

Personfara till följd av transient urladdningsström vid jordfel i distributionsnät

Jämförelse av kabelnät och luftledningsnät på mellanspänningsnivå



Anna Guldbrand

Dept. of Industrial Electrical Engineering and Automation

Lund University

Sammanfattning

I denna rapport behandlas frågan om hur kabelnätens starka kapacitiva kopplingen till jord påverkar de transienta felströmmar som uppkommer vid jordfel. Strömtransienten vid jordfel i 10 och 20 kV nät har, utifrån förenklade jordtagsmodeller och kroppsimpedanser, beräknats i Matlab.

Risken för personskada ökar med urladdningsströmmens effektivvärde och varaktighet. Varaktigheten är proportionell mot ledningens kapacitans mellan fas och jord och därmed mot ledningens längd. Kapacitansen till jord för PEX-kabel och luftledning är 0,36 μF respektive 0,006 μF per fas och km. Därmed medför jordfel i nät med PEX-kabel samma risk för personskada, på grund av urladdningsström, som luftledning av sextio gånger kabelns längd. Vid fel orsakade av en person i beröring med både fas och jord är risken för skador stor både till följd av fundamentalfrekvent och transient ström. Till exempel medför urladdningstransienten vid jordfel i ett 26 km stort 20 kV luftledningsnät eller 0,5 km stort kabelnät 50 % risk för hjärtkammerflimmer hos en person som utgör den enda felimpedansen i jordfelet, enligt IECs normer och beräkningar som redovisas i denna rapport.

Den transienta felströmmen ger precis som den fundamentalfrekventa felströmmen upphov till potentialökning i marken runt fel och jordtag. Personer som befinner sig i närheten av felställe eller jordtag och är i beröring med flera olika spänningsnivåer, utsätts för fara i form av ström genom kroppen. Vilka strömtransienter och därtill kopplade kabellängder som kan anses vara ofarliga beror på hur området kring felstället och nätstationerna spänningssätts vid jordfel. Spänningssättningen avgörs av markens resistivitet och utformning av nätstationernas jordtag.

För att risk för hjärtkammerflimmer ska föreligga, krävs vid felställe i jord med homogen resistivitet 750 Ω att en person står precis i felstället och att kabellängden är minst 10 km för 10 kV nät och 2 km för 20 kV nät. Om personen istället befinner sig en halv meter från felstället krävs över 200 km kabel. Beräkningar som redovisas i denna rapport förutsätter exponentiellt avtagande spänningssättning vid jordtag. En meter från jordtaget är markens spänningssättning ungefär 30 % av den i stationens nollpunkt. Om man istället tänker sig att stationen är jordad på ett sådant sätt att markens potential avtar jämnare, är berörings- och stegspänning, och därmed risken för alvarliga personskador, i stationens omedelbara närhet mindre. Stegspänningen vid längre avstånd från felet bör däremot öka och därmed göra felet kännbart inom ett större område.

Nätstationer är normalt jordade så att det runt stationen skapas en ekvipotentialyta med minimal spänningsskillnad. Eftersom steg- och beröringsspänning inom området är ytterst liten då jordningen fungerar korrekt, ska ingen urladdningstransient kännbart påverka de personer som befinner sig vid stationen då jordfel inträffar i nätet. Högsta stegspänning uppnås då någon står med en fot på ekvipotentialytans rand och den andra en meter ut. För att strömtransienten överhuvudtaget ska uppfattas av en person placerad på detta sätt, krävs enligt de förutsättningar som finns angivna i rapporten många hundra kilometer stora 20 kV kabelnät.

Sammanfattning	2
<i>Inledning</i>	<i>1</i>
Bakgrund	1
Syfte och mål	1
Omfattning och avgränsningar	1
<i>Fel med kroppsresistans som felimpedans</i>	<i>1</i>
Impulsströmmar i distributionssystem	1
Personfara vid impulsström	3
Jämförelse av luftledningsnät och kabelnät	4
<i>Berörings- och stegspänning</i>	<i>7</i>
Spänningssättning av område runt jordfel	7
Spänningssättning av jordtag	8
Ström genom kroppen	8
Felställe utan preparerat jordtag.....	8
Fel i jordtag.....	10
Personfara	11
Jämförelse av luftledningsnät och kabelnät	12
Felställe utan preparerat jordtag.....	12
Vid jordtag	13
Utgångspunkt i fundamentalfrekvent regelverk	14
<i>Slutsats</i>	<i>15</i>
<i>Referenser</i>	<i>16</i>
<i>Bibliografi</i>	<i>16</i>

Inledning

Elforsk har under våren drivit ett projekt för att underlätta kablfieringen av de svenska distributionsnätet. En av projektets huvudfrågor är hur man behandlar de stora kapacitiva felströmmar som uppkommer vid jordfel i kabelnäten. Dessa felströmmar är en följd av kabelledningens kapacitiva koppling till jord, vilken är betydligt större än motsvarande koppling för luftledning. Utförarnas (Carl Bro AB och Vattenfall Power Consultant AB) arbete är i huvudsak inriktat på fundamentalfrekventa storheter och kompensering av dessa. I denna rapport behandlas istället frågan om hur den starka kapacitiva kopplingen till jord påverkar de transienta felströmmar som uppkommer vid jordfel. Rapporten har tillkommit mot bakgrund av det intresse som den expert/styrgrupp som Elforsk har satt samman, visat frågan.

Bakgrund

Vid jordfel i ett distributionssystem uppstår förutom en fundamentalfrekvent felström också en initial transient urladdningsström. En transient ström kan precis som den fundamentalfrekventa leda till personskada. En mycket stor del av de svenska distributionsnät, det vill säga nät med spänningsnivå 10 och 20 kV, har fram till idag bestått av luftledning. Luftledningarnas kapacitiva koppling till jord är svag och den transienta urladdningsström som uppkommer vid enfasigt jordfel är därför liten och anses inte utgöra någon fara för person eller egendom. Vid kablfiering av distributionsnäten ökar ledningarnas kapacitiva koppling till jord avsevärt vilket leder till ansenligt större transienta urladdningsströmmar.

Syfte och mål

Rapportens syfte är att belysa de stora skillnader som finns mellan urladdningsströmmar i luftlednings- och kabelnät. Om möjligt ska rapporten också ge en fingervisning om hur stora kabelnäten kan göras utan att det föreligger risk för personsador på grund av transienta urladdningsströmmar.

