



Elektrisk influens på fordon under kraftledning

ADIB EL-SHERIF

Examensarbete åt Svenska Kraftnät (*Lars Wallin*)

Handledare:

Jan-Olov Sjödin, Vattenfall Power Consultant AB

Magnus Garnefält, Vattenfall Power Consultant AB

Hans Edin, Skolan för elektro- och systemteknik

Avdelningen för elektroteknisk teori och konstruktion, KTH

Examinator:

Hans Edin, Skolan för elektro- och systemteknik

Avdelningen för elektroteknisk teori och konstruktion, KTH

XR-EE-ETK 2006:012

Sammanfattning

Detta arbete behandlar frågor kring hur ett under en kraftledning uppställt fordon kan laddas upp av det elektriska fältet som bildas mellan ledningar och mark. Om det kan tänkas uppstå obehagliga eller farliga beröringsspänningar/kontaktströmmar mellan fordon och människa.

Eftersom det är fordonens däck som är länken mellan fordon och mark har det genomförts experiment och mätningar på just däcken. Här har de undersökta parametrarna varit däckens isolation/ledningsförmåga vilka visar sig ha en stor variation från däck till däck.

En 2- och 3-dimensionell modell av en buss uppställd parallellt med och under en 220 kV's trefas kraftledning har gjorts i programmet *Comsol MultiphysicsTM*. Med utförda simuleringar på denna modell har influensspänningar och kortslutningsströmmar undersökts på ett 18 meter och ett 11.2 meter långt fordon. Dessa parametrar har även undersökts m.h.a. 2-dimensionella analytiska linjeladdnings-beräkningar. Den maximala teoretiska kortslutningsströmmen (kontaktströmmen) beräknades till 0.77 mA på det 18 meter långa fordonet, med en influensspänning på ca: 1355 V. Detta ger en gnistenergi motsvarande 3.3 mJ, vilket är tillräckligt för att kunna antända en bränsle-luftblandning. Denna spänning ligger trots detta under värdet för minimal antändningsspänning enligt en empirisk formel framtagen av EPRI's *Transmission Line Reference Book*.

Dessa simulerade och beräknade värden av ett fordons influensspänning och kortslutningsström har sedan använts i ett ekvivalent kretsschema. En jämförelse med teoretiska värden och verkliga mätvärden på en buss under en 220 kV's ledning i Huddinge visar att teori och verklighet stämmer överens vad gäller influerad spänning. Mätningar har också gjorts på en miniatyrmodell av en buss under en enkelledare och dessa värden jämfördes med simulerade värden på en motsvarande modell. Skillnaden i influensspänning var marginell, men kontaktströmmen var något större.

Abstract

This thesis deals with questions as to how a vehicle under a transmissionline can become charged by the electric field between the powerline and ground. If this can lead to uncomfortable or dangerous induced voltages and currents between a vehicle and a human body in contact with it.

Since the tires are the link between vehicle and ground the conducting characteristics of two bus tires have been investigated and measured. The results show a wide range of varieties between the two measured tires.

Simulations on a two- and threedimensional model of a vehicle under a 220 kV powerline have been made in the program *Comsol Multiphysics*TM. Induced voltage and currents on an 18 meter and an 11.2 meter long vehicle parallel to the line have been simulated and calculated. The maximal theoretically induced current (contactcurrent) was calculated to be 0.77 mA on the 18 meter long vehicle with an induced voltage of about 1355 Volts. These values give a sparkenergy of 3.3 mJ, which is enough to ignite a fuel-airmixture. However the calculated voltage still does not exceed the minimum ignitionvoltage given by an empirical formula developed in EPRI's *Transmission Line Reference Book*.

These simulated and calculated values of induced voltage and currents have been used in an equivalent circuit and compared with measured values on a large bus under a 220 kV powerline in Huddinge. The results show that theory and measurements coincide with each other concerning induced voltage. Measurements have also been made on a small model of a bus under a single line and these values were compared with a corresponding model showing that the difference between calculated and measured induced voltage is marginal. However the difference was found to be somewhat larger as to induced current.

Tack

Tack till min handledare på KTH, Hans Edin, för alla råd och den hjälp jag fått under arbetets gång. Samt till mina båda handledare på Vattenfall Power Consultant Jan-Olov Sjödin och Magnus Garnefält. Ni har varit till stor hjälp. Tack till Per Pettersson för hjälp med materialinsamling.

Jag vill också tacka Lars Wallin på Svenska Kraftnät för att han gjort det hela möjligt. Dessutom vill jag tacka alla på swebus och SL som ställt upp med material vid mättillfällena.

Tack också till Göran Olsson på STRI och Anette Larsson på Vattenfall utveckling för hjälp med efterforskning i området.

Innehåll

Sammanfattning	iv
Förord	vii
Innehåll	viii
Figurer	x
Tabeller	xii
1 Introduktion	1
1.1 Bakgrund	1
1.1.1 Tidigare gjorda arbeten	2
1.2 Mål	3
1.3 Rapportens uppbyggnad	4
2 Teori	5
2.1 Elektriska fält allmänt	5
2.2 Elektriska fält skapade av kraftledningar	7
2.3 Analytiska beräkningar av elektriska fält under kraftledningar	7
2.3.1 Ekvivalent radie för multipelledare	8
2.3.2 Logaritmisk potential	9
2.3.3 Potentialkoefficienter	10
2.4 Elektrisk uppladdning av fordon	12
2.4.1 En analytisk beräkningsmetod för kortslutningsström och tomgångsspänning	13
2.4.2 Numerisk beräkning av kortslutningsström	14
2.4.3 Kapacitans till jord	15
2.4.4 Kortslutningsström och gnistbildning	16
2.4.5 Antändning	17
2.5 Comsol Multiphysics	17

3	Beräkningar och Simuleringar	19
3.1	Typ av kraftledning	19
3.1.1	Simuleringar i Comsol	20
3.1.2	Enkel-ledare	21
3.1.3	Trefas-ledare med två topplinor - en jämförelse	24
3.2	Trefas-ledare med två topplinor - Huddinge	26
3.2.1	Simuleringar och beräkningar på uppställt fordon	27
3.2.2	Analys av Beräknings- och Simuleringsresultat	32
3.2.3	Varierande area mellan buss och jord som funktion av konduktiviteten	34
4	Mätningar	35
4.1	Mätning av impedans på däck	35
4.2	Uppbyggnad och mätning av modell	38
4.3	Bussmätningar	40
4.4	Analys av mätresultat	41
5	Slutsatser och framtida arbete	45
	Litteraturförteckning	47
	Appendix A - Terminologi och symbollista	53
	Appendix B - Mätdata bussdäck	58

Figurer

2.1	Elektriska fältet mellan två metallplattor	5
2.2	Frekvens och Våglängd (källa Svenska Elverksföreningen).	6
2.3	Elektrisk fältstyrka längs en tvärgående linje under en kraftledning (källa Svenska Elverksföreningen)	7
2.4	Ekvivalenta radien för multipelledare	9
2.5	Geometri för beräkning av spegelladdningar	10
2.6	Kretsschema:th, Théveninekvivalent tvåpol :tv, Nortonekvivalent tvåpol	12
2.7	Effekter av växelström i människokroppen	16
3.1	Stagad portalstolpe	19
3.2	Simulerad enkelledare i Comsol	21
3.3	Analytiskt beräknade och numeriskt simulerade resultat för enkel- ledare längs en linje på 1.5 meters höjd	22
3.4	Skillnad i potential V och elektrisk fältstyrka $\frac{V}{m}$ mellan analytiskt beräknade och numeriskt simulerade resultat längs en linje på 1.5 meters höjd under en enkel-ledning. Nedre figur: samma skillnad i %	23
3.5	Simulerad trefas-ledare i Comsol	24
3.6	Analytiskt beräknad potential och E-fält, topplinorna är inte ut- satta i figuren, men har koordinaterna (-5,15) och (5,15)	25
3.7	Jämförelse av skillnaderna med ekvivalent radie och två ledare per fas	26
3.8	Den analytiskt uträknade potentialen och den numeriskt simulera- de på 1.5 m höjd, plottade i samma figur	27
3.9	Geometri i Comsol inför en 2D-simulering med uppställd buss . .	29
3.10	Geometri i Comsol inför en 3D-simulering med uppställd buss . .	29
3.11	Mått för bussarna B1 och B2	30
3.12	$U_{oc}(C_b)$ med $I_{sc}=0.77$ mA, och $U_{ign}(C_b)$	33
3.13	Konduktivitet som funktion av arean	34
4.1	$\tan\delta$	35

4.2	$\tan\delta$ mätning på ett bussdäck	36
4.3	tv: Däck 1, th: Däck 2	37
4.4	Mätning på modell	38
4.5	Spänning på modell som funktion av ledningsspänning	39
4.6	Fotografi av ledningsstolpe och spann vid mätplatsen i Huddinge	40
4.7	Mätning av influensspänning på uppställd buss	40
4.8	Ekvivalent krettschema av buss med däck	41
4.9	Ekvivalent krettschema av buss med däck och isolerande skivor .	42

Tabeller

1.1	Insatsvärden givna av ICNIRP och EU-direktiv	1
1.2	Experimentella data för 50% av barn, kvinnor och män	3
3.1	Maximala E-fältet och Potentialen på 1.5 m höjd rakt under en enkel ledare	22
3.2	Ledningsgeometri för jämförelsen av r_{i-ekv} och rätt antal ledare per fas	24
3.3	Ledningsdata	26
3.4	Buss 1 och 2	28
3.5	Simulerings- och beräkningsresultat	31
3.6	Jämför resultat med beräknade värden enligt EPRI	32
4.1	Mått samt mätvärden vid däckmätning	36
4.2	Mått på modell	38
4.3	Mätresultat av spänning på Buss 2	41
4.4	Erhållna spänningar enligt kretsschema av buss med däck. U_{oc} = tomgångsspänning och I_{sc} = kortslutningsström utan däck	42
4.5	Spänningen U_b som funktion av C_{isol}	43

Kapitel 1

Introduktion

1.1 Bakgrund

Det finns ibland önskemål om att utnyttja marken under kraftledningarna till uppställning av bilar, bussar eller andra fordon. Dessa fordon påverkas då av det elektriska fältet som genereras av ledningen så att en liten ström flyter mellan fordon och mark. Fordonets däck har en viss impedans till jord, men det är okänt om däckens ledningsförmåga är tillräcklig för att leda undan den influerade strömmen utan att spänningssättningen blir för hög. I ogynnsamma fall skulle spänningen kunna ge gnistor som kan antända en bränsle-luftblandning, eller vara skadlig vid beröring.

En annan aspekt är direktivet som europaparlamentet antog 1999 respektive 2004 där gränsvärden och insatsvärden för yrkesverksamma och allmänhetens exponering av bl.a. elektriska fält bestämdes, se tabell 1.1 (Europaparlamentet 2004). Om insatsvärden inte överskrider så överskrider inte gränsvärdena heller. Om insatsvärden överskrider måste en utredning göras för att säkerställa att gränsvärdena inte överskrider (Arbetsmiljöverket). Direktivet

Grupp / Exponering	Elektriska fält [kv/m]	Kontaktströmmar [mA]
Yrkesverksamma	10	1
Allmänheten	5	0.5

Tabell 1.1. Insatsvärden givna av ICNIRP och EU-direktiv

har tagits fram med hjälp av ICNIRP¹ som bl.a. arbetar med att undersöka faror och att ta fram gränsvärden för olika sorters ickejoniserande strålning.

¹ICNIRP - Internationella kommissionen för skydd mot ickejoniserande strålning

Resultaten av undersökningen i denna rapport kommer att relateras till insatsvärdena i tabellen ovan.

Genomgående i rapporten anges effektivvärden på spänningar och strömmar.

1.1.1 Tidigare gjorda arbeten

Ett mycket uppmärksammat ämne är vilka hälsorisker de magnetiska fält som finns i vår omgivning har på människa och djur. Det har varit en het debatt och diskuterats i media. Men huruvida det elektriska fältet påverkar oss och vår omgivning eller ej är inte ett i lika hög grad utforskat område. Men det finns dock litteratur som berört området med varierande tillvägagångssätt.

Huey-Ru Chaung [11] har i sin rapport *Steady-State and Shock Currents Induced by ELF Electric Fields in a Human Body and a Nearby Vehicle* undersökt just hur ELF-fältet från en kraftledning teoretiskt kan ge upphov till gnistbildning. Där beräkningar gjorts på en ekvivalent krets av ett fordon med en influerad spänning, och dess impedans till jord. Kretsen byggs upp av en spänningskälla som är fordonets tomgångsspänning U_{oc} (spänningen på fordonet då det är helt isolerat från jord) i serie med fordonets kapacitans till jord som ges av

$$C_b = \frac{|I_{sc}|}{\omega|U_{oc}|} \quad (1.1)$$

där I_{sc} är fordonets kortslutningsström.

I en annan rapport *Electrostatic Induction at a Motor Vehicle Located near an ExtraHigh-Voltage Line* skriven av *F.G. Kaidanov* [12] har man gjort simuleringar i ett program för beräkning av elektrostatisk influens från luftledningar (overhead line). *Kaidanov* gjorde dessa simuleringar för diverse olika ledningskonfigurationer. Enligt rapporten är fordonet modellerat som en elektriskt ledande rektangulär parallelepiped. Det framgår ur simuleringarna att den influerade spänningen på ett fordon som placeras parallellt med ledningen får en potential som är 5-20% högre än om det står rät vinkel från ledningen sett. I rapporten nämns också en undersökning som visar att strömmen mellan ett helt isolerat stort fordon (buss) och en jordad person i praktiken inte överskrider 76 % av fordonets kortslutningsström.

I *Transmission Line Reference Book* [2] har man noga analyserat influensfenomen från kraftledningar. Det har gjorts undersökningar angående energier i ginstbildningar och antändning av bränslen. Men också beräkningar av fältstyrka och potential under en 3-fas kraftledning av olika modeller. Det

har dessutom gjorts beräkningar på inducerade strömmar i föremål nära jord. Dessa är beräknade genom att multiplicera föremålets ekvivalenta area S , med den ostörda vertikala komponenten av E-fältet på marknivå. Formeln för S har tagits fram empiriskt för diverse olika geometriska konfigurationer. Kortslutningsströmmen ges då av

$$I_{sc} = j\omega\varepsilon_0 E_{\perp} \cdot S \quad (1.2)$$

ILO-(International Labour Organization) [14], har gjort en undersökning av män, kvinnor och barns känslighet för 50/60-Hz kontaktströmmar. Ett stadigt tag i ett föremål (Grasp) förväntas ge en mindre känslighet än lätt vidröring (Touch). Enligt denna undersökning och med ett antagande att kvinnors och barns gräns för uppfattning är 2/3 respektive 1/2 av den för män, så är gränsen för perception vid Grasp och Touch enligt tabell 1.2.

