ELFORSK

Utlösningsvillkoret i lågspänningsnät:

Hjälpmedel för riskanalys vid förlängda frånkopplingstider

Elforsk rapport 04:28

Pernilla Owe, Per Pettersson, Ulf Grape
– Vattenfall Utveckling AB

mars 2004

Utlösningsvillkoret i lågspänningsnät:

Hjälpmedel för riskanalys vid förlängda frånkopplingstider

Elforsk rapport 04:28

Pernilla Owe, Per Pettersson, Ulf Grape
– Vattenfall Utveckling AB

mars 2004

Utlösningsvillkoret i lågspänningsnät:

Hjälpmedel för riskanalys vid förlängda frånkopplingstider

Elforsk rapport 04:28

Pernilla Owe, Per Pettersson, Ulf Grape
– Vattenfall Utveckling AB

Förord

Genom åren har, av och till, långa felbortkopplingstider i lågspänningsnätet diskuterats och denna fråga har åter blivit aktuell. Starkströmsföreskrifterna begränsar feltiden i service-ledningar till 5 sekunder, men tillåter längre tid vid fel i överföringsledningar i distributionsnät (yttre nät). Företagen kan utnyttja regeln för att i förtid slippa förstärka nätet eller montera sektionssäkringar utefter ledningssträckan.. Bortkopplingstidens längd är tillsammans med spänningens storlek avgörande parametrar för den möjliga skadan. Statistiskt sett är risken för personskada p.g.a. fel i yttre nät låg, men olycksfall kan ändå inte uteslutas.

Elsäkerhetsverket avser att inte ändra gällande föreskrift men överväger att införa krav på att riskanalys utförs i enskilda fall för att tillåta förlängda bortkopplingstider. Elsäkerhetsverket har anmodat elbranschen att ta fram ett underlag för innehållet i en sådan riskanalys. Avsikten är att företagen skall kunna göra de bedömningar som är rimliga och som man kan ta ansvar för.

Uppdraget har bestått i att ta fram riktlinjer för riskanalys för fall då förlängda utlösningstider kan förekomma i yttre nät. Dessa riktlinjer skall bl.a. beakta skillnader mellan olika typer av nät, förhållanden som påverkar möjlig beröringsspänning till storlek och tid etc. Riktlinjerna skall primärt utgå från personsäkerhetsaspekten med beaktande av kravet på selektivitet i näten. Med hjälp av riktlinjerna skall elbolagen själva kunna göra riskanalyser med en rimlig arbetsinsats.

I styrgruppen har följande personer ingått:
Olle Corfitsson, Öresundskraft, Dan Andersson, Sydkraft Elnät, Tor-Erik Hansi, Vattenfall Eldistribution, Urban Ritzén, Tekniska verken, Linköping, Per Clasén, Graninge, Horst Blüchert, Elsäkerhetsverket samt Åke Sjödin, Elforsk.

Projektet har finansierats av följande företag: Vattenfall Eldistribution AB, Fortum Distribution AB, Sydkraft Nät AB, Göteborg Energi Nät AB, Graninge Nät AB, Tekniska verken i Linköping AB, Lunds Energi Elnät AB, Skellefteå Kraft AB, Öresundskraft AB, Jämtkraft AB, Umeå Energi Nät AB, Jönköping Energi Nät AB, Gävle Energi AB, Telge Energi AB, Eskilstuna Energi & Miljö, Luleå Energi Elnät AB, Borås Energi Nät AB, Energiverken i Halmstad AB, Sundsvall Energi Nät AB, AB Falu Elverk, Borlänge Energi AB, Nacka Energi AB, Leksand-Rättvik Energi AB, Kommunal Teknik Trelleborg, AB Malungs Elverk, Härryda Energi AB, Ale Elförening ek för, Öviks Energi Nät AB, Lysekils Energi AB, Karlshamn Energi AB, Ljusdal Energi AB, Staffanstorp Energi AB, Herrljunga Elektriska AB, Karlsborg Energi AB, Åkab Nät och Skog.

Stockholm juni 2004

Åke Sjödin
Överföring&Distribution
Elforsk AB

Sammanfattning

Genom åren har frågan om långa frånkopplingstider i lågspänningsnät kommit upp till diskussion ett flertal gånger. Starkströmsföreskrifterna anger inget övre tak för frånkopplingstiden i yttre nät, annat än indirekt genom kravet på automatisk frånkoppling (dvs att säkringen måste lösa). I praktiken visar sig detta ge en övre tidsgräns på ca 25-30 s.

Man känner inte till något fall i landet där fel i yttre nät har lett till några allvarliga personskador hos lågspänningsabonnenterna. Samtidigt vet man att 5-10 personer/år dör av elchock som en följd av fel i inre nät, och att korta frånkopplingstider är avgörande för att det inte är fler. Kan man då för fel i yttre nät låta frånkopplingstiden bli vad den blir utan vidare funderingar kring vilka risker detta kan medföra?

Elsäkerhetsverket har inte för avsikt att ändra gällande föreskrift men vill att el-branschens företag väger in riskerna vid val av längre frånkopplingstider. För att underlätta för företagen har vi tagit fram en mall för en sådan riskanalys.

Det visar sig att risken för elchock i de flesta fall är så liten att någon riskanalys inte behöver göras. Detta beror på att flera faktorer med låg sannolikhet måste inträffa samtidigt (beröring av utsatt del och sann jord vid enfasigt jordfel). Samtidig beröring av skilda potentialer försvåras ytterligare genom bl.a. det allt vanligare bruket av dubbelisolerade apparater istället för skyddsjordade och kravet på huvudpotential-utjämning i nya byggnader. Även indirekt potentialutjämning genom t.ex. vattenpump eller fjärrvärmenät bidrar till en lägre risk. Den maximala beröringsspänningen på 115 V är också bara hälften så stor som beröringsspänningen vid fel i inre nät.

De nätdelar som visat sig kunna ge förhöjda risker är luftledningsnät på landsbygd med frånkopplingstider på över 10 sekunder. Riskanalysen koncentreras därför till dessa nät. Då många luftledningsnät byggs om från oisolerad till isolerad friledning, med betydligt lägre felfrekvens, samtidigt som antalet apparater med utsatta delar minskar kommer den redan nu låga risken för elchock på grund av fel i yttre nät successivt att minska ytterligare. De riskmoment som finns handlar till stor del om handhavandet av äldre handverktyg och hushållsapparater. Inomhus är det främst ett hand-hand-problem eftersom golvet i sig ger för hög resistans mot sann jord, utom när det gäller betonggolv.

Vid genomförandet av den föreslagna riskanalysen skriver handläggaren in sina värden på frånkopplingstid och ledningssträckor i det framtagna Excelarket (Riskanalys.xls). Det finns även möjlighet att ändra värdena på beröringsfrekvens och beröringstid Resultatet blir ett jämförelsetal på riskens storlek uppräknat till hela landets folkmängd. Detta anger hur många år man kan förvänta sig att det går mellan varje dödsfall i landet om alla nät av motsvarande typ skulle ha samma risk som det beräknade nätet. Vid låga jämförelsetal kan det vara motiverat att göra någon typ av åtgärd. Siffrorna ska dock inte ses som några exakta värden, dels eftersom det är fråga om sannolikheter, dels för att det i detta stadie inte har varit möjligt att ta fram tillräckligt underbyggda omräknings-

faktorer. Angivna data får därför ses som exempel. Det finns dock indikationer om att de ingående värdena i flera fall tycks ligga på den säkra sidan.

Det bör påpekas att riskerna som är kopplade till fel i yttre nät även vid långa frånkopplingstider är avsevärt lägre än riskerna vid fel i inre nät. Det kan vara effektivare – både ekonomiskt och ur risksynpunkt – att satsa på andra personsäkerhetshöjande åtgärder än att till varje pris försöka hålla nere frånkopplingstiderna i yttre nät. Det är ändå befogat att sortera ut och åtgärda de nät som har de allra högsta riskerna. Om riskanalysen görs med hjälp av den framtagna Excelfilen (Riskanalys.xls) kan man snabbt sålla fram dessa nät. I de flesta fall får man istället en bekräftelse på att nätet ur detta hänseende ligger inom acceptabla gränser. Var denna nivå ska sättas, det vill säga hur stor risk som kan accepteras, får dock avgöras av respektive företag inom elbranschen, i samråd med Elsäkerhetsverket.

Innehållsförteckning

1 INLEDNING 1

1.1 BAKGRUND 1
1.2 MÅL 1
1.3 AVGRÄNSNINGAR 1

2 BETECKNINGAR OCH DEFINITIONER 2

2.1 BETECKNINGAR 2
2.2 DEFINITIONER 3

3 NULÄGE 3

3.1 TILLÄMPNING AV FÖRESKRIFTERNA 3
3.2 FELSTATISTIK 4
3.3 OLYCKSFALL OCH TILLBUD, SAMT YTTERLIGARE RISKER 5

4 RESONEMANG KRING INDIREKT BERÖRING 5

4.1 MILDRANDE FAKTORER 5
4.2 IDENTIFIERADE RISKSITUATIONER 7

5 RISKANALYS 8

5.1 FÖRSLAG TILL RISKANALYS 8
5.2 BERÄKNINGAR OCH BERÄKNINGSANVISNINGAR 10
5.3 EXEMPEL PÅ ÅTGÄRDER 13

6 SLUTSATSER 13

7 REFERENSER 14

Bilagor

A NÄTBERÄKNINGSPROGRAM FÖR LÅGSPÄNNING

B RISKANALYS – INLEDANDE FRÅGOR

C FÖRDJUPAD RISKANALYS – FLÖDESSCHEMA

D RISKANALYS – ABONNENTGENOMGÅNG

E SANNOLIKHETSTEORETISK BAKGRUND TILL RISKBERÄKNING

F EXEMPEL PÅ RISKBERÄKNINGAR

G STRÖM GENOM KROPPEN

1 Inledning

Uppdraget har bestått i att ta fram riktlinjer för riskanalys för fall då förlängda frånkopplingstider kan förekomma i yttre nät. Det är främst personsäkerheten som beaktas vid riskbedömningarna. Med hjälp av riktlinjerna skall elbolagen själva kunna göra riskanalyser med en rimlig arbetsinsats. För att underlätta en eventuell framtida implementering av riskanalysen i befintliga nätberäkningsprogram redovisas checklistorna i form av flödesschemor. Schemorna beaktar bland annat skillnader mellan olika typer av nät och förhållanden som påverkar möjlig beröringsspänning till storlek och tid.

