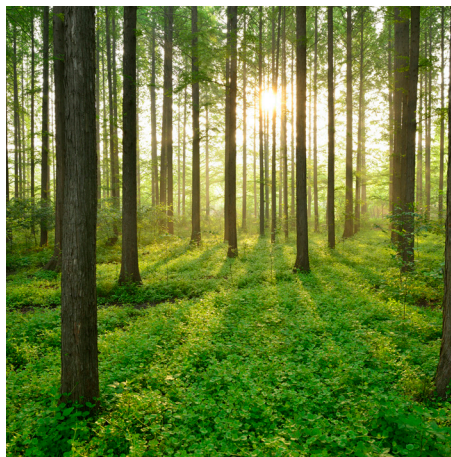


TRENDER I SPÄNNINGSDIPPAR OCH TRANSIENTER

RAPPORT 2026:1161



RISK- OCH
TILLFÖRLITLIGHETSANALYS



Trender i spänningsdippar och transienter

MATH BOLLEN, ABDALLAH UOSEF, LULEÅ TEKNISKA UNIVERSITET

ISBN 978-91-89918-44-3 | © Energiforsk mars 2026

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

Förord

Programmet Risk- och tillförlitlighetsanalys har initierat projektet *Trender i spänningsdippar och transienter i framtida elnät*. Projektet ger en översikt av hur olika ändringar i produktion, distribution av elnät påverkar spänningsdippar och kopplingstransienter, inkl konsekvenser.

Fel och kopplingshandlingar har studerats i fyra olika exempelnett: mellanspänningsnät i stadsmiljö, mellanspänningsnät på landsbygd, matning till storstäder, samt region- och stamnät bort från städerna. Rapportens författare är professor Math Bollen tillsammans med doktoranden Abdallah Uosef på LTU.

Stort tack till programstyrelsen för deras engagemang i projektet:

- | | |
|---|--|
| • Jenny Paulinder, Göteborg Energi Nät (ordförande) | • Magnus Brodin, Skellefteå Kraft Elnät |
| • Emil Welin, Vattenfall Eldistribution | • Göran Sandström, Umeå Energi |
| • Linus Hansson, Ellevio | • Hampus Halvarsson, Jämtkraft Elnät |
| • Niclas Ericsson, E.ON Energidistribution | • August Millqvist, Öresundskraft |
| • Geoffrey Jordaan, Svenska kraftnät | • Henric Johansson, Jönköping Energi Nät |
| • Fredrik Andersson, Elinorr | • Fredrik Sjödin, Installatörsföretagen |
| | • Carl Johan Wallnerström, Ei (adj) |

Följande bolag har deltagit som intressenter till projektet. Energiforsk framför ett stort tack till samtliga för värdefulla insatser.

- | | |
|-------------------------------|--------------------------------|
| • Svenska kraftnät | • Blåsjön Nät |
| • Ellevio AB | • Dala Energi Elnät |
| • Vattenfall Eldistribution | • Elektra Nät |
| • E.ON Energidistribution | • Gävle Energi |
| • Göteborg Energi Elnät | • Hamra Besparingsskog |
| • Elinorr | • Hofors Elverk |
| • Jämtkraft Elnät | • Härjeåns Nät |
| • Öresundskraft | • Härnösand Elnät |
| • Skellefteå Kraft | • Ljusdal Elnät |
| • Umeå Energi | • Malungs Elnät |
| • Krafringen Nät | • Sandviken Energi Nät |
| • Jönköping Energi Nät | • Sundsvall Elnät |
| • PiteEnergi Elnät | • Söderhamn Elnät |
| • Karlstads El och Stadsnät | • Åsele Elnät |
| • Karlskoga Elnät | • Årsunda Kraft & Belys.fören. |
| • Elinorr ekonomisk förening; | • Övik Energi Nät |
| • Bergs Tingslags Elektriska | • Ei (adjungerad |

Här redovisas resultat och slutsatser från ett projekt inom ett forskningsprogram som drivs av Energiforsk. Det är rapportförfattaren/-författarna som ansvarar för innehållet.

Stockholm i februari 2026

Susanne Stjernfeldt

Sammanfattning

Det finns olika trender som påverkar sannolikheten för interferens på grund av spänningsdippar och transienter. Denna rapport innehåller en systematisk studie av relevansen för de olika trenderna.