[mA]	Barn	Kvinnor	Män
Perception vid (Touch)	0.18	0.24	0.36
Perception vid (Grasp)	0.55	0.7	1.1

Tabell 1.2. Experimentella data för 50% av barn, kvinnor och män

1.2 Mål

Målet för denna undersökning är att analysera potentialen under en kraftledning, samt hur ett uppställt fordon under en 220kV kraftledning kan bli uppladdat. Att genom verkliga mätningar på en buss parkerad under en kraftledning, samt numeriska simuleringar och analytiska beräkningar av en motsvarande modell, kunna klargöra vilka parametrar som påverkar bussens influerade ström och spänning. Om det kan tänkas uppstå alltför höga beröringsspänningar eller om energin i en gnistbildning skulle kunna antända en bränsle-luftblandning.

Det är även av intresse att göra en mer ingående undersökning av ledningsförmågan/isolationen i/på fordonets däck.

1.3 Rapportens uppbyggnad

Kap 1 börjar med en bakgrundsbeskrivning och en redogörelse av vad som tidigare gjorts inom området samt en målbeskrivning. Innan kapitlet hittas en tabell med definitioner av variabler och förkortningar som används genomgående i rapporten.

Kap 2 inleds med en beskrivning av det elektriska fältet samt den teoretiska bakgrunden till de i arbetet utförda matematiska beräkningsmetoderna och simuleringarna. I detta kapitel beskrivs också hur strömmar och gnistor uppfattas av människokroppen.

Kap 3 beskriver uppbyggnaden av den numeriska modellen samt genomförda simuleringar. Resultat av numeriska simuleringar och analytiska beräkningar jämförs för några olika ledningskonfigurationer. Men också för influensspänningar och kortslutningsströmmar på 2 st olika busskonfigurationer. Kapitlet avslutas med en resultatanalys.

Kap 4 presenterar de i arbetet utförda mätningarna. Impedansmätningar på två olika sorters bussdäck och mätning av influensspänning på en buss uppställd under en kraftledning samt mätningar på en modell. Och till sist en analys av resultaten.

Kap 5 Slutsatser och framtida arbete, där resultaten bl.a. relateras till EU-direktivet.

Kapitel 2

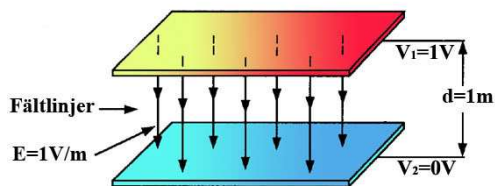
Teori

2.1 Elektriska fält allmänt

Det finns elektriska fält överallt i vår omgivning. För att skapa ett elektriskt fält krävs det att två ledande föremål har olika elektrisk potential eller spänning. Då bildas ett elektriskt fält (även kallat E-fält) mellan dessa ledande föremål. Enheten för elektrisk fältstyrka är volt/meter. Mellan två metallplattor beräknas den elektriska fältstyrkan genom att dividera potentialskillnaden med avståndet mellan plattorna enligt ekvation 2.1. [3]

$$E = \frac{V_1 - V_2}{d} \quad (2.1)$$

En karaktäristisk egenskap för den elektriska fältstyrkan är att den minskar väldigt fort med ökande avstånd. Då ett elektriskt fält illustreras i figurer ritas det med riktning-pilar som pekar från en högre spänning mot en lägre enligt figur 2.1. Det finns olika sorters elektriska fält, statiska och tidsvarie-

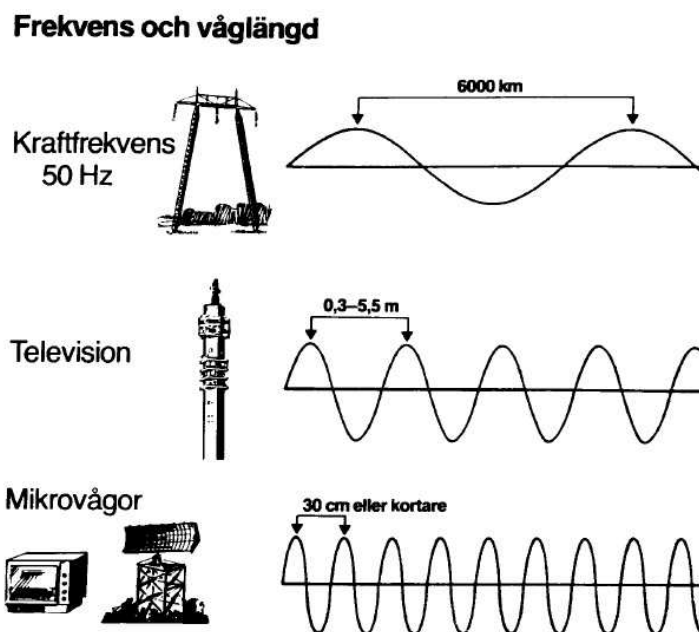


Figur 2.1. Elektriska fältet mellan två metallplattor

rande fält. De statiska fälten ändrar inte riktning med tiden och skapas av en

DC-spänning¹, de tidsvarierande fälten skapas av en AC-spänning². Tidsvarierande elektriska fält pulserar med en viss frekvens som beror av frekvensen på energikällan som alstrar dem. Man brukar dela in dessa frekvenser i två nivåer, låg- och hög-frekventa fält. Lågfrekventa fält uppstår vid användning, produktion och överföring av el och benämns oftast som ELF-fält (Extremely Low Frequency = Extremt Låg Frekvens)-fält. Högfrekventa fält (mikrovåg- och radio-frekvenser) orsakas av mikrovågsantennar, mobiltelefoner, mikrovågsugnar och radaranläggningar, TV- och radiosändare m.m. [4]

Vid nätfrekvens som är 50 Hz i Sverige får den sinusformade spänningen en mycket lång våglängd, i figur 2.2 kan man se att våglängden för en 50Hz-spänning är omkring 6000 km lång. Denna våglängd (λ) beror av frekvensen



Figur 2.2. Frekvens och Våglängd (källa Svenska Elverksföreningen).

(f) enligt sambandet i ekvation 2.2.

$$\lambda = \frac{c_{ljus}}{f} \quad (2.2)$$

¹Direct current = Likström

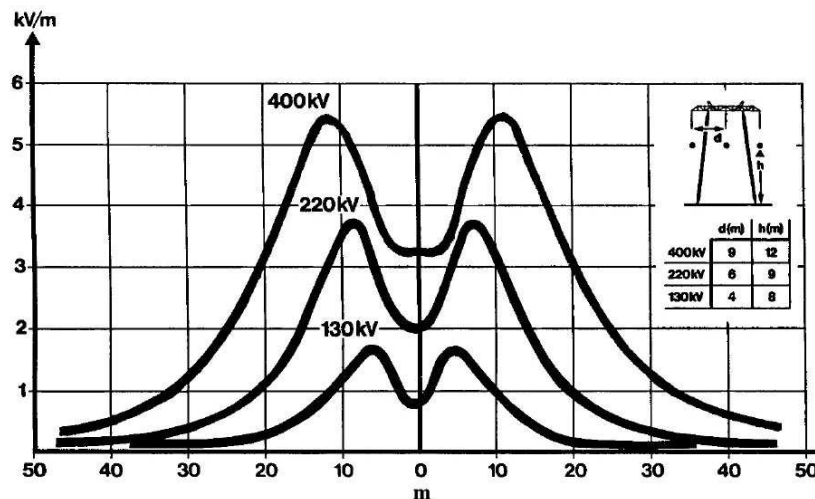
²Alternating current = Växelström

där c_{ljus} är ljusets hastighet i vakuum. Av detta kan man förstå att tidsvariationen för nätfrekvenser är mycket långsam i jämförelse med många andra mer förekommande frekvenser.

2.2 Elektriska fält skapade av kraftledningar

Nätfrekvensen i Sverige gör att de elektriska och magnetiska fälten som genereras kring en kraftledning hamnar i kategorin ELF-fält. Kraftledningarnas fält ses som relativt svaga. Exponeringen koncentreras till ledningens omedelbara omgivning [3]. En karaktäristisk illustration av hur den elektriska fältstyrkan kan se ut längs en tvärgående linje på marknivå under en kraftledning ses i figur 2.3. Fältstyrkan visas för tre olika spänningsnivåer.

Ett minimum precis under mittenfasen är resultat av att fasspänningarna



Figur 2.3. Elektrisk fältstyrka längs en tvärgående linje under en kraftledning (källa Svenska Elverksföreningen)

som sinsemellan är förskjutna 120° tar ut varandra i den punkten.

2.3 Analytiska beräkningar av elektriska fält under kraftledningar

De elektriska och magnetiska fälten från en kraftledning bildas från de elektriska strömmar och laddningar som finns på ledningarna och de strömmar och

laddningar som blir inducerade i jorden av ledningarna.

Enligt Maxwells ekvationer är de elektriska och magnetiska fälten sammankopplade³ d.v.s om det magnetiska fältet \mathbf{B}^4 är känt, kan den elektriska fältstyrkan \mathbf{E} beräknas, och vice versa. Men då det råder speciella förhållanden kan dessa storheter ses som icke-sammankopplade⁵. Ofta gäller detta för fälten kring kraftledningarna då den låga frekvensen gör att den tidsberoende variationen i fälten blir så pass långsam att Maxwells ekvationer nästan blir icke-sammankopplade. [9] Detta leder till att fälten kan beskrivas med elektrostatiska respektive magnetostatiska ekvationer. Det magnetiska fältet bestäms då av strömmen och det elektriska fältet från spänningen på ledningen. [10]

Vid bestämning av E-fält kring en högspännings AC - lina är det i praktiken mest använda tillvägagångssättet att se på problemet som just elektrostatiskt d.v.s trots att en växelspanning varierar periodiskt med frekvensen f så räknar man på problemet utan tidsberoende.

Elektrostatikens betydelse för elektrotekniken ligger till stor del däri, att ett med tiden varierande elektriskt fält, blott det ändrar sig tillräckligt långsamt, i varje ögonblick kan uppfattas som elektrostatiskt. [6]

Vid beräkning modelleras kraftledningen lämpligast som en tvådimensionell källa med i z-riktningen oändligt långa parallella linjeladdningar där hänsyn till jordens inverkan görs m.h.a. spegelladdningar enligt figur 2.5 [9]

För att beräkna potential och elektrisk fältstyrka från en kraftledning i en godtycklig punkt måste man känna till potentialen V_i på ledningarna samt den geometriska konfigurationen av dem: avstånd mellan ledningarna, antalet linor per fas, radien på fasledningarna och topplinorna samt radien för de sammanbuntade linorna per fas.

2.3.1 Ekvivalent radie för multipelledare

I de fall då man har mer än en lina per fas, en s.k. multipelledare, beräknas en ekvivalent radie med ekvation 2.3.

³av engelskan **coupled**

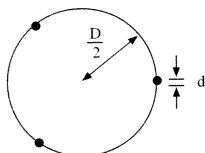
⁴ \mathbf{B} = magnetisk flödestäthet, \mathbf{H} = magnetisk fältstyrka. Men i 99% av fallen då det talas om magnetiska fält är det den magnetiska flödestätheten man syftar på

⁵av engelskan **decoupled** eller **uncoupled**

$$r_{ekvivalent} = \frac{d}{2} = \sqrt[n]{n \left(\frac{D}{2}\right)^{(n-1)} \left(\frac{d}{2}\right)} \quad (2.3)$$

n är antalet ledare, $\frac{d}{2}$ och $\frac{D}{2}$ är ledarradien respektive den stora radien för den cirkel som går igenom de sammanbuntade ledarna enligt figur 2.4.

Multipelledare medför minskad korona (glimurladdningar) och lägre reaktans



Figur 2.4. Ekvivalenta radien för multipelledare

hos ledningen. [8]

2.3.2 Logaritmisk potential

Med hjälp av Gauss lag kan den elektriska fältstyrkan från en lång rak tråd beskrivas med ekvation

$$E(r_c) = \frac{\rho_l}{2\pi\epsilon_0 r_c} \quad (2.4)$$

där r_c är avståndet mellan trådens axel och punkten där fältstyrkan sökes. Sambandet

$$\mathbf{E} = -\nabla V \quad (2.5)$$

kan med cylinderkoordinater skrivas som

$$-\frac{dV}{dr_c} = \frac{\rho_l}{2\pi\epsilon_0 r_c} \quad (2.6)$$

där den allmänna lösningen blir på formen

$$V = -\frac{\rho_l}{2\pi\epsilon_0} \ln r_c + k \quad (2.7)$$

och k är en okänd konstant. Detta uttryck är ofysikaliskt då en oändligt stor potential erhålles då avståndet $r_c \rightarrow \infty$. För att få ett fysikaliskt korrekt uttryck måste man se till att totala laddningen blir ändlig. Detta görs genom

att man förutom ρ_l introducerar en tråd med laddningen $-\rho_l$. Potentialen från de två trådarna kan då uttryckas som

$$\begin{aligned} V &= V_1 - V_2 \\ &= -\frac{\rho_l}{2\pi\epsilon_0} \ln r_{c1} + k_1 + \frac{\rho_l}{2\pi\epsilon_0} \ln r_{c2} - k_2 \\ &= \frac{\rho_l}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r_{c2}}{r_{c1}} + (k_1 - k_2) \end{aligned} \quad (2.8)$$

och för att uppfylla villkoret att potentialen ska vara noll långt borta från trådarna måste $(k_1 - k_2) = 0$ man kan nu se att potentialen går mot noll ty på ett stort avstånd är ju

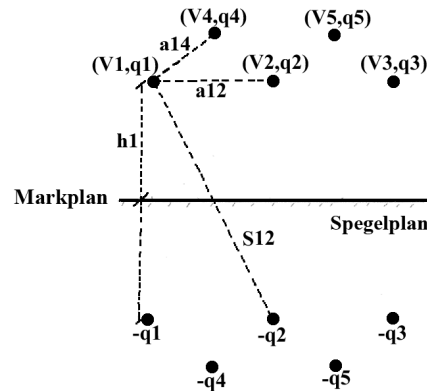
$$r_{c1} \approx r_{c2} \longrightarrow \ln \frac{r_{c2}}{r_{c1}} = 0 \quad (2.9)$$

Den logaritmiska potentialen som beskriver bidraget från två trådar kan nu skrivas om från ekv (2.8) till ekvation (2.10) [7]

$$V = \frac{\rho_l}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r_{c2}}{r_{c1}} \quad (2.10)$$

2.3.3 Potentialkoefficienter

Då de parallella ledarna i figur 2.5 har relativt små diametrar jämfört med avståndet mellan ledarna och höjden på ledarna, och då ledaravståndet och ledarhöjden över marken är liten i jämförelse med längden på ledarna, kan man räkna trådytorna som approximativa ekvipotentialytor i det fält som beräknas från linjeladdningarna placerade i ledarnas centrum [2].