1.1 Bakgrund

Genom åren har, av och till, långa felbortkopplingstider i lågspänningsnätet diskuterats och denna fråga har åter blivit aktuell. Starkströmsföreskrifterna [1] begränsar frånkopplingstiden i servisledningar till 5 sekunder[1], men tillåter längre tid vid fel i huvudledningar i distributionsnät (yttre nät). Fram till 1988 angavs den maximala frånkopplingstiden till ”några sekunder”. Enligt rättsbeslut ansågs denna skrivning innefatta tider upp till 10 sekunder, varför denna gräns anses accepterad för yttre nät utan vidare riskanalys (mer om detta i avsnitt 5.2). Företagen kan utnyttja regeln för att i förtid slippa förstärka nätet eller montera sektionssäkringar utefter ledningssträckan. Frånkopplingstidens längd är tillsammans med spänningens storlek en avgörande parameter för den möjliga skadan. Statistiskt sett är risken för personskada på grund av fel i yttre nät ytterst låg, men olycksfall kan ändå inte uteslutas.

Elsäkerhetsverket har inte för avsikt att ändra gällande föreskrift men vill att elbranschens företag väger in riskerna vid val av längre frånkopplingstider.

1.2 Mål

Målet med projektet har varit att ta fram en mall för riskanalys vid förlängda frånkopplingstider, för att underlätta för elbranschens företag att väga in riskerna med detta.

Utgångsläget har varit att på ett snabbt och enkelt sätt kontrollera om yttre nät, med frånkopplingstid över 10 s, ändå kan anses vara tillräckligt säkra ur personsäkerhetssynpunkt.

1.3 Avgränsningar

Riskanalysen har begränsats till att behandla personsäkerheten. Eventuella risker för djur tas inte upp, ej heller risk för brand eller annan ekonomisk skada. För sällskapsdjur torde risken för samtidig beröring av skilda potentialer på grund av fel i yttre nät vara betydligt lägre än för människor, vilken redan den är mycket låg.

I jordbruksanläggningar, trädgårdsmästerier och utrymmen där husdjur hålls råder särskilda krav. Exempelvis krävs enligt Starkströmsföreskrifterna [1] avsnitt 705.413.1.6

[1] Frånkopplingstiden 5 sekunder infördes i föreskriftstexten 1992 (fanns med som förklarande text 1988).

kompletterande potentialutjämning i utrymmen där husdjur hålls. Lantbruken är potentialutjämnade sedan 60-70-talet (lagkrav, särskilda regler vid djurhållning), varför denna abonnentgrupp inte behandlas speciellt i riskanalysen. Boningshus, förrådsbyggnader och liknande ligger däremot utanför dessa krav. Dessa abonnemang inryms dock i gruppen villaabonnenter.

Även småindustrier är normalt potentialutjämnade på ett sådant sätt att risken för samtidig beröring av skilda potentialer minimeras. Dessa tas därför inte heller upp specifikt i riskanalysdelen.

Vi har endast räknat med enfasiga jordfel eftersom det är vid dessa felfall som det kan uppstå farliga potentialskillnader hos abonnenten mellan PEN-ledaren och sann jord. Endast nätdelar med förlängd frånkopplingstid (>10s) i huvudledningar i distributionsnät beaktas. Då inget annat anges har vi räknat med att personerna är barfota vid beröringstillfället. Inomhus handlar det dock oftast om ett hand-hand-problem varför detta inte alltid är relevant.

Det finns även vissa felfall som under olyckliga omständigheter inte lyckas lösa ut säkringen – oavsett normal frånkopplingstid. Då detta inte är en specifik fråga för långa utlösningstider – felfallen ger samma problem för nät som dimensionerats för utlösningstider under 10 s – tas inte heller detta fall upp. Ett exempel på sådant fall är PEN-ledaravbrott där PEN-ledaren lägger sig på fasen.

Vi har inte gjort någon utvärdering av de olika nätberäkningssystemen som används, men i bilaga A finns en uppräkning av de program som används inom styrgruppsmedlemmarnas respektive nätområden.

Det har heller inte varit projektets uppgift att föreslå hur stor risk som kan accepteras, samt eventuella åtgärder efter genomförd riskanalys. Det är istället en elsäkerhetsfråga där det är upp till respektive bolag att agera (i samråd med Elsäkerhetsverket).

2 Beteckningar och definitioner

Följande beteckningar och definitioner används i denna rapport. En del av beteckningarna förklaras även visuellt i figur 5.1.

2.1 Beteckningar

$Z_{x\%}$ = kroppsimpedans vars värde underskrids av x% av befolkningen.
S_h = säkring för huvudledning i distributionsnät
SLS = servisledningssäkring
UD = utsatt del
R_T = kroppsresistans
R_g = övergångsresistans fot-golv-jord
U_{UD} = spänning i utsatt del (default 115 V)
I_T = ström genom kroppen
f = sannolikhet för beröring samtidigt som fel inträffar eller feltillstånd råder
f_1 = felfrekvens i 400V-nätet

f_2 = beröringsfrekvens
t_1 = genomsnittlig frånkopplingstid
t_2 = genomsnittlig beröringstid

2.2 Definitioner

Huvudledning i distributionsnät: Gemensam ledning i nätet före servisledning(-ar).

Utsatt del: Del som normalt sett ej är spänningsförande men kan bli det vid ett fel i grundisoleringen.

Indirekt beröring: Persons eller husdjurs beröring med utsatt del som blivit spänningsförande på grund av fel.
Exempel: Skruv som kommit i kontakt med fasen och gör höljet spänningsförande.

Elchock: En ström som passerar igenom kroppen.

Kroppsimpedans: Kroppens impedans då den utsätts för en spänning. Impedansen är beroende av vilken väg strömmen går genom kroppen, och vilken spänning och frekvens det rör sig om. Kroppsimpedansen varierar även individuellt från person till person. I tabeller anges vanligen kroppsimpedansen vid strömgenomgång från hand till hand.

Huvudpotentialutjämning: Utifrån kommande skyddsledare, telefon- och datakablar, rörledningar o.dyl. ansluts till en gemensam jordpunkt vid inledning i byggnaden.

Kompletterande potentialutjämning: Potentialutjämning som ska innefatta alla samtidigt berörbara utsatta delar av fast installerad materiel och byggnadsdelar av metall, inklusive, där så erfordras, armeringen i betong. Potentialutjämningssystemet skall anslutas till skyddsledarsystemet.

Sann jord: ”Nollpotentialen”

3 Nuläge

3.1 Tillämpning av föreskrifterna

Vid ny- eller ombyggnad eftersträvas max 5 s frånkopplingstid även för yttre nät. För äldre nät accepterar de olika nätbolag som tillfrågats upp till 10-20s frånkopplingstid. Vid högre frånkopplingstider måste man enligt policy eller motsvarande åtgärda nätet. Prioriteringarna har då hittills främst gjorts utifrån frånkopplingstidernas längd snarare än från resultatet av någon typ av riskanalys.

En risk med långa frånkopplingstider är att säkringskaraktäristiken kan göra att säkringen inte löser ut alls. Man uppfyller då inte kravet på automatisk frånkoppling i avsnitt 413.1 i Starkströmsföreskrifterna [1]. Vi förutsätter dock att föreskrifterna följs på denna punkt, varför detta inte kommer att tas upp speciellt i den framtagna riskanalysen.

Tittar man på utlösningskurvorna för säkringar så ser man att det planar ut väldigt mycket redan efter 20-30 sek. Tar man hänsyn till att man oftast inte har en stum kortslutning, samt att det finns problem med uppvärmning, kan det bli svårt att säkerställa att säkringen löser ut vid tider över 25 sek.

För att ligga på säkra sidan vad gäller frånkopplingstid räknar man normalt på den sämsta säkringskarakteristiken, vanligen enligt IEC-normkurva. Har man problem att då klara kravet på frånkopplingstid väljer man normalt en bättre säkring för att ligga på den säkra sidan när det gäller utlösningskravet.

Vid bedömning av frånkopplingstider i samband med dimensionering av nät poängteras följande aspekter:

- Starkströmsföreskrifternas [1] krav på automatisk frånkoppling (avsnitt 413.1)
- Personsäkerhet
- Brandsäkerhet
- Selektivitet i nätet
- Spänningsgodheten – kan vara svår att uppfylla vid långa utlösningstider
- Förlustkostnader
- Kostnader för ombyggnad av befintligt nät.
- Tid till eventuell planerad total ombyggnad.
- Ekonomi, även ur ett samhällsekonomiskt perspektiv – prioriteringar

Den begränsande faktorn varierar beroende på typ av nät och belastning. I långa lågspänningsnät med låg belastning är det ofta utlösningsvillkoret som är begränsande. I tätortsnät med hög belastning är det oftare spänningsgodheten. I andra fall kan behovet av kortslutningseffekt vara dimensionerande t.ex. vid speciella industrilaster. Kostnaden och tid till planerad större ombyggnad är också viktiga aspekter.

