlegging forutsetter derfor elektromagnetisk kompatibilitet i elektronisk utrustning og installasjon. Topologien kan betraktes som et speilbilde av en geometrisk hierarki av soner som spenner fra det ytre ubeskyttede miljø til den ”komplett rene” innerste sone, se figur 3.1.

En EM analyse av et større system er komplisert ikke bare på grunn av de fysiske og elektriske forhold, men også de elektriske egenskaper til de forskjellige systemkomponentene. Derfor er det konseptuelt og definere en rekke overføringsfunksjoner relatert til det innfallende EM signal og reaksjonen på system og selektive systemdeler. En måte å bestemme disse overføringsfunksjonene for et større system er å dele systemet, hvis mulig, inn i flere mindre, ukompliserte og relativt uavhengige deler. Slike delsystemer er mye enklere å analysere og reaksjonen på det totale system estimeres ved kombinasjon av delanalysene.

Oppdelingen av et større system forenkles ved å betrakte systemet som oppbygget av et større antall elektrisk ledende overflater som svekker eller skjærmer innfallende EM felt fra å trenge inn i systemet. Et godt hjelpemiddel er en spesifikk beskrivelse av systemets elektriske topologi eller hvordan de skjermende overflatene er konfigurert når systemet eller installasjonen skal dekomponeres.

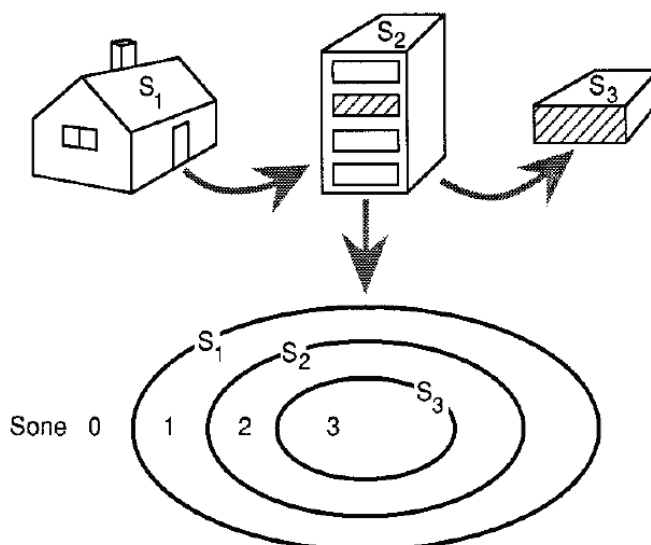
Figur 3.1:
Topologisk
hierarki



3.2.1 Elektromagnetisk topologi

La oss starte med å analysere et enkelt eksempel. Et elektronisk apparat er plassert inne i en godt elektrisk ledende og tett metallboks. Boksen er montert i et stativ av metallisk rammeverk. Stativet er plassert i en bygning. Bygningen befinner seg i et ytre elektrisk støymiljø med flere kjente og ukjente støykilder, se figur 3.2.

Figur 3.2:
Eksempel på skjerming
og soneinndeling



Beveger vi oss mot bygningen vil ytterveggene være den første støybegrensende barrieren vi støtet på. Er veggene utført i armert betong, vil

armeringen fungerer som en glissen elektromagnetisk skjerm med støydempende virkning. Vegger av trematerialer, som i prinsippet er transparente for elektromagnetiske felter, vil også ha skjermende virkning, ikke så mye på grunn av veggens elektromagnetiske egenskaper, men fordi veggene opprettholder en kjent avstand til ytre støykilder. Støydempning oppnås i dette tilfellet ved fysisk avstand mellom støykilde og offer. De elektromagnetiske feltene avtar med avstanden og innomhus kan vi snakke om et kontrollert eller behersket elektromagnetisk miljø. Med behersket elektromagnetisk miljø menes at vi har god kontroll med de lokale støykildene, samt at vi har metoder og tiltak som begrenser støyen som trenger inn via gjennomføringer i barrieren (veggen).

Den neste barrieren er stativet som fungerer som en glissen skjerm eller jordplan med effektiv støyavledning dersom det utnyttes på riktig måte.

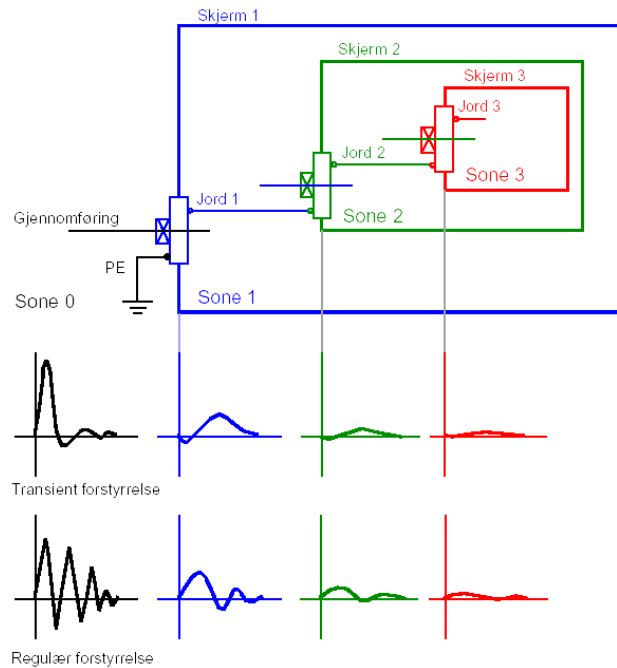
Den siste barrieren er den tette skjermboksen som omslutter apparatet. I eksempelet har vi tre barrierer eller såkalte *sonegrensener* mellom ytre støykilder og det elektroniske apparatet som hver for seg svekker de elektromagnetiske støyfeltene.

Topologisk sett har vi en ytre sonegrense S_1 bestående av selve bygningsskallet, en midtre sonegrense S_2 som er stativets ytre struktur og en indre sonegrense S_3 gitt av skjermboksens metalliske overflate. Sonene er definerte som lukkede avgrensede volumer som ikke skjærer hverandre eller har gjensidige fellesområder. Soneinndelingen skal hindre at støy går ukontrollert fra en sone til en annen.

Sonegrensenes elektriske ekvivalent kaller vi *den generaliserte skjerm* ettersom den beskrives med en generalisering av det vanlige skjermingsbegrepet. En generalisert skjerm kan være en ordinær elektromagnetisk skjerm, en tett metallisk skjermboks av plate eller nett, men normalt består den av en kombinasjon av flere fenomener som hver for seg minsker den elektromagnetiske koplingen. Redusert kopling oppnås også ved å fjerne kretsene fra hverandre. Avstand mellom utstyrsmoduler er således en viktig del av den generaliserte skjermen og et effektivt støydempende tiltak.

En forutsetning for effektiv støybeskyttelse er imidlertid at de forskjellige sonegrensene sammenkoples på en systematisk måte. Figur 3.3 viser hvordan sonene i eksempelet koples sammen og hvordan støybegrensende innretninger plasseres i sonegrensene. Legg også merke til hvordan jord er koplet mellom sonegrensene. En jordforbindelse *må ikke krysse en sonegrense* da en slik ledningsføring totalt ødelegger sonegrensens støydempende funksjon. Figuren illustrerer også hvordan transiente og kontinuerlige støysignaler påvirkes ved passering av de ulike sonegrensene.

Figur 3.3:
Topologiske soner



3.2.2 Topologiske grenseflater

De topologiske egenskapene til elektrisk ledende objekter er avgjørende for mekanismene som dominerer den elektromagnetiske koplingen mellom dem. Et ledende objekt kan rettes ut eller bøyes uten at de topologiske egenskapene endres. Dersom objektet bøyes slik at endene berører hverandre og gir god elektrisk kontakt, endres egenskapene dramatisk. I et sirkulært objekt vil elektromagnetiske felt indusere strømmer dekkader større enn tilsvarende i et utstrakt objekt. Den induerte strømmen er dessuten proporsjonal med arealet av den ledende sløyfen. Topologisk sett har det oppstått en ny type objekt trass i at de mekaniske endringene er minimale. I EMC sammenheng har fenomenet stor betydning.

Topologien har mange nyttige verktøy for analyse av elektromagnetiske forstyrrelser. I følge topologien representerer lukkede grenseflater skjerming mellom elektromagnetiske miljø i atskilte volum som reduserer den gjensidige koplingen mellom dem.