Figur 2.5. Geometri för beräkning av spegelladdningar

Potentialen⁶ på ledare i kan nu beräknas för n antal ledare enligt den tidigare

⁶Potentialen är ett komplext tal då hänsyn till både amplitud och fas måste tas

nämnda logaritmiska potentialekvationen (2.10) med omskrivningen

$$V_i = \sum_{j=1}^n k_{ij} \rho_{l_j} \quad (2.11)$$

där ρ_{l_j} är linjeladdningen på ledare j och k_{ij} potentialkoefficienterna som beskrivs av

$$k_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2h_i}{r_i} \quad (2.12)$$

$$k_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{S_{ij}}{a_{ij}} \quad (2.13)$$

r_i är radien för ledare i och som ersätts med en ekvivalent radie för de fall man har mer än en ledare per fas vilket beskrivs i stycke 2.3.1

h_i = höjden för ledare i

a_{ij} = avståndet mellan ledare i och ledare j

S_{ij} = avståndet mellan ledare i och speglingen av ledare j .

Dessa ekvationer som bildar ett ekvationssystem kan på matrisform skrivas som

$$\vec{V} = \mathbf{k} \cdot \vec{\rho}_l \implies \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ \vdots \\ V_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_{11} & k_{12} & \dots & k_{1n} \\ k_{21} & k_{22} & \dots & k_{2n} \\ k_{31} & k_{32} & \dots & k_{3n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{n1} & k_{n2} & \dots & k_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \rho_{l_1} \\ \rho_{l_2} \\ \rho_{l_3} \\ \vdots \\ \rho_{l_n} \end{pmatrix} \quad (2.14)$$

Med kända potentialer på ledarna går det att ur ekvation 2.14 beräkna den i systemet totala laddningen på respektive ledare. Detta m.h.a. elementära matrisoperationer

$$\vec{\rho}_l = \mathbf{k}^{-1} \cdot \vec{V} \implies \begin{pmatrix} \rho_{l_1} \\ \rho_{l_2} \\ \rho_{l_3} \\ \vdots \\ \rho_{l_n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_{11} & k_{12} & \dots & k_{1n} \\ k_{21} & k_{22} & \dots & k_{2n} \\ k_{31} & k_{32} & \dots & k_{3n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{n1} & k_{n2} & \dots & k_{nn} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ \vdots \\ V_n \end{pmatrix} \quad (2.15)$$

nu är det möjligt att beräkna den elektriska potentialen vid en godtycklig punkt i området kring ledarna. Detta görs genom att återigen beräkna potentialen i önskad punkt m.h.a. laddningsbidragen från respektive ledare i den punkten p enligt ekvation 2.16.

$$V(p) = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left| \sum_{i=1}^n \rho_{l_i} \ln \frac{S_{ip}}{a_{ip}} \right| \quad (2.16)$$

S_{ip} = avståndet mellan punkten och speglingen av ledare i
 a_{ip} = avståndet mellan punkten och den i :te ledare

Och beloppet av den elektriska fältstyrkan i punkten p ges av

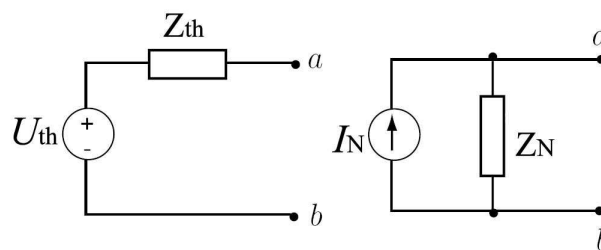
$$E(p) = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sqrt{\left| \sum_{i=1}^n \rho_{li} \left(\frac{x_{ip}}{S_{ip}^2} - \frac{x_{ip}}{a_{ip}^2} \right) \right|^2 + \left| \sum_{i=1}^n \rho_{li} \left(\frac{f_{ip}}{S_{ip}^2} - \frac{y_{ip}}{a_{ip}^2} \right) \right|^2} \quad (2.17)$$

x_{ip} = horisontella avståndet mellan punkt och ledare i
 y_{ip} = vertikala avståndet mellan punkt och ledare i
 f_{ip} = vertikala avståndet mellan punkt och spegling av ledare i

Elektriska fältet är derivatan av potentialen. I kapitel 3 görs dessa beräkningar för några ledare av olika konfiguration och spänning. Dessutom jämförs värdena med simulerade numeriska beräkningar både på en 2D- och en 3D-modell.

2.4 Elektrisk uppladdning av fordon

Då ett fordon står under en kraftledning sker det en viss uppladdning av det vilket innebär att fordonet får en influerad potential. Graden av uppladdning beror av fordonets dimensioner, läge, höjd över mark, ledningens konfiguration, läge och spänning, samt däckens och underlagets elektriska egenskaper [2],[11],[12]. För att göra problemet mer överskådligt brukar man bygga upp ett ekvivalent elektriskt kretsschema. Till detta schema krävs att den öppna kretsens spänning⁷ U_{oc} är känd d.v.s. den influerade spänningen på fordonet



Figur 2.6. Kretsschema:th, Théveninekvivalent tvåpol :tv, Nortonekvivalent tvåpol

⁷ U_{oc} = Open Circuit Voltage = Tomgångsspänning

då det är helt isolerat från jord. Samt kortslutningsströmmen⁸ I_{sc} vilken är den ström man skulle få i jordledaren om fordonet jordades. Krettschemat som erhålles är då systemets Thévenin- och Norton- ekvivalenta tvåpoler figur 2.6. Dessa storheter är relaterade till varandra genom fordonets impedans till jord Z_b enligt Ohms lag ekvation 2.18,

$$U_{oc} = Z_b \cdot I_{sc} \quad (2.18)$$

där $U_{th} = U_{oc}$, $I_{sc} = I_N$ och $Z_{th} = Z_N = Z_b$. Om fordonet är helt isolerat från jord d.v.s. flytande blir denna impedans fordonets kapacitans till jord, alltså rent kapacitiv. Detta är det värsta fallet eller *worst case* då influensspänningen har sitt maximala värde [13]. Impedansen beskrivs då av ekv 2.19.

$$Z_b = \frac{1}{j\omega C} \quad (2.19)$$

2.4.1 En analytisk beräkningsmetod för kortslutningsström och tomgångsspänning

En första uppfattning av kortslutningsström och hur stor den influerade spänningen på ett fordon kan bli, fås genom beräkningar på en analytisk modell där man använt sig av linjeladdningsekvationerna. Detta stycke beskriver teorin bakom dessa beräkningar.

För att kunna modellera ett fordon analytiskt m.h.a. linjeladdningar, byggs det upp en bur av linjeladdningar med ett fordons motsvarande dimensioner under kraftledningens faser. Om man låter potentialen på bur-ledningarna vara = 0 d.v.s. man jordar buren och beräknar summaladdningen på buren erhålles den totala laddningen. Denna laddning är relaterad till kortslutningsströmmen enligt ekvation 2.20.

$$I_{sc} = j\omega Q_b \quad (2.20)$$

Q_b är summan av laddningarna på ledningarna som bygger upp buren, multiplicerade med L vilket är längden på fordonet. Detta eftersom burladdningarna är linjeladdningar med enheten $\frac{C}{m}$. Om burladdningarnas index börjar från $s \rightarrow t$ blir uttrycket för den totala laddningen på en bur med längden L :

$$Q_b = \left(\sum_{i=s}^t \rho_{l_i} \right) \cdot L \quad (2.21)$$

⁸ I_{sc} = Short Circuit Current = Kortslutningsström

Detta beräknas analytiskt genom att lösa följande ekvationssystem 2.22

$$\begin{pmatrix} V_1 \\ \vdots \\ V_n \\ V_s \\ \vdots \\ V_t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_{11} & \dots & k_{1n} & k_{1s} & \dots & k_{1t} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{n1} & \dots & k_{nn} & k_{ns} & \dots & k_{nt} \\ k_{s1} & \dots & k_{sn} & k_{ss} & \dots & k_{st} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{t1} & \dots & k_{tn} & k_{ts} & \dots & k_{tt} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \rho_{l_1} \\ \vdots \\ \rho_{l_n} \\ \rho_{l_s} \\ \vdots \\ \rho_{l_t} \end{pmatrix} \quad (2.22)$$

där $V_s \rightarrow V_t = 0V$ är potentialen på burens ledningar och $\rho_{l_s} \rightarrow \rho_{l_t}$ är den av kraftledningen influerade linjeladdningen på burens ledningar. Detta ekvationssystem löses p.s.s som tidigare med elementära matrisoperationer. Nästa steg är att beräkna tomgångsspänningen på buren. Då teorin visar att det elektriska fältet i en metallkropp är $= 0$ alltså $E = 0$ och då $\mathbf{E} = -\nabla V$ så måste ju potentialen vara konstant [7]. Och eftersom Gauss lag ger följande samband mellan fält och laddningstäthet:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \quad (2.23)$$

följer att om $E = 0$ måste även $\rho = 0$ [7]. För att uppfylla detta antages en okänd men gemensam potential på buren, alla bur-ledningar har potentialen V och summaladdningar $= 0$. Det sist nämnda villkoret ger en extra ekvation vilket gör det möjligt att bestämma V . Ekvationssystemet får en extra kolumn som uppfyller villkoret att burledningarna har den gemensamma potentialen V och en extra rad som uppfyller villkoret att bur-ledningarnas summaladdning $= 0$, se ekv 2.24.

$$\begin{pmatrix} V_1 \\ \vdots \\ V_n \\ V_s = 0 \\ \vdots \\ V_t = 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_{11} & \dots & k_{1n} & k_{1s} & \dots & k_{1t} & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ k_{n1} & \dots & k_{nn} & k_{ns} & \dots & k_{nt} & 0 \\ k_{s1} & \dots & k_{sn} & k_{ss} & \dots & k_{st} & -1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ k_{t1} & \dots & k_{tn} & k_{ts} & \dots & k_{tt} & -1 \\ 0 & \dots & 0 & 1 & \dots & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \rho_{l_1} \\ \vdots \\ \rho_{l_n} \\ \rho_{l_s} \\ \vdots \\ \rho_{l_t} \\ V \end{pmatrix} \quad (2.24)$$

Potentialen på buren erhålles genom att lösa ut V ur ekvationssystemet ovan.

2.4.2 Numerisk beräkning av kortslutningsström

Här beskrivs den teoretiska bakgrunden till hur den totala laddningen på en kropp beräknas i det numeriska programmet Comsol Multiphysics.

Den totala laddningen inom en volym, bestäms av den elektriska fältstyrkan på begränsningsytan av denna volym [7]. Genom att jorda kroppen, kommer laddningarna fördela sig jämnt mellan kropp och jord. Och Gauss lag på integralform lyder :

$$\iint \varepsilon_0 \mathbf{e}_n \cdot \mathbf{E} dS = Q_{innanför} = Q_b$$

alltså genom att integrera normalen till E-fältet på ytan av en kropp erhålles laddningen innanför [7], och med känd laddning kan kortslutningsström och kapacitans bestämmas.

2.4.3 Kapacitans till jord

Ett fordon på mark har en kapacitans till jord vars storlek beror av dess dimensioner, höjd från marken och underlaget det står på. Oftast är denna kapacitans i en mycket större storleksordning än kapacitanserna mellan ledningarna och den mellan ledningarna och fordon. Om fordonet kan ses som en lång cylinder liggande ovanför jord beskrivs kapacitansen som funktion av längden enligt ekvation 2.25

$$C' = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln\left(\frac{h}{r} + \sqrt{\left(\frac{h}{r}\right)^2 - 1}\right)} \quad (2.25)$$

r = cylinderns radie

h = höjden till cylinderns centrum från mark

L = cylinderns längd (eller höjden på den liggande cylindern)

fordonets längd L nära jord ersätts av en effektiv längd som enligt [2] approximeras till $= L + 2r$ fordonets kapacitans till jord ges då av:

$$C = C' \cdot (L + 2r) \quad (2.26)$$

Ett annat sätt att analytiskt undersöka kapacitansen är att beräkna den utifrån teorin beskriven under rubrik 2.4.1. Med känd tomgångsspänning på den flytande kroppen och laddning på den jordade, beräknas kapacitansen enkelt ur ekvation 2.20 och 2.19:

$$U_{oc} = Z_b I_{sc} = \frac{j\omega Q_b}{j\omega C_b} \Rightarrow C_b = \frac{Q_b}{U_{oc}} \quad (2.27)$$

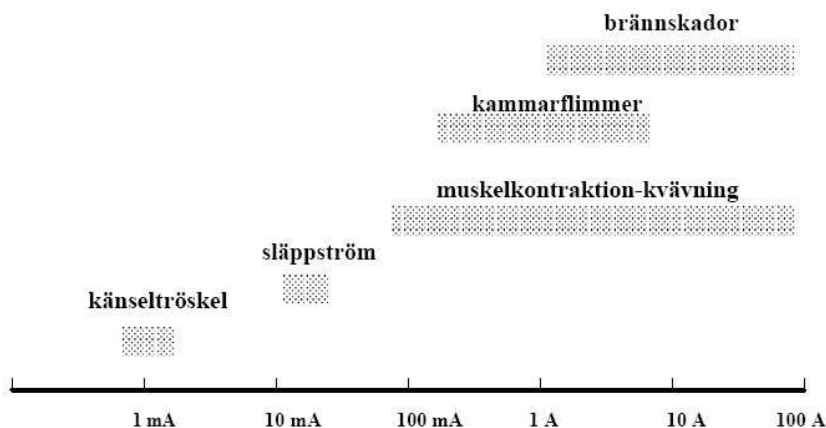
m.h.a. detta samband kan kapacitansen även beräknas i det numeriska fallet med känd laddning $Q_{innanför}$.