3.2 Felstatistik

Den felstatistik vi har utgått från vid våra beräkningar är hämtad ur Sveriges Elleverantörers Statistik för leveranssäkerhet i de svenska elnäten 1995-97 [2]. Den genomsnittliga felintensiteten för de olika ledningstyperna är där angiven för hela perioden, dvs tre år, varför värdena först har dividerats med tre för att visa felintensiteten på årsbasis.

Detta ger oss följande felintensiteter för 0,4 kV:

$f_{1\text{friledning, oisolerad}}$	0,06 ggr/ km, år	(0,18/3)
$f_{1\text{friledning, isolerad}}$	0,01 ggr/ km, år	(0,03/3)
$f_{1\text{hängkabel}}$	0,04 ggr/km, år	(0,12/3)
$f_{1\text{hängspiralkabel}}$	0,01 ggr/km, år	(0,02/3)
$f_{1\text{kabel, mark}}$	0,03 ggr/km, år	(0,07/3)
$f_{1\text{kabel, vatten}}$	0,01 ggr/km, år	(0,02/3)

Eftersom ovanstående felintensiteter gäller fel oavsett typ medan vi i detta sammanhang endast är intresserade av enfasiga jordfel måste man vid riskberäkningarna skala ner dessa värden ytterligare. Detta beskrivs i avsnitt 5.2.

3.3 Olycksfall och tillbud, samt ytterligare risker

Risken för att personskador uppstår i abonnenternas anläggningar på grund av fel i huvudledning i distributionsnät är mycket liten, vilket inte minst avsaknaden av svåra olycksfall pekar mot. Under de 40-50 år som elolycksfallsstatistik samlats in och bearbetats mer systematiskt finns det inget dödsfall som kan relateras till denna typ av fel. Hittills har det istället mer varit en fråga om förstörd egendom och risk för brand. Inte heller vid en rundfrågning bland olika nätbolag var det någon som kände till något olycksfall där människor blivit skadade på grund av fel i huvudledning i distributionsnät i kombination med lång frånkopplingstid. De få incidenter som inträffat har i värsta fall medfört skador på anslutna apparater och elanläggningar.

4 Resonemang kring indirekt beröring

Risken för personskador på grund av indirekt beröring i samband med ett fel i yttre nät är lyckligtvis mycket låg, vilket inte minst statistiken pekar mot (se avsnitt 3.3). Dels har det, bland annat genom egna mätningar, visat sig vara svårare än vi först trodde att hitta utsatta delar i hemmet, dels skall delarna beröras i samband med att ett enfasigt jordfel inträffar i distributionsnätets huvudledning. För att det ska uppstå personskador krävs också att personen greppar om den utsatta delen på ett sådant sätt att han eller hon får kramp och fastnar. Det normala är annars att man får en stöt och rycker bort handen. Det kan visserligen vara en nog så obehaglig upplevelse, men konsekvenserna ur personskadesynpunkt är mycket begränsade. Mer om beröringsfrekvenser och liknande tas upp i nästa kapitel, i samband med beskrivningen av de föreslagna beräkningarna för riskanalysen.

Nedan följer en sammanställning av några olika faktorer som ytterligare bidrar till att minska risken för samtidig beröring av olika potentialer. Därefter diskuteras de återstående risksituationer eller, om man så vill, riskbeteenden som har identifierats.

4.1 Mildrande faktorer

Det finns ett antal mildrande faktorer som var och en är med och bidrar till att det inte blir fler olyckor och tillbud än vad som annars skulle kunna ha vara fallet. Dessa faktorer härrör i vissa fall till det yttre nätet eller det sätt på vilket den aktuella byggnaden ansluts till elnätet. I andra fall härrör faktorerna istället till abonnentens beteende och bruk av olika elmateriel. Det finns även andra faktorer som bidrar till att minska riskerna för abonnenten vid fel på huvudledning i distributionsnät.

I nät/elanslutning

- Intermittenta fel – ljusbågen blåser ut (plastkablar)
- Krav på huvudpotentialutjämning i nya byggnader

Hos abonnenten

- Isolerade handverktyg
- Isolerande skor (gummisulor)
- Nya apparater är ofta dubbelisolerade istället för jordade (undantag: datorer, som dock har få åtkomliga metalldelar)

Övrigt

- Tidssynkronisering – många faktorer måste inträffa samtidigt
- Indirekt potentialutjämning via exempelvis vattenpump eller fjärrvärmesystem

Beträffande starkströmsföreskrifternas [1] krav på huvudpotentialutjämning i nya byggnader så infördes detta i och med utgåvan 1999 (avsnitt 413.1.2.1). Förfarandet med huvudpotentialutjämning rekommenderades dock redan i den tidigare utgåvan från 1994. I princip har detta inneburit att flertalet byggnader som anslutits till elnätet efter 1996 är försedda med huvudpotentialutjämning. Även om detta endast innebär att inkommande ledningar ges en gemensam jordpunkt vid inledning till byggnaden så förs denna potentialutjämning i praktiken vidare in i byggnaderna, varför samtidig beröring av skilda potentialer försvåras ytterligare.

En annan aspekt är typen av nät fram till abonnenten. Här kan sägas att markkablar i allmänhet har en lägre impedans mot jord i samband med jordfel. Kabelnät drivs normalt i maskade slingor[2], vilket bidrar till att hålla nere nollföljdsimpedansen i händelse av enfasigt jordfel. Bland annat kan markledare i vissa fall bidra till lägre impedans. Vidare visar statistiken att mark- och sjökablar generellt sett har en lägre felfrekvens än oisolerade luftledningar och hängkablar, varför även detta bidrar till att man inte kommer upp i samma risker som kan vara fallet med friledningar. Dessutom kan andelen enfasiga jordfel antas vara lägre. Slutligen kan sägas angående kablar att ledarmaterialet ofta står för en mycket liten del av totalkostnaden för kabelanläggningen. I varje fall huvudledningarna i distributionsnäten är bland annat av detta skäl ofta väl dimensionerade.

Typen av område är också av betydelse för sannolikheten att komma i kontakt med skilda potentialer genom indirekt beröring. Stadsområden är genom bland annat vattenlednings-, kabel- och (i förekommande fall) fjärrvärmenät i princip potentialutjämnade. Det är även vanligare med kabelanslutningar istället för friledningar i dessa områden. Det kan också tilläggas att det i tätortsnät med hög belastning oftare är spänningsgodheten än utlösningsvillkoret som är den begränsande faktorn.

[2] Gäller inte i lika hög grad för landsbygdsnät som för stadsnät.

4.2 Identifierade risksituationer

Med hänsyn till resonemanget kring mildrande faktorer anser vi att det räcker att koncentrera riskanalysen till landsbygdsnät med luftledning byggt före 1996.

	Inomhus	Utomhus
Hand-fötter	• Handverktyg i fuktiga utrymmen • Omålade betonggolv i fuktiga utrymmen (källare, tvättstuga, garage) – i kombination med ex. metallkranen i en källardusch • Värmeslingor i golvet[3]	• Elektriska grillar • Grilltändare • Handverktyg (äldre)
Hand-hand	• Brödrostar • Gamla våffeljärn o.dyl. • Handverktyg (äldre) • Spis • Radiatorer	

Tabell över olika typer av risksituationer

Inomhus gäller att det för strömbanan hand-fötter ofta tillkommer en betydande resistans genom golvet för att nå sann jord. Omålade betonggolv leder rätt bra, men i de flesta situationer då man vistas i garage eller på andra platser med betonggolv har man skor på fötterna, vilket gör att impedansen mot jord inte blir så låg ändå. Inomhus torde det därför främst vara ett hand-hand-problem, bortsett från de fall då man har duschrummet i källaren och omålat betonggolv där.

Utomhus kan det vara värre. Är man barfota ute, och det är ju inte helt ovanligt sommartid, leder marken ungefär som ett betonggolv [3]. Utomhus är därför strömbanan hand-fötter ett större problem.

De största riskerna tycks vara vid uteaktiviteter samt i källare eller utrymmen inne som har betonggolv.

I praktiken är spänningssättning av utsatt del begränsad till maximalt ca 115V, till skillnad från fel genom felaktig installation eller defekta belastningsobjekt som kan ge spänningssättning av utsatt del på 230V. Genom att spänningssättningen begränsas till max 115V begränsas även antalet farliga situationer och problemet blir i huvudsak ett hand-hand-problem. Kombinationen övergångsresistans fot-golv och golvmaterialets resistivitet gör att farliga hand-fot-situationer blir mycket osannolika med undantag av de fall som nämnts ovan.

[3] Golvvärme innebär inte någon direkt risk för beröring, men ökar risken för att personen går barfota. I allmänhet monteras dock elektriska värmeslingor under klinkergolv eller annan golvbeläggning med förhållandevis hög resistivitet.

Det är viktigt att påpeka att abonnenten vid enfasigt jordfel i yttre nät inte är behjälpt av att ha jordfelsbrytare, något som i andra (och betydligt vanligare) fall kan ha en avgörande betydelse för att minska personskadorna vid elfel. För den studerade typen av fel är det dock skyddsledaren som är farlig och den ligger kvar även om jordfelsbrytaren skulle lösa ut fasen.

