

■ www.sintef.no ■



**Energiforsyningens
Forskningsinstitutt A/S**

Adresse: 7034 Trondheim
Telefon: 73 59 72 00
Telefax: 73 59 72 50
Telex: 55 513 efi n

Foretaksnr.: 939350675

TEKNISK RAPPORT

SAK/OPPGAVE (tittel)

JORDINGSARRANGEMENT I ELKRAFTANLEGG

Beskrivelse av forskjellige jordingsarrangement for å femskaffe underlag til utarbeidelse av håndbok for utforming av jordingsanlegg.

SAKSBEARBEIDER(E)

Arne P. Brede, Hans K. Høidalen, Ove Rørvik,
Herlof Seljeseth, prosjektleder

AP Brede

OPPDRAAGSGIVER(E)

Statnett, ENFO, div.everk iht. Effen-prosjektet

TR NR.

TR A 4185

DATO

1994-06-20

OPPDRAAGSGIVER(E)S REF.

Jan A. Olsen, ENFO

GRADERING

Åpen

PROSJEKTNR.

300338.03

OPPLAG

23

ANTALL SIDER

71

ELEKTRONISK ARKIVKODE

n:\dok\ho\apb\9403702.tek

FAGGRUPPE

Kraftsystemteknikk v/Lars Rolfseng

ISBN

82-594-0681-0

RAPPORTTYPE

3, 6, 7

AVDELING

Elkraftteknologi v/John Kulsetås

RESULTAT (sammendrag)

Basert på erfaring, gjennomgang av litteratur, retningslinjer og normer (vedleggsrapport 1) er prinsipielle krav til utførelse av jordingsanlegg for kraft-, transformatorstasjoner og luftlinjer beskrevet. Ut fra litteratur og erfaring (vedleggsrapport 2) er forslag til oppbygging av jordingsanlegg for stasjoner og linjer innenfor spenningsnivået 11-420kV skissert. I tillegg til anbefalinger er problemstillinger og vurderinger vedrørende jording diskutert.

STIKKORD

EGENVALGTE

JORDING

EMC

ELKRAFTANLEGG

JORDINGSPLAN

INNHALDSFORTEGNELSE

HOVEDRAPPORT : JORDINGSARRANGEMENT I ELKRAFTANLEGG . 1

VEDLEGGSRAPPORTER

VEDLEGGSRAPPORT 1. JORDING I ELFORSYNINGSSANLEGG	7
V1.1. Innledning	8
V1.2. Definisjoner og begreper	12
V1.3. Systemjording	19
V1.4. Beskyttelsesjording	19
V1.4.1. Jordpotensial	19
V1.4.2. Skrittspenning og berøringspenning	21
V1.4.3. Strømgjennomgang i mennesker	22
V1.4.4. Kritiske faktorer og punkter	26
V1.4.5. Tiltak for å begrense potensialforskjeller	26
V1.5. Sikkerhetstiltak for arbeid på høyspenningsanlegg	27
V1.5.1. Leder for kopling	27
V1.5.2. Leder for sikkerhet	27
V1.5.3. Spenningskontroll	28
V1.5.4. Jordingsprosedyrer	28
V1.5.5. Arbeidsjording	29
V1.5.6. Endepunktsjording	29
V1.5.7. Markeringsjording	29
V1.5.8. Redskap for jording og kortslutning	31
V1.6. Overspenningsjording	31
V1.6.1. Spesielle krav og løsninger	31
V1.6.2. Bygningsinstallasjoner	33
V1.6.3. Lynvernanlegg	34
V1.6.4. Fordelingstransformatorer	34
V1.7. EMC-jording	35
V1.7.1. Behov	35
V1.7.2. Hovedprinsipp for EMC-jording	36
V1.7.3. Stasjonsjording	37
V1.7.4. Jording av signalreferanse	37
V1.7.5. Jording i ett punkt	37
V1.7.6. Jording i flere punkt	38
V1.7.7. Flytende referanseplan	38
V1.7.8. Overføring av støysignaler	38
V1.7.9. Direkte kopling/Common Mode/Serie Mode	39
V1.7.10. Induktiv kopling	40

V1.7.11. Kapasitiv kopling	41
V1.7.12. Elektromagnetisk stråling	42
V1.7.13. Frekvensavhengighe	42
V1.8. Jordelektroder	43
V1.9. Referanser	45

VEDLEGGSRAPPORT 2. JORDINGSANLEGG FOR STASJONER OG LINJER

V2.1. Innledning	48
V2.2. Jordinganlegg i kombinert kraft- og transformatorstasjon	49
V2.2.1. Hovedjording	49
V2.2.1.1. Jordnett i friluftsløpskoplingsanlegg	50
V2.2.1.2. Fundamentjording ved stativ og bygninger	52
V2.2.1.3. Jordnett i SF ₆ -anlegg	52
V2.2.1.4. Jordelektroder i kraftstasjon	53
V2.2.1.5. Toppliner/jordlinjer på kraftledninger og utgående jordkabler	53
V2.2.1.6. Forbindelse mellom de andre delene av jordinganlegget	54
V2.2.1.7. Spesielle forbindelse ved SF ₆ -anlegg	54
V2.2.2. Jording av apparater og andre anleggsdeler	55
V2.2.2.1. Høyspenningsapparater i friluftsanlegg	55
V2.2.2.2. Lavspenningsanlegg	56
V2.2.2.3. Kontrollanlegg og dataanlegg	56
V2.2.2.4. Jording av teleanlegg	59
V2.2.2.5. Jording av gjerde, rørledninger etc.	61
V2.3. Jording av kraftledninger	61
V2.3.1. Virkning av toppliner/jordlinjer og jordelektroder	62
V2.3.2. Jording av 300-400 kV ledninger	64
V2.3.3. Jordkabelanlegg	64
V2.3.4. 66-132 kV ledninger	64
V2.3.5. 11-22 kV ledninger	65
V2.4. Transformatorstasjoner	65
V2.5. Jording av nettstasjoner/fordelingstransformatorer	65
V2.5.1. Oversikt over ulike alternativer	65
V2.5.2. Vurdering av forskjellige tiltak	66
V2.5.3. Anbefalinger	69
V2.6. Referanser	70

JORDINGSARRANGEMENT I ELKRAFTANLEGG

Beskrivelse av forskjellige jordingsarrangement for å framskaffe underlag til utarbeidelse av håndbok for utforming av jordingsanlegg.

Basert på erfaring, gjennomgang av litteratur, retningslinjer og normer (vedleggsrapport 1) er prinsipielle krav til utførelse av jordingsanlegg for kraft-, transformatorstasjoner og luftlinjer beskrevet. Ut fra litteratur og erfaring (vedleggsrapport 2) er forslag til oppbygging av jordingsanlegg for stasjoner og linjer innenfor spenningsnivået 11-420kV skissert. I tillegg til anbefalinger er problemstillinger og vurderinger vedrørende jording diskutert.

Energiverkene har behov for en håndbok som viser hvordan jording i elkraftanlegg, alle typer og spenningsnivå, bør utføres. Det finnes ikke slike nyere retningslinjer som omfatter alle typer anlegg, tar hensyn til nyere anleggsteknikk og som er tilpasset norske forhold. Håndboken skal også beskrive målinger av jordmotstand, skritt- og berøringsspenninger. I tillegg vil den behandle induserte spenninger både i telelinjer og signalkabler. Anbefaling av vern for telelinjer vil også bli en del av innholdet i håndboken.

Selve håndboken vil hovedsakelig bestå av anbefalinger og være tilrettelagt for praktisk bruk. Problemstillinger og vurderinger omkring jording vil bare i liten grad bli behandlet.

Det har skjedd store forandringer i anleggsteknikk både på høyspenningsiden og på kontroll- og overvåkingssiden de siste 20 år siden EFI sist var sterkt engasjert i jording på de høyere spenningsnivå. Det kan nevnes bruk av gassisolerte anlegg, belagte liner, større bruk av kondensatorbatterier, avledere, avansert elektronisk vern, moderne databasert prosesskontroll, overvåkings- og informasjonssystemer. Dette innebærer en konsentrasjon og blanding av ulike typer utstyr som opererer både med høye og lave effekter. Normalt resulterer dette i et vanskelig elektromagnetisk miljø for de elektroniske informasjonssystemene som arbeider med stor hastighet og med svært lave effektnivå i forhold til elkraftkretser.

Korrekt utforming av jording for de ulike anleggstypene er en av de viktigste forutsetningene for å få elektromagnetisk kompatibilitet, EMC, dvs. at alle typer utstyr og anlegg kan fungere feilfritt i nærheten av hverandre.

For å framskaffe underlag til en håndbok for jording i elkraftanlegg skal det ved EFI utarbeides tre tekniske rapporter i løpet av 1994 som tar for seg ulike problemstillinger omkring jording. Denne rapporten er den første i rekken.

I vedleggsrapport 1 er det gitt en prinsipiell beskrivelse av de krav som settes til utførelse av beskyttelses- og sikkerhetsjording som benyttes for å ivareta hensynet til sikkerhet ovenfor mennesker, dyr og tekniske anlegg. Innenfor begrepet sikkerhetsjording ligger forhold som omhandler prosedyrer og krav til hvordan elkraftanlegg skal jordes, f.eks. arbeidsjording, endepunktsjording og markeringsjording, når det foregår arbeid på anleggene.

Det er i vedleggsrapport 1 også gitt en prinsipiell beskrivelse av overspenningsvern for utstyr og apparater mot påkjenninger fra atmosfæriske utladninger. Det er spesielt lagt vekt på å få fram betydningen av å redusere høyfrekvente spenningsfall i jordingsanleggene som følge av høyfrekvente utladningsstrømmer. Under høyfrekvente strømforløp kan spenningsfallet i tilledninger bli betydelig sammenlignet med spenningsfallet over selve jordingsmotstanden. Nødvendigheten av å ha så korte tilledninger som mulig til den komponent eller anleggsdel som skal vernes blir sterkt fremhevet.

Problemstillinger vedrørende evnen til sameksistens mellom forskjellige apparater og utstyr, EMC, er et meget omfattende tema. Hovedprinsippene for EMC-jording er behandlet i vedleggsrapport 1. Med utgangspunkt i nyere forslag fra CIGRE, IEC og CENELEC er det gitt en del forslag til hovedregler for hvordan slik jording bør utføres innenfor elkraftanlegg.

Flere forskjellige løsninger har vært benyttet for jording av støyfølsomt elektronisk utstyr, EMC-jording. Eksempelvis kan nevnes adskilt jording til egen jordelektrode, noe som er direkte farlig, egne (separate) jordingsanlegg tilkoplede beskyttelsesjord (PE) i bare ett punkt eller løsninger med bruk av beskyttelsesjord i hvert enkelt apparat. Det er mulig å benytte forskjellig grad av separate jordledere for forskjellige typer av utstyr hvis det er nødvendig. Denne løsningen vil normalt skape betydelige anleggs- og vedlikeholdsmessige komplikasjoner.

Basert både på litteratur, praktisk erfaring og normer (vedleggsrapport 2) er det tatt opp problemstillinger og foretatt vurderinger i forbindelse med utforming av praktiske jordingsanlegg. Det er skissert oppbygging av jordingsanlegg for en kombinert 300-420kV kraft- og transformatorstasjon, jording av 11-420kV kraftlinjer, 66-132kV transformatorstasjoner og nettstasjoner på

11-22kV fordelingsnettnivå. Selv om presentasjonsformen i vedleggsrapport 2 er noe annerledes enn den som skal brukes i håndboken, vil de skisserte forslagene være viktige bidrag til selve håndboken.

VEDLEGGSRAPPORT 1

JORDING I ELFORSYNINGSANLEGG

VEDLEGGSRAPPORT 1.

JORDING I ELFORSYNINGSANLEGG

Orientering om jording for å beskrive problemstillinger i forbindelse med jording av forskjellige typer utstyr og anlegg.

.....

På bakgrunn av normer, litteratur, retningslinjer og erfaring fra praktisk utforming av anlegg er det gitt en prinsipiell beskrivelse av krav som settes til utførelse av beskyttelses- og sikkerhetsjording, jording av overspenningsvern og jording av elektronisk utstyr.

V1.1. INNLEDNING

For elektriske anlegg har en flere forskjellige målsetninger med jording:

- personvern (beskyttelsesjording, sikkerhetsjording og jording av lynvernlegg)
- overspenningsvern av utstyr og apparater (systemjording og avlederjording)
- vern mot funksjonsforstyrrelser og skader på apparater (EMC-jording)

De forskjellige målsetninger for jording som er beskrevet ovenfor, stiller ulike krav til jordingsanlegget. Forskjellige separate jordingsanlegg er derfor delvis brukt. Som hovedregel er de tilknyttet felles jordelektroder.

Beskyttelsesjording, sikkerhetsjording og systemjording er hovedsakelig rettet mot driftsfrekvente forstyrrelser som f.eks. jordfeil og feilkoplinger, og er relativt enkle å utføre. Men i høyspenningsnett med systemjording må en stille strenge krav til jordelektroder. For øvrig dreier det seg om forskriftsmessige krav til ledertverrsnitt, materialvalg, mekanisk og kjemisk bestandighet for jordingsanlegget, [1].

EMC eller elektromagnetisk kompatibilitet, definert som evnen til sameksistens mellom forskjellige apparater og anleggsdeler i et anlegg, omfatter funksjonsforstyrrelser og skade på utstyr, dvs. også overspenningsvern. Elektroniske apparater er i mange tilfeller følsomme for relativt små potensialforskjeller mellom ulike innganger som f.eks. signal, kraftforsyning og jord. Dette gjelder både jordfeil ved driftsfrekvens, normal drift og ved transienter pga. driftskoplinger eller atmosfæriske utladninger.

Å benytte jord som returleder for elkraft- eller signalkretser har historisk sett også vært en annen målsetning med jording. Dette har ofte ført til funksjonsforstyrrelser eller andre ulemper. Jord som returleder anbefales ikke med mindre det er helt klart at slike ulemper kan unngås i tilstrekkelig grad.

Lynvernanslegg og EMC-jording må også dimensjoneres ut fra transiente, høyfrekvente strømforløp som f.eks. lynnedslag, feil- eller driftskoplinger i kraftnettet. Slik jording stiller særlige krav til utforming av jordledere. For lynvernanslegg har også selve jordelektroden stor betydning, mens den ofte har liten betydning for lokale EMC-problem.

I signalanslegg anvendes det også til dels overspenningsavledere som vern mot driftsfrekvente overspenninger pga. jordpotensial eller induserte langsspenninger i telelinjer ved jordfeil i kraftnettet.

Jordpotensial, skritt- og berøringsspenninger oppstår pga. jordens begrensede elektriske ledningsevne og den strøm som flyter i jordsmonnet. Driftsfrekvent potensial oppstår typisk i et feilsted og i den/de stasjon(er) der det er systemjordet nøytralt punkt. Induserte langsspenninger oppstår i området langs feilbeheftet ledning, jmf. figur V1.1, og til dels langs andre ledninger som mater inn en del av feilstrømmen fra mer fjerne stasjoner. En vesentlig årsak til dette er at driftsfrekvent strøm trenger dypt ned i jorda. Ekvivalent returvei for driftsfrekvent feilstrøm ligger i ca 10km dybde ved en jordresistivitet på $10.000\Omega\text{m}$. Ved lavere resistivitet konsentreres returstrømmen mer langs kraftledningene. Ekvivalent returdybde er ca 1km ved $100\Omega\text{m}$ som etter norske forhold er en lav verdi.

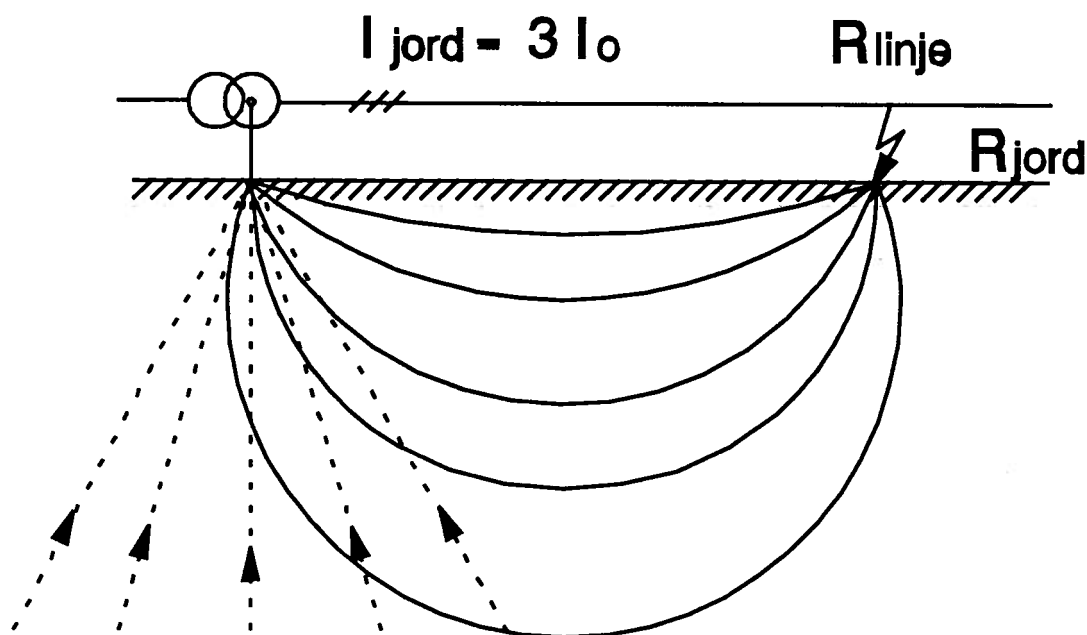
Jordede toppliner på kraftledninger er et effektivt middel til å senke driftsfrekvent jordmotstand og jordpotensial i stasjoner. Gjennomgående toppliner med høy ledningsevne vil føre indusert strøm og vil redusere den strøm som flyter til jord. Derved reduseres normalt både jordpotensial og indusert langsspenning.

Både nødvendig underlagsdata, beregningsmetoder og beregningsverktøy for bestemmelse av jordslutningsstrøm avhenger av nettype, driftsjording og ønsket nøyaktighet. Ofte kan det gjøres forenklinger for å framskaffe en oversikt som viser typiske verdier for et nett med spolejordet nøytralt punkt, isolert nøytralt punkt eller høyohmig resistansjording der kapasitetene mot jord er de viktigste elementene ved siden av spole og resistans. For forenklete beregninger av jordslutningsstrømmer henvises det til f.eks. [2].

For å angi *størrelsesorden* av verdier for enpolte jordslutningsstrømmer i nett med kapasiteter mot jord fra hver fase lik C_j , linjespenning U og nullsystemstrøm I_0 , kan en benytte følgende formel:

$$I_j = \sqrt{3} I_o = \sqrt{3} \omega C_j U \quad [V]$$

For en typisk 22kV luftlinje med jordline vil C_j gjerne ligge i området 4,9-6,0nF/km pr.fase mens en typisk 132kV luftlinje med planoppheng og jordline normalt vil ha kapasiteter pr.fase i området 6,4-6,8nF/km.



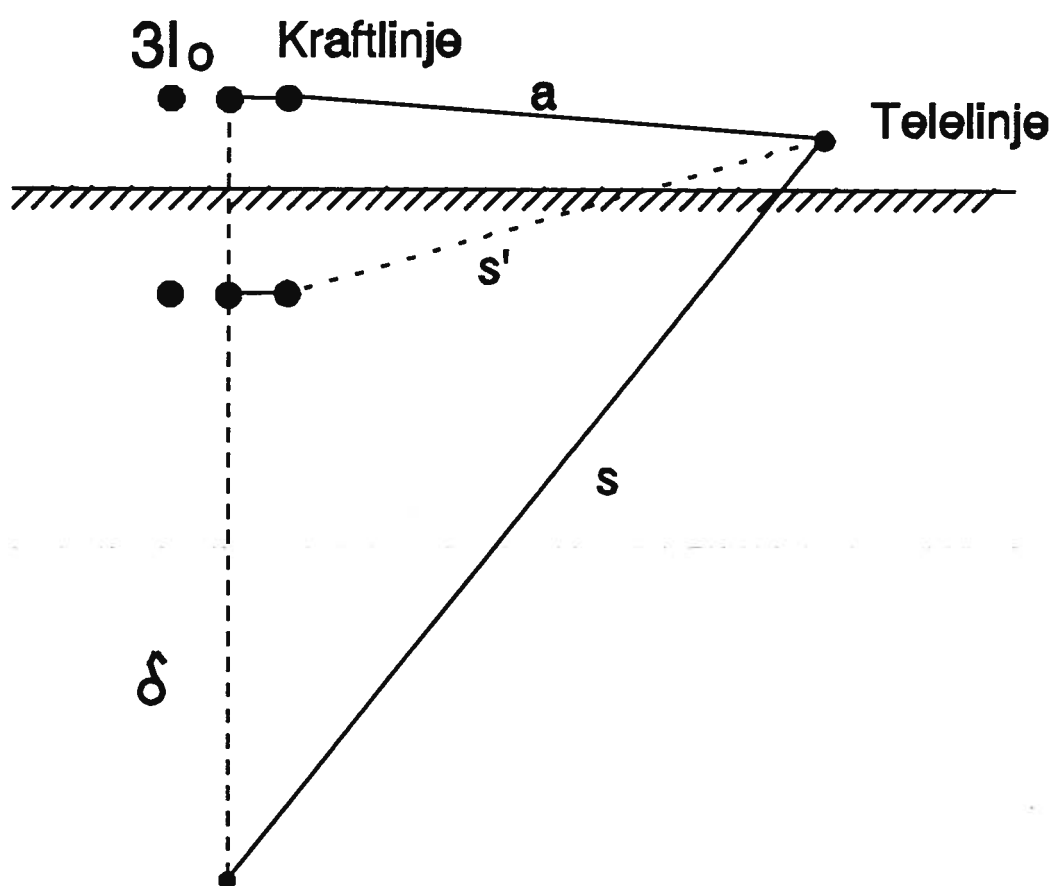
Figur

V1.1a: Prinsipielt strømførslp i jord ved jordfeil i direkte jordet nett.
Stiplet: Forstørret radiell strmfordeling forholdsvis nær jordelektroden.