Rapporten behandlar tre viktiga elkvalitetshändelser: spänningsdippar på grund av kortslutningar eller jordfel; transienter i spänning och ström på grund av påkoppling av en kapacitans; spänningsdippar på grund av påkoppling av en transformator. För dessa tre händelser görs det en kartläggning av förändringar i emission, spridning och immunitet på grund av ett flertal trender. Några av trenderna som behandlas i rapporten är: bygga nya luftledning; ersätta luftledning med kablar; svaga driftlägen i transmissionsnät; anslutning av moderna kraftelektroniska apparater till elnätet; och klimatförändring.

Förändringar i emission, spridning och immunitet bestämmer tillsammans förändringar i antalet fall av interferens, det som i slutändan är viktigast för alla studier om elkvalitet.

Det förväntas inga stora förändringar i emission; dvs inga stora ändringar i antalet kortslutningar, antalet jordfel, antalet påkopplingar av kapacitanser, och antalet påkopplingar av transformatorer.

Det förväntas märkbara förändringar i spridning och det behövs ytterligare studier för att kunna kvantifiera detta och för att få mer insyn i dessa förändringar. Ersättning av luftledning med kablar i transmissionsnät samt svaga driftlägen i transmissionsnätet kan leda till djupare dippar och därmed flera bortkopplingar av anläggningar. Ökning av antalet kablar vid högre spänningsnivåer förväntas leda till mer allvarigare transienter vid början och slutet av dippar, samt till högre risk för förstärkning av transienter vid dippar och på grund av påkoppling av kapacitanser. Kablar på högre spänningsnivåer förväntas också ge en ökning av risk för temporära överspänningar.

Det förväntas också märkbara förändringar i utrustnings immunitet mot dippar och transienter. Det finns dock en stor brist på kunskap om modern utrustnings immunitet mot dippar och transienter. Det behövs en seriös forskningssatsning för att få mer insyn i hur moderna apparater uppför sig under spänningsdippar och transienter. Det ska bland annat ingå vilken roll karakteristiker som obalans, fasvinkelhopp, och dipptransienter spelar i apparaters immunitet mot spänningsdippar.

Sammanfattningsvis, ser författarna inga stora hot just nu, men individuella kunder kan drabbas mycket av förändringarna och då det finns en del brist på kunskaper behövs ytterligare studier.

Nyckelord

Elkraftsystem, elkvalitet, spänningsdippar, transienter, emission, spridning av störningar, immunitet, interferens

Summary

There are various trends that affect the likelihood of interference due to voltage dips and transients. This report contains a systematic study of the relevance of those different trends.

The report addresses three important power quality events: voltage dips due to short circuits or ground faults; transients in voltage and current due to the connection of a capacitance; voltage dips due to the connection of a transformer. For these three events, changes in emission, propagation and immunity are mapped due to several trends. Some of the trends addressed in the report are building new overhead lines; replace overhead lines with cables; weak operating modes in transmission networks; connection of modern power electronic devices to the power grid; and climate change.

Changes in emission, propagation and immunity together determine changes in the number of cases of interference, which is what matters in the end for any power quality study.

No major changes in emission are expected, i.e. no major changes in the number of short circuits, the number of earth faults, the number of capacitance energizations, and the number of transformer energizations.

Noticeable changes in propagation are expected, and further studies are needed to quantify this and to gain more insight in these changes. Replacement of overhead lines by cables in the transmission network and weak operating modes in the transmission network can lead to deeper dips and thus more tripping of installations. Increasing the number of cables at higher voltage levels is expected to lead to more severe transients at the beginning and ending of dips, as well as to a higher risk of amplification of voltage dip transients and transients due to the energization of capacitances. Cables at higher voltage levels are also expected to increase the risk of temporary overvoltages.

Noticeable changes in the immunity of equipment to dips and transients are expected. However, there is a great lack of knowledge about the immunity of modern equipment to dips and transients. A serious research effort is needed to gain more insight into how modern equipment behaves during voltage dips and during transients. Among other things, it should include the role of characteristics such as unbalance, phase angle jumps, and dip transients for the immunity of equipment to voltage dips.

In conclusion, the authors do not see any major threats, but individual customers may be greatly affected by the changes and there is lack of knowledge that needs further study.