5 Riskanalys

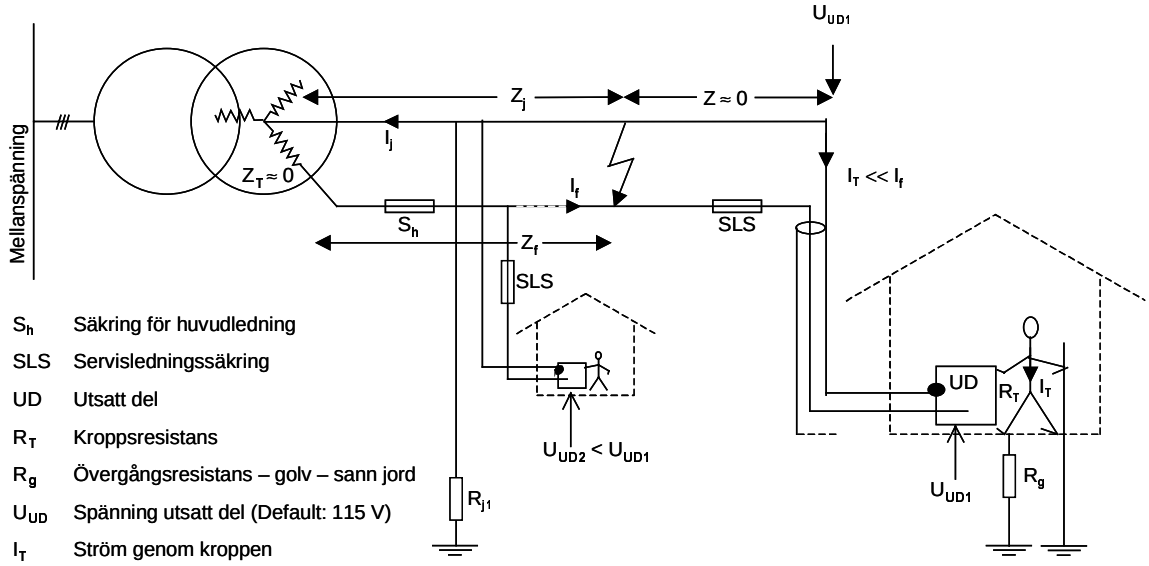
Det är främst för de befintliga näten som man ser ett behov av att genomföra riskanalysen, och då för de delar där frånkopplingstiden är över 10 s. När man bygger nytt försöker man i möjligaste mån att hålla nere frånkopplingstiden till max 5 s även för yttre nät, men vid utbyggnad kan detta bli svårt. Därför är det sannolikt att riskanalysen främst kommer att tillämpas i samband med utbyggnad av befintliga nät.

5.1 Förslag till riskanalys

För att underlätta en eventuell implementering av riskanalysen i befintliga nätberäkningssystem (nätdokumentationssystem) har vi valt att beskriva de olika momenten i analysen med hjälp av flödesschemor. Dessa återfinns i bilagorna B-D.

Riskanalysen är avsedd att kunna användas för alla nät med frånkopplingstider >10s. Den första gången kan man behöva lite extra vägledning. I detta och det följande avsnittet beskrivs de olika delarna i analysen och beräkningarna. När man har lärt sig tillvägagångssättet ska man kunna gå in direkt i respektive flödesschema.

I figur 5.1 visas några olika beteckningar som har används under den fortsatta analysen.

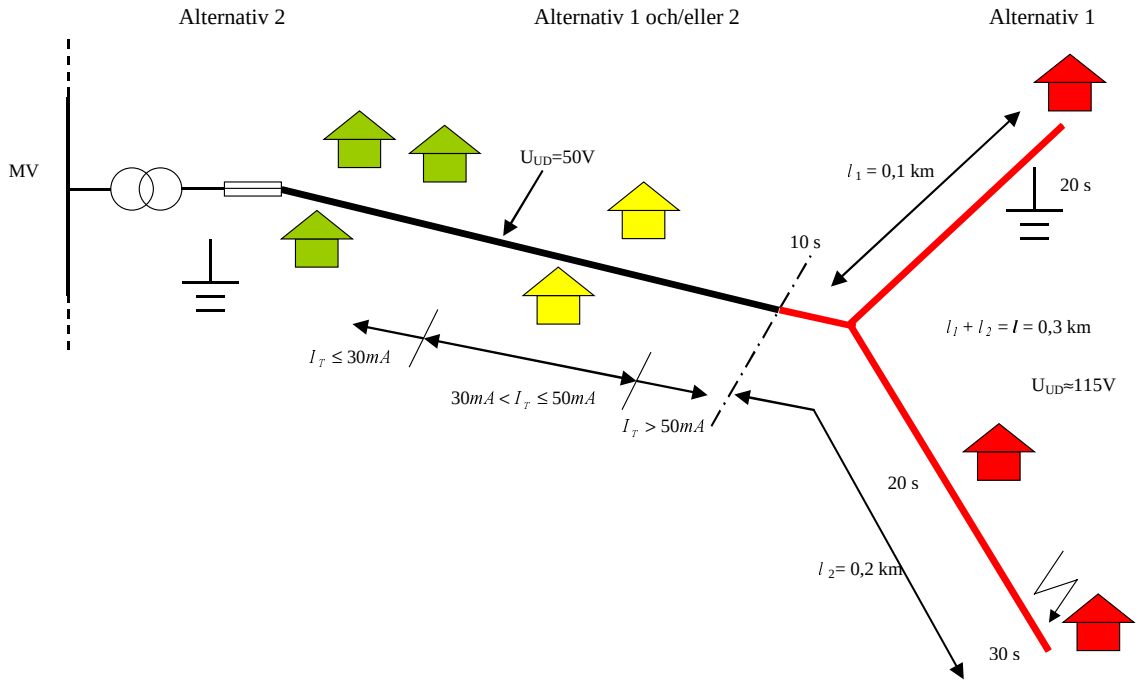


Figur 5.1 Baskrets för riskanalysens beräkningar.

Vårt förslag består av två olika vägar att genomföra analysen efter. Det räcker med att få godkänt i ett av alternativen för att riskanalysen ska ge godkänt. Genomgången ska göras för en säkring (S_h) i taget.

Med hänvisning till det som tagits upp i kapitel 4 är det bara vissa nät som behöver analyseras. Endast luftledningsnät behöver beaktas. Om nätet och de anslutna byggnaderna i huvudsak är byggda efter 1996[4] kan analysen anses slutförd och godkänd utan ytterligare åtgärder. Samma sak gäller stadsnät och nät med frånkopplingstider under 10 s (förklaras i nästa avsnitt). Flödesschema för denna första sållning finns i bilaga B.

I figur 5.2 visas ett exempel på hur de båda alternativen kan tillämpas på ett nät. Alternativen beskrivs vidare nedan, samt i avsnitt 5.2.



Figur 5.2 Exempel på nät. Felet inträffar här långt från transformatorn.
Gröna hus - Strömmen genom kroppen ($I_{T50\%}$) max 30 mA.
Gula hus - Strömmen genom kroppen ligger inom intervallet 30-50 mA.
Röda hus - Strömmen genom kroppen blir högre än 50 mA. Förhöjd risk för personskador.
Tiderna anger frånkopplingstid vid fel i respektive punkt.

Alternativ 1 behandlar risken för samtidig beröring av utsatt del och fel på yttre nät, och beskrivs med hjälp av flödesschemorna– dels ett huvudschema som utgår från nätets egna data (bilaga C), dels ett tilläggsschema som behandlar abonnentens beröringstider mm (bilaga D).

De delar av näten som har förlängd frånkopplingstid har ofta en begränsad utbredning och får därför låg felfrekvens. Abonnenterna utsätts inte alltför ofta för samtidig kontakt med utsatt del och lokal jord, och sådan kontakt sker under en begränsad tid. Sammantaget kan man i många fall enkelt, via flödesschemat, påvisa att risken för personskada är mycket låg, rentav inom acceptabla gränser.

[4] Nyare nät byggs i allmänhet med grövre ledningsareor.

Abonnentundersökningen förväntas kunna göras snabbt genom att först gå igenom det värsta fallet. Om resultatet är okey, med viss marginal, behöver man inte testa de andra abonnenterna.

Alternativ 2 utgår från en algoritm för spänning i utsatt del, U_{UD}, som tillsammans med kropps- och övergångsresistans ger en ström, I_T. Tillsammans med tiden kan man i ett ström-tid-diagram se om situationen är farlig. Vid strömgenomgång hand-fötter är i många fall övergångsresistansen mot jord så stor att strömmen blir ofarlig.

5.2 Beräkningar och beräkningsanvisningar

I de riskberäkningar som redovisas i bilaga F, finns endast luftledningsnät med. I bilagan kan man utläsa att riskerna vid isolerad friledning och hängspiralkabel är betydligt lägre än för oisolerad friledning och hängkabel. Detta antyder att inte heller isolerad friledning och hängspiralkabel behöver ingå i den fördjupade riskanalysen. Om riskanalysen framöver bakas in i de olika nätberäkningsprogrammen krävs det i princip samma arbetsinsats om alla nät tas med som om man begränsar det till luftledningsnäten. För att inte förvirra har vi dock valt att endast ta med ledningstyperna med förhöjda risker, det vill säga oisolerad friledning och hängkabel, i beräkningsarket Riskanalys.xls.

I det föregående avsnittet nämndes att nät med frånkopplingstider under 10 s inte behöver genomgå någon vidare riskanalys. Förklaringen till detta är dels, som tidigare nämnts, rättsbeslut om att 10 sekunder kan innefattas av Starkströmsföreskrifternas [1] tidigare begrepp ”några sekunder”, dels att riskerna enligt ström-tid-diagrammet, figur 14 i IEC 479-1 [4] är desamma vid 10 s strömgenomgång som vid 5 s (vilket dock redan det kan vara livsfarligt om strömmen är över 30 mA). Frånkopplingstiden speglar tiden för frånkoppling av fel som inträffar på det sämsta stället, varför medelfeltiden borde vara lägre än 10 s i dessa nät. Tiden 15 s har använts som ett medelvärde för de fall då frånkopplingstiden överstiger 10 s.