Reaktansen for jordledere øker nesten proporsjonalt med frekvensen. Jordmotstander får også en induktiv komponent, men denne øker mindre enn proporsjonalt med frekvensen. Derfor blir reaktans og indusert spenning i jordledere og elektroder ofte av større betydning enn jordpotensial ved høye frekvenser. Det er dette som tilsier bruk av korte jordforbindelser.

Av denne grunn er det også vanskeligheter med å måle jordpotensial ved høye frekvenser (impulsmotstand) pga. induisert spenning i måleledningene.

I figur V1.1b er det for et direkte jordet nett prinsipielt vist hvilke spenninger som kan indueres i en nærført telelinje ved jordfeil i kraftnettet.



Figur V1.1b. Indusert spenning i telelinje pga. jordfeil i kraftnettet. Aksielt snitt av kraftledning og nærført teleledning. δ er ekvivalent dybde for returstrømmen i jordsmonnet.

Indusert spenning pr. km parallellført telelinje: $U_i = \omega M 3I_0$, hvor $\omega M \approx 0,02\pi \ln(\delta/a)$ [Ω/km]. Formelen er tilnærmet og gjelder for 50 Hz og a opp til ca 0,25 δ .

I de etterfølgende kapitler vil problemstillinger vedrørende jording for forskjellige formål og hvordan jordingen prinsipielt bør utføres for elforsyningsanlegg bli nærmere beskrevet.

V1.2. DEFINISJONER OG BEGREPER

De internasjonale definisjoner med relasjon til jording, som er gitt av IEC, finnes spredd over flere forskjellige publikasjoner, f.eks. IEC 50 (121, 131, 151), IEC 601 (601, 604) og IEC 826 (826). Disse synes ikke å dekke alle de begreper vi anvender. En del oversettelser til norsk finnes f.eks. i: Forskrifter for elektriske forsyningsanlegg, [1], Forskrifter for elektriske bygningsinstallasjoner, [5], Driftsforskrifter for elektriske forsyningsanlegg, [9], Jording av tekniske installasjoner i bygninger, [11], og Håndbok i lynvernanlegg for bygninger, [13].

En del IEC-definisjoner er ikke gode, og i en del pågående arbeid i CENELEC benyttes bl.a. modifiserte definisjoner i forhold til IEC. De definisjonene som anvendes her er bare delvis i overensstemmelse med IEC men angir den betydning vi legger i de enkelte begrep. Det er så langt som mulig også tatt med i parentes engelske ord for begrepet.

GRUNNLEGGENDE DEFINISJONER

Jord (earth)

Ledende masse i jordskorpen, dvs. forskjellige jordarter, sand, stein, berg, vann, hav. Forskjellig fra IEC 50 (826-04-01).

Fjern jord/sann jord/nøytral jord (remote earth/reference earth)

Jord som ligger utenfor potensialområdet rundt strømførende jordelektroder.

Jordelektrode (earth electrode)

Leder som er nedgravd/satt i jord eller innstøpt i betong i jord.

Jordforbindelser/jordleder/beskyttelsesleder (protective conductor PE)

Beskyttelsesleder for vern mot berøringsfare ved sammenkopling av forskjellige jordelektroder og jordsamleskinner samt tilkopling av utsatte og andre ledende anleggsdeler og eventuelt nøytralpunkt. IEC 50 (826-04-05).

Beskyttelsesleder

Særlig brukt om PE-leder i lavspenningskabel.

Jording

Omfatter metoder og tiltak for å forbinde anleggsdeler og apparater til jord.

Potensialutjevningsleder (bonding conductor)

En leder mellom to nærliggende ledende strukturer som fjerner mulig potensialforskjell mellom dem.

Utsatt ledende anleggsdel (exposed conductive part)

Ledende del som kan bli spenningssatt ved jordfeil i det elektriske anlegget.

Annen ledende del (extraneous conductive part)

Del som kan ha et annet elektrisk potensial i farlig nærhet til utsatt del/jordingsanlegg.

Jordingsanlegg/jordingssystem (earthing system)

Et begrenset anlegg/system av jordledere, elektroder og tilkoblede ledende strukturer (f.eks. stålarmring, stålkonstruksjoner, ledende kabelmantler og jordliner). Vil også omfatte deler av lynvernanlegg og tilkoblede jordingsanlegg for tele- og kontrollsignal.

Jordliner

Tråd/wire langs kabelføringer eller på kraftledninger.

Toppline

Jordline plassert som lynoppfangere på kraftledninger.

Innføringsvern

Toppline/jordline ca 1-5 km ut fra en kraft-/transformatorstasjon.

Hovedjording

Hele jordingsanlegget bortsett fra tilkoplinger til utsatt og annen ledende del, lynvernanlegg og spesielle tilkoplinger til tele- og kontrollanlegg (signaljord/instrumentjord/egensikker jord).

Lynvernanlegg

Hele systemet som brukes til å verne et område mot virkningene av lynutladninger. Det kan bestå av både utvendige anlegg og anlegg innenfor bygninger.

I prinsipp dreier det seg om jording av overspenningsavledere for linjer/kabler og om jording av nedledere for vern av bygninger. Det handler naturligvis også om plassering, utforming og dimensjonering av vernet. Lynvern av bygning krever en egen separat tilknyttet jordelektrode.

Separat jording

Egne jordledere og eventuelt elektroder som er galvanisk tilknyttet større jordingsanlegg, f.eks. jording av tele- og kontrollanlegg eller lynvernanlegg.

Adskilt jording

Egne jordelektroder for forskjellige anlegg eller deler av anlegg som er anordnet slik at jordingsanleggene ikke påvirker hverandre vesentlig via jord, f.eks. ved fordelingstransformatorer i mastearrangement.

Signalreferansejord

Spesielle isolerte jordledere som benyttes som referansejord for følsomme elektroniske apparater, ofte tilkople et sentralt punkt av PE-jord/hovedjord eller sentralt punkt av kontroll-/elektronikkutstyr.

TYPER AV ELEKTRODER**Horisontal elektrode (horizontal earth electrode)**

Nedgravd elektrode f.eks. wire, tråd eller bånd (normalt i 0,3-2m dybde). Den kan være utformet som ring rundt fundament, radialer, kråkefot, maskenett eller kombinasjoner av disse.

Jordspyd (earth rod)

Elektrode av stang eller rørform som normalt drives ned til større dybder.

Jordkabel som elektrode (cable with earth electrode effect)

En kabel med ledende uisolert skjerm eller armering. Kan ha ytre korrosjonsvern med minst samme ledningsevne som omgivende jord.

Fundamentjord elektrode (foundation earth electrode)

Leder som er støpt inn i eller under betongfundament. Kan være armeringsjern eller koppertråd.

Potensialstyringselektrode (potential grading earth electrode)

Elektrode som er spesielt utformet for å endre forløp av overflatepotensial og redusere berøringsspenning, (se Spenninger ved jordfeil).

VIKTIGE ELEKTRISKE PARAMETRE FOR JORD OG ELEKTRODER**Jordresistivitet (earth resistivity)**

Jordens spesifikke resistivitet omkring en elektrode, ρ , [Ωm].

Jordmotstand (resistance to earth)

Elektrodens resistans mot fjern/sann jord, R_j , [Ω], dvs. forholdet mellom potensialet på elektroden og den strøm den leder til jord. Ren resistans fås bare for relativt små elektroder eller likestrøm.

Impedans til jord (impedance to earth)

Driftsfrekvent impedans mellom et jordingsanlegg eller deler av dette og fjern jord.

Langs impedans for jordline

Driftsfrekvent impedans med jord som retur, [Ω/km].

Avledningsmotstand for jordline

Driftsfrekvent jordmotstand pr. lengdeenhet [Ω/km].

Overføringsimpedans (transfer impedance)

Generelt uttrykk for forholdet mellom spenning som oppstår i en leder/sløyfe/krets som følge av strøm i en annen. Det kan være galvanisk og/eller induktiv kopling mellom sløyfer der jord er returvei for strøm.

Permittivitet

Forholdet mellom elektrisk flukstetthet og feltstyrke, $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$, hvor $\epsilon_0 \approx 8,85 \cdot 10^{-12} \text{F/m}$, ϵ_r har normalt verdier i området ca 5-20.

Impulsmotstand

Forholdet mellom toppverdi av en impulsspenning og toppverdien av strømmen i et valgt punkt for en jordleder.

HENSIKTER MED JORDING**Beskyttelsesjording (protective earthing)**

Jording av ledende anlegg-/apparatdel som kan bli spenningsatt ved jordfeil i det elektriske anlegget for å unngå farlig berøringsspenning.

Systemjording (system earthing)

Driftsmessig jording av et punkt i en spenningsførende krets enten direkte eller via en impedans.

Sikkerhetsjording

Midlertidig jording, f.eks. arbeidsjording, markeringsjording eller endepunktsjording, av elektriske anleggsdeler som er utkoplet under bygging/vedlikehold/reparasjon for å hindre farlig berøringsspenning pga. innkopling eller påvirkning fra andre anlegg som er i drift.

EMC-jording

Jording for å oppnå elektromagnetisk sameksistens mellom forskjellige typer elektriske apparater og anlegg.

SYSTEMJORDING AV NØYTRALPUNKT**System med isolert nøytralpunkt**

Nøytralpunktet er helt isolert fra jord eller forbundet til jord via en høy impedans av hensyn til signaloverføring eller relévern/overvåking.

System med resonansjordet/spolejordet nøytralpunkt

System der minst ett nøytralpunkt er jordet via slokkespole/Petersenspole.

System med lavohmig jordet nøytralpunkt

Et system der minst ett nøytralpunkt er jordet direkte eller via en impedans som er dimensjonert slik at det oppnås pålitelig automatisk utkopling av alle mulige feilsteder. (Jording kan også skje automatisk når feil inntreffer.)

System med forsinket jording ved feil

System med isolert eller resonansjordet nøytralpunkt hvor det i tilfelle av at en lysbuefeil ikke slokker av seg selv, blir foretatt en direkte eller lavohmig jording av nøytralpunktet etter få sekunder.

Jordfeilstrom/jordslutningsstrom i feilstedet ved enpolet jordslutning er :

- ved isolert nøytralpunkt lik nettets kapasitive feilstrom,
- ved resonansjordet nøytralpunkt (spole) lik ukompensert reststrom,
- ved lavohmig jordet nøytralpunkt lik enpolet kortslutningsstrom.

SPENNINGER VED JORDFEIL

Jordpotensial (earth potential rise)

Spenningen (U_J) mellom jordingsanlegg/elektrode og fjern jord.

Overflatepotensial (earth surface potential)

Spenningen (U_0) mellom et punkt på jordoverflaten og fjern jord.

Berøringsspenning (touch voltage)

Spenningen ($U_B = U_J - U_0$) som en person kan bli utsatt for ved å berøre en jordet anleggsdel og som står i en horisontal avstand på 1m fra berøringspunktet.

Skrittspenning (step voltage)

Spenningen ($S_S = \Delta U_0$) som en person kan bli utsatt for ved å stå med føttene 1m fra hverandre nær jordingsanlegget.

Overført spenning (transferred voltage)

Differens mellom jordpotensial (U_J) overført via isolerte ledere (kabelskjerm, rør, skinner, nøytralleider) til et mer fjerntliggende sted og overflatepotensialet (U_0) på dette stedet. Det samme gjelder for ledere som fører et lavt potensial inn til jordingsanlegget fra et sted utenfor jordingsanlegget.

FEILSTRØMBEGREP

Jordfeil (enpolet) (earth fault)

En ledende forbindelse pga. isolasjonsfeil eller overslag mellom en faseleder og jord eller jordet anleggsdel.

Dobbel jordfeil (double earth fault)

Ledende forbindelse til jord på to faseledere på to forskjellige steder.

Multippel jordfeil

Jordfeil på mer enn to steder.

JORDSLUTNINGSSTRØM

Jordslutningsstrøm/jordfeilstøm (earth fault current)

Den strøm (I_F) som flyter gjennom feilstedet ved feil på bare en faseleder, dvs. 3 ganger nullsystemstrøm i feilstedet; $3I_0$.

Nullsystemstrøm (zero sequence current)

Er lik 1/3 jordfeilstøm (også ved feil på flere faser på samme sted).

Strøm til jord (current to earth)

Den strøm ($r \cdot I_F$) som flyter til jord via alle jordelektroder inklusive jordliner/toppliner og kabelskjermer og dermed medfører jordpotensial $U_j = r \cdot I_F \cdot Z_j$.

Reduksjonsfaktor, r, (reduction factor)

Forholdet mellom strøm til jord og jordfeilstøm. Forholdet er mindre eller lik 1 pga. kompenserende induisert strøm i toppliner, jordliner eller kabelskjermer.

V1.3. SYSTEMJORDING

For å stabilisere driftsfrekvente spenninger i forhold til jord, oppnå hurtig selektiv utkopling av jordfeil eller slokking av lysbue ved forbigående jordfeil benyttes systemjording. Normalt er dette en jording av nøytralt punkt i transformator eller generator direkte eller via en impedans, f.eks. resistans eller slokkespole.

Ved enpolt jordfeil i et spolejordet nett vil spolestrømmen, $I_L = U_0 / j\omega L$ være 180° faseforskjøvet i forhold til den kapasitive jordstrøm på de friske fasene, $I_C = j3\omega C_0 U_0$ og lede denne til jord gjennom spolen, istedet for gjennom feilstedet når spolen er riktig innstilt. U_0 og C_0 er hhv. nullsystemspenning og -kapasitet sett fra feilstedet.

Ifølge [1] skal direkte jordet nett i Norge kun benyttes dersom det finnes et relesystem som ved jordslutning hurtig kobler ut, dvs. innen 0,5s, den delen av anlegget hvor jordfeilen befinner seg, og hittil kun i nett med spenning over 132kV. For tiden pågår det imidlertid vurdering av direktejording av 132kV nettet i Nord Norge og planlegging for deler av nettet på Vestlandet.

Driftsmessig jordforbindelse for høyspenningsanlegg skal tilknyttes samme jordingsanlegg som stasjonens *beskyttende* jordforbindelse.

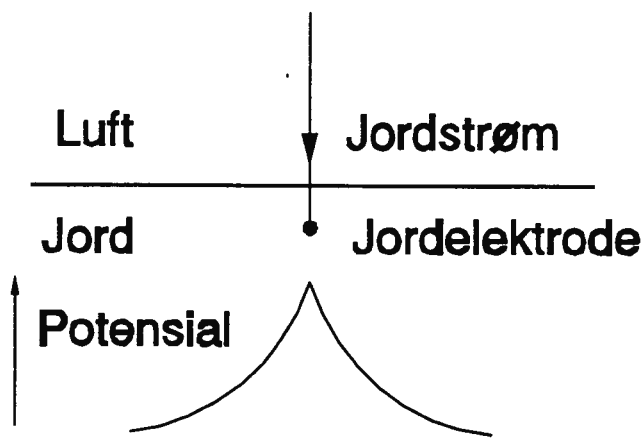
V1.4. BESKYTTELSESJORDING

Elektriske apparater eller utstyr i høyspenningsanlegg har ofte en ytre kapsling eller fundament/feste som kan bli spenningførende ved isolasjonsfeil. Det kreves beskyttelsesjording av slike utsatte anleggsdeler for å unngå farlige spenningsdifferanser som mennesker eller dyr kan bli utsatt for.

Beskyttelsesjording er i hovedsak en driftsfrekvent (50-60Hz) problemstilling.

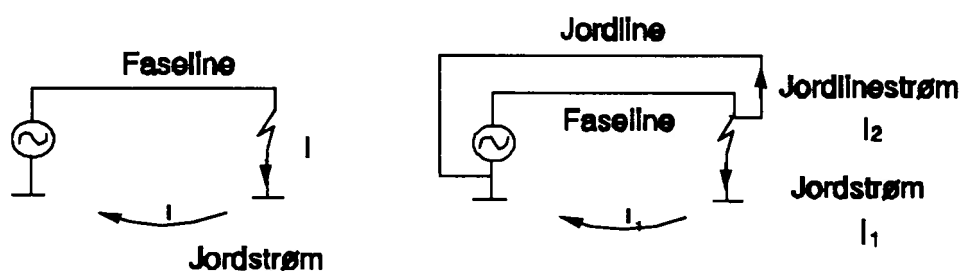
V1.4.1 Jordpotensial

Når en strøm går til jord vil det, i forhold til fjern jord (sann jord), bygge seg opp et jordpotensial på stedet som følge av jordsmonnets resistivitet. Potensialet vil bli størst ved jordelektroden der strømtettheten er størst for så å avta mot null utover. I figur V1.2 er det prinsipielt vist potensialoppbygging i jordsmonnet fra en langsgående jordelektrode i bakken som fører strøm.



Figur V1.2: Potensialoppbygging rundt en jordelektrode nedgravd i bakken.

Ved enpolt jordfeil vil jordstrømmen normalt være størst ved direktejordet eller lavohmig jordet nett. Jordstrømmen vil avta ved bruk av gjennomgående jordline eller jodede kabelskjermer.

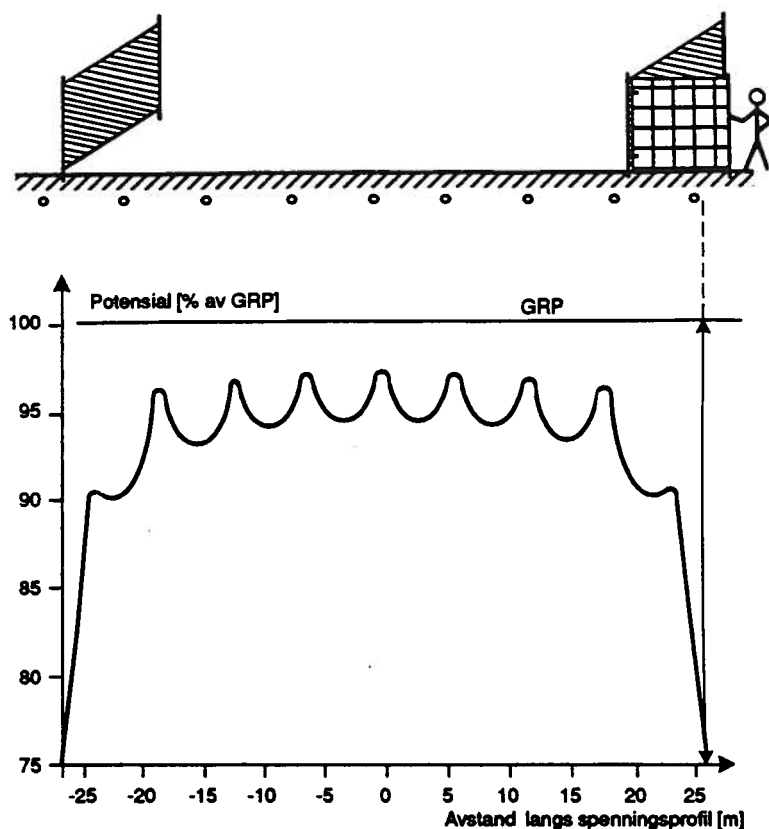


Figur V1.3: Jordstrøm uten (venstre) og med jordline (høyre). $I_1 < I$.

Jordpotensialet er proporsjonalt med jordstrømmen og jordsmonnets resistivitet.