2.4.4 Kortslutningsström och gnistbildning

Kortslutningsströmmen som går igenom en kropp vid beröring av ett uppladdat föremål kan vara så liten att den inte uppfattas. Man har i [2] gjort en undersökning där den lägsta i människokroppen uppfattbara⁹ strömmen har mätts upp. Olika kroppar är olika känsliga, men känsligheten varierar även med kroppsdelar. Den strömkänsligaste delen av kroppen är tungan.

Undersökningen gav ett medelvärde på 1.1 mA för män då beröringspunkten var fingerspetsen, med den andra handen jordad. Detta medelvärde ökar med frekvensen d.v.s. en strömstyrka med en låg frekvens är lättare att känna än samma strömstyrka med en högre frekvens. Att utsättas för en växelström ger en stickande eller stingande¹⁰ sensation till skillnad från en likström som inledningsvis ger en sensation av värme.

I figur 2.7 kan man se vilka biologiska effekter en 50 Hz ström har i människokroppen. Gnistbildning kan endast ske om potentialskillnaden mellan



Figur 2.7. Effekter av växelström i människokroppen

föremålen är tillräckligt stor. Urladdningens storlek beror på tomgångsspänning och kapacitans hos föremålet som blir urladdat [2]. Energin i en gnista ges av sambandet

$$W_e = \frac{1}{2} \cdot C_b \hat{U}_{oc}^2 \quad [J] \quad (2.28)$$

med enheten Joule. Den minsta i människokroppen uppfattbara gnistenergin är enligt STS [15] 1 mJ och då man kommer upp i storlekar som 10 mJ kan

⁹engelska uttrycket är - Threshold of perception

¹⁰engelska uttrycket är - stinging

gnistan uppfattas som obekvämt och ge muskelsammandragningar. Men det varierar från person till person, vissa klarar flera hundra mJ innan de upplever muskelsammandragningar.

2.4.5 Antändning

Man klargör i [2] att det inte finns någon rapporterad händelse där bränsle antänts genom en influerad gnisturladdning från en kraftledning. Trots detta är det både teoretiskt och praktiskt bevisat att en gnista mellan två ledande föremål kan antända en bränsle-luftblandning. Den lägsta gnistenergi W_e som krävs för att antända kolväten är 0.25 mJ för en enda kapacitiv urladdning under ideala förhållanden [2]. Enligt [2] har det gjorts en serie undersökningar där man låtit objekt med varierande kapacitans utsättas för ett ELF-fält. Undersökningarna gjordes med en elektrod formad som en bränslepumps munstycke och en öppen behållare fylld med bensin. Syftet var att bestämma den minimala antändningsspänningen som funktion av objektets kapacitans. Undersökningen gav följande empiriska samband

$$U_{ign} = 4.6C^{-0.3} \quad (2.29)$$

Det visade sig att de faktiska antändningsspänningarna hamnade på 1 till 2 ggr minimivärdena från ekvationen 2.29. Den minimala antändningsspänningen för en nålspets är 0.65 gånger lägre än den för en bränslepumps munstycke [2].

2.5 Comsol Multiphysics

Det numeriska programmet som använts för modell-simuleringar är *Comsol Multiphysics* som tidigare hette *Femlab* vilket står för *Finite Element Modeling Laboratory*. Som namnet antyder använder sig programmet av finita element metoden för fältberäkningar. Den okända lösningen approximeras som summan av ett finit antal kontinuerliga delfunktioner (element) [5]. Alltså, lösningsmetoden i Comsol bryter ner problemet till ett eller flera system av linjära ekvationer. Detta kan göras iterativt eller direkt.

För 2D-simuleringarna används en direkt lösningsmetod (UMFPACK), vilket oftast går snabbast med 1D och 2D geometrier. De linjära ekvationssystemen löses m.h.a. gausselimination [16]. Eliminationsprocessen kräver ofta mycket av minne och beräkningstid vilket blir mycket märkbart vid 3D-simuleringar. Därför används en iterativ lösningsmetod för de 3-dimensionella simuleringarna.

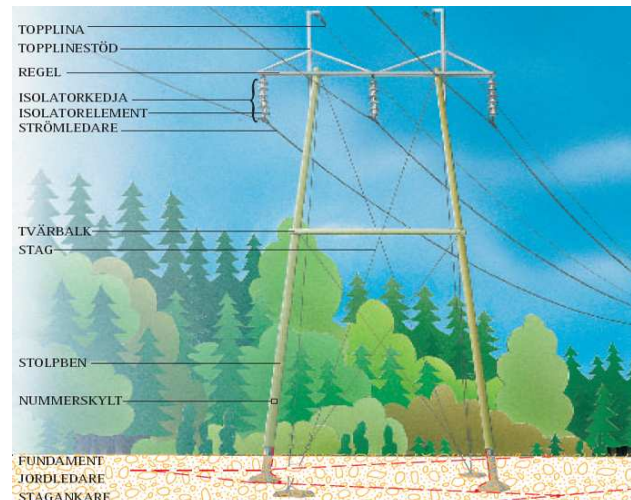
Kapitel 3

Beräkningar och Simuleringar

I denna del av rapporten redovisas de uträknade och simulerade resultaten erhållna utifrån de i teoridelen beskrivna metoderna.

3.1 Typ av kraftledning

Fasernas läge gentemot varandra beror på vilken typ av ledningsstolpe det är som håller upp dem. Till de vanligaste stolparna hör den så kallade Portalstolpen vilken illustreras i figur 3.1. Portalstolpen är konstruerad på ett



Figur 3.1. Stagad portalstolpe

sådant sätt att den håller upp faslinorna i en horisontell linje med i detta fall två topplinor. Man kan höra på namnet att topplinorna är placerade ovanför

fasledningarna, det horisontella läget är mellan mittfasen och de två ytterfaserna.

3.1.1 Simuleringar i Comsol

Simuleringarna inleds med att göra en modell med en enkel ledare ovanför jord. Ledaren modelleras som en cylinder med en randpotential, radien är densamma som i det analytiska fallet, d.v.s. den beräknas från fasledningens tvärsnittsarea. Sedan bygger man upp själva omgivningen runt ledaren som är området i vilket de numeriska beräkningarna görs. Detta görs enkelt i Comsol genom att definiera en stor rektangel eller kub runt om ledaren. Då det finns många olika s.k. moduler där specifika storheter undersöks är det viktigt att välja rätt modul för det aktuella fallet. Vad som skall modelleras är den elektriska potentialen i omgivningen av en kraftledning och jord (marken). Och som förklarats tidigare görs detta lämpligast i en statisk miljö d.v.s. utan något tidsberoende. I programmet Comsol väljs modulen Electrostatics-Electromagnetic Module.

Därefter konstrueras en mer verklig modell med tre ledare och två topplinor. Denna modell görs i två varianter, en med den analytiskt beräknade ekvivalenta radien för multippelledare vilket innebär att simuleringar görs på 5 st ledare (tre faser och två topplinor). Detta ger självfallet en något mer komplex geometri än i enkel-ledarfallet, vilket gör de numeriska beräkningarna mer omfattande.

I den andra varianten görs simuleringar med rätt antal ledare per fas d.v.s. modellen och de analytiska beräkningarna får göras om på nytt så att man istället för att använda den ekvivalenta radien för hopbuntade ledningar gör en modell med det faktiska antalet ledare per fas. I detta fall är det två ledare per fas med ett mellanliggande avstånd på 20 cm. Dessa simuleringar blir återigen något mer omfattande då det istället för 5 st är 8 st ledningar som skall tas hänsyn till. Syftet med dessa simuleringar är att undersöka hur stor skillnaden med att använda en modell med r_{ekv} och rätta antalet ledare per fas är.

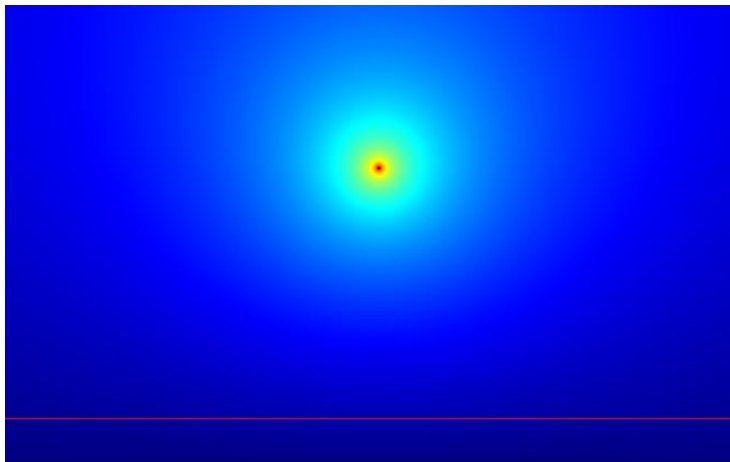
Med en känsla för simuleringar och beräkningar görs denna gång simuleringar på en 2-dimensionell motsvarighet till ledningen som de verkliga mätningarna gjorts på. Dessutom görs både 2D- och 3D-simuleringar med en buss uppställd under ledningen vilket kan ge en första antydning till storleksordningen av den på bussen influerade spänningen. Simuleringarna görs först på en flytande buss vilket betyder att bussen är helt isolerad från jord, och därefter på en jordad

buss. Resultaten återfinns i slutet av detta kapitel.

En ledande area, mellan buss och jord, med varierande storlek och ledningsförmåga har simulerats. Resultatet har plottats i en figur för att illustrera spänningsfallet som funktion av denna area och dess konduktivitet.

3.1.2 Enkel-ledare

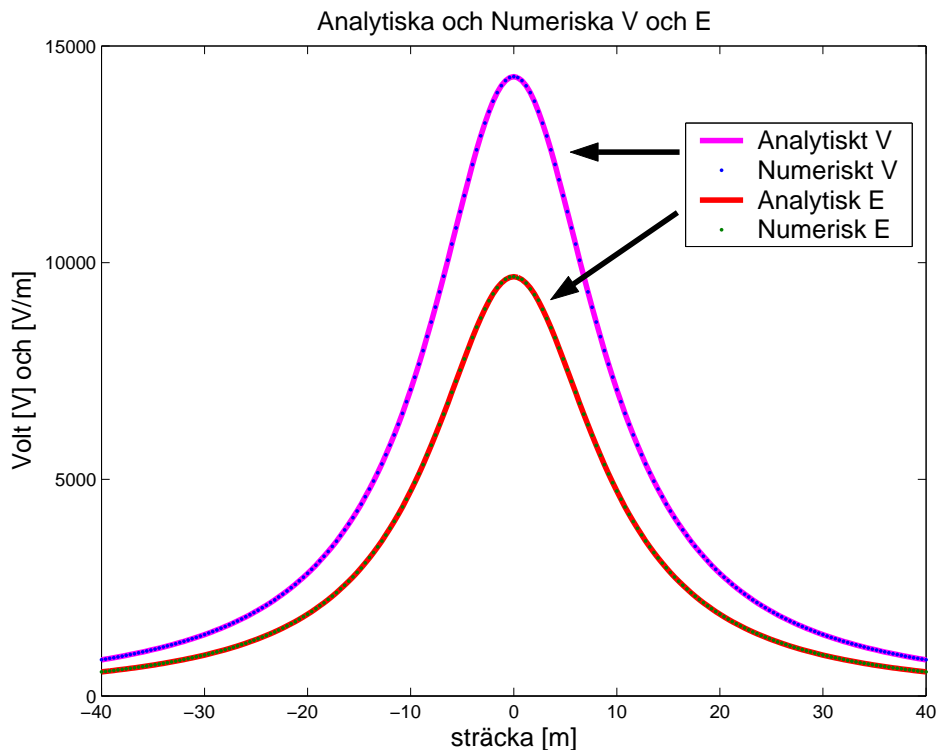
I figur 3.2 kan man se resultatet efter en 2D-simulering i Comsol av en enkel-ledare med potentialen 235 kV, radien 0.02 m och höjden 10 m ovan jord. Det rektangulära området kring ledaren representerar området i vilket de numeriska beräkningarna gjorts. Färgnyanserna som går från rött till mörkblått ger en bild av hur den elektriska potentialen fördelat sig i det simulerade området, där röd motsvarar 235 kV och mörkblå potentialen 0 V vilken mycket riktigt är den färg som ses i botten av figuren där randvillkoret satts till jord¹ (för svartvit är svart 0 V) Det är längs den röda linjen som värdena för potentialen är tagna på höjden 1.5 m ovanför markplanet. För att konstruera en så



Figur 3.2. Simulerad enkelledare i Comsol

riktig modell som möjligt jämförs de analytiskt uträknade resultaten med de numeriskt simulerade. En plott som visar detta för den elektriska potentialen och E-fältet i enkelledarfallet illustreras i figur 3.3. Man kan ur figuren se att de analytiska och numeriska resultaten är av samma storleksordning, vilket är positivt, då det stärker valet av randvillkor och områdesparametrar som gjorts vid simuleringarna. Den maximala E och V för de två fallen kan urskiljas i

¹Boundary Settings - Ground



Figur 3.3. Analytiskt beräknade och numeriskt simulerade resultat för enkelledare längs en linje på 1.5 meters höjd

	Maximal Analytiskt	Maximal Numeriskt
Potential [kV]	14.2918	14.2937
E-fält [kV/m]	9.6737	9.6755

Tabell 3.1. Maximala E-fältet och Potentialen på 1.5 m höjd rakt under en enkel ledare

tabell 3.1. Där ser man också att skillnaden är mycket liten, vilket pekar på att de två beräkningsmetoderna överensstämmer väl med varandra.