Innehåll

1	Inledning	12
2	Interferens, händelser och trenderna	13
2.1	Elkvalitet, störningar och interferens	13
2.2	Emission, spridning och immunitet	13
2.3	Trenderna som har studerats	14
2.4	Händelser som har studerats	15
3	Översikt av resultaten	16
3.1	Spänningsdippar på grund av jordfel och kortslutningar	16
3.1.1	Kortslutningar och jordfel	16
3.1.2	De viktigaste trenderna	16
3.1.3	Rekommendationer	17
3.2	Transienter på grund av påkoppling av kapacitanser	18
3.2.1	Påkoppling av kapacitanser	18
3.2.2	De viktigaste trenderna	18
3.2.3	Rekommendationer	18
3.3	Spänningsdippar på grund av påkoppling av transformatorer	19
3.3.1	Påkoppling av transformatorer	19
3.3.2	De viktigaste trenderna	19
3.3.3	Rekommendationer	19
4	Spänningsdippar på grund av kortslutningar och jordfel	21
4.1	Översikt över påverkan	21
4.2	Allmän beskrivning av fenomenen	21
4.3	Förändringar i emission	23
4.3.1	Nya luftledning	23
4.3.2	Kablar istället för luftledning	23
4.3.3	Ersättning av seriekompenserade ledningar	24
4.3.4	Vind- och solkraft	25
4.3.5	Svaga drifttillstånd i transmissionssystemet	25
4.3.6	Stora effektlöden över långa avstånd	25
4.3.7	Modern kraftelektronisk utrustning	25
4.3.8	Utrustning som beter sig likadant under en spänningsstörning	25
4.3.9	Klimatförändringar	25
4.4	Förändringar i spridning	26
4.4.1	Nya luftledning	26
4.4.2	Kablar istället för luftledning	28
4.4.3	Seriekompenserade ledningar	31
4.4.4	Vind- och solkraft	31
4.4.5	Svaga drifttillstånd i transmissionssystemet	32
4.4.6	Stora effektlöden över långa avstånd	36

4.4.7	Modern kraftelektronisk utrustning	37
4.4.8	Utrustning som beter sig likadant under en spänningsstörning	37
4.4.9	Klimatförändringar	38
4.5	Förändringar i immunitet	38
4.5.1	Nya luftledningar	39
4.5.2	Kablar istället för luftledningar	39
4.5.3	Ersättning av seriekompenserade ledningar	39
4.5.4	Vind- och solkraft	39
4.5.5	Svaga drifttillstånd i transmissionssystemet	39
4.5.6	Stora effektlöden över långa avstånd	40
4.5.7	Modern kraftelektronisk utrustning	40
4.5.8	Utrustning som beter sig likadant under en spänningsstörning	41
4.5.9	Klimatförändringar	41
5	Transienter på grund av inkoppling av kapacitanser	42
5.1	Översikt över påverkan	42
5.2	Allmän beskrivning av fenomenen	43
5.2.1	Grundläggande uttryck	43
5.2.2	Dämpningens roll i nätet	43
5.2.3	Roll för shunt-dämpning	44
5.2.4	Shunt- och seriedämpning	45
5.2.5	Synkroniserad påkoppling och amplitud av transienten	46
5.2.6	Back-to-back påkoppling	46
5.2.7	Påkoppling av kablar och luftledningar	47
5.2.8	Förstärkning av transienten	48
5.3	Förändringar i emission	48
5.3.1	Nya luftledningar	48
5.3.2	Kablar istället för luftledningar	49
5.3.3	Ersättning av seriekompenserade ledningar	49
5.3.4	Vind- och solkraft	49
5.3.5	Svaga drifttillstånd i transmissionssystemet	49
5.3.6	Stora effektlöden över långa avstånd	49
5.3.7	Modern kraftelektronisk utrustning	49
5.3.8	Utrustning som beter sig likadant under en spänningsstörning	49
5.3.9	Klimatförändringar	49
5.4	Förändringar i spridning	50
5.4.1	Nya luftledningar	50
5.4.2	Kablar istället för luftledningar	50
5.4.3	Ersättning av seriekompenserade ledningar	51
5.4.4	Vind- och solkraft	51
5.4.5	Svaga drifttillstånd i transmissionssystemet	52
5.4.6	Stora effektlöden över långa avstånd	52
5.4.7	Modern kraftelektronisk utrustning	52