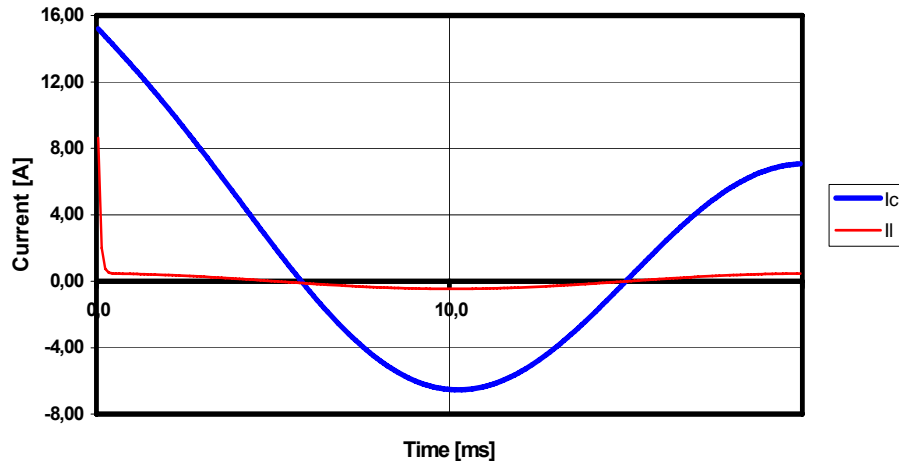
Omfattning och avgränsningar

Den urladdningstransient som uppkommer vid enfasigt jordfel i kabelnät har jämförts med den transient som uppkommer vid enfasigt jordfel i luftledningsnät. Hela transienta urladdningsströmmen, samt de delar av denna som passerar genom människokroppen placerad på olika avstånd från felställe eller jordtag, har också jämförts med de riktlinjer som finns gällande risk för hjärtkammerflimmer hos människor. Strömtransienten för 10 och 20 kV nät har, utifrån en förenklad jordtagsmodell och kropps impedans, beräknats i Matlab.

Fel med kroppsresistans som felimpedans

Impulsströmmar i distributionssystem

Ett jordfel i ett kraftsystem är en koppling mellan fas och jord, vilket betyder en koppling förbi fasens kapacitans till jord. Kopplingen medför en transient urladdningsström. Urladdningsströmmen går genom den resistans som finns i jordfelet. I Figur 1 visas ett exempel på transient urladdningsström adderad till fundamentalfrekvent felström vid enfasigt jordfel i isolerat system.



Figur 1, Transient urladdningsström adderad till den fundamentalfrekventa felströmmen för luftledning, I_l och kabel, I_c . Exempel med 10 kV fasspänning, kroppsresistans 1000 Ω , kapacitans 3,6 μF per fas för kabel och 0,06 μF per fas för luftledning (10 km ledning).

Initialvärdet för urladdningsströmmen är fasspänningens toppvärde dividerat med felresistansen. Om orsaken till jordfelet är en person som tar i ledaren utgörs denna resistans av personens kroppsresistans, det vill säga

$$I_0 = \frac{\hat{U}_{Phase}}{R_{Body}}$$

Kapacitansen mellan ledning och jord för luftlednings och kabelnät, vilken lagrar energi och ger upphov till urladdningsströmmen, kan approximeras ur riktvärdet på den fundamentalfrekventa kapacitiva strömmen

$$I_l = \frac{U \cdot I}{300}$$

$$I_c = \frac{U \cdot I}{5}$$

För kabledredningar beror den kapacitiva strömmen i stor utsträckning på vilken typ av kabel som används. Det värde som anges här kan sägas gälla för PEX kabel. Detta resulterar för luftledning och kabel i driftkapacitanser

$$C_l = 0,006 \mu\text{F}/\text{km} \cdot \text{fas}$$

$$C_c = 0,36 \mu\text{F}/\text{km} \cdot \text{fas}$$

Urladdningsströmmen för ett isolerat system avtar enligt

$$i(t) = I_0 \exp(-t/RC)$$

$$R = R_{Body}$$

då kroppsresistansen kan antas vara av storleksordningen 1000 eller 3000 Ω , vilka är de approximationer som används här. Kroppsimpedans är en olinjär storlek som beror av flera olika faktorer. Kroppsimpedans anges ibland som en funktion av spänningen över kroppen. Strömmens effektivvärde är vid kondensatorurladdning

$$I_{rms} = \frac{I_0}{\sqrt{6}}$$

Impulsströmmens varaktighet definieras som tiden till dess strömmen understiger 5 % av sitt initialvärde, vilket betyder

$$t_i = 3 \cdot RC.$$

Personfara vid impulsström

Olika storheter används för att definierar hur små urladdningsströmmar som kan påverka människan. Specifika flimmerenergin

$$F_e = \int_0^{\infty} i(t)^2 dt = I_0^2 \cdot \frac{RC}{2}$$

är en typ av riktvärde.

Hjärtkammerflimmer anses vara den största anledningen till dödsfall orsakade av elektrisk chock [1]. Specifika flimmerenergin är, förutsatt bestämda villkor gällande strömmens väg, hjärtats fas och så vidare, kopplad till en viss sannolikhet att hjärtkammerflimmer ska uppstå. Också om man kalkylerar risken utifrån strömimpulsens effektivvärde, I_{rms} och varaktighet, t_i finns flera olika gränser vilka avser olika stora risker för hjärtkammerflimmer. I IECs normer [2] anges gränser för att hjärtkammerflimmer ska kunna uteslutas, samt för 5 % och 50 % risk. Urladdningsströmmens varaktighet bör, för att dessa gränser ska stämma, vara mellan 0,1 och 10 ms. Energin som genom impulsen frigörs i kroppen är flimmerenergin multiplicerad med kroppens resistans. I USA används istället för IECs normer en standard IEEE 80 som skiljer sig något från de europeiska normerna.

Försök har utförts för att undersöka människors förmåelse och smärtgräns kopplad till specifik energi. När det gäller gränser för hjärtkammerflimmer baseras dessa till stor del på undersökningar utförda på hundar. Om hjärtkammerflimmer uppkommer för kortvariga strömmar beror också på när, i förhållande till hjärtats fas, impulsen går genom kroppen. I [3] skriver G Biegelmeier om de värden på flimmerenergin vilka, beroende på impulsens längd, används som gränser i en konventionell överenskommelse:

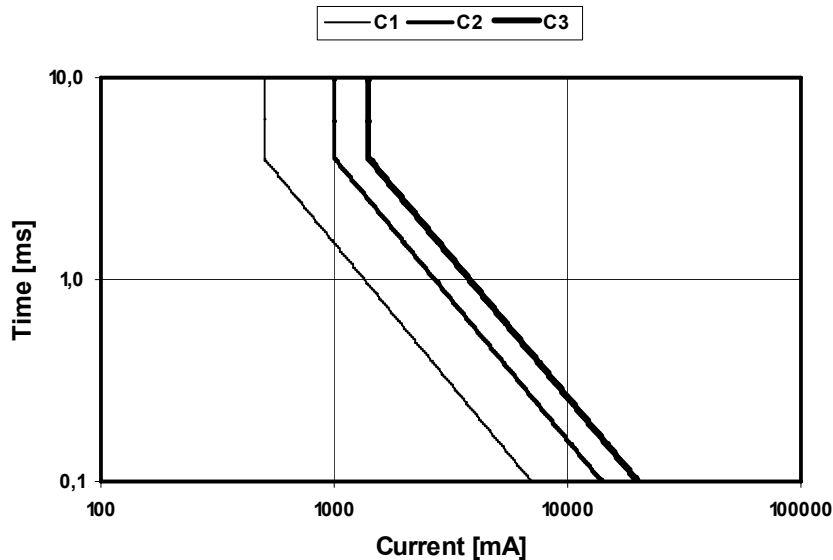
$$5 \text{ ms} : 5 \text{ mA}^2 \text{ s}$$

$$1 \text{ ms} : 10 \text{ mA}^2 \text{ s}$$

$$0,1 \text{ ms} : 20 \text{ mA}^2 \text{ s}$$

Dessa gränser nämns inte i [2]. I den tekniska rapporten anges riskerna enbart i förhållande till strömmens effektivvärde och impulslängd. Gränserna anges med logaritmisk skala både vad gäller ström genom kroppen och tidskonstant. Jämfört med den överenskommelse Biegelmeier nämner när för IECs normer, en betydligt mindre kapacitans flimmergränsen, förutsatt kroppsmotstånd 1000 eller 3000 Ω .