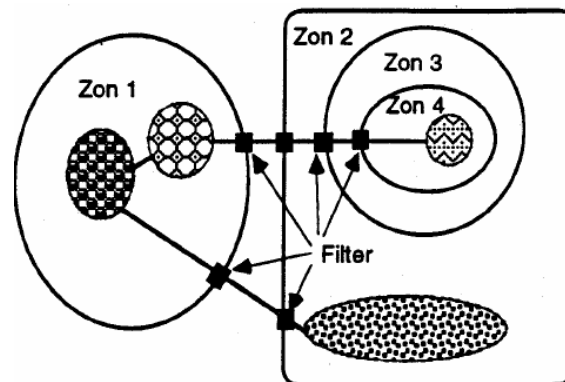
Den topologiske problemløsning forutsetter at de forskjellige elektromagnetiske soner for et apparat eller installasjon bestemmes. Hver sone må være atskilt med geometriske eller fysiske barrierer. En geometrisk barriere er i hovedsak et åpent areal der et eksisterende elektromagnetisk felt avtar til et akseptabelt nivå. En tilsvarende barriere oppstår også når avstanden mellom to

ledende element er så stor at koplingskapasiteten mellom dem har liten betydning for overføring av transiente forstyrrelser. I motsetning er en fysisk barriere en eller annen form for ledende metallisk skjerm som hindrer elektromagnetiske felt fra å trenge inn i elektroniske kretser, samt begrense utstråling fra interne kretser til det omsluttende miljø. Slike skjermene er også effektive som beskyttelse mot elektrostatiske utladninger (ESD) og støystømmer som flyter i jordingsystemet. Forutsetningen krever imidlertid at skjermene er koplet til jord på en slik måte at enhver forstyrrelse avkoples fra de sensitive elektroniske kretsene som skal beskyttes. Da skjerming og jording avhenger av hverandre, er det meget viktig at jordingsproblemet tas alvorlig når den elektromagnetiske topologi skal konfigureres.

Sonebegrepet kan defineres for et enkelt apparat, for en gruppe apparater eller for en installasjon. Sonegrensene viser ikke den virkelige konfigurasjon av sonene, kun det elektriske forholdet til hverandre. Grensene er ofte utformet som enkle geometriske figurer og hovedhensikten er at grenseflatene skal gi tilstrekkelig støydemper slik at nabosonene ikke forstyrres. Sonegrensene er i prinsippet generaliserte skjermene som demper støysignalene i forhold til støyens nivåforskjell i de forskjellige sonene. Når det legges en signalforbindelse fra en sone til en annen, må forbindelsen utstyres med en eller annen form for støydempende innretninger som gjør sonene støymessig uavhengige av hverandre. Figur 3.4 viser en hypotetisk installasjon med soneinndeling og signalforbindelser.

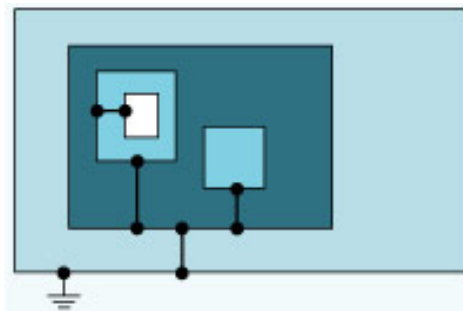
Figur 3.4:

Hypotetisk installasjon med soneinndeling og signalforbindelser



Det neste spørsmålet blir nå hvordan de ulike topologiske sonene skal refereres til hverandre. Det generelle postulat er at en indre sone skal forbindes med en jordforbindelse til den omkringliggende skjermen. Figur 3.5 illustrerer korrekt topologisk jording av soner.

Figur 3.5:
Korrekt topologisk jording



Beskyttelsesjord (PE) skal forbindes til *utsiden av sone 1*. Utsiden av sone 2 forbindes til innsiden av sone 1 og så visere. Virkningen av jordstrømmen som eventuelt flyter i sonegrensene reduseres ved at ytre og indre jordforbindelse *ikke koples til samme gjennomgående skrue*, med atskilles minst 10 cm dersom mulig.

3.3 Analyse av et komplekst elektrisk system

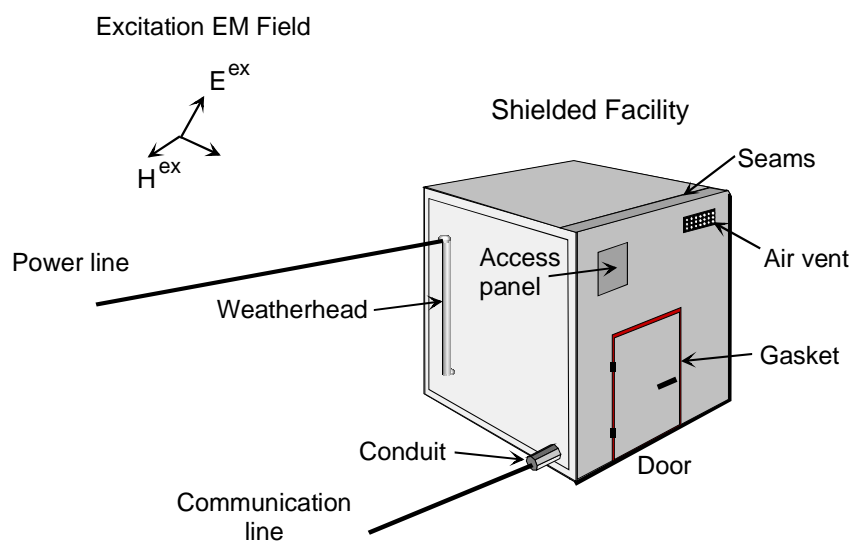
Uavhengig av systemets kompleksitet er første skritt i analysen å identifisere hvordan elektromagnetisk energi påvirker systemet. Se blant annet etter følgende karakteristiske trekk:

- Induktiv, kapasitiv og galvanisk kopling mellom ledere
- Direkte innstråling av elektromagnetiske felt
- Strøm og ladninger som forplanter seg langs ledere
- Elektromagnetiske felt som trenger gjennom åpninger i skjermer
- Diffus gjennomtrengning i svake ledende skjermer
- Hulromsresonans

Figur 3.6 viser en hypotetisk installasjon eksponert av et innfallende elektromagnetisk felt.

Anta at det skjermete systemet inneholder flere støysensitive elektroniske enheter koplet til den ytre verden over kraft- og kommunikasjonskabler. I tillegg har fasiliteten dører, ventilasjonsåpninger, adgangspanel og uideelle sammenføyninger i skjermingen. Det neste vi må gjøre er å utvikle et interaksjonsdiagram for den komplette installasjon. Som hjelpemiddel vises til det konseptuelle flytskjema i figur 3.7 som viser antatte og mulige koplingsveier i en elektrisk installasjon. Anvendt for installasjonen i figur 3.6, kan et fullfrekvensdiagram se ut som figur 3.8. Imidlertid er den kritiske elektromagnetiske påvirkning i hovedsak den som følger med kabler som krysser sonegrenser. For en praktisk arbeidende EMC ingeniør er det som regel tilstrekkelig kun å konsentrere seg om støybidragene fra kabler og ledere og således se bort fra høyfrekvent feltkopling.

Figur 3.6:
System eksponert av
et elektromagnetisk felt



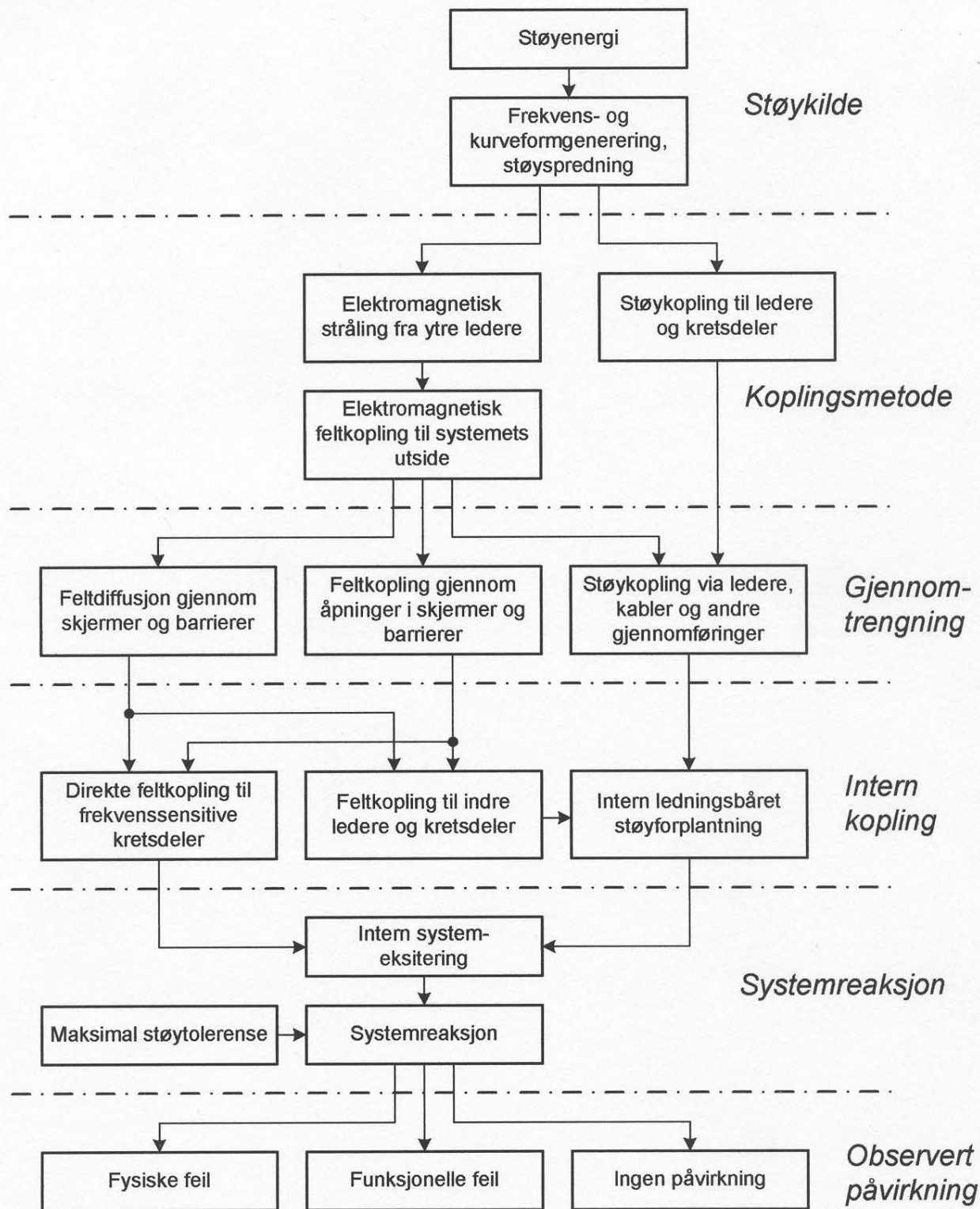
Nedenfor listes noen spesifikke og vesentlige retningslinjer for utvikling av en elektromagnetisk topologi:

- Undersøk om et finnes naturlige skjermmer og/eller elektromagnetiske barrierer
- Katalogiser alle svakheter i slike skjermmer
- Konstruer et generisk diagram for signalflyten i systemet
- Noter alle viktige forhold for signalforbindelsene
- Gjør et frekvensestimat for systemet
- Dersom filtre og transientbeskyttelse inngår, kontroller at disse er plassert i grenseflaten til beskyttende soner
- Kabelskjermmer må være omhyggelig jordet dersom de skal fungere etter hensikten
- Dersom en metallisk skjerm skiller to soner må alle interne barrierer i sonene være plassert så nær skjermen som mulig
- Nettfiltre med skjermet innkapsling må være montert i direkte elektrisk kontakt med skjermen for å oppnå tilfredsstillende støydemping

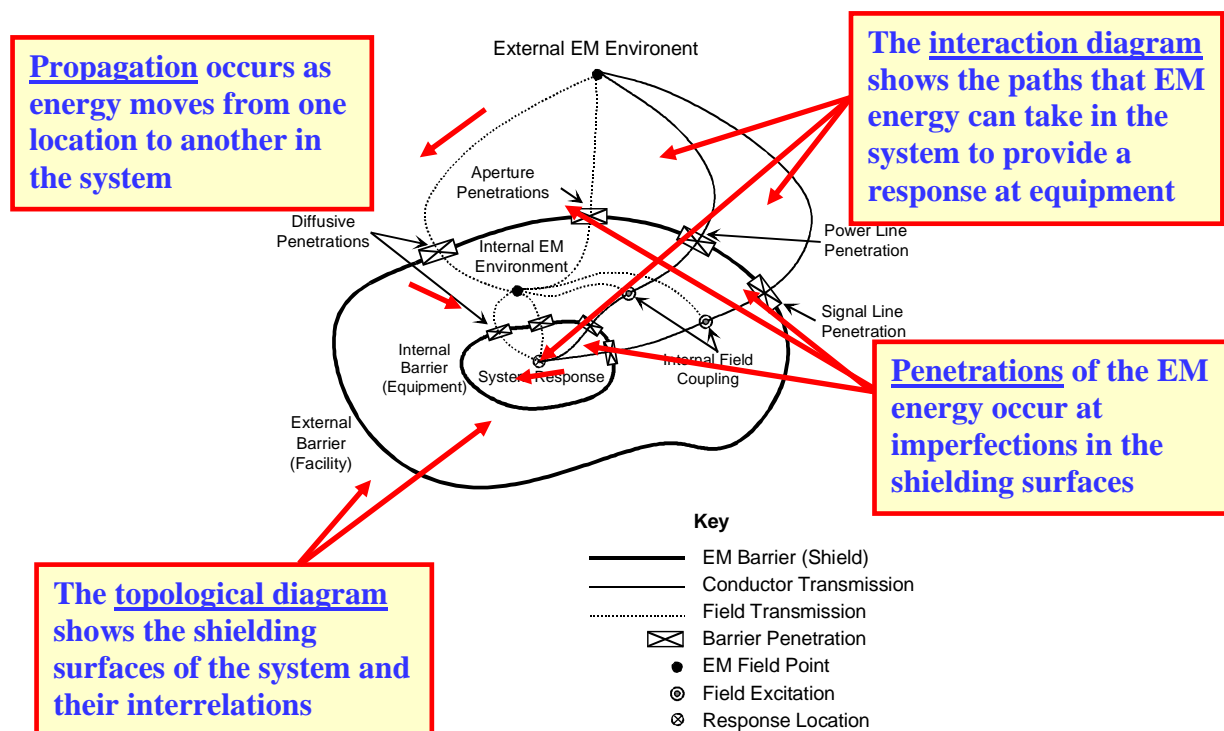
Skjermete rom, metalliske stativ og ledende chassis bidrar til å skille en "ren elektromagnetisk sone" fra mer forurensete. De innerste soner er normalt klassifisert som de reneste og anvendes som beskyttelse for støyfølsomt elektronisk utstyr. En indre sone kan også bli anvendt for å hindre utstråling fra utstyr som arbeider med høy frekvens og energi til omliggende utstyr. En frekvensomformer er eksempel på utstyr som vanligvis krever ekstra skjerming, filtrering og avledning og plasseres gjerne i egen sone.

Da skjerming og jording spiller en viktig rolle i en elektromagnetisk topologi, gis i fortsettelsen en generell beskrivelse av konseptet for den generaliserte skjerm.

Figur 3.7: Flytdiagram for koplingsveier i en elektrisk installasjon



Figur 3.8:
Komplett interaksjon
for systemet i figur 3.6



3.4 Den generaliserte skjerm

Ovenfor nevnes begrepet ”den generaliserte skjerm”. I dette avsnittet skal vi se nærmere på hva begrepet innebærer og hvordan vi finner de generaliserte skjermene i et elektrisk system. Den generelle oppfatning av et skjermet område er et volum omsluttet av en fullstendig tett metallisk overflate. Vi skal i det følgende se hvordan vi kan utvide begrepet til også omfatte skjermene der deler av den metalliske overflaten erstattes av virtuelle skjermene eller grenseflater uten at dempningseffekten svekkes nevneverdig. Konseptet krever imidlertid at skjermflaten omslutter hele det skjermete området, men den kan bestå av en kombinasjon av reelle og virtuelle skjermsegmenter.

EMC analysen av større og komplekse elektriske systemer lettes dersom systemet deles opp i mindre og oversiktige delsystemer, gjerne helt ned til kretskort- og komponentnivå. Store systemer, som for eksempel fly, skip, lokomotiver, kommunikasjonssystemer og tilsvarende, består av konstruksjonsdeler som hver for seg tjener som naturlige grenseflater med skjermvirkning mot utsiden. Metallhuden på fly, stålskroget til et skip og lokomotivets stålskroseri er første skjermingsnivå og del av den generaliserte skjermen. Innvendig finnes flere skillevegger, skap, kabinetter og lignende som utgjør neste skjermingsnivå. I tillegg er instrumenter, apparater og annet

spesialutstyr gjerne bygget inn i egne skjermbokser. Topologisk sett har vi et sett med konsentriske grenseflater som hver for seg bidrar til kretsatskillelse og støydemping selv om de ikke fullstendig omslutter det beskyttete volum.

Når vi skal dele systemet inn i topologiske soner med generaliserte skjjermer, er det to definerte krav som må oppfylles:

- Utstyret må ikke forstyrre miljøet i sonen mer enn de grenseverdier som er satt for sonen.
- Utstyret må tåle de støypåkjenninger som er karakterisert med sonenes grenseverdier.

Når vi skal fastlegg de virtuelle deler av den generaliserte skjermen, må vi huske at støyen avtar med avstanden fra støykilden. Mellom en støykilde og et offer finnes alltid områder der støyen har avtatt til akseptable nivå hvor den generaliserte grenseflaten trekkes. Med andre ord, vi oppnår ”effektiv skjerming” på grunn av avstand til støykilden. Dersom dette er umulig må vi iverksette andre skjermingstiltak som for eksempel med ekstra innføring av metalliske skjjermer.

