

# Konfigurering av kraftkabel med flera enledarkablar per fas

En teoretisk studie av svårigheter och  
möjligheter

Elforsk rapport 04:26



# Konfigurering av kraftkabel med flera enledarkablar per fas

En teoretisk studie av svårigheter och  
möjligheter

Elforsk rapport 04:26



# Konfigurering av kraftkabel med flera enledarkablar per fas

En teoretisk studie av svårigheter och  
möjligheter

Per Pettersson, Vattenfall Utveckling AB

**VATTENFALL** 



## Förord

Syftet med projektet var att undersöka vilka förutsättningar som finns för förbättringar i konstruktioner och förläggningssätt för kabelförband för att uppnå ökad överföringsförmåga och driftsäkerhet.

Fokus i projektet har varit att betrakta strömdelning inom fas och uppkomna skärmströmmar vid olika konfigurationer samt även de elektromagnetiska fält som uppstår.

Finansiering av projektet har via Elforsk erhållits av följande 14 företag i finansiell storleksordning:

|                              |                                  |
|------------------------------|----------------------------------|
| Vattenfall Eldistribution AB | Jämtkraft AB                     |
| Sydkraft Nät AB              | Eskilstuna Energi & Miljö AB     |
| Svenska Kraftnät             | Borås Energi Nät AB              |
| Göteborgs Energi AB          | Energiverken i Halmstad Elnät AB |
| Gränings Nät AB              | Karlstads Elnät AB               |
| Lunds Energi Elnät AB        | Borlänge Energi AB               |
| Öresundskraft AB             | Kvänumbygdens Energi ek. för.    |

Styrgruppen för projektet bestod av följande personer:

Erik Thunberg, Svenska Kraftnät

Erik Spiegelberg, Vattenfall Eldistribution AB

Ulf Thorén, Sydkraft Nät AB

Per Pettersson, Vattenfall Utveckling AB, projektledare

Ulf Grape, Vattenfall Utveckling AB

Sven Jansson, Elforsk AB, projektansvarig

Stockholm juni 2004

Sven Jansson

Elforsk AB



## Sammanfattning

Kraftkablar med fasor uppdelade på flera enledarkablar studeras teoretiskt med avseende på relevanta egenskaper, främst strömdelning inom fas, skärmströmmar och magnetfältsemission och i viss mån balans mellan faserna och praktisk görlighet. Kvantitativa kriterier för egenskaperna ställs upp. Ett trettiotal konfigurationer med upp till tre enledarkablar per fas presenteras och utvärderas. För varje egenskap jämförs de olika konfigurationernas prestanda, och de bra skiljs ut från de dåliga. Generellt sett bra lösningar eftersöks.

Två huvudtyper av konfigurationer identifieras med avseende på gruppering av enledarkablarna: den ena med enfasiga grupper och den andra med trefasiga. I alla avseenden finns den senare huvudtypen vara överlägsen även om man skruvar enledarkablarna inom grupper för den första huvudtypen för att uppnå jämn strömdelning. Det observeras att skruvning inte förmår reducera de ytterligt höga skärmströmmarna, och inte heller den högre magnetfältsemissionen.

Inom huvudtypen med trefasgrupper identifieras vidare två undertyper av konfigurationer: en med plana grupper och en med triangulära. Båda undertyperna kan användas för lågfälsapplikationer med jämn strömdelning i fallet med två enledarkablar per fas, den triangulära med ett fyndigt arrangemang med inverterade grupper.

Den triangulära undertypen lämpar sig naturligt för en ny klass av konfigurationer för fallet med tre enledarkablar per fas, som ger perfekt strömdelning och samtidigt lågt magnetfält och acceptabla skärmströmmar. Transponering inom grupperna kan behövas om skärmen är jordad i båda ändarna.

Fallet med fyra enledarkablar per fas studeras ej ingående. Emellertid observeras att bra konfigurationer kan skapas genom dubbling av fallet med två enledarkablar per fas.

Tabellen på omstående sida ger en grov bild av prestanda hos ett antal särpräglade konfigurationer. Symbolen "0" representerar någon form av standard, "–" sämre och "+" bättre. Dubbling av symbol betyder förstärkning.

| Konfiguration | Antal per Fas | Strömdeln. | Skärmström | Magnetfält | Fasbalans | Enkelhet | Anm.                                          |
|---------------|---------------|------------|------------|------------|-----------|----------|-----------------------------------------------|
|               | 1             | 0          | 0          | 0          | 0         | 0        | Triangulärt grundfall                         |
|               | 1             | 0          | –          | –          | **) –     | 0        | Plant grundfall                               |
|               | 2             | 0          | –          | 0          | –         | 0        | Vanligt förekommande                          |
|               | 2             | 0          | 0          | *) +       | **) –     | –        | Ny idé. Lågt magnetfält. Förläggning?         |
|               | 2             | 0          | --         | *) +       | **) --    | 0        | Förekommer. Lågt magnetfält.                  |
|               | 2             | **) --     | --         | –          | --        | ++       | Enkel, men dåliga prestanda                   |
|               | 2             | 0          | 0          | +          | 0         | --       | Teoretiskt optimal, men besvärlig förläggning |
|               | 3             | –          | –          | 0          | –         | +        | Vanligt förekommande. Ganska enkel            |
|               | 3             | 0          | 0          | *) ++      | **) –     | 0        | Ny idé. Mycket lågt magnetfält                |
|               | 3             | **) --     | --         | –          | --        | ++       | Enkel, men dåliga prestanda                   |
|               | 4             | 0          | –          | *) +       | –         | –        | Ny idé. Lågt magnetfält                       |
|               | 4             | 0          | --         | *) +       | **) --    | 0        | Lågt magnetfält                               |

\*) Skärmen jordad i bara ena änden, alt. jordad i båda ändarna samt skruvning inom grupper.

\*\*) Kan fås perfekt, dvs 0, med skruvning inom grupper.

## Summary

Power cables equipped with multiple single-core cables per phase are studied theoretically regarding relevant properties, especially current division among the single-core cables, shield currents, and emission of magnetic field, and to some extent phase balance and practical feasibility. Quantitative criterias for the properties are established. Some thirty configurations containing up to three single-core cables per phase are presented and evaluated. The performances of the configurations are compared regarding each property, and good ones are separated from bad ones. Overall good solutions are sought.

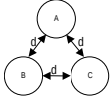
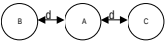
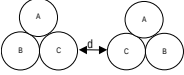
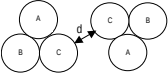
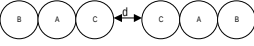
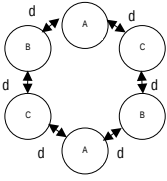
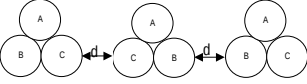
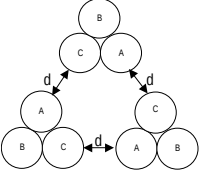
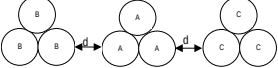
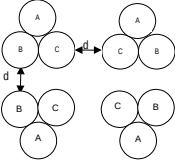
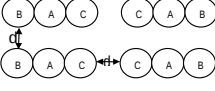
Two main types of configurations are identified regarding grouping of single-core cables: one using one-phase groups and the other using three-phase groups. The latter one is found to be superior in all respects even if transposition of the single-core cables within groups is carried out for the first one to achieve even current division. It is observed that transposition does not reduce the exceedingly high shield currents, as well as the higher magnetic field emission.

Two subtypes of configurations of three-phase groups are further identified for the preferred main type: flat formation and triangular. Both subtypes can be used for low-field applications with perfect current division for the case with two single-core cables per phase, the triangular one using an innovative arrangement with inverted groups.

For the case with three single-core cables per phase, the triangular subtype lends itself naturally to a novel class of configurations having perfect current division and at the same time very low field and moderate shield currents. Transposition within groups may be needed if the shield is earthed at both ends.

The case with four single-core cables per phase is not studied thoroughly. However, it is observed that good solutions may be found by doubling of the case with two single-core cables.

The table overleaf gives a broad overview of the performance of a number of particular configurations. The symbol "0" represents some form of standard performance, "–" under, and "+" over, doubling of symbol means strengthening.

| Configuration                                                                       | # per phase | Current division | Shield current | Magnetic field | Phase balance | Simplicity | Comment                                    |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------|------------------|----------------|----------------|---------------|------------|--------------------------------------------|
|    | 1           | 0                | 0              | 0              | 0             | 0          | Triangular basic case                      |
|    | 1           | 0                | –              | –              | **) –         | 0          | Plane basic case                           |
|    | 2           | 0                | –              | 0              | –             | 0          | Common                                     |
|    | 2           | 0                | 0              | *) +           | **) –         | –          | New idea. Low magnetic field. Laying?      |
|    | 2           | 0                | --             | *) +           | **) --        | 0          | Existing. Low magnetic field               |
|    | 2           | **) –            | --             | –              | --            | ++         | Simple, but poor performance               |
|   | 2           | 0                | 0              | +              | 0             | --         | Theoretically optimal but difficult laying |
|  | 3           | –                | –              | 0              | –             | +          | Common. Rather simple                      |
|  | 3           | 0                | 0              | *) ++          | **) –         | 0          | New idea. Very low magnetic field          |
|  | 3           | **) –            | --             | –              | --            | ++         | Simple, but poor performance               |
|  | 4           | 0                | –              | *) +           | –             | –          | New idea. Low magnetic field               |
|  | 4           | 0                | --             | *) +           | **) --        | 0          | Low magnetic field                         |

\*) The shield earthed at one end only, alt. earthed at both ends plus transposition within groups.

\*\*) Brought perfect, i.e. 0, by transposition within groups.





# Innehållsförteckning

|          |                                                |           |
|----------|------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>INLEDNING .....</b>                         | <b>1</b>  |
| 1.1      | BAKGRUND .....                                 | 1         |
| 1.2      | MÅL.....                                       | 1         |
| 1.3      | GENOMFÖRANDE .....                             | 1         |
| 1.4      | AVGRÄNSNINGAR .....                            | 2         |
| <b>2</b> | <b>PROBLEMFORMULERING .....</b>                | <b>3</b>  |
| 2.1      | FÖRUTSÄTTNINGAR OCH DEFINITIONER.....          | 3         |
| 2.2      | EGENSKAPER .....                               | 3         |
| 2.2.1    | <i>Strömdelning</i> .....                      | 3         |
| 2.2.2    | <i>Skärmströmmar</i> .....                     | 3         |
| 2.2.3    | <i>Magnetfält</i> .....                        | 4         |
| 2.2.4    | <i>Fasbalans</i> .....                         | 4         |
| 2.2.5    | <i>Kortslutningspåverkan</i> .....             | 4         |
| 2.2.6    | <i>Praktiska frågor</i> .....                  | 4         |
| <b>3</b> | <b>ANALYS.....</b>                             | <b>5</b>  |
| 3.1      | KVALITATIV ANALYS.....                         | 5         |
| 3.2      | EKVATIONSSYSTEM .....                          | 5         |
| 3.3      | DATORPROGRAM .....                             | 7         |
| 3.4      | MULTIPOLMETODEN.....                           | 7         |
| 3.5      | PARALLELLKOPPLING AV TRELEDARKABLAR .....      | 7         |
| <b>4</b> | <b>TILLÄMPNING .....</b>                       | <b>9</b>  |
| 4.1      | FÖRUTSÄTTNINGAR .....                          | 9         |
| 4.1.1    | <i>Kriterier</i> .....                         | 9         |
| 4.1.2    | <i>Jordningen</i> .....                        | 10        |
| 4.2      | DATORBERÄKNINGAR .....                         | 11        |
| 4.2.1    | <i>En enledarkabel per fas</i> .....           | 11        |
| 4.2.2    | <i>Två enledarkablar per fas</i> .....         | 12        |
| 4.2.3    | <i>Tre enledarkablar per fas</i> .....         | 13        |
| 4.2.4    | <i>Fler än tre enledarkablar per fas</i> ..... | 13        |
| 4.2.5    | <i>Olika antal enledarkablar per fas</i> ..... | 14        |
| 4.3      | JORDNINGENS INVERKAN PÅ MAGNETFÄLTET .....     | 14        |
| 4.4      | ELIMINERING AV FASOBLANS GENOM SKRUVNING ..... | 15        |
| 4.5      | PARAMETERVARIATION .....                       | 16        |
| 4.5.1    | <i>En invariansprincip</i> .....               | 16        |
| 4.5.2    | <i>Inverkan på strömdelning</i> .....          | 16        |
| 4.5.3    | <i>Inverkan på skärmström</i> .....            | 17        |
| 4.5.4    | <i>Inverkan på magnetfältet</i> .....          | 18        |
| 4.6      | PRAKTIKFALL .....                              | 18        |
| <b>5</b> | <b>SLUTSATSER.....</b>                         | <b>19</b> |
| <b>6</b> | <b>TABELLER .....</b>                          | <b>20</b> |
| <b>7</b> | <b>FIGURER.....</b>                            | <b>21</b> |
| <b>8</b> | <b>REFERENSER .....</b>                        | <b>22</b> |