Alternativ 1 (samtidig beröring av utsatt del och fel på yttre nät)
Vid beräkningarna, se bilaga F, finns felfrekvensen för de olika ledningstyperna inlagda. Dessa felfrekvenser gäller för fel på hela 0,4 kV-nätet och inte specifikt för yttre nät. Vidare ligger alla typer av fel med här, medan vi bara är intresserade av de enfasiga jordfelen. På grund av detta finns det med en reduktionsfaktor. Den är nu satt till 50%, men det är sannolikt en alldeles för hög siffra. En reduktion ner till 10-20% kan vara rimligt, vilket i så fall skulle innebära att riskerna, ur felfrekvenssynpunkt, i själva verket är högst hälften så stora som beräknat. Bilaga E ger en sannolikhetsteoretisk bakgrund till den sannolikhetsberäkning som görs inom ramen för alternativ 1.

För att återgå till reduktionsfaktorn för felfrekvenserna så inträffar, enligt vad vi erfar, i storleksordningen 75% av felen i servisledningarna och endast en mindre andel av felen är jordfel. Räknar man med att så mycket som hälften av felen enligt felstatistikens angivna fel per km är enfasiga jordfel som drabbar yttre nät så har man alltså tagit till goda marginaler.

Beräkningarna är uppdelade i en del som gäller felfrekvensen och frånkopplingstider för nätet och en del som gäller hur ofta abonnenten kommer i kontakt med både utsatt del och sann jord, samt under hur lång tid detta pågår i genomsnitt. Utifrån dessa värden kan man beräkna sannolikheten för att ett fel på det yttre nätet inträffar samtidigt som abonnenten är i kontakt med utsatt del och sann jord. Sannolikheten ges av nedanstående formel:

$$f = f_1 \cdot f_2 \cdot (t_1 + t_2)$$

f = sannolikhet för beröring samtidigt som fel inträffar eller feltillstånd råder
f_1 = felfrekvens i 400V-nätet
f_2 = beröringsfrekvens
t_1 = genomsnittlig frånkopplingstid
t_2 = genomsnittlig beröringstid
Se även bilaga E.

Beröringsfrekvens och beröringstid kan skilja mycket från individ till individ. Det beror också på vilken aktivitet det berör. I beräkningarna har vi räknat med en beröringsfrekvens på 5000 gånger/år hos varje abonnent och en genomsnittlig beröringstid på 5 s. Av dessa beröringar med utsatt del är det endast en liten andel som inträffar samtidigt med beröring av sann jord. Vi har i våra beräkningar räknat med en faktor på 10%. Frekvensen för samtidig beröring av utsatt del och sann jord borde dock vara en bra bit lägre än så, och vid hand-hand-problem även beröringstiden. För hand-fot-problem är tiden mer oberäknelig – den kan vara mycket kort, men kan även sträcka sig över någon eller några minuter exempelvis vid användning av olika handverktyg utomhus.

Om det inträffar ett fel i yttre nät samtidigt som någon är i beröring av både utsatt del och sann jord behöver inte det innebära att personen i fråga blir allvarligt skadad. Då skulle varje sådant fall vara förenat med att abonnenten får kramp och fastnar. I själva verket är det naturliga reaktionen att man, om möjligt, rycker undan handen direkt. För att man ska fastna krävs dels att man greppar om den utsatta delen, dels att strömmen är tillräckligt hög för att den ska leda till kramp. Med hjälp av en faktor, r, räknas sannolikheten på varje undersökt nätavsnitt ner till en risk för dödsfall. Vi har i beräkningarna satt r till 50%, dvs att man i hälften av fallen fastnar. Denna siffra torde vara väl tilltagen. Enligt resonemangen i bilaga E kan den genomsnittliga exponeringstiden vid tillbud ansättas till den genomsnittliga varaktigheten av beröringsspänningen. Vi har därför antagit att man dör om man fastnar. Även i detta ligger en extra säkerhetsfaktor eftersom det förutsätter att strömmen är tillräckligt hög under denna tid.

För att få en uppfattning om hur stor risk det blir räknat på hela landet räknas sannolikheten upp med den andel problemnät (luftledningsnät på landsbygd med frånkopplingstid >10s) som finns i landet. Det är ingen exakt siffra, men de svar vi har fått pekar på att andelen ligger någonstans kring 5-10% av landsbygdsnäten. I de redovisade beräkningarna har vi räknat med 6%. Enligt en ännu inte utgiven rapport från Statens Energimyndighet [5] finns det 1,5 miljoner abonnenter i landsbygdsnät i Sverige. Dessa siffror stämmer väl överens med motsvarande siffror från SCB. Man har nu fått en siffra

på risken att detta ska inträffa i landet. Detta sannolikhetsvärde inverteras sedan för att tydliggöra hur många år det, statistiskt sett, går mellan varje dödsfall.

Vid de riskberäkning som redovisas i bilaga F hamnar vi på ett fall per 23 år för 100m oisolerad friledning och ett fall per 5 år för 500m oisolerad friledning. Motsvarande siffror för hängkabel är 35 respektive 7 år. Vid långa sträckor med förlängd utlösningstid kan riskerna alltså bli så pass höga att åtgärder bör vidtas. Det är dock svårt att sätta någon exakt gräns för vilken risk man kan acceptera.

I filen Riskanalys.xls, flik beräkningar, finns det möjlighet att göra sina egna beräkningar och få ut en summerad risk för detta nät utifrån bland annat frånkopplingstid, ledningssträckor och antalet abonnenter. Man skriver in respektive sträckas längd samt medelfrånkopplingstiden för sträckan. I de fall man inte har både oisolerad friledning och hängkabel sätts ledningssträcka och abonnentantal till noll för den ledningstyp som inte ska vara med. I arket anger gula rutor vilka värden man kan ändra på och blåmarkerad ruta de jämförelsetal man får ut.

Alternativ 2 (strömnivåer vid olika strömvägar och spänningar)
Utgående från spänningen på utsatt del, U_{UD}, kan man med hjälp av kroppsimpedans och övergångsimpedanser beräkna strömmarna direkt ur ohms lag.

Eftersom riskbedömningen ska slås ut på hela befolkningen har vi vid beräkning av strömmarna genom kroppen valt att använda kroppsimpedansen $Z_{50\%}$, det vill säga den impedans vars värde underskrids av 50% av befolkningen. Vill man ha ytterligare marginaler i beräkningarna kan man istället välja att använda $Z_{5\%}$, det vill säga den impedans vars värde endast underskrids av 5% av befolkningen. $Z_{95\%}$, bör dock inte användas eftersom detta värde endast är relevant för 5% av befolkningen. De i bilaga G angivna kroppsresistanserna är hämtade från tabell 1 i [4] och figur 3 i [6]. Värdena gäller för strömgenomgång hand-hand, och förutsätter stora (5.000-10.000 mm^2) och torra kontaktytor. Små kontaktytor ökar impedansen, medan fuktiga kontaktytor kan halvera den. För att beräkningarna även ska kunna utföras för strömvägen hand-fot/fötter har kroppsimpedanserna även räknats om med de faktorer som ges av figur 2 och 3 i [4].

För betong är resistiviteten, $\rho \approx 150\ \Omega m$
I våra beräkningar är fotens anläggningsyta, $A_{fot} \approx (0{,}05 \cdot 0{,}25) \cdot 2/3\ m^2 \approx 0{,}008\ m^2$
För båda fötterna gäller då, $A_{fötter} = 2 \cdot A_{fot} \approx 0{,}016\ m^2$
Vi har approximerat betonggolvet med ett oändligt plan, vilket ger oss övergångs-resistansen med hjälp av formeln:

$$R = \rho \cdot \frac{1}{4r} = \left\{ A = \Pi r^2 \right\} = \rho \cdot \frac{\sqrt{\Pi}}{4\sqrt{A}}$$

Då betong och mark har ungefär samma resistivitet kan den framräknade impedansen för betonggolv antas gälla även för gräsmatta.

Som siffrorna visar i bilaga G är det alltså ofördelaktigt med betonggolv eller mark/gräsmatta under fötterna om beröringsspänningen är över 75 V. De flesta andra underlag kan annars räknas som mer eller mindre isolerande, varför de klarar även den högsta spänningen, 115 V, på utsatt del. Övergången hand-hand är också farlig i de fall beröringsspänningen är över 50-75 V. Ju närmare transformatorn, sett från felet, man kommer ju lägre beröringsspänning utsätts man för.

Många luftledningar med förlängd frånkopplingstid (>10s) går förmodligen till sommarstugor och fritidshus. Där har man inte så ofta betonggolv, däremot brukar man vistas mycket utomhus, både med och utan verktyg. Det kan dock tänkas att många jordfel inträffar i samband med lite otrevligare väder såsom åska, storm och blötsnö, och då aktar man sig normalt för aktiviteter såsom grillning ute.

I beräkningsarket, bilaga G, har strömmar på max 30 mA markerats med grönt eftersom det är strömmar man normalt klarar av utan några organiska skador. Muskelkramp inträder dock redan vid ca 10 mA och även andningssvårigheter kan förekomma. Strömmar på 30-50 mA markeras med gult då dessa strömnivåer påverkar vävnader och inre organ. Det finns också en viss risk, upp till 5%, för hjärtkammarflimmer. Strömmar över 50 mA har markerats med rött. Risken för hjärtkammarflimmer är då över 5%. Vid 100 mA är risken 50%. Om strömvägen genom kroppen är en annan än från vänster hand till en eller båda fötterna krävs det ofta högre strömmar för att hjärtkammarflimmer ska uppstå. Vid en strömväg från hand till hand krävs t.ex. 2,5 gånger så hög ström för att sannolikheten för hjärtkammarflimmer ska komma upp i samma nivå.

5.3 Exempel på åtgärder

För att komma tillrätta med de fall som inte kan få klartecken direkt utifrån riskanalysen finns det några olika åtgärder att ta till.