I praksis tilsvarer sonegrensene generaliserte skjjermer der dempingen er identisk med forskjellen mellom signalnivåene i de forskjellige elektriske miljøene og bestemmes ut fra koplingen over grensebarrierene. Koplingen skal være begrenset og kontrolleres med en kombinasjon av flere beskyttelsesmetoder:

- Tilstrekkelig avstand mellom kretsene som er den vanligste og viktigste beskyttelsesmetoden.
- Elektromagnetisk skjerming.
- Skygging. Fungerer og anvendes kun ved høye frekvenser der $\lambda \ll$ skyggeskjermen.
- Ortogonalisering som går ut på å gjøre feltvektoren til støyfeltet vinkelrett inn mot offerets ledninger. Metoden er i hovedsak effektiv for lave frekvenser der $\lambda >$ jordplan og ledningslengder.

En objektiv oppfatning av sonegrensenes form og plassering i installasjonen er uunnværlig. Det kan være vanskelig å beskrive en sonegrense med enkle geometriske uttrykk så en intuitiv forståelse av dens beliggenhet er som regel et godt alternativ. I tillegg vil en elektromagnetisk skjerm ha hull og åpninger (dører, vinduer, ventilasjonsåpninger m.m.) og et ledende objekt plassert i eller nær åpningen vil påvirke skjermvirkningen. Dempning på grunn av fysisk avstand påvirkes også dersom et ledende objekt plasseres eller flyttes inn i omgivelsen.

Systematisering av beskyttelsesteknikken gir bedre fysikalsk forståelse av kjente begreper som skjerming og jording. For skjerming gjelder den klassiske regel at ingen ting er sterkere enn det svakeste ledd. Jording skal betraktes som et skjermingstiltak og fungerer effektivt så lenge avstanden til jordreferanse er mindre enn $\lambda/1000$. Systematisk jording på kretskort gir god skjermvirkning

opp til et titalls MHz mens jording i apparatskap og installasjoner sjelden er særlig effektive over 100 kHz!

I det følgende gis en oppsummering av regler og metoder som kommer til anvendelse når generaliserte skjjermer skal estimeres:

- Skjermeffektiviteten bestemmes av skjermens svakeste punkt, Utsagnet gjelder også for sonegrenser og generaliserte skjjermer.
- En skjerm skal være lukket. Derfor skal en kabelskjerm være lukket i begge ender. Lukket er ikke ensbetydende med at skjermen galvanisk skal være tilkoplest i begge ender.
- Tykke skjermplater er bare nødvendige i helt spesielle tilfeller, tynne metallfolier er nesten alltid tilstrekkelig.
- For skjerming av lavfrekvente magnetiske felt er materialets elektriske ledningsevne ofte viktigere enn dets magnetiske egenskaper. Kopper og aluminium er ofte et bedre alternativ enn stål.
- Jording er det samme som å kople seg elektrisk til den lokale skjermen eller sonegrensen.

De topologiske grensene er karakterisert ved at det ikke finnes kopling mellom ut- og innsiden. Den korresponderende fysiske grense trekkes som en virtuell skjerm som i prinsippet kun representerer en signal- eller koplingsdempning. Dempningen skjer nødvendigvis ikke ved skjermen eller på grunn av den. Filosofien bak soneoppdeling og den generaliserte skjerm baserer seg i hovedsak å oppnå fysisk separasjon av kretselementer som kan interferere.

En elektromagnetisk skjerm er ikke perfekt. En generalisert skjerm er en mer eller mindre tett skjerm som omslutter et elektromagnetisk miljø og omfatter alle typer begrensingsflater med støydempende effekt. Eksempler på begrensingsflater med god elektromagnetisk effekt er:

- Elektrisk ledende armering i bygningskonstruksjoner.
- Chassis i et apparat.
- Elektrisk ledende mekanisk konstruksjon eller stamme i et system.
- Metalliske stativer og apparatskap.
- Ledende plategolv eller datagolv.
- Jordplan på et kretskort.
- Metalliske kabelbroer eller -stiger.
- Godt ledende jordsmonn.

Merk at de generaliserte skjermene er frekvensavhengige slik at vi alltid må anvende topologiske modeller tilpasset de mest fremherskende frekvenser i installasjonen.

3.5 Elektromagnetisk skjerming

Anta et tynn ledende sfærisk skall plassert i et elektrisk felt. I følge Faraday er feltet inne i sfæren tilnærmet lik null. Ikke fordi at skallet absorberer feltet, men fordi E-feltet setter opp ladninger av motsatt polaritet langs skallet som motvirke det originale felt inne i sfæren. Da elektronene beveger seg svært lett på ledende overflater er skallets tykkelse av uordnet betydning. Meget tynne metallfolier vil derfor ha utmerket beskyttelse mot elektriske felt.

Når vi snakker om magnetiske felt har Faradays effekt ingen relevans da det ikke finnes magnetiske ladninger. Magnetiske felt dempes kun ved bruk av magnetiske materialer med høy permeabilitet og tilstrekkelig tykkelse. Et sfærisk skall av magnetisk materiale vil redusere feltet inne i sfæren da feltet i hovedsak følger skallet som har lav reluktans. En alternativ løsning er å anvende en skjerm av godt ledende material som for eksempel kopper eller aluminium. Det gjennomtrengende magnetiske felt setter opp virvelstrømmer i skjermen som i sin tur genererer et nytt magnetfelt motsatt retter det opprinnelige og reduserer dette. Skjermingseffekten øker med økende frekvens og gir effektiv skjermvirkning ved høyere frekvenser.

Lavfrekvente magnetiske felt er meget vanskelig å skjerme. I stedet for å benytte tykke kostbare magnetiske materialer, vil skjermer basert på virvelstrømdempning være relativt effektive selv for meget lave frekvenser. Tykke aluminiumsplater er ofte benyttet med godt resultat som beskyttelse mot nettfrekvens. Platetykkelsen må da være minst halvparten av inntrengningsdybden for støyfrekvensen. For skjerming av 50 Hz magnetiske felter har 6 mm aluminiumsplater vist seg i være meget effektive.

Hull og brudd i en skjerm som omgis et topologisk volum begrenser dens effektivitet. I henhold til teorien bak magnetisk skjerming med induserte strømmer, vil det flyte strøm i skjermen så lenge det ikke er hindringer i strømbanen. Nødvendige åpninger i skjermen må arrangeres slik at hullenes innvirkning på strømbanen minimaliseres.

Dersom hullets geometri er slik utformet at det fungerer som en resonator for høye frekvenser, kan høyfrekvente strømmer i skjermen medføre at hullet virker som en antenne som overfører elektromagnetisk stråling inn i det avskjermete volum.

En serie små hull er bedre enn et enkelt stort. Feltene vil ikke kunne trenge dypt inn i topologien så lenge hullets diameter er liten i forhold til bølgelengden av det forstyrrende signal. For $\lambda \gg D$, vil dempningen i avstand d fra et hull med diameter D være:

- 20 dB for $d/D = 1$
- 30 dB for $d/D = 2$
- 60 dB for $d/D = 5$

For frekvenser under 1 GHz anbefales ikke større åpninger enn $\lambda/30$ for best mulig skjermeffektivitet.

En skjerm skal være så tett som mulig. Alle hull og gjennomføringer vil svekke skjermens effektivitet. Som eksempel vil et tangentielt magnetisk felt nær en metallisk skjerm kunne trenge gjennom et hull og indusere støystrømmer i en nærliggende kabel. Tilsvarende vil et elektrisk felt vinkelrett på en metallisk skjerm trenge gjennom en åpning og sette opp en indusert spenning i en nærliggende kabel.

Et hull eller åpning i en skjerm kan ”lukkes” med generaliserte skjermer i henhold til regelen om avstand til støykilder. Generaliserte grenser på begge sider av hullet vil avgrense et topologisk volum forbudt for sensitive elektroniske enheter og kretser.

Effektiv støybeskyttelse krever bevissthet om den elektromagnetiske topologi og utnyttelse av eksisterende barrierer. Topologien må ikke kompromitteres av tilfeldige hull gjennom barrierer for inntak av kabler og separate jordforbindelser. Slike hull medfører at støyende jordstrømmer slipper inn i et beskyttet område. Alle kabelskjermer skal således jordes på utsiden av en barriere. Slike forbindelser må være så elektrisk tette som mulig og kontakter med 360 graders omsluttende skjermtilkopling anbefales. Anvendes enklere tilkoplingsmetoder, må det etableres en tilfredsstillende tilkopling. Dersom flere kabler tilkoples et apparat eller et skjermet område, skal det benyttes en felles innføringsplate. Et felles inntakspunkt for alle kabelforbindelser begrenser vagabonderende strømmer til kun å flyte i liten del av skjermen.