## **Bilagor**

**A KONFIGURATIONSARKIV**

**B SERIEIMPEDANSER**

# 1 INLEDNING

## 1.1 Bakgrund

För överföring av elkraft över såväl korta som långa avstånd har kablar kommit att ersätta luftisolerade ledningar i en ökande utsträckning. Till exempel installeras idag i vattenkraftverk ofta kablar mellan generator och transformator där man tidigare använde blankskenor, främst av ekonomiska skäl. Ett annat exempel är distributionsnät i tätort och ibland även landsbygd där luftledningarna i hög grad får ersättas av markförlagda kablar, ofta för att nå en högre tillförlitlighet, och ibland även av miljöskäl såsom nedbringande av magnetfältsemissionen.

Då stora effekter skall överföras kan det bli nödvändigt att parallellkoppla flera enledarkablar per fas för att erhålla tillräcklig belastningsbarhet. Parallellkoppling innebär både svårigheter och möjligheter. En väl känd svårighet är att säkerställa strömfördelningen mellan enledarkablarna så att inte en av dem blir överbelastad medan andra belastas långt under sin belastningsbarhet. En möjlighet erbjuds då det gäller förbandets magnetfältsalstring som kan hållas låg, dels genom kompakt geometri, men kanske främst genom att faskonfigurera kablarna i förhållande till varandra så att magnetfälten från de olika enledarkablarna tenderar att släcka ut varandra. Andra aspekter i detta sammanhang är osymmetri mellan de tre faserna, som kan skapa oönskade nollföljdsströmmar, och anslutningen av kablarna, som kan bli mer eller mindre besvärlig för olika arrangemang. Även storleken och riktningen på de krafter som uppstår vid kortslutning påverkas av konfigureringen.

De normer som finns idag ger inte tillräcklig vägledning vid utformning av kraftkablar med två eller flera enledarkablar per fas med hänsyn till de egenskaper som kan vara betydelsefulla i det specifika fallet. Ett behov av studium har identifierats.

## 1.2 Mål

Studien avser att ta fram olika alternativa konfigurationer med fler än en enledarkabel per fas och utvärdera deras respektive för- och nackdelar med avseende på relevanta egenskaper. Beroende på applikationen kan vissa egenskaper vara viktigare än andra och man kan inte förvänta sig att utpeka patentröslöslningar som är överlägsna ur alla aspekter. Avsikten är att identifiera lösningar som man generellt sett bör undvika och lyfta fram de goda lösningarna.

## 1.3 Genomförande

De relevanta egenskaperna identifieras och kvantitativa kriterier för dessa ställs upp. En uppsättning kandidatkonfigurationer tas fram och utvärderas med avseende på kriterierna. Kandidatkonfigurationernas prestanda jämförs för varje egenskap, och goda respektive dåliga faller ut. Konfigurationer som generellt sett visar bra prestanda identifieras liksom sådana som generellt visar dåliga prestanda.

## 1.4 Avgränsningar

Jämfört med projektets ursprungliga beskrivning måste vissa avvikelser meddelas, samtidigt som vissa förtydliganden av texten är på sin plats.

Under arbetets gång blev det klart att skärmströmmar, som inte omnämndes alls i projektbeskrivningen samt även strömmar i följeledare, skulle kunna vara av väsentlig betydelse för kablers belastningsbarhet såväl som magnetfältsalstring. Befintligt datorprogram för beräkning av strömmar och magnetfält kunde inte beakta skärmströmmar, utan har måst utvidgas till att inkludera dessa, vilket arbete kom att dra resurser från andra aktiviteter. Detta ledde till att aspekten om kortslutningskrafter redan tidigt uteslöts ur studien, att aspekten om fasobalans tonades ned samt att utrymmet för en planerad aktivitet med praktisk verifikation minskade drastiskt. I ett sent skede visade sig dessutom dessa skärmströmmar, vid konfigurationer tänkta för låg magnetfältsalstring, fullständigt kunna fördärva denna egenskap om skärmens jordning är mycket bra. Denna problematik hade inte förutsetts vid projektets specificering.

En annan problemställning rörande skärmens behandling, är under vilka villkor man kan ha skärmen öppen i ena änden, dvs alla enledarkablarnas skärmar icke förbundna, med eller utan avledare. Detta behandlas ej i denna studie, men identifieras som ett område för separat studium.

Termiska aspekter ingår inte i studien. Härmed avses kopplingen mellan värmeutvecklingen till följd av strömmar i fasledare och skärmar och kabelns belastningsbarhet. Denna fråga har att göra med värmeavledningen och involverar sålunda kabelns förläggningssätt, utöver själva strömmarna och resistanserna.

Möjligheten att använda parallellkopplade treledarkablar behandlas blott summariskt.

## 2 PROBLEMFORMULERING

### 2.1 Förutsättningar och definitioner

Studien behandlar egenskaper hos trefasig kraftkabel förlagd i mark, kulvert eller luft. Kraftkabeln sträcker sig längs en rät linje mellan två terminaler. Varje fas utgörs av en eller flera enledarkablar som delar på fasströmmen. Enledarkablarnas placering och fastillhörighet, konfigureringen, är i varje tvärsnitt identisk. Eventuellt kan enledarkablar få byta plats längs kraftkabeln, skruvning. De totala fasströmmarna utgör ett perfekt symmetriskt trefassystem.

Alla enledarkablar är identiskt lika och det är samma antal i alla faserna. En enledarkabel består av fasledare, isolation, skärm och mantel. Fasledarna inom en fas är förbundna i terminalerna. Alla skärmar är förbundna och jordade i ena terminalen. I den andra terminalen finns två huvudfall beträffande skärmarna: öppen skärm med icke förbundna och icke jordade skärmar och sluten skärm med förbundna skärmar. För sluten skärm finns två alternativ: skärmen jordad eller skärmen ojordad i den andra terminalen. Parallellt med enledarkablarna kan en eller flera följeledare löpa. Följeledare är jordad i båda terminalerna.

Fasledare, skärmar och följeledare benämnes fortsättningsvis ledare.

### 2.2 Egenskaper

#### 2.2.1 Strömdelning

Om strömmen inom en fas delas lika mellan fasledarna och om detta gäller för alla tre faserna föreligger perfekt strömdelning. Avvikelse från detta är oönskad, emedan enledarkabeln med den högsta strömmen blir mer eller mindre begränsande för belastningsförmågan hos kraftkabeln genom ökad värmealstring i fasledaren. Graden av nedsättning av belastningsförmågan pga bristande strömdelning beror av förläggningstypen. Bristande strömdelning förorsakar även överföringsförluster.

I vissa fall kan perfekt strömdelning i en fas erhållas genom att enledarkablarna får byta plats längs kabeln efter ett visst schema, som beror av antalet enledarkablar i fasen. Detta kallas transponering eller skruvning.

#### 2.2.2 Skärmströmmar

Vid sluten skärm uppstår strömmar i skärmarna. Dessa strömmar ger upphov till värmealstring i skärmarnas ledare och är oönskade dels genom förorsakande av överföringsförluster och dels genom nedsättning av belastningsförmågan hos kraftkabeln. Ström i följeledare är oönskad av samma skäl. Graden av nedsättning av belastningsförmågan pga dessa strömmar beror av förläggningstypen.

I princip kan skärmströmmar elimineras genom en form av transponering, ”korskoppling”, av skärmarna. Detta innebär att skärmar från olika enledarkablar bryts upp och seriekopplas efter ett visst schema, som beror av antalet enledarkablar i fasen. Möjlighet finns att även eliminera ström i följeledare genom att variera placeringen längs kraftkabeln.

Vid öppen skärm uppstår inducerad spänning mellan skärm och jord, dvs i praktiken över mantel, vilken vid stor felström kan leda till överslag. Överspänningens storlek är direkt proportionell mot kraftkabelns längd och strömstyrkan.

### ***2.2.3 Magnetfält***

Strömmarna i ledarna är källor till det totala magnetfält som alstras av kraftkabeln. Magnetfältsemission är en negativ egenskap, dels p g a möjliga hälsorisker för personal och allmänhet, och dels eftersom oönskade induktionsströmmar och spänningar kan uppkomma i elanläggningen själv eller i omgivningen.

### ***2.2.4 Fasbalans***

Perfekt balans mellan faserna fås om impedansen är lika för de tre faserna. Avvikelse från detta innebär att matande system kan snedbelastas av kraftkabeln varvid obalans kan uppstå i spännings- eller strömsystemet. Graden av snedbelastning beror av kraftkabelns fasimpedanser i förhållande till det omgivande systemets fasimpedanser.

### ***2.2.5 Kortslutningspåverkan***

I samband med jord- eller kortslutningsfel i kraftkabeln eller i det omgivande systemet uppstår stora krafter mellan enledarkablarna vid stora felströmmar. Vid annan förläggningstyp än mark måste enledarkablarna förankras för att förhindra dynamiskt förorsakade skador på kraftkabeln själv eller omgivningen. Dimensioneringen av kraftkabeln måste även beakta termiska aspekter i samband med de stora felströmmarna.

Kortslutningspåverkan behandlas inte i studien.

### ***2.2.6 Praktiska frågor***

Härmed avses egenskaper som har betydelse under byggnads- och driftfasen. Beroende på förläggningstyp blir de olika konfigurationerna mer eller mindre svåra att realisera rent praktiskt. Det kan röra sig om problem med att lägga enledarkablarna på plats eller att få en enkel anslutning vid terminalerna. Även åtkomlighet och enkelhet vid reparation är av intresse liksom den allmänna överskådligheten.

### 3 ANALYS

I kapitlet presenteras de verktyg som används för att studera egenskaperna hos olika konfigurationer. De består dels av en metod för kvalitativ analys, som kan användas på konfigurationer med inbyggda symmetriegenskaper, en numerisk metod som tillämpas med ett datorprogram och en metod att karakterisera magnetfältet i en fjärrzon, multipolmetoden.

#### 3.1 Kvalitativ analys

Initialt kan man tänka sig att strömdelningen är perfekt, d v s i varje enledarkabel i en fas flyter identiskt lika strömmar i fasledarna. Varje ledare påverkas av en elektromotorisk kraft, EMK, som strävar efter att driva en ström i den. Denna EMK är en funktion av de strömmar som flyter i de andra ledarna och av avståndet till dem. Om nu alla fasledare inom en fas påverkas av identiska EMK:er och detta gäller alla faser så föreligger verkligen den antagna perfekta strömdelningen. Om EMK:erna är olika uppkommer obalans inom fasen och strömmar kommer att cirkulera mellan fasledarna.

