

BERÄKNINGSMETODER FÖR ELNÄT UNDER STORA OSÄKERHETER

RAPPORT 2020:711



Beräkningsmetoder för elnät under stora osäkerheter

Överspänningar och övertoner

OSCAR LENNERHAG – JAN LUNDQUIST – MATH BOLLEN

ISBN 978-91-7673-711-8 | © Energiforsk december 2020

Energiforsk AB | Telefon: 08-677 25 30 | E-post: kontakt@energiforsk.se | www.energiforsk.se

Förord

Projektet, *Beräkningsmetoder för elnät under stor osäkerhet*, är resultatet av ett licentiatarbete som förväntas fortsätta och avslutas med en doktorandexamen. Projektet har utvecklat effektiva beräkningsverktyg som är lämpliga för elnät med stor osäkerhet. Tillämpningsområden är i huvudsak isolationskoordinering och elkvalitet, då elektriska resonanser är grundläggande för dessa tillämpningsområden.

Projektet har byggt upp erfarenhet kring vilka osäkerheter som uppstår till följd av att ny utrustning (kablar, omriktare etc.) ansluts till elnätet, samt andra osäkerheter som nätets driftläge, samt hur dessa osäkerheter kan hanteras.

Beräkningsmetoderna kan appliceras på isolationskoordinering och elkvalitetsstudier.

Projektet är utfört av industridoktoranden Oscar Lennerhag på Independent Insulation Group Sweden AB och han har handledts av professor Math Bollen på Luleå Tekniska Universitet. Projektet tillhör programmet *Risk- och Tillförlitlighetsanalys* och är samfinansierat med Energimyndigheten och Svenska kraftnät.

Ett extra stort tack till referensgruppen, som på ett mycket givande sätt har bidragit till projektet:

- Erik Thunberg, Svenska kraftnät
- Christian Frank Flytkjaer, Energinet.dk
- Shima Mousavi Gargari, TenneT
- Christer Kauma, Vattenfall
- Per Norberg, Vattenfall
- Claes Ahlrot, E.ON
- Gunilla Le Dous, Göteborg Energi

Programmets Risk- och Tillförlitlighetsanalys programstyrelse, som initierat, följt upp och godkänt projektet, består av följande ledamöter:

- Jenny Paulinder, Göteborg Energi AB (ordförande)
- Josefine Grundius, Ellevio AB
- Mari Jakobsson, Svenska kraftnät
- Hans Andersson, Vattenfall Eldistribution AB
- Kenny Granath, Mälarenergi Elnät AB
- Hampus Halvarsson, Jämtkraft AB
- Magnus Brodin, Skellefteå Kraft AB
- Ola Löfgren, Föreningen Industriell Elteknik (FIE)
- Carl Johan Wallnerstöm, Energimarknadsinspektionen
- Anders Richert, Elsäkerhetsverket

Stort tack också till samtliga företag har varit engagerade i programmet Risk- och Tillförlitlighetsanalys:

- Göteborg Energi AB
- Ellevio
- Svenska kraftnät
- Vattenfall Eldistribution AB
- Elinorr AB
- Mälarenergi Elnät AB
- Jämtkraft AB
- Skellefteå Kraft AB
- AB PiteEnergi
- Jönköping Elnät AB
- Borås Elnät AB
- Föreningen Industriell Elteknik (FIE)

Stockholm november 2020
Energiforsk AB

Susanne Stjernfeldt
Forskningsområde Elnät, Vindkraft och Solel

Sammanfattning

Denna rapport beskriver ett antal osäkerheter som påverkar spridningen av övertoner i låg- och mellanspänningsnät samt resonanta överspänningar i transmissionsnät. Inverkan av osäkerheter illustreras i ett flertal realistiska nätmodeller. Vidare presenteras två metoder som elnätsföretag kan tillämpa för att ta hänsyn till osäkerheter i studier på spridning av övertoner i låg- och mellanspänningsnät samt åsköverspänningar i HVDC-förbindelser.

Den första metoden kan användas för att aggregera ett givet nät till ekvivalenta impedanser, samtidigt som det bevarar nätets stokastiska egenskaper. Den aggregerade modellen kan sedan användas för att representera inverkan av nätet i studier samtidigt som beräkningsbördan minskas avsevärt jämfört med att modellera nätet i detalj. Metoden har illustrerats genom att applicera den på tre svenska lågspänningsnät.

Den andra metoden kan användas för att bestämma representativa överspänningsnivåer i HVDC-förbindelser med både kabel och luftledning. Målet med metoden är att minimera antalet beräkningar som krävs för att bestämma de överspänningar som kabeln utsätts för relaterat till MTBF (*mean time between failures*). Metoden demonstreras genom att applicera den på en fallstudie för en ± 525 kV HVDC-förbindelse.

Summary

This report describes a number of uncertainties that affect the spread of harmonics in low and medium voltage networks, as well as resonant overvoltages in transmission networks. The impact of uncertainties is illustrated using realistic network models. Furthermore, two methods are presented that network operators can use to consider uncertainties in studies on propagation of harmonics in low- and medium-voltage networks as well as lightning overvoltages in HVDC connections.

The first method can be used to aggregate a given network to equivalent impedances, while preserving the stochastic properties of the network. The aggregate model can then be used to represent the impact of the network in studies, while reducing the computational burden significantly compared with modelling the network in detail. The method has been illustrated by applying it to three Swedish low-voltage networks.

The second method can be used to determine representative overvoltage levels in HVDC connections with both cable and overhead lines. The aim of the method is to minimize the number of calculations required to determine representative overvoltages that the cable is exposed to, related to the MTBF (mean time between failures). The method is demonstrated by applying it to a case study for a ± 525 kV HVDC connection.

Innehåll

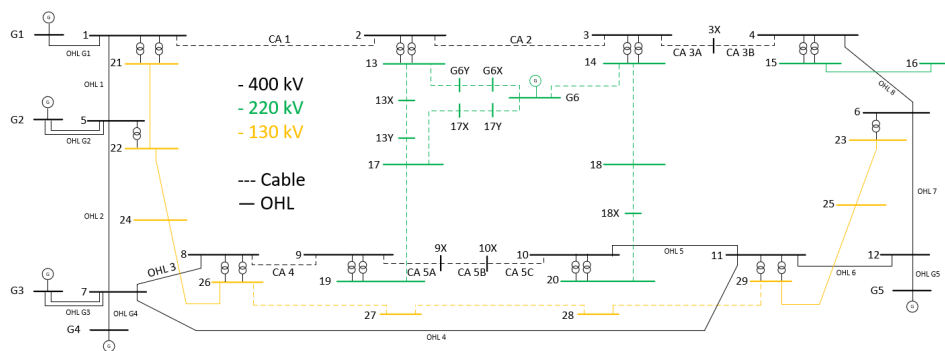
1	Inledning	8
1.1	Bakgrund	8
1.2	Motivering	9
2	Inverkan av osäkerheter på spridning av övertoner och resonanta överspänningar	10
2.1	Osäkerheter på grund av variationer i tid	10
2.2	Osäkerheter på grund av framtida utveckling av nätet	12
2.3	Osäkerheter vid spänningssättning av transformatorer	13
2.4	Osäkerheter i underliggande nät och laster	14
3	En stokastisk aggregerad övertonslastmodell	15
3.1	Metodbeskrivning	15
3.1.1	Översikt	15
3.1.2	Nätets admittansmatris	16
3.1.3	Kundlastmatrisen	16
3.1.4	Beräkning av ekvivalenta impedanser	17
3.1.5	Förenklad representation av de ekvivalenta impedanserna	17
3.1.6	Generering av korrelerade sampel	17
3.2	Sammanfattning av fallstudie	18
4	En förbättrad statistisk metod för att beräkna åsköverspänningar i HVDC luftlednings/kabelsystem	21
4.1	Metodbeskrivning	21
4.1.1	Karaktärisering av ledningen	22
4.1.2	Statistisk beräkning	22
4.1.3	Fastställande av representativa åsköverspänningsnivåer	23
4.2	Sammanfattning av fallstudie	23
4.2.1	Karaktärisering av ledningen	24
4.2.2	Statistisk beräkning	27
4.2.3	Fastställande av representativa överspänningar	28
5	Diskussion och rekommendationer	29
5.1	Inverkan av osäkerheter på spridning av övertoner och resonanta överspänningar	29
5.2	En stokastisk aggregerad lastmodell	29
5.3	En förbättrad statistisk metod för att bestämma representativa överspänningar i HDDC luftlednings/Kabelsystem	30
6	Slutsatser	32
6.1	Inverkan av osäkerheter på spridning av övertoner och resonanta överspänningar	32
6.2	En stokastisk aggregerad lastmodell	32
6.3	En förbättrad statistisk metod för att bestämma representativa överspänningar i HDDC luftlednings/Kabelsystem	33
7	Referenser	34

1 Inledning

Denna rapport sammanfattar delresultat från projektet "Beräkningsmetoder för elnät under stor osäkerhet", som finansieras av Energiforsk inom riskanalysprogrammet. Övriga finansiärer är Svenska kraftnät och Energimyndigheten. Projektet förväntas avslutas under första halvan av 2022.

Projektet utförs av Oscar Lennerhag (industridoktorand, Independent Insulation Group), Math Bollen (huvudhandledare, Luleå Tekniska Universitet) och Jan Lundquist (bihandledare, Independent Insulation Group). Denna rapport baseras till största del på projektets halvvägsrapport [1] samt ett urval av de artiklar och rapporter som publicerats hittills [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8].

De simuleringar som beskrivs i rapporten har genomförts i det exempelnät som beskrivs i [2] och [5], härnäst kallat "exempelnätet". Ett enlinjeschema visas i Figur 1-1.



Figur 1-1. Översikt över exempelnätet.

1.1 BAKGRUND

Kraftsystemet står inför ett antal förändringar som en del av övergången till ett mer hållbart energisystem, inklusive en storskalig integration av förnybar generering, förändringar i nätet som införande av fler kablar vid högre spänningsnivåer, samt förändringar i lastkompositionen, t.ex. på grund av en övergång till energieffektiva apparater. Dessa förändringar kommer att leda till nya tekniska utmaningar i transmissions- och distributionsnät [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17], [18], [19].