Lukkete skjermer er en type elektromagnetiske barrierer, åpne generaliserte skjermer med spesifikk elektromagnetisk demping mellom soner en annen. Plasseres et vertikalt metallisk plan i veien for et innfallende horisontalt elektromagnetisk felt, oppstår en generell skjermende effekt i ”skyggen” på den andre siden, en effekt som gjerne benevnes ”den generaliserte skjermende effekt”. Fenomenet er et nyttig hjelpemiddel i alt EMC arbeid. Andre eksempler er jordplan på trykte kretskort og ledende golv i datamaskinrom. Begge tiltak reduserer koplingen fra miljøbestemte elektromagnetiske felt til kabler og andre ledende element i nærheten på grunn av den generaliserte skjermingseffekten.

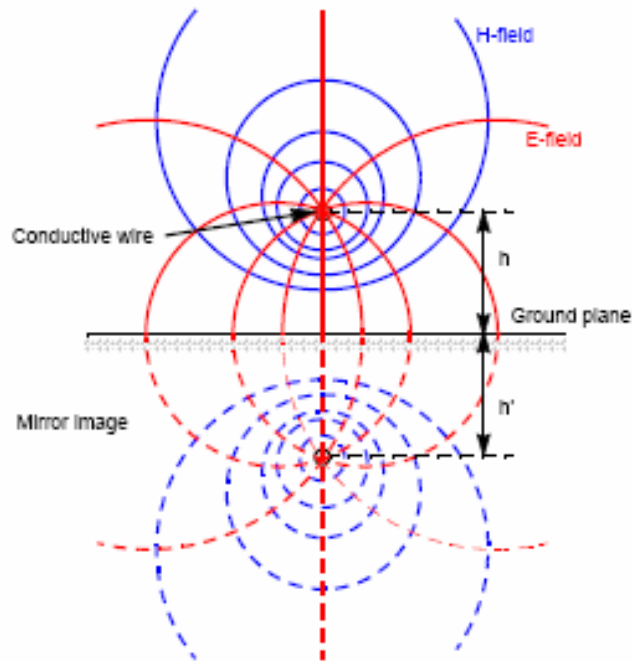
3.6

Jordplan

Den gjensidige påvirkning fra et ledende jordet plan på et objekt over planet beskrives med speiling. I praksis betyr det at planet erstattes med et virtuelt bilde av objektet over planet. De elektromagnetiske feltene rundt en leder i avstand h fra et ledende plan og speilbildet i avstand h' , er vist i figur 3.9. De elektriske feltlinjene møter alltid jordplanet i rett vinkel. Tilsvarende vil de magnetiske feltlinjene rundt lederen aldri skjære gjennom planet. Dersom lederen nå beveges mot planet, dvs. avstandene h og h' gjøres mindre, vil feltene til slutt kollapse til et minimum når lederen berører planet. Verken E- eller H-feltet vil nå kunne indusere spenninger eller strømmer i andre nærliggende elektriske ledere og objekter. Hovedregelen er generelt at kabling

og ledende objekter skal plasseres så nær jordplanet som mulig for å redusere den gjensidige koplingen.

Figur 3.9:
Elektromagnetiske felt rundt en leder og dens speilbilde



Den gjensidige kopling mellom to ledere som løper parallelt et jordplan er gitt med:

$$M_{12} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left[\frac{D^2 + (h_2 + h_1)^2}{D^2 + (h_2 - h_1)^2} \right]$$

der D = avstanden mellom lederne, h_1 og h_2 avstanden mellom hver av lederne og jordplanet og $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$.

Vi merker oss at uttrykket kun inneholder konstanter og geometriske parametere og ingen elektriske. Minskes anstandene h_1 og h_2 , vil den gjensidige koplingen avta mot null.

Tilsvarende er den kapasitive koplingen mellom de samme ledere gitt med:

$$V_2 = V_1 \frac{C_{12}}{(C_{g1} + C_{g2})}$$

der V_1 = er spenningen til kildelederen, V_2 = induisert spenning i offerlederen, C_{12} = kapasitansen mellom lederne og C_{g1} og C_{g2} kapasitansen mellom hver leder og jordplanet. Da kapasitansen mellom ledere er omvendt proporsjonal med avstanden, vil C_{g1} og C_{g2} øke når lederne nærmer seg jordplanet og således redusere den induiserte spenning V_2 .

Ut fra diskusjonen ovenfor postuleres følgende viktige krav:

- De elektromagnetiske feltene rundt en elektrisk leder avtar når lederen nærmer seg en jordplan.
- Den gjensidige kopling mellom ledere reduseres når de nærmer seg et jordplan.
- Den kapasitive kopling mellom ledere reduseres når de nærmer seg et jordplan.
- Elektriske ledere og elektronisk utstyr bør derfor plasseres så nær et ledende plan (jordplan) som mulig for å redusere den elektromagnetiske støykopling.

Imidlertid er fenomenene beskrevet ovenfor frekvensavhengige, men er ganske signifikante for frekvenser over noen få hundre Hz.

3.7 Topologisk jording

Jording er synonymt med å foreta en elektrisk kopling til nedgravd jordlektrode for å oppnå en presis jordreferanse. Skal vi være i stand til å overføre jordpotensialet til en tilkoplede enhet, må jordforbindelsen være mye kortere enn en bølgelengde, for eksempel 1/1000 del av den aktuelle bølgelengden som skal avkoples. For meget lave frekvenser er en slik jording tilfredsstillende da potensialfordelingen langs jordoverflaten å være ganske konstant.

Bølgelengden for 50 Hz er for eksempel hele 6000 km. For høyere frekvenser avtar effektiv jordlederlengde til en brøkdel av en meter eller til og med til en brøkdel av en centimeter.

Tradisjonelt har flere typer jord blitt definert og anvendt. I eldre anlegg er det ikke uvanlig å finne separate opplegg for kommunikasjonsjord, signaljord, analog og digital jord, kraftjord og så videre, en filosofi som forbruker mye ”kopper”, gir uoversiktige installasjoner med dårlig vedlikeholdbarhet og uakseptabel støyundertrykkelse. I et topologisk miljø skal bare to eller maksimum tre typer jordsystemer anvendes definert som beskyttelsesjord (PE), referanse- eller signaljord (RE) og egensikker jord (IS) for bruk i eksplosjonsfarlige områder.

Topologisk jording er et lavfrekvensproblem. Sonegrenser er anlegges ved sammenkopling av forskjellige punkter tilhørende en generalisert skjerm samtidig som ledere i forskjellige soner atskilles så mye som mulig. Den topologiske problemstilling gir grunnlag for en presis definisjon av jording. Anta et objekt som skal jordes befinner seg i en godt definert og avgrenset

sone. På grunn av sonegrensen er sonen effektivt isolert fra andre soner. *Den eneste og naturlige jordreferansen er kun skjermen som avgrenser sonen.*

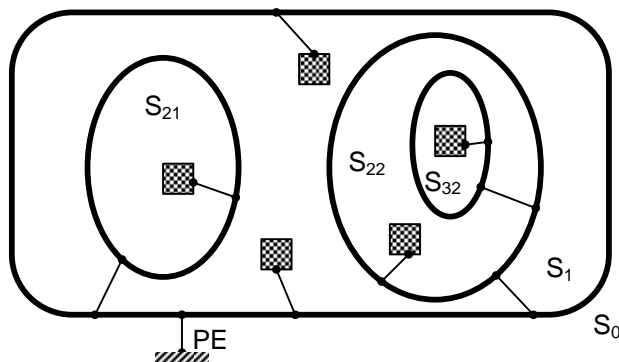
I et skjermet volum blir meningsfull og korrekt jording å kople seg til den lokale skjermen. For å hindre forstyrrelser inne i sonen er det meget viktig at alle elektroniske objekter følger potensialet til skjermen selv om dette varierer. Betingelsen er automatisk sikret så lenge skjermen er benyttet som jordreferanse for alle interne objekter. Med utgangspunkt i topologien formaliseres følgende vitale regler:

- Jording er det samme som å kople seg til skjermen som omslutter sonen.
- Jording er det samme som <"skjerming OG avledning">. I god EMC teknikk må de tre relasjonene harmoniseres. Husk at resultatet ikke er bedre enn det svakeste ledd i treenigheten.