- Mindre säkring
- Grövre ledningsareor / grövre neutralledare
- Etablera nya jordtag
- Potentialutjämning hos abonnenten

6 Slutsatser

Riskerna som är kopplade till fel i yttre nät är även vid långa frånkopplingstider avsevärt lägre än riskerna vid fel i inre nät. Det är många riskfaktorer som måste samverka, dessutom under en mycket begränsad tidsperiod. Sammanlagringen av många små risker är förmodligen orsaken till att inga kända dödsfall har inträffat. Sannolikheten att alla riskfaktorer inträffar samtidigt är mycket låg. Det är kort sagt väldigt svårt att utsättas för farliga potentialskillnader som uppstått på grund av fel i huvudledning i distributionsnät.

Det kan vara effektivare, både ekonomiskt och ur olycksfallssynppunkt, att satsa på andra personsäkerhetshöjande åtgärder än att till varje pris hålla nere frånkopplingstiderna i yttre nät. Det är ändå befogat att med hjälp av riskanalys sortera ut och åtgärda de nät som har de allra högsta riskerna. Sannolikt tillhör dessa risknät kategorin

luftledningsnät på landsbygd. Då många luftledningsnät byggs om från oisolerad till isolerad friledning, med betydligt lägre felfrekvens, samtidigt som antalet apparater med utsatta delar minskar kommer den redan nu låga risken för olycksfall successivt att minska ytterligare. I de redovisade beräkningarna i denna rapport finns ett antal säkerhetsfaktorer inbakade (andel enfasiga jordfel, beröringsfrekvens mm), vilket gör att riskerna sannolikt är ytterligare något lägre än framräknat. Resultaten bör med andra ord ligga på den säkra sidan.

Starkströmsföreskrifternas [1] krav på automatisk frånkoppling måste uppfyllas oavsett om nätet tillhör riskkategorin eller ej. Riskanalysen ersätter alltså inte på något sätt detta krav. I praktiken innebär detta att frånkopplingstiden inte bör vara längre än 25-30 s, eftersom det vid längre tider än så är svårt att garantera en säker frånkoppling.

7 Referenser

[1] Elsäkerhetsverket; ”Starkströmsföreskrifterna” ELSÄK-FS 1999:5, Elanders Gotab, Stockholm 1999, ISSN 1103-405X
[2] Sveriges Elleverantörer; ”Leveranssäkerhet i de svenska elnäten 1995-97”, Svensk Energi, art.nr. 11 328 01, Stockholm
[3] Vogt D; ”Potentialausgleich, Fundamenterder, Korrosionsgefährdung”, sid 363
[4] CEI; ”Effects of current on human beeings and livestock – General aspects” IEC 479-1, Genève, tredje utgåvan, 1994-09
[5] Rölvåg M; ”Rapport23a.pdf”, Statens Energimyndighet, rapportutdrag 2004-01-23 från ännu ej utgiven rapport.
[6] Persäter W, Elrud A; ”Farlig strömgenomgång - och ofarlig”, Elinstallatören nr 9 2003
[7] CEI; ”Protection against electric shock – Common aspects for installation and equipment” IEC 61140, Genève, tredje utgåvan, 2001-10

Bilagor

A Nätberäkningsprogram för lågspänning

Nätberäkningsprogram för lågspänning				
bolag	**program**	**källa**	**datum**	**kommentar**
f d Sydkraft Elnät Syd	SweDam*	mejl	19/9-03	Egenutvecklat program som bygger på samma beräkningsmotor som många andra nätberäkningsprogram i Sverige.
f d Sydkraft Elnät Mälardalen	Facil+*	mejl	19/9-03	
f d Sydkraft Elnät Nord	Meldis*	mejl	19/9-03	
Graninge	Tekla Xpower	mejl	12/9-03	
Linköping Kraftnät	X-power	mejl	23/9-03	Mycket bra system men räknar något tuffare än vårt tidigare system, PDE
Vf Norrnät	Netbas**	mejl	19/9-03	Programmet är bra. Dock viktigt att parametrar såsom bakomliggande kortslutningseffekter, spänningsnivå i trafo, kabelareor, kabellängder, osv, är rätt inställda inför beräkning.
Vf Sveanät	Netbas** samt Netkoll	mejl	24/9-03	Både Netbas och Netkoll är, på det sättet som Sveanät använder dem, relativt trubbiga. Ytterligare ett par program används (härrör från tiden före Sveanäts bildande och lever kvar tillsvidare).
Vf Östnät	Netbas**	mejl	15/9-03	
Vf Västnät	Netbas**	mejl	18/9-03	För att beräkningar skall kunna utföras enligt norm kan det krävas vissa anpassningar.
* Inom kort kommer hela Sydkraft Nät att gå över till ABBs beräkningsprogram i Facil++. ** Powel Energy Management AB, Norge, är systemleverantör				

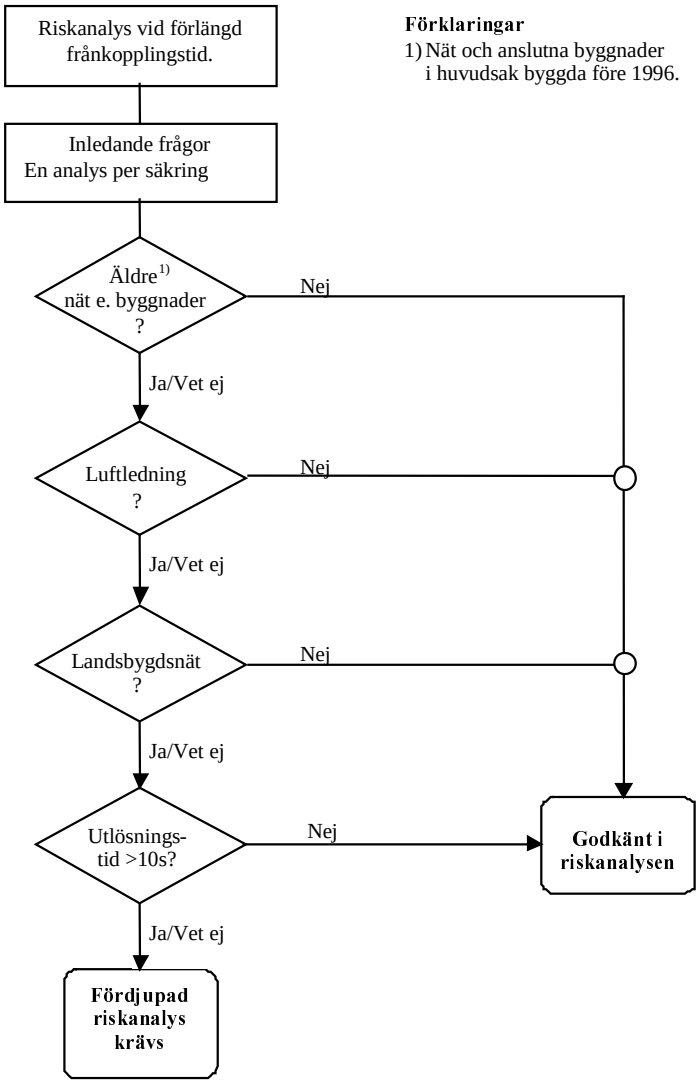
Sammanställning av använda nätberäkningsprogram

B Riskanalys – inledande frågor

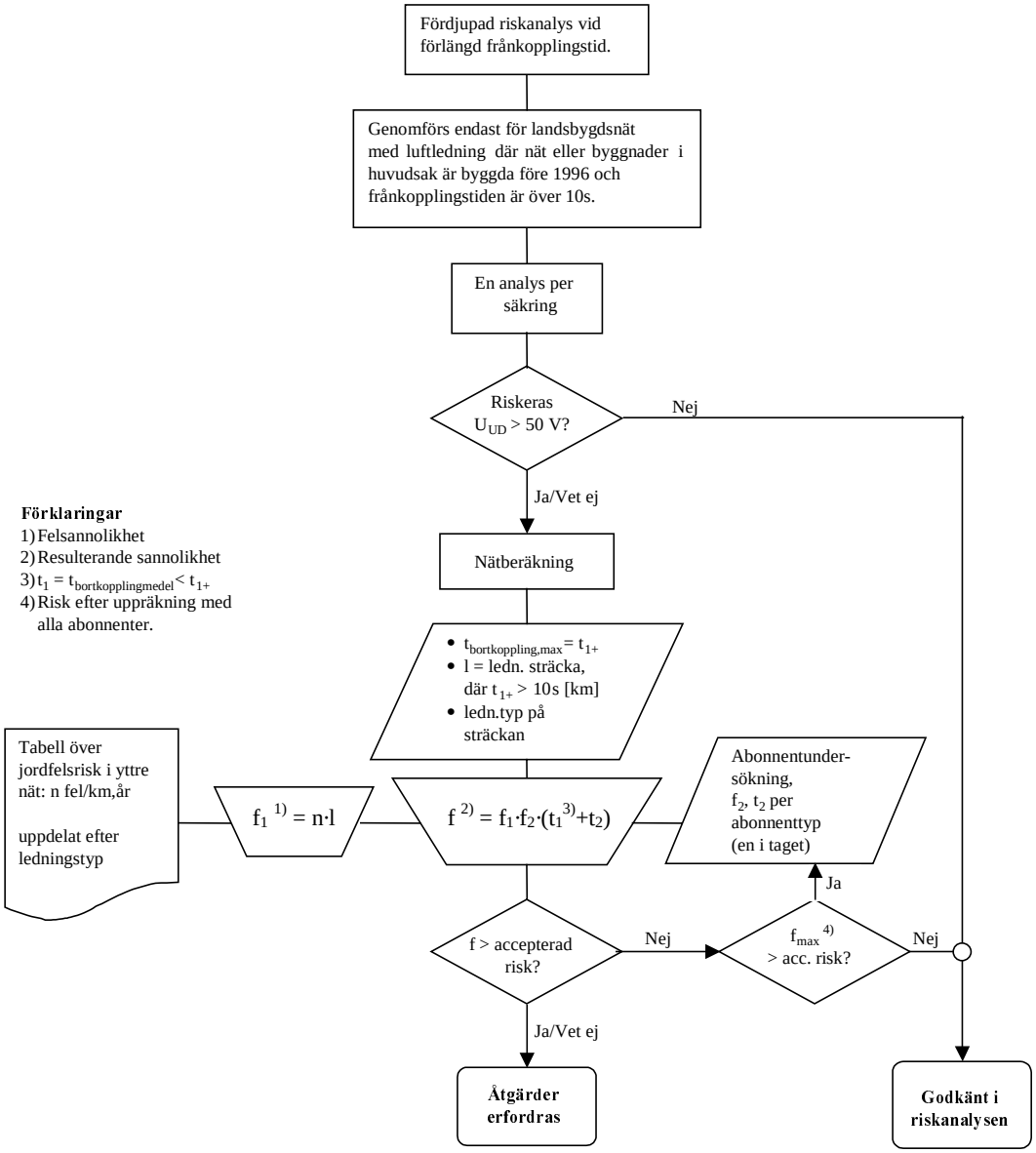
Fråga	Ja/Vet ej	Nej
Nät och byggnader i huvudsak byggda före 1996?		
Luftledning?		
Landsbygdsnät?		
Frånkopplingstid > 10 sekunder?		