Perfekt strömdelning är en symmetriegenskap som kännetecknas av att alla enledarkablar i en fas har identisk placering relativt alla de andra och att detta gäller för alla faserna. I konfigurationsarkivet i bilaga A är *2b*, *2c*, *2f*, *2g*, *3h*, *3l* och *3o* exempel på detta, samt vid enledartransponering, *2d*, *3a*, *3f*, *3j* och *3n*.

Även fasbalans är en symmetriegenskap. Perfekt fasbalans kännetecknas av att impedansen för en fas är oförändrad om denna tänks byta enledarkablar med de i en annan fas, och detta gäller vid alla tänkbara byten. I konfigurationsarkivet i bilaga A är *2g*, *3f*, *3g*, *3i*, *3k*, *3m* och *3o* konfigurationer med perfekt fasbalans.

Man noterar att *2g* och *3o* är de enda konfigurationerna i arkivet som både har perfekt strömdelning och perfekt fasbalans.

På detta stadium kan den kvalitativa analysen inte föras så långt mycket längre. I avsnitt 3.4 presenteras emellertid en analysmetod med vilken magnetfältsalstringen enkelt kan karakteriseras genom att direkt identifiera källorna till fältet för en given konfiguration.

#### 3.2 Ekvationssystem

Ett grundläggande koncept i analysen här är slingan. En slinga är en tänkt sammanbindning av två ledare så att strömmen i den ena ledaren returneras i den andra. För fasledarna inom en fas kan varje strömfördelning tänkas sammansatt av en uppsättning fixa strömmar, alla med den fasvinkel som hör till fasen och med summaström lika med den för fasen, men i övrigt godtycklig. Utgående från denna initiala strömfördelning kan varje faktisk strömfördelning erhållas genom att bilda tänkta slingor mellan fasledarna i vilka strömmar får induceras. Om antalet fasledare är  $n$  införs  $n-1$  slingor för fasen. Strömmen i varje fasledare ges sedan som summan av den initialt fixa strömmen i fasledaren och strömmarna från de slingor som innehåller fasledaren.

På motsvarande sätt, dock utan initiala strömmar, kan strömmarna i skärmarna och följeledarna tänkas vara bildade i en sluten men ojordad skärm så att summaströmmen är lika med noll. Jordningen av skärmen simuleras av ytterligare en slinga som består av en av skärmarna, godtyckligt vilken, förbunden med en tänkt returledare, som modellerar returströmmens väg mellan jordningarna.

Låt en slinga  $m$  bestå av ledarna  $i(m)$  och  $j(m)$ . För de båda ledarna gäller ekvationerna:

$$\sum_v I_v Z_{iv} + \sum_{n \neq m} (I_k Z_{ik} - I_k Z_{il}) + I_i Z_{ii} - I_i Z_{ij} = -\frac{\delta V_i}{\delta z}$$

$$\sum_v I_v Z_{jv} + \sum_{n \neq m} (I_k Z_{jk} - I_k Z_{jl}) + I_j Z_{ji} - I_j Z_{jj} = -\frac{\delta V_j}{\delta z}$$

där  $I$  och  $Z$  betecknar ström och impedans per längdenhet, respektive,  $V$  potential och  $z$  längskoordinat. Index  $v$  står för fasledare så att den första termen är bidraget till EMK:n från fasledarna med initiala strömmar. Den andra termen består av bidragen från alla slingor  $n$  utom den aktuella med  $k(n)$  och  $l(n)$  betecknande ledarna i respektive slinga. De två återstående termerna på vänstersidan står för bidraget från slingan själv. De båda ekvationerna kan nu genom subtraktion reduceras till en enda med högerledet lika med noll eftersom högerleden är lika. EMK:erna från de initiala strömmarna flyttas över till högerledet.

En i båda ändar jordad ledare betraktas som en speciell typ av slinga, ”jordslinga”, som uppträder i ekvationerna ovan med  $Z_{il}$  och  $Z_{ji}$  lika med noll. Jordslingan  $m$  med  $i(m)$  betecknande ledaren beskrivs av den enda ekvationen.

$$\sum_v I_v Z_{iv} + \sum_{n \neq m} (I_k Z_{ik} - I_k Z_{il}) + I_i Z_{ii} = 0$$

På detta sätt behandlas alla slingor och ett ekvationssystem av samma ordning som antalet slingor erhålles. Slingströmmarna är lösningar till ekvationssystemet och adderas till de initiala strömmarna varvid strömmarna i alla ledarna blir bestämda.

Impedanserna  $Z$  beskrivs i bilaga B. Till dessa kan läggas eventuella externa impedanser. Eventuella externa EMK:er kan även införas som extratermer i vänsterledet.

Det förtjänar påpekas att samtliga strömmar i ledarna lämnas oförändrade vid en godtycklig vridning av en given konfiguration, eftersom endast ledarnas inbördes lägen är av betydelse.

### 3.3 Datorprogram

Ett datorprogram som bestämmer alla ledarströmmar och det därav alstrade magnetfältet har utvecklats vid Vattenfall Utveckling AB. Programmet bygger på reduktion och lösning av ekvationssystemet som beskrivits i det tidigare avsnittet. Magnetfältets flödestäthet bestäms i ett horisontalplan på valfri höjd över konfigurationens mittpunkt.

Programmet medger ett användarstyrt val av förbindning av alla ingående ledare och förbindning till jord.

### 3.4 Multipolmetoden

Härmed avses en enkel metod att sönderlägga en konfiguration i dess magnetfältsalstrande strömkällor och syntetisera fältet från dessa till det totala magnetfält som alstras av arrangemanget i fjärrzonen, dvs på ett stort avstånd från kraftkabeln. Med hjälp av metoden kan en konfiguration klassificeras som monopol, dipol, quadropol, hexapol osv vilka har magnetfältsavtagande som  $1/r$ ,  $1/r^2$ ,  $1/r^3$ ,  $1/r^4$  osv., där  $r$  är avståndet till konfigurationens centrum. Konfigurationer som ger lågt fält i fjärrzonen är kandidater till att ge lågt fält även i närzonen.

Metoden bygger på att varje balanserat trefasssystem av strömmar kan betraktas som bestående av två enfasssystem elektriskt förskjutna  $120^\circ$ . Om nämligen tre ledare för strömmar med faslägen  $1$ ,  $a$  och  $a^2$  där  $a = \exp(j2\pi/3)$  så kan ledaren med fasläge  $a^2$  ses som återledare till vardera av de båda andra ledarna. Detta följer formellt av att  $a^2 = -1-a$ . Man får således två enfasssystem förskjutna med  $a$ . På långt avstånd alstrar vardera systemet dipolfält som avtar som  $1/r^2$ . I vissa konfigurationer där faserna är uppdelade på två delfaser kan fjärrfältet avta som  $1/r^3$ . Detta inträffar om två enfasssystem är geometriskt vridna  $180^\circ$  i förhållande till varandra, vilket ger quadropolfält i fjärrzonen. För  $2n$ -poler avtar fältet som  $1/r^{n+1}$ . Storheten  $n$  kommer fortsättningsvis att benämnas ”poltyp”.

Fältstyrkan i en punkt i fjärrzonen beror bara av avståndet till konfigurationen och ej av riktningen. Detta innebär att varje given konfiguration kan vridas utan att fältstyrkan i en given punkt ändras. För en mera ingående beskrivning av multipolmetodens teori och applikation hänvisas till [3] och [4].

### 3.5 Parallellkoppling av treledarkablar

Analysen hittills utgår från att endast enledarkablar används vid parallellkopplingen. Vid användning av treledarkablar blir situationen i många avseenden helt annorlunda och faktiskt mycket enklare att analysera förutsatt att skärmen är koncentrisk. Med fasledarna spiraliserade liksom skärmen blir skärmströmmen lika med noll om alla tre faserna ingår i varje treledarkabel. Perfekt balans inom och mellan faserna råder dessutom oavsett hur treledarkablarna är placerade i förhållande till varandra. Magnetfältet blir mycket lågt i fjärrzonen till följd av fasledarnas spiralisering, [5]. Om

treledarkablarna bara innehåller en fas uppträder de som om de vore enledarkablar, ur alla aspekter som här anläggs, och kan i princip analyseras som sådana.

## 4 TILLÄMPNING

Konfigurationerna i bilaga A undersöks med de metoder som presenterats i kapitel 3. Förutsättningarna anges först varefter resultatet av beräkningarna analyseras. Kapitlet avslutas med en känslighetsanalys, parametervariation, med avseende på enledarkabeln och praktikfall.

### 4.1 Förutsättningar

#### 4.1.1 Kriterier

Avsikten är att bedöma konfigurationerna i bilaga A med avseende på ett antal kriterier. För att få relevanta jämförelser är det lämpligt att ge konfigurationerna likvärdiga förutsättningar. De grundläggande förutsättningarna är:

- F1 Samma typ av enledarkabel respektive följeledare används
- F2 Avstånd mellan enledarkablar sinsemellan är ett och samma. Avstånd mellan grupper av enledarkablar är också ett och samma. Magnetfältet bestäms i samma punkt.
- F3 Nominella strömstyrkan är lika för enledarkablarna
- F4 Skärmen är sluten.

Beträffande förutsättning F1 så är grundfallet en enledarkabel med fasledarradie  $a_c=20$  mm skärmradi  $a_s=25$  mm och radie över mantel  $a_j=32$  mm. Fasledarens resistans  $R_c=0,03 \text{ } \Omega/\text{km}$  och skärmens  $R_s=0,6 \text{ } \Omega/\text{km}$ . Dessa data gäller ungefär för en enledarkabel för distribution med driftspänningen 12-24 kV med fasledare av 1000-1200 mm<sup>2</sup> Al och skärm av 35 mm<sup>2</sup> Cu. Följeledaren har resistansen  $R_n=0,4 \text{ } \Omega/\text{km}$ , vilket svarar mot en 50 mm<sup>2</sup> lina av Cu.

Två avståndsfall för F2 studeras: små avstånd med enledarkablarna placerade tätt ihop så att  $d=0$  mm, och stora avstånd där avståndet mellan grupper  $d=250$  mm. Fältpunkten, dvs punkten där flödestätheten beräknas, är belägen 2 m vertikalt ovanför konfigurationens mittpunkt.

För F3 används 1000 A per enledarkabel,

Konfigurationerna jämförs med avseende på vissa kriterier i avsnitt 4.2. I avsnitt 4.5 studeras inverkan av avvikelse från grundfallet för F1. Dessa kriterier är:

- K1 Strömdelning
- K2 Skärmström
- K3 Magnetfält
- K4 Fasbalans

Ett mått på strömdelningsegenskapen i K1 är:

$$k_d = I_{\max} / I$$

där  $I$  är nominell strömstyrka för enledarkabel och  $I_{\max}$  är strömstyrkan i den enledarkabel i arrangemanget som har högst ström. Stora värden på  $k_d$  indikerar dålig strömdelning.

Kriteriestorheten  $k_s$  i K2 har definierats som maximal skärmström  $I'_{\max}$  för någon skärm normerad med skärmströmmen i konfiguration 1a med små avstånd,  $I'_{1a}$ , dvs

$$k_s = I'_{\max} / I'_{1a}$$

Det behöver naturligtvis inte vara samma enledarkabel som ger maximal ström i K2 som i K1.

Magnetfältet i K3 har normerats med det från 1a med små avstånd under villkoret att fasströmmen är densamma. Kriteriestorheten för K3,  $k_m$ , definieras alltså som

$$k_m = (B / m) / B_{1a}$$

där  $B$  är flödestätheten vid nominell ström i enledarkabel och  $m$  är antal sådana per fas. Med denna definition är konfigurationen i sig själv bestämmande för egenskapen och inte enledarkablarnas kapacitet.