Figur 3.10 viser et eksempel på korrekt topologisk jording. Merk at *ingen jordforbindelse krysser noen sonegrense.*

Figur 3.10:

Eksempel på topologisk jording



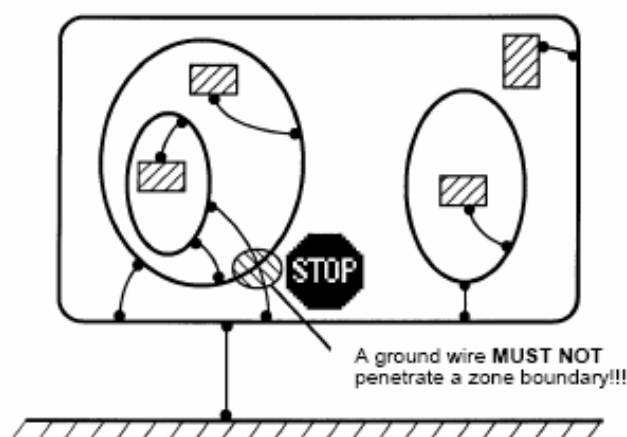
I en lukket metallisk skjerm defineres korrekt jording som en direkte kopling til skjermen. I tilfeller der en slik skjerm mangler, kan definisjonen virke noe villedende. Imidlertid løses problemet ved bruk av den generaliserte skjerm med formalisert jording til den lokale skjermen. Selv i tilfeller der det ikke finnes en omsluttende metallisk skjerm, finnes det alltid metalliske deler i den generaliserte skjermen som er godt egnet til jordingsformål. Et godt eksempel er jordplanet.

En jordforbindelse som føres gjennom en sonegrense og koples til jord utenfor sonen, ødelegger fullstendig sonegrensens skjermende effektivitet, se figur 3.11. Dessverre finnes mange slike forbindelser i større og komplekse systemer som bidrar til degradering av systemets funksjonalitet. En enkel måte å omgå slike problemer er å benytte kunnskapen om den elektromagnetiske topologi og

soneinndeling under prosjektering, installasjon og vedlikehold av større systemer. Derfor skal EMC ingeniøren delta i prosjekteringen fra dag en!

Figur 3.11:

Ukorrekt jording,
unngå slike mistak!!



3.8

Inntaksplate

Den generaliserte effektivitet av en skjerm henger nøye sammen med hvordan kabler og ledninger føres inn i et beskyttet volum. Dersom en kabelskjerm koples til sonegrensen øker støystrømmen i skjermen rundt tilkoplingspunktet. En forholdsregel som hindrer store uønskete støtstrømmer i skjermen er å føre alle kabelkategorier inn gjennom et felles inntakspunkt, en såkalt inntaksplate, som utgjør en forsterket del av skjermen. Koplingsmetoden svekker ikke sonegrensens skjermingseffektivitet selv om flere forbindelser fører gjennom et felles punkt i grenseflaten. Fordelingstavler og sikringspanel i bygninger er eksempler på typiske inntaksplater. Slike innretninger skal være tilkopleet PE!

Er det nødvendig å benytte flere innføringspunkt langs grenseoverflaten, økes faren for støystrømmer i skjermen mellom innføringspunktene. Størst er risikoen når skjermen er svak eller glissen. Støystrømmen er frekvensavhengig og det verste tilfellet oppstår når avstanden mellom innføringspunktene tilsvarer en halv bølgelengde. Tilsvarer avstanden imidlertid flere bølgelengder, vil støystrømmen kun være avhengig av antall innføringspunkt.

3.9

Jordsystemets struktur

Elektrisk sammenkoblede objekter danner forskjellige nettverkskonfigurasjoner avhengig av hvorledes de sammenkoplet. Med "smart konstruksjon" kontrolleres den generaliserte effektivitet og skjermingen mellom ytre og indre

elektroniske kretser. Alfa og omega for et tilfredsstillende resultat henger nøye sammen med hvordan jording er konstruert og installert.

I en del EMC litteratur foretrekkes sløyfeformet jordsystemer, men hovedmengden anbefaler imidlertid stjerne eller grenformete strukturer. En gren- eller treformet struktur har mange fordeler og få ulemper. Anvendes ett innføringspunkt i sonen benyttes kun en liten felles del av grenseoverflaten for skjermtilkoplinger på begge sider av barrieren. For kabelgjennomføringer blir således skjermtilkoplingene ganske sammenfallende på inn- og utsiden av kontaktflaten.

Totalsystemet har kun en definert kontaktoverflate klassifisert som rotpunktet til en treformet struktur. De forskjellige sonene i systemet skal sammenkoples slik at de danner en trestruktur. Finnes det flere forbindelsespunkt er faren for utilsiktede systemsløyfer overhengende og ukontrollerbare støyostrømmer kan derfor flyte mellom forbindelsespunktene. Et klassisk eksempel på degenerert trestruktur er tilfeller der kraftfordelingsnettverket er forbundet til skjermen flere punkter. Tilsvarende forhold oppstår også når kraft- og kommunikasjonskabler føres gjennom den lokale skjermen på forskjellige steder.

Hovedregelen er at en grenformet jordlederstruktur er den beste løsning for maksimum skjermingseffektivitet for et topologisk område og bidrar sterkt til at den elektromagnetiske kopling blir minimal. Dersom det oppstår sløyfer ved at grener sammenkoples, må sonegrensen forsterkes elektrisk dersom skjermeffektiviteten skal opprettholdes.

Enkelte ganger må kravet til ren grenstruktur fravikes til fordel for et mer komfortabelt kabelopplegg. En hovedregel er da å installere flere små sløyfer i stedet for en større. Løsningen øker skjermeffektiviteten, samt redusere faren for støyinteraksjon. Induserte strømmer er proporsjonal med sløyfens areal og er for små sløyfer redusert til et minimum. Med et flertall tverrforbindelser mellom sløyfene oppstår dessuten en maskenettstruktur som er kjent for å være en utmerket potensialutjevner.

Det er avgjørende å opprettholde grenstrukturen selv om det finnes enkelte sløyfeforbindelser og vi kan derfor formulere følgende utsagn:

- Fra et lavfrekvent synspunkt er en gren- eller trestruktur anbefalt som den beste løsning. Dersom sløyfer ikke kan unngås anbefales å fylle opp en større sløyfe med et flertall mindre. Og til sist, strukturene skal gjøres så små som praktisk mulig.

For høyere frekvenser, der bølgelengden er kortere enn dimensjonen av sløyfen, gjelder ikke argumentasjonen ovenfor. Høyfrekvente overflatestrømmer øker ikke selv om ledersløyfer finnes. Endringer i systemstruktur medfører noen ganger resonante fenomener som dramatisk endrer strømmen. I slike tilfeller er det ikke mulig å dempe strømmen med en dertil egnet grenstruktur. Høyfrekvenstilfellet kontrolleres kun med hensiktsmessig skjerming.

Praktisk er det vanskelig å oppnå en sonekonstruksjon i samsvar med en perfekt grenstruktur. Selv i en ”intelligent konstruksjon” antas at nye implementeringer introduserer utilsiktede og uønskete sløyfekonfigurasjoner. Kategoriske krav til å unngå enhver sløyfe medfører ofte lange fordyrende jordforbindelser som også forringer systemets ytelse. I slike tilfeller blir en avveining mellom en perfekt grenstruktur og nødvendigheten av å oppgå en tilfredsstillende systemoppførsel et sentralt kompromiss.

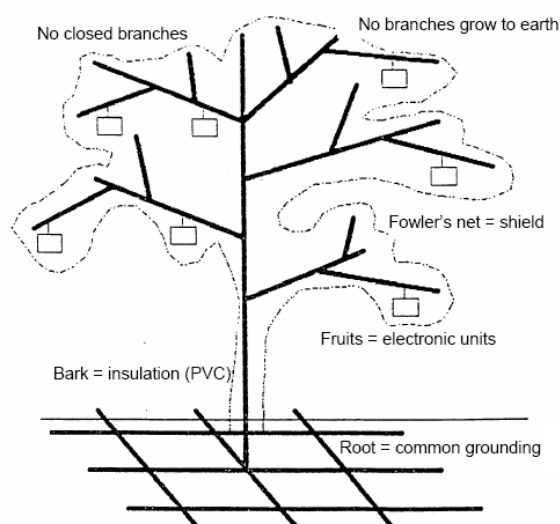
3.10

Jordtrær

Ovenfor påpekes at ”Moder jord” er det beste referansepunkt for jordingsformål. I prinsippet varierer potensialet langs jordoverflater på grunn av lineære og ulineære impedanser i jordsmonnet samt støystømmer som avledes til jord. I normale anvendelser, så som lett industri, er tommelregelen at vi har en potensialforskjell på ca. 1 volt pr. 100 meter jordsmonn. I områder med ”tunge effektforbrukere” er forskjellen ofte noe høyere.

Beskyttelsesjord (PE) skal fortrinnsvis fungere som en effektiv potensialutjevner og bør derfor ha typisk sløyfestructur. Dersom PE løper nær støyfølsomt utstyr, er faren for støyinterferens stor. Problemet unngås enten ved å øke avstanden eller bryte PE-jordsløyfen opp i flere mindre sløyfer som vil redusere støystømmen. Om ønskelig kan PE også ha grenstruktur.