IECs riktgränser för maximala urladdningsströmmar följer den logaritmiska skala som visas i Figur 2. Hur stor urladdningsström människokroppen tål beror på hur lång tid impulsen varar, med andra ord kroppens resistans och den felbehäftade fasens kapacitans till jord. Kurva c_1 är gränsen under vilken ingen risk för hjärtkammerflimmer ska anses finnas. Mellan kurva c_1 och kurva c_2 finns upp till 5 % risk för hjärtkammerflimmer. Kurvan som utesluter risk för hjärtkammerflimmer får anses ange mycket konservativa värden [1].



Figur 2, Gränser för hjärtkammarflimmer [2], ström som går genom den vänstra sidans hand till fot. Strömmar och tidskonstanter under c_1 medför ingen risk, c_1 till c_2 medför upp till 5 % risk, c_2 till c_3 medför upp till 50 % risk, över c_3 medför över 50 % risk.

Jämförelse av luftledningsnät och kabelnät

Om en person med kroppsresistans 1000 eller 3000 Ω orsakar jordfel i nät med nominell huvudspänning 10 eller 20 kV fås urladdningsströmmar med effektivvärde enligt Tabell 1.

	\hat{U}_{Phase} [kV]	R_{Body} [Ω]	I_{rms} [A]	$\log_{10}(I_{\text{rms}})$
1	8,17	1000	3,33	0,52
2	8,17	3000	1,11	0,045
	\hat{U}_{Phase} [kV]	R_{Body} [Ω]	I_{rms} [A]	$\log_{10}(I_{\text{rms}})$
3	16,3	1000	6,67	0,82
4	16,3	3000	2,22	0,35

Tabell 1, Effektivvärdet av den ström som går genom kroppen vid ett av människa orsakad jordfel

Dessa motsvarar, om inte risken för hjärtkammarflimmer ska överstiga IECs riktgränser, impulsströmsvaraktigheter listade i Tabell 2.

	t_i [ms]	$t_{15\%}$ [ms]	$t_{150\%}$ [ms]
1	0,29	0,75	1,2
2	1,3	3,45	-
3	0,11	0,28	0,46
4	0,50	1,3	2,1

Tabell 2, Tidskonstanter som anger gränserna för flimmerrisk om de nominella strömmarna är som i exempel 1 till 4.

Vilken längd det motsvarar för luftlednings- och kabelnät kan räknas ur

$$l_l = \frac{t_i}{3 \cdot R \cdot C_l}$$

respektive

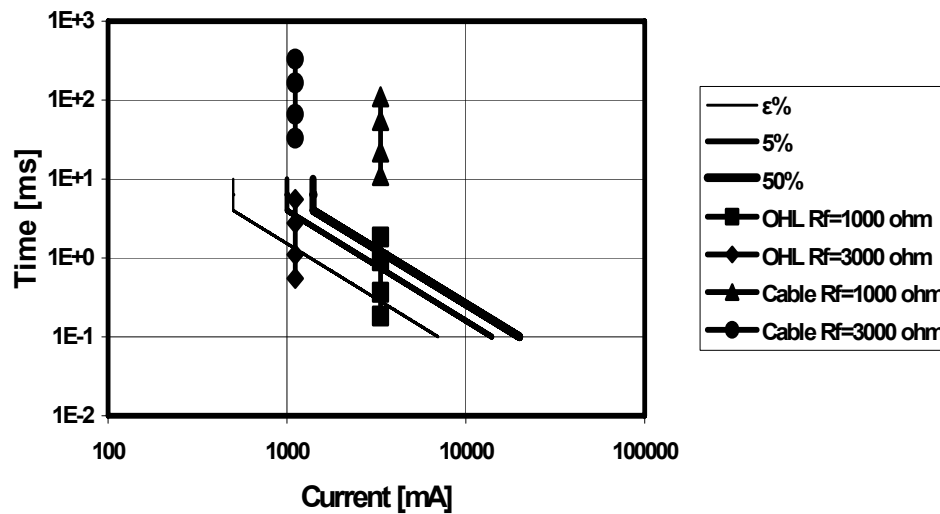
$$l_c = \frac{t_i}{3 \cdot R \cdot C_c}$$

De ungefärliga längder luftledning och kabel detta innebär för exempel 1, 2, 3 och 4 listas i Tabell 3.

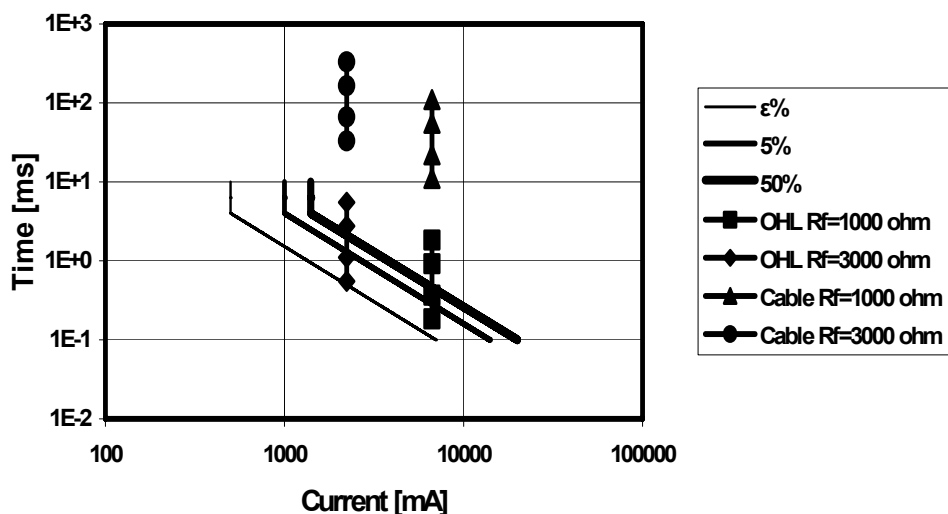
	Luftledning			Kabel		
	I_{IEC} [km]	$I_{IEC5\%}$	$I_{IEC50\%}$	I_{IEC} [km]	$I_{IEC5\%}$	$I_{IEC50\%}$
1	16	42	68	0,27	0,7	1,1
2	24	64	-	0,40	1,1	-
3	6,1	16	26	0,10	0,26	0,43
4	9,3	24	39	0,15	0,40	0,65

Tabell 3, ungefärliga längder kabel respektive luftledningsnät som kan läggas utan att risk för hjärtkammerflimmer uppstår och med mindre än 5 och 50 % risk enligt IEC tekniska rapport 479-2 [2].

Figur 3 visar hur de urladdningsströmmar som uppstår i ett nät med fasspänning 10 kV förhåller sig till IECs gränsvärden [2]. Urladdningsströmmarna är beräknade för 10, 20, 50 och 100 km långa ledningar. Figur 4 visar motsvarande för nät med 20 kV fasspänning.