Om någon eller några av ovanstående frågor besvaras med Nej behöver inte den efterföljande riskanalysen göras. För närmare förklaring se avsnitt 4.1 och 5.2 i rapporten. Besvaras alla frågor ovan med Ja/Vet ej ska en fördjupad riskanalys göras.

Flödesschema som beskriver de inledande frågeställningarna:



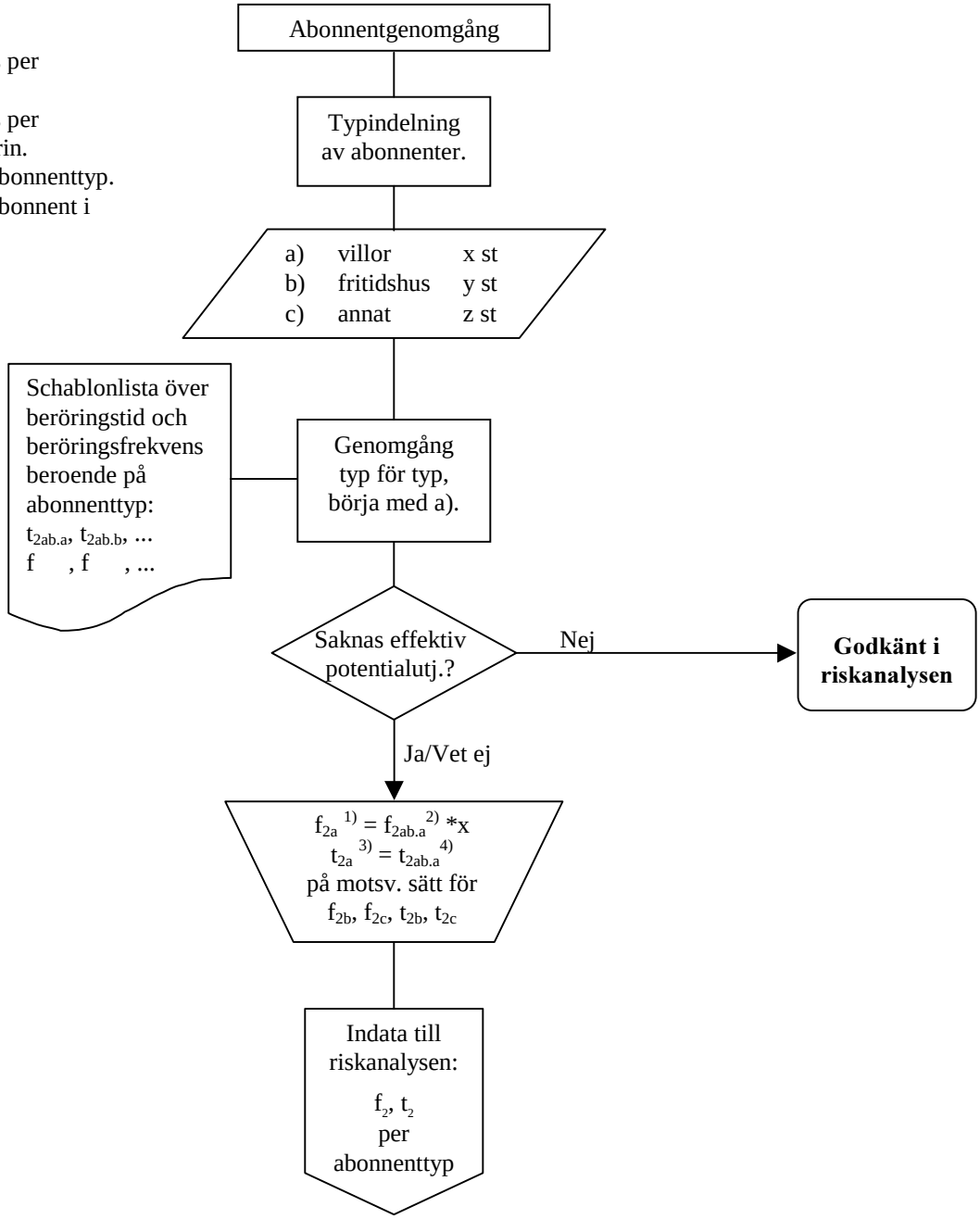
C Fördjupad riskanalys – flödesschema



D Riskanalys – abonnentgenomgång

Förklaringar

1) Beröringsfrekvens per abonnenttyp.
2) Beröringsfrekvens per abonnent i kategorin.
3) Beröringstid per abonnenttyp.
4) Beröringstid per abonnent i kategorin.



E Sannolikhetsteoretisk bakgrund till riskberäkning

Inledning

Vid riskberäkningen har formler för tillbudsfrekvens och varaktighet använts. Här är avsikten att visa bakgrunden till formlerna, villkoren för deras giltighet och att härleda dem med enkla beräkningar som inte kräver omfattande kunskaper inom sannolikhetsteorin.

I det följande ses risksituationen som ett osannolikt sammanträffande av två oberoende händelser. Frekvensen för sådana sammanträffanden bestäms först i en grundmodell som hämtats från teorin för tillförlitlighet. Varaktigheten för situationen studeras sedan i en separat analys.

Grundmodell

Vi tänker oss två processer som båda kan ha två tillstånd som vi kallar ”av” och ”på”. Varje process växlar på ett slumpmässigt men sannolikhetsteoretiskt väldefinierat sätt mellan tillstånden. De två processerna antas dessutom vara oberoende av varandra. Tillstånd *av* kan tänkas stå för ett normaltillstånd och *på* som ett tillstånd förenat med risk av något slag. Vi definierar begreppet ”incident” som den händelsen som innebär att båda processerna antar tillståndet *på*. Man kan då fråga sig hur ofta en incident inträffar och hur länge den varar, givet att vardera processen är definierad med statistisk fördelning för tiderna för hur länge processerna är *av* och *på*.

I den aktuella tillämpningen kommer den ena processen att svara mot att jordpotentialen höjs vid ledningsfel och den andra processen mot att beröring av spänningsutsatt del sker. Vid sammanträffande av händelserna uppstår olycksfallsrisk.

Avsikten är närmast att bestämma hur ofta sammanträffande av tillståndet *på* sker och hur länge det varar. Vi inför beteckningarna:

f_i = frekvensen för övergång från tillstånd *av* till *på* för process *i*

t_i = genomsnittsvärdet för hur länge tillstånd *på* varar för process *i*

p_i = sannolikheten för tillstånd *på* för process *i*

Här är index i = 1 för den ena processen och 2 för den andra. Vi låter storheterna utan index beteckna den intressanta processen som antar tillståndet *på* då båda processerna är *på* och *av* annars. Man inser att storheterna är kopplade till varandra enligt

$$p_i = f_i \cdot t_i$$

Man gör därför lätt följande beräkningar, där vi har utgått från det förhållandet att sannolikheten för två oberoende händelser är produkten av deras sannolikheter

$$p = p_1 \cdot p_2 = f_1 t_1 \cdot f_2 t_2 = f_1 f_2 \cdot t_1 t_2 = f_1 f_2 \frac{t_1 t_2}{t_1 + t_2}(t_1 + t_2)$$

$$= (f_2 \cdot f_1 t_1 + f_1 \cdot f_2 t_2)\frac{t_1 t_2}{t_1 + t_2} = (f_2 p_1 + f_1 p_2) \cdot \frac{t_1 t_2}{t_1 + t_2} = ft$$

med $f = f_2 p_1 + f_1 p_2 = f_{21} + f_{12}$ $\qquad t = \dfrac{t_1 t_2}{t_1 + t_2}$

Här identifierar vi f_{21} som frekvensen för händelsen att *på* inträffar i process 1 och att process 2 då redan är i tillstånd *på*, dvs process 2 är *på* före 1. För f_{12} gäller förstås det omvända. Då ser vi att överlappningstiden t får angivet uttryck. Detta uttryck är inte direkt relevant för den aktuella tillämpningen utan måste revideras, vilket vi återkommer till i nästa avsnitt. Först kan en liten kommentar om ovanstående räkningars giltighet vara på sin plats.