I Norge kan jordsmonnets resistivitet bli svært høy p.g.a. fjellgrunn og tele i jorda om vinteren. For at jordingsanlegget skal fungere effektivt er det derfor viktig at jordelektroder plasseres i

telefri jord når dette er mulig. Jordresistiviteten minker normalt med økende fuktighet i jordsmonnet.



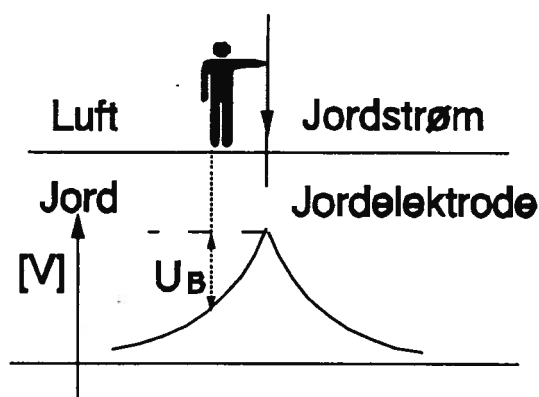
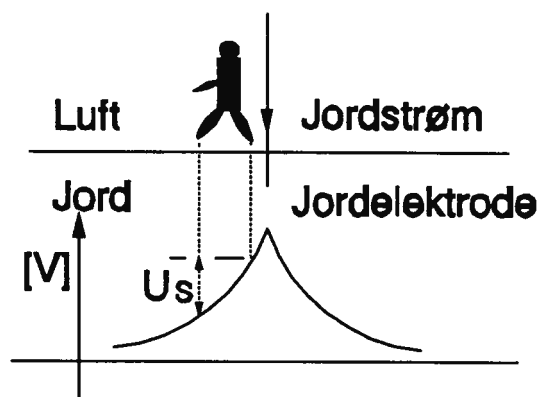
Figur V1.4: Fordeling av jordpotensial viser mulighet for høye berøringspenninger nær gjerde som omslutter et areal med jordelektroder i bakken. GPR er maksimal spenningstigning for jordelektroden.

Jordingsanleggets oppgave er å fordele strømmen utover i jordsmonnet. En enkel jordelektrode eller et system av jordelektroder av liten utstrekning vil føre til stor strømtetthet rundt elektroden og dermed et høyt potensial i forhold til fjern jord. Et elektrodeanlegg av større utstrekning vil fordele strømmen i jordsmonnet slik at strømtettheten og dermed jordpotensialet blir mindre. Jordelektroder som går dypt i jorda fører normalt til mindre potensialoppbygging enn elektroder som ligger like under jordoverflaten. Ledertverrsnitt for jordelektroder har liten betydning for jordmotstand og potensial. Tverrsnitt velges derfor normalt ut fra krav til strømtetthet og mekanisk eller korrosjonsmessig bestandighet.

V1.4.2. Skrittspenning og berøringspenning

Med *skrittspenning* menes potensialforskjellen en person som går eller står på jordoverflaten i nærheten av et jordingsanlegg kan bli utsatt for. Skrittspenningen er lik spenning mellom en persons føtter med 1 m skrittavstand. Skrittspenningen U_s er illustrert i figur V1.6.

Med *berøringsspenning* menes den potensialforskjellen en person som står på jordoverflaten og berører en ledende del av jordingsanlegget kan bli utsatt for. Berøringsspenningen er lik spenningsforskjellen mellom jorden der personen står og den gjenstand som berøres. Berøringsspenningen U_B er skissert i figur V1.5.

 Figur V1.5: Berøringsspenning, U_B .

 Figur V1.6: Skrittspenning, U_S .


Med til kategorien berøringsspenning hører også de tilfeller hvor en person berører en gjenstand som er jordet et annet sted enn i umiddelbar nærhet av der hvor personen står. Slike tilfeller kan være særlig kritiske. Dersom spenningen på slike anleggsdeler kan bli svært høy, som f.eks. ved kabelskjermmer som bare er jordet i en ende, må disse behandles som spenningsførende selv om de ligger på jordpotensial ved normal drift.

V1.4.3. Strømgjennomgang i mennesker

Dersom en person utsettes for en høy berørings- eller skrittspenning kan dette føre til strømgjennomgang gjennom deler av kroppen. Det er foretatt undersøkelser i forskjellige land for å kartlegge hvor mye strøm et menneske tåler. Virkningen av vekselstrøm i området 15-100Hz gjennom menneskekroppen er beskrevet i IEC rapport 479-1, [3]. Rapporten angir også impedanskarakteristikker for menneskekroppen. I tabell T1, [4], er det gitt en oppsummering av fysiologisk virkning på kroppen som funksjon av 60Hz strømgjennomgang. Det henvises også til §413.1, "Beskyttelse ved hjelp av automatisk utkobling av strømtilførselen" i [5].

Tabell T1: Virkning av 60Hz vekselstrøm på menneskekroppen, [4].

Strømstyrke gjennom kroppen	Tidsintervall for strømgjennomgang	Fysiologisk virkning på kroppen.
0-1mA	Tiden uten betydning	Nesten umulig å kjenne strømmen.
1-15mA	Tiden uten betydning	Krampe inntreffer. Ved strømstyrke høyere enn 10mA er det ikke mulig å slippe taket om en spenningsførende leder.
15-30mA	Noen minutter	Krampaktige sammentrekninger i armene.
30-50mA	Fra sekunder og opp til få minutter	Uregelmessig hjertervirksomhet. Stigning av blodtrykket. Sterk krampe. Bevisstløshet. Ved lengre varighet av strømmen er det fare for hjerteflimmer.
50-500mA	Lengre tid enn en hjerterperiode	Fare for hjerteflimmer. Bevisstløshet. Sterk sjokkvirkning. Merker i huden på grunn av strømmen.
Mer enn 500mA	Kortere tid enn en hjerterperiode	Hjerteflimmer. Tidspunkt når strømmen treffer hjertet er av betydning. Bevisstløshet. Merker i huden på grunn av strømmen.
	Lengre tid enn en hjerterperiode	Hjertekrampe. Krampen opphører straks dersom ikke tiden er for lang. Bevisstløshet. Strømmen forårsaker merker og brannskår i huden.

En strøm på 0,1A kan være dødelig. For likespenning regnes grensen å ligge på 0,5A. For frekvenser større enn 10kHz er grensen mye større enn 0,5A.

Kroppsvekten er bl.a. bestemmende for hvor høye strømmen et menneske tåler. Det er normalt den strømstyrken som fører til hjerteflimmer (60-100mA) som er farligst.

Også mindre strømmen enn 50mA kan være svært farlige. Dette har sammenheng med at muskelsammentrekning ofte fører til at en person utsettes for strømgjennomgang over lengre tid pga. vanskeligheter med å frigjøre seg fra spenningsførende anleggsdeler. Sekundære skader kan

også oppstå ved f.eks. fall. Ytterligere materiale vedrørende strømgjennomgang i mennesker kan finnes i f.eks. [6] og [7].

Varighet:

Varigheten av strømgjennomgangen er svært avgjørende for om en bestemt strømstyrke vil medføre skader eller ikke. Hurtig og automatisk utkobling av jordfeil, normalt 0,5s, er meget viktig for å hindre personskade. Det er generelt akseptert at en kan tillate en strøm I_B som er omvendt proporsjonal med kvadratroten av strømmens varighet t_s uten at det opptrer skader.

$$I_B = \sqrt{\frac{S_B}{t_s}} \quad [A]$$

hvor faktoren S_B bl.a. er avhengig av personens kroppsvekt.

I amerikanske standarder, [8], er det for en person på 70 kg anbefalt en tillatt strøm på

$$I_B = \frac{0,157}{\sqrt{t_s}} \quad [A]$$

Kroppsmotstand:

Forsøk indikerer at kroppsmotstanden går ned til ca $R_k = 1000\Omega$. Denne verdien er bl.a. avhengig av strømmens frekvens og hudens fuktighet.

Kontaktmotstand:

I tillegg til kroppsmotstanden kommer også overgangsmotstanden, R_p , mellom en person og spenningsførende omgivelser. Godt isolerende gummisko vil redusere strømgjennomgangen betydelig i forhold til fuktig og skittent skotøy. Det er vanlig å regne konservativt slik at det mest kritiske tilfellet legges til grunn. Mellom en persons hender og en ledende gjenstand fra en del av jordingsanlegget antas overgangsmotstanden å være null.

Berøringsspenning:

I serie med kroppsmotstanden antas i dette tilfellet at de to overgangsmotstandene, R_f , mellom føttene og jord komme i parallell med hverandre. Dette gir en tillatt berøringsspenning lik

$$U_B = (R_k + 0,5R_f) I_B \quad [\text{V}]$$

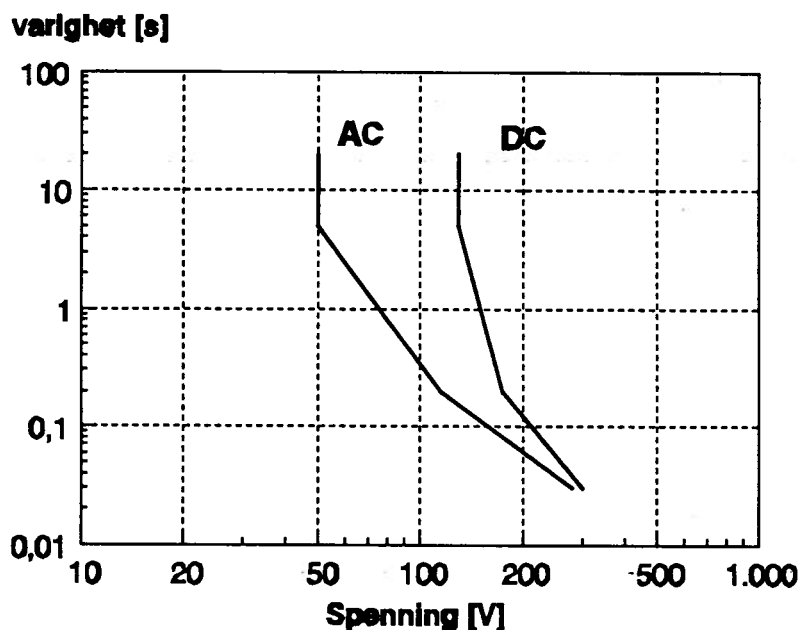
Skrittspenning:

I dette tilfellet vil de to overgangsmotstandene mellom føttene og jord komme i serie med kroppsmotstanden. Dette gir en tillatt skrittspenning lik

$$U_S = (R_k + 2R_f) I_B \quad [\text{V}]$$

For en gitt maksimalverdi på I_B viser disse overslagsberegningene at en person tåler mindre berøringsspenning enn skrittspenning.

Norske forskrifter for bygningsinstallasjoner (FEB), [5], angir direkte tillatt berøringsspenning U_B . Disse er vist i figur V1.7.



Figur V1.7: Tillatt berøringsspenning i hht. Forskrifter for bygningsinstallasjoner, [5]. Kurven for AC angir effektivverdier.

I Forskrifter for Elektriske Forsyningsanlegg (FEF), [1], er det angitt at jordingen skal være slik utført at spenningen mot jord bli så lav som mulig. Ved enpolt jordslutning skal den ikke overskride $125V_{\text{eff}}$. På mindre beferdede steder tillates $250V_{\text{eff}}$. Dersom det ikke er praktisk mulig

å oppfylle ovenstående bestemmelser, skal det sørges for at berørings- og skrittspenninger begrenses til rimelige og så vidt mulig ufarlige verdier. I de tilfeller hvor jordslutningsstrømmen utkoples automatisk etter høyst 0,5s, kan en berøringsspenning på 250V og en skrittspenning på 500V anses for rimelige verdier.

V1.4.4. Kritiske faktorer og punkter

En del kritiske faktorer som må være til stede for at en feil skal kunne betraktes som en sikkerhetsrisiko for personer eller dyr kan oppsummeres i følgende oppstilling:

- Høy jordmotstand og/eller feilstrøm til jord. Spesielt jordfeil i direktejordet nett.
- Dobbel jordfeil.
- Person/dyr som forbinder punkter med stor potensialforskjell.
- Lang varighet av feilen eller automatisk gjeninnkobling.

Noen punkter eller anleggsdeler i kraftnettet vil være spesielt kritiske med tanke på personsikkerhet. Av disse kan nevnes:

- Håndtak til f.eks. manuelle skillebrytere. Disse blir ofte berørt. Muskelsammentrekning gjør at personen kan bli hengende fast.
- Ved f.eks. jordede gjerder rundt en nettstasjon. Særlig i randsonen rundt et jordingsanlegg kan det oppstå store potensialforskjeller, jmf. figur V1.4.
- Kabelskjermene. Hvis disse ikke er jordet direkte på stedet må de behandles som spenningsførende.
- Kortvarige perioder med stor strømgjennomgang i overspenningsavledere.

V1.4.5. Tiltak for å begrense potensialforskjeller

Nedenfor er det vist en del generelle tiltak som kan settes iverk for å begrense faren for skadelige berørings- eller skrittspenninger.

- Først og fremst gjelder det å ha et godt jordingsanlegg. I dette ligger det å ha et sammenhengende system med jordelektroder av stor utstrekning med tilstrekkelig tverrsnitt og helst telefri jord.
- Dernest må ledende deler som kan være utsatt for berøring kobles til jordingsanlegget. Tilkoblingen må skje så nært som mulig til jordingsanlegget.

- Et beskyttende lag av singel eller grov pukk og asfalt kan legges over bakken i et utendørs jordingsanlegg. Dette gir ekstra isolasjon mot jordingsanlegget for en person som går på gruslaget. Gruslaget må ha høyere resistivitet enn jordsmonnet for at dette skal ha effekt.
- Gjennomgående jordline eller jordede kabelskjermer.
- Beskyttelse av ledende deler med isolasjon.

V1.5. SIKKERHETSTILTAK FOR ARBEID PÅ HØYSPENNINGSANLEGG

Ansvars- og myndighetsforhold mellom de som gir ordre om og som skal utføre arbeid i forbindelse med høyspenningsanlegg blir regulert gjennom *Driftsforskrifter for Høyspenningsanlegg med utfyllende orientering (DH)*, [9]. DH omhandler hvordan det praktiske arbeidet skal planlegges og gjennomføres. Selve utførelsen og oppbyggingen av høyspenningsanlegg er regulert gjennom *Forskrifter for Elektriske Forsyningsanlegg (FEF)*, [1].

Driftsforskriftene (DH) foreskriver hvordan sikkerheten skal ivaretas med ansvarsfordeling mellom personell og hvilke typer jording som er påkrevet.

V1.5.1. Leder for kopling

Kobling av høyspenningsanlegg skal ledes av en utpekt *leder for kopling*. Leder for kopling for det enkelte koplingsoppdrag skal utpekes blant de personer som er godkjent ved skriftlig instruks. Leder for kopling skal sørge for at koplinger utføres på en forsvarlig måte og at arbeidet er i samsvar med driftsforskriftene. Det blir lagt stor vekt på at koplinger skal planlegges og utføres slik at den ikke medfører fare for operatøren som skal utføre koplingen, og at det ved f.eks. feilkoplinger ikke skal oppstå fare for andre personer, dyr eller eiendom.

V1.5.2. Leder for sikkerhet

Sikkerheten ved ethvert arbeid på eller nær ved høyspenningsanlegg skal ivaretas av en utpekt leder for sikkerhet. Leder for sikkerhet for det enkelte arbeid skal utpekes blant de personer som er godkjent ved skriftlig instruks. Leder for sikkerhet skal sørge for at arbeidet utføres på forsvarlig måte og i samsvar med driftsforskriftene. Leder for sikkerhet skal bl.a. sørge for nødvendig spenningskontroll på arbeidsstedet etter at melding fra leder for kopling er mottatt om at nødvendig frakopling og sikring mot innkopling er foretatt og at eventuelle endepunktsjordinger er etablert.

Leder for sikkerhet skal sørge for at nødvendig jording og kortslutning på arbeidsstedet blir utført før han gir tillatelse til arbeidslaget om at arbeid kan settes igang. Når arbeidet er utført skal leder for sikkerhet sørge for at sikringstiltakene blir opphevet og selv gi beskjed til leder for kopling om at anlegget er klart for spenningsetting.

V1.5.3. Spenningskontroll

Før jording og kortslutning skal det foretas spenningskontroll på arbeidsstedet. Kontrollen skal gi sikker informasjon om hvorvidt de aktuelle anleggsdeler er uten driftsspenning. Selve utførelsen skal ikke innebære fare for utøveren. Den vanligste måten å utføre spenningskontroll på er ved hjelp av spenningsindikator som skal funksjonstestes umiddelbart før og etter at selve spenningskontrollen er foretatt.

Spenningsindikator uten betjeningsstang må ikke bringes nærmere spenningsførende deler enn risikoavstanden. Spenningsindikator med betjeningsstang må ved bruk holdes i betryggende avstand fra jordede anleggsdeler og nabofaser slik at uforvarende jordslutning eller kortslutning i anlegget unngås.

Ved spenningskontroll med spenningsindikator skal det alltid være minst 2 personer tilstede. Driftslederen eller den han bemyndiger kan dog tillate at spenningskontrollen utføres av én person dersom det ansees for tvingende nødvendig og dersom vedkommende samtykker i dette. Vedkommende må imidlertid være godkjent som leder for sikkerhet.

V1.5.4. Jordingsprosedyrer

Før arbeidet påbegynnes og så lenge det varer, skal anlegget være jordet og kortsluttet.

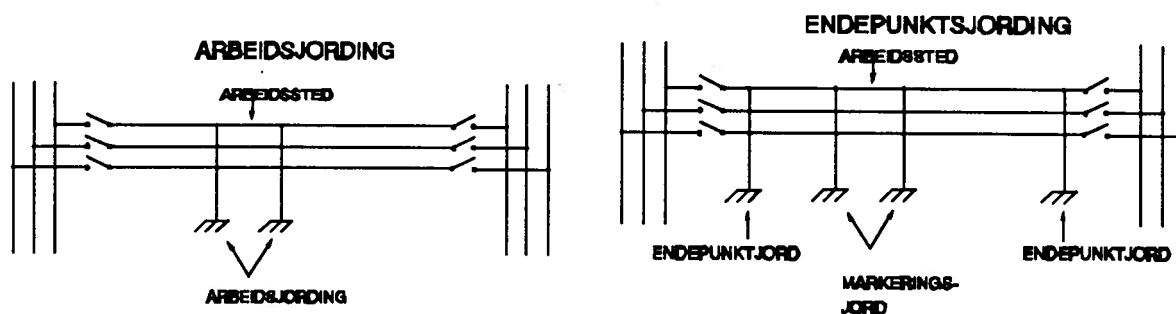
Jording og kortslutning skal foretas på arbeidsstedet. Jording og kortslutning av anleggsdeler på eller i umiddelbar nærhet av arbeidsstedet kalles arbeidsjording. Markeringsjording kombinert med endepunktsjording kan benyttes som alternativ til arbeidsjording på selve arbeidsstedet.

Hensikten med arbeidsjording er å forhindre at det på selve arbeidsstedet skal oppstå farlige spenningsforskjeller forårsaket av utilsiktet innkopling av anleggsdeler, tordenvær, innvirkning fra nærliggende sterkstrømsanlegg eller restspenninger fra tidligere spenningsatte deler av anlegget.

V1.5.5. Arbeidsjording

Det er leder for sikkerhet som har ansvaret for at det under hele arbeidet er arbeidsjording på arbeidsstedet. Arbeidsjordingen skal være dimensjonert for å tåle full kortslutning. Arbeidsjordingen skal også markere at anleggsdelen som det arbeides på ikke er spenningsatt. Arbeidsjordingen skal derfor være synlig fra det sted hvor det arbeides fra såfremt den ikke er plassert i umiddelbar nærhet, f.eks. i en nabocelle.

Prinsipiell utførelse av arbeids-, markerings- og endepunktsjording er vist i figur V1.8.



Fig

ur V1.8: Forskjellige måter å utføre forskriftsmessig kortslutning og jording på.

V1.5.6. Endepunktsjording

Endepunktsjording er jording og kortslutning ved alle frakoplingsteder hvorfra et anlegg kan settes under spenning. Den skal være dimensjonert for anleggets største kortslutningsstrøm.