Isolationskoordinering och elkvalitetsstudier är viktiga verktyg vid planering och dimensionering av kraftsystemet. Resonanser påverkar både överspänningar och spridning av övertoner och det finns ett antal trender som påverkar resonanser, där den allmänna utvecklingen går mot resonanser vid lägre frekvenser och med mindre dämpning [9], [10]. Som en konsekvens av detta finns en ökad risk för förstärkning av lägre ordningens övertoner, samt en ökad risk för så kallade resonanta överspänningar. En storskalig integrering av förnybar generering och

förändringar i lastens sammansättning förväntas även leda till en ökad osäkerhet i frekvens och dämpning av resonanser [9], [10].

1.2 MOTIVERING

Beräkningsmetoder som används i studier baseras ofta på en antagen fullständig kunskap om systemet som studeras. Osäkerheter, t.ex. relaterade till systemets driftläggning eller modellering av komponenter, kan hanteras på flera sätt. Ett vanligt tillvägagångssätt är att utföra Monte Carlo-simuleringar, men beroende på problemets omfattning (modellens omfattning, antalet variabler och deras egenskaper, etc.) kanske detta inte är praktiskt eller ens genomförbart. Ett annat tillvägagångssätt är deterministiska metoder, som ofta använder någon form av "värsta fall" -förhållanden. Vid stor osäkerhet kan sådana metoder ge alltför pessimistiska resultat, med stora marginaler och höga kostnader som följd.

Det övergripande målet för projektet är att bidra till utvecklingen av ett robust, säkert och flexibelt kraftsystem, utan att begränsa mängden förnybar energi som kan anslutas. Detta kommer att uppnås genom utveckling av nya beräkningsmetoder som kan användas för att studera isolationskoordinering och elkvalitet i kraftsystem med stora osäkerheter.

2 Inverkan av osäkerheter på spridning av övertoner och resonanta överspänningar

När man studerar övertoner måste två aspekter beaktas: impedansen (käll- eller överföringsimpedans) och emissionen (övertonskällan). Även om båda kan förknippas med betydande osäkerheter, fokuserar denna rapport på impedansen. Impedansen påverkas av komponenter som är anslutna till nätet, såsom kablar, luftledning, transformatorer eller laster [20]. Som ett exempel kan lasten påverka både dämpningen av resonanser och resonansfrekvensen [20], [21]. Lasten varierar dock i tid och det är i allmänhet inte känt vilken utrustning som är ansluten till nätet vid en given tidpunkt. En annan osäkerhet är inverkan av kraftelektronik på nätets impedanskaraktäristik [22], [23], [24].

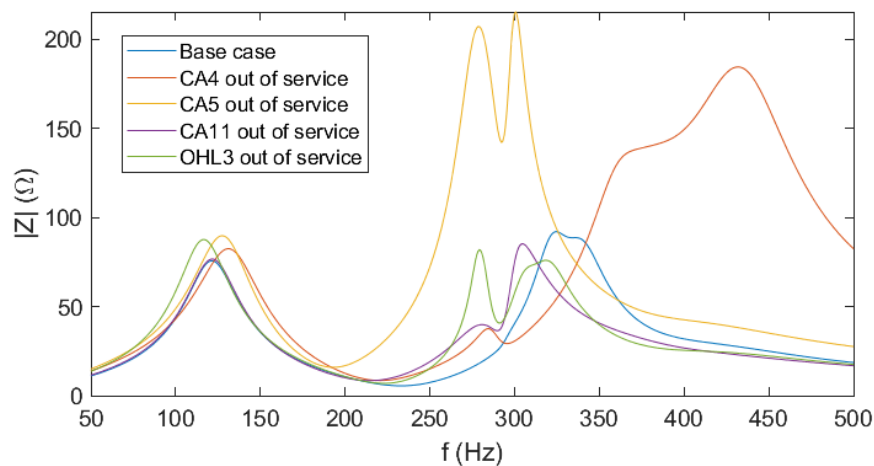
Temporära överspänningar kan orsakas av flera olika fenomen, såsom jordfel eller lastfrånkoppling [19]. Denna rapport fokuserar på temporära överspänningar förstärkta av resonanser, så kallade resonanta överspänningar. Resonanta överspänningar uppstår när en tillfällig vågformsdistorsion förstärks av en resonans, vilket kan leda till höga överspänningar. Ett typiskt exempel är mättning av transformatorer i kombination med resonanser vid låga frekvenser. När en transformator går i mättning (t.ex. vid inkoppling av en transformator eller vid felbortkoppling i närheten av en eller flera transformatorer) beter den sig som en strömkälla med höga övertonsströmmar vid bland annat 100 Hz och 150 Hz [25], [26]. Ifall källimpedansen har en parallellresonans, det vill säga en hög impedans, vid någon av dessa frekvenser kommer resonansen att exciteras av övertonsströmmen, med resonanta överspänningar som följd [19], [27]. Vid studier av resonanta överspänningar finns ett flertal osäkerheter att beakta, däribland modellering av komponenter (transformatorer, laster, vindkraftparker, etc.) och olika driftlägen i nätet.

Följande avsnitt redovisar ett urval av osäkerheter som påverkar spridning av övertoner och resonanta överspänningar, baserat i huvudsak på [3], [4], [5], [8].

2.1 OSÄKERHETER PÅ GRUND AV VARIATIONER I TID

Som en följd av ett mer flexibelt kraftsystem förväntas mer osäkerhet kring möjliga driftfall. Om en stor generator är ur drift kan detta leda till en försvagning av nätet och därmed lägre resonansfrekvenser. På samma sätt kan bortkoppling av ledningar eller kablar ha en betydande inverkan på nätets impedanskaraktäristik.

Som ett exempel visar Figur 2-1 källimpedansen sedd från nod 9 i exemplenätet för olika N-1-scenarier. Beroende på vilken komponent som tas ur drift kan påverkan på resonansfrekvensen och dämpningen vid en viss frekvens vara betydande.

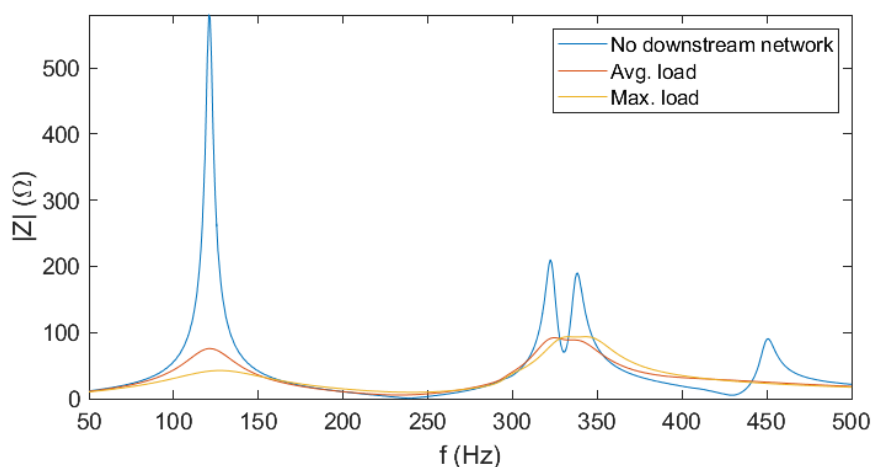


Figur 2-1. Inverkan av N-1 i exempelnätet.

Förnybara energikällor som använder kraftelektronik påverkar nätet både vad gäller resonansfrekvensen, t.ex. på grund av kablar i uppsamlingsnätet eller kapacitiva element i filter, samt genom emission av övertoner [22]. Samtidigt är förnybar generering intermittent, och mängden förnybar generering som är ansluten vid en given tidpunkt är inte känd i förväg.

Lasten varierar också med tiden. Även om det kan vara möjligt att förutsäga aggregerade lastprofiler är det i allmänhet inte känt vilken utrustning som är ansluten vid en given tidpunkt. Sett från högre spänningsnivåer har dock enskilda komponenter i lågspänningsnät sannolikt en försumbar inverkan på nätets impedanskaraktäristik jämfört med kablar på mellanliggande spänningsnivåer [20], [21], [28]. Eventuella variationer i lasten kan dock fortfarande ha en betydande inverkan på dämpningen.

Som ett exempel jämför Figur 2-2 tre belastningsfall i exempelnätet: ingen förbrukning (underliggande nät är fränkopplade), en uppskattad genomsnittlig förbrukning och maximal förbrukning. Underliggande nät modellerades i detalj ner till distributionstransformatorernas nedsida (400 V).

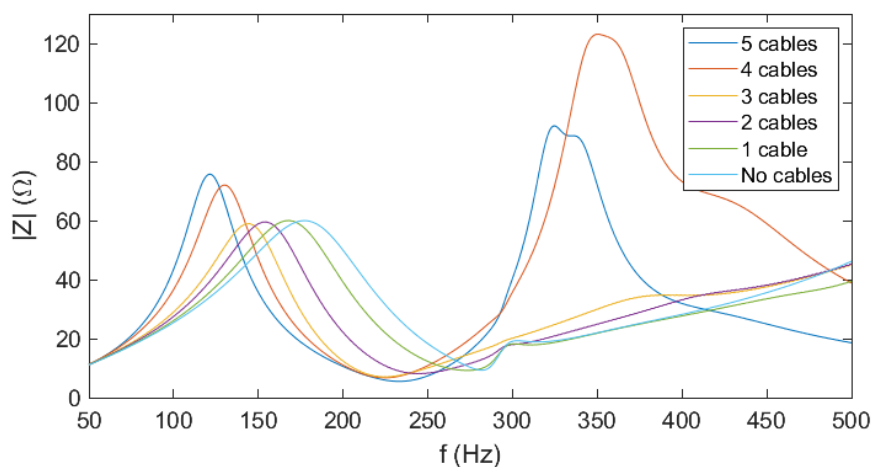


Figur 2-2. Inverkan av underliggande nät och laster i exempelnätet.

Som framgår av figuren bör underliggande nät och laster ej försummas då detta leder till en allvarlig underskattning av dämpningen vid lägre frekvenser.

2.2 OSÄKERHETER PÅ GRUND AV FRAMTIDA UTVECKLING AV NÄTET

Under planeringsfasen kan längden på en förbindelse samt valet av teknik (t.ex. markkablar, tunnelkablar eller luftledningar) vara okända. Eftersom kablar och luftledningar skiljer sig med hänsyn till deras elektriska parametrar kommer de att påverka resonanser på olika sätt. Förläggningen av kablar (t.ex. triangel eller platt förläggning) och skärmjordningen kan också påverka de resulterande impedansegenskaperna [20], men dessa detaljer är ofta inte kända under planeringsfasen. Figur 2-3 visar den resulterande impedansprofilen sett från nod 9 i exempelnätet för olika andel kabel vid 400 kV. Andelen kabel har en betydande inverkan på de resulterande resonanserna.