Formlerna ovan används flitigt i tillförlitlighetsteorin och härleds där ofta under det så kallade Markovantagandet, som innebär att tiderna för tillstånden har en speciell typ av fördelning, nämligen exponentialfördelningen. Detta innebär att processen är minneslös i den meningen att framtiden vid varje tidpunkt påverkas av det förflutna blott genom situationen i själva tidpunkten. Detta är ett mycket starkt antagande som i allmänhet inte är uppfyllt. Under förutsättning att tiden för *på* är väsentligt kortare än tiden för *av* gäller emellertid formlerna approximativt utan ett sådant antagande, alltså helt generellt. I det aktuella fallet är detta villkor verkligen uppfyllt.

Modifiering av den genomsnittliga varaktigheten

I det föregående härleddes ett uttryck för den genomsnittliga överlappstiden för de två processerna. I bakgrunden till denna tid ligger antagandet att varaktigheten för tillståndet *på* i respektive process ej påverkas av om den andra processen är *på* eller inte. För process 2, dvs beröringsprocessen är emellertid ett sådant antagande orealistiskt; antingen rycker man bort handen direkt om man kan, eller så får man kramp så att exponeringen upphör först då säkringen i yttre nät utlöses och spänningen försvinner. Vi gör här det pessimistiska antagandet att det sistnämnda gäller, dvs att process 1 bestämmer när exponeringen upphör.

En mera realistisk bestämning av varaktigheten t fås om vi betingar med avseende på vilken process som är *på* först enligt

$$t = (f_{21} \cdot t_{21} + f_{12} \cdot t_{12}) / (f_{21} + f_{12})$$

där f_{21} och f_{12} redan är definierade och där t_{21} och t_{12} är den genomsnittliga varaktigheten givet att process 2 resp. 1 är *på* först. Under antagandet om kramp som gjorts ovan får man direkt att t_{21} blir ingenting annat än t_1. Det återstår att bestämma t_{12}, som ju är den genomsnittliga kvarvarande tiden fram till spänningslöshet. Man skulle vilja tro att t_{12} är exakt hälften så stor som t_1, och detta är helt korrekt om varaktigheten för process 1 är en konstant, dvs att den är ständigt lika med t_1, utan variation. I det allmänna fallet blir det litet knepigare.

Antag, för enkelhets skull, att det finns två värden på varaktigheten, 1 sekund och 10 sekunder och att den kortare inträffar 10 gånger så ofta som den längre. Då blir t_1 lika med knappt 2 sekunder, och hälften av detta blir knappt 1 sekund. Emellertid inser man att den längre tiden står för halva den tid då tillstånd *på* råder, så att sannolikheten blir 50% att det blir den längre tiden som gäller. I sådant fall blir den genomsnittliga tiden 5 sekunder, medan den blir 0,5 sekunder i annat fall. Totalt blir genomsnittet således 2,75 sekunder. Detta värde skall jämföras med 1 sekund som skulle gälla om varaktigheten var konstant lika med 2 sekunder. Slutsatsen är att själva sannolikhetsfördelningen för varaktigheten som statistisk variabel inverkar och att genomsnittet inte blir representativt längre. Här observeras att om exponentialfördelning antas för den statistiska variationen så blir den aktuella genomsnittliga tiden precis t_1, alltså i detta exempel knappt 2 sekunder, vilket är mer än knappt 1 sekund men mindre än 2,75.

Vi har sett att kännedom om den statistiska fördelningen för varaktigheten spelar in för bestämning av t_{12}. Man känner inte denna fördelning och tvingas därför göra antaganden. Ett troligtvis pessimistiskt antagande om exponentialfördelning gör emellertid situationen mycket enkel i och med att både t_{21} och t_{12} då blir lika med t_1 och man får alltså på detta sätt

$$t = t_1$$

Av ovanstående följer dessutom att om riskbedömningen vid tillbud skulle kräva detaljerad kännedom om exponeringens varaktighet som statistisk variabel så ger exponentialfördelningsantagandet en förenklad analys.

Slutsats

Frekvensen för förekomsten av tillbud hos en enskild abonnent har bestämts med en enkel formel där frekvens och genomsnittlig varaktighet för beröringsspänning å ena sidan ingår liksom dito för beröring av utsatt del å den andra. Den genomsnittliga exponeringstiden vid tillbud har diskuterats och man har funnit motivering för att ansätta den till den genomsnittliga varaktigheten av beröringsspänningen.

F Exempel på riskberäkningar

		oisolerad friledning	isolerad friledning	hängkabel	hängspiral-kabel	
I nätet	Oreducerad felfrekvens	0,06	0,01	0,04	0,01	avbrott/km,år
	Andel enfasiga jordfel	50%	50%	50%	50%	
	f_1 antal enfasiga jordfel per km	0,03	0,005	0,02	0,005	fel/km,år
	Genomsnittlig frånkopplingstid	15 s	15 s	15 s	15 s	
	t_1 genomsnittlig frånkopplingstid	4,8E-07 år	4,8E-07 år	4,8E-07 år	4,8E-07 år	

Hos abonnenten	Antal beröringar av utsatt del (totalt per abonnentanläggning)	5 000 ggr/år	
	Reduktionsfaktor - samtidig beröring med sann jord	10%	
	f_2 samtidig beröring av utsatt del och sann jord	500 ggr/år	
	Genomsnittlig beröringstid (per samtidig beröring)	5 s	
	t_2 genomsnittlig beröringstid (per samtidig beröring)	1,6E-07 år	
	r risk att fastna om övriga förutsättningar är uppfyllda	50%	
	Totalt antal abonnenter i landsbygdsnät	1 500 000 st	
	Andel riskutsatta abonnenter	6%	(luftledning, utlösningstid > 10s)
	Antal riskutsatta abonnenter	90 000 st	

Riskberäkningar

	oisolerad friledning		isolerad friledning		
	alt.1	alt. 2	alt.1	alt. 2	
Ledningssträcka med frånkopplingstid > 10 s	100 m	500 m	100 m	500 m	
Risk per abonnentanläggning:					
$f=f_1*f_2*(t_1+t_2)$ sannolikhet för samtidigt beröring och fel	9,5E-07	4,8E-06	1,6E-07	7,9E-07	fall/år
f*r sannolikhet för dödsfall pga elchock vid fel i yttre nät	4,8E-07	2,4E-06	7,9E-08	4,0E-07	fall/år
Uppräknad risk:					
Uppräknad risk för utsatt abonnentgrupp	4,3E-02	2,1E-01	7,1E-03	3,6E-02	fall/år
Risken motsvarar antal fall per år i hela landet.					
Jämförelsetal (antal år mellan varje statistiskt dödsfall)	23	5	140	28	år/fall

	hängkabel		hängspiralkabel		
	alt.1	alt. 2	alt.1	alt. 2	
Ledningssträcka med frånkopplingstid > 10 s	100 m	500 m	100 m	500 m	
Risk per abonnentanläggning:					
$f=f_1*f_2*(t_1+t_2)$ sannolikhet för samtidigt beröring och fel	6,3E-07	3,2E-06	1,6E-07	7,9E-07	fall/år
f*r sannolikhet för dödsfall pga elchock vid fel i yttre nät	3,2E-07	1,6E-06	7,9E-08	4,0E-07	fall/år
Uppräknad risk:					
Uppräknad risk för utsatt abonnentgrupp	2,9E-02	1,4E-01	7,1E-03	3,6E-02	fall/år
Risken motsvarar antal fall per år i hela landet.					
Jämförelsetal (antal år mellan varje statistiskt dödsfall)	35	7	140	28	år/fall

G Ström genom kroppen

Strömnivåer beroende på beröringsspänningens och övergångsresistansens storlek.

U_{UD}, spänning på utsatt del (Varierar beroende på felställe i nätet)	115 V	100 V	75 V	50 V
$R_{T\ hand\text{-}hand}$, total kroppsresistans [kΩ] ($Z_{50\%}$)	1,725	1,857	2,200	2,625
$R_{T\ hand\text{-}fot} = R_{T\ hand\text{-}hand} / 0{,}8$	2,2	2,3	2,8	3,3
$R_{T\ hand\text{-}fötter}$ (Z_i ca 75% av hand-fot)	1,6	1,7	2,1	2,5

Värdena ovan förutsätter stora (5000-10000 mm^2) och torra kontaktytor.
Små kontaktytor ökar impedansen, fuktiga kontaktytor kan halvera den.
$Z_{50\%}$ innebär att halva befolkningen har lägre kroppsimpedans, halva har högre.

(Obs! barfota)	betonggolv*	50%-gräns	klinker	linoleum
R_g, övergångsresistans fot - jord [kΩ]	0,73	1,7	5	200
R_g, övergångsresistans fötter - jord [kΩ]	0,51	2,2	5	200

* samma värden för gräsmatta

$I_{hand\text{-}hand} = U_{UD}/R_{T\ hand\text{-}hand}$	115 V	100 V	75 V	50 V
$I_{hand\text{-}hand}$ ($I_{50\%}$)	67 mA	54 mA	34 mA	19 mA

$I_{hand\text{-}fötter} = U_{UD}/(R_{T\ hand\text{-}fötter}+R_g)$	115 V	100 V	75 V	50 V
$I_{hand\text{-}fötter}$ betonggolv ($I_{50\%}$)	54 mA	44 mA	29 mA	17 mA
$I_{hand\text{-}fötter}$ gränsvärde ($I_{50\%}$)	30 mA	25 mA	18 mA	11 mA
$I_{hand\text{-}fötter}$ klinker ($I_{50\%}$)	17 mA	15 mA	11 mA	7 mA

Förklaring till färgkodningen:

Grönt: Strömmar upp till 30 mA, en strömnivå man normalt klarar utan några organiska skador. Muskelkramp från 10 mA, även andningssvårigheter kan förekomma.

Gult: Strömmar på 30-50 mA, upp till 5% risk för hjärtkammarflimmer. Skador på vävnader och inre organ.

Rött: Strömmar över 50 mA, över 5% risk för hjärtkammarflimmer (50% risk vid 100 mA).

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