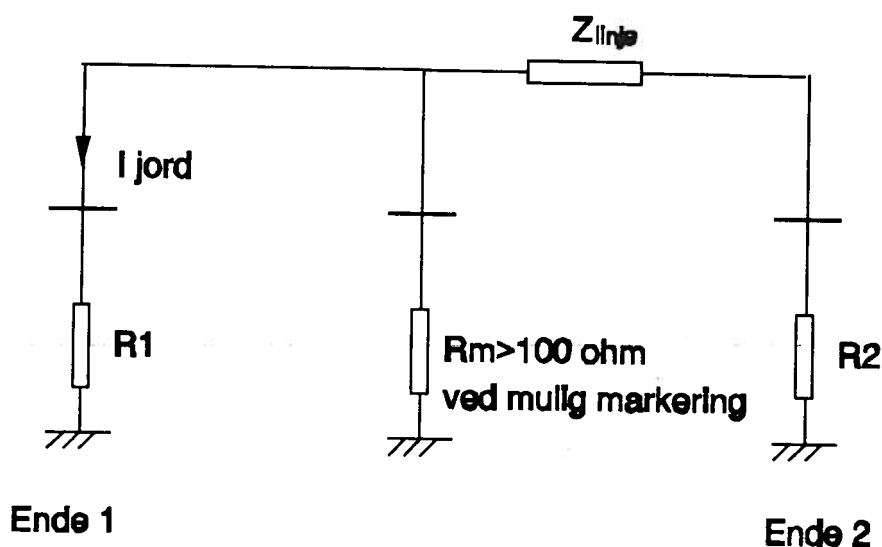
Det er leder for kopling som skal sørge for endepunktsjording. Framgangsmåten ved etablering av endepunktsjording avviker ikke fra etablering av vanlig arbeidsjording.

V1.5.7. Markeringsjording

Unntaksvis kan det av praktiske grunner benyttes arbeidsjording som ikke er dimensjonert for anleggets fulle kortslutningsstrøm. Arbeidsjordingen kalles da markeringsjord og må alltid benyttes sammen med endepunktsjording. Markeringsjording skal alltid påsettes etter at endepunktsjording er foretatt.

Hensikten med markeringsjordingen blir for det første å markere at den anleggsdel det arbeides på ikke er spenningsatt og skal som ved vanlig arbeidsjording være synlig fra arbeidsstedet. Derneft skal markeringsjordingen sammen med endepunktsjordingen forhindre at det oppstår farlige spenninger på arbeidsstedet.

Lokal potensialutjevning oppe i en mast eller inne i en kiosk kan være meget god, men særlig aktsomhet bør utvises mellom arbeidsted og jord på bakken. Uansett hvordan arbeidsjordingen utføres kan det være vanskelig å gardere seg mot potensialforskjell mellom faser og jord på arbeidsstedet dersom det er induserte langsspenninger eller jordpotensial i de aktuelle jordingspunktene. Dette kan illustreres med følgende eksempel hvor en tenker seg at en feilstrøm går til jord i en koplingsstasjon.



Figur V1.9: Beregningseksempel som viser at farlige spenninger kan opptre ved bruk av markeringsjording.

3 faser i parallell gir normalt en impedans i linjen i underkant av $1 \Omega/\text{km}$ ved 50Hz.

Dersom linjelengden er kortere eller i underkant av 5km, vil linjeimpedansen Z_{linje} være mindre enn 5Ω . Dersom en velger å se bort fra linjeimpedansen, vil potensialet over markeringsjord være gitt av spenningsdelingen mellom de to mostanden $R1$ og $R2$. En feilstrøm på 100A og motstander $R1$ og $R2$ begge er lik 10Ω , vil resultere i at spenningen i forhold til sann jord over markeringsjord-motstanden R_m blir ca 500V.

V1.5.8. Redskap for jording og kortslutning

Driftsforskriftene angir at jording og kortslutning skal utføres enten ved

- fast jordslutter med eller uten momentinnkopling
- flyttbart jordingsapparat
- annet egnet jordingsutstyr godkjent av NVE

Eksempel på annet egnet jordingsutstyr er jordingsspyd og jordingsvogn. Ved godkjenningen vil det bli avgjort om utstyret skal betraktes som flyttbart jordingsapparat slik at det ved bruk av utstyret kreves minst 2 personer tilstede. Ved store kortslutningsstrømmer vil det av sikkerhetsmessige grunner normalt bli benyttet fastmontert jordingsutstyr.

V1.6. OVERSPENNINGSJORDING

Både stasjonære og transiente overspenninger vil normalt opptre i elkraftnett som følge av ulike typer feil- og kplingsforløp. I tillegg kommer forstyrrelser som følge av atmosfæriske utladninger. For linjer, kabler og apparatanlegg vil de elektriske kretsparametrene, som er frekvensavhengige størrelser, også være med på å bestemme størrelsen på overspenningene. Av de elektriske egenskapene til jordsmonnet har resistiviteten størst betydning for motstanden mot fjern (sann) jord.

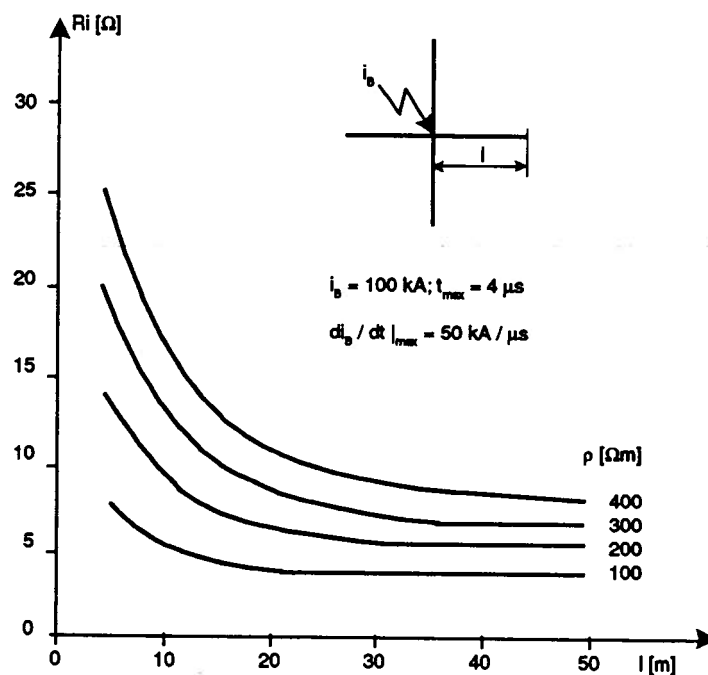
Det er svært viktig å redusere spenningsstigningen i jordingsanleggene som følge av høyfrekvent strømflyt i jordsmonnet. I dette tilfellet er det ikke lenger en 50Hz problemstilling en behandler slik som ved drifts- eller beskyttelsesjording. Normalt øker spenningsfallene med økende strømstyrke. Kortvarige overspenninger som følge av spenningsfall i jordingsanlegget kan være livstruende for både mennesker og dyr samt føre til skader på utstyr og anlegg.

V1.6.1. Spesielle krav og løsninger

For høyfrekvente strømmer har utformingen av jordelektroden og lengde og antall av tilknytningsledere stor betydning for motstanden til sann jord. Dette gjelder spesielt når den fysiske utstrekningen av jordingsanlegget eller deler av dette blir sammenlingbar med bølgelengden av de høyfrekvente strømmene. Jordingsmotstanden (bølge-/impulsmotstand) har stor betydning for de transiente spenningsfall som kan opptre både i jordingsanleggene og i apparatanleggene forøvrig.

For ett og samme jordsmonn vil maskenett normalt gi lavere impulsmotstand enn vertikale eller horisontale jordledere. Impulsmotstanden stiger normalt med steilheten på strømfronten og kan gjerne nå en øvre grense på 100-150 Ω for en enkel horisontal stråle avhengig bl.a. av jordsmonnets resistivitet.

En reduksjon av impulsmotstanden for horisontale jordledere kan f.eks. oppnås ved å forlegge ledere som stråler ut fra et felles punkt. Fire stråler med innbyrdes 90° vinkel ("kråkefotjording") er en praktisk og nærmest optimal løsning for å redusere impulsmotstanden til sann jord. Mer enn fire stråler gir relativt liten motstandsreduksjon. Figur V1.10 viser beregnede verdier for impulsmotstand basert på en gitt støtstrøm for et jordingsanlegg med fire horisontale stråler som funksjon av lengden på strålene. Jordresistiviteten er parameter. Strømmen har en toppverdi på 100kA som nås etter 4 μ s.



Figur V.1.10: Beregnet impulsmotstand for 4 sammenkoblede horisontale jordledere påtrykt en gitt støtstrøm med jordresistiviteten som parameter, [10].

Impulsjord, bølgemotstand og karakteristikk for høyfrekvente strøm- og spenningsforløp på jordledere vil bli nærmere behandlet i den andre av de totalt tre tekniske rapportene som vil bli laget før jordingshåndboken blir utgitt.

Dersom en vil ta hensyn til en relativt lang avstand mellom jordingsanlegget i bakken og tilkoplingen over jordsmonnet, kan dette modelleres med å legge inn en induktans i serie med jordingsanleggets motstand mot sann jord. Under høyfrekvente strømforløp kan spenningsfallet over tilledningen (induktansen) bli betydelig og kommer i tillegg til spenningsfallet over selve jordingsanlegget i bakken. Det er slike forhold som gjør at det bør tilstrebes kortest mulig avstand mellom jordingsanlegget og det apparat eller anlegg som skal jordes/beskyttes.

V1.6.2. Bygningsinstallasjoner

I alle bygningsinstallasjoner skal det være en klemme eller skinne for hovedjordingen. Til hovedjordingen skal følgende ledere være tilkople:

- hovedjordleder
- PE-leder
- hovedutjevningsledere
- andre beskyttelsesledere
- ledere for driftsjording (dersom driftsjording benyttes)
- elverkets PE-, eventuelt PEN-leder
- utjevningsforbindelse til lynvernanlegg
- signalreferansejord for tele- og dataanlegg
- hovedvannledning
- hovedrør for sentralvarmeanlegg o.l.
- avløpsrør, også når dette er ledende (muffe med innvendig ledende belegg monteres før avgreininger)

Når det gjelder oppbygging og forlegning av jordlederanlegg i bygningsinstallasjoner henvises det til [5]. I tillegg er det ved EFI utarbeidet en håndbok som gir retningslinjer for jording av tekniske installasjoner i bygninger, [11]. EFI har også utgitt en håndbok for hvordan signalkabler i bygg fortrinnsvis bør forlegges, og hvor det er gitt anbefaling om jordingsstrategi for strømforsyningens beskyttelsesjord i forhold til signalreferansejord, [12].

Når det gjelder jording av bygningsinstallasjoner i forbindelse med kraftstasjonsanlegg, kraftstasjoner og nettstasjoner henvises det til kapittel V2.2 i vedleggsrapport 2.

V1.6.3. Lynvernanlegg

Formålet med lynvernanlegg (lynavledningsanlegg) er å gi bygninger eller anlegg nødvendig beskyttelse mot atmosfæriske overspenninger ved å redusere risikoen for tap og skade på både mennesker, dyr og tekniske anlegg. Retningslinjer for hvordan lynvernanlegg bør konstrueres er bl.a. utgitt av Norsk Brannvernforening, [13]. Veiledning for dimensjonering og utførelse er i samsvar med IEC-norm nr.1024-1.

Utformingen av selve jordingsanlegget og potensialutjevning mellom lynvernanlegget og andre tekniske installasjoner er to punkt som må vies stor oppmerksomhet.

Det skal være et eget jordingsanlegg i bakken for lynvernanlegget. Dette bør konstrueres i hht. en eller flere av de metoder som er vist i den andre av de tre rapportene som vil bli laget før jordingshåndboken blir skrevet. Det er spesielt viktig å få den høyfrekvente impedansen (impulsmotstanden) så lav som mulig. Elektrodeanlegget skal tilkoples hovedjordskinne sammen med PE-jord og andre jordelektroder evt. hovedutjevningsskinne, (FEB 91, § 542.4), [5].

V1.6.4. Fordelingstransformatorer

Et vanlig problem i høyspenningsnettet er lynoverspenninger som forårsaker tenning/gjennomslag i nøytralpunktets gjennomslagsikring (tennspenning ca 2kV) i lavspenningsviklingen når sikring og transformatorkasse har felles jord. Dette fører normalt til strøm fra lavspenningsviklingen til jord. Av hensyn til transformerte overspenninger fra lavspenningssiden til høyspenningsidens nøytralpunkt for Yy-koblede transformatorer, vil det være fordelaktig at beskyttelsesjordingen og jordingen av nøytralpunktets gjennomslagsikring er tilknyttet hver sin elektrode. Adskilt jording vil ved luftledningsnett også være gunstig mht. å redusere risikoen for overføring av driftsfrekvent høyspenning til lavspenningsnettet via transformatorkassen.

For at et adskilt jordingsanlegg skal fungere tilfredstillende, må de to jordelektrodene være plassert i en viss avstand fra hverandre. Denne avstanden vil være avhengig av jordmonnets beskaffenhet og forlegning og utforming av jordingsanlegget. Normalt er det ønskelig med en avstand på ca 20m. Det er her viktig at tilledere til lavspenningsviklingens jordelektroder blir isolert for å hindre overslag mellom de to jordingsanleggene i nærheten av transformatoren.

Dersom adskilt jording er upraktisk for innvendig betjente nettstasjoner, bør felles jording kunne aksepteres. Det anbefales da spesielt at lavspenningsavledere monteres mellom hver fase og nøytralpunktet på lavspenningsiden for luftledningsanlegg. Lavspenningsavledere kan forøvrig anbefales for utsatte anlegg også med todelt jordingsanlegg.

V1.7. EMC-JORDING

V1.7.1. Behov

EMC (evnen til sameksistens mellom forskjellige apparater og anleggsdeler i et anlegg) er et omfattende tema. Det er f.eks. et EMC-problem når et elektrisk apparat blir skadet eller feilfunksjonerer etter lynnedslag eller pga. induerte spenninger i elforsyningsnettet. De langt fleste EMC-problemer skyldes lokale forhold innenfor den enkelte installasjon.

Hovedårsaken er at vår tids moderne elektroniske komponenter i apparater er vesentlig mer følsomme for elektromagnetiske forstyrrelser enn de elektriske apparater som tidligere var i bruk. Dette gjelder f.eks. følsomhet for underspenning (dip), korte avbrudd og transienter som oppstår under driftskoplinger eller feil. Forstyrrelser pga. kortvarige transiente spenninger skyldes ofte dårlig jordingsanlegg.

Høyfrekvente transienter kan forstyrre elektroniske apparater via nettilkoplingen, via tilknyttede signalkabler eller via jord enten direkte gjennom signalreferansejord i apparatet eller via apparatets kapasitet mot jord. Høyfrekvente potensialforskjeller i jordingsanlegget er derfor en vanlig årsak til forstyrrelser, men forstyrrelser kan også indueres i signalkabelføringer mellom forskjellige apparater. Forstyrrelsen kan også stråles rett inn i apparatet hvis støykilden (bryter eller kontaktor) er svært nær.

For å unngå forstyrrelser pga. transienter har en hittil anvendt følgende tiltak:

- ekstra potensialutjevning i områder med sterk konsentrasjon av følsomt utstyr (f.eks. datarom)
- skjerming av signalkabler
- egne jordledere til følsomt utstyr
- i mange tilfeller også helt egne jordingsanlegg for følsomt utstyr med tilknytning til øvrig jordingsanlegg bare i ett sentralt punkt

De to siste metodene krever at utstyret ikke tilkoples jordleder gjennom nettilkoplingen. Alternativt kan beskyttelsesjord tilføres fra nettet og signaljord fra eget anlegg. Dette krever at beskyttelsesjord og signaljord også er adskilt i apparatet. Det siste er ikke tilfelle i mye utstyr som er i handelen. Det synes også å være en tvilsom løsning både mht. sikkerhet og EMC.

Forskjellige internasjonale organer som IEC, CENELC og CCITT synes nå å ville anbefale maskenettjording også for større bygningsinstallasjoner. På denne måten vil potensialforskjeller i jordingsanlegget bli kraftig redusert.

Radielle jordingsanlegg i distribusjonskabel får meget stor høyfrekvensimpedans sett fra apparatene. Hvis dette medfører problem for signaloverføring/kommunikasjon mellom følsomme apparater, kan en benytte skjermet signalkabel med skjerm tilknyttet felles jord, men da vel å merke direkte til apparatkapsling/sjassis i begge ender. Dette betyr også at det etableres en maske i jordingsanlegget. For å beskytte signalkabelens skjerm mot overbelastning (50Hz) må det derfor legges en jordleder langsetter kabelen. Denne jordlederen må ha så stort tverrsnitt at den tåler den ugunstigste jordslutning i anlegget.

EMC-jording angår ikke bare høye frekvenser men hele frekvensspektret og dermed også 50 Hz ved normal drift og feil i nettet. Typiske eksempler på dette er TN-S fordelingssystem der jordlederen bare fører strøm under feil, og et TN-C system der jordlederen også kan føre driftsfrekvent belastningstrøm. I et IT system kan det også flyte kontinuerlig feilstrøm i jordledere hvis det ikke finnes feilindikering eller jordfeilbryter.

V1.7.2. Hovedprinsipp for EMC-jording

Jording for EMC-formål krever i mange tilfeller en vesentlig bedre potensialutjevning enn jording for personsikkerhet. Dette gjelder ikke bare for 50Hz men også for feil- og koplingstransienter.

Følgende hovedregler bør i hht. nyere forslag fra CIGRE, IEC og CENELEC så langt som mulig anvendes:

- Jordingsanlegget (felles for PE og EMC) bør danne så mange masker/sløyfer som praktisk mulig og eventuelt suppleres spesielt mht. EMC.
- Alle typer kabler bør legges nær jordledere og jordede strukturer tilknyttet maskenettet i den hensikt å utnytte den skjermvirkningen dette gir (små feilstrøm sløyfer og lave elektromagnetiske felt).
- Forskjellige typer kabler (strøm- og spenningsnivå, signaltyper) legges i egne grupper og helst på hver sine broer/stiger.
- Det bør bare benyttes skjermede signalkabler som forbindelse mellom forskjellige apparater.
- Kabelskjermen bør, med få unntak, forbindes til jordnet sjassis (PE) i begge ender.
- Det må alltid legges en jordleder parallelt med signalkabel, ellers kan skjermen bli overbelastet av 50 Hz feilstrøm.
- Normalt bør en unngå å legge signalkabler nær jordledere som kan føre store feilstrømmer eller atmosfæriske utladninger.

V1.7.3. Stasjonsjording

I tillegg til beskyttelsesjording, systemjording, arbeids- og markeringsjording kan det etableres et jordingsanlegg for instrumentering- og kontrollanlegg (EMC/signal-jording) for å begrense forstyrrelser (støy) i signalkretsene.

V1.7.4. Jording av signalreferanse

Kretser med elektroniske apparater og signaloverføring basert på analoge eller digitale signaler kan betraktes som en samling av flere sendere og mottakere. Kablingen mellom instrumenter og apparater er ofte komplisert. Dersom det ikke er individuelle returledere for signaler må det etableres et felles signal- eller referansepotensial som utgjør returleder for en gruppe med signalledere. .

Ideelt sett burde et slikt referanseplan ikke representere noen impedans i signalkretsene, og induserte feil/støysignaler ville derved unngås. Det er imidlertid ikke praktisk mulig å lage signal/målekretser uten overgangsmotstander eller som helt unngår kapasitive eller induktive induserte støysignaler. Det er derfor svært viktig å koordinere signaljording med resten av jordingsanlegget.

Det er hovedsakelig tre måter å lage et hensiktsmessig signalreferanseplan på:

- jording i ett felles punkt
- jording i flere punkt
- flytende referanseplan

V1.7.5. Jording i ett punkt

Denne jordingsmetoden blir brukt for å redusere sirkulerende jordstrømmer eller redusere antall jordsløyfer som normalt gir common mode (direkte koplet) støyspenninger. Dette er den mest vanlige signaljordingen i industrianlegg. Jordingen utføres ved at alle signaljordledere forbindes til et felles jordreferansepunkt.

Denne jordingsmetoden er meget effektiv for utstyr og kabling beregnet for frekvenser opp til ca 300kHz (noen kilder angir denne grensen til området 100kHz - 10MHz). Denne jordingen er mindre effektiv for høyere frekvenser hvor signalets bølgelengde er sammenlignbar med dimensjoner på apparater eller lengder av jordledere.

V1.7.6. Jording i flere punkt

Jording av apparater/signalkretser i flere punkt kan være nødvendig ved frekvenser over ca 300kHz men også ved lav frekvens (nettfrekvens) for å motvirke uønskede potensial mellom apparatene. Fordelen med et slikt system er at signalkretsene blir enklere å bygge. Det kreves imidlertid et meget godt referanseplan. Slik jording er typisk innenfor det enkelte apparat/instrument eller apparatstativ.