Figur 3.12:
Jordtre



Referansejord (RE) skal normalt konfigureres med trestruktur som reduserer støystømmer i grenene. I installasjoner med flere trestrukturer skal de generaliserte jordtrær ha god atskillelse med redusert gjensidig kopling. Det

understrekes at koplingen mellom forskjellige jordtrær kun skal gå via stammen og rotpunktet.

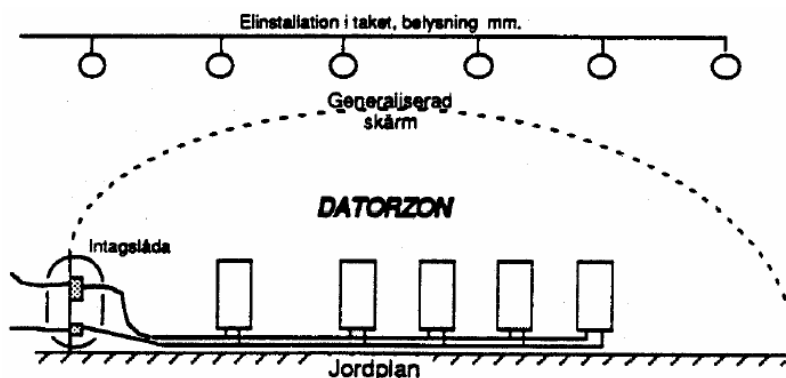
Det er praktisk mulig å velge hvilken som helst tregren som rotpunkt så lenge en tilfredsstillende forbindelse til et referansepunktet kan legges. Unngå for øvrig kortslutning mellom grener på samme tre eller mellom grener på forskjellige trær. Signalforbindelser mellom objekter tilhørende forskjellige trær skal ha en eller annen form for galvanisk skille som hindrer jordsløyfer. Og til slutt, en viktig huskeregel er at en *trestruktur er definert "som en åpen struktur uten store sløyfer"*.

3.11 Noen topologiske eksempler

3.11.1 Datamaskininstallasjon

I en større datainstallasjon er mengder av elektroniske enheter plassert på et ledende golv som utgjør et jordplan. Alle datatekniske enheter er koplet til en "ren" kraftforsyning spesielt beregnet for datatekniske enheter. Kraft- signal- og kommunikasjonskabler er ført inn via en felles innføringsplate. Krafttilførsel til lys, varme, ventilasjon og lignende mates fra kabelforlegning i taket. Figur 3.13 viser hvorledes den generaliserte skjermen konstrueres på grunnlag av avstand mellom støykilde og offer.

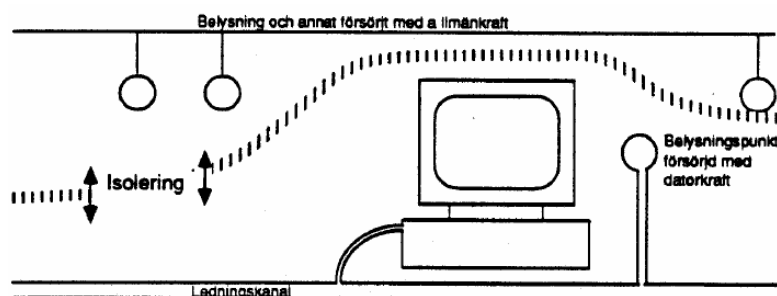
Figur 3.13:
Datamaskininstallasjon



Dersom det skal installeres et belysningspunkt i nærheten av en datamaskin eller skjermterminal, skal kraften tas fra den rene kraftfordelingen og ikke fra det felles fordelingsnett, se figur 3.14.

Figur 3.14:

Lyspunkt nær en datamaskin

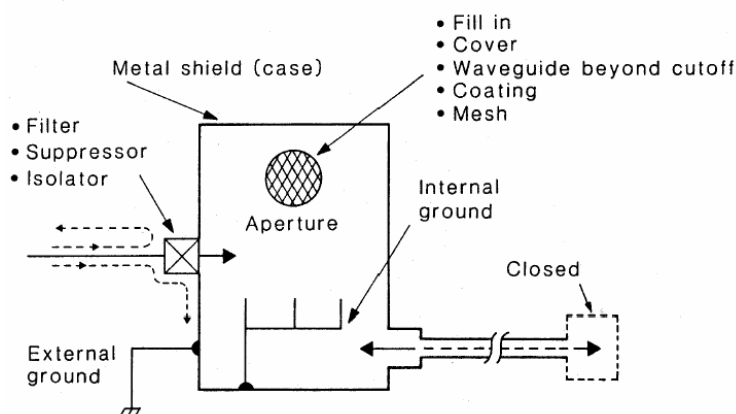


3.11.2 Topologisk jording av apparat i en skjermet boks

Figur 3.15 viser et apparat montert i en skjermet boks med korrekt jording. PE er koplet til boksens utside. Innkommende signalledninger er utstyrt med beskyttelselementer på utsiden av boksen for avledning av støy til PE. Inne i boksen er det internt bygget opp et jordtre koplet til kun ett rotpunkt. Legg merke til avstanden mellom ytre og indre jordtilkopling. Finessen skal hindre støy fra den ytre jordtilkopling å interferere med det indre jordsystemet. For øvrig er topologien lukket gjennom skjermet kabel til andre tilleggsenheter.

Figur 3.15:

Topologisk jording av apparat i skjermet boks

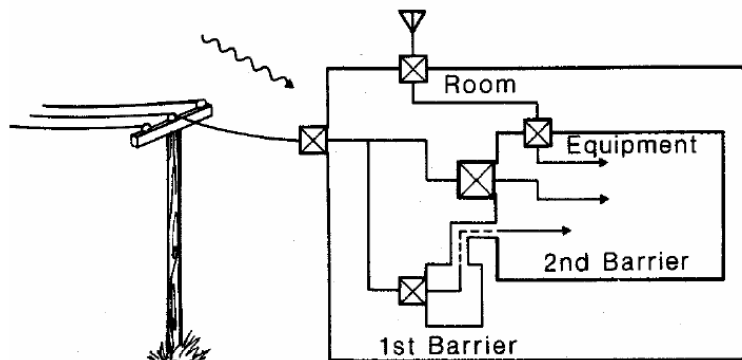


3.11.3 System med to barrierer

En luftlinje er koplet til en bygning. Eksponeres linjen fra EMP eller lynnedslag, vil elektromagnetiske felt i MV og kA område vandre mot bygningens yttervegg som er den første barrieren. Signalnivåene reduseres ved transientbeskyttelse og avledning slik at signalene innomhus faller til kV og A nivåer. Den andre barrieren reduserer nivåene ytterlig til V og mA verdier.

Legg merke til antennetilkoplingen med eget innføringspunkt. Da bølgelengden for antennesignalet er mye kortere enn avstanden mellom innføringspunktene, svekkes ikke barrierens effektivitet.

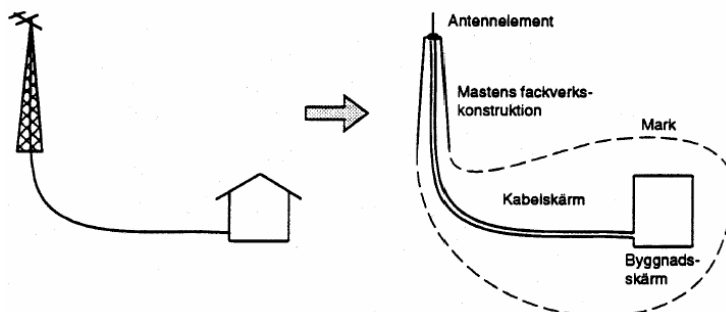
Figur 3.16:
System med to barrierer



3.11.4 Topologien til en antennemast

I en antennemast er antenneelementene koplet til en koaksialkabel eller bølgeleder til kommunikasjonsutstyr inne i bygningen. I følge sikkerhetskrav skal antenneelementene være avledet til masten for å beskytte fødekabelen mot høye lynstrømmer. Topologien har to spesifikke soner, maststrukturen, marken og bygningen som beskriver den ytre sonen og kabelskjermen og bygningens skjerm den indre. Kabelskjerner og antenneelement skal være sammenkoplet direkte som i en foldet dipol eller via filter og transientbeskyttelse. I dette eksempelet regnes antenneelementene som inntaksplaten der de to sonegrensene koples sammen. Topologien gir dermed tips hvorledes antennekabelen skal videreføres til andre topologier.