Ett enkelt kriterium för fasbalansen i K4 är

$$k_b = |Z_{\max}| / |Z_{\min}|$$

där  $Z_{\max}$  är impedansen för den fas som har högst absolutvärde och  $Z_{\min}$  dito för den som har lägst. Eftersom effektiva beräkningshjälpmedel saknas så kan ej  $k_b$  anges i annat fall än då kvalitativ analys ger att  $k_b=1$ . I många fall saknar eventuell obalans praktisk betydelse eftersom fasimpedanserna hos kraftkabeln är små i förhållande till de hos det omgivande kraftsystemet pga de små fasavstånden. Uppdelning av fasströmmen på flera ledare tenderar att ytterligare minska fasimpedanserna.

#### **4.1.2 Jordningen**

Begreppet jordning kräver en precisering vid fall med sluten skärm som är jordad i båda ändarna. Kvalitén på jordningen är generellt sett beroende av systemjordningens typ. I direktjordade nät är vanligtvis jordtagsmotståndet i stationer blott någon bråkdel av en ohm, medan det i höghmigt jordade nät kan uppgå till ett antal ohm.

För konfigurationer som t.ex. 1a saknar jordtagsresistansen helt betydelse eftersom skärmarnas totalström blir noll, så att ingen ström behöver flyta i jordningarna. Så är

emellertid inte fallet för t.ex. konfiguration *1b* där en nettoström måste flyta. Storleken på nettoströmmen beror inte bara av jordtagsresistanserna i terminalerna utan även av impedansen för jordåterledningskretsen, vilken i sin tur beror av den väg som strömmen tar. I modellen av impedanserna som används ligger ett antagande att återledningskretsen är en oändlig halvrymd med resistiviteten  $3000 \Omega\text{m}$ , vilket innebär att strömmen återleds på flera kilometers djup. Verkligheten beskrivs emellertid dåligt av en sådan enkel modell, eftersom marken typiskt består av skikt med olika resistivitet, och dessutom kan innehålla ledande föremål, som t.ex. vattenledningsrör, vilka strömmen kan följa.

Man urskiljer två extremfall: det ena med ideala jordtag med resistansen noll och återledning i en homogen halvrymd, och det andra med så stor jordtagsresistans att ingen nettoström alls kan flyta. Det som händer i det senare fallet är att en longitudinell spänningsuppbyggnad uppstår mellan skärmarnas båda hopkopplingspunkter. För mycket långa kablar skulle detta, teoretiskt sett, kunna vara besvärande, men i praktiken har inga problem uppmärksammats pga detta. Motsvarande spänningsuppbyggnad uppkommer förstås om skärmen blott är jordad i den ena terminalen. Det som sagts om fenomenet gäller även för konfigurationer med följeledare.

Datorprogrammet är så utformat att båda extremfallen ovan samt fall med specificerad jordtagsimpedans kan beaktas. I avsnitt 4.2 har dock valts fallet med oändlig impedans så att ingen återledningsström alls flyter. Detta är för konfiguration *1b* i enlighet med [1]. Inverkan på magnetfältet av en perfekt jordning behandlas i avsnitt 4.3.

## 4.2 Datorberäkningar

Konfigurationer från bilaga A utvärderades med datorprogrammet. För varje konfiguration gjordes fyra beräkningar: öppen skärm, skärmarna inom fas ihopkopplade, alla skärmar ihopkopplade men jordade bara i ena terminalen och alla skärmar ihopkopplade och idealt jordade i båda terminalerna. Här antas att alla skärmar är ihopkopplade men jordade bara i ena terminalen.

### 4.2.1 En enledarkabel per fas

För referenskonfigurationen *1a* och  $d=0$  beräknades skärmströmmen till 97A och flödestätheten till  $3.96 \mu\text{T}$ . Dessa värden utgör referens för skärmström resp. magnetfält. Skärmströmmen och magnetfältet ökade 2,6 resp. 4,0 ggr vid  $d=250$  mm.

Inverkan av följeledare studerades för *1a* med  $d=250$ . Följeledaren placerades först på ett avstånd av 10 cm utanför manteln på den vänstra delledaren i triangeln bas. Då kom en ström av ungefär samma storlek som halva skärmströmmen att flyta i följeledaren samtidigt som strömstyrkan sjönk i den närmaste enledarens skärm, steg i skärmen i toppen och lämnades oförändrad i den andra skärmen i basen. Placerades följeledaren i mitten på triangeln bas så blev strömmen i den ytterligare ungefär halverad och samtliga skärmströmmar mycket litet påverkade. Man inser att om följeledaren placeras i arrangemangets mittpunkt så kommer ingen ström alls att flyta i den och

skärmströmmarna att lämnas helt opåverkade. Oavsett placering visade sig följeledaren påverka magnetfältet marginellt.

I fall *1b* uppstod en spänningsuppbyggnad längs skärmen om 15V/km vid små avstånd,  $d=0$ . Ingen större skillnad noterades mellan fallen med och utan följelina placerad 10 cm utanför den vänstra enledarkabelns mantel. Denna spänning bestämdes genom ett passningsförfarande då en ansatt motriktad EMK fick pressa tillbaka nettoströmmen till noll efter att skärmen jordats idealt. Man kan för övrigt notera att skärmströmmen i den mittre fasen var väsentligt lägre än den i de båda yttre. Skärmströmmen för de båda yttre faserna skiljde sig något från varandra, i enlighet med [1], och alla skärmströmmar visade sig för övrigt stämma exakt med värden beräknade med de i [1] angivna uttrycken, vilket verifierar datorprogrammets riktighet.

Som förväntat visade sig skärmströmmarna inverka något reducerande på magnetfältet, relativt sett något mer för *1b* än för *1a*. Reduktionen var mycket liten vid  $d$ -värdet 0 mm och större vid  $d$ -värdet 250 mm pga ökade skärmströmmar.

#### **4.2.2 Två enledarkablar per fas**

Ur alla avseenden utom skärmström är *2b* bättre än *2a* för såväl vertikala som horisontella arrangemang. Den något större skärmströmmen torde dock uppvägas av en bättre strömdelning. Observera att *2b* skapats av *1a* genom "spegling", i *2bh* i vertikalplanet och i *2bv* i horisontalplanet.

Konfiguration *2c* av poltyp  $n=2$  ger förstås lägre magnetfält än *2a* och *2b*, horisontellt som vertikalt, och är i övrigt minst lika bra som dessa. Strömdelningen är perfekt. Det förtjänar påpekas att alla goda egenskaper hos konfigurationen bibehålls vid all translation av de båda trefasgrupperna i förhållande till varandra, dvs vid parallellförlyttning utan vridning.

Konfiguration *2d* är mycket ogynnsam oskruvad då det gäller strömdelning, en effekt som accentueras vid de små avstånden. Skärmströmmen, som är mycket stor, påverkas inte märkbart av skruvning. Inte heller magnetfältet påverkas av skruvning och är mycket högt. Den skruvade varianten uppträder på ett liknande sätt som *1b*, och datorprogrammet har körts med en ekvivalent enledarkabel i varje fas och ett ekvivalent fasavstånd, båda beräknade som geometriska medelvärden på ett speciellt sätt.

Konfiguration *2e*, med plana trefasgrupper, ger vid horisontellt arrangemang en dålig strömdelning och ganska hög skärmström, dock ej så hög som *2f*. Vid vertikalt arrangemang är strömdelningen perfekt men skärmströmmen mycket hög. Magnetfältet är jämförbart med de för *2a* och *2b*. Detta gäller både horisontella och vertikala arrangemang.

Konfiguration *2f* är av poltyp 2 och ger därför ett lågt magnetfält, dock inte riktigt så lågt som *2c* av samma poltyp bland de med triangelgrupper, vid horisontellt arrangemang. Vid vertikalt arrangemang är däremot magnetfältet lägre. Strömdelningen är perfekt, men skärmströmmen är hög vid horisontellt arrangemang. Vid vertikalt

arrangemang är däremot skärmströmmen låg. Det är intressant att notera att det mindre avståndet ger något högre skärmström än det större, vilket inte är fallet vid triangelgrupper. I likhet med 2c bibehålls de goda egenskaperna vad gäller magnetfält och strömdelning vid all translation.

Slutligen konfiguration 2g av cirkulär typ, som är den teoretiskt sett optimala men som kan vara svår att realisera praktiskt, ger perfekt strömdelning och fasbalans, låg skärmström och naturligtvis mycket lågt magnetfält eftersom poltypen  $n=2$ .

### **4.2.3 Tre enledarkablar per fas**

Konfigurationerna 3a, 3f, 3j och 3n är besläktade med 2d bland de med två enledarkablar per fas i och med att de innehåller grupper av enledarkablar tillhörande samma fas. De dåliga egenskaperna hos 2dh överförs därmed i allt väsentligt även om man skruvar. Det är anmärkningsvärt att 3a skruvad finns med som rekommenderad lösning i [2].

De övriga konfigurationerna har det gemensamt att varje grupp innehåller alla tre faserna. Detta medför att magnetfält såväl som skärmströmmar inte blir diskvalificerande. Man noterar att, vad gäller strömdelning, ”spegling” i 3c, dvs alternerande fasskifte i triangelns bas, inte har den effekt jämfört med 3b, med lika fasning, som den har i 2bh jämfört med 2ah.

Lågt magnetfält fås från 3d, 3e, 3i och 3m som är av poltyp  $n=2$ , och mycket lågt från 3h, 3l och 3o som är av poltyp  $n=3$ . Man ser att 3o är efter samma princip som 2g, bland de med två enledarkablar per fas, och att samma teoretiskt sett goda egenskaper överförs, medan praktisk realisering kan vara problematisk. Man observerar vidare att 3k ger en sämre strömdelning än de övriga med trefasgrupper.

### **4.2.4 Fler än tre enledarkablar per fas**

Av det tidigare kan man dra den allmänna slutsatsen att vissa konfigurationer kan generaliseras till ett godtyckligt antal enledarkablar per fas medan andra är speciella för ett specifikt antal. T.ex. kan 2a via 3a lätt generaliseras vilket också gäller 2b via 3b bland konfigurationerna innehållande trefasgrupper, och det är ganska givet att egenskaperna kommer att överföras i det stora hela. Konfigurationer som 3f-3m är däremot speciella och tycks sakna möjlighet till generalisering. Många av dessa uppkom vid ett sökande efter konfigurationer med mycket lågt magnetfält, dvs sådana med  $n=3$ , som ger hexapolfält.

I praktiken torde det i de flesta fall emellertid vara tillfyllest med  $n=2$ , med quadropolfält. För fallet med fyra enledarkablar per fas finner man att man kan skapa konfigurationer med jämn strömfördelning genom att ”spegla” vardera av 2bh och 2fh i horisontalplanet. För 2bh kan praktiska problem uppstå i och med att spetsarna i trianglarna kommer nedåt. Samma konfigurationer kan fås genom att spegla 2bv respektive 2ev i vertikalplanet.

En allmän reflexion är att det förefaller svårt att hitta riktigt bra konfigurationer med fler än fyra enledarkablar per fas, t.ex. med fem. Naturligtvis finns alltid, för varje antal, cykliska konfigurationer möjliga efter principen i  $2g$  via  $3o$ , men de är praktiskt sett ogörliga.

#### **4.2.5 Olika antal enledarkablar per fas**

En av förutsättningarna för studien är att antalet enledarkablar per fas skall vara lika för alla faserna. Det kan vara intressant att se vad som kan åstadkommas om man släpper denna förutsättning. Ett exempel är konfigurationen  $4/3$  (totalt antal enledarkablar dividerat med antal faser). Man lägger märke till det låga magnetfältet.