Figur 2-3. Inverkan av andel kabel på 400 kV i exempelnätet.

En annan osäkerhet är den framtida utvecklingen av lasten. Moderna kraftelektronikbaserade apparater och omriktare som används till solceller leder till ökad kapacitans i lågspänningsnät och bidrar med mindre dämpning jämfört med resistiva laster [22]. Inverkan på dämpningen är dock svår att bedöma på grund av en brist på jämförande mätningar av nätimpedansen [29]. Det är dessutom inte känt vilka kunder som kommer att installera solpaneler i framtiden.

Modelleringen av omriktare som används för HVDC eller förnybar generering kräver detaljerad information, t.ex. om reglersystemet, för alla driftlägen av relevans [20].

Som tidigare nämnts ger förnybar generering vanligtvis mindre kortslutningseffekt till systemet jämfört med konventionell generering, och en storskalig ersättning av konventionell produktion med kraftelektronikbaserad sådan kommer att leda till en försvagning av nät vid 50 Hz. Mer forskning behövs för att förstå inverkan på övertonsfrekvenser.

2.3 OSÄKERHETER VID SPÄNNINGSSÄTTNING AV TRANSFORMATORER

Som tidigare nämnts är en typisk orsak till resonanta överspänningar spänningssättning av transformatorer i kombination med resonanser vid låga frekvenser. Storleken på inkopplingsströmmen beror på transformatorns mätningsegenskaper, tidpunkten för spänningssättningen och eventuell remanens [30]. Tomgångstest ger inte tillräckligt med information för att fullt ut modellera mätningsegenskaperna varför antaganden är nödvändiga. Tidpunkten för spänningssättning påverkas av brytaregenskaperna och den använda inkopplingsstrategin (om en sådan används). Synkroniserad inkoppling kan användas för att reducera transformatorns inkopplingsström eller för att minimera kopplingsöverspänningar. Strategin vid transformatorinkoppling beror på transformatorns uppbyggnad [25]. En del strategier tar hänsyn till remanens, antingen genom att uppskatta remanensen baserat på information om spänningen vid bortkoppling eller genom att använda kontrollerad bortkoppling (för att få ett förutsägbart mönster i det remanenta flödet) följt av kontrollerad inkoppling. Mekanisk spridning i brytare måste beaktas. Osäkerheter inkluderar inverkan av mekanisk spridning och eventuella fel i uppskattningen av remanensen. Vid felbortkoppling kan den återvändande spänningen orsaka en form av okontrollerad spänningssättning. Tabell 2-1 visar den maximala inkopplingsströmmen vid slumpmässig och synkroniserad inkoppling, för olika nivåer av remanens, med hänsyn till mekanisk spridning. För synkroniserad inkoppling används en enkel strategi där fas L1 spänningssätts vid positiv spänningstopp, L2 112 grader efter L1 och L3 85 grader efter L1 [31]. Ytterligare information om fallstudien finns i [4], [8].

Resultaten visar att en enkel strategi för synkroniserad inkoppling fungerar bättre än slumpmässig inkoppling, även utan hänsyn till förekomsten av remanens. Genom att uppskatta det remanenta flödet kan inkopplingsströmmen minskas ytterligare, men inverkan av mekanisk spridning måste fortfarande beaktas, liksom eventuella fel i uppskattningen av remanensen.

Tabell 2-1. Inkopplingsström vid olika remanens och inkopplingsstrategi.

Strategi	Remanens (p.u.)	Medelström (kA)	Max. ström (kA)
Slumpmässig inkoppling	0	1,2	2,0
Slumpmässig inkoppling	0,5	1,5	3,0
Slumpmässig inkoppling	0,8	1,9	3,7
Kontrollerad inkoppling	0	0,1	0,6
Kontrollerad inkoppling	0,5	0,9	1,5
Kontrollerad inkoppling	0,8	1,6	2,3

2.4 OSÄKERHETER I UNDERLIGGANDE NÄT OCH LASTER

Underliggande nät och laster modelleras vanligtvis på ett förenklat sätt på grund av brist på information eller beräkningsmässiga avvägningar. Modelleringen av kundinstallationer och den resulterande inverkan på dämpningen är en av de största osäkerheterna i studier som involverar resonanser. Valet av modell (fullständig representation eller aggregerade modeller) kan ha stor inverkan på de beräknade resonanserna [20], [32].

3 En stokastisk aggregerad övertonslastmodell

Underliggande nät och laster bör beaktas i studier som behandlar övertoner eller resonanta överspänningar eftersom de kan ha en betydande inverkan på både frekvensen och amplituden hos resonanser [33], [24], [21]. Att inkludera underliggande nät och laster är dock en utmaning:

- Kundimpedansen varierar med tiden beroende på vilka enheter som är anslutna.
- Det saknas allmän kunskap om kundimpedansen vid övertonsfrekvenser.
- På grund av energieffektivitetsåtgärder och integrering av förnybar generering förväntas lasternas sammansättning förändras [9], [23].
- Detaljerad modellering av underliggande nät kräver betydande insatser vad gäller datainsamling, modellering samt beräkning.

För att studera inverkan av befintliga och framtida laster på spridningen av övertoner och resonanta överspänningar behövs stokastiska modeller, både på individuell kundnivå och aggregerade. När man tar fram lastmodeller för övertonsstudier används ofta två tillvägagångssätt (vanligtvis fokuserade på emissionen): mätbaserade metoder eller komponentbaserade metoder. Några exempel finns i [34], [35], [36], [37], [38]. För att utföra en detaljerad studie krävs dock betydande modelleringsinsatser och den information som krävs är sällan tillgänglig när studier utförs.

I [20] ges exempel på aggregerade harmoniska belastningsmodeller som utgår från begränsad information om underliggande nät. Även om sådana modeller kan vara lämpliga för att representera lasternas inverkan på högre spänningsnivåer är de i allmänhet inte tillräckligt detaljerade för att studera spridning av övertoner i mellanspännings- eller lågspänningsnät.

I [33] föreslås en stokastisk metod för att studera käll- och överföringsimpedanser mellan kunder i lågspänningsnät. Den beskrivna metoden kan också vara användbar när man studerar lågspänningsnätets inverkan på resonanser vid studier på högre spänningsnivåer. Det är dock inte praktiskt genomförbart att modellera alla lågspänningsnät i detalj, inklusive kundinstallationerna.

Följande avsnitt presenterar en metod för att aggregera ett nät till en representativ impedans, samtidigt som det bevarar nätets stokastiska beteende [6]. Den aggregerade modellen kan användas för att representera inverkan av underliggande nät i studier samtidigt som beräkningsbördan avsevärt minskas jämfört med att modellera nätet i detalj.

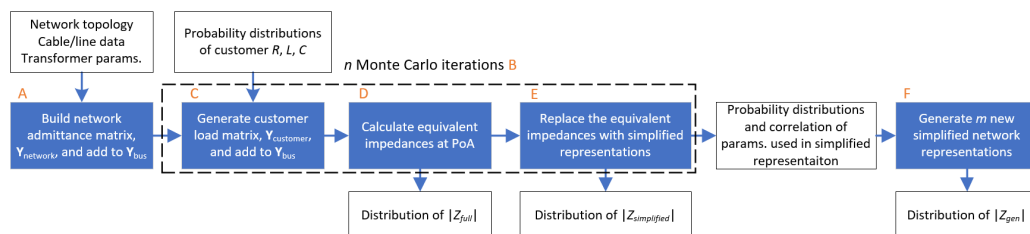
3.1 METODBESKRIVNING

3.1.1 Översikt

Metoden som presenteras i [6] använder så kallade Copulas för att generera en uppsättning aggregerade impedanser som exakt representerar det stokastiska

beteendet hos ett givet nät. För att illustrera metoden kan man utgå från ett lågspänningsnät där kundlasterna representeras av en stokastisk modell. Metoden kan sedan tillämpas på följande sätt (en översikt över metoden ges i Figur 3-1:

1. Ta fram admittansmatrisen utifrån nätets topologi och ingående parametrar.
2. Utför n Monte Carlo-iterationer. För varje iteration utförs följande steg:
 - a. Generera kundlastmatrisen utifrån lasternas sannolikhetsfördelning och kombinera den med nätets admittansmatris.
 - b. Beräkna ekvivalenta impedanser som representerar det underliggande nätet sett från aggregeringspunkten.
 - c. Ersätt de ekvivalenta impedanserna med förenklade representationer.
3. Baserat på de n iterationerna, beräkna tillhörande sannolikhetsfördelningar och korrelationer för de parametrar som används i de förenklade representationerna.
4. Generera m nya förenklade nätverksrepresentationer. Detta görs med Copula-metoden utifrån de sannolikhetsfördelningar och parametrar som bestäms i 3.



Figur 3-1. Översikt över metoden.

3.1.2 Nätets admittansmatris

Nätets admittansmatris sätts ihop utifrån nätets topologi och impedansdata för kablar, ledningar, transformatorer etc. Nätets admittansmatris kan variera, t.ex. om olika driftlägen ska beaktas, eller vara statisk, vilket är fallet i exemplet som presenteras här.

I ett 4-ledarsystem representeras varje nod av 4 "subnoder": de tre faserna och nollan. I detta fall kommer admittansmatrisen att vara av rang $4Nb \times 4Nb$, där Nb är antalet noder i systemet.

3.1.3 Kundlastmatrisen

I exemplet som presenteras här används en enkel kundlastmodell där tre parallella RLC-kretsar, anslutna fas-till-nolla, används för att representera varje kund.

Parametrarna och deras tillhörande sannolikhetsfördelningar visas i Tabell 3-1, baserat på [33].

Tabell 3-1. Parametrar som används till kundlastmodellen.

	Fördelning	Parametrar	
R	Likformig	Min = 14,4 Ω	Max = 10,6 k Ω
L	Likformig	Min = 14 mH	Max = 500 mH
C	Normal	$\mu = 5 \mu\text{F}$	$\sigma = \mu/3$

3.1.4 Beräkning av ekvivalenta impedanser

I en y-konfiguration beräknas ekvivalenta impedanser mellan fas och nolla, Z_a , Z_b , och Z_c . I en delta-konfiguration är målet att beräkna motsvarande fas-till-fas-impedanser Z_{AB} , Z_{BC} och Z_{CA} .