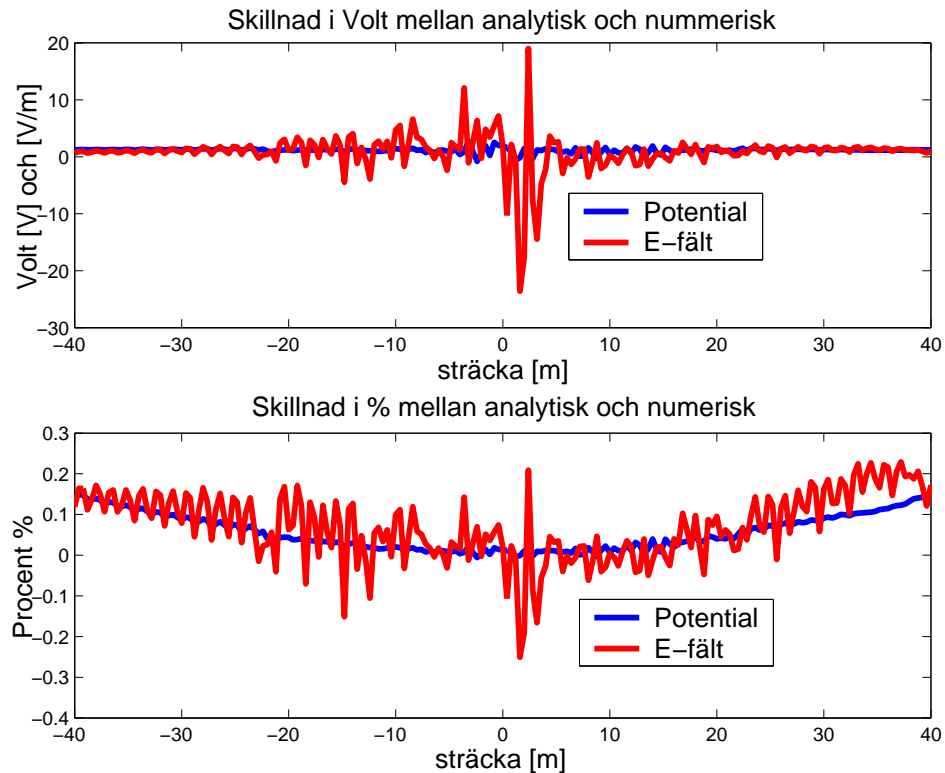
En bättre uppfattning om hur dessa två metoder skiljer sig åt kan fås med en mer noggrann undersökning av resultaten.

$$\begin{aligned}\Delta V &= V_{Numerisk} - V_{Analytisk} \\ \Delta E &= E_{Numerisk} - E_{Analytisk}\end{aligned}\tag{3.1}$$

Om man tar differensen av analytiska och numeriska potentialen längs en linje på 1.5 m höjd över marken erhålles en maximal skillnad på 2.7 V vilket

motsvarar 0.15 %, och motsvarande för E-fältet blir 19.0 V/m, 0.23 % se figur 3.4.

Varför skillnaden i E-fält är något större kan förklaras av att de numeriska



Figur 3.4. Skillnad i potential V och elektrisk fältstyrka $\frac{V}{m}$ mellan analytiskt beräknade och numeriskt simulerade resultat längs en linje på 1.5 meters höjd under en enkel-ledning. Nedre figur: samma skillnad i %

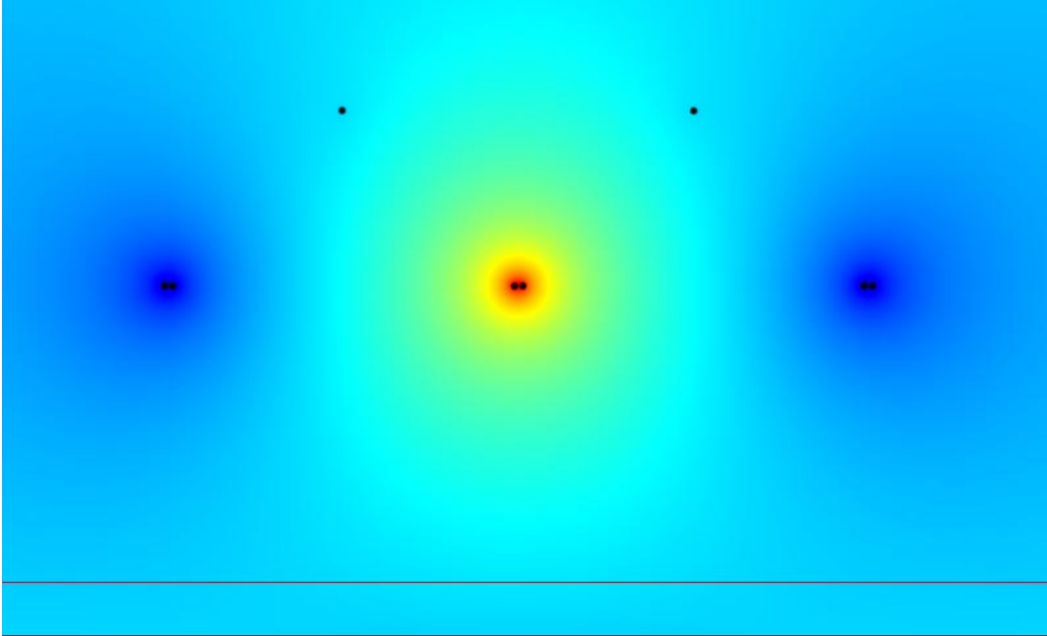
beräkningarna görs för att bestämma potentialen V . Den elektriska fältstyrkan tas fram som en funktion av potentialen enligt ekvation 3.2 där den ges som derivatan av potentialen

$$\mathbf{E} = -\nabla V \quad (3.2)$$

detta innebär att oavsett hur fin meshen görs kommer noggrannheten för den elektriska fältstyrkan alltid att vara sämre än den för potentialen V . Fortsättningsvis görs endast jämförelser mellan analytiskt uträknad och numeriskt simulerad potential.

3.1.3 Trefas-ledare med två topplinor - en jämförelse

Precis som för fallet med enkel-ledaren ovan byggs geometrin upp i Comsol med lednings-kordinater från tabell 3.2. Själva ledningarnas radier beräknas



Figur 3.5. Simulerad trefas-ledare i Comsol

Koordinat	x	y
Fas 1	-10 m	10 m
Fas 2	0 m	10 m
Fas 3	10 m	10 m
Topplina 1	-5 m	15 m
Topplina 2	5 m	15 m

Tabell 3.2. Ledningsgeometri för jämförelsen av r_{i-ekv} och rätt antal ledare per fas

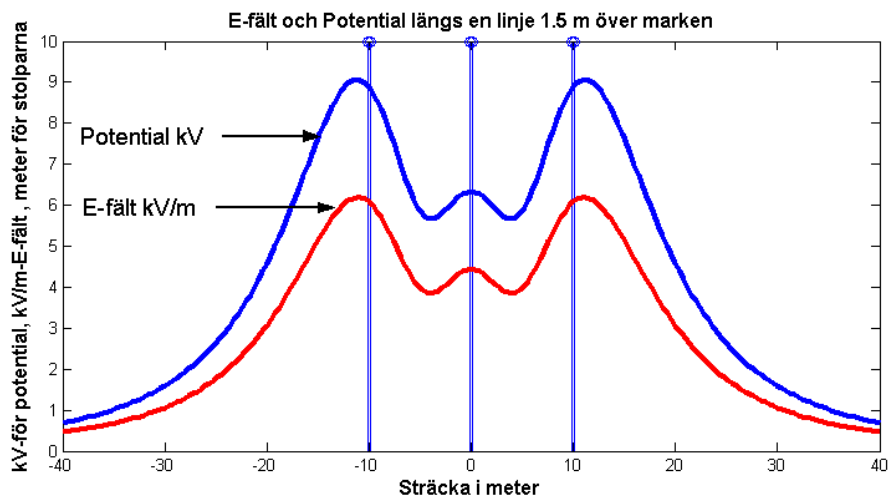
utifrån data i tabell 3.3 där den ekvivalenta radien för 2 ledningar per fas med ett inbördes avstånd på $0.2 + 2r_{fas}$ meter blir enligt ekvation 3.3.

$$r_{i-ekv} = \sqrt[2]{2 \left(\frac{0.2 + 2 \cdot r_{fas}}{2} \right)^{(2-1)} (r_{fas})} = 0.0519 \quad [m] \quad (3.3)$$

Radien för topplinorna och fasledningarna beräknas från tvärsnittsareorna.

$$r_{topp} = \sqrt{\frac{241\text{mm}^2}{\pi}} = 0.0088 \text{ [m]} \quad r_{fas} = \sqrt{\frac{454\text{mm}^2}{\pi}} = 0.0120 \text{ [m]} \quad (3.4)$$

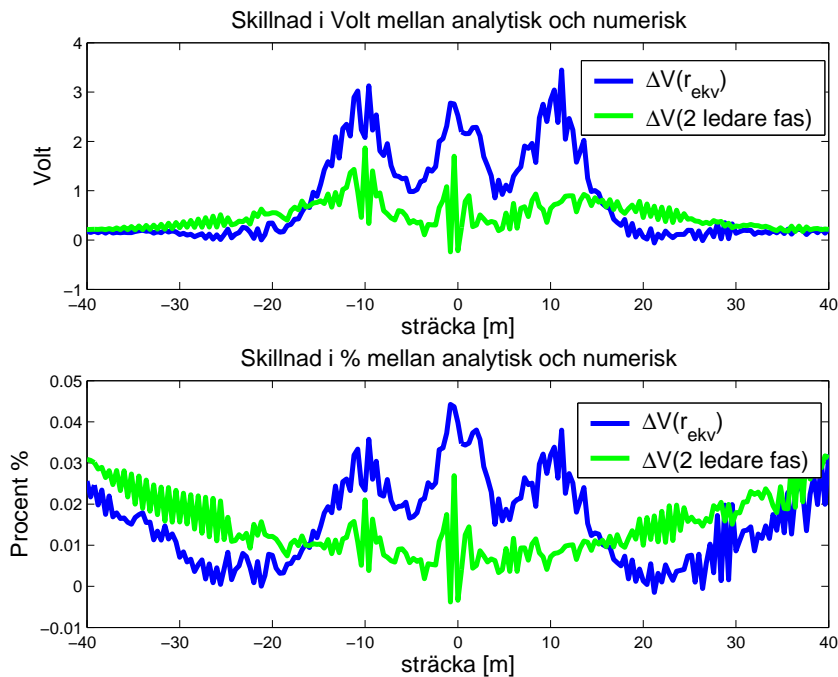
Med dessa dimensioner på ledningarna och en fasspänning på 235 kV fördelar sig den elektriska potentialen och den elektriska fältstyrkan på en linje 1.5 m ovan mark enligt figur 3.6. Man kan se att både potential och E-fält har sitt maximala värde strax utanför ytterfaserna. En förståelse för skillnaden i att



Figur 3.6. Analytiskt beräknad potential och E-fält, topplinorna är inte ut-satta i figuren, men har koordinaterna (-5,15) och (5,15)

använda sig av en ekvivalent radie istället för rätta antalet ledare per fas kan fås med en jämförelse.

Den elektriska potentialen för ovanstående system beräknades analytiskt med 2 ledare per fas. Detta resultat jämfördes med en numerisk simulering av systemet med ekvivalenta radien och en med 2 ledare per fas. Resultatet visas grafiskt i figur 3.7. Det framgår ur figuren att skillnaderna är marginella vilket visar på att approximationen med den ekvivalenta radien är tillförlitlig.



Figur 3.7. Jämförelse av skillnaderna med ekvivalent radie och två ledare per fas

3.2 Trefas-ledare med två topplinor - Huddinge

I denna modell har de givna ledningsparametrarna ur tabell 3.3 använts. Beräkningar och simuleringar har genomförts på samma sätt som tidigare. Huvudspänningen sätts till 220 kV vilket är spänningen på trefasledningen i

Lägsta höjd för aktuellt spann vid lokal islast	15.5 m
Typ av ledningsstolpe	Portalstolpe
Koordinat Fas 1	(x,y) = (-6.6,15.5)
Koordinat Fas 2	(x,y) = (0,15.5)
Koordinat Fas 3	(x,y) = (6.6,15.5)
Faslina	2x454 Condor/Fas
Antal ledningar per fas	2 st
Avstånd ledning/fas	0.45 m
Koordinat Topplina 1	(x,y) = (-3.3,18.8)
Koordinat Topplina 2	(x,y) = (3.3,18.8)
Topplina	2x241 FeAl

Tabell 3.3. Ledningsdata

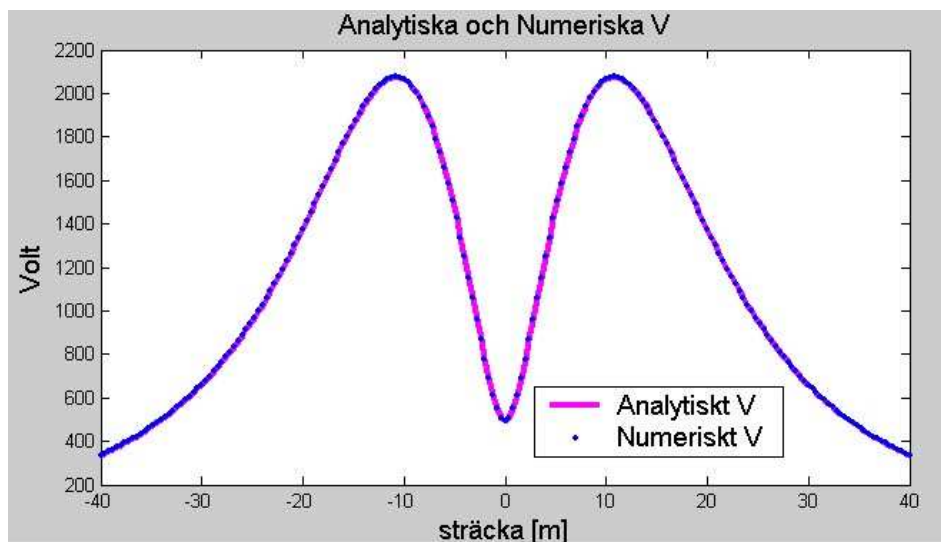
Huddinge. Effektivvärdet av fasspänningen på respektive ledare blir då enligt ekvation 3.5.

$$U_{fas} = \frac{220kV}{\sqrt{3}} = 127 \text{ [kV]} \quad (3.5)$$

Den ekvivalenta radien för 2 ledare per fas med ett avstånd på 45 cm blir:

$$r_{i-ekv} = 0.0755 \text{ [m]} \quad (3.6)$$

Figur 3.8 visar hur potentialen fördelar sig på höjden 1.5 m. Med ett kortare avstånd mellan faserna får potentialkurvan ett något annorlunda utseende. I denna beräkning är också ledningarna något högre belägna än i tidigare fall.



Figur 3.8. Den analytiskt uträknade potentialen och den numeriskt simulerade på 1.5 m höjd, plottade i samma figur

Den maximala potentialen är även i detta fall lokaliserad strax utanför ytterfaserna där den har ett värde på 2.076 kV på 1.5 meters höjd.

Skillnaden mellan analytiska och numeriska beräkningar är mycket liten. Spänningskillnaden är som störst runt 0.6 V och den procentuella skillnaden hamnar på någon tiondels procent.