### **4.3 Jordningens inverkan på magnetfältet**

I föregående avsnitt antogs att alla skärmarna var elektriskt förbundna med varandra i båda ändar, men jordade i blott den ena av dem. Därvid undertrycks den eventuella nettoström i skärmen, som annars hade kunnat flyta genom jordningarna, såsom observerades i avsnitt 4.1.2. Denna "jordström" uppstår till följd av fasobalans och ger sig tillkänna som en potentialuppbyggnad mellan skärmens båda ändpunkter om den inte tillåts flyta genom jordningarna. En sådan jordström har i beräkningarna visat sig ha en ganska begränsad inverkan på skärmströmmarnas allmänna storlek, medan inverkan på magnetfältsemissionen kan vara dramatisk vid konfigurationer med mer än en enledarkabel per fas.

Av de konfigurationer som studerats är de cirkulära, dvs  $2g$  och  $3o$ , samt de triangulära  $3g$ ,  $3i$ ,  $3k$  och  $3m$  de enda med perfekt fasbalans, och dessa påverkas inte av jordningen. Av de övriga ger  $2c$  och  $2f$  ett lågt fält och  $3h$  och  $3l$  ett mycket lågt fält om jordström ej finns, men ett inte särskilt lågt vid perfekt jordning i båda ändarna. Mera precist så ökar  $k_m$  för  $2ch$  och  $3h$  till ca 0,5, och för  $2fh$  till 0,65, samtliga siffror för  $d=0$ . Konfiguration  $3l$  är inte körd i dator, för  $d=0$ , men bedöms få en försämring ungefär som  $3h$ . För  $d=250$  mm blev inte effekten lika dramatisk, faktiskt sjönk fältet för både  $2ch$  och  $2fh$  i referensfältpunkten, i det senare fallet nära till hälften. Ett par meter ut från mitten noterades emellertid en fältökning. För  $3h$  och  $3l$  steg  $k_m$  till ca 0,2 vid det större avståndet, alltså även där en kraftig försämring.

Slutsatsen är att för obalanserade konfigurationer med lågt eller mycket lågt magnetfält vid öppen alternativt slutna men dåligt jordad skärm, eller slutna skärm jordad i bara den ena änden, så sker en dramatisk ökning vid perfekt jordning vid tätt packade arrangemang.

Effekten förklaras av att nettoströmmen genom skärmen alstrar ett monopolfält, poltyp  $n=0$ , som helt slår igenom. Typiskt är denna ström bara 1-2% av fasströmmen, det högre värdet vid tät packning,  $d=0$ , vilket i sig ger ett  $k_m$  på 0,25-0,50. Monopolfältet avtar alltså som  $1/r$ , och redan på ett par meters avstånd ut från mitten av konfigurationen

kommer det i samtliga fall som studerats ovan att ge ett dominerande bidrag till det totala fältet.

En relevant fråga i detta sammanhang är hur stort jordtagsmotståndet egentligen skall vara för att jordningen inte ska kunna anses vara perfekt. Man kan se problemet som att en av fasobalans skapad EMK driver strömmar genom kretsen bestående av alla parallellkopplade skärmar och jordåterledaren. Den geometriska medelradien för skärmen beror av skärmradien och de inbördes avstånden mellan enledarkablarna och kan vara av storleksordningen en decimeter för konfigurationer med två enledarkablar per fas, något mindre vid det mindre  $d$ -avståndet och något större vid det större. Med hjälp av uttryck i bilaga B kan då reaktansen för kretsen beräknas till ca  $0,7 \Omega/\text{km}$ , resistansen är  $0,05$  och kan försummas. De parallellkopplade skärmarnas resistans är beroende av antalet enledarkablar per fas och antas kunna försummas. Alltså ska jordtagsreistansen per kilometer kabelsträcka ställas i relation till  $0,7 \Omega/\text{km}$ . Redan några få ohm per kilometer kabelsträcka av sammanlagd resistans för båda terminalerna bör alltså räcka till att dra ned jordströmmen väsentligt, och begreppet ”icke perfekt jordning” blir därmed definierat.

#### 4.4 Eliminering av fasobalans genom skruvning

I det föregående avsnittet påvisades hur jordströmmar genom skärmen fullständigt kunde fördärva magnetfältet för konfigurationer avsedda för lågt eller mycket lågt fält om jordningen var alltför bra och det samtidigt rådde obalans mellan faserna. Patentlösningen på problemet är förstås skruvning inom trefasgrupperna så att fasbalans resulterar. Med skruvning menas att vid två punkter belägna  $1/3$  av kabelns längd från ändarna låta enledarkablarna byta plats cykliskt så att alla tre positionerna antas. För konfigurationer med triangulära grupper permuteras enledarkablarna helt enkelt i punkterna genom  $120^\circ$  vridning åt samma håll, medurs eller moturs, medan sådana med plana grupper måste permuteras åt olika håll, se exemplen i figur 1.

Genom skruvning elimineras alltså jordströmmar och därmed det därav förorsakade fördärliga bidraget till magnetfältet, så att tabell 1 i stort fortfarande är giltigt för konfigurationerna  $2c$ ,  $2f$ ,  $3h$  och  $3l$ .

Beträffande skärmströmmen, som nu blir lika i alla enledarkablarna, så kan denna inte bestämmas med hjälp av datorprogrammet, eftersom detta antar att samma konfiguration gäller längs hela sträckan. Emellertid förenklar fasbalansen problemet till den grad att analytisk lösning blir möjlig. Det kan visas att skärmströmmen påverkas obetydligt av skruvningen vid triangulära grupper så att värdena i tabell 1 fortfarande är giltiga. Vid plana grupper gäller att skruvning av  $1b$  med  $d=0$  ger  $k_s=1,33$  att jämföra med  $1,58$  utan skruvning. För konfiguration  $2fh$  sker faktiskt därav en rejäl minskning av  $k_s$ .

Strömdelningen inom fas lämnas opåverkad av skruvningen. Observera att den skruvning som är aktuell för konfigurationer med lika fasning inom grupp, t.ex.  $2dh$ , är av annat slag och har för avsikt att skapa balans inom faser, och inte som här mellan faser.

## 4.5 Parametervariation

Tabell 1 är beräknad för en enda typ av enledarkabel beskriven i avsnitt 4.1.1, och typisk för impedansjordade distributionsnät. Det är av intresse att undersöka vilken inverkan enledarkabelns konstruktion har, och ett exempel avseende direktjordat överföringsnät studeras. Först påvisas en invariansprincip som ökar den intuitiva förståelsen av problemet.

### 4.5.1 En invariansprincip

En mycket betydelsefull egenskap hos serieimpedanserna i bilaga B är att de är invarianta under förändring av längdskalan, dvs storleken på alla radier och avstånd. Att så är fallet beror på att den logaritmiska termen som ingår i uttrycket för serieimpedansen innehåller kvoten mellan  $D_g$ , jordåterledningsdjupet, och  $d_{kl}$ , centrumavståndet mellan två ledare, alternativt  $a_k$ , radien för en ledare. Om således alla dessa förändras med en multiplikativ konstant,  $q$ , så lämnas alla kvoter oförändrade. Detta överförs via de logaritmiska termerna till reaktanserna. Om då alla ledarresistanser lämnas oförändrade så blir alltså alla  $Z_{kl}$  oförändrade och ekvationssystemet i avsnitt 3.2 oförändrat, vilket leder till att alla strömmar blir oförändrade.

Vad händer då med magnetfältet som naturligtvis skall jämföras i punkter vars koordinater också har skalats om med faktorn  $q$ ? Svaret är att det minskar med faktorn  $q$ , vilket inses genom att betrakta fältet från varje enskild ledare, monopol, som avtar omvänt proportionellt mot avståndet. Men om man vill bibehålla den ursprungliga fältpunkten och bara skala om konfigurationen, vad kan då sägas om fältet? Antag att fältpunkten är belägen vertikalt ovanför konfigurationens mittpunkt, och att avståndet är så stort att fjärrfältsapproximationen i avsnitt 3.4 gäller så att fältet avtar som  $1/r^{n+1}$ . Att då gå tillbaka till den ursprungliga fältpunkten innebär att det ursprungliga fältet förstöras med faktorn  $q^n$ . Om således flödestätheten är känd i en referenspunkt rakt ovanför konfigurationens centrum så fås den i samma punkt efter skalning genom multiplikation med  $q^n$ .

### 4.5.2 Inverkan på strömdelning

Studien av inverkan på strömdelningen inskränks till konfigurationer med trefasgrupper av enledarkablar, dvs  $2d$ ,  $3a$ ,  $3f$ ,  $3j$  och  $3n$  lämnas utanför. Konfigurationerna  $2bv$ ,  $2ch$ ,  $2ev$ ,  $2f$ ,  $2g$ ,  $3h$ ,  $3l$  och  $3o$  med perfekt strömdelning är oberoende av varje parametervariation. Av övriga konfigurationer är  $2bh$  och  $2cv$  speciella eftersom de är de enda som är perfekta med öppen skärm men får en, om än betydelselös, liten störning från skärmströmmarna då skärmen sluts. Återstår  $2a$ ,  $2eh$ ,  $3b$ ,  $3c$ ,  $3d$ ,  $3l$ ,  $3g$ ,  $3i$ ,  $3k$  och  $3m$ . Man ser att  $2e$  i stort sett borde uppträda som  $2b$  då det gäller strömdelning, om än med ännu större cirkulerande strömmar. Av tabell 1 framgår vidare att vad gäller  $k_d$  så avviker inte  $2ah$  väsentligt från de andra i uppräknningen. Emellertid är det mycket enklare att analysera den vertikala varianten  $2av$ , och denna konfiguration får stå som modell till parametervariationen.

Som nämndes ovan kan skärmströmmar ha en viss inverkan på strömdelningen, men i allmänhet är den svag, och öppen skärm antas här för enkelhetens skull. Studien begränsas vidare till den fas som är belägen i triangelgruppens topp. Den cirkulerande strömmen i den aktuella fasen alstras av strömmarna i de båda faser som är belägna i triangelgruppens bas. Dessa strömmar består dels av nominella strömmar och dels av cirkulerande strömmar. Analysen förenklas om man bortser från den senare kategorin. Den cirkulerande strömmen kannu beräknas som den drivande EMK:n dividerad med slingans impedans. Då reaktansen i slingan i typiska fall överstiger resistansen kan man förenklat skriva

$$k_d \approx 1 + \frac{\ln(d_1 / d_2)}{2(1/4 + \ln(b/a_c))} \quad d_{1,2} = \sqrt{b^2 + s^2 \pm \sqrt{3}bs}$$

där  $a_c$ ,  $s$  och  $b$  är fasledarens radie, centrumavstånd mellan ledare i trefasgrupp respektive centrumavstånd mellan trefasgrupperna. Med tidigare beteckningar blir  $s=2a_j$  där  $a_j$  är radien för manteln. Sätter man in värden enligt grundfallet och konfiguration 2a med  $d=0$  så blir  $k_d=1,25$  att jämföra med 1,16 med den numeriska beräkningen. Med  $d=2s$ , som antas fortsättningsvis för enkelhets skull, blir  $k_d=1,20$ .

En 145 kV-kabel med samma ledararea som i grundfallet har en isolation som är ca tre ggr tjockare än den för en 24 kV-kabel. Detta skulle innebära att både  $s$  och  $b$  ökar med ca en tredjedel, vilket lämnar kvoten mellan  $d_1$  och  $d_2$  oförändrad, så att man får  $k_d=1,18$ , vilket skall jämföras med 1,20. Alltså kan man dra slutsatsen att spänningsnivån har obetydlig effekt på  $k_d$ .