3.1.5 Förenklad representation av de ekvivalenta impedanserna

Den förenklade representationen av de ekvivalenta impedanserna skiljer sig beroende på antalet resonanspunkter i det underliggande nätet, i frekvensområdet av intresse. Vid en enda parallellresonans är det tillräckligt att approximera varje ekvivalent impedans med en parallell RLC-krets. I så fall beräknas den förenklade representationen enligt följande:

1. Beräkna R som $\max(|Z|)$.
2. Beräkna LC från resonansfrekvensen:

$$LC = \left(\frac{1}{2\pi f_{res}} \right)^2$$

3. C kan uttryckas som LC/L för att minska antalet parametrar som ska optimeras. En optimering genomförs sedan enligt minsta kvadratmetoden för att hitta L genom att jämföra $|Z|$ och $|Z_{fit}|$, där $|Z_{fit}|$ ges av:

$$|Z_{fit}| = \left| \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{j\omega L} + j\omega \frac{LC}{L} \right)^{-1} \right|$$

4. Slutligen beräknas C från LC/L .

Om det finns flera resonanspunkter kan metoden utökas genom att kombinera flera RLC-kretsar för att approximera de ekvivalenta impedanserna [39], [40].

3.1.6 Generering av korrelerade sampel

Copula-metoden [41] används för att generera nya sampel med samma korrelation och sannolikhetsfördelning som ursprungliga data. Detta görs på följande sätt:

1. Betrakta en slumpmässig vektor $(X_1, X_2, \dots, X_n)$ med kontinuerliga kumulativa fördelningsfunktioner $F_i(x)$.

2. Sannolikhetsintegraltransformen ger $U_i = F_i(X_i)$, vilken är jämnt fördelad. Copulan för $(X_1, X_2, \dots, X_n)$ definieras som den gemensamma kumulativa sannolikhetsfördelningen för $(U_1, U_2, \dots, U_n)$.
3. Utifrån Copula-fördelningen kan nya sampel av $(U_1, U_2, \dots, U_n)$ genereras.
4. Genom att tillämpa de inverterade kumulativa fördelningsfunktionerna F_i^{-1} på dessa sampel kommer nya data att erhållas med samma egenskaper som originaldata:

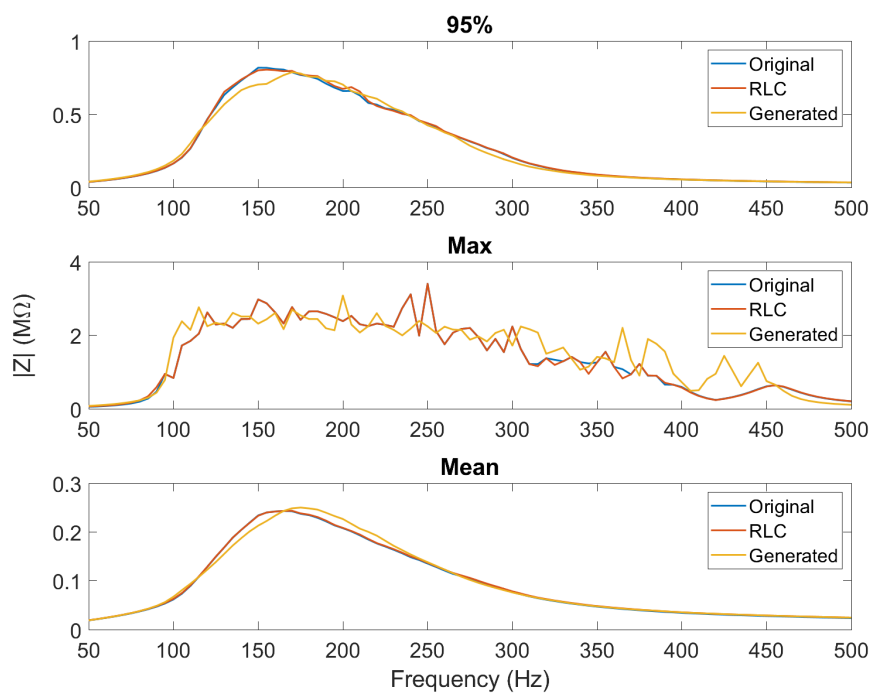
$$(X_1, X_2, \dots, X_n) = (F_1^{-1}(U_1), F_2^{-1}(U_2), \dots, F_n^{-1}(U_n))$$

3.2 SAMMANFATTNING AV FALLSTUDIE

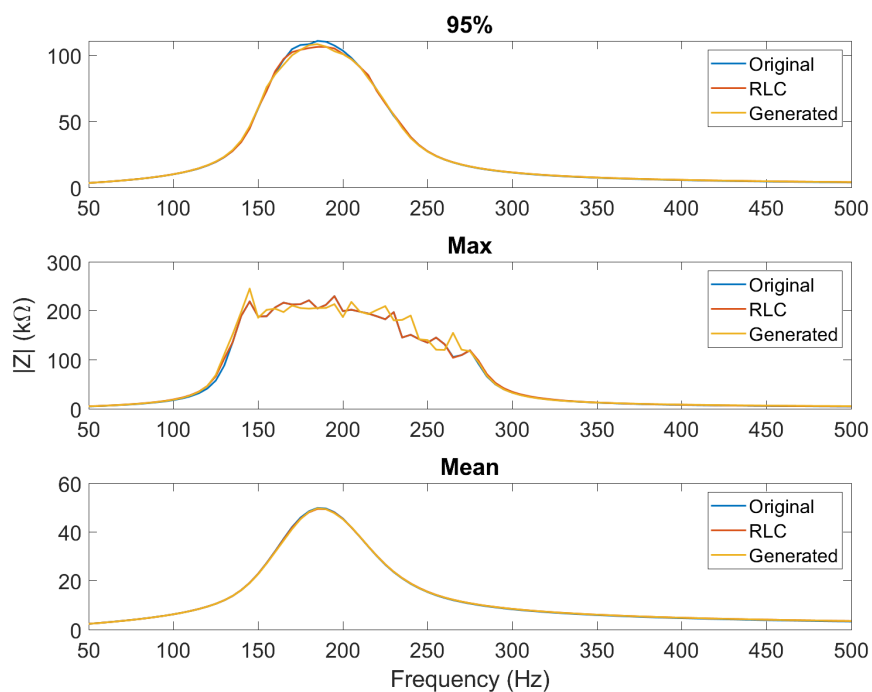
Metoden illustreras med tre svenska lågspänningsnät (4-ledare, 230 V, 50 Hz). Det första nätet består av 6 kunder på landsbygden, det andra nätet är ett förortsområde med 39 kunder och det tredje nätet är ett förortsområde med 83 kunder. Ytterligare detaljer om de data som används finns i [6].

Figur 3-2 till Figur 3-4 visar en jämförelse av den 95:e percentilen, maxvärdet och medelvärdet för den kompletta modellen (hela lågspänningsnätet), den förenklade representationen samt för genererade data, över 10 000 iterationer. Tabell 3-2 visar medelfelet.

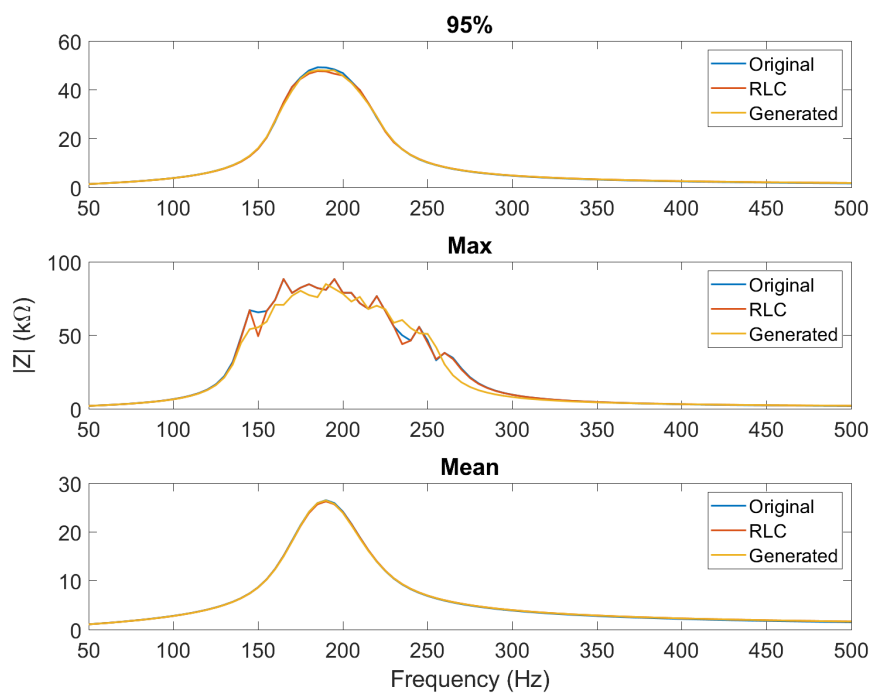
Resultaten visar att genererade data matchar det stokastiska beteendet hos den fullständiga modellen. De studerade näten uppvisar liknande egenskaper, men frekvensbandet som innehåller resonanser blir smalare då antalet kunder ökar.



Figur 3-2. 95:e percentilen, max. och medelvärde för den kompletta modellen, den förenklade representationen samt genererade data. 6-kundersnätet.



Figur 3-3. 95:e percentilen, max. och medelvärde för den kompletta modellen, den förenklade representationen samt genererade data. 39-kundersnätet.



Figur 3-4. 95:e percentilen, max. och medelvärde för den kompletta modellen, den förenklade representationen samt genererade data. 83-kundersnätet.

Tabell 3-2. Medelfel vid jämförelse av genererade data och den kompletta modellen.