Figur 3, Impulsströmmens varaktighet och effektivvärde för 10 kV distributionsnät. De fyra markeringarna motsvarar nerifrån och upp 10, 20, 50 och 100 km långa ledningar [2].



Figur 4, Impulsströmmens varaktighet och effektivvärde för 20 kV distributionsnät. De fyra markeringarna motsvarar nerifrån och upp 10, 20, 50 och 100 km långa ledningar [2].

Det finns ett linjärt samband mellan ledningslängd och impulsströmmens varaktighet. Strömmens varaktighet kan uttryckas som

$$t_i = k \cdot l$$

$$k = 3 \cdot R \cdot C$$

Impulsströmmens varaktighet per km ledning listas för exemplen i den här rapporten i Tabell 4.

	Luftledning C = 0,006 [μF]	Kabel C = 0,36 [μF]
1, 3 R = 1000 [Ω]	t _i [ms/km] 0,018	t _i [ms/km] 1,1
2, 4 R = 3000 [Ω]	0,054	3,2

Tabell 4, Impulsströmmens varaktighet per km ledningslängd för olika värden på R och C

Ett annat sätt att ange gränser för farliga urladdningsströmmar är som tidigare nämnts den specifika flimmerenergin F_e . Enligt [3] finns en, av impuls längd beroende, konventionell överenskommelse avseende flimmer-energi vilken visas i Tabell 5.

Tidskonstant, t _i [ms]	Flimmerenergi, F _e [A ² s]
5	5e-3
1	10e-3
0,1	20e-3

Tabell 5, Konventionell överenskommelse avseende flimmerenergi

Dessa gränser motsvaras ungefärligt av luflednings- och kabellängder enligt Tabell 6.

	Luftledning	Kabel	F _e [A ² s]	t _i [ms]
1	l _{ol} [km] 50	l _c [km] 0,83	10	0,9
2	75	1,2	5	4,0
3	25	0,42	20	0,45
4	37,5	0,62	10	2,0

Tabell 6, Ungefärliga längder kabel respektive luftledningsnät som kan läggas utan att risk för hjärtkammerflimmer uppstår enligt [3]

Längderna som accepteras med dessa riktlinjer hamnar någonstans mittemellan de som räknas fram om IECs riktlinjer för upp till 5 och 50 % risk för hjärtkammerflimmer används.

Tidskonstanten är proportionell mot ledningens kapacitans mellan fas och jord. Kabel medför därför samma risk för hjärtflimmer, på grund av urladdningsström, som luftledning av sextio gånger kabelns längd, oavsett vilka riktlinjer man väljer att följa.

Berörings- och stegspänning

Det är inte bara i de sällsynta fall där en människa utgör kopplingen mellan fas och jord det föreligger risk för personfara i samband med jordfel på mellanspänningsnätet. Risken för alvarliga personskador, i varje enskilt fall, är dock störst vid denna typ av olyckor eftersom strömmen genom människokroppen då består av hela jordfelsströmmen. Vid jordfel kan också personer som befinner sig i närheten av felställe och jordtag utsättas för en viss fara i form av ström genom kroppen. Strömmen är då bara av en del av den totala felströmmen. Också den strömtransient som kommer från urladdning av den felande fasens kapacitans till jord kan ge upphov till en viss ström genom personer i närheten av felställe och jordtag.

Spänningssättning av område runt jordfel

Mark, generellt, är inte en perfekt ledare, utan har en viss resistivitet, ρ . Denna resistivitet ger upphov till en resistans mellan två punkter i marken. Resistansen mellan två punkter på avstånd dr ifrån varandra är

$$dR = \frac{\rho}{A} dr$$

där ρ är resistiviteten hos ledaren som förbinder punkterna och A är ledarens tvärsnittsarea. Spänningsskillnaden över sträcka dr kan därför tecknas som

$$dU = \frac{\rho \cdot I}{A} dr$$

där I är strömmen som flyter mellan punkterna. Om man antar att resistiviteten i marken är homogen kommer felströmmen sprida sig i en halvsfär ut från felstället. Detta ger, runt felstället, upphov till en förhöjd spänningsnivå i förhållande till vad man kallar sann jord. Då oändligheten används som referens blir den maximala potentialhöjningen, det vill säga spänningsnivån i felstället

$$U = - \int_{r_0}^{\infty} \frac{\rho \cdot I_e}{2 \cdot \pi \cdot r^2} dr$$

Eftersom ledarens tvärsnittsarea inte oändligt liten i felstället kan inte $r_0 = 0$ användas. Istället säger man att det är samma en viss ekvipotential runt felstället. Det totala jordtagsmotståndet är

$$R_s = \frac{\rho}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{1}{r_0}$$

Spänningsskillnaden mellan två punkter på avstånd r_1 och r_2 från felstället är

$$\Delta u(t) = \frac{\rho}{2 \cdot \pi} \cdot i_e(t) \cdot \frac{r_2 - r_1}{r_1 \cdot r_2}$$

En impulsformad felström ger upphov till en impulsformad spänningshöjning. Spänningen i en punkt kring felstället kommer därför bero av både avståndet till felet och tiden som passerat sedan felet inträffade.

Hur stor ström som faktiskt går genom kroppen på en människa som befinner sig i området beror förutom potentialskillnaden i beröringspunkterna på personens kroppsresistans mellan beröringspunkterna och markens resistans mellan dessa punkter.

Spänningssättning av jordtag

För att minska risken för allvarliga personskador vid fel i nätstationer, får spänningssättning av stationernas jordade delar inte överstiga 100 V [5]. För att inte överskrida spänningssättningsgränsen jordas stationerna på ett sådant sätt att den totala jordtagsresistansen sällan överstiger 8 Ω. För samjordning gäller

$$R_{res} = 0,5 \cdot r_m + \sqrt{r_m \cdot R_g}$$

där r_m är resistansen som förbinder jordtagen och R_g är den individuella jordtagsresistansen [6]. Jordningen kan utföras på olika sätt, till exempel med nedgrävd lina eller spett. Om stationen är jordad med ett antal spett ner i marken kommer felströmmen att spridas ut från dessa jordtag i form av en cylinder och en halvsfär. Resistansen till sann jord, för varje spett kan skrivas som

$$R = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot L} \cdot \ln\left(\frac{a+L}{a}\right)$$

där L är spettets djup i marken och a dess radie. Flera spett kan användas för att sänka jordtagsresistansen [7]. I utförda beräkningar antas potentialhöjningen som den transienta urladdningsströmmen orsakar en sträcka r_0 från jordtaget vara

$$u(t) = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot L} \cdot \ln\left(\frac{r_0 \cdot (a+L)}{a \cdot (r_0+L)}\right) \cdot i_e(t)$$

Spänningen mellan två punkter på avstånd r_1 och r_2 från jordtaget beräknas som

$$u_{eq}(t) = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot L} \cdot \ln\left(\frac{r_2 \cdot (r_1+L)}{r_1 \cdot (r_2+L)}\right) \cdot I_e(t)$$