#### 4.5.3 Inverkan på skärmström

Studien med avseende på inverkan på skärmströmmen begränsas till konfigurationer med triangulära trefasgrupper. Man ser att  $k_s$  i tabell 1 ej väsentligt överstiger ett, som för referenskonfigurationen 1a med  $d=0$ , och denna torde kunna stå som modell i studien. Genom att sönderlägga konfigurationen enligt multipolmetoden avsnitt 3.4 finner man att skärmströmmen  $I_s$  kan bestämmas som den drivande EMK:n dividerad med impedansen i ett enfassystem bestående av två enledarkablar i konfigurationen. I typiska fall är resistansen i skärmkretsen väsentligt större än reaktansen, som försummas och man får med  $I$  betecknande fasströmmen:

$$I_s / I \approx j\omega \frac{\mu_o}{2\pi} \frac{\ln(s/a_s)}{R_s}$$

där  $s=2a_j$  då  $d=0$ . Detta ger  $|I_s / I| = 0,098$ , vilket stämmer bra med det resultatet från den numeriska beräkningen. Observera att  $I_s$  ligger  $90^\circ$  ur fas med  $I$ , vilket har betydelse för magnetfältet, som behandlas nedan.

För en kraftkabel för högre spänning och med tjockare isolation ökar  $s$  i ungefär samma mån som  $a_s$  och den logaritmiska faktorn förhåller sig konstant. För ett direktjordat

system måste man emellertid gå upp i skärmarea, t.ex. till  $95 \text{ mm}^2$  för 145 kV att jämföra med  $35 \text{ mm}^2$  för 24 kV och impedansjordat system. Detta betyder alltså nästan en tredubbling av skärmströmmen, eftersom  $R_s$  är direkt proportionell mot skärmarean.

#### 4.5.4 Inverkan på magnetfältet

För varje given konfiguration är längdskalan den absolut viktigaste parametern för magnetfältet. Inverkan beror på poltypen  $n$  så att en förändring av alla avstånd inom konfigurationen med faktorn  $q$  ger en ändring av flödestätheten med faktorn  $q^n$ . Dvs att konfigurationer som i sig ger låga eller mycket låga fält är ytterst känsliga för ändringar i längdskalan. För tätt packade konfigurationer, dvs  $d=0$ , ökar alla avstånd proportionellt mot  $a_j$ , och den tjockare isolationen hos en enledarkabel för 145 kV konstruktionsspänning ger som uppskattats i avsnitt 4.2.2 en ökning av  $a_j$  med ca en tredjedel. För  $n=1$  betyder det alltså en ökning av flödestätheten med just en tredjedel, och för  $n=2$  med ca tre fjärdedelar. För  $n=1$  och det större avståndet mellan grupperna blir inverkan relativt sett mindre.

Skärmströmmar har en viss betydelse för magnetfältet eftersom det är totalströmmen som ger fältet från den enskilda enledarkabeln. I avsnitt 4.5.3 visades att skärm- och fasledarströmmen typiskt är fasförskjutna  $90^\circ$ , vilket betyder att skärmströmmen bidrar obetydligt till det totala magnetfältet.

#### 4.6 Praktikfall

Praktisk verifiering av hur bra den beskrivna modellen kan prediktera de olika egenskaperna i avsnitt 2.2 har inte kunnat göras med dedicerade mätningar då det visade sig vara svårt att få tillgång till lämplig kraftkabel att mäta på. Det har även visat sig att mycket få relevanta mätningar finns dokumenterade i litteraturen. Man skulle alltså, för en kraftkabel med fler än en enledarkabel per fas, vilja få uppmätt ledarströmmar, skärmströmmar och magnetfält. En studie där magnetfältet mätts upp för två olika konfigureringar i en nätstation samt vissa mätningar i vattenkraftstationer skall relateras.

I [6] beskrivs åtgärder för att reducera magnetfältet från en kraftkabel på lågspänningssidan i en nätstation. Ursprungligen fanns konfigurationen  $2dh$  på en kabelstege mellan transformator och lågspänningsställverk. Som första åtgärd övergick man till  $2ah$ , varvid magnetfältet sjönk till en femtedel. Det framgår inte av rapporten vilket avstånd  $d$  som gäller, men av en bild framgår att det skulle kunna vara något mindre än 250 mm. Den uppmätta reduktionen skulle alltså kunna vara i enlighet med modellen.

I [7] redogörs för mätningar av magnetfält från skenor mellan generator och generatorställverk i ett antal vattenkraftstationer. I några fall hade blankskenor bytts ut mot kablar. Generellt noterades en väsentlig magnetfältreduktion, men den exakta storleken framkommer ej. I ett fall med två enledarkablar per fas användes konfiguration  $2dh$ , och i en annan med tre dylika  $3b$  skruvad.

## 5 SLUTSATSER

Två huvudtyper av konfigurationer identifieras med avseende på gruppering av enledarkablar: den ena med enfasiga grupper och den andra med trefasiga. I alla avseenden befinns den senare huvudtypen vara bäst om ej skruvning av enledarkablar inom fas tillgrips. En sådan skruvning medför visserligen alltid perfekt strömdelning inom fas men för konfigurationer med enfasiga grupper fås mycket större skärmströmmar vid slutna skärm jämfört med trefasiga grupper, och dessutom alltid mycket högre magnetfält.

Inom huvudtypen med trefasgrupper identifieras två undertyper av konfigurationer: en med plana grupper och en med triangulära. För fallet med två enledarkablar per fas befinns båda huvudtyperna i princip vara lika effektiva då det gäller att få jämn strömdelning och/eller lågt magnetfält. För att få lågt magnetfält med triangulära grupper krävs emellertid ett oortodox arrangemang med invertering av grupperna. I detta fall visar sig plana grupper ge högre skärmströmmar än triangulära vid horisontellt arrangemang, och lika vid vertikalt.

För fallet med tre enledarkablar per fas befinns den triangulära undertypen naturligt passa in i en helt ny klass av konfigurationer med trianglarna placerade i en större triangel. Det visar sig på så sätt gå att skapa konfigurationer med perfekt strömdelning, ej speciellt höga skärmströmmar och mycket lågt magnetfält. Arrangemangen kräver ingen invertering av trianglarna.

Fall med fler än tre enledarkablar per fas studeras ej ingående. Emellertid observeras att för fallet med fyra går bra konfigurationer att skapa genom dubbling av fallet med två. Vid triangulära grupper krävs invertering.

Eventuell följeledare förändrar inte nämnvärt ovanstående slutsatser.

En speciell konfiguration med enledarkablarna arrangerade på en cirkel med cyklisk fasning befinns ha extrema egenskaper, men torde ha praktiska begränsningar.

Skärmens jordning visar sig ha obetydlig inverkan på alla studerade egenskaper utom magnetfält. För samtliga konfigurationer utom de cirkulära med lågt magnetfält vid två enledarkablar per fas och mycket lågt vid tre ökar magnetfältet dramatiskt då en i båda ändar förbunden skärm jordas perfekt i båda ändarna. Detta fenomen har sig grund i obalans mellan faser, och kan elimineras genom skruvning. För skärm jordad i bara den ena änden uppstår ej problemet.

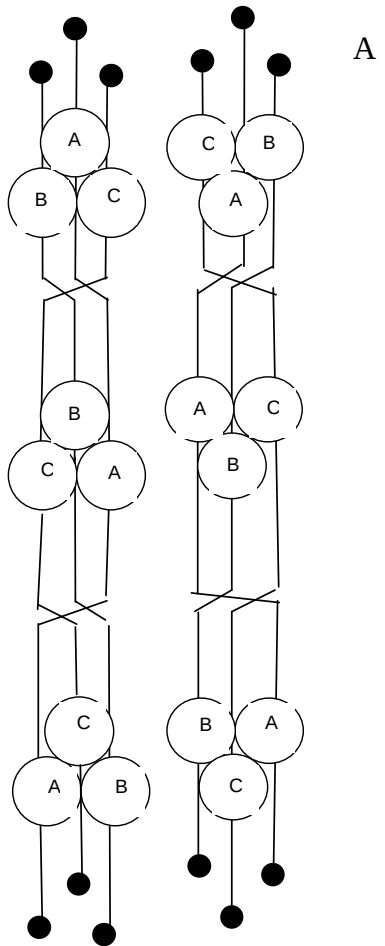
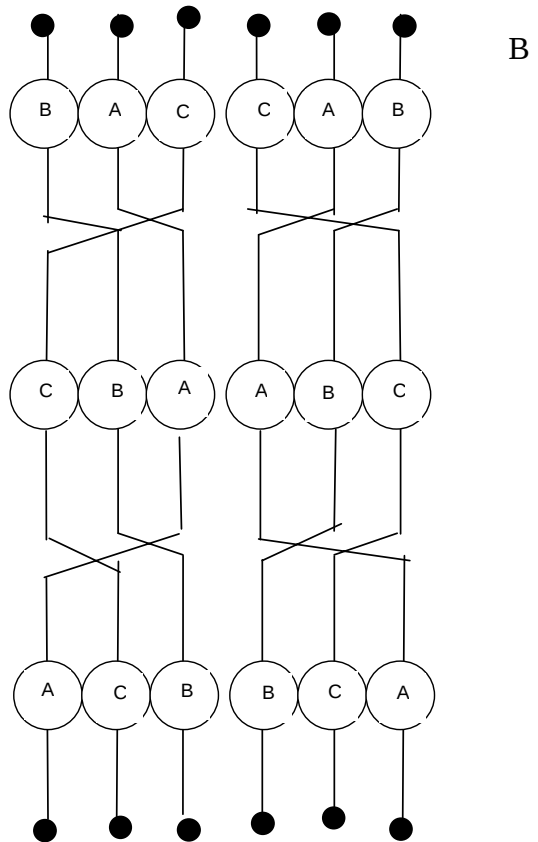
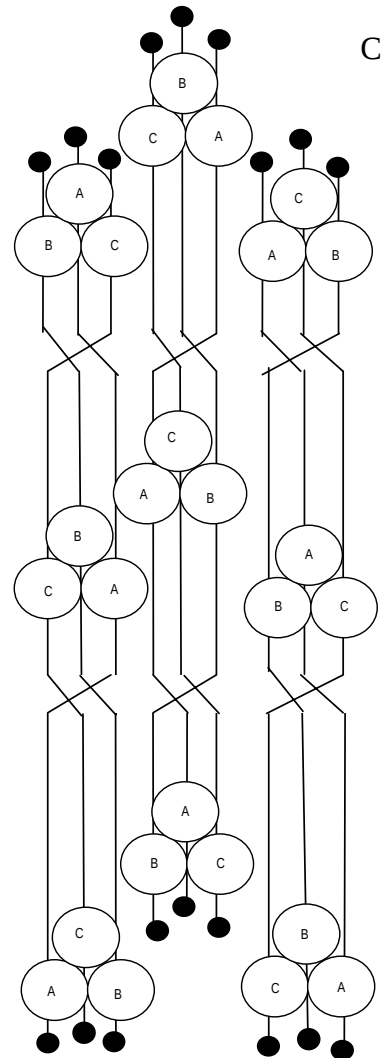
Resultatet av studien är framförallt tänkt att stimulera till fortsatt aktivitet inom problemområdet, så att inte slentriantänkande leder till undermåliga lösningar. Kanske kan SEK-kommittén TK 20 gynna ett framtagande av mera utförliga riktlinjer. Parallellt kan förhoppningsvis kraftföretagen pröva arrangemang som visat sig ha lovande egenskaper i studien, för att på så sätt skapa sig erfarenhet. Studien kan även styrka sundheten i redan etablerad praxis.