5.4.8	Utrustning som beter sig likadant under en spänningsstörning	52
5.4.9	Klimatförändringar	52
5.5	Förändringar i immunitet	53
5.5.1	Nya luftledning	53
5.5.2	Kablar istället för luftledning	53
5.5.3	Ersättning av seriekompenserade ledningar	53
5.5.4	Vind- och solkraft	53
5.5.5	Svaga drifttillstånd i transmissionssystemet	53
5.5.6	Stora effektlöden över långa avstånd	53
5.5.7	Modern kraftelektronisk utrustning	53
5.5.8	Utrustning som beter sig likadant under en spänningsstörning	54
5.5.9	Klimatförändringar	54
6	Transformatorpåkoppling	55
6.1	Effekter av de olika förändringarna	55
6.2	Översikt av fenomenet	55
6.2.1	Likströmskomponenten i strömmen	56
6.2.2	Mättnings och vågformsförvrängning	56
6.2.3	Sympatisk interaktion	58
6.2.4	Temporär överspänning	58
6.3	Förändringar i emission	59
6.3.1	Nya luftledning	59
6.3.2	Kablar istället för luftledning	59
6.3.3	Ersättning av seriekompenserade ledningar	59
6.3.4	Vind- och solkraft	59
6.3.5	Svaga drifttillstånd i transmissionsnätet	59
6.3.6	Stora effektlöden över långa avstånd	59
6.3.7	Modern kraftelektronisk utrustning	59
6.3.8	Utrustning som beter sig likadant under en spänningsstörning	59
6.3.9	Klimatförändringar	60
6.4	Förändringar i spridning	60
6.4.1	Nya luftledning	60
6.4.2	Kablar istället för luftledning	60
6.4.3	Ersättning av seriekompenserade ledningar	63
6.4.4	Vind- och solkraft	64
6.4.5	Svaga drifttillstånd i transmissionsnätet	65
6.4.6	Stora effektlöden över långa avstånd	65
6.4.7	Modern kraftelektronisk utrustning	65
6.4.8	Utrustning som beter sig likadant under en spänningsstörning	66
6.4.9	Klimatförändringar	66
6.5	Förändringar i immunitet	66
6.5.1	Nya luftledning	66
6.5.2	Kablar istället för luftledning	66

6.5.3	Ersättning av seriekompenserade ledningar	66
6.5.4	Vind- och solkraft	66
6.5.5	Svaga drifttillstånd i transmissionssystemet	67
6.5.6	Stora effektfloeden över långa avstånd	67
6.5.7	Modern kraftelektronisk utrustning	67
6.5.8	Utrustning som beter sig likadant under en spänningsstörning	68
6.5.9	Klimatförändringar	68
7	Referenser	69

1 Inledning

Denna rapport beskrivs förväntade trender i sannolikhet för interferens på grund av tre vanliga händelser i elnätet: kortslutningar och jordfel; påkoppling av kablar, kondensatorer och andra kapacitiva element; påkoppling av transformatorer.

Projektet utfördes av Math Bollen och Abdallah Uosef vid Elkraftteknik på Luleå tekniska universitet i Skellefteå.

Kapitel 1 till och med 3 skrevs av Math Bollen som en inledning samt en sammanfattning av de viktigaste resultaten från Kapitel 4 tom 6. Kapitel 4 till och med 6 skrevs av Math Bollen med input från Abdallah Uosef. Originalversionen av dessa kapitel skrevs på engelska; det gjordes en översättning till svenska med hjälp av den automatiska översättningsfunktionen i Word.

Språkgranskningen av hela rapporten gjordes av Sarah Rönnberg.

2 Interferens, händelser och trenderna

2.1 ELKVALITET, STÖRNINGAR OCH INTERFERENS

Det finns många olika definitioner av elkvalitet ("power quality" på engelska), till stor del beroende på hur man ser på elkvalitetens mål och omfattning. Författare av rapporten brukar beskriva elkvalitet med referens till en hypotetisk ideal spänning och ideal ström i elnätet. Den ideala spänningen är en sinusvåg med konstant amplitud (230 V i det svenska lågspänningsnätet), med konstant frekvens (50 Hz), utan vågformsdistorsion, och utan obalans i ett trefasnät. Den ideala strömmen har då också konstant amplitud, osv; den är även i fas med spänningen.