Jording i flere punkt krever imidlertid godt vedlikehold for å håndtere virkningen av korrosjon, vibrasjon og temperaturforskjeller. Et annet problem er at en slik flerpunkts jording kan gi uttalltelige common mode støyspenninger ved lave frekvenser dersom skjermen ikke har stort nok tverrsnitt.

V1.7.7. Flytende referanseplan

Et flytende referanseplan blir brukt til å isolere kretser eller utstyr rent elektrisk fra et felles jordplan eller fra en felles kabling som kan medføre sirkulerende jordstrømmer med påfølgende mulighet for common mode spenninger/støy.

I et slikt anlegg blir utstyret elektrisk sammenkoplet men isolert fra et felles referanseplan. En ulempe med et slikt anlegg er at statiske ladninger kan bygges opp med etterfølgende skadelige utladninger eller generering av støypulser. Det er derfor nødvendig å bygge inn utladningsmotstander til jord for å unngå statisk ladningsoppbygging. Forstyrrelser kan også oppstå ved kapasitiv kopling mot felles referanseplan dersom denne har betydelig utstrekning/potensialforskjell.

V1.7.8. Overføring av støysignaler

Støysignaler overføres normalt til kontroll- og signalkabler på en av fire forskjellige måter:

- direkte kopling (felles impedans/galvanisk)
- kapasitiv kopling (spenning/elektrisk felt)
- induktiv kopling (strøm/magnetisk felt)
- stråling (elektromagnetisk)

Både kapasitiv og induktiv kopling representerer normalt overføring av energi fra nærfelt. En krets eller kabel blir definert til å ligge innenfor nærfeltet til en elektromagnetisk støykilde dersom avstanden mellom kilden og kretsen/apparatet er mindre enn ca 1/6 av støysignalet's bølgelengde.

Strålt støy refereres vanligvis til kretser som ligger i fjernfeltet fra støykilden. Utstråling av energi blir sett på som ren bølgeforplantning.

Følgende definisjon av frekvensområder er foreslått, [14]:

- lavfrekvens område: < 10kHz
- mellomfrekvens område: 10kHz - 3MHz
- høyfrekvens område: > 3MHz

V1.7.9. Direkte kopling / Common Mode / Serie Mode

Dersom to eller flere kretser har en felles signal- eller forbindelsesleder, gir dette en kopling mellom kretsene via en felles impedans med mulighet for uønskede støyspenninger. I dette tilfellet er overføring av støysignaler proporsjonal med felles koplingsimpedans.

Mellom en støykilde og en signalkrets med frem- og tilbakeleder kan en definere to former for kopling:

Common mode/Felles kopling

Dette er en kopling som gir like stor spenning på begge signallederne i forhold til jord. Felleskopling kan ikke reduseres ved revolivering men ved hjelp av kabelskjermer jordet i begge ender og/eller kablene forlagt nær/på jordede strukturer.

Direct mode/Transversal Mode/Direkte kopling/Tverrkopling

Dette gir spenningsforskjell mellom signallederne (uønsket signal). Dette kan skje direkte p.g.a. usymmetri i signalkretsen i forhold til jord eller p.g.a. at elektromagnetiske støyfelt oppstår i sløyfen mellom lederne. For å unngå dette kan lederne snoes (revolveres).

Figur V1.11. viser en forenklet sammenstilling over hvordan signalspenningen V_s , serie mode-spenningen V_{DM} , og common mode-spenningen V_{CM} kan virke sammen i en felles signalkrets.

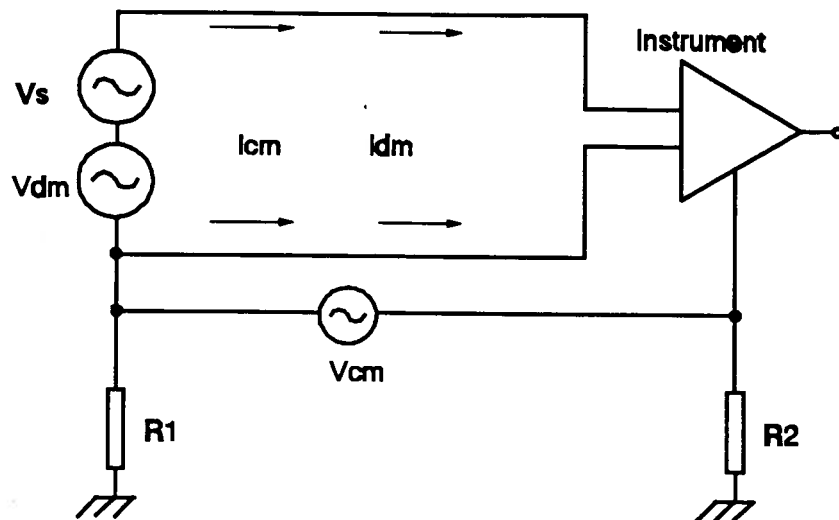


Fig.V1.11. Serie (V_{DM})- og common mode (V_{CM}) spenninger i en krets med signalkilde (V_S).

V1.7.10. Induktiv kopling

Måle- og signalkretser utgjør normalt lukkede sløyfer med gjensidig induktans mellom lederne. Kopling mellom kretsene er hovedsakelig en transformerings-effekt mellom støykilde og mottaker. Selv DC-kretser produserer et vekslende magnetisk felt dersom strømmen skifter polaritet eller et plutselig brudd inntreffer i kretsen.

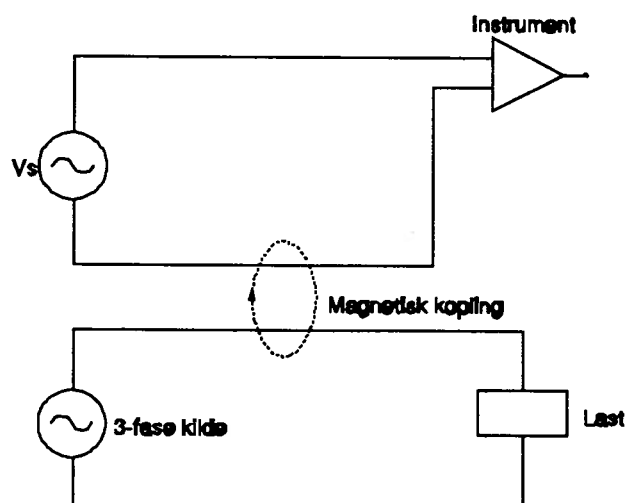


Fig. V1.12. Eksempel på induktiv kopling av støysignal.

Ved strømforandring i kretser som vist i figur V1.12 blir det indusert et vekslende magnetfelt utenfor kildelederen. Det induseres en spenning i mottakerkretsen når deler av denne fluksen omslutter mottakerkretsen. Amplituden av den induserte spenningen er direkte proporsjonal med det arealet av fluksen som sekundærkreten omslutter og kan uttrykkes ved følgende formel:

$$E = M \frac{di}{dt} \quad [V]$$

hvor

- E: - indusert spenning i sekundærkretsen
- M: - gjensidig induktans
- di/dt: - strømforandring i primærkretsen

For magnetisk/induktiv kopling er den gjensidige induktans direkte en funksjon av felles koblet ledningslengde og en funksjon av avstanden mellom lederne.

Både kapazitiv og induktiv kopling er funksjoner av de tidsderiverte felter fra støykildene. Koplingen mellom støykilden og mottaker øker med økende signalfrekvens.

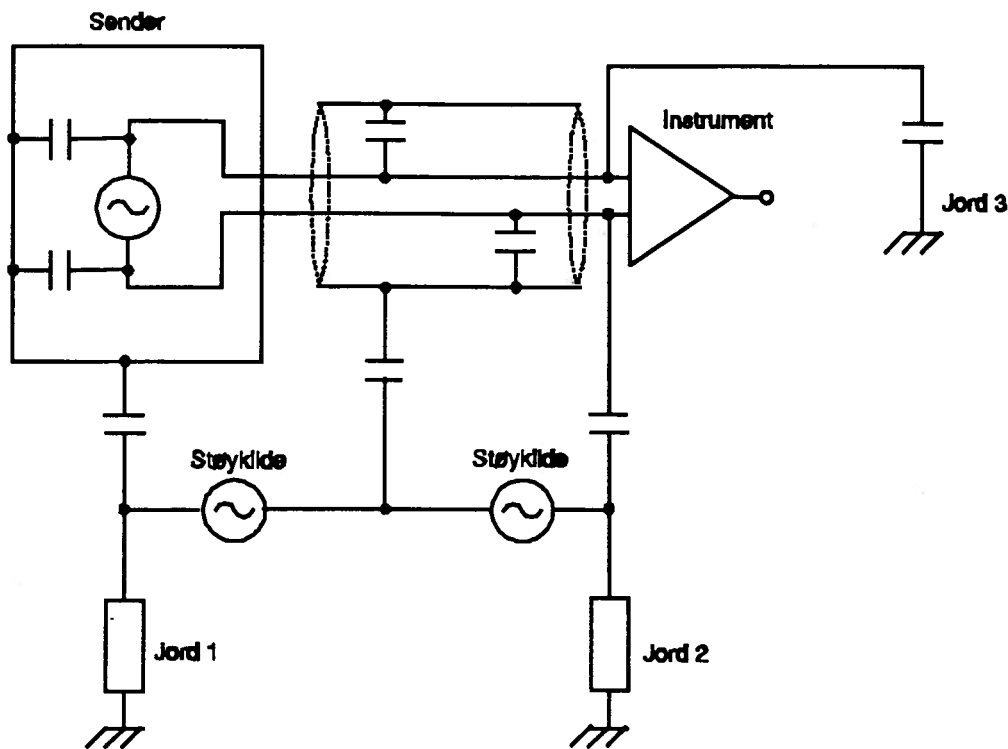
V1.7.11. Kapasitiv kopling

I enhver elektrisk krets er det normalt en kapasitiv kopling innbyrdes i kretsen og til omgivelsene, se figur V1.13. Enhver spenningsforandring, uavhengig av hvor kilden er plassert, vil prøve å tvinge en strøm gjennom kapasitetene og gir opphav til støyspenninger i hht. formelen:

$$I = C \frac{du}{dt} \quad [A]$$

hvor

- I: - strøm gjennom kapasiteten C
- C: - kapasitet mellom to kretser
- du/dt: - spenningsforandring over kapasiteten C



Figur V1.13. Eksempel på kapasitiv kopling av støysignal.

V1.7.12. Elektromagnetisk stråling

Høyfrekvente signaler produsert av eksterne kilder kan overføre en betydelig energimengde til signalkretser vha. stråling. Selv om interferensfrekvensene er høyere enn de frekvenser som signalkretsene normalt vil reagere på, kan de fort gi problemer dersom støysignalene blir modulert med lavere frekvenser og deretter demodulert i signalkretsene. En slik prosess med oppfangning og demodulering av støysignaler kan gi feilsignaler i kabler som fører lavfrekvente signaler.

V1.7.13. Frekvensavhengighet

Et elektrisk signal som forplanter seg langs luftlinjer eller i kabler dempes. Dempningen måles normalt etter en logaritmisk skala. Dempningen er sterkt frekvensavhengig slik at de forskjellige frekvenskomponentene dempes ulikt. Dempningen øker ved økende frekvens.

De forskjellige frekvenskomponenter forplanter seg med ulik hastighet og resulterer i at signalet forvrenges langsetter signalkabelen. Bølgehastigheten øker normalt med økende frekvens. For høye bitrater ved digital signaloverføring og et uhensiktsmessig kabelvalg kan dette f.eks. resultere i at signalkomponenter fra en bitperiode glir over i neste bitperiode. Dette resulterer i intersymbol-interferens.

Det henvises for øvrig til annen teleteknisk litteratur for mer detaljert beskrivelse av frekvensavhengig signaloverføring. I [12] er det bl.a. gitt en kortfattet innføring i transmisjonsteknikk på signalkabler.

V1.8. JORDELEKTRODER

Jordelektroder kan utformes på mange måter. Vanligvis blir de lokale jordingsforhold bestemmende for valg av elektrodetype. Ved gode jordingsforhold med lav resistivitet kan det f.eks. være tilstrekkelig med relativt korte jordspyd. Er derimot jordingsforholdene vanskelige kan det være nødvendig med relativt lange horisontale jordledere. Det er gitt en del opplysninger om enkle jordelektroder i [9].

Blant elektriske egenskaper til jordsmonnet ansees bare den relative permeabilitet å være konstant og lik 1. Selv om den relative dielektrisitetskonstanten varierer over et ganske stort område, gjerne mellom 1 og 80 avhengig av jordsmonn og berggrunn, er den ikke av vesentlig betydning for å oppnå god jording. Dielektrisk holdfasthet for jordsmonnet har stor betydning for jordmotstanden i forbindelse med lynstrømmer men varierer egentlig innenfor relativt snevre grenser. Det må tas hensyn til den kjemiske sammensetning til jordsmonnet i forbindelse med vurdering av korrosjonsfare for jordelektroder.

Resistiviteten i jordsmonnet varierer innenfor et svært stort område, gjerne 1-50.000Ωm eller mer. Resistiviteten er svært viktig i alle problemstillinger hvor jord inngår som returleder for strøm, jordingsanlegg, lekkstrømmer og korrosjon, induktiv interferens og vern mot lynoverspenninger.

Resistiviteten i jordlagene over grunnvannstanden varierer med årstiden og er bl.a. avhengig av vanninnholdet i jordsmonnet. Resistiviten stiger sterkt når jorden fryser. Dersom jordelektroden ikke ligger i frostfri dybde, må en regne med en vesentlig økning av jordingsmotstanden om vinteren. Tabellen nedenfor viser noen typiske verdier for ulike typer vann og jordsmonn.

Tabell T2. Resistivitet for ulike typer jordsmonn.

Jordsmonn og vanntyper	Resistivitet [Ωm]
Saltholdig sjøvann	< 1
Fuktig myrjord	20-200
Ferskvann (elv, innsjø)	10-1.000
Dyrket jord, leire (fuktig)	50-200
Fuktig sandjord	100-300
Tørr sandjord, morene	1.000-50.000
Fjellgrunn med vannfylte sprekker	1.000-10.000

Ved jording av elkraftanlegg blir det lagt vekt på å oppnå så lav overgangsmotstand mot sann (fjern) jord som mulig. For EMC-formål vil det i tillegg bli lagt vekt på å oppnå best mulig potensialutjevning innenfor jordingsanlegget. Selv om beregning av jordmotstand ikke alltid blir utført før bygging av jordingsanlegg, kan det være formålstjenlig å foreta måling av jordsmonnets resistivitet dersom det stilles krav om lave overgangsmotstander. Slike målinger kan gi informasjon om jordspyd drevet ned til et bestemt dyp er å foretrekke framfor horisontale jordledere nedgravd i bakken.

Dersom det er aktuelt med et nedgravd jordingsanlegg på moderat dybde, kan det f.eks. bli et valg mellom flere vertikale jordspyd eller horisontale ledere, en eller flere horisontale ledere knyttet sammen i et felles punkt eller kombinasjoner av de nevnte jordlederene. Måleresultater fra ett jordingsanlegg kan vanskelig overføres direkte til et lignende anlegg fordi det kan være store forskjeller i jordsmonnet på de to stedene. Jordingsmotstanden for forskjellige elektrodearrangement kan imidlertid relativt lett beregnes under antagelse av homogent jordsmonn. Innflytelsen av visse variasjoner av resistiviteten med dybden kan også tas med i forenklete beregninger.

I den andre av de 3 tekniske rapporter som skal være underlag for jordingshåndboken, er det vist en del forskjellige elektrodetyper med formler og kurver for beregning av jordmotstand. Det er også vist beregning av jordmotstand for større jordnett under kraft- og transformatorstasjoner.

V1.9. REFERANSER

- [1] Norges Vassdrags- og Energiverk (NVE)
Forskrifter for Elektriske Forsyningsanlegg (FEF) av 1. oktober 1987.
Oslo: 1988.

- [2] Seljeseth, H.
Jordslutningsvern i høgspenningsfordelingsnett.
Fagernes: 15-17 februar 1993.
NIF-kurs, 34934020.

- [3] IEC
Effect of current passing through the human body.
Geneve: 1984, IEC-publikasjon nr. 479-1.

- [4] Verlo, T., Nordaunet, L.
Bruk av vann som slokkemiddel i elektriske anlegg under spenning.
Trondheim: EFI, 1991.
(Åpen EFI TR 3772)

- [5] Norges Vassdrags- og Energiverk (NVE)
Forskrifter for Elektriske Bygningsinstallasjoner m.m. (FEB) av 20. desember 1989.
Oslo: 1990.

- [6] Brinkmann, K., Schäfer, H.
Der Elektrounfall.
Springer Verlag: 1982.

- [7] Biegelmeier, G.
Die Wirkungen des elektrischen Stromes auf den Menschen und der elektrische Widerstand des menschlichen Körpers.
VDE-Verlag: 1985.

- [8] American National Standard
IEEE guide for safety in AC substation grounding. ANSI/IEEE Std. 80-1986.
New York, USA: 1986.

- [9] Norges Vassdrags- og Energiverk (NVE)
Driftsforskrifter for høyspeningsanlegg med utfyllende orientering av 20 november 1987 (DH).
Oslo: 1988.

- [10] Kindler, H., Lehmann, V.
Design of earthing systems used to earth lightning currents.
Berlin: International Conference on Lightning Protection, 21. ICLP, 21-25 sept. 1992.

- [11] EFI A/S (Redaksjon: Ekrem, D.I., Selvik, E.)
Jording av tekniske installasjoner i bygninger. Retningslinjer.
Trondheim: EFI, 1993.

- [12] EFI A/S (Redaksjon: Aspli, R. (IGP A/S), Ekrem, D.I., Lundquist, A.)
Strukturerte kabelnett. Håndbok i kabling av bygg.
Trondheim: EFI, 1993.

- [13] Norsk Brannvern Forening
Lynvern for bygninger.
Oslo, 1992.

- [14] Benda S.
Interference free electronics.
Lund, Sverige, 1991

VEDLEGGSRAPPORT 2

JORDINGSANLEGG FOR STASJONER OG LINJER

VEDLEGGSRAPPORT 2.

JORDINGSANLEGG FOR STASJONER OG LINJER

Beskrivelse av jordingsanlegg for å vise den prinsipielle utforming og sammenkopling av anlegg for forskjellige jordingsformål.

Basert på litteratur og praktisk erfaring er det skissert utforming av jording for en kombinert 300-420kV kraft- og transformatorstasjon, jording av 22-420kV kraftlinjer, 66-132kV transformatorstasjoner og netstasjoner på fordelingsnettnivå.

V2.1. INNLEDNING

Jordingsanlegg har flere forskjellige viktige oppgaver: personvern, overspenningsvern, miljøvern (EMC). For å løse alle disse oppgavene må anlegget utformes og dimensjoneres med hensyn til alle krav eller ønsker.

De problemstillinger som påvirkes av jordingsanlegget er særlig potensial-, skritt- og berøringsspenninger, induserte spenninger og elektromagnetiske felt. Disse problemer skyldes strøm som flyter til jord ved jordfeil i anlegget eller ved atmosfæriske utladninger. Interne transiente strømmen i jordingsanlegget under driftskoplinger eller spesielle forhold som gjør at det flyter varig strøm i jordingsanlegget i stasjonær drift er også aktuelle problemstillinger.

Felles for alle disse situasjonene er at mulige problemer avhenger like mye av den strømmen som flyter i jordingsanlegget som av utformingen av selve anlegget. Tiltak for å unngå problemer kan derfor utføres med minst to ulike angrepspunkt:

- ved utforming og utførelse av jordingsanlegget
- ved å begrense feilstrømmer og dempe forstyrrelser fra andre kilder

For EMC er et tredje angrepspunkt minst like viktig, nemlig hvilke immunitetskrav som stilles til følsomme elektriske apparater som brukes i anlegget. Det har tatt lang tid å komme fram til aksepterte, bindende normer på dette området. Fra og med 1996 vil en få obligatoriske europainormer både for immunitet og utstråling fra apparater. Ved korrekt utført jording i henhold til forskriftsmessige krav og anbefalinger er det liten sannsynlighet for at problemer av noen art kommer til å oppstå.

I denne rapporten er det vist eksempler på hvordan jordingsanlegget praktisk kan utføres for forskjellige anleggstyper inndelt etter spenningsnivå. Denne inndelingen er omtrent i samsvar med det som vil bli brukt i jordingshåndboken for elkraftanlegg, og tar for seg alle de anleggstyper/utstyr/spenningsnivå som benyttes f.eks. i en stasjon.