Ström genom kroppen

Felställe utan preparerat jordtag

En person som befinner sig i ett område i närheten av ett jordfel bildar tillsammans med resistansen i jorden mellan beröringspunkterna en elektrisk krets. Strömmen genom denna krets, tillika strömmen genom människo-kroppen, ges av

$$I_b = \frac{U_{eq}}{R_{eq} + R_{step}}$$

Här är spänningen mellan kroppens beröringspunkter, då ingen beröring sker

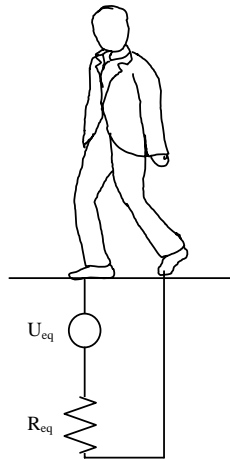
$$U_{eq}$$

Markens ekvivalenta resistans då resistiviteten antas vara homogen och beröringspunkterna modelleras som två cirkulära plattor [8]

$$R_{eq} = 6 \cdot \rho$$

Resistansen i kroppen, då fötterna är beröringspunkterna till mark [3]

$$R_{step} = 1000 \Omega$$



Figur 5, Markens ekvivalenta resistans för stegspänning då beröringspunkterna modelleras som cirkulära plattor $R_{eq} = 6\rho$ (3ρ per fot i serie). Kroppens resistans antas vara 1000Ω

Urladdningstransientens bidrag till felströmmen är

$$i_e(t) = I_{0e} \cdot \exp(-t/t_0)$$

Här är strömmens initiala värde

$$I_{0e} = U_{lg \max} \cdot R_e$$

Tidskonstanten

$$t_0 = R_e \cdot C$$

Strömimpulsens varaktighet

$$t_i = 3 \cdot t_0 = 3 \cdot R_e \cdot C$$

Fasens kapacitans till jord

$$C = C_{c,ol} \cdot l$$

För PEX-kabel

$$C_c = 0.36 \mu F / km$$

För luftledning

$$C_{ol} = 0.006 \mu F / km$$

Den transienta felströmmen ger precis som den fundamentalfrekventa felströmmen upphov till potentialökning i marken. Förutom att avta med avståndet från felstället följer denna potentialökning strömmens tidsberoende. Vid en viss tidpunkt är spänningen mellan två punkter

$$u_{eq}(t) = \frac{\rho}{2 \cdot \pi} \cdot i_e \cdot \frac{r_2 - r_1}{r_1 \cdot r_2}$$

Om en någon samtidigt är i beröring med dessa två punkter går en impulsformad ström

$$i_b(t) = \frac{u_{eq}}{R_{eq} + R_{step}} = \frac{\rho}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{i_e(t)}{R_{step} + 6 \cdot \rho} \cdot \frac{r_2 - r_1}{r_1 \cdot r_2}$$

genom denna persons kropp. Om personen står eller går i området kommer strömmen gå från fot till fot. Strömimpulsens varaktighet är av storleksordningen ms. För att

känna av transienten måste personen därför befinna sig i felställets närhet just då felet sker. Den del av markens potentialhöjning som beror på fundamentalfrekvent felström kommer finns kvar till dess den felströmmen upphör. Under den tiden kvarstår risken för skadliga strömmar genom kroppen hos den som kommer in på spänningssatt område. Till skillnad från transienta felströmmar kompenseras dock farliga fundamental-frekventa felströmmar till stor del bort.

Fel i jordtag

Förutsatt homogen resistivitet är markens ekvivalenta resistans vid stegspänning är också vid jordtag

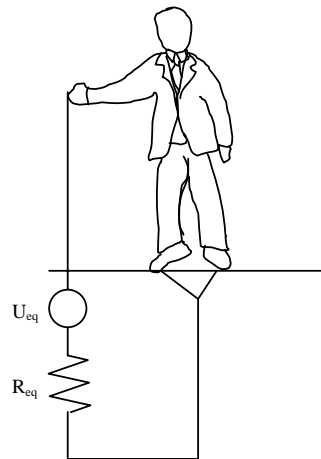
$$R_{eq} = 6 \cdot \rho$$

Vid beröringsspänning är markens ekvivalenta resistans [8]

$$R_{eq} = 1,5 \cdot \rho$$

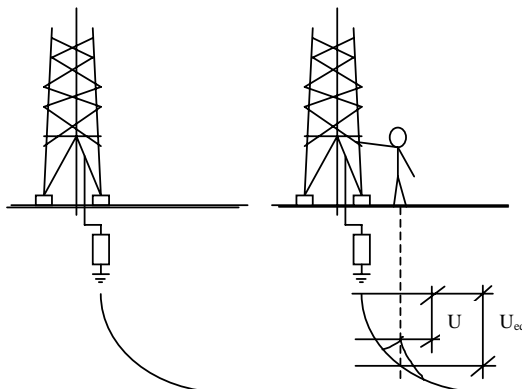
Kroppsimpedans för arm och bål i serie med två parallella ben [3]

$$R_{touch} = 750 \Omega$$

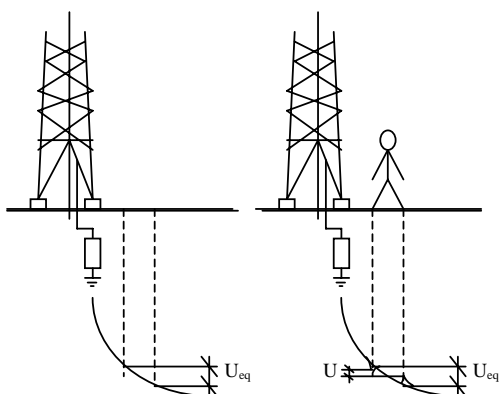


Figur 6, Markens ekvivalenta resistans för beröringsspänning då fötternas beröringspunkter till jord modelleras som cirkulära plattor $R = 1.5\rho$ (3ρ per fot parallellt). Kroppens resistans antas, på grund av strömmens väg, vara 750Ω

Potentialhöjningen kring en jordad station vid jordfel, samt vid berörings- och stegspänning visas schematiskt i Figur 7 och Figur 8.



Figur 7, Beröringsspänning



Figur 8, Stegspänning

För en person i närheten av en station jordad med nedgrävda spett kan strömmen genom kroppen approximeras som

$$i_b(t) = \frac{u_{eq}}{R_{eq} + R_{step}} = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot L} \cdot \ln\left(\frac{r_1 \cdot (r_0 + L)}{r_0 \cdot (r_1 + L)}\right) \cdot \frac{I_e(t)}{6 \cdot \rho + R_{step}}$$

Strömmen genom den som rör vid stationens jordade delar genom någon som rör vid stationens jordade delar approximeras som

$$i_b(t) = \frac{u_{eq}}{R_{eq} + R_{touch}} = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot L} \cdot \ln\left(\frac{r_0 \cdot (a + L)}{a \cdot (r_0 + L)}\right) \cdot \frac{I_e(t)}{1,5 \cdot \rho + R_{touch}}$$

Personfara

Risken för skada hos den person som befinner sig nära ett jordtag eller felställe vid jordfel avgörs av storlek och varaktighet av den impulsström som går genom personens kropp. Stora strömmar kan leda till hjärtkammarr-flimmer medan små kanske orsakar tillfällig smärta och obehag. Ett sätt att ange vilken risk olika strömstorlekar och impulstider innebär, är att använda sig av måttet specifik flimmerenergi, F_e .