Elkvalitet handlar då om alla avvikelser från idealspänning och idealström. Dessa avvikelser refereras till som "störningar" ("disturbances", på engelska). Det betyder i praktiken att det alltid finns störningar i både spänning och ström. Idealvärden kan bara nås i en simulering, inte i verkligheten. Att det finns störningar i spänning och ström (dvs avvikelser från idealvärdet) är inte något man behöver oroa sig för. Det som man ska oroa sig för är när dessa störningar har en negativ påverkan, till exempel att en apparat ansluten till nätet oförväntat kopplas bort. Sådan negativ påverkan refereras till som "interferens" ("interference" på engelska). Det slutliga målet med all forskning, mätning, standardisering, och allt annat inom elkvalitet är att förebygga eller minska sannolikheten för interferens. Även om målet är att förebygga interferens, då handlar aktiviteterna inom elkvalitet till största delen om störningar. Men det är viktigt att ha hela tiden i bakhuvudet att det handlar till slutet om interferens.

Det finns olika typer av störningar, som då oftast delas upp i "variationer" ("variations" på engelska) och "händelser" ("events" på engelska). Variationer är störningar som finns hela tiden, som övertoner och spänningsvariationer ("spänningsamplitudvariationer" skulle vara ett mer korrekt begrepp, men spänningsvariationer är det som oftast används). Variationer går att mäta hela tiden. Händelser är större avvikelser från idealvärdet, som inträffar när någon parameter överskrider ett tröskelvärde, som till exempel spänningsdippar, transienter, och avbrott. Det finns ingen hård gräns mellan variationer och händelser och det finns inte heller något unikt sätt att definiera de olika störningstyperna. Vid Luleå tekniska universitet har det till exempel introducerats två nya störningstyper: supratoner (som fick stor uppmärksamhet) och mellansnabba spänningsvariationer (som fick nästan ingen uppmärksamhet). Skillnaden i uppmärksamhet har sannolikt att göra med att det finns många fall av interferens på grund av supratoner men inga kända fall av interferens på grund av mellansnabba spänningsvariationer.

2.2 EMISSION, SPRIDNING OCH IMMUNITET

I denna rapport kommer vi att använda ytterligare tre begrepp: "emission" (samma ord på engelska), "spridning" ("propagation" eller "transfer" på engelska) och "immunitet" ("immunity" på engelska). Begreppen har använts länge i olika sammanhang; de användes i [1] för att jämföra hur elkvalitet påverkas av olika

trender vid elproduktion, vid elförbrukning och i elnätet. Den grundläggande tanken med studien var då att relevansen av all påverkan finns i ändringar i sannolikheten för interferens. Ändringar i sannolikheten för interferens kan orsakas av:

- Ändringar i mängden emission
- Ändringar i spridning av störningar från källan till apparaterna som potentiellt drabbas
- Ändringar i apparaters immunitet mot störningarna

Uppdelningen används också i slutrapporten av CIGRE arbetsgrupp C4.24 [2]. Rapporten fokuserar på vågformsdistorsion; händelser som dippar och transienter behandlas i mindre detalj i rapporten.

Länken mellan emission, spridning, immunitet och interferens kan beskrivas genom följande olikhet som kriteriet för inträffandet av interferens.

$$Emission \times Spridning > Immunitet \quad (1)$$

Det finns interferens om olikheten gäller och det finns ingen interferens om olikheten inte gäller. Ökning av sannolikhet till interferens kommer därmed att inträffa på grund av:

- Ökning av emission
- Ökning av spridning
- Minskning av immunitet

Obs. författare är helt medveten om att de inte följer det korrekta sättet att notera matematiska formel och att det behövs en hel del mer definitioner innan man kan komma till en sådan formel. Målet är dock bara att illustrera hur de tre begreppen relaterar till interferens.

Termen emission används till exempel i elkvalitets- och EMC-standarder oftast för variationer som övertoner (vågformsdistortion) eller elektromagnetisk strålning ("luftburen emission"). Termen kan dock också användas för händelser som spänningsdippar och transienter. Vid spänningsdippar på grund av kortslutningar och jordfel motsvarar emissionen felets förekomst.