3.2.1 Simuleringar och beräkningar på uppställt fordon

De buss-storlekar som valts att undersökas har mått enligt Tabell 3.4. Det är på **Buss 2** som de verkliga mätningarna är gjorda. **Buss 1** skall föreställa

	Buss 1	Buss 2
Bredd	2.5 m	2.58 m
Tak-Höjd	3.5 m	3.2 m
Längd	18 m	11.2 m
Botten-Höjd	0.4 och 0.35 m	0.4 och 0.35 m

Tabell 3.4. Buss 1 och 2

en led buss eller dragspelsbuss. Värdena på de två olika busstyperna ger en uppfattning av vad bussens längd har för inverkan.

En buss modelleras i 2D genom att rita en rektangel med höjd och bredd enligt tabell 3.4 och i 3D, en låda med bussens längd som djup. I Comsol ges randvillkoret flytande potential² vilket innebär att kroppen är ledande och att det är den omgivande miljön (fasspänning, geometriska avstånd, radier mm) som bestämmer influensspänning på den.

För att vara på säkra sidan placeras bussen längs med ledningarna, detta för att den influerade potentialen på bussen då blir maximal. Man får det så kallade *worst case*-scenariot, vilket är ett vanligt tillvägagångssätt i ingenjörssammanhang. Om man kan konstatera att *worst case* fallet är ofarligt, så är även alla andra tänkbara fall ofarliga. Med en uppställningsplats för fordon under kraftledningen kan man tänka sig att de snarare skulle stå i en mer från ledningen sett tvärgående riktning vilket motsvarar ett lindrigare fall. Enligt *Kaidanov* [12] skulle detta resultera i en minskning av influerad spänning på 5-20%.

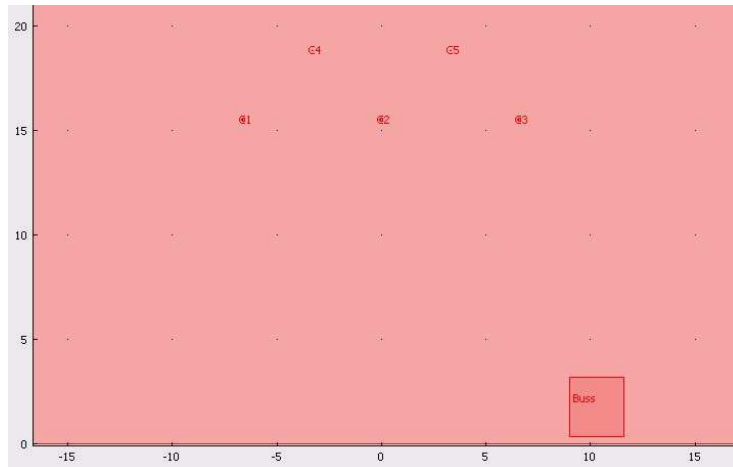
Simuleringarna är gjorda med bussmodellerna i tabell 3.4 placerade 9 och 15.5 meter från mittenfasen. Fyra stycken simuleringar görs för varje buss.

Bussen placeras:

1. 9 meter från mittenfasen i området med maximal potential och med en höjd över mark = (engelska clearance) = 0.4 meter.
2. 9 meter från mittenfasen med clearance = 0.35 meter.
3. 15.5 meter från mittenfasen där de verkliga mätningarna är gjorda med clearance = 0.4 meter.
4. 15.5 meter från mittenfasen med clearance = 0.35 meter.

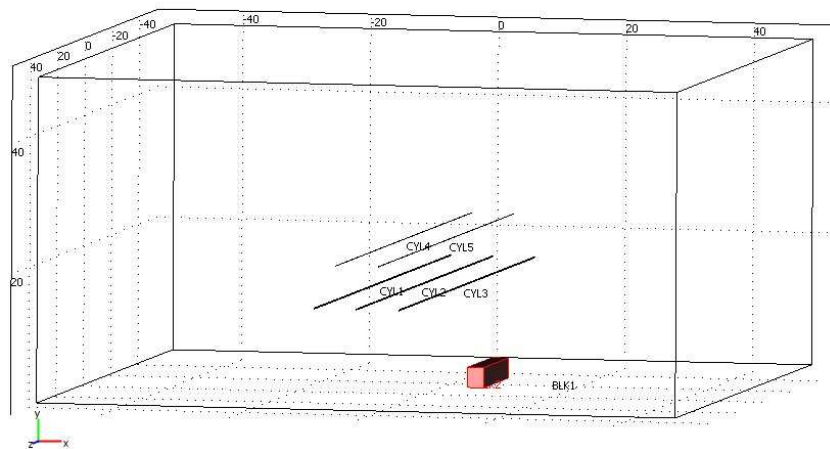
Dessa simuleringar görs på både en 2- och en 3-dimensionell modell. I figur 3.9 ses geometrin för **Buss 2** i en 2D-simulering. För att kunna göra

²engelska - floating potential



Figur 3.9. Geometri i Comsol inför en 2D-simulering med uppställd buss

3D-simuleringarna krävs en kraftfull dator då den extra dimensionen ger betydligt mer komplexa numeriska beräkningar. Dessa simuleringar har gjorts möjliga m.h.a. en server på KTH som kan lösa minneskrävande simuleringar. Modellen byggs upp genom att först skapa omgivningen i form av en stor låda med måtten 100x100x50 - (bredd)x(längd)x(höjd) och med det borte vänstra hörnet i punkten $= (x,y,z) = (-50,0,-50)$ se figur 3.10. Därefter ritas ledningarna ut i form av långa smala cylindrar. Spänningar på ledningar och

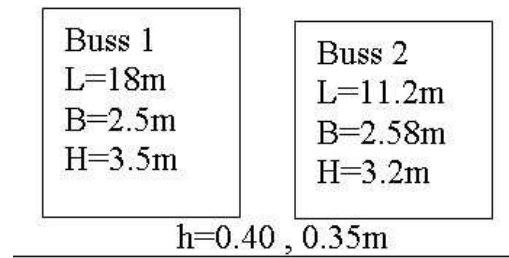


Figur 3.10. Geometri i Comsol inför en 3D-simulering med uppställd buss

övriga randvärden anges på samma sätt som för 2D-modellen. Meshen för 3D-modellen blir något grövre eftersom minnet annars inte räcker till.

Bussen jordas genom att man i det numeriska fallet anger ett punktvärde med potentialen 0 på ett av bussens hörn (detta sparar minne), och i det analytiska, beräkna summaladdningen på en bur med bussens dimensioner, vilket beskrivs i kapitel 2.4.1. Kortslutningsströmmen beräknas sedan ur laddningen på bussen, enligt ekvation 2.20 i teoridelen.

Resultaten av genomgångna simuleringar och beräkningar kan ses i tabell 3.5 nedan. Där h är avståndet från bussens undersida till jord (clearance) och x är horisontella avståndet i meter från mittenfasen.



Figur 3.11. Mått för bussarna B1 och B2

	h = 0.40 m	h = 0.35 m
*****	*****	*****
Buss 1, x=9 meter	2D	2D
U_{oc} [V]	1327	1208
C_b [pF]	1775,5	1940,2
I_{sc} rms [mA]	0,74	0,74
	Analytisk	Analytisk
U_{oc} [V]	1326	1208
C_b [pF]	1840,9	2021,2
I_{sc} rms [mA]	0,77	0,77
	3D	3D
U_{oc} [V]	1355	1246
C_b [pF]	1662,3	1777,4
I_{sc} rms [mA]	0,71	0,70

	h = 0.40 m	h = 0.35 m
*****	*****	*****
Buss 1, x=15.5 meter	2D	2D
U_{oc} [V]	1078	987
C_b [pF]	1759,2	1931,5
I_{sc} rms [mA]	0,60	0,60
	Analytisk	Analytisk
U_{oc} [V]	1079	983
C_b [pF]	1837,2	2017,3
I_{sc} rms [mA]	0,62	0,62
	3D	3D
U_{oc} [V]	1116	1097
C_b [pF]	1658,4	1914,4
I_{sc} rms [mA]	0,58	0,66
*****	*****	*****
Buss 2, x=9 meter	2D	2D
U_{oc} [V]	1240	1129
C_b [pF]	1111,4	1221,4
I_{sc} rms [mA]	0,43	0,43
	Analytisk	Analytisk
U_{oc} [V]	1244	1132
C_b [pF]	1152,4	1266,9
I_{sc} rms [mA]	0,45	0,45
	3D	3D
U_{oc} [V]	1429	1368
C_b [pF]	954,5	937,3
I_{sc} rms [mA]	0,43	0,40
*****	*****	*****
Buss 2, x=15.5 meter	2D	2D
U_{oc} [V]	1011	921
C_b [pF]	1105,0	1212,8
I_{sc} rms [mA]	0,35	0,35
	Analytisk	Analytisk
U_{oc} [V]	1014	923
C_b [pF]	1150,2	1264,1
I_{sc} rms [mA]	0,37	0,37
	3D	3D
U_{oc} [V]	1257	1077
C_b [pF]	955,2	1058,5
I_{sc} rms [mA]	0,38	0,36

Tabell 3.5. Simulerings- och beräkningsresultat

3.2.2 Analys av Beräknings- och Simuleringsresultat

Enligt ekvation 1.2 som lyder: $I_{sc} = j\omega\varepsilon_0 E_{\perp} S$ kan kortslutningsströmmen enligt [2] beräknas om man känner till den ekvivalenta arean S och den ostörda vertikala komponenten av elektriska fältstyrkan vid marknivå E_{\perp} . Detta har gjorts med **Buss 1** för att jämföras med erhållna värden i tabell 3.5.

S beräknas för en rektangel med bredden B höjden H och Längden A enligt:

$$S = AB(1 + (1.4 + \frac{5}{(\frac{A}{B})^{6/10}}) \cdot (0.1(\frac{H}{B})^{1/2} + 0.78(\frac{H}{B}) + 0.07(\frac{H}{B})^2 + 0.01(\frac{H}{A})^3)) \quad (3.7)$$

Denna formel är empiriskt framtagen enligt EPRI's *ReferenceBook* [2]. Den ostörda vertikala komponenten av E-fältet vid marknivå ges av ekvation 3.8, där h_i är höjden för ledare i och x_{ip} horisontella avståndet mellan ledare i och punkten p . [2]

$$E_{\perp}(p) = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0} \left| \sum_{i=1}^n \rho_{li} \frac{h_i}{x_{ip}^2 + h_i^2} \right| \quad (3.8)$$

För att kunna beräkna tomgångsspänningen antages bussen ha en kapacitans till jord motsvarande en liggande cylinder ovan jord enligt ekvation 2.26.

$$U_{oc} = \frac{I_{sc}}{j\omega C_{cyl}} = \frac{E_{\perp} S}{C_{cyl}} \quad (3.9)$$

Med ledningskonfigurationen enligt den i Huddinge och mått för **Buss 1** fås

$$E_{\perp}(p = 9m) \approx 1.37 \left[\frac{kV}{m} \right]$$

$$S_{Buss1} = 201.4 \text{ m}^2$$

$$C_{cyl-Buss1} = 1668 \text{ pF} \text{ från ekvation 2.26 med } r = 3.1/2, h = 0.4 \text{ m}$$

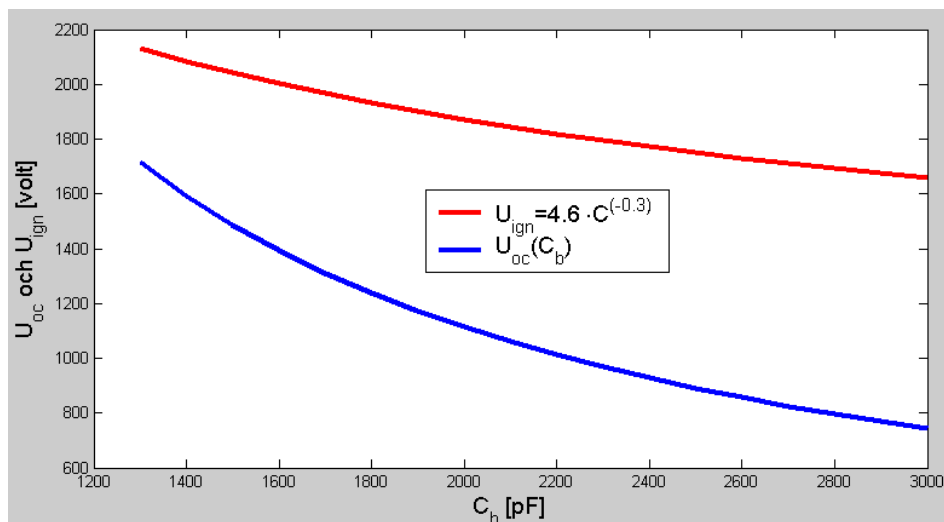
I tabell 3.6 kan man se att EPRI's värden för kortslutningsström stämmer väl överrens med de beräknade och simulerade värdena i tabell 3.5. Spänningen

Buss 1, x=9m, h=0.4	Max från Tabell 3.5	EPRI
U_{oc} [V]	1355	1462
C [pF]	1841	1668
I_{sc} [mA]	0.767	0.766

Tabell 3.6. Jämför resultat med beräknade värden enligt EPRI

på bussen är mycket beroende av dess kapacitans till jord. Den liggande cylindern är ju en approximation där man valt att sätta cylinderns radie till halva chassihöjden på bussen. Enligt [2] har man mätt upp kapacitansen för olika

typer av fordon där b.l.a. en stor trailer har en kapacitans från 2000 pF. Med denna kapacitans erhålles en spänning på 1220 [V]. Med en bestämd maximal kortslutningsström sjunker spänningen med ökad fordonskapacitans. I detta fall, med $I_{sc} = 0.77$ mA, beror spänningen av kapacitansen enligt figur 3.12 där man också kan se att denna kurva ligger under kurvan för (enligt EPRI) minimal antändningsspänning.