	6 kunder	39 kunder	83 kunder
Max	48 %	11 %	10 %
Medel	4,1 %	2,2 %	3,1 %
95%	6,9 %	2,6 %	2,9 %

4 En förbättrad statistisk metod för att beräkna åsköverspänningar i HVDC luftlednings/kabelsystem

Fler och fler HVDC-förbindelser konstrueras som en blandning av kabel och luftledning. I en sådan konfiguration kommer kabelsystemet att utsättas för överspänningar som härrör från blixtnedslag till ledningen [42], [43]. Två orsaker till åsköverspänningar beaktas: backöverslag över ledningsisolatorer, som kan uppstå när blixten träffar en topplina, och skärmfel, som uppstår när blixten träffar en fasledare. Risken för backöverslag beror på blixttätheten, blixstens strömstyrka och stolparnas jordtag. För skärmfel måste två viktiga parametrar beaktas: den kritiska strömmen (*critical current*), som är den maximala strömmen som kan injiceras i fasledarna utan att orsaka ett överslag, samt den maximala penetreringsströmmen (*penetrating current*), som är den maximala strömmen som kan slå till fasledarna.

Representativa överspänningsnivåer för HVDC-kabelsystem anslutna till luftledningar bestäms vanligtvis enligt en deterministisk metod utan att beakta åsköverspänningarnas statistiska egenskaper. Detta kan leda till onödigt konservativ dimensionering av kabelisoleringen [44]. En statistisk metod för att bestämma representativa åsköverspänningsnivåer för kabeln utvecklades tidigare [45] baserat på det statistiska konceptet för överspänningsskydd av transformatorstationer [46], [47], [48]. Metoden fokuserar på backöverslag och tar hänsyn till den statistiska fördelningen av blixtrömmens amplitud samt dämpning av överspänningarna på grund av korona.

I [7] presenteras en förbättrad statistisk metod som bygger vidare på [45]. Den förbättrade metoden tar även hänsyn till skärmfel och ökad dämpning på grund av resistiva effekter, samt påverkan av markjonisering. Målet med metoden är att minimera antalet beräkningar som krävs för att bestämma representativa överspänningsnivåer som kabelsystemet utsätts för relaterat till acceptabel MTBF (*mean time between failures*).

4.1 METODBESKRIVNING

Den förbättrade statistiska metoden är uppdelad i tre steg:

- Karakterisering av luftledningens respons vid blixtnedslag
- Statistisk beräkning
- Fastställande av representativa åsköverspänningsnivåer i kabelsystemet

Följande avsnitt beskriver varje steg mer detaljerat.

4.1.1 Karaktärisering av ledningen

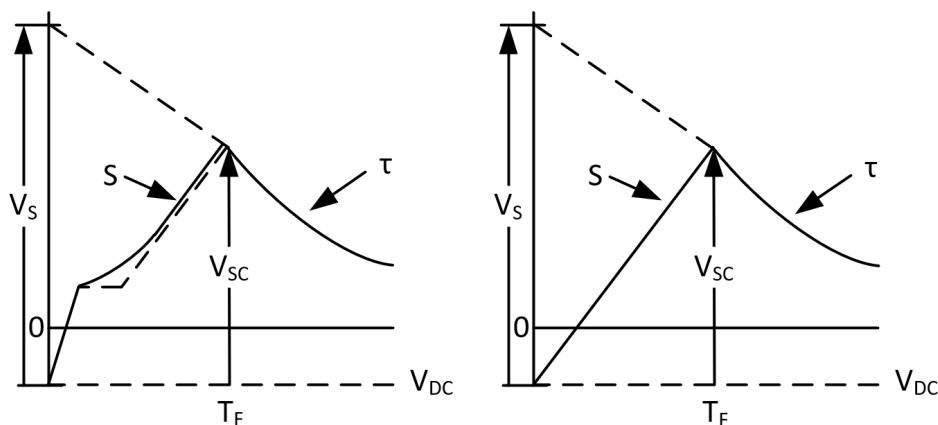
I det första steget karaktäriseras luftledningens respons på blixtnedslag genom elektromagnetiska transientberäkningar (EMT). I detta skede beaktas inte kabeln i beräkningarna. Följande parametrar används för att uttrycka ledningens egenskaper:

- Förhållandet mellan blixtrömmens storlek och överspänningens amplitud vid nedslagsplatsen.
- Formen på den resulterande överspänningsvågen.
- Dämpningen av överspänningsamplituden, främst orsakad av resistiva effekter i ledare och mark.

Inverkan av korona beaktas inte i detta skede eftersom det är svårt att modellera i EMT-simuleringar. Det ingår i stället i det statistiska förfarandet, som beskrivs i nästa avsnitt.

4.1.2 Statistisk beräkning

När överspänningsvågen rör sig längs ledningen kommer koronaurloadningar leda till en minskning av överspänningens branthet, och därmed en minskning av den högsta överspänningen [46], [47], [48]. Inverkan av korona illustreras i Figur 4-1, där S är vågfrontens branthet, T_f motsvarande fronttid och τ tidskonstanten för den exponentiellt avtagande vågformen.



Figur 4-1. Inverkan av korona på spänningssvågen (vänster). Approximation med linjär front (höger).

Överspänningens amplitud, V_{sc} , på ett visst avstånd d från nedslagsplatsen kan beräknas med följande uttryck:

$$V_{sc} = V_s e^{-T_f/\tau}, \quad T_f = \frac{V_{sc}}{S}, \quad S = \frac{K_c}{d}$$

där V_s är spänningen vid nedslagsplatsen och K_c koronadämpningskoefficienten enligt den förenklade definitionen i [47]. Med hänsyn till inverkan av den resistiva dämpningen, $r(d)$, erhålls följande uttryck:

$$V_{scr} = V_{sc}r(d)$$

Som en förenkling antas att alla blixtnedslag sker till en stolpe. Således kan uttrycket för V_{scr} tillsammans med förhållandet mellan överspänningen och blixtrömmen användas för att bestämma vilken blixtrömsamplitud som krävs vid varje stolpe för att erhålla en viss V_{scr} vid övergången mellan kabel och luftledning.

Genom att beakta blixtnedslag till samtliga stolpar längs ledningen som resulterar i samma V_{scr} vid övergångsstationen kan den ackumulerade risken att överstiga en viss V_{scr} vid övergångsstationen bestämmas. Genom att ta hänsyn till blixtrömmens statistiska fördelning och det årliga antalet blixtnedslag i topplinor eller fasledare kan den etablerade uppsättningen blixtrömmar kopplas till en statistisk returperiod, uttryckt i form av MTBS (*mean time between surges*).

Slutligen itereras V_{scr} tills den beräknade MTBS är lika med acceptabel MTBF för kabelsystemet. Detta resulterar i en uppsättning blixtrömmar som kan användas för att bestämma representativa överspänningsnivåer i kabelsystemet.

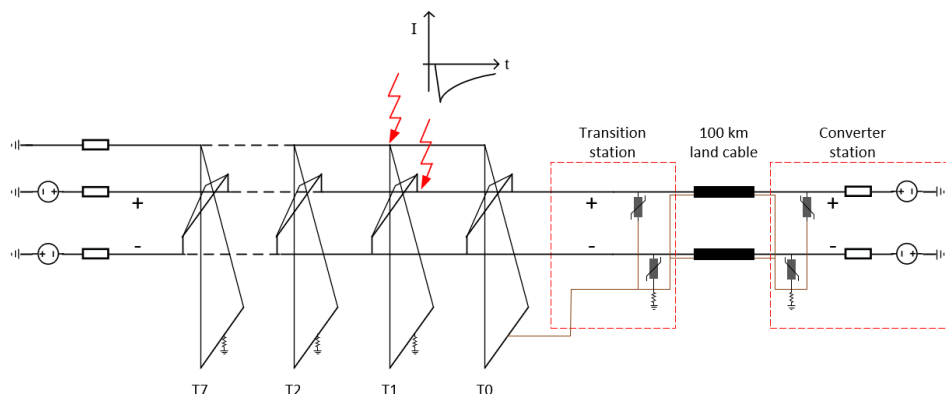
4.1.3 Fastställande av representativa åsköverspänningsnivåer

De blixtrömmar som beräknades i steg 2 resulterar alla i samma V_{scr} vid övergångsstationen.

För att minimera inverkan av att försumma koronadämpning i simuleringsmodellen injiceras blixtrömmen företrädesvis vid den första stolpen utanför övergångsstationen.

4.2 SAMMANFATTNING AV FALLSTUDIE

Metoden illustreras genom att applicera den på en fallstudie för ett ± 525 kV HVDC-kabelsystem, som visas i Figur 4-2. Blixtnedslaget modellerades baserat på resultaten från [49]. En kombinerad statistisk fördelning för negativa och positiva blixtar användes [50]. Markkabeln och luftledningen modellerades med frekvensberoende parametrar. Den så kallade *leader progression model* används för att ta hänsyn till risken för överslag över ledningsisolatorerna. Stolparna jordades genom en resistans. Kabelskärmarna är anslutna till den första stolpen. Ytterligare detaljer om parametrarna som används för fallstudien finns i [7].



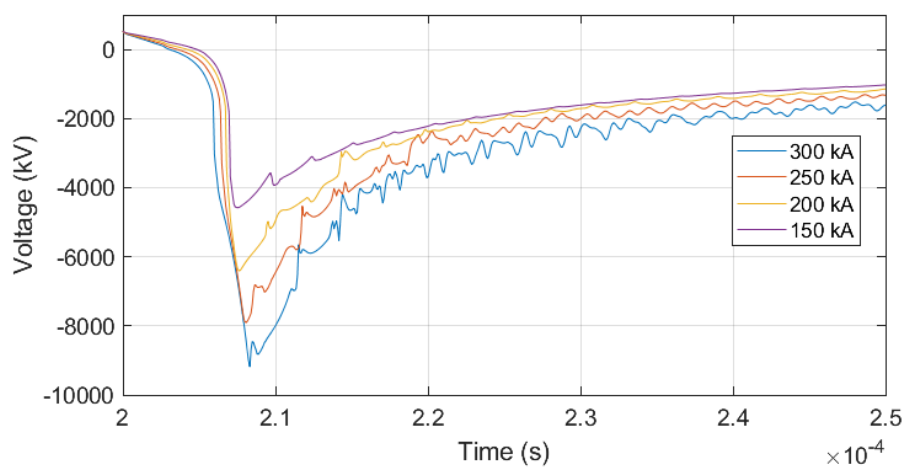
Figur 4-2. Översikt över modellen.