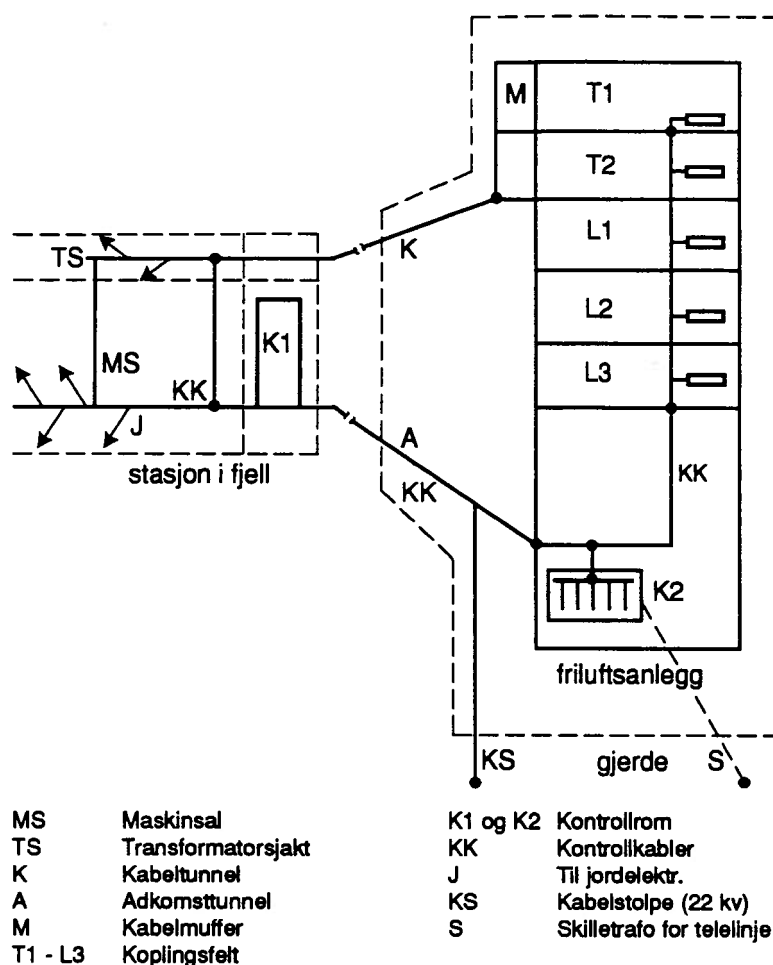
Presentasjonsformen er delvis annerledes enn det som skal brukes i håndboken fordi det til dels er tatt med problemstillinger og vurderinger i tillegg til anbefalinger.

I håndboken er det også nødvendig å foreta en del suppleringer og mulige alternative utførelser illustrert med skisser. I tillegg skal håndboken omfatte praktiske avsnitt fra de to neste tekniske rapportene som også skal være med på å gi grunnlag for jordingshåndboken. Disse to rapportene vil omhandle beregning og måling av jordmotstand, induerte spenninger ved nærføring av kabler og ledninger samt en del om vern av tele- og signalledninger.

V2.2. JORDINGSANLEGG I KOMBINERT KRAFT- OG TRANSFORMATOR-STASJON. 300-400 kV KOPLINGSANLEGG

V2.2.1. Hovedjording

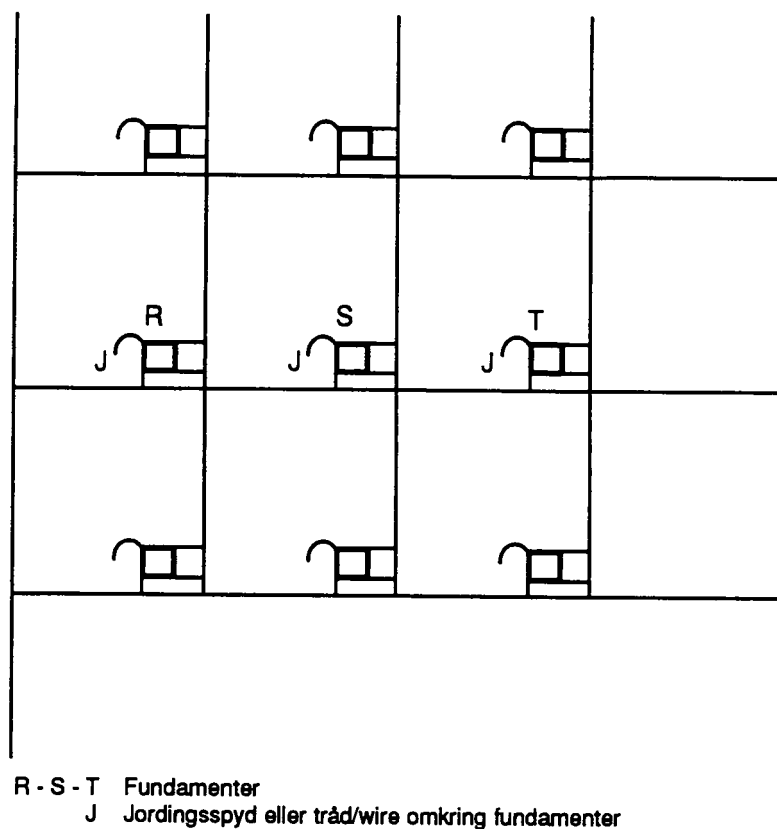
Hovedjordingen omfatter alle jordelektroder i anlegget, hovedforbindelser mellom disse (f.eks. langs kabelføringer) og hovedforbindelser (skinner eller jordline) innen hvert delanlegg/bygning. I figur V2.1 er det prinsipielt vist hvordan forskjellige elektodeanlegg normalt bør sammenkoples.



Figur V2.1: Prinsipiell sammenkopling av forskjellige jordingsanlegg.

2.2.1.1. Jordnett i friluftskoplingsanlegg

Jordnettet skal utformes som et maskenett. Det anbefales å legge parallelle ledere langs delelinjen mellom hvert koplingsfelt og lang ytterkantene av koplingsanlegget. På tvers av koplingsfeltene legges det kryssende ledere som sammenkoples med de langsgående i alle kryssningspunkt. Antall og plassering av tverrgående ledere kan avhenge av antall og plassering av anleggsdeler som skal jordes, men avstanden mellom lederne bør ikke være større enn feltbredden. Ved måletransformatorer og overspenningsavledere bør avstanden ikke overstige ca 4m, og det bør suppleres med langsgående ledere for hver fase slik at de aktuelle apparater kan tilknyttes ved knutepunkt i jordnettet slik som vist i figur V2.2. Andre alternativ kan være å foretrekk som f.eks uten ledere under hver fase, særlig når tverrgående ledere ligger tettere sammen.



Figur V2.2: Jording av måletransformatorer og overspenningsavledere. Sammenkopling til jordspyd eller horistontale jordledere/elektoder.

Jordnettet er en jordelektrode, men ofte er det først og fremst et nettverk for potensialutjevning. Det vil alltid være aktuelt med supplerende jordelektroder fordi jordnettet normalt ligger relativt grunt og tørt. Under forhold med tykke jordlag med lav resistivitet er jordspyd alltid det beste supplement og spesielt hvis jordresistiviteten avtar med dybden. Jordspyd plasseres med fordel langs randen av jordingsanlegget og ved overspenningsavledere og måletransformatorer. Lengden av spydene kan bestemmes etter målinger og prøver, men ca 5m anbefales der hvor det er mulig. Langs randen av jordingsanlegget kan spydene gjerne være så lange som mulig. Samtidig bør avstanden mellom spydene være 1,5 - 2 ganger lengden, noe som også påvirker lengden ved gitt posisjon. Spyd kortere enn 2m antas å ha liten virkning hvis de ikke når ned i jord med vesentlig lavere resistivitet.

Et annet alternativ til supplerende jordelektroder er et underliggende elektrodeanlegg. Det er bare aktuelt ved nyanlegg der koplingsanlegget skal legges på en fylling. Det viktigste er å legge jordledere der hvor det er mest fuktig jord, binde dem sammen og føre opp flere ledere helst i

nærheten av overspenningsavledere og måletransformatorer. En bør ha flere oppføringer i rimelig avstand fra hverandre avhengig av lengden som anbefalt ved bruk av jordspyd.

Som jordledere benyttes kopperline eller -skinne dimensjonert for maksimal jordslutningsstrøm i anlegget, [1]. Det bør i størst mulig grad unngås skjøting av ledere i jord. Krysningspunkter i jordnettet må utføres med termittsveising eller presskoplinger. Som jordspyd med de aktuelle lengder bør det brukes prefabrikerte lengder av kopperkledd stål med skjøtehylser og spesialutstyr for neddriving.

V2.2.1.2. Fundamentjording ved stativ og bygninger

Ved stativfundament vil armeringen i fundamentet normalt gi omtrent like god forbindelse til jord som kopperelektroder omkring fundamentet. Hvis forbindelse mellom stativ og armeringsjern ikke kan unngås, er det derfor lite å oppnå ved å legge kopper omkring fundamentet. Dessuten kan dette eventuelt medføre økt korrosjon av armeringsjern. Hvis armeringsjernet er fullstendig omgitt av betong, er risiko for korrosjon svært liten.

For bygningsfundament anbefales det i dag å benytte en sammenhengende armeringsstruktur (sveiset eller godt bendslet) som skjerm mot elektromagnetiske forstyrrelser og å kople den sammen med hovedjord. Dette betyr at det kan være relativt lite å oppnå ved å legge kopperledere omkring fundamentene og at det i uheldige tilfeller kan medføre korrosjon. Dersom fundamentene er godt drenert, er det gunstig å legge en ring av kopperledere under dreneringsnivået og utenfor dreneringen. Denne forbindes med hovedjordingen i bygningen på minst to sentrale punkt.

V2.2.1.3. Jordnett i SF₆ - anlegg

Slike anlegg er normalt innendørs, og jordnettet under anlegget vil derfor normalt ikke fungere som jordelektrode. Derimot har det en særdeles viktig oppgave som potensialutjevning og bør ha en maskevidde på ca 2x2m eller bestå av metallplater eller -rister på ett eller flere nivå.

Årsaken til dette er at det ved kopling i SF₆-anlegget oppstår meget store og høyfrekvente strømmen og potensialdifferenser i SF₆-kapslingen. Det medfører også store strømmen og potensialdifferenser i jordnettet. Et finmasket nett eller en plate vil redusere potensialdifferensene og støyfeltstyrken omkring anlegget vesentlig, [4].

Utjevningseffekten kan bedres ved at jordnettet koples sammen med sveisede armeringsjern i betonggulv samtidig som det kan gi en viss elektrodeeffekt. For øvrig må jordnettet koples

sammen med andre tilgjengelige elektroder med kortest mulige forbindelser (fundamentjord, toppliner på kraftledninger og jordledninger/skjermer i kabeltraséer, jmf. kapittel V2.2.1.7).

Jordnettet må dimensjoneres mht. maksimal jordslutningsstrøm (50Hz) i anlegget, [1].

V2.2.1.4. Jordelektroder i kraftstasjon

Den rent fysiske utformingen vil bli forskjellig for anlegg i friluft/bygninger og anlegg i fjell. I fjellanlegg vil det alltid dreie seg om fundamentjording i tillegg til kopling til metalliske deler i vannveien som f.eks. rør, damluker og innstøpte deler av turbin.

I fjellanlegg vil den beste jordforbindelsen normalt være der det er størst fuktighet i omgivelsene. Vannet i rør vil som regel ha liten betydning.

Fundamentjordingen i et fjellanlegg kan bestå enten av armeringsjern i fuktige områder eller kopperledere i fuktige områder mellom betong og fjellvegg. Her bør en være oppmerksom på mulige korrosjonsproblemer.

V2.2.1.5. Toppliner/jordliner på kraftledninger og utgående jordkabler

Slike jordliner har, dersom de er tilknyttet jordelektroder i hver mast, svært stor betydning for 50Hz impedansen mot jord i et koplingsanlegg. Med to godt ledende toppliner (f.eks. 2 x FeAl nr. 60), overgangsmotstand til sann jord på f.eks. 30Ω ved hver mast og midlere spennvidde på ca 300m, blir impedansen mot jord sett fra stasjonen ca $2,7\Omega$. Den lokale jordmotstand for et koplingsanlegg kan i ugunstige tilfeller være 5 - 10Ω , mens en med 4 tilknyttede kraftledninger kan få omkring $0,7\Omega$ for disse alene. Dessuten gir slike toppliner en reduksjonsfaktor for strømmen til jord på 0,4 - 0,5 fordi resten av feilstrømmen på ledningen kompenseres av induert strøm i topplinene. Beregningsmetoder blir angitt i den andre rapporten av ialt tre rapporter som utgjør grunnlaget for jordingshåndboken.

På denne bakgrunn er det spesielt viktig å sørge for kortest mulig og tilstrekkelig kraftige forbindelser mellom alle topplinene innbyrdes og til jordede transformatorer i stasjonen.

Impedansen til jord vil også være lav (ca $3,3\Omega$) om det anvendes ståltoppliner med minst 85mm^2 tverrsnitt. Reduksjonsfaktoren blir dårligere (ca 0,85 for 85mm^2 Fe) enn for f.eks. FeAl nr 60. Men den del av en linje som ligger langt fra en stasjon har liten eller ingen betydning for stasjonen og kan ha ståltoppliner eller ingen toppliner dersom det gir akseptable forhold

langs ledningen. Optimal lengde kan være fra ca 4 til ca 8km ved jordmotstand på 30-100 Ω pr. mast.

Kabler vil på tilsvarende måte som toppliner representere en lav 50Hz-impedans til jord ved ledende og uisolert mantel eller skjerm. Det samme er tilfelle for blanke jordlinjer i kabelgrøfter. Impedansen til jord kan tilnærmet beregnes på samme måte som for toppliner på grunnlag av resulterende langsimpedans og resulterende avledningsmotstand. Jordledere i kabelgrøfter gir normalt enda lavere impedans til jord enn toppliner fordi de er i kontinuerlig kontakt med jord og fordi jordingsforholdene ofte er bedre. Dersom dette ikke er tilfelle, eller hvis det dreier seg om en kort forbindelse, kan en få sterk kopling mellom jordingsanleggene i endepunktene. En får i beste fall resulterende avledningsmotstand fordelt på de to stasjonene. Men koplingen mellom dem gir i alle fall lavere impedans til jord for begge stasjonene. Enfase kabler med isolert skjerm virker ikke som jordelektrode. De bør av sikkerhetsmessige grunner helst jordes i begge ender hvis det ikke medfører utilsattelig tap/temperaturstigning. Dette gir også lavere feltstyrke i nærheten av kablene. Alternative løsninger er revolivering av skjermene (cross bonding) eller jording bare i en ende for små kablelengder.

V2.2.1.6. Forbindelse mellom de andre delene av jordingsanlegget

Hovedforbindelser mellom de viktigste deler av jordingsanlegget bør legges kortest mulig vei og helst som nedgravde elektroder. Dessuten bør det legges hovedforbindelser langs alle viktige kabelføringer som f.eks. fra friluft koplingsanlegg til kontroll/relé-bygg, fra koplingsanlegg til kraftstasjon, fra kraftstasjon til kontrollrom inne og fra kontrollrom inne til kontrollrom ute. Det er en fordel å spre disse forbindelsene for å redusere reaktansen og oppnå avstand mellom forskjellige typer kabler (f.eks. høyspennings- og kontrollkabler).

Alle disse forbindelsene kan normalt utføres med en eller to ganger 50-70mm² blank kopperline, men det må tas hensyn til forventet feilstrøm. Jordlinene og elektrodeanleggene bør sammenkoples både ved første krysning og ved aktuelle endepunkter, f.eks. kontrollrom, feltskap, transformatorrom. Det må anses som tilstrekkelig med to hovedjordforbindelser mellom kraftstasjon og utendørsanleggene.

2.2.1.7. Spesielle forbindelser ved SF₆-anlegg

Ved gjennomføringer til kraftledninger bør SF₆-kapslingen avsluttes med en metallisk veggplate på 3-4m² der det legges 6-8 korte forbindelser mellom kapslingen og platen. Dette øker kapasiteten mellom kapslingen og jord, reduserer støypotensialet på kapslingen og på kraftledningen og reduserer støyfeltstyrken. Platen skal også ha en kortest mulig forbindelse

til jordnettet. Denne forbindelsen skal også føres videre til toppliner eller samleskinne for toppliner.

Ved overgang fra SF₆-anlegg til jordkabel anvendes to alternative løsninger:

- a) koaksial forbindelse mellom SF₆-kapsling og kabelskjerm i overgangsboksen,
- b) kapsling og skjerm isolert fra hverandre, dvs. jordet i hvert sitt punkt i anlegget.

Løsning a) gir minimum utstrålt støyeffekt fra anlegget og ingen problemer med potensialdifferens mellom delene. Dersom denne løsningen ikke kan anvendes, f.eks. ved bruk av ringkjerne strømtafo på kabelen, vil jordforbindelsen mellom kapsling og skjerm bli så lang at en får overslag mellom kabelskjerm og jordledning eller kapsling og meget høy støyfeltstyrke. Eventuelt kan det også oppstå skade på kabelskjermen. Disse problemene kan unngås ved å utforme overgangen mellom SF₆-kapslingen og kabelskjermen slik at det blir et koaksialt gnistgap på 2-5mm mellom SF₆-kapslingen og kabelskjermen. Dette gir tilstrekkelig lave støyspenninger. Alternativt kan skjerm og kapsling eller isolerte deler av kapslingen forbindes via motstander på noen få ohm, kapasitanser, eller varistorer på flere steder rundt omkretsen. Ekstra korte forbindelser er nødvendige.

Metallisk rammeverk for SF₆-anlegget forbindes til jordnettet i minst to punkter. Kabelbroer eller stiger forbindes til jordet struktur og jordnett i begge ender og der de krysser ledende strukturer.

Selve SF₆-kapslingen jordes ved foten av hver bæresøyle. Disse jordlederne må være ekstra korte og bestå av 3-4 forbindelser ved hver søyle.

V2.2.2. Jording av apparater og andre anleggsdeler

V2.2.2.1. Høyspenningsapparater i friluftsanlegg

Alle jordforbindelser til høyspenningsapparater skal være så korte som mulig og være dimensjonert for maksimal, forventet jordslutningsstrøm.

Korte forbindelser er særlig viktige ved måletransformatorer i 300-400kV anlegg. Fra hver måletransformator bør det benyttes to eller flere tilkopplingsledere (tamper) tilkople hver sine grener i jordnettet, jmf. figur V2.2. Tampene tilkoples foten av stativet med skruforbindelse.

Ved rørstativ er forbindelsen gjennom stativet bedre enn gjennom jordledere særlig for høyfrekvente transienter. Det er derfor unødvendig å føre jordlederen lenger enn til foten av stativet.

Det henvises til kapittel V2.2.1.7 for detaljer vedrørende SF₆-anlegg.

V2.2.2.2. Lavspenningsanlegg

For interne lavspenningsanlegg innenfor stasjonens hovedjordingsanlegg kan jording utføres som for vanlige bygningsinstallasjoner, [2], [3]. Kabler føres helst over egne broer eller kanaler adskilt fra høyspenningskabler og kontrollkabler.

Skal lavspenning føres utenfor stasjonens hovedjording (utenfor inngjerdet område), må det benyttes en skilletransformator for den del av belastningen som ligger utenfor. Denne transformatoren må være isolert for maksimalt jordpotensial i stasjonene. Den utenforliggende del av nettet vil da være et IT-nett. Overspenningsvern for skilletransformatoren kan være nødvendig.

V2.2.2.3. Kontrollanlegg og dataanlegg

Det bør anvendes hovedjordledninger (eller skinner) gjennom skaprekker/stativ i alle datarom, kontrollrom og rom for hjelpespenninger, relévern, teleutstyr o.l. Disse jordledningene bør tilkoples ekstern hovedjord langs kabelføringer der hvor kabelen går inn/ut av rommet.

Hver kabeltype holdes mest mulig samlet og broer/kanaler plasseres slik at det blir størst mulig avstand fra høyspenning og høystrømkabler til data- og målekabler. Spesielt bør det ikke legges kontrollkabler på langs i nærheten av samleskinner. Det bør brukes bare skjermede kabler i koplingsanlegg og ellers til alle måle-/instrumentringskabler og datakabler. De forskjellige typer kabler (signaltyper og nivå) bør skilles fysisk og helst føres i egne kanaler eller broer (f.eks. målinger, meldinger, styringer, lavspenning og høyspenning). Ledende kabelbroer, stiger eller rør bør jordes i begge ender og ved avgreninger.

Som hovedregel skal kabelskjermer jordes i begge ender og ved mellomliggende koplingspunkter, men *følgende unntak gjelder for jording bare i det sentale endepunkt:*

- kabler som fører analoge signaler med nivå under 1V og frekvens under 1kHz,
- koaksialkabler der skjermen er en del av signalløypen og det tilkoblede utstyr er følsomt for lave frekvenser, f.eks. LAN,
- tilfeller hvor kabelskjermer kan bli overbelastet, f.eks. ved jordfeil (tilfeller der det ikke er jordleder langs kabelen).