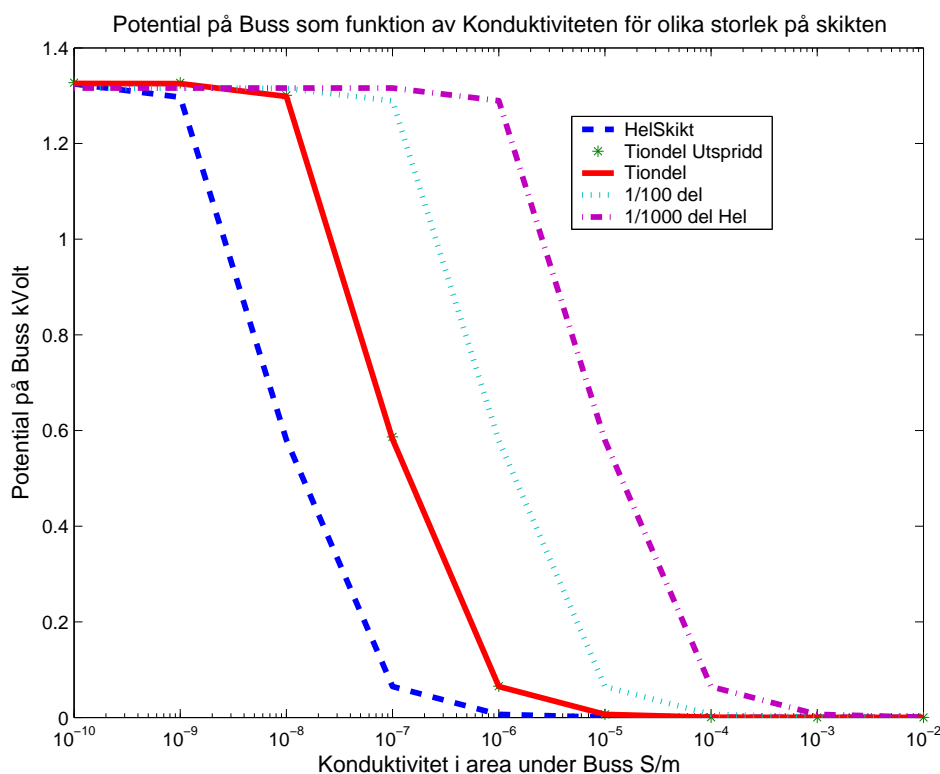
Figur 3.12. $U_{oc}(C_b)$ med $I_{sc} = 0.77$ mA, och $U_{ign}(C_b)$

3.2.3 Varierande area mellan buss och jord som funktion av konduktiviteten

För att få något begrepp om hur en ledande kropp under bussen avleder spänningen har det gjorts 2D-simuleringar med varierande storlek och ledningsförmåga på en ledande kropp som binder bussen med jord. Från en tusendel till hela bussens undersida. Detta görs m.h.a. att sätta en komplex permittivitet som delområdesvillkor³ för den ledande ytan:

$$\tilde{\epsilon} = 1 - j \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0} \quad (3.10)$$

där σ är konduktiviteten. Dessa simuleringar är gjorda på **Buss 1** placerad 9 meter från mittfasen med en höjd ovan mark på 0.4 meter. Figuren visar att



Figur 3.13. Konduktivitet som funktion av arean

konduktivitet och area är proportionella mot varandra. Då arean minskar en tiondel krävs det 10 gånger större konduktivitet för att få ner spänningen till noll.

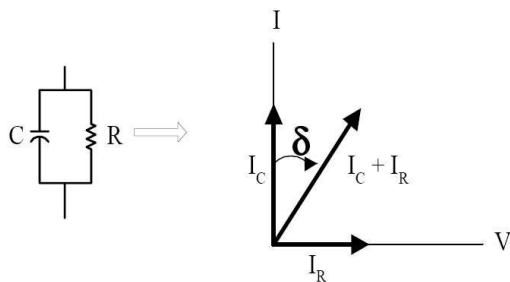
³subdomain settings

Kapitel 4

Mätningar

4.1 Mätning av impedans på däck

Man kan tro att ett däck totalt isolerar ett fordon från jord, men det är inte alltid fallet. För att få något begrepp om huruvida ett fordons däck påverkar dess impedans till jord har mätningar på två olika bussdäck gjorts. Dessa mätningar genomfördes med $\tan\delta$ mätning. Vinkeln δ kallas för förlustvinkel. I en perfekt kondensator har man 90 graders vinkel mellan spänning och ström. Den ström som går genom isolationen är rent kapacitiv. Men om isolationen inte är perfekt kommer det att uppstå en resistiv ström, I_R , som minskar vinkeln mellan spänning och ström med vinkeln δ se figur 4.1. Mätinstrumentet



Figur 4.1. $\tan\delta$

som använts kallas *IDA 200* och är ett system för isolationsdiagnostisering. Det som mäts är kapacitans och dielektriska förluster. Mätningen görs genom att lägga på en spänning på 140 V mellan fälg och kontaktytan mot mark, enligt figur 4.2.

Man får ett värde på parametrarna c' och c'' vilka förhåller sig till vinkeln δ ,



Figur 4.2. $\tan\delta$ mätning på ett bussdäck

resistans och kapacitans enligt följande samband

$$\begin{aligned} \tan\delta &= \frac{I_R}{I_C} = \frac{c''}{c'} \\ C &= c' & c' &= \varepsilon' \cdot c_0 \\ R &= \frac{1}{\omega c''} & c'' &= \frac{\sigma}{\omega \cdot \varepsilon_0} \cdot c_0 \end{aligned} \quad (4.1)$$

Tabell 4.1 visar beräknade värden för kapacitans och resistans samt däcktyp och mått. De två olika typer av däck som mätningarna gjordes på kan ses

	Däck 1	Däck 2
Typ	Michelin X 295/80 R 22,5	Michelin X 275/70 R 22,5
Bredd	0.25 m	0.23 m
Radie	0.52 m	0.49 m
c'	1786.5 pF	55385 pF
c''	862.75 pF	169000 pF
R_d	3.6895 Mohm	0.018835 Mohm
C_d pF	1786.5 pF	55385 pF

Tabell 4.1. Mått samt mätvärden vid däckmätning

i figur 4.3. Då det sitter mer än ett däck på ett fordon blir däckens totala



Figur 4.3. tv: Däck 1, th: Däck 2

impedans till jord en parallellkoppling av impedanserna hos samtliga däck enligt ekvation 4.2.

$$Z_{d-n-hjul} = \frac{1}{j\omega(\bar{c}) \cdot n} = \frac{1}{j\omega(c' - jc'') \cdot n}$$

$$\iff \quad (4.2)$$

$$Z_{d-n-hjul} = \frac{1}{n} \cdot R_d \parallel C_d = \frac{1}{n} \cdot R_d \cdot \frac{1}{j\omega C_d} \cdot \frac{1}{R_d + \frac{1}{j\omega C_d}}$$

Denna impedans kommer att användas i en ekvivalent krets i analysen av mätresultaten som kommer senare i rapporten.

I appendix B kan mätvärden på c' och c'' tagna direkt från mätinstrumentet hittas. Då mätningen gjordes för ett frekvenssvop anges värdena för respektive frekvens. Värdena på c' och c'' i tabell 4.1 är ett medelvärde för respektive däck enligt:

$$c(\text{medel}) = \frac{c(\text{däck}) + c(\text{däck vridet } 100^\circ)}{2} \quad (4.3)$$

4.2 Uppbyggnad och mätning av modell

För att vara väl förberedd inför de verkliga mätningarna konstruerades en miniatyrmodell av en 12 m lång buss skala 1:20, dessa mätvärden jämfördes med en 3D-simulering av samma modell. Bussens mått kan ses i tabell 4.2. En

enhet meter	skala 1:1	skala 1:20
Längd	12	0.6
Bredd	2.5	0.125
Höjd	3.1	0.155
Höjd över mark	0.021	0.42
LedningsLängd	30-34	1.5-1.7
LedningsHöjd	17.6	0.88
LedningsRadie	0.08	0.004

Tabell 4.2. Mått på modell

höghög (1 G Ω) resistiv 1:1000 prob användes för mätning av influensspänning. För att få modellen flytande placerades den på en isolerande puck m.h.a. ett vattenpass för att undvika lutning. 11 mätvärden togs med en spänning på ledningen från 0V-40kV. De första simuleringarna gav en betydligt högre spänning. Hänsyn togs då till ledningens längd vilket resulterade i ett mer med verkligheten överensstämmande resultat.

I figur 4.4 saknas gavlarna vilka sattes dit m.h.a. aluminiumfolie, detta för

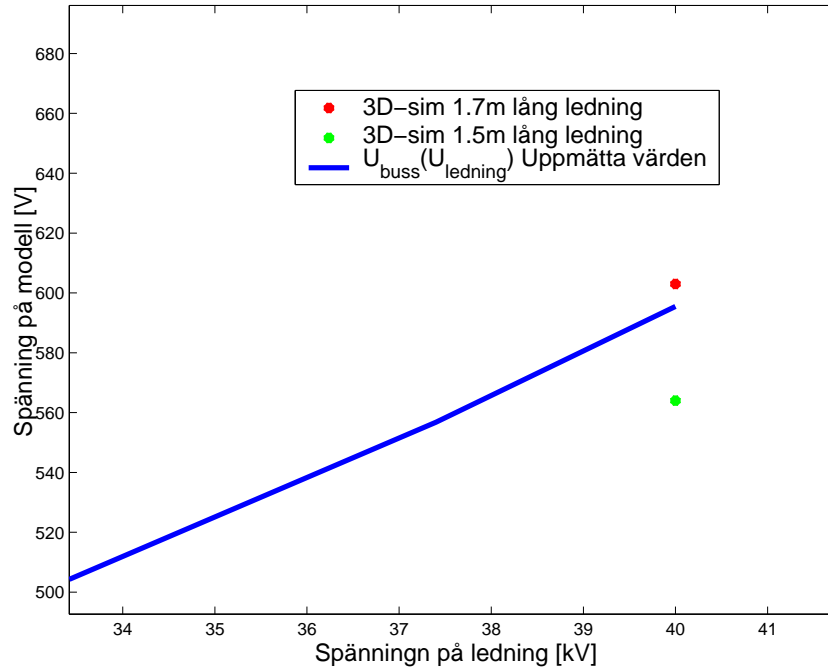


Figur 4.4. Mätning på modell

att man till en början trodde de endast skulle ha en liten inverkan på den influerade spänningen. Det visade sig att med gavlarna steg 40 kV-spänningen

på modellen med cirka 10-15 V.

I figur 4.5 ses spänningen på bussen (med gavlar) som funktion av ledningsspänningen, plottad i samma figur som de 3-dimensionella 40 kV-värdena med en ledningslängd på 1.7 och 1.5 meter. Mätning med modellen placerad i mit-



Figur 4.5. Spänning på modell som funktion av ledningsspänning

ten och rakt under ledningen gav en spänning på 595 V. Simuleringarna gav med de olika ledningslängderna spänningen enligt nedan:

$$U(1.5m) = 564 V$$

$$U(1.7m) = 603 V$$

Som synes stämmer mätning och simulerade värden väl överens med varandra. Vad gäller kortslutningsströmmen var den uppmätta något större än den beräknade.

$$I_{sc-mät}(40kV) = 13\mu A$$

$$I_{sc-teori}(40kV) = 11\mu A$$

Denna skillnad visar på ett fel mellan uppmätt och beräknad ström i storleksordningen $\pm 18\%$.

4.3 Bussmätningar

Mätningarna ägde rum vid Volvo Truck Center i Huddinge. Bussen som användes vid de verkliga mätningarna är **Buss 2** med mått enligt figur 3.11 och tabell 3.4. Bussen ställdes upp 15.5 meter från mittenfasen då detta läge var det bästa möjliga med tanke på närliggande föremål såsom parkerade bussar, stängsel m.m. Figur 4.6 visar 220 kV-ledningen i Huddinge. Man kan tydligt se de två ledarna per fas.

Mätningarna utfördes med en multimeter, som anslöts till diverse olika stäl-



Figur 4.6. Fotografi av ledningsstolpe och spann vid mätplatsen i Huddinge

len på bussen, först med däck stående direkt på grusplanen, därefter med bussen uppkörd på isolerande plattor enligt figur 4.7. Mätningarna togs på ett flertal olika ställen runt bussens undersida och chassi. Resultat av mätningar-



Figur 4.7. Mätning av influensspänning på uppställd buss

na kan ses i tabell 4.3.

Varför spänningen på bussen inte kommer i närheten av simulerade och beräk-

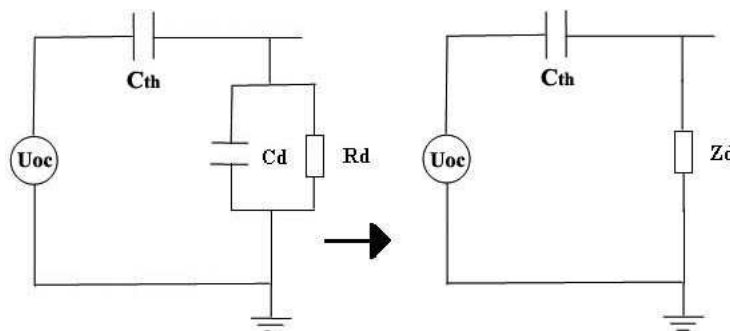
	Utan isolerande plattor	Med isolerande plattor
U_{buss}	1.7 V	152 V

Tabell 4.3. Mätresultat av spänning på **Buss 2**

nade värden kan förklaras av att däckens ledningsförmåga trots de isolerande skivorna kan ha en inverkan på bussens influensspänning. En ekvivalent krets där hänsyn till både däck och isolerande skivor tas kan ge en bättre förståelse av mätresultaten. Uppbyggnad och beräkning på en sådan krets görs i nästa avsnitt.

4.4 Analys av mätresultat

Det ekvivalenta schemat för bussen vid mätningen utan isolerande skivor ser ut enligt figur 4.8 nedan [11]. Där C_{th} är théveninekvivalentens kapacitans sett mellan buss och jord då samtliga spänningskällor är kortslutna, d.v.s. då kraftledningen är jordad. Numeriskt blir denna kapacitans bussens kapacitans till jord då kapacitansen mellan buss och kraftledning är jämförelsevis liten.



Figur 4.8. Ekvivalent kretsschema av buss med däck

U_{oc} = bussens tomgångsspänning utan däck

C_d = däckens kapacitans

R_d = däckens resistans

Z_d = däckens impedans

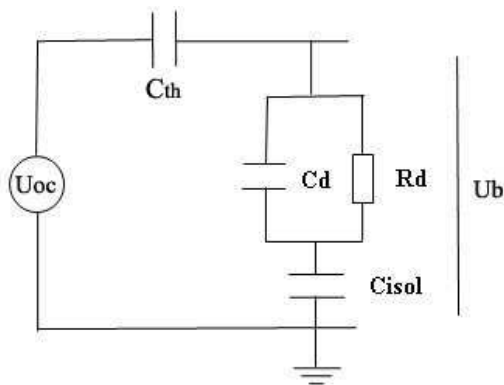
De uppmätta värdena ur tabell 4.3 är som sagt tagna från **Buss 2** placerad 15.5 meter från mittenfasen med en höjd över mark på ca:0.35 meter. Dessa värden jämföres med resultaten erhållna från teorin med en tillkopplad impedans för däcken Z_d beräknad ur ekvation 4.2. Tabell 4.4 visar spänningen på bussen med 4 st parallellkopplade däck med värden på kapacitans och resistans tagna ur tabell 4.1 för respektive däcktyp. Med hänsyn tagen till multimeterns impedans som är $10\text{ M}\Omega$ sjunker dessa värden med ca: 1%.