$$F_e = I_{brms}^2 \cdot t_i \text{ A}^2 \text{ s}$$

Här är effektivvärdet av strömmen genom kroppen

$$I_{brms} = \frac{I_{0b}}{\sqrt{6}}$$

Felströmmens och därför kroppsströmsimpulsens varaktighet

$$t_i = 3 \cdot t_0 = 3 \cdot R_e \cdot C$$

Kroppsströmsimpulsens initialvärde

$$I_{0b} = \frac{U_{0eq}}{R_{eq} + R_{step}}$$

Det initiala värdet av den transienta strömmens bidrag till spänningsskillnaden mellan två punkter

$$U_{0eq}$$

För att känna smärta krävs att vi utsätts för en specifik energi på mellan 50 och 100 $\mu\text{A}^2\text{s}$ [3]. Om impulsströmmens varaktighet är av storleksordning 3 ms krävs specifik energi 0,05 $\mu\text{A}^2\text{s}$ för att urladdningen alls ska uppfattas och 5 $\mu\text{A}^2\text{s}$ kan uppfattas som obehaglig. För hjärtkammerflimmer gäller konventionellt att värden upp till 5 $\mu\text{A}^2\text{s}$ för 5 ms, 10 $\mu\text{A}^2\text{s}$ för 1 ms och 20 $\mu\text{A}^2\text{s}$ för 0,1 ms inte innebär risk för hjärtkammerflimmer [3].

Jämförelse av luftledningsnät och kabelnät

Felställe utan preparerat jordtag

Med hjälp av Matlab beräknas, för nätspänning 10 och 20 kV, transient ström genom en person i närheten av jordfel vid feltilfallet. Markens resistivitet antas vara 750 Ωm och $r_0 = 0,1$ m. Vid felstället är därför resistansen till sann jord

$$R_s = \frac{750}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{1}{0,1} = 1200 \Omega.$$

Den transienta jordfelsströmmen beror, förutom på nätets spänningsnivå, på felets impedans och kapacitansen till jord hos den felbehäftade fasen. Beräkningarna sker för ett fall då felimpedansen enbart består av felställets jordtagsresistans R_g . För nät med PEX-kabel är kapacitansen 0,36 μF per km och fas och för luftledningsnät är kapacitansen 0,006 μF per km och fas. Med dessa förutsättningar är det avståndet från felstället som avgör hur stor ström som initialt kommer att gå genom kroppen. Markens potentialhöjning avtar snabbt i felets omedelbara närhet. Längden på kabelnätet bestämmer den sammanlagda kapacitansen och därmed impulsströmmens varaktighet. Med gränser för specifik energi enligt ovan, som utgångspunkt kan man försöka avgöra om och hur personer i felets närhet kommer att känna av ett jordfel. För personer i omedelbar närhet till felet undersöks risk för allvarligare skador i form av hjärtkammerflimmer. För att underlätta beräkningarna antas ett steg vara 1 m, långt. Tabell 7 visar specifik energi per kilometer ledning vid avstånd $r_1 = 0$ m, 0,5 m, 1 m, 2 m och 3 m från ekvipotentialgränsen. Tabell 8 visar kroppsströmmens effektivvärde.

Nättyp	U	F_e /km kabel [$\mu\text{A}^2\text{s}$]				t_i [ms]
		$r_1 = 0$ m	$r_1 = 0,5$ m	$r_1 = 1$ m	$r_1 = 2$ m	
Kabel	10 kV	587	7,7	1,3	0,17	1,3
	20 kV	2300	31	5,3	0,67	1,3
Luftledning	10 kV	9,8	0,13	0,022	0,0028	0,022
	20 kV	39	0,51	0,089	0,011	0,022

Tabell 7, Specifik flimmerenergi per km kabledledning för 10 och 20 kV nät, samt varaktighet per km ledning

Nätspänning	I_{brms} [A]			
	$r_1 = 0$ m	$r_1 = 0,5$ m	$r_1 = 1$ m	$r_1 = 2$ m
10 kV	0,67	0,077	0,032	0,011
20 kV	1,3	0,18	0,064	0,022

Tabell 8, Effektivvärdet av kroppsström för 10 och 20 kV nät

För en person i felställets omedelbara närhet är risken för allvarlig skada störst. För att nå tidigare nämnda gränsvärden för hjärtkammerflimmer, krävs att en person står precis i felstället och att kabellängden är minst 10 km för 10 kV nät och 2 km för 20 kV nät. Om personen befinner sig en halv meter från felstället krävs så stora kabelnät att urladdningsströmmens varaktighet överskrider 25 ms. Effekten av strömimpulser med så lång varaktighet kan jämföras med effekt av växelström. Om man antar ett

pessimistiskt synsätt och likställer impulsens maxvärde med AC strömmens maxvärde, trots ett betydligt mindre effektivvärde, krävs en 300 ms lång impuls för att strömmen genom kroppen hos en person 0,5 m från felet ska kunna orsaka hjärtkammerflimmer. Det betyder över 200 km kabel. Ännu större nät krävs om personen befinner sig mer än 0,5 m från felet. Vid jordfel i luftledningsnät mindre än 400 km innebär urladdningstransienten inte någon risk för hjärtkammerflimmer. Undantaget är fel i 20 kV nät där urladdningstransienter från nät ner till 150 km kan utgöra risk för den som befinner sig just vid felstället.

	Smärtgräns							
	Kabellängd[km]				Luftledningslängd			
	r ₁ = 0 m	r ₁ = 0,5 m	r ₁ = 1 m	r ₁ = 2 m	r ₁ = 0	r ₁ = 0,5	r ₁ = 1	r ₁ = 2
10 kV	*	7 km	40 km	200 km	10	**	**	**
20 kV	*	2 km	10 km	75 km	3	200	**	**

Tabell 9, Ungefärliga kabel- och luftledningslängder för vilka risk för smärta finns * < 1 km, ** > 400 km.

Smärtgränsen nås, vilket Tabell 9 visar, med betydligt mindre ledningsnät. Urladdningsström från kabelnät över 20 km bör, på grund av den långa impulstiden, snarare jämföras med riktvärden för växelström än med riktvärden för impulsström. Impulsströmmens maxvärde jämförs med växel-strömmens maxvärde, trots olika effektivvärde. Enligt de riktvärden som gäller för växelström [3] bör urladdningsströmmen knappast innebära risk för hjärtkammerflimmer för en person som befinner sig i närheten av felstället. Däremot finns betydande risk för att en person i området upplever smärta och riskerar mindre allvarliga skador. Luftledningens låga kapacitans till jord gör att urladdningstransienten för luftledningar har mycket kort varaktighet. Det är därför svårt att uttala sig vid vilka längder transienten blir kännbar för en person nära felet.