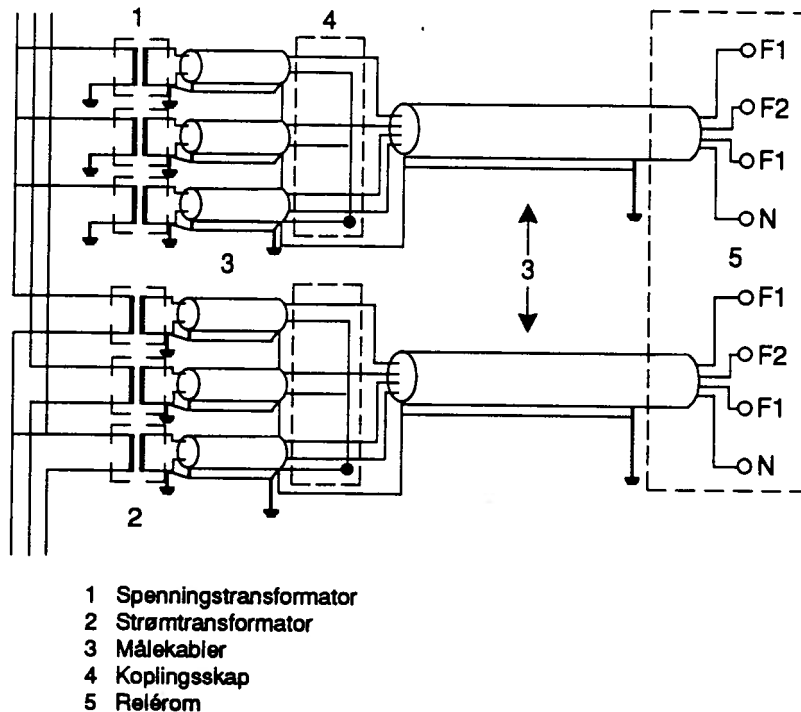
Ved alle disse tre unntakene er signalkabelen ikke fullstendig beskyttet mot forskjell i jordpotensial og indusert langspenning, og utstyret som er tilkoplekabelen kan feilfunksjonere hvis signalkretsene er usymmetriske i forhold til jord. I verste fall kan de skades f.eks. under tordenvær eller jordfeil. Dette kan unngås for 50Hz ved å legge jordleder langs kablene. For å sikre best mulig mot høyfrekvente transienter bør skjermene forbindes til jord via en ca 10nF kondensator eller varistor i den åpne enden slik at de effektivt er jordet for høye frekvenser.

Som vern for kabler som er spesielt utsatt for atmosfæriske overspenninger, bør det benyttes dobbeltskjernet kabel med ytre skjerm jordet i begge ender dersom det er behov for en indre skjerm jordet bare i en ende.

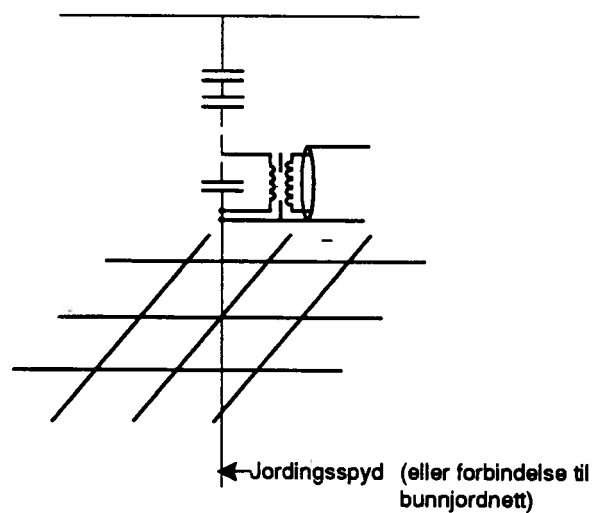
Ved jording av kabelskjermer i begge ender kan det flyte relativt stor transient strøm i skjermene. Derfor er det viktig å velge riktig jordingspunkt slik at skjermstrømmen ikke kan flyte inn i støyfølsomt utstyr, dvs. at skjermene prinsipielt skal tilkoples på utsiden av apparatskjermer, men heller ikke langt fra apparatet fordi skjermvirkningen er avhengig av at kabelskjermer og apparatskjermer får samme potensial. I tillegg til jordingen ved apparat er det en fordel å jorde de mest utsatte kabelskjermer, f.eks. fra 300-400kV koplingsanlegg, ved inngangen til det aktuelle rom, dvs. der hvor det er forbindelse til jord via jordliner langs flere kabelføringer og eventuelt til fundamentjord.

Prinsipielt er det best å kople kabelskjermen koaksialt til apparatskjermer, men i praksis er dette sjelden nødvendig. Ved normalt prosesskontrollutstyr og elektronisk relévern anbefales istedet å etablere best mulig potensialutjevning mellom alle metalleder i apparatskap og tavler ved hjelp av sveisede eller godt skrudde forbindelser og dessuten korte jordforbindelser til de enkelte apparatskjermer. Da kan kabelskjermene jordes til spesielle hovedjordskinner i bunnen eller toppen av skapet eller langs sideveggene. Det siste vil i mange tilfeller gi muligheter for å jorde kabelskjermen nærmest apparatet, mens en ved jording i bunnen kan få mindre elektromagnetiske felt pga. skjermstrømmene inne i skapet. Det beste er sannsynligvis å legge alle kabelføringer inn til sideveggene i skapet og montere jordskinner direkte på veggen. Det gir mulighet for den aller beste potensialutjevning for transienter og gir lav feltstyrke inne i skapet. Kabelskjermene kan med fordel ikke kappes ved jordingspunktet, men føres helt fram til det enkelte apparat.

Kabelavslutningen og jordingen er i mange tilfeller minst like viktig ute i anlegget. Det gjelder spesielt kabler for målinger i 300-400kV koplingsanlegg og kabler som kan bli utsatt for atmosfæriske utladninger. Strømmen i skjermene vil her være vesentlig større enn ved kontrollsiden og kan ha vesentlig høyere frekvens (spesielt ved SF₆-anlegg). Her må kabelskjermene tilkoples direkte til apparatgods som vist på figur V2.3. På strøm- og spenningstransformatorer bør koplingen ligge inne i koplingsboks, men må være kort og legges tettest mulig inn til boksveggen for å få minst mulig strømsløyfe mellom skjerm og jordplan. Eksempel på jording av kapasitiv spenningstransformator er vist i figur V2.4 (side 59).



Figur V2.3: Jording av måletransformator og målekabler.



Figur V2.4: Jording av kapasitiv spenningstransformator.

Ved SF₆-anlegg anbefales det kontrollkabler med ekstra tett skjerm (ikke åpen trådsjerm) og koaksialtilkopling til SF₆-anlegget. I motsatt ende, f.eks. relé-/koplingstavle, kan anvendes samme teknikk som beskrevet foran. Tilkoplingen til SF₆-anlegget er spesielt viktig for å begrense støyspenningen mellom skjerm/jordleder og signallederne i kabelen. Dette er normalt leverandørens ansvar på samme måte som måletransformatorens evne til begrenset omforming av common mode spenning til spenning mellom sekundærklemmene. Slik tverrspanning reduseres nemlig ikke ved jording av kabelskjermene.

V2.2.2.4. Jording av teleanlegg

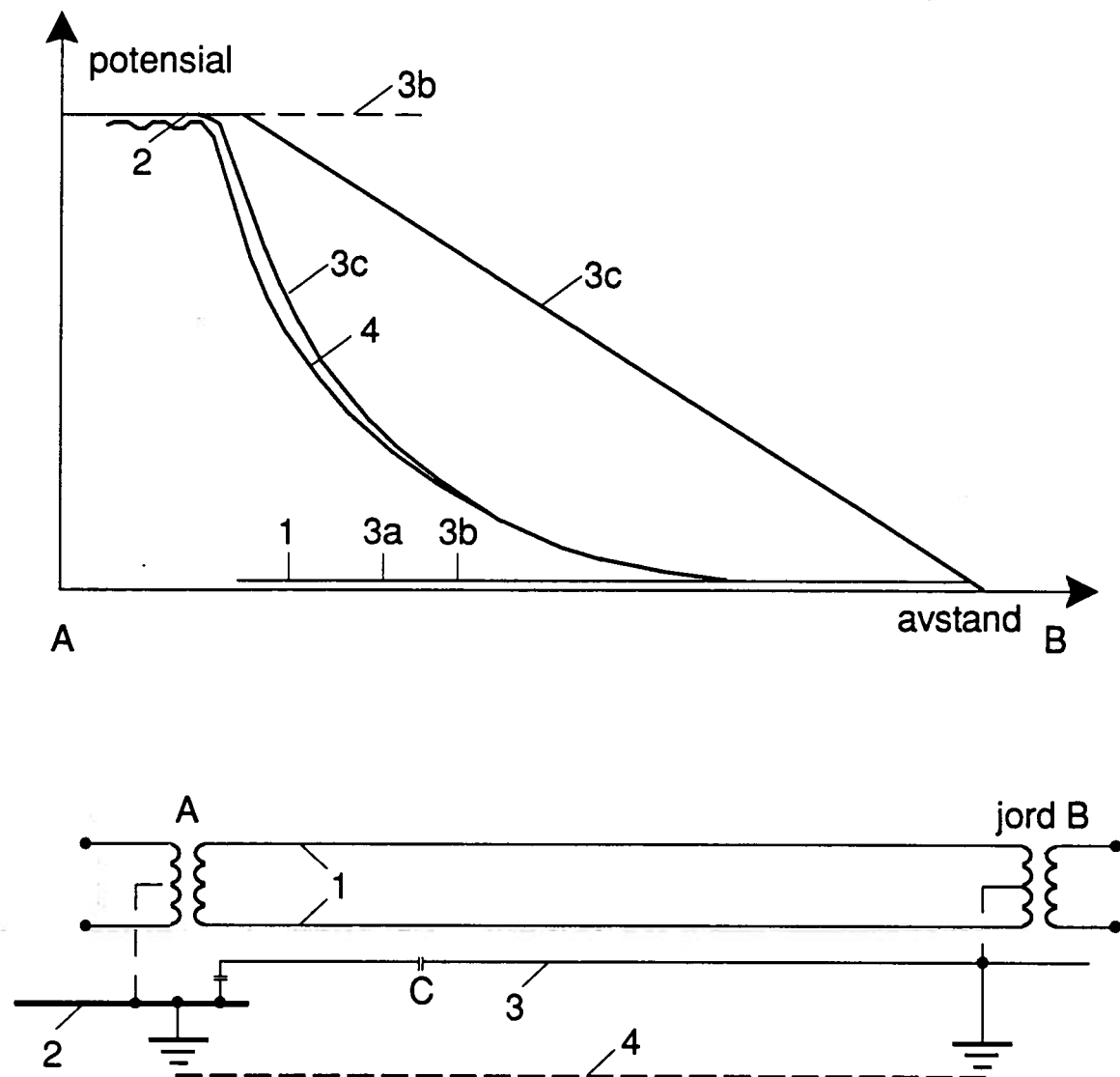
Jording av interne teleanlegg bør utføres etter de samme prinsipper som kontrollanlegg og dataanlegg.

Ved anlegg for kommunikasjon over metalliske linjer utenfor stasjonen må linjer og utstyr vernes, som hovedregel med ett eller flere galvaniske skiller. Ofte må også vernetransformator beskyttes mot atmosfæriske overspenninger som illustrert i figur V2.5.

Overspenningsvern alene er sjelden akseptabelt av to årsaker:

- Driftsfrekvente avlederstrømmer kan bli for store selv for edelgassavledere klasse III.
- Det vil pga. disse store strømmene ofte oppstå høye jordpotensialer ved avlederne i motsatt ende (utenfor stasjonen), og kabelen kan bli termisk overbelastet.

I tilfeller der slike høye potensialer ikke betyr noe risiko (f.eks. vanskelig tilgjengelige egne anlegg) og driftsfrekvente strømmer begrenses av linjemotstand eller overgangsmotstand til jord, vil normale avledere være tilfredsstillende vern for utstyret.



- 1 Kabelpar
- 2 Stasjonsjord
- 3 Kabelskjerm, armering eller bæreline
- 3a Isolert, forbundet til fjern jord, brutt ved A
- 3b Isolert, jordet i begge ender, brutt ved C
- 3c Isolert, jordet i begge ender
- 3d Uisolert, jordet i begge ender
- 4 Jordsmonn

Figur V2.5: Skilletransformator ved innføring av telelinje til kraftstasjon.

V2.2.2.5. Jording av gjerde, rørledninger etc.

Metallisk gjerde blir ofte tilkoplest stasjonens jordnett på flere steder. I så fall legges det en jordleder i ca 30cm dybde og 1m utenfor gjerdet omkring hele anlegget. Denne jordlederen tjener mest til potensialstyring og tilknyttes et stort antall gjerdestolper og alle portstolper. Utenlands synes det å være mest vanlig ikke å forbinde gjerdet med stasjonsjord unntatt når gjerdet er så nær anlegget at de kan berøres samtidig med jordede anleggsdeler. Begrunnelsen for dette er at berøringsspenninger på utsiden blir mindre. Men dette er åpenbart noe avhengig av avstanden fra jordingsanlegget til gjerdet og forholdet mellom største og minste avstand. Disse effektene er det imidlertid mulig å korrigere noe for ved seksjonering av gjerdet.

Hvis rørledninger skal føres inn til stasjonen, f.eks. alminnelig vannforsyning, bør de helst være av isolerende materiale. I motsatt fall bør det settes inn isolerende rør minst 20 m utover fra gjerdet. Dersom gjerdet ikke er forbundet med stasjonsjord, bør det være isolerte rør også noen meter (5-10m) innenfor gjerdet. For eventuelle gassledninger anvendes spesielle regler.

Skinneganger må også isoleres på betryggende måte, f.eks. ved å fjerne et par skinnelengder forbi gjerdet. Skinner innenfor gjerdet må forbindes med jordingsanlegget.

Jordline på kraftledninger for 50kV driftsspenning og høyere bør normalt også tilkoples stasjonsjord. Det benyttes sammenkoblede jordingsanlegg for alle spenningsnivå i en stasjon. Det samme gjelder for jordliner i kabelgrøfter og som regel for alle spenningsnivå.

For 11-22kV anlegg kan det være aktuelt å isolere gjennomgående jordline fra jordingsanlegget i 300-400kV anlegg. Dette gjelder spesielt hvis beregnet jordpotensial fra vedkommende stasjon er høyt og det er dårlige jordingsforhold langs linjen. Slik isolering kan utføres i kabelmasten dersom det er en kabelinnføring eller ved å sløyfe jordline eller isolere den med strekkisolatorer i det siste spennet.

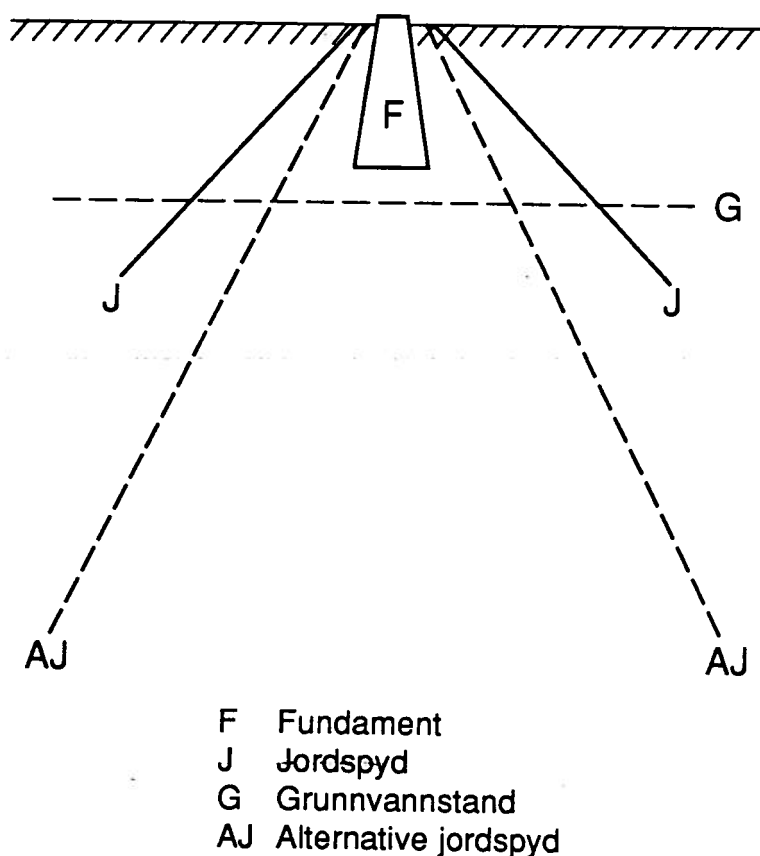
V2.3. JORDING AV KRAFTLEDNINGER

Jording av kraftledninger består av toppliner/jordliner og jordelektroder ved mastene. De har tilsammen flere oppgaver. Toppliner kan tjene som lynoppfangere og til å redusere 50Hz jordmotstand, skritt- og berøringsspenninger ved å parallellkople mange mastejordinger. Jordline under fasene virker normalt ikke som lynoppfangere, men de vil på samme måte som toppliner medvirke til at det kan oppstå betydelige jordpotensialer et stykke fra et feilsted.

V2.3.1. Virkning av toppliner/jordliner og jordelektroder

Virkingen av toppliner er tidligere omtalt under kapittel V2.2.1.5 sett fra et endepunkt. Når avstanden til endepunktet er mer enn ca 4-8km, vil impedansen til jord via toppliner være redusert til det halve eller mindre, sett fra en mast.

Mastejordingene er det eneste som kan senke impulsmodstand til rimelige verdier ved hver enkeltmast. For å oppnå lav impulsmodstand bør det anvendes fundamentjording (armering) ved betongfundament og jordspyd der hvor det er dyp jord (>1m). Jordspyd bør prinsipielt slås ned på skrå (ca 45°) fra mastefot i 2 til 4 forskjellige retninger slik at jordledere til mastefot blir så korte som mulig, samtidig som en oppnår nødvendig avstand mellom spydene slik som vist på figur V2.6.



Figur V2.6: Plassering av jordspyd ved mastefotjording.

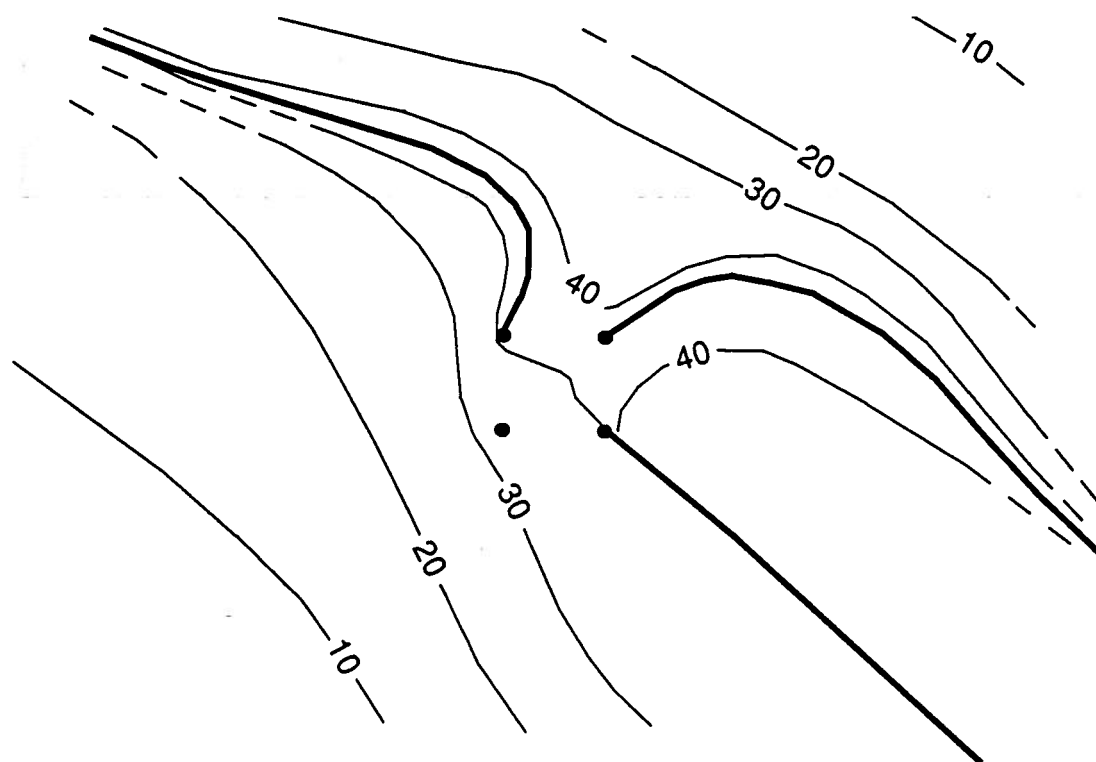
Hvis spydene må gjennom et lag med dårlig ledende jord øverst, kan de med fordel drives ned med noe mindre vinkel i forhold til vertikalen. Ved master med flere fundamenter er det best å følge

samme praksis, men hvis det kan drives ned totale lengder på 5-10m er det ikke effektivt å drive i alle retninger fra samtlige fundament. Det er da viktigst å drive i retning bort fra masten ved alle fundamentene. I praksis vil det sjelden være mulig å drive ned spyd i alle retninger.