V_b (Däck 2) ser ut att stämma mest överens med mätresultaten. Alternativt

Buss 2 ,x=15.5m ,h=0.35	Analytisk	Numerisk 2D	Numerisk 3D
U_{oc} [V] Utan Däck	923	921	1077
I_{sc} [mA]	0.37	0.35	0.36
U_b (Däck 1) [V]	123.55	123.28	144.16
U_b (Däck 2) [V]	1.5728	1.5693	1.8352

Tabell 4.4. Erhållna spänningar enligt kretsschema av buss med däck. U_{oc} = tomgångsspänning och I_{sc} = kortslutningsström utan däck

(Däck 1) fast då mer ledande, tack vare axeltrycket på däcken. Om man nu isolerar bussen m.h.a. att köra upp den på isolerande skivor, kan även detta modelleras i en ekvivalent krets genom att placera ytterligare en kapacitans mellan impedansen för bussens däck och jord, enligt figur 4.9. Denna kapa-



Figur 4.9. Ekvivalent kretsschema av buss med däck och isolerande skivor

citans beräknas ur ekvation 4.4, där ϵ_r är permittiviteten för de isolerande skivorna.

$$C_{isol} = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} \quad (4.4)$$

Buss 2 , x=15.5m ,h=0.35	Analytisk	Numerisk 2D	Numerisk 3D
$U_b(\text{Däck 1}) C_{isol} = 5000\text{pF}$ [V]	265.3	256.9	271.9
$U_b(\text{Däck 1}) C_{isol} = 7000\text{pF}$ [V]	230.4	222.8	234.5
$U_b(\text{Däck 1}) C_{isol} = 9000\text{pF}$ [V]	209.5	202.4	212.4
$U_b(\text{Däck 2}) C_{isol} = 5000\text{pF}$ [V]	186.6	180.1	188.5
$U_b(\text{Däck 2}) C_{isol} = 7000\text{pF}$ [V]	141.6	136.4	141.8
$U_b(\text{Däck 2}) C_{isol} = 9000\text{pF}$ [V]	114.1	109.8	113.7

Tabell 4.5. Spänningen U_b som funktion av C_{isol}

$$A = (\text{antal däck}) \cdot L_{kontaktyta} \cdot B_{kontaktyta}$$

$$d = 0.0012 \text{ m} = \text{skivornas tjocklek}$$

Om man låter $\varepsilon_r = 4$ och sätter däckens kontaktbredd till 0.25 m och låter däckens kontaktarens längd $L_{kontaktyta}$ öka från 0.2-0.3 m, fås ett värde på C_{isol} från 5000 - 9000 [pF]. Tabell 4.4 visar spänningen V_b i figur 4.9 som funktion av de isolerande skivornas kapacitans C_{isol} .

Med hänsyn tagen till de isolerande skivorna blir spänningen på bussen något högre. Spänningen U_b i kretsen är i samma storleksordning som den uppmätta vilket pekar på att det ekvivalenta kretsschemat är gångbart. Bussens tyngd ger ett tryck på däcken som i sin tur ökar dess ledningsförmåga, men i hur stor grad detta sker har inte undersökts. Om man bortser från tryckets inverkan ser det ut som om bussens däckimpedans ligger någonstans mellan de uppmätta däckimpedanserna.

Kapitel 5

Slutsatser och framtida arbete

Som beräkningar och simuleringar visar är den maximala strömmen, som kan förekomma då en 18 meter lång buss står uppställd under en 220 kV's kraftledning av den konfiguration som finns i Huddinge, ca: 0.77 mA. Denna ström är enligt statistiken under känseltröskeln för män, men kommer att uppfattas av de flesta kvinnor och barn. Strömstrykan kommer dock enligt ILO's undersökning inte uppfattas som smärtsam vid lätt beröring (Touch).

Enligt EU-direktivet ligger denna strömstyrka under minimivärdet på 1 mA för yrkesverksamma, t.o.m. om man lägger till den procentuella skillnaden mellan uppmätt och beräknad kortslutningsström vid modellmätningarna blir strömstyrkan ca: 0.9 mA. Den elektriska fältstyrkan vid marknivå har ett maxvärde på ca: 1.4 kV/m för 220kV's ledningen i Huddinge vilket är lägre än insatsvärdet för allmänheten på 5 kV/m. Även om man sänker ledningarna 5 m blir maximala beräknade fältstyrkan strax utanför ytterfaserna 3kV/m.

Vid mätning av däckens ledande egenskaper visade sig däck 2 vara mycket mer ledande än däck 1, detta pekar på att influensspänningen på en buss kan variera kraftigt beroende på däcktyp. Det är också konstaterat, enligt en undersökning i EPRI's *ReferenceBook*, att spridningen i uppmätt uppladdningsström är mycket beroende på underlag. Den största spridningen erhöles då fordonet stod på en grusväg. Den uppmätta strömmen varierade då mellan 0.1% och 100% av den maximala.

Influensspänningen på ett fordon blir i praktiken vanligtvis mycket lägre eftersom däckens och underlagets ledningsförmåga påverkar den. Det maximala värdet av influensspänning nås endast i undantagsfall.

Vad gäller gnistbildning har man visat att då en person kommer i kontakt

med ett uppladdat fordon under en kraftledning blir beröringsspänningen inte lika stor som fordonets spänning till jord. Detta för att en person som befinner sig under kraftledningen själv blir uppladdad och minskar spänningsskillnaden mellan fordon och jord. Detta hindrar inte att en gnista från ett fordon kan upplevas som obehaglig. I ogynnsamma fall då en person, som är helt jordad, kommer i kontakt med den isolerade bussen på 18 meter kan energier i en eventuell gnista enligt erhållna data nå storlekar på 3.3 mJ, vilket är tillräckligt för att antända en bränsle-luftblandning under ideala förhållanden. Men enligt ekvation 2.29 ligger influensspänningarna på de två bussarna under gränsen för minimal antändningsspänning U_{ign} .

Ett intressant framtida arbete vore att studera skillnaden i antändningsenergies för enstaka och repetitiva gnistor. Likaså vore det intressant med en mer ingående undersökning av fordonskapacitanser till jord, med och utan däck. Dessutom kan det vara av intresse att studera ledningsförmågan i/på däck som funktion av axeltrycket. Antändningsenergies för olika bränsle-luftblandningar såsom diesel, etanol, m.m. skulle också kunna vara något att studera.

Litteraturförteckning

- [1] Oetiker, Tobias et al. *The Not So Short Introduction to L^AT_EX 2_ε*¹
- [2] *EPRI Transmission Line Reference Book 345 kV and Above* revised 1979
- [3] Sammanfattning av projektet Åtgärder mot elektriska och magnetiska fält i byggnader Ett samarbetsprojekt mellan Chalmers och NCC *Reduktion av elektriska och magnetiska fält i byggnader* revised 1979
- [4] <http://www.who.int/en/> - *World Health Organization* 2005
- [5] Göran Engdahl, Hans Edin, Roland Eriksson, Sven Hörnfeldt, Niclas Schönborg *Electrotechnical modeling and design*
- [6] Ekelöf, Stig *Kompendium i Fältteori* Studienämnden 1964
- [7] Petersson, Gunnar *Teoretisk Elektroteknik Stationära fenomen* 1998 Institutionen för Teoretisk Elektroteknik, Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm
- [8] Söder, Lennart *Statisk Analys av Elsystem* Oktober 2001 Institutionen för elkraftteknik, Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm
- [9] Sang C. Kim, Doo H. Kim *Fuzzy Based Approach for the Safety Assessment of Human Body under ELF EM field Considering Power System States* Energy Management and Power Delivery, 1998. Proceedings of EMPD '98. 1998 International Conference on Volume 2, 3-5 March 1998 Page(s):369 - 374 vol.2
- [10] Olsen, R.G. and Jaffa, K.C *Electromagnetic Coupling from Power Lines and Magnetic Field Safety Analysis* IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, No. 12, pp 3595-3607, Dec. 1984.

¹www.nada.kth.se/datorer/tex/doc/latex/general/lshort.pdf

- [11] Chun-Ju Lin, Huey-Ru Chaung, Kun-Mu Chen, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, VOL. 32, No. 1, February 1990 *Steady-State and Shock Currents Induced by ELF Electric Fields in a Human Body and a Nearby Vehicle*
- [12] Kaidanov, F.G. Izvestiya Akademii Nauk SSSR. Energetika i Transport Vol. 25 *Electrostatic Induction at a Motor Vehicle Located near an ExtraHigh-Voltage Line*
- [13] Reilly, Patrick, J. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, No. 9 September 1982, , The Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory, Laurel, Md . 20707 *Characteristics Of Spark Discharges from Vehicles Energized by AC Electric Fields*
- [14] International Labour Organization 1994. Occupational Safety and Health Series No. 69. *Protection of workers from power frequency electric and magnetic fields*
- [15] STS Science, Technology and Safety. *SSERC Bulletin 205*
- [16] Comsol The Knowledge Base <http://www.comsol.se/support/>

Appendix A

Terminologi - Symboler och förkortningar

Enligt praxis betecknas vektorstorheter med **fet** stil.

Förkortningar

<i>Förkortning</i>	<i>Engelsk beskrivning</i>	<i>Svensk beskrivning</i>
ELF	Extremely Low Frequency	Extremt Låg Frekvens
UHV	Ultra High Voltage	Ultra Hög Spänning
EHV	Extremely High Voltage	Extremt Hög Spänning
Comsol		Numeriskt simuleringsprogram
FEM	Finite Element Method	Finita Element Metoden
MATLAB	Numerical math program	Numeriskt beräkningsprogram
ICNIRP	International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection	Internationella kommissionen för skydd mot ickejoniserande strålning
EPRI	Electric Power Research Institute	
ILO	International Labour Organization	
STS	Science, Technology and Safety	

Versaler

<i>Symbol</i>	<i>Beskrivning</i>	<i>enhet</i>
E	Elektrisk fältstyrka	$\frac{V}{m}$
B	Magnetisk flödestäthet	T
<i>C</i>	Kapacitans	F
C_b	Bussens kapacitans till jord	F
<i>V</i>	Elektrisk Potential	V
U_{oc}	Tomgångsspänning	V
U_{ign}	Minimal spänning för antändning	V
<i>Z</i>	Impedans	Ω
Z_b	Bussens impedans till jord	Ω
<i>X</i>	Reaktans	Ω
<i>R</i>	Resistans	Ω
Z_d	Däckimpedans	Ω
H_i	Höjden för ledare i	m
S_{ij}	Avstånd mellan ledare i och speglingen av ledare j	m
W_e	Elektrisk energi	J
∇	Nabla operatorn $(\frac{d}{dx}, \frac{d}{dy}, \frac{d}{dz})$	

Gemener

<i>Symbol</i>	<i>Beskrivning</i>	<i>enhet</i>
\mathbf{k}	Potentialkoefficientmatris	$\frac{m}{F}$
f	Frekvens	$\frac{1}{s}$
ω	Vinkelfrekvens	$\frac{rad}{s}$
a_{ij}	Avstånd mellan ledare i och ledare j	m
k_{ij}	Potentialkoefficienterna för ledning i och j	$\frac{m}{F}$
r_i	Radie för ledning i	m
r_{i-ekv}	Den ekvivalenta radien för ledning i	m
σ	Konduktivitet, Elektrisk ledningsförmåga	$\frac{A}{Vm}$
ε	Permittivitet $\varepsilon_0 = 8.854187817 \cdot 10^{-12}$	$\frac{F}{m}$
ρ	Resistivitet	Ωm
q	Laddning	C
ρ_l	Linjeladdningstäthet	$\frac{C}{m}$
c' och c''	Real och imaginärdel av komplex kapacitans	F

Appendix B

Mätdata från $\tan\delta$ –mätningar på bussdäck

Däck 1

Michelin X 295/80 R 22,5

frekvens	c'	c''
1000	9.9474E-10	3.6495E-10
470.59	1.1863E-9	4.4735E-10
216.22	1.4013E-9	5.6196E-10
100	1.6616E-9	7.3717E-10
46.512	2.0156E-9	1.0572E-9
21.563	2.4390E-9	1.4879E-9
10	2.9740E-9	2.2687E-9
4.6417	3.1699E-9	3.2285E-9
2.1546	3.6374E-9	6.1937E-9
1	4.1081E-9	1.5655E-8

Däck 1 vridet 100 grader

Michelin X 295/80 R 22,5

frekvens	c'	c''
1000	8.7089E-10	2.8188E-10
470.59	1.0095E-9	3.3216E-10
216.22	1.1657E-9	4.1071E-10
100	1.3558E-9	5.3834E-10
46.512	1.5962E-9	7.4636E-10
21.563	1.8940E-9	1.0750E-9
10	2.3032E-9	1.6711E-9
4.6417	2.7030E-9	2.5681E-9
2.1546	3.1572E-9	5.3441E-9
1	3.5902E-9	1.1374E-8

Däck 2

Michelin X 275/70 R 22,5

frekvens	c'	c''
470.59	2.6939E-8	3.741E-8
216.22	3.8473E-8	5.5856E-8
100	4.7362E-8	9.3623E-8
46.512	5.4792E-8	1.7743E-7
21.563	6.2318E-8	3.6145E-7
10	7.0654E-8	7.5930E-7
4.6417	8.0093E-8	1.6153E-6
2.1546	9.0891E-8	3.4591E-6
1	1.0505E-7	7.4377E-6

Däck 2 vridet 100 grader

Michelin X 275/70 R 22,5

frekvens	c'	c''
470.59	2.9055E-8	3.8539E-8
216.22	4.0636E-8	5.7022E-8
100	4.9474E-8	9.5668E-8
46.512	5.6947E-8	1.8155E-7
21.563	6.4594E-8	3.7003E-7
10	7.3083E-8	7.7727E-7
4.6417	8.2724E-8	1.6532E-6
2.1546	9.3788E-8	3.5392E-6
1	1.0708E-7	7.5958E-6