Vid jordtag

Stationen antas vara jordad med fyra spett ner i marken. Vart och ett 4 m långt och med en radie på 1 cm. Markresistiviteten $\rho = 750 \Omega\text{m}$. Som tidigare nämnts gäller för samjordade system

$$R_{res} = 0,5 \cdot r_m + \sqrt{r_m \cdot R_g}$$

Här är $r_m = 1 \Omega$ resistansen som förbinder jordtagen i följande beräkningar och de R_g individuella jordtagsresistanserna. För den ovan nämnda jordtagstypen är $R_g = 61 \Omega$. Det bör motsvara en resulterande jordtags-resistans på 8,3 Ω . Den maximalt tillåtna spänningssättningen av stationens jordade delar är 100 V. Ofta används i distributionsnätens matande station en 10 A koppling till jord. Vid jordfel är felströmmen genom nätstationerna därför upp till 13 eller 14 A. För att inte överskrida 100 V sätts det resulterande jordtagmotståndet därför till ungefär 8 Ω . Specifik energi, effektivvärde av ström genom kropp och strömpulsens varaktighet vid steg i närheten av station och vid beröring av station för 10 och 20 kV nät då felimpedansen enbart antas bestå av jordtagsresistansen, för kabelnät och luftledning visas i Tabell 10 och Tabell 11.

Nättyp	U	Steg		t _i [μs]		
		0 m	0,5 m	0 m	0,5 m	
Kabel	10 kV	0,54	0,11	2,7	0,11	9,0
	20 kV	1,1	0,22	10,6	0,43	9,0
Luftledning	10 kV	0,54	0,11	0,044	0,0018	0,15

20 kV 1,1 0,22 0,18 0,0072 0,15

Tabell 10, Specifik flimmerenergi per km ledning, effektivvärde av ström genom kropp vid steg i närheten av station för 10 och 20 kV nät, samt strömimpulsens varaktighet per km ledning

Nättyp	U	Beröring				t _i [μs]
		0,5 m	1 m	0,5 m	1 m	
Kabel	10 kV	1,4	1,6	17	23	9,0
	20 kV	2,8	3,2	69	91	9,0
Luftledning	10 kV	1,4	1,6	0,29	0,38	0,15
	20 kV	2,8	3,2	1,1	1,5	0,15

Tabell 11, Specifik flimmerenergi per km ledning, effektivvärde av ström genom kropp vid beröring av station för 10 och 20 kV nät, samt strömimpulsens varaktighet per km ledning

För att en person i närheten av eller i kontakt med stationen ska riskera hjärtkammerflimmer på grund av urladdningsström, krävs mer än 500 km luftledningsnät. För kabelledningar kan betydligt mindre nät innebära en risk för den som befinner sig vid en station där jordfel inträffar. Tabell 12 anger för vilken ungefärlig kabellängder risk för hjärtkammerflimmer kan föreligga.

U	Kabellängd Steg (r ₁ avser närmaste fot)		Beröring (r ₁ avser båda fötter)	
	r ₁ = 0 m	r ₁ = 0,5 m	r ₁ = 0,5 m	r ₁ = 1 m
10 kV	*	*	Ca 350 km	Ca 250 km
20 kV	*	*	Ca 150 km	Ca 100 km

Tabell 12, Ungefärliga kabellängder för vilka risk för hjärtkammerflimmer föreligger, * > 400 km

Vid de kabel och luftledningslängder som listas i Tabell 13 finns risk för att urladdningstransienten ska uppfattas som smärtsam. I de fall då impulsens varaktighet är kortare än 0,1 ms är det svårt att med bestämdhet säga någonting om impulsströmmens verkningar.

Nättyp	U	Ledningslängd Steg		Beröring	
		r ₁ = 0 m	r ₁ = 0,5 m	r ₁ = 0,5 m	r ₁ = 1 m
Kabel	10 kV	40 km	*	6 km	4 km
	20 kV	10 km	250 km	1,5 km	1,1 km
Luftledning	10 kV	*	*	*	240 km
	20 kV	*	*	90 km	65 km

Tabell 13, Ungefärliga ledningslängder för vilka risk för smärtsam urladdningsström föreligger, * > 400 km

Utgångspunkt i fundamentalfrekvent regelverk

För nätstationens jordade delar gäller att spänningssättningen inte får överstiga 100 V. Då tidigare angivna antagande görs vad gäller markpotentialens avtagande och den ekvivalenta resistansen vid steg och beröringsspänning fås kroppsström enligt Tabell 14.

Närmsta fotens avstånd från stationen	r ₁ = 0 m	r ₁ = 0,5 m	r ₁ = 1 m
Ström genom kroppen vid stegspänning	13 mA	2,7 mA	1,5 mA
Ström genom kroppen vid beröringsspänning	-	34 mA	39 mA

Tabell 14, Stationär ström genom kroppen vid steg i område nära station och vid kontakt med station då spänningen i stationens jordade delar är 100 V

För beröringsspänning är strömmen genom kroppen så stor att man passerar släppgränsen. För en frisk person föreligger dock ingen risk för hjärtkammerflimmer. Den transienta felströmmens spänningssättningen av stationen, i form av spänningens

initialvärde och varaktighet, då resistansen är 8Ω visas i Tabell 15. Som tidigare sker beräkningarna med nätspänning 10 och 20 kV.

Nätspänning	U_{station}	t_i	$I_{\text{obstep}} r_1 = 0 \text{ m}$	$I_{\text{obtouch}} r_1 = 1 \text{ m}$
10 kV	10 kV	9,0 $\mu\text{s}/\text{km}$	1,3 A	3,9 A
20 kV	20 kV	9,0 $\mu\text{s}/\text{km}$	2,7 A	7,8 A

Tabell 15, Den transienta strömmens spänningssättning av stationens jordade delar och den initiala strömmen genom kroppen då jordtagsresistansen är $8,3 \Omega$

Eftersom felimpedansen enbart beräknas som stationens jordtagsresistans är spänningssättningen av stationens jordade delar initialt lika stor som nätspänningen. Också kroppsströmmens initialvärde för en person som står vid jordtaget och för en person som står en meter från jordtaget och rör stationens jordade delar visas. För att få impulsströmmens effektivvärde divideras strömmens initialvärde med en faktor $\sqrt{6}$. Vid ett jordfel i kommer den transienta jordfelsströmmen att adderas till den fundamentalfrekventa. Om felet sker på ett sådant sätt att spänningssättningen av stationens jordade delar är maximala 100 V, bör berörings-spänningen utan transient bidrag, vara i närheten av vad som inte längre kan anses vara ofarligt. Till detta adderas en impulsformad spänning som i sig ger upphov till en obehaglig och i vissa fall skadlig ström genom kroppen.

Markpotentialen runt felstället avgör hur stor del av felströmmen som kommer att gå genom den person som befinner sig i närheten av felet. I dessa exempel har räknats med exponentiellt avtagande spänningssättning. En meter från jordtaget är markens spänningssättning ungefär 30 % av den i stationens nollpunkt. Om man istället tänker sig att stationen är jordad på ett sådant sätt att markens potential avtar jämnare, är berörings- och stegspänning, och därmed risken för alvarliga personskador, i stationens omedelbara närhet mindre. Stegspänningen vid längre avstånd från felet bör däremot öka och därmed göra felet kännbart inom ett större område.