4.2.1 Karaktärisering av ledningen

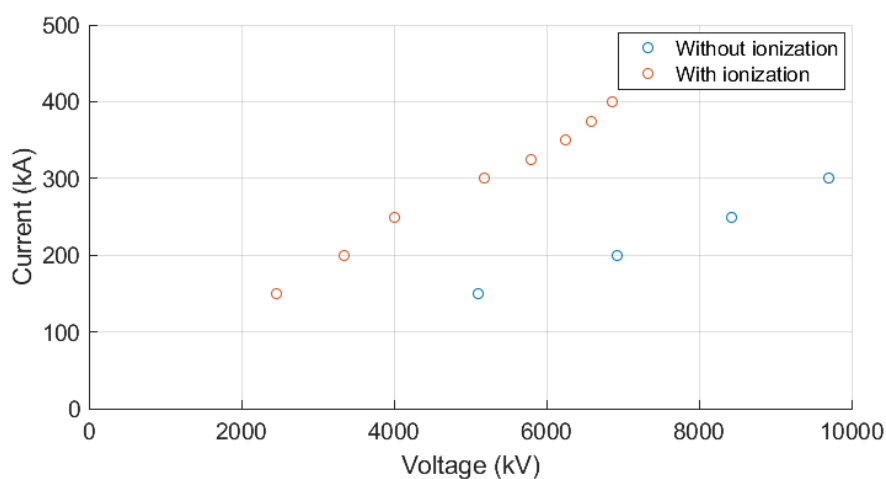
Backöverslag

För att studera backöverslag injicerades negativ blixtröm av olika storlek i topplinan vid ledningens mitt. Simuleringar utfördes med och utan markjonisering. Figur 4-3 visar den resulterande spänningen vid stolpen där blixten slår ner, utan markjonisering, och Figur 4-4 visar förhållandet mellan spänning och blixtröm med och utan hänsyn till markjonisering. Baserat på dessa resultat bestämdes förhållandet mellan blixtröm och överspänningsamplitud samt formen på överspänningsvågens svans.

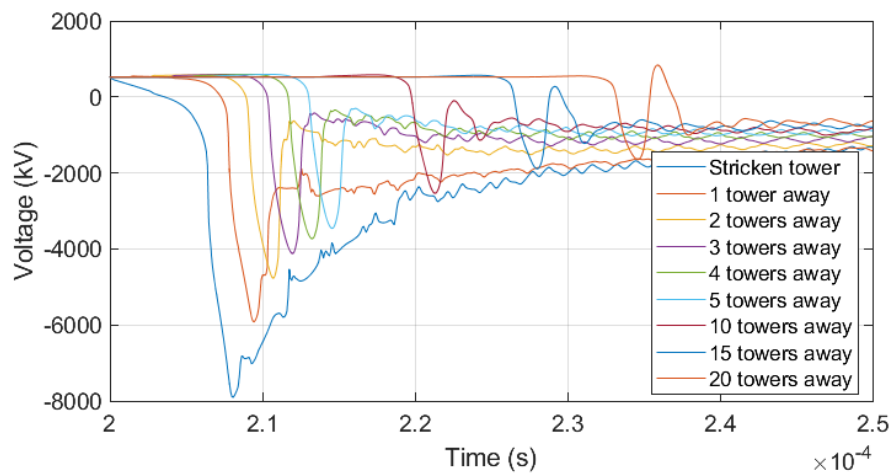
Figur 4-5 visar överspänningen vid olika stolpar efter att 250 kA blixtröm injiceras i topplinan utan hänsyn till markjonisering. Dessa resultat användes för att bestämma dämpningen på grund av det resistiva spänningsfallet, utan att beakta inverkan av korona. Figur 4-6 visar den resulterande kurvanpassningen av funktionen $r(d)$ för backöverslag, med och utan hänsyn till markjonisering.



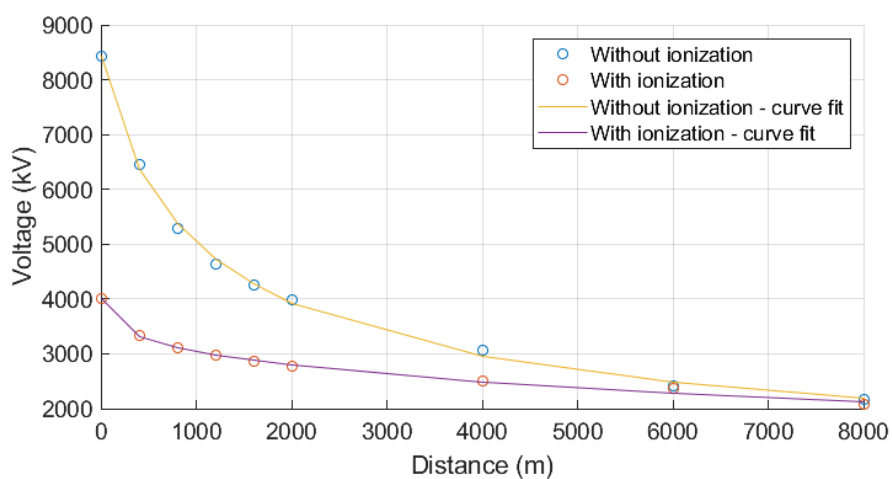
Figur 4-3. Spänning på den positiva polen vid nedslag i topplinan vid olika blixtrörm. Utan markjonisering.



Figur 4-4. Förhållande mellan blixtrörm och överspanningsamplitud med och utan markjonisering vid backöverslag.



Figur 4-5. Spänning på den positiva polen vid blixtnedslag vid olika avstånd, för en blix på 250 kA. Utan markjonisering



Figur 4-6. Kurvanpassning av $r(d)$ för backöverslag.

Skärmfel

Vid beräkning av skärmfel injicerades negativ blixtröm av olika storlek i den positiva fasledaren på ledningens mitt. Förhållandet mellan blixtrömmen och överspänningens storlek, formen på överspänningsvågens svans samt den resistiva dämpningen bestämdes på samma sätt som för backöverslag.

4.2.2 Statistisk beräkning

Resultaten från karaktäriseringen av ledningen användes som indata till den statistiska metoden. MTBS valdes till 300 år, vilket motsvarar en ackumulerad årlig risk på 0,00333. Backöverslag och skärmfel behandlas separat eftersom de resulterande överspänningarnas karaktär kan skilja sig åt.

Tabell 4-1 visar ett utdrag från den statistiska beräkningen för backöverslag, utan hänsyn till markjonisering. Tabellen visar den ström som krävs vid varje stolpe för att få en viss V_{scr} vid övergångsstationen. Genom att justera V_{scr} till 4370 kV erhöles en MTBS på 300 år. I detta fall bidrog bara de första 8 stolparna till risken (mer avlägsna stolpar visade sig ge ett försumbart bidrag till den ackumulerade risken).

Tabell 4-1. Statistisk beräkning för backöverslag utan markjonisering.

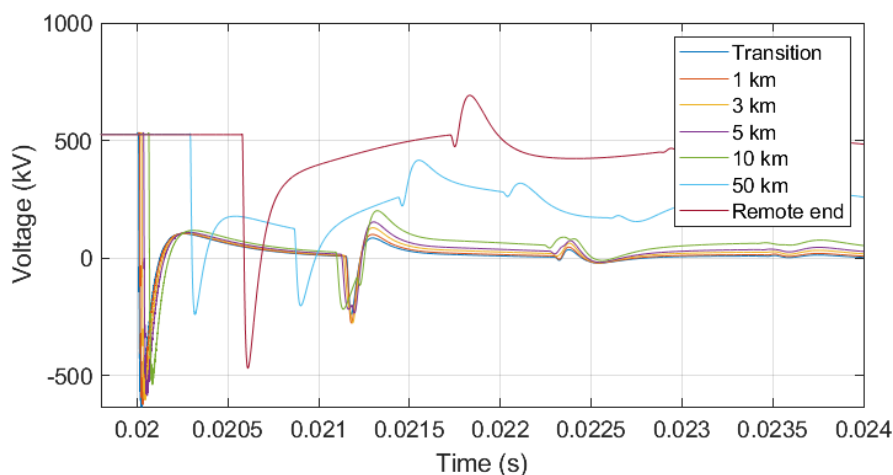
Stolpe	d (m)	S (kV/ μ s)	T_f (s)	$r(d)$	V_s (kV)	V_{scr} (kV)	I (kA)	Ackumulerad årlig risk
1	400	4250	1,0	0,754	6204	4370	182	0,00199
2	800	2125	2,1	0,637	7869	4370	236	0,00275
3	1200	1417	3,1	0,561	9569	4370	291	0,00307
-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	3200	531	8,2	0,384	19 682	4370	619	0,00333

För att visa den statistiska effekten av markjonisering upprepades beräkningen för samma V_{scr} (4370 kV). När markjonisering beaktas krävs en högre ström för att erhålla samma överspänningsamplitud vid nedslagsplatsen jämfört med fallet utan markjonisering. Samtidigt innebär det långsammare avtagandet av överspänningen att fler stolpar bidrar till den ackumulerade risken. Som en konsekvens ökar motsvarande MTBS från 300 år till cirka 760 år för att erhålla samma V_{scr} . Detta indikerar att beräkningar utan att beakta markjonisering kommer att ge konservativa resultat. Markjonisering tillför dock också osäkerhet eftersom jordförhållandena kan variera längs en ledning.

Motsvarande beräkningar genomfördes även för skärmfel. I det fallet motsvarar en MTBS på 300 år en V_{scr} på 3160 kV. Det bör noteras att riskbidragen från alla strömmar som överstiger 25 kA (den maximala penetreringsströmmen) försummas, eftersom inga strömmar över 25 kA slår till den positiva fasledaren enligt *leader progression model*.

4.2.3 Fastställande av representativa överspänningar

De beräknade blixtrömmarna användes i den kompletta modellen (se Figur 4-2) för att bestämma representativa överspänningar i kabelsystemet. Figur 4-7 visar de resulterande överspänningarna över kabelisolationen i den positiva polen vid olika punkter längs kabeln för backöverslag. En strömamplitud av 182 kA resulterade i en maximal negativ överspänningsnivå av 631 kV vid övergångsstationen.



Figur 4-7. Spänning på den positiva polen vid olika punkter på kabeln för ett blixtnedslag (182 kA) till topplinan i den första stolpen utanför övergångsstationen, utan markjonisering.

Vid beräkning av skärmfel var en ström av 19 kA tillräckligt låg för att inte orsaka överslag på ledningen. Fallet resulterade i en maximal överspänning av 600 kV vid övergångsstationen.