Figur 3.17:
Topologien til en antennemast



Et lynnedslag i masten skjer mot dens metallkonstruksjoner. En naturlig avledningsvei for lynstrømmen er å søke inn i kabler til bygningens elektrotekniske anlegg. For å begrense strømmene skal vi forsøke å holde

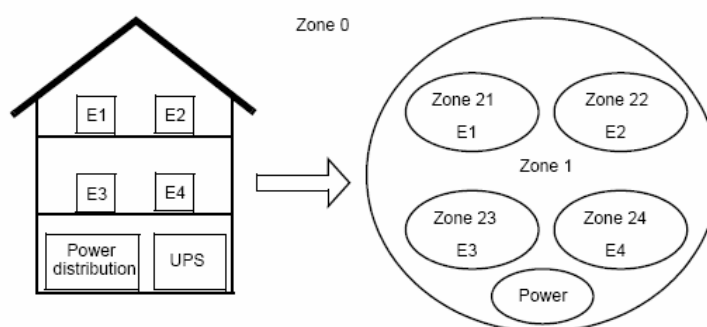
kabelføringene best mulig isolert fra mastkonstruksjonen. Oppe ved antenneelementet finnes et felles sammenkoplingspunkt, men ellers skal kablene legges isolert fra mast og andre jordforbindelser.

Master montert direkte på bygninger skal ha lynavledning. En ekstra jordledning som legges på utsiden av bygningen oppfattes som en elektrisk forsterkning av bygningens ytre sonegrense.

3.11.5 Basisinstallasjon og soneinndeling

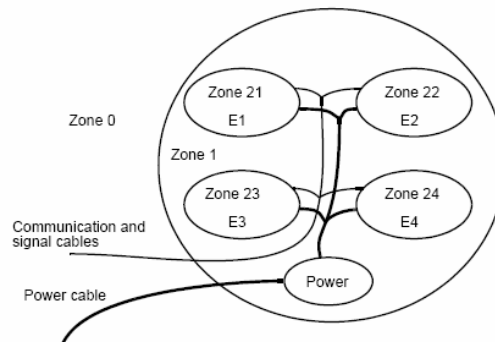
En bygning inneholder fire forskjellige kontorlandskaper utstyrt med datamaskiner og andre elektroniske hjelpemidler. I underetasjen finnes inntak for kraft, kommunikasjon og datalinjer, samt kraftfordeling med batteriforsynt UPS og andre felles fasiliteter. Basisinstallasjonen og forslag til soneinndeling er vist i figur 3.18.

Figur 3.18:
Basisinstallasjonen og
forslag til soneinndeling



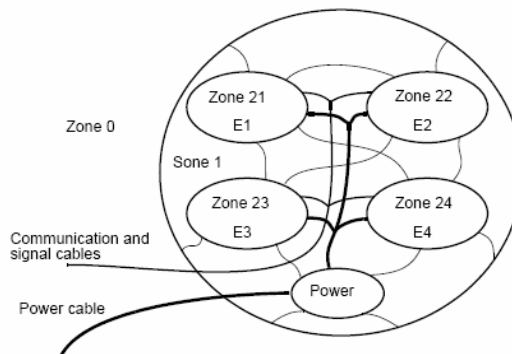
Til fordeling av kraft, kommunikasjon og datanett anbefales en gren- eller treformet struktur, se figur 3.19.

Figur 3.19:
Kabeltrær



Dersom trestrukturen inneholder større jordsløyfer er faren for systemforstyrrelser tilstede. Påkjenningen minsker og skjermeffektiviteten økes ved å bryte større sløyfer opp i flere mindre. Prinsippet er vist i følgende figur.

Figur 3.20:
Potensialutjevningsnettverk



3.11.6 Sammenkopling av enheter

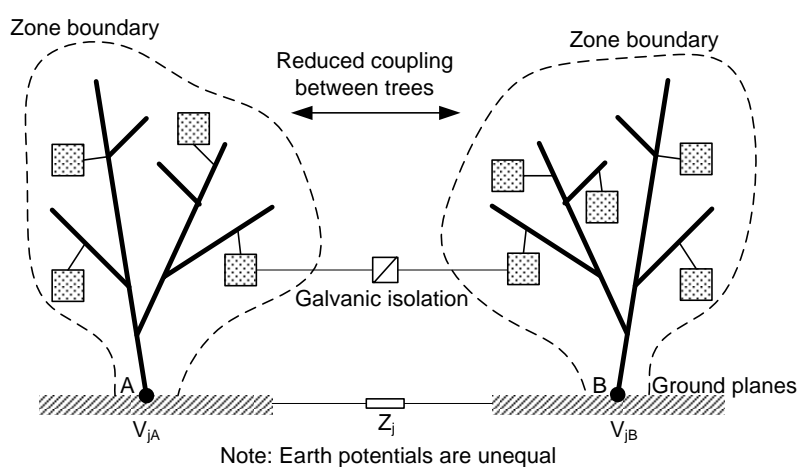
I systeminstallasjoner med stor utstrekning varierer jordpotensialet langs jordoverflaten og gir ulik jordreferanse for distribuerte elektrotekniske enheter. Problemet omgås ved å kople klaser av uavhengige enheter til et felles jordtre. To eller flere jordtrær med individuelle rotpunkt og avgrensede topologiske soner etableres i en distribuert installasjon. Dersom en signalforbindelse skal strekkes mellom enheter som tilhører forskjellige jordtrær, må to spesifikke forhold iakttas:

- En uønsket jordsløyfe kan oppstå på grunn av strømmer som flyter i kabelskjerm eller signalledere.

- Forskjellen i jordpotensial kan overskride grensen for undertrykt liketaksstøy (common mode suppression) slik at signalmottakere feilfunksjonerer.

Problemet unngås ved å innføre en eller annen type galvanisk skille i forbindelsen som bryter opp jordsløyfen, se figur 3.21.

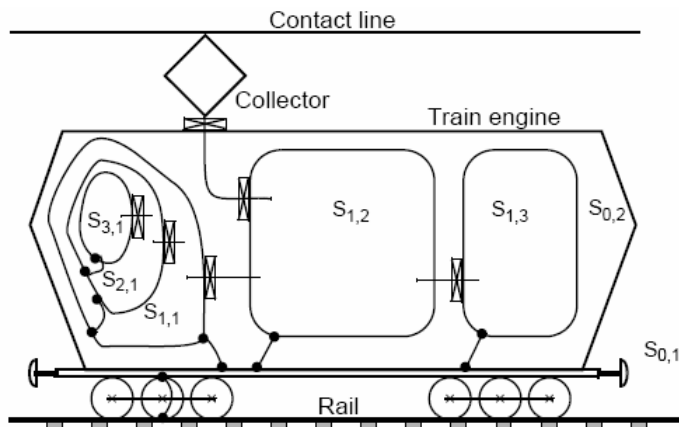
Figur 3.21:
Sammenkopling av enheter på forskjellige jordtrær



3.11.7 Topologiske soner i et elektrisk lokomotiv

Figur 3.22 viser de hypotetiske sonene for det indre i et elektrisk lokomotiv eller togsett. Da det finnes mange varianter av elektriske traksjonsenheter og elektronisk instrumentering, er figuren kun ment som retningslinje hvordan en slik soneinndeling kan gjøres. Et nyttig tips er å atskille tyngre effektforbrukere og sikkerhets- og instrumenteringsutstyr i egne soner med tilfredsstillende skjerming og støybeskyttelse.

Figur 3.22:
 Topologiske soner
 i et elektrisk lokomotiv



- S_{0,1}: The topology of the traction power system
- S_{0,2}: Zone including the body of the car
- S_{1,1}: Zone including the driver's cabin
- S_{1,2}: Zone for main power handling
- S_{1,3}: Zone for power conversion and traction motors
- S_{2,1}: Zone for instrumentation, communication, ATC equipment etc
- S_{3,1}: Zone for noise sensitive apparatus in shielded boxes

3.12 Referanser

- [1] K. S. Lee, (Editor): EMP Interaction: Principles, Techniques and Reference data. Report no. AFWL-TR-80-402, Air Force Weapon Laboratory, December 1980.
- [2] P. A. Chatterton and M. A. Houlden: EMC, Electromagnetic Theory to Practical Design. John Wiley & Sons Ltd, ISBN 0 471 92878 X, First edition 1992.
- [3] F. M. Tesche: Electromagnetic Topology: Analysis of RF effects on electrical systems. Slideshow. Clemson University, June, 2001.
- [4] Dag Bjørkløf (ETL SEMKO): Shielding for EMC. Compliance Engineering Feature Article, 1999.
- [5] Torbjørn Karlsson and Gøran Dalen: Riktig jording og skjerming. Forelesninger på EMC seminar, Bergen Airport Hotell, september 1995.
- [6] Hans Berstad: Praktiske eksempler på topologi. EMC seminar, Storefjell Høyfjellshotell, september 1993.
- [7] Kjell Malvig, (Editor): Elektromagnetisk sameksistens/Electromagnetic Compatibility. EEU- og studentkompendium (Fag 43316) ved NTNU, første utgave 1997.
- [8] Energiforsyningens fellesorganisasjon Enfo: Publikasjon nr. 445-2000 EMP-sikring av kraftforsyningsanlegg. Håndbok. ISBN 82-436-0405-7.
- [9] Hans Berstad: Electromagnetic Topology. Lecture at NEIU seminar, Finse 2006.