## 6 TABELLER

| Konfiguration | Strömdelning<br>$k_d$ |       | Skärmström<br>$k_s$ |       | Magnetfält<br>$k_m$ |       | Fasbalans<br>$k_b$ | Poltyp $n$ | Anmärkning |
|---------------|-----------------------|-------|---------------------|-------|---------------------|-------|--------------------|------------|------------|
|               | d=0                   | d=250 | d=0                 | d=250 | d=0                 | d=250 |                    |            |            |
| 1a            | 1                     | 1     | 1                   | 2,6   | 1                   | 4,0   | 1                  | 1          |            |
| 1b            | 1                     | 1     | 1,58                | 3,20  | 1,38                | 6,4   |                    | 1          |            |
| 2ah           | 1,13                  | 1,02  | 1,18                | 1,02  | 0,81                | 0,87  |                    | 1          |            |
| 2av           | 1,16                  |       | 1,15                |       | 0,80                |       |                    | 1          |            |
| 2bh           | 1,02                  | 1,00  | 1,27                | 1,02  | 0,66                | 0,71  |                    | 1          |            |
| 2bv           | 1                     | 1     | 1,29                |       | 0,70                |       |                    | 1          |            |
| 2ch           | 1                     | 1     | 1,11                | 1,01  | 0,052               | 0,191 |                    | 2          |            |
| 2cv           | 1,01                  |       | 1,00                |       | 0,057               |       |                    | 2          |            |
| 2dh           | 1,33                  | 1,08  | 3,20                | 5,35  | 2,21                | 6,8   |                    | 1          | Oskruvad   |
| 2dh           | 1                     | 1     |                     | 5,36  |                     | 6,8   |                    | 1          | Skruvad    |
| 2dv           | 1                     | 1     |                     |       |                     |       |                    | 1          |            |
| 2eh           | 1,21                  | 1,04  | 1,28                | 1,56  | 0,75                | 1,01  |                    | 1          |            |
| 2ev           | 1                     | 1     | 2,33                |       | 1,36                |       |                    | 1          |            |
| 2fh           | 1                     | 1     | 1,81                | 1,62  | 0,138               | 0,301 |                    | 2          |            |
| 2fv           | 1                     | 1     | 0,97                |       | 0,052               |       |                    | 2          |            |
| 2g            | 1                     | 1     | 0,85                |       | 0,054               |       | 1                  | 2          |            |
| 3a            |                       | 1,11  |                     | 6,8   |                     | 6,1   |                    | 1          | Oskruvad   |
| 3a            | 1                     | 1     |                     | 6,9   |                     | 6,1   |                    | 1          | Skruvad    |
| 3b            | 1,08                  | 1,02  | 1,24                | 1,03  | 0,77                | 0,79  |                    | 1          |            |
| 3c            | 1,10                  | 1,01  | 1,24                | 1,03  | 0,80                | 0,72  |                    | 1          |            |
| 3d            |                       | 1,02  |                     | 1,01  |                     | 0,258 |                    | 2          |            |
| 3e            |                       | 1,01  |                     | 1,01  |                     | 0,156 |                    | 2          |            |
| 3f            |                       | 1,11  |                     | 5,7   |                     | 4,4   | 1                  | 1          | Oskruvad   |
| 3f            | 1                     | 1     |                     | 5,7   |                     | 4,0   | 1                  | 1          | Skruvad    |
| 3g            |                       | 1,02  |                     | 1,01  |                     | 0,63  | 1                  | 1          |            |
| 3h            | 1                     | 1     | 1,18                | 1,02  | 0,0034              | 0,024 |                    | 3          |            |
| 3i            | 1,10                  | 1,01  | 1,18                | 1,01  | 0,136               | 0,162 | 1                  | 2          |            |
| 3j            |                       | 1,14  |                     | 5,7   |                     | 4,4   |                    | 1          | Oskruvad   |
| 3j            | 1                     | 1     |                     | 5,7   |                     | 4,4   |                    | 1          | Skruvad    |
| 3k            |                       | 1,04  |                     | 1,02  |                     | 0,70  | 1                  | 1          |            |
| 3l            | 1                     | 1     |                     | 1,04  |                     | 0,029 |                    | 3          |            |
| 3m            |                       | 1,01  |                     | 1,00  |                     | 0,184 | 1                  | 2          |            |
| 3n            |                       |       |                     |       |                     |       |                    | 1          | Oskruvad   |
| 3n            | 1                     | 1     |                     |       |                     |       |                    | 1          | Skruvad    |
| 3o            | 1                     | 1     |                     |       |                     |       | 1                  | 3          |            |
|               |                       |       |                     |       |                     |       |                    |            |            |
| 4/3           | 1                     | 1     | 0,91                | 1,61  | 0,177               | 0,95  |                    | 1          |            |

Tabell 1 Egenskaper hos konfigurationer

## 7 FIGURER



Figur 1 Skruvning av trefasgrupper

- A konfiguration 2 ch
- B konfiguration 2fh
- C konfiguration 3h

## 8 REFERENSER

- [1] "Calculation of the continuous current rating of cables", IEC 287, 1982.
- [2] "Belastningsförmåga hos kablar med märkspänning 1 till 24 kV", svensk Standard SS 424 14 24, 1979.
- [3] Pettersson P, "Simple method for characterization of magnetic fields from balanced three-phase systems" CIGRE Session 1992, Paper 36-103.
- [4] Pettersson P, "Principles in transmission line magnetic field reduction", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 11, No. 3, July 1996.
- [5] Pettersson P, Schönborg N, "Reduction of power system magnetic field by configuration twist", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 12, No. 4, Oct 1997.
- [6] Fransson L, Hamnerius Y, "Reduktion av Magnetiska fält från nätstationer", Chalmers, Rapport Nr 48, juni 1990.
- [7] Larsson A, "Sammanställning från mätningar av magnetfält i vattenkraftstationer", intern rapport Vattenfall Utveckling, juni 1994.

## **Bilagor**



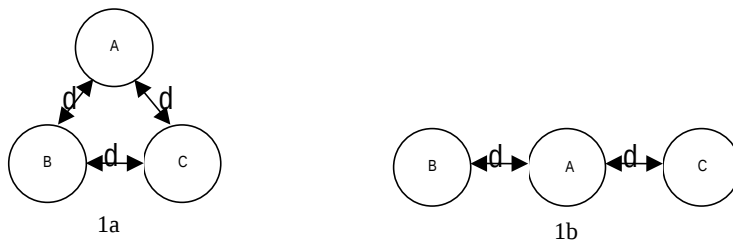
## A KONFIGURATIONENSARKIV

Siffran i konfigurationsbeteckningen anger antal enledarkablar per fas och andra bokstaven typen. Den tredje bokstaven anger arrangemang av grupper av enledarkablar med  $h$  betecknande horisontellt och  $v$  vertikalt. Dualiteten mellan vertikala och horisontella följer vissa principer. T.ex. är trefasgrupperna i  $2ah$  och  $2av$  identiskt lika men placerade horisontellt respektive vertikalt. I  $2bh$  och  $2bv$  är grupperna "speglade" i vertikal- respektive horisontalplanet (ytterligare en vertikal variant med topparna mot varandra möjlig men ej visad). I  $2ch$  och  $2cv$  är den inverterade gruppen placerad bredvid respektive under. Dessa principer är blott använda vid konfigurationer med två enledarkablar per fas, men skulle kunna överföras till det allmänna fallet.

Ur alla aspekter som involverar strömmar i fasledare och skärmar är samtliga konfigurationer invarianta under godtycklig vridning. Detsamma gäller magnetfältets fältstyrka i fjärrzonen. Detta innebär t.ex. att  $2dv$  vriden  $90^\circ$  i princip inte är en egen konfiguration.

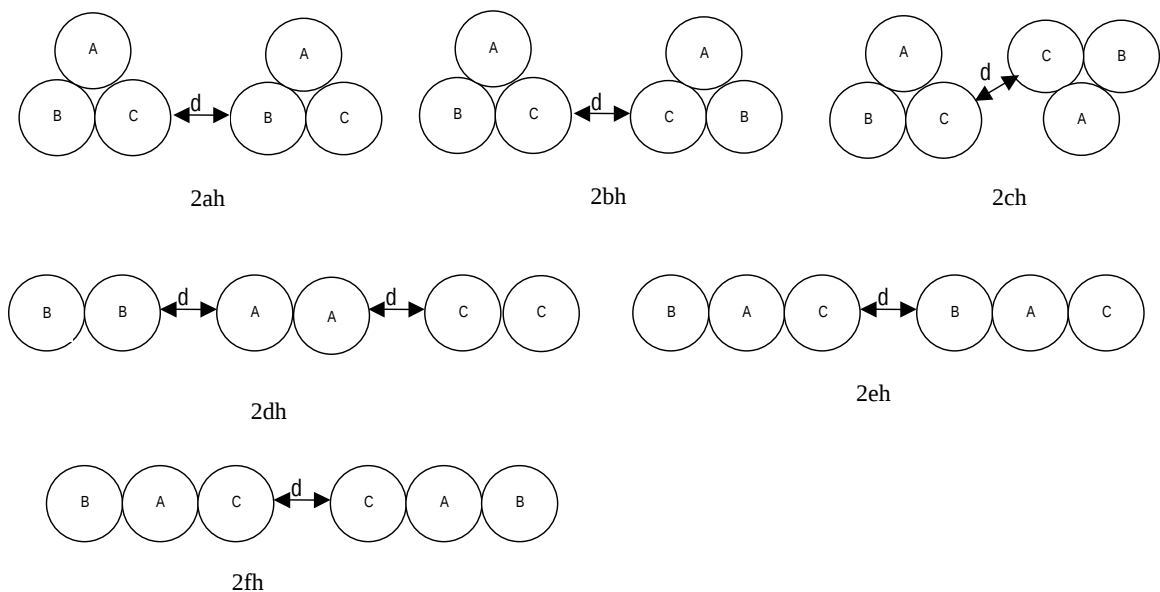
Av konfigurationerna i arkivet rekommenderas följande i [2]:  $2bh$ ,  $2ev$ ,  $2fh$ ,  $2fv$  och  $3a$  skruvad.