De beräknade överspänningarna är signifikant lägre jämfört med de värden som föreslås för prekvalificeringstest i [51]. Det finns flera orsaker till detta, inklusive vald MTBF (300 år), samt att de resulterande överspänningarna är beroende av projektspecifika parametrar.

5 Diskussion och rekommendationer

5.1 INVERKAN AV OSÄKERHETER PÅ SPRIDNING AV ÖVERTONER OCH RESONANTA ÖVERSPÄNNINGAR

En sänkning av resonansfrekvenserna kommer att leda till förstärkning av lägre ordningens övertoner. Detta kan dock motverkas av en förskjutning i emission till högre frekvenser [9], [10]. En annan aspekt som bör övervägas är den effekt som förändringar i kraftsystemet har på dämpningen, eftersom detta kan ha en stor inverkan på spridningen av övertoner samt resonanta överspänningar. Lastmodeller är av stor betydelse här, men olika lastmodeller ger väldigt olika resultat när det gäller dämpning och resonansfrekvens [20]. Det bör noteras att dämpningen är svår att bedöma, och det saknas jämförande mätningar av nätets impedans som kan användas för att indikera eventuella förändringar av dämpningen. Det bör också noteras att den faktiska effekten av förändringar som påverkar resonanser kan vara svår att bestämma, t.ex. på grund av osäkerheter relaterade till modellering av övertonskällors emission och impedans. Övertoner bör mätas kontinuerligt på olika platser och spänningsnivåer för att fånga upp trender som kan relateras till en förändring i resonansförhållandena.

Eftersom kablar har en stor inverkan på resonansfrekvensen bör inverkan på övertoner och risken för resonanta överspänningar betraktas som en del av planeringsprocessen i större kabelprojekt vid högre spänningar. Framtida nätutbyggnad och olika driftfall bör också beaktas i studier eftersom de kan ha en inverkan på de resulterande resonanserna.

Förändringar i kraftsystemet (nätet tillsammans med all produktion och laster) medför också fler osäkerheter, t.ex. när det gäller driftfall eller komponentmodellering. Det är svårt att ge allmänna rekommendationer angående osäkerheter och resonanser, eftersom effekten av en osäkerhet eller komponent kan skilja sig beroende på vilket nät som studeras. Om fler exempel på befintliga (eller åtminstone realistiska) nät görs tillgängliga kommer det att vara möjligt att bättre kvantifiera inverkan av olika osäkerheter under olika förhållanden.

Det är känt hur storskalig ersättning av konventionella produktionskällor med förnybar generering kommer att påverka nätet vid 50 Hz. Det finns dock ett behov av mer forskning för att förstå påverkan vid högre frekvenser.

5.2 EN STOKASTISK AGGREGERAD LASTMODELL

Metoden som beskrivs i [6] och sammanfattas i kapitel 3 kan användas för att aggregera ett underliggande nät till en enda impedans samtidigt som dess stokastiska egenskaper (t.ex. variationer i kundlaster eller osäkerheter relaterade till nättopologin) behålls. På detta sätt är det möjligt att ta hänsyn till de stokastiska egenskaperna hos nätet när man utför studier på högre spänningsnivåer, samtidigt som beräkningsbördan avsevärt minskas jämfört med att modellera nätet i detalj. Metoden kan också användas för att undersöka inverkan av att ansluta nya enheter till nätet (t.ex. solpaneler) på ett stokastiskt sätt, eller för att jämföra effekterna av olika kundlastmodeller på impedansen. Metoden kan också användas för att

kvantifiera vikten av olika parametrar när man jämför olika kundlastmodeller. Metoden kan tillämpas på vilken spänningsnivå som helst.

Kundlastmodellen som används i [6] har vissa begränsningar, inklusive:

- Något samband mellan konsumtion och tid på dygnet beaktas inte.
- Tre parallella RLC-kretsar (en per fas) används för att representera varje kund. En mer detaljerad representation kan behövas.
- Varje kund har samma fördelning av R, L och C. I praktiken kan det vara nödvändigt att använda olika fördelningar för att representera olika kunder eller typer av kunder.
- Varje fas anses oberoende och ingen hänsyn tas till två- eller trefasbelastningar.

För att överväga variationer med tiden kan flera simuleringar utföras med olika parametrar för att representera olika tider på dygnet, veckan eller året.

Punkterna 2–4 representerar begränsningar i den valda kundlastmodellen och är inte begränsningar för själva metoden. Metoden kan utökas för att använda vilken stokastisk representation som helst av kundlasterna.

De studerade näten i [6] resulterar i en enda parallellresonans i frekvensområdet av intresse. Parallellresonansens frekvens bestäms främst av kundimpedansen. Detta kanske inte är fallet för alla lågspänningsnät eller för alla lastmodeller. De studerade lågspänningsnäten beter sig på liknande sätt, men när antalet kunder ökar uppstår resonanser i ett smalare frekvensband. Detta kan förklaras med den valda lastmodellen och centrala gränsvärdessatsen: när antalet kunder ökar kommer kombinationen av slumpmässiga variabler att gå mot en normalfördelning som är smalare ju fler kunder det finns.

Om nätet som studeras har mer än en resonanspunkt kan flera RLC-kretsar kombineras för att approximera impedansen som en funktion av frekvensen [39], [40]. Den föreslagna metoden kan sedan tillämpas som beskrivet, den enda skillnaden är att antalet parametrar ökar.

5.3 EN FÖRBÄTTRAD STATISTISK METOD FÖR ATT BESTÄMMA REPRESENTATIVA ÖVERSPÄNNINGAR I HVDC LUFTLEDNINGS/KABELSYSTEM

Den statistiska metod som föreslås i [7] gör det möjligt att optimera dimensionering av kabelisolationen, i motsats till deterministiska metoder.

Samma statistiska procedur tillämpas för backöverslag och skärmfel, vilket gör det möjligt att utvärdera och jämföra dessa två fenomen med avseende på risken för kabelfel. Den representativa överspänningsnivån bör väljas baserat på överspänningens storlek, samtidigt som man beaktar att backöverslag utsätter kabeln för en ändring i polaritet. Om de resulterande överspänningsamplituderna är lika bör de representativa överspänningarna därför baseras på beräkningarna för backöverslag eftersom dessa är allvarligare för kabelisolationen.

Några av de strömmar som beräknats med den statistiska metoden är extremt höga, vilket är en följd av att blixtrömmen är log-normalfördelad. Riskbidraget från så höga strömmar är dock mycket lågt.

Markjonisering leder till en ökning av MTBS men tillför ytterligare osäkerhet eftersom det är starkt beroende av de lokala markförhållandena. Beroende på jordningsförhållandena kan dessutom strömtätheten vara för låg för att jonisering ska kunna ske.

Den resistiva dämpningsfaktorn bör beaktas i studier för högre systemspänningar, eftersom den kommer att ha stor inverkan på de resulterande överspänningarna i kabelsystemet.

Överspänningarna beräknade i [7] är betydligt lägre än de testnivåer som presenteras i [51]. Det bör dock noteras att de resulterande överspänningarna beror på projektspecifika förhållanden, såsom kabellängden eller jordningsförhållandena.

6 Slutsatser och rekommendationer

6.1 INVERKAN AV OSÄKERHETER PÅ SPRIDNING AV ÖVERTONER OCH RESONANTA ÖVERSPÄNNINGAR

- Då mer kapacitans införs i nätet minskar resonansfrekvenserna. Detta förväntas ha en stor inverkan på utbredningen av övertoner och på resonanta överspänningar. Som ett exempel konstaterades det i [52] att även små procentandelar av solceller eller elfordon har en betydande inverkan på resonansfrekvenser i lågspänningsnät.
- I framtiden förväntas också mindre dämpning, t.ex. på grund av energieffektivitetsåtgärder inklusive övergång till kraftelektronik för frekvensomriktare och uppvärmning. Det behövs mer studier för att kvantifiera hur dämpningen förändras.
- Underliggande nät och laster har stor inverkan på dämpningen av resonanser och bör inkluderas i studier för att undvika underskattning av dämpningen.
- Framtida nätutbyggnadsscenarier och olika driftfall påverkar risken för resonanta överspänningar. Detta bör vara en naturlig del av dimensioneringsprocessen.
- I de undersökta fallen visade sig kabeltoleranser ha en försumbar inverkan på amplituden och frekvensen för resonanser vid låga frekvenser.
- Den mekaniska spridningen av brytare och den inkopplingsstrategi som används påverkar de resulterande överspänningarna vid transformatorinkoppling.

6.2 EN STOKASTISK AGGREGERAD LASTMODELL

- Fallstudien visar att resultaten med den föreslagna metoden visar god överensstämmelse med resultaten från den kompletta modellen.
- I de studerade fallen dominerar kundimpedanserna med avseende på den lägsta frekvensresonansen.
- För de studerade fallen visade det sig att resonanser uppträder i ett smalare band när antalet kunder ökar.
- Metoden kan användas för att inkludera den stokastiska karaktären hos kundlaster (eller andra osäkerhetsfaktorer) när man utför studier på högre spänningsnivåer, samtidigt som beräkningsbördan minskar avsevärt jämfört med att modellera nätet i detalj.

6.3 EN FÖRBÄTTRAD STATISTISK METOD FÖR ATT BESTÄMMA REPRESENTATIVA ÖVERSPÄNNINGAR I HVDC LUFTLEDNINGS/KABELSYSTEM

- Den föreslagna metoden gör det möjligt att bestämma representativa överspänningsnivåer samtidigt som antalet beräkningar minimeras.
- Fallstudiens resultat visar att användningen av en statistisk metod i vissa fall kommer att resultera i lägre representativa överspänningsnivåer jämfört med deterministiska beräkningar.
- Om markjonisering inkluderas resulterar detta i en ökad MTBS.
- Införandet av den resistiva dämpningsfaktorn har en betydande inverkan på de resulterande överspänningarna.
- Den resulterande blixtrörmstorleken ligger inom området för strömmar som vanligtvis används i deterministiska studier.