Jordingsspiraler av kobber kan legges både rundt betongfundament og rundt trestolper. Spiraler er ingen god form for impulsjording pga. induktiviteten. Det er i alle fall bedre å legge to spiraler med stor stigning hver sin vei (bifilart) enn å legge en spiral med samme totale lengde.

I utmark og fjellterreng er det sjelden mulig å oppnå ønskelig jordmotstand ved mastene med fundamentjording, og jordspyd kan sjelden anvendes. Jording med horisontalt nedgravde ledere kan da være den eneste mulighet slik som vist i figur V2.7.

Jordingsmotstanden for 50Hz kan reduseres noe med store trådlengder, men for impulsmotstanden er det bare effektivt med noen titalls meter fra masten for hver gren.



Figur V2.7: Jordpotensial (ekvipotensiallinjer) omkring en mast på fjellgrunn. De tre tykke strekene representerer horisontale jordlinjer.

V2.3.2. Jording av 300-400 kV ledninger

Slike ledninger bygges nesten alltid på stålmaster. Det anbefales:

- Gjennomgående toppliner med 1 eller 2 x FeAl nr. 60 eller tilsvarende ledende tverrsnitt. Reduksjonsfaktor ca 0,4 - 0,7, nullimpedans ca 0,75 - 1,1 Ω /km og jordingsimpedans ca 3 - 6 Ω i hver retning.
- Alternativt en eller to toppliner FeAl nr. 60 i utsatte områder med bebyggelse og nær stasjoner (5-10km) og ellers ståltoppliner eller nedgravd jordline i bakken.
- Jordelektroder som jordspyd og/eller fundamentjording under bra jordingsforhold, hovedsakelig dyrket mark eller myr. Siktemål for jordmotstand 10-30 Ω pr. mast.
- Jordelektroder av horisontale liner 30-100m i skog og fjellområder. Siktemål for jordmotstand 20-100 Ω .

V2.3.3. Jordkabelanlegg

Ved jordkabler med ytre isolerende kappe anbefales det å legge en blank jordleder med tilstrekkelig stort tverrsnitt i kabelgrøften og forbinde den til ledende kabelmantel/skjerm ved alle skjøter, revolveringspunkt og endepunkt. Ved skjermede kabler blir strømbelastningen på jordlinen vesentlig mindre enn jordfeilstrømmen.

V2.3.4. 66 - 132 kV ledninger

Slike ledninger bygges i stor utstrekning på tremaster uten gjennomgående jord/toppline. Det anbefales 1-3km innføringsvern med jordelektroder om mulig i hver mast. I tillegg til at toppline kan være overspenningsvern, gir jordline generelt en betydelig reduksjon av jordmotstand i tilknyttede stasjoner.

Det anbefales ståltoppliner med minst 70mm² tverrsnitt og jordelektroder som beskrevet for 400kV-anlegg. Med gjennomsnittsverdi på 100 Ω pr. mast blir impedansen sett fra en stasjon 7-8 Ω for 3km lengde. Jordelektrodene utformes og utføres på samme måte som for 300-400 kV ledninger.

For ledninger bygd på stålmaster må gjennomgående jord-/toppliner være et krav. Det er normalt å benytte ståltoppliner. Med tanke på en eventuell overgang til direkte jording av 132kV-nett bør det vurderes å anvende FeAl toppline(r) for nye ledninger og se på mulighetene for å skifte til FeAl på eksisterende linjer. Dette gjelder spesielt i innføringssonen og angår da også ledninger på tremaster.

V2.3.5. 11 - 22 kV ledninger

Slike ledninger bygges i svært stor grad på tremaster med eller uten gjennomgående jordline. Hovedoppgaven til jordlina er å redusere driftsfrekvent jordmotstand i nettstasjonene. Med ca 20 mm² stålline og 100Ω mastejording for hver 200m oppnås en jordingsimpedans på ca 12Ω via jordlinen, 6Ω med jordline i to retninger. Se for øvrig kapittel V2.5.

V2.4. TRANSFORMATORSTASJONER 50 - 132 kV

For anlegg med direkte jordet nøytralpunkt bør/må stasjonsjordingen for friluftsanlegg prinsipielt utføres som for høyere spenninger. For nye 132kV anlegg med spolejording eller ombygging av slike anlegg bør en følge de samme retningslinjer med tanke på overgang til direkte jording.

For innendørs koplingsanlegg bør det også være et jordmaskenett med parallelle ledere på grensen mellom hvert koplingsfelt og minst to ledere på tvers av feltene. Det må være minst to forbindelser til resten av hovedjord og helst flere direkte nedledere til jordelektrodene fra overspenningsavledere og eventuelt lynavledere.

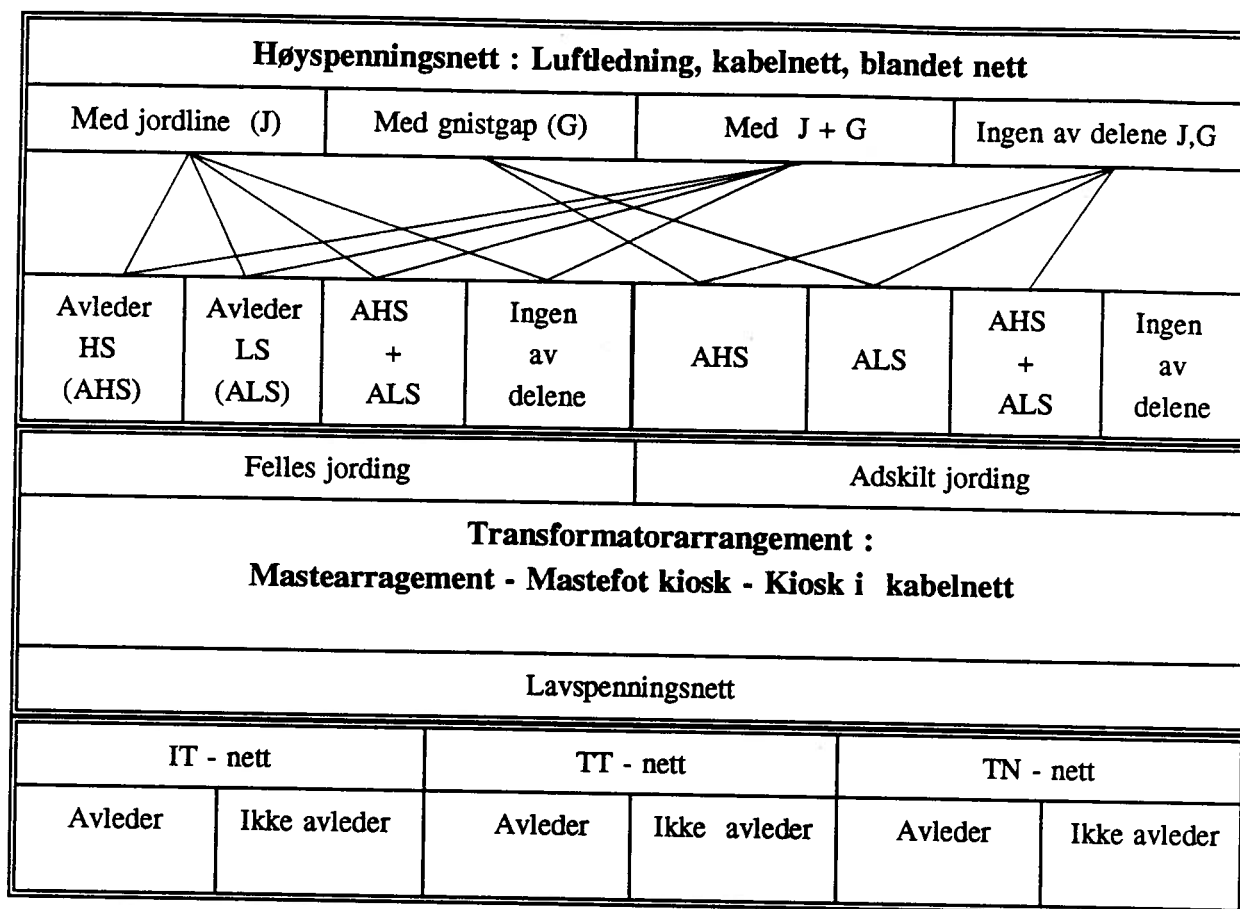
I 22 kV koplingsfelt er det tilstrekkelig med en hovedjordledning på tvers av feltene, men også her bør det være minst to forbindelser til resten av hovedjordingsanlegget.

V2.5. JORDING AV NETTSTASJONER/FORDELINGSTRANSFORMATORER

V2.5.1. Oversikt over ulike alternativer

Det er mange forskjellige jordingsmessige varianter av nettstasjoner og tilknyttede høyspennings- og lavspenningsnett. I figur V2.8 er det forsøkt å gi en oversikt over ulike alternativer for nett- og transformatorarrangement. De viktigste kombinasjoner er antydnet med forbindelseslinjer, men flere kombinasjoner er mulige.

For rene jordkabelnett er det lite behov for overspenningsavledere og adskilt jording, dvs. at det er få varianter. Årsaken til de mange varianter for høyspennings luftledninger og blandede nett er bl.a. at en har hatt betydelige problemer med overspenningsvern av nettstasjoner og tilknyttet lavspenningsnett ved dårlige jordingsforhold. Dette skyldes høye potensialer på transformatorkasse/ jord under overslag/feil på høyspenningssiden i transformatorarrangementet.

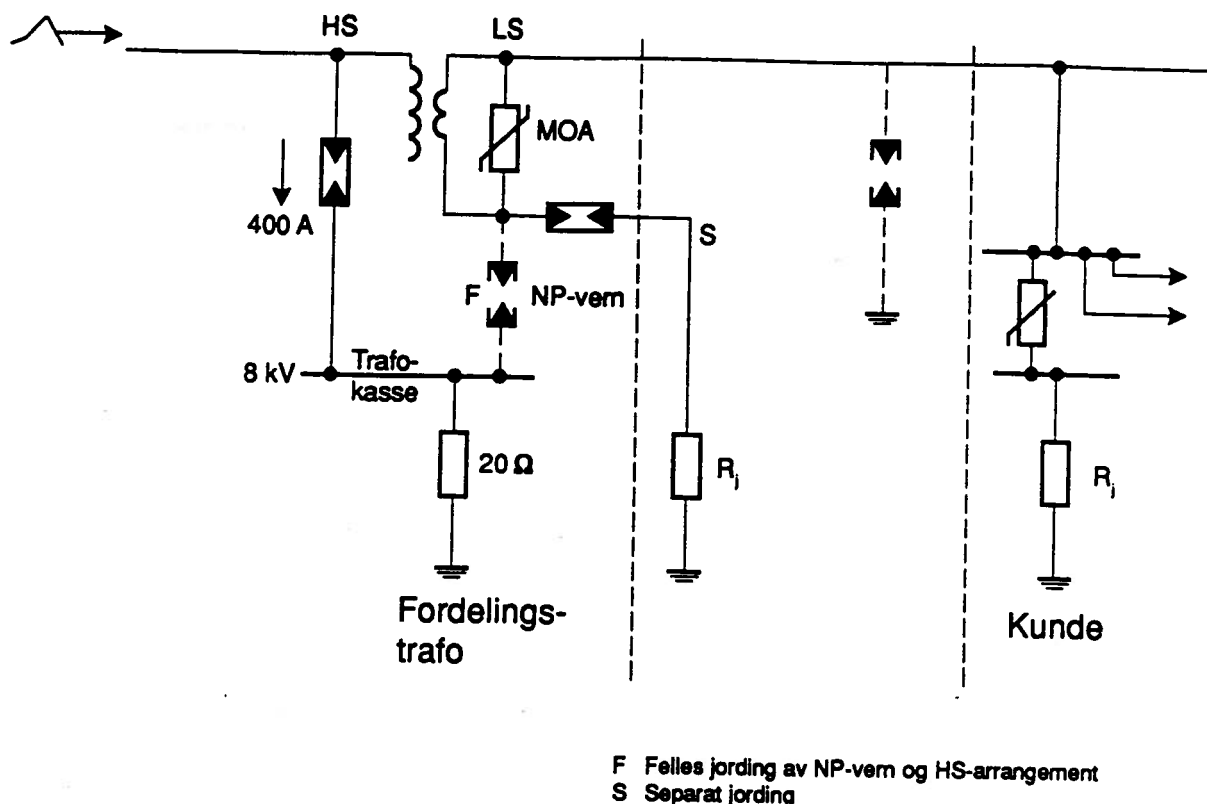


Figur V2.8: Oversikt som viser aktuelle alternativer for jording av nettstasjoner og fordelingstransformatorer.

Overslag pga. transiente overspenninger eller tenning av gnistgap kan også føre til 50Hz følgestrøm og dobbel jordslutning med stor 50Hz feilstrøm og høye potensialer.

V2.5.2. Vurdering av forskjellige tiltak

Risikoen for dobbel jordslutning er den opprinnelig årsak til adskilt jording av nøytralpunktvernet på lavspenningssiden. Men dette er også gunstig med hensyn til vern av selve transformatoren mot at kassepotensial blir transformert tilbake til høyspenningssiden. Likevel har denne løsningen en svakhet: Den forhindrer at alle de relativt lave overspenningene kommer over til lavspenningssiden. De riktig store overspenningene, som kan oppstå ved lynnedslag nær transformatoren, kan imidlertid slå over på gjennomføringene på lavspenningssiden. En mulighet til å holde 50Hz-potensial unna lavspenningssiden kan være å tilkople en høyspennings ventilavleder mellom nøytralpunktet og transformatorkassen som skissert på figur V2.9.



Figur V2.9: Jording og utførelse av aktuelle overspenningsvern i fordelingstransformatorer og lavspenningsnett.

Transiente overspenninger er det mulig å redusere kraftig ved å plassere avledere på alle lavspenningskursene før første abonnent. En løsning med avleder mellom transformatorboks og nøytralepunkt krever også avledere mellom faser og nøytralepunkt på lavspenningsiden. Men for å verne abonnentenes installasjoner også mot induerte overspenninger i lavspenningsnettet må alle utsatte abonnenter ha avledere ved inntaket jordet i egen installasjon.

Dersom en kan oppnå tilstrekkelig lav jordmotstand i nettstasjonen, vil felles jording være å foretrekke både med hensyn til enkelhet og sikkerhet. Men dette kan i mange tilfeller bare oppnås med gjennomgående jordline enten på høyspenningssiden eller på lavspenningsiden. Lavspenningsiden må i mange tilfeller antas å by på vesentlig bedre jordingsmuligheter enn høyspenningssiden, og det er et spørsmålet om slik jording kan bli aktuelt ved eventuell overgang til TN-system.

Jordledning på høyspenningssiden har egentlig ikke noen særlig funksjon dersom det anvendes tremaster og en kan få ned 50Hz jordmotstand på annen måte. Uten jordline på høyspenningssiden og uten gnistgap på transformatoren, men med gnistgap på nærliggende master, vil sannsynligheten for overslag på høyspenningssiden i nettstasjonen trolig bli kraftig redusert.

I følgende tabell er det gitt en summarisk oversikt over fordeler og ulemper med jordings og

vernemessige tiltak ved nettstasjoner/transformatorer for både høyspennings- og lavspenningsnett.

Tabell T2.1: Oppsummering av fordeler og ulemper ved jording og vern av 11-22kV nettstasjoner.

		FORDELER	ULEMPER
HS nett	Jordline	Lav jordmotstand 50Hz Sikker utkopling av dobbel jordfeil	Leder overspenninger til nettstasjonen
	Gnistgap	Reduksjon av atmosfæriske overspenninger Avflating av bølgefront	Kan medføre 50Hz følgestrøm. Driftsfrekvent jordpotensial på trafo via jordline.
Nett-stasjon	Felles jording	Enkel å utføre Personsikkerhet	Leder jordpotensial (2kV støt og >ca 500VAC) via nøytralpunktvern over på LS-nettet
	Adskilt jording	Stopper transiente jordpotensialer <50-60kV (støt) Kan også være effektiv for 50Hz	Merarbeid? Sikkerhet? Overslag over LS-gjennomføringer ved lynnedslag nær trafo
	Gnistgap på HS-siden	Overspenningsvern	Kan medføre transient og 50Hz jordpotensial på trafokasse, flere overslag til LS
	Avledere på HS-siden	Overspenningsvern Slokker 50Hz strøm	Kan medføre transient potensial Mindre driftssikkert/driftsvennlig enn gnistgap ?
	Avledere på LS-siden	Vern mot tilbaketransformert kassepotensial til HS-siden Valg av restspenningsnivå er viktig.	MOA mindre driftssikre enn ventilavledere Feilfinning vanskelig
LS-nettet	IT-nett og TT-nett	Kan bli drevet med jordfeil	Dobbel jordfeil oppstår og kan bli stående Overspenn.vern ofte nødvendig
	TN-nett	Automatisk selektiv utkopling av jordfeil Mindre overspenninger enn IT(TT) Mulighet for bedre jording	Fører trafos jordpotensial delvis fram til abonnent (stor dempning ved god jording)

V2.5.3. Anbefalinger

- For å oppnå lavest mulig impulsjordmotstand ved nettstasjoner anlegges lokale jordelektroder etter samme prinsipp som for høyspenningsmaster.
- For å sikre relativt rask utkopling av doble jordslutninger bør en ved 22kV stasjoner ta sikte på en driftsfrekvent jordmotstand på høyst 20Ω , helst 10Ω . 20Ω gir en maksimal strøm på ca 500A ved dobbel jordslutning.
- Ved dårlige lokale jordingsforhold anbefales (gjennomgående) jordline på høyspenningssiden (eller lavspenningssiden). Med jordline vil det normalt være mulig å få under 10Ω jordingsmotstand.
- Gnistgap ved høyspenningsmaster nær nettstasjon anbefales der det erfaringsmessig er fare for skade pga. atmosfæriske utladninger.
- Hvis jordmotstander holdes innenfor anbefalte grenser, kan det anvendes felles jording på transformator under forutsetning av at det ved luftledningsnett også anvendes avledere mellom faser og nøytralepunkt på lavspenningssiden. I motsatt fall anbefales adskilt jording.
- Gnistgap på høyspenningssiden i nettstasjon kan øke sannsynligheten for 50Hz overspenninger på lavspenningssiden. Overspenningsavleder kan være å foretrekke hvis ikke gnistgap på linjen er tilstrekkelig.
- Avledere med riktig restspenningsnivå plassert mellom fase og nøytralepunkt på lavspenningssiden er trolig det viktigste transformatorvern ved siden av gnistgap på høyspenningsledningen.
- Av de tiltak som er nevnt, er det bare adskilt jording og lav jordmotstand som gir kundene et visst vern. For å verne disse mot transiente overspenninger fra nettstasjonen, kan en plassere et avlederpunkt på alle lavspenningskurser før første abonnent. Dette punktet må plasseres der hvor jordingsforholdene er best mulig, og impuls-jordmotstanden bør helst være under 20Ω . Men for å verne kundene mot induerte atmosfæriske overspenninger i selve lavspenningsnettet, bør alle utsatte kunder ha eget overspenningsvern ved inntaket tilkople kundens jordingsanlegg (evt. felles jordingsanlegg).

V2.6 REFERANSER

- [1] Norges Vassdrags- og Energiverk (NVE)
Forskrifter for Elektriske Forsyningsanlegg (FEF) av 1. oktober 1987.
Oslo: 1988.

- [2] Norges Vassdrags- og Energiverk (NVE)
Forskrifter for Elektriske Bygningsinstallasjoner m.m. (FEB) av 20. desember 1989.
Oslo: 1990.

- [3] Norges Vassdrags- og Energiverk (NVE)
Driftsforskrifter for høyspeningsanlegg med utfyllende orientering av 20. november 1987 (DH).
Oslo: 1988.

- [4] Lewis, J., et.al. CIGRE arbeidsgruppe 23.10.
Earthing of GIS - An application guide.
Paris: Elektra nr. 151, desember 1993.

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

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