### En kabel per fas

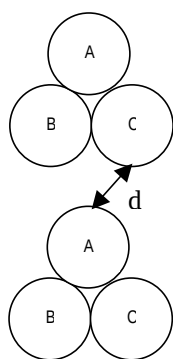


### Två kablar per fas

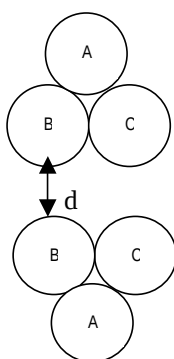
#### Horisontella grupper



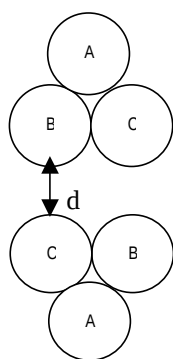
### Vertikala grupper



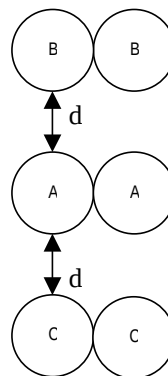
2av



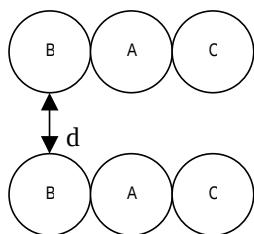
2bv



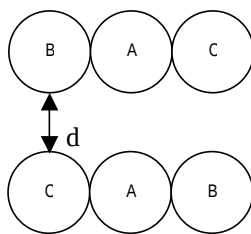
2cv



2dv

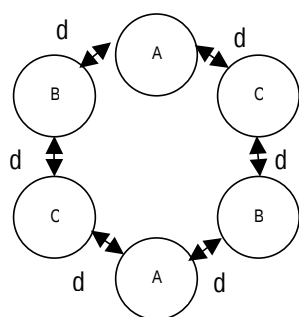


2ev



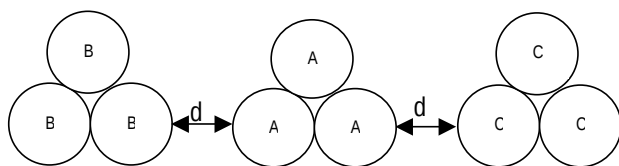
2fv

### Cirkulärt

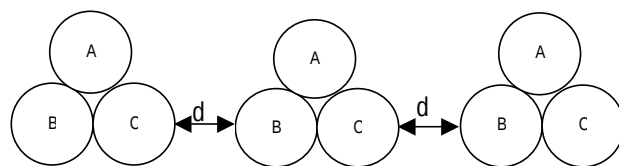


2g

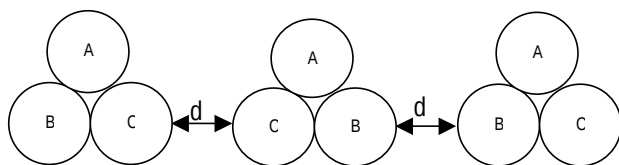
## Tre kablar per fas



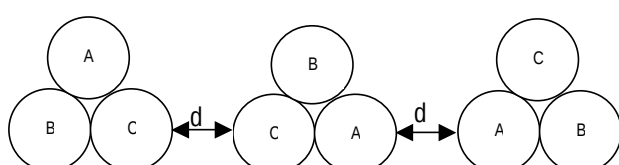
3a



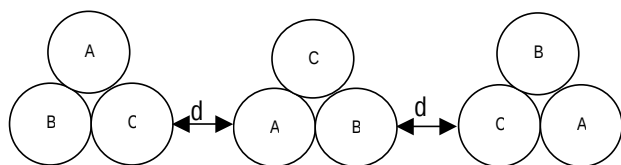
3b



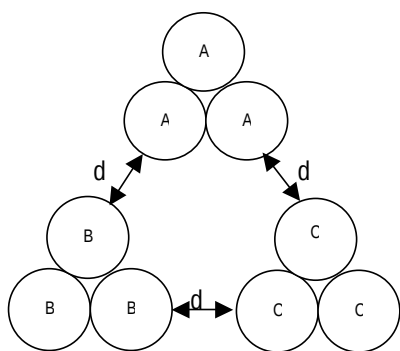
3c



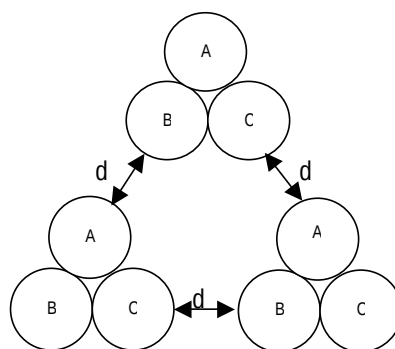
3d



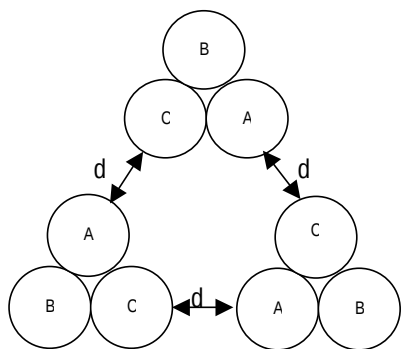
3e



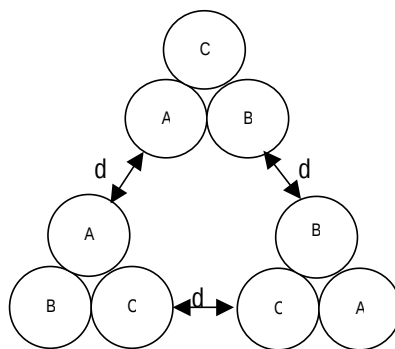
3f



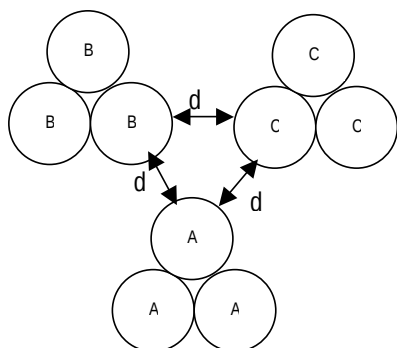
3g



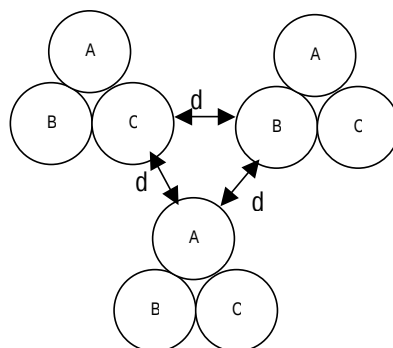
3h



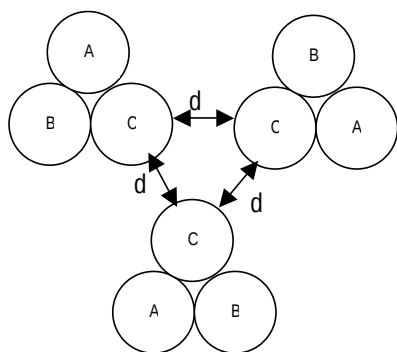
3i



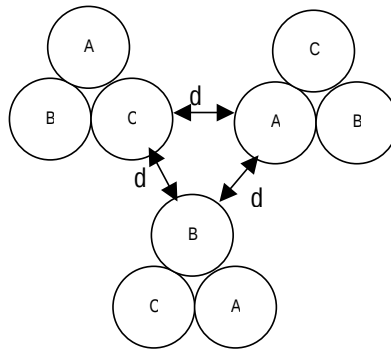
3j



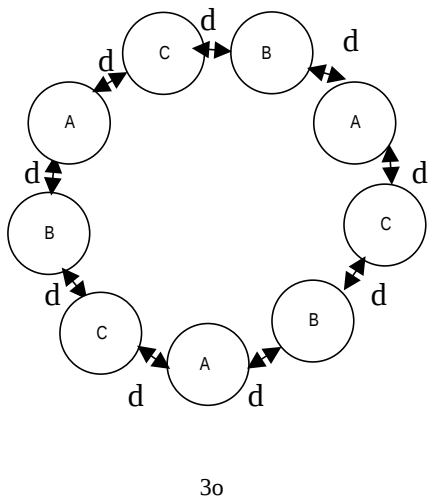
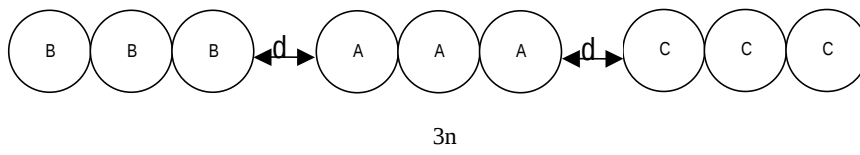
3k



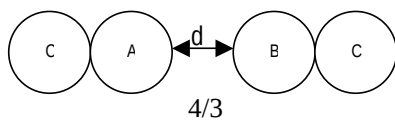
3l



3m



Olika antal kablar per fas





## B SERIEIMPEDANSER

### B.1 Inledning

Parametrar vid bestämning av ledarströmmarna är serieimpedanserna per längdenhet, vilka betecknas med  $Z$ . För två ledare  $k$  och  $l$  är  $Z_{kl}=Z_{lk}$  den ömsesidiga impedansen, dvs den EMK som uppstår i den ena av dem då en ström med styrkan en Ampère och vinkeln noll, flyter i den andra. EMK:n vid strömmen  $I$ , som fasor, blir då  $I$  multiplicerad med den komplexa storheten  $Z$ . Självimpedansen  $Z_{kk}$  för ledare  $k$  är den EMK som alstras av strömmen i ledaren själv.

Själv- och ömsimpedanser kommer att uttryckas som logaritmiska potentialer. För att få en fysikaliskt riktig modell måste summan av alla strömmar vara lika med noll, inklusive den ström som går i marken. Det kan visas att en sådan ström vid låga frekvenser, matematiskt sett, kan beskrivas som flytande i en tänkt ledare på ett visst djup i marken under förutsättning att marken kan ses som en homogen halvrymd av viss konstant resistivitet. En sådan beskrivning är standard i samband med jordåterledningseffekter i kraftledningssammanhang. Man knyter då till varje ledare en returkrets, gemensam för alla ledare, med en viss resistans och en viss induktans. Resistansen är, paradoxalt nog, oberoende av markens resistivitet trots att djupet på den tänkta returledaren beror av den. Reaktansen, däremot, uppträder som om stammande från den tänkta returledaren på ett intuitivt gripbart sätt.

### B.2 Serieimpedanser

Serieimpedanserna får något olika uttryck beroende på om ledaren är fasledare eller följeledare å ena sidan eller skärmledare å den andra. Låt index  $k$  och  $l$  beteckna två ledare. Med  $d_{kl}$  betecknande centrumavståndet mellan ledarna ( $d_{kl}=0$  betyder att en av ledarna är fasledare och den andra skärmledare),  $a_k$  och  $a_l$  deras radier och  $R_k$  och  $R_l$  deras resistans per längdenhet kan man för  $k \neq l$  skriva ömsimpedansen  $Z_{kl}$  som

$$Z_{kl} = \frac{\omega\mu_0}{2\pi} \left( \frac{\pi}{4} + j \ln \frac{D_g}{d_{kl}} \right) \text{ om } d_{kl} \neq 0$$

$$Z_{kl} = \frac{\omega\mu_0}{2\pi} \left( \frac{\pi}{4} + j \ln \frac{D_g}{a_{kl}} \right) \text{ om } d_{kl} = 0$$

$$a_{kl} = \max(a_k, a_l)$$

och för  $k=l$  självimpedansen  $Z_{kk}$  om ledare  $k$  är fas- eller följeledare som

$$Z_{kk} = R_k + \frac{\omega\mu_0}{2\pi} \left[ \frac{\pi}{4} + j \left( \frac{1}{4} + \ln \frac{D_g}{a_k} \right) \right]$$

alternativt om ledare  $k$  är skärmledare som

$$Z_{kk} = R_k + \frac{\omega\mu_0}{2\pi} \left( \frac{\pi}{4} + j \ln \frac{D_g}{a_k} \right)$$

Här representerar  $D_g$  djupet för återledningsströmmen i marken och ges av

$$D_g = 1,31\delta \quad \delta = \sqrt{\frac{2\delta}{\omega\mu_0}} \quad \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \quad \omega = 2\pi f$$

där  $\delta$  är skindjupet för marken med resistiviteten  $\delta$  och  $f$  är frekvensen. Med  $\delta=3000 \Omega\text{m}$ , vilket ofta antages, och  $f=50 \text{ Hz}$  blir  $D_g=5100 \text{ m}$ . Man ser att återledningsströmmarna går mycket djupt med denna modell.

Man identifierar den logaritmiska termen och  $\pi/4$ -termen som avspeglade reaktansen respektive resistansen hos jordåterledningskretsen. Man kan tolka den senare storheten som representerande halvrymdens, dvs markens, inre resistans. Konstanten  $1/4$  som förekommer tillsammans med den logaritmiska termen identifieras som ledarens inre reaktans för fas- och följeledare. För skärmledare är alltså motsvarande term satt till noll. Det är brukligt att den inre reaktansen beaktas genom att inkludera den i logaritmen på så sätt att radien  $a_i$  ersätts med densamma multiplicerad med 0,78.

Om jordåterledningsströmmen undertycks, vilket praktiskt åstadkoms genom att ena änden av skärmen lämnas ojordad eller dåligt jordad i ena eller båda terminalerna, så bör inte återledningsdjupet spela någon roll. Att så också verkligen blir fallet i modellen följer av att i varje ekvation i systemet så är summan av alla strömmar lika med noll, vilket innebär att alla termer med  $\ln(D_g)$  tar ut varandra. Vidare kan man se att den konstanta termen  $\pi/4$  representerande markens inre resistans också försvinner.

# **ELFORSK**

SVENSKA ELFÖRETAGENS FORSKNINGS- OCH UTVECKLINGS – ELFORSK – AB  
Elforsk AB, 101 53 Stockholm. Besöksadress: Olof Palmes Gata 31  
Telefon: 08-677 2530. Telefax 08-677 2535  
[www.elforsk.se](http://www.elforsk.se)