Nätstationerna är normalt jordade på ett sådant sätt att steg och beröringsspänning med avseende på fundamentalfrekvent felström inte når kännbara värden. Runt stationen skapas en ekvipotentialyta med minimal spänningsskillnad. För att i en mark med resistivitet $1000 \Omega\text{m}$ nå ett individuellt jordtagsmotstånd så lågt som 8Ω , krävs en ekvipotentialyta med mellan 17 och 20 meters radie beroende på om man approximerar jordtaget som djupjordtag (5 m) eller halvsfär. Eftersom steg- och beröringsspänning inom området är ytterst liten då jordningen fungerar korrekt, ska ingen urladdningstransient kännbart påverka de personer som befinner sig vid stationen då jordfel inträffar i nätet. Högsta stegspänning uppnås då någon står med en fot på ekvipotentialytans rand och den andra en meter ut. För att strömtransienten överhuvudtaget ska uppfattas av en person placerad på detta sätt, krävs med samma förutsättningar som i tidigare beräkningar många hundra kilometer stora 20 kV kabelnät. Detta gäller även då det enskilda jordtagsmotståndet är den enda felimpedansen och hela felströmmen går igenom detta jordtag.

En fråga att ställa sig är hur nätets övriga jordtag påverkar jordfelsströmmen. Hur kommer felströmmen gå, och därför markens potentialhöjning se ut, om det finns andra jordtagpunkter, till exempel koppartrådar nergrävda i närheten.

Slutsats

I IEC tekniska rapport 479-2 kopplas en viss risk för hjärtkammerflimmer till en impulsströms effektivvärde och varaktighet. Vid jordfel beror impuls-strömmens effektivvärde av den felbehäftade fasens spänning till jord och resistansen i felet. Impulsströmmens varaktighet är proportionell mot resistansen i felet och den

felbehäftade fasens kapacitans till jord. För konstant felresistans och fasspänning är risken för hjärtkammerflimmer kopplad till ledningens kapacitans. Kapacitansen mellan fas och jord för PEX-kabelledning är 60 gånger större per längdenhet än motsvarande kapacitans för luftledning. En kabelledning medför därför samma risk för hjärtkammerflimmer, på grund av urladdningsström, som en luftledning av sextio gånger kabelns längd. Urladdningen i kroppen kan också mätas i termer av specifik flimmerenergi. Den specifika energin är också den proportionell mot ledningens kapacitans till jord. Vid urladdningsström genom kroppen till följd av steg eller beröringsspanning är risken för hjärtflimmer liten om inte det nätet där felet inträffar är mycket stort och ledningarna har hög kapacitans till jord. Jordfel i betydligt mindre kabelnät kan dock leda till att urladdningstransienten upplevs som smärtsam för den som befinner sig i närheten av jordfel eller feldrabbad station. Vilka strömtransienter och därtill kopplade kabellängder som kan anses ofarliga beror på hur området kring nätstationerna spänningssätts vid jordfel. Spänningssättningen avgörs av markens resistivitet och utformning av nätstationernas jordtag.

Referenser

1. Carman W.D.: "Probabilistic comparison and application of international electrical safety criteria", International Conference on Power System Technology, 2000. Proceedings. PowerCon 2000, vol. 3, pp. 1347-1352, 2000
2. IEC technical report 479-2, "Effects of current passing through the human body", 1987
3. Biegelmeier, G.: „Wirkungen des elektrischen Stroms auf Menschen und Nutztiere. Lehrbuch der Elektropathologie“, VDE-Verlag, Berlin, 1986.
4. Persson J.: "Jordfelsproblematik i icke direktjordade system", Examensarbete LTH, 2005
5. "Elsäkerhetsverket Starkströmsföreskrifterna", Föreskrifter och allmänna råd ELSÄK-FS 1999:5, ISSN 1103-405X, Elanders Gotlab, Stockholm 1999
6. Pesonen, A.J.; Maaskola, J. & Elovaara, J.: "Special features of earth-fault currents", Report 410-10, Paper presented at the CIGRE Symposium "High Currents in Power Systems" Brussels, 3-6 June 1985.
7. "IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems", IEEE Standard 142-1982, New York, 1982.
8. "IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding", IEEE Std. 80, IEEE, New York, 1986.

Bibliografi

Bernstein T.: "Electrical shock hazards and safety standards", IEEE Transactions on Education, vol. 34, no. 3, pp. 216-222, 1991

Bridges J.E.: "Electrical Safety Concepts And Implementation", Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society 1991, vol.13, pp. 1014-1016, 1991

Bridges J.E.: "New developments in electrical shock safety", IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 1994. Symposium Record. Compatibility in the Loop, pp. 22-25, 1994

Capelli-Schellpfeffer M., Toner M., Lee R.C. & Astumian R.D: "Advances in the evaluation and treatment of electrical and thermal injury emergencies", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 31, no. 5, pp. 1147-1152, 1995

Carman W.D.: "Development of risk profiles associated with electrical power substation earthing systems", International Conference on Power System Technology, 2000. Proceedings. PowerCon 2000, vol. 3, pp.1341-1346, 2000

Carman W.D.: "Probabilistic comparison and application of international electrical safety criteria", International Conference on Power System Technology, 2000. Proceedings. PowerCon 2000, vol. 3, pp. 1347-1352, 2000

Chien-Hsing Lee, Sakis Meliopoulos A.P. & James R.I.: "A graphical method for safety assessment of grounding systems", IEEE Power Engineering Society Winter Meeting 2000, vol. 3, pp. 2016-2021, 2000

Chilbert M.A., Swiontek T., Myklebust J.B., Prieto T.E., Sances A. Jr., Leffingwell C. & Henderson J.D. Jr.: "Fibrillation induced at powerline current levels", IEEE Transactions on Biomedical Engineering, vol. 36, no. 8, pp. 864-869, 1989

Chow Y.L., Salama M.M.A. & Djogo G.: "Thevenin source resistances of the touch, transferred and step voltages of a grounding system", IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, vol. 146, no. 2, pp. 107-114, 1999

Dawalibi, F.P., Southey R.D. & Baishiki R.S.: "Validity of conventional approaches for calculating body currents resulting from electric shocks", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 5, no. 2, pp. 613-626, 1990

"IEEE guide for safety in AC substation grounding", IEEE Std 80-2000, pp. i-192, 2000

Lee, C.H. & Lin, S.D.: "Safety assessment of AC earthing systems in a DC traction-supply substation", IEE Proceedings - Electric Power Applications, vol. 152, no. 4, pp. 885-893, 2005

Lee C.H. & Sakis Meliopoulos A.P.: "Comparison of touch and step voltages between IEEE Std 80 and IEC 479-1", IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, vol.146, no. 6, pp. 593-601, 1999

Malkin R.A.& Hoffmeister B.K.: "AC leakage currents cause complete hemodynamic collapse below the ventricular fibrillation threshold", Computers in Cardiology 1999, pp. 351-353,1999

Nahman J.M.: "Assessment of the risk of fatal electric shocks inside a substation and in nearby exposed areas", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 5, no. 4, pp. 1794-1801, 1990

Nahman J. & Zlatanovski M.: "Risk of fatal electric shocks at distribution network MV/LV transformer stations", IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, vol. 145, no. 4, pp. 463-467, 1998

Parise G.: "A summary of the IEC protection against electric shock", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 34, no. 5, pp. 911-922, 1998