7 Referenser

- [1] O. Lennerhag, "Calculation Methods for Power Systems Facing Large Uncertainties," Luleå University of Technology, Skellefteå, Sweden, 2020-04-30.
- [2] O. Lennerhag, "Power system model for resonance studies," Luleå University of Technology, Skellefteå, Sweden, 2018.
- [3] O. Lennerhag och M. Bollen, "Power system impacts of decreasing resonance frequencies," i *International Conference on Harmonics and Quality of Power*, Ljubljana, Slovenia, 2018.
- [4] O. Lennerhag och M. Bollen, "Impact of uncertainties on resonant overvoltages," i *International Conference on Power System Transients*, Perpignan, France, 2019.
- [5] O. Lennerhag och M. Bollen, "A power system model for resonance studies," i *25th International Conference on Electricity Distribution (CIRED)*, Madrid, 2019.
- [6] O. Lennerhag och M. Bollen, "A Stochastic Aggregate Harmonic Load Model," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 35, nr 5, pp. 2127-2135, 2020.
- [7] O. Lennerhag, J. Lundquist, C. Engelbrecht, T. Karmokar och M. Bollen, "An Improved Statistical Method for Calculating Lightning Overvoltages in HVDC Overhead Line/Cable Systems," *Energies*, vol. 12, nr 16, p. 3121, 2019.
- [8] O. Lennerhag och M. Bollen, "Impact of uncertainties on resonant overvoltages following transformer energization," *Electric Power Systems Research*, vol. 187, p. 106503, 2020.
- [9] S. Rönnerberg och M. Bollen, "Power quality issues in the electric power system of the future," *The Electricity Journal*, vol. 29, nr 10, pp. 49-61, 2016.
- [10] S. Rönnerberg, M. Bollen, R. Langella, F. Zavoda, J.-P. Hasler, P. Ciufo, V. Cuk och J. Meyer, "The expected impact of four major changes in the grid on the power quality: a review," *Cigre Science & Engineering*, vol. 8, pp. 5-13, 2017.
- [11] N. Cuniffe, M. V. Escudero, A. Mansoldo, E. Fagan, M. Norton och C. Ellis, "Investigating the methodology and implications of implementing long HVAC cables in the Ireland and Northern Ireland power system," i *CIGRE Session C4*, Paris, 2016.
- [12] W. Wiechowski och P. B. Eriksen, "Selected studies on offshore wind farm cable connections-challenges and experience of the Danish TSO," i *IEEE Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, 2008.
- [13] H. Kalilnezhad, M. Popov, L. van der Sluis, J. A. Bos och J. P. de Jong, "Influence of long EHV ac underground cables on the resonance behavior of the Dutch transmission system," i *IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM)*, 2016.
- [14] L. Wu, "Impact on EHV/HV Underground Power Cables on Resonant Grid Behavior," Technical University Eindhoven, 2014.
- [15] M. Bollen, S. Mousavi-Gargari och S. Bahramirad, "Harmonic resonances due to transmission-system cables," *The Renewable Energies and Power Quality Journal (RE&PQJ)*, nr 12, 2014.

- [16] M. Bollen, L. Yao, S. Rönnerberg och M. Wahlberg, "Harmonic and interharmonic distortion due to a windpark," i *IEEE PES General Meeting*, 2010.
- [17] M. Bradt, B. Badrzadeh, E. Camm, D. Mueller, J. Schoene, T. Siebert, T. Smith, M. Starke och R. Walling, "Harmonics and resonance issues in wind power plants," i *IEEE Transmisison & Distribution*, 2012.
- [18] C. L. Bak och F. F. da Silva, "High voltage AC underground cable systems for power transmission--A review of the Danish experience, part 1," *Electric Power Systems Research*, vol. 140, pp. 984-994, 2016.
- [19] CIGRE WG C4.502, "TB 556: Power System Technical Performance Issues Related to the Application of Long HVAC Cables," 2013.
- [20] CIGRE JWG C4/B4.38, "TB 766: Network modelling for harmonic studies," 2019.
- [21] F. Barakou, M. Bollen, S. Mousavi-Gargari, O. Lennerhag, P. A. Wouters och E. F. Steennis, "Impact of load modeling on the harmonic impedance seen from the transmission network," i *17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, 2016.
- [22] X. Wang, F. Blaabjerg, Z. Chen och W. Wu, "Modeling and analysis of harmonic resonance in a power electronics based AC power system," i *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, 2013.
- [23] H. Hu, Q. Shi, Z. He, J. He och S. Gao, "Potential harmonic resonance impacts of {PV} inverter filters on distribution systems," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 6, nr 1, pp. 151-161, 2015.
- [24] D. Chakravorty, J. Meyer, P. Schegner, S. Yanchenko och M. Schocke, "Impact of modern electronic equipment on the assessment of network harmonic impedance," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 8, nr 1, pp. 382-390, 2017.
- [25] J. H. Brunke och K. J. Frohlich, "Elimination of transformer inrush currents by controlled switching. I. Theoretical considerations," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 16, nr 2, pp. 276-280, 2001.
- [26] H. Bronzeado, P. Brogan och R. Yacamini, "Harmonic analysis of transient currents during sympathetic interaction," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 11, nr 4, pp. 2051-2056, 1996.
- [27] CIGRE WG C4.307, "TB 568: Transformer energization in power systems: A study guide," Paris, 2014.
- [28] F. Barakou, M. Bollen, S. Mousavi-Gargari, P. Wouters och E. Steennis, "Downstream network modeling for switching transients in {EHV} networks containing cables," i *IEEE Manchester PowerTech*, 2017.
- [29] V. Cuk, J. Cobben, W. Kling och P. Ribeiro, "Considerations on harmonic impedance estimation in low voltage networks," i *IEEE 15th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, 2012.
- [30] M. M. Duro och R. Denis, "Parameter uncertainty assessment in the calculation of the overvoltages due to transformer energization in resonant networks," i *CIGRE Session*, 2012.
- [31] ABB, "Switchsync PWC 600 User manual," 9/12 2015.
- [32] F. Barakou, A. Pitsaris, P. Wouters och E. Steennis, "Study of series resonance overvoltage at LV side of transmission transformer during EHV cable energization," i *International Conference on Power Syetems Transients (IPST)*, 2017.

- [33] T. Busatto, A. Larsson, S. Rönnberg och M. Bollen, "Including Uncertainties from Customer Connections in Calculating Low-Voltage Harmonic Impedance," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 34, nr 2, pp. 606-615, 2019.
- [34] M. T. Au och J. V. Milanovic, "Development of stochastic aggregate harmonic load model based on field measurements," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 22, nr 1, pp. 323-330, 2007.
- [35] D. Salles, C. Jiang, W. Xu, W. Freitas och E. Hooman, "Assessing the collective harmonic impact of modern residential loads—Part I: Methodology," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 27, nr 4, pp. 1937-1946, 2012.
- [36] V. Cuk, J. F. Cobben, W. L. Kling och P. F. Ribeiro, "Analysis of harmonic current summation based on field measurements," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 7, nr 12, pp. 1391-1400, 2013.
- [37] A. M. Blanco, A. Greverer, S. Müller, J. Meyer och P. Schegner, "Stochastic harmonic load model of residential users based on measurements," i *IEEE PowerTech*, Eindhoven, 2015.
- [38] A. M. B. Castaneda, "Stochastic harmonic emission model of aggregate residential customers," Saechsische Landesbibliothek-Staats-und Universitaetsbibliothek Dresden, 2018.
- [39] J. Arrillaga och N. R. Watson, *Power system harmonics*, John Wiley & Sons, 2004.
- [40] N. G. Hingorani och M. F. Burberry, "Simulation of AC system impedance in HVDC system studies," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. %1 av %2PAS-89, nr 5, pp. 820-828, 1970.
- [41] J. Harry, *Dependence modeling with copulas*, Chapman and Hall/CRC, 2014.
- [42] IEC 60071-1, "Insulation Co-ordination - Part 1: Definitions, Principles and Rules, Ed. 8.1," 2011.
- [43] IEC 60071-2, "Insulation Co-ordination - Part 2: Application Guide, Ed. 3.0," 1996.
- [44] CIGRE WG B1.05, "TB 268: Transient voltages affecting long cables," Paris, 2005.
- [45] J. Lundquist, C. Engelbrecht, E. Thunberg, V. Dubickas, H. Jansson och T. Worzyk, "Lightning Impulse Test Levels for Extruded HVDC Cable Systems," i *CIGRE Session*, Paris, 2014.
- [46] IEEE Std. 1313.2-1999, "Guide for the Application of Insulation Coordination," 1999.
- [47] A. R. Hileman, *Insulation Coordination for Power Systems*, New York, USA: Marcel Dekker, 1999.
- [48] IEEE WG on Lightning Performance of Lines, "A Simplified Method for Estimating Lightning Performance of Transmission Lines," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. %1 av %2PAS-104, pp. 918-932, 1985.
- [49] J. Takami och S. Okabe, "Observational results of lightning current on transmission towers," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 22, nr 1, pp. 547-556, 2006.
- [50] CIGRE WG C4.407, "TB 549: Lightning Parameters for Engineering Applications," Paris, 2013.
- [51] CIGRE WG B1.32, "TB 496: Recommendations for testing DC extruded cable systems for power transmission at a rated voltage up to 500 kV," Paris, 2012.

- [52] S. Rönnberg, T. Busatto och M. Bollen, "Should waveform distortion (harmonics) be considered when connecting large amounts of PV?," i *Solar integration workshop*, 2018.

Sökord

Övertoner, överspänningar, osäkerheter, kablfiering, transformatorinkoppling, HVDC

BERÄKNINGSMETODER FÖR ELNÄT UNDER STORA OSÄKERHETER

Här beskrivs osäkerheter som påverkar spridningen av övertoner i låg- och mellanspänningsnät och resonanta överspänningar i transmissionsnät.

Inverkan av osäkerheter illustreras i realistiska nätmodeller och i ett par metoder som elnätsföretag kan använda för att ta hänsyn till osäkerheter i spridning av övertoner i låg- och mellanspänningsnät.

Den föreslagna metoden gör det möjligt att bestämma representativa överspänningsnivåer samtidigt som antalet beräkningar minimeras.

Resultaten visar att användningen av en statistisk metod i vissa fall kommer att resultera i lägre representativa överspänningsnivåer jämfört med deterministiska beräkningar.

Ett nytt steg i energiforskningen

Energiforsk är en forsknings- och kunskapsorganisation som samlar stora delar av svensk forskning och utveckling om energi. Målet är att öka effektivitet och nyttiggörande av resultat inför framtida utmaningar inom energiområdet. Vi verkar inom ett antal forskningsområden, och tar fram kunskap om resurseffektiv energi i ett helhetsperspektiv – från källan, via omvandling och överföring till användning av energin. www.energiforsk.se



Energiforsk