2.3 TRENDERNA SOM HAR STUDERATS

Det har studerats konsekvenser av ett 10-tal olika trender, vissa trender finns tydliga, andra mindre tydliga. Listan är inte komplett heller, men vi har försökt att täcka de flesta pågående utvecklingarna i alla fall.

För varje trend har det gjorts en bedömning av hur den påverkar emission, spridning och immunitet för tre olika händelser. För vissa kombinationer har det bara gjorts en kvalitativ bedömning, för andra kombinationer har det gjorts beräkningar.

De följande trenderna har tagits med i studien:

- Nya luftledning; här gäller det framför allt nya luftledningar på de högre spänningsnivåerna.
- Ersätta luftledningar med kablar eller nya kablar istället för nya luftledningar.
- Ersätta seriekompenserade luftledningar med okompenserade luftledningar.
- Storskalig introduktion av solkraft och vindkraft
- Driftlägen i transmissionsnät med låg kortslutningseffekt; vi kommer att referera till detta som "svaga driftlägen"
- Överföring av stora mängder effekt över långt avstånd
- Anslutning av moderna kraftelektroniska apparater till elnätet; det kan vara allt från LED belysning till HVDC länkar.
- Stora mängder apparater som uppför sig likadana under en störning i spänning
- Klimatförändring

2.4 HÄNDELSER SOM HAR STUDERATS

Den här rapporten behandlar trender i emission, spridning och interferens för tre specifika händelser:

- kortslutningar och jordfel
- påkoppling av kapacitanser
- påkoppling av transformatorer

En kort beskrivning av händelserna samt en översikt av de viktigaste resultaten finns i Kapitel 3. Ändringar i emission, spridning och immunitet, för dessa tre händelser kommer att behandlas i detalj in Kapitel 4, 5 och 6.

3 Översikt av resultaten

3.1 SPÄNNINGSDIPPAR PÅ GRUND AV JORDFEL OCH KORTSLUTNINGAR

3.1.1 Kortslutningar och jordfel

En kortslutning (en lågimpedans förbindelse mellan två eller tre faser) och ett jordfel (en lågimpedans förbindelse mellan en, två eller tre faser och jord) ger en spänningssänkning i en del av elnätet. Delen av nätet där en märkbar spänningssänkning inträffar är liten vid ett fel i lågspänningsnätet, men stor vid ett fel i transmissionsnätet. Spänningen kommer tillbaka när skyddet tar bort felet. Händelsen i spänningen refereras till som en spänningsdipp med kvarstående spänning och varaktighet som de två mest diskuterade egenskaper (ordet "karaktistiker" används oftast i litteraturen istället för "egenskaper"). Andra karaktistiker har dock också fått en del mer uppmärksamhet under åren, som obalans och fasvinkelhopp (även ordet "fashopp" används; se Avsnitt 4.2). Oscillationer vid början och slutet av en spänningsdipp ("spänningsdipptransienter" eller "dipptransienter") har fått begränsat med uppmärksamhet i litteraturen. Spänningsdippar på grund av kortslutningar och jordfel, samt deras karaktistiker, behandlas i mer detalj i Kapitel 4.

3.1.2 De viktigaste trenderna

3.1.2.1 *Emission*

Det förväntas en ökning av antalet fel på grund av att det byggs nya luftledningar på högre spänningsnivåerna; även klimatförändringen förväntas ge en ökning av antalet fel. Ersättning av luftledningar med kablar kommer att minska antalet fel i låg- och mellanspänningsnät.

För transmissionsnät kommer det att vara en liten eller även försumbar ändring av antalet dippar; ändringar i spridning kommer i de flesta fall att ha större påverkan.

3.1.2.2 *Spridning*

Det som är mer relevant för känslig utrustning (och därmed för nätanvändare) än ändringar i antalet fel är ändringar i spridning av dippar. Det som påverkar kvarstående spänning är nya luftledningar, ersättning av luftledningar med kablar och drifttillstånd av transmissionsnät med låg kortslutningseffekt på grund av att stora kraftstationer inte är i drift. Det sista ger alltid en minskning av kvarstående spänning och en ökning av antalet dippar som upplevs av känslig utrustning. Nya luftledningar och ersättning av luftledningar med kablar kan leda till en ökning så väl som en minskning av kvarstående spänning och därmed av antalet dippar. Här saknas det statistik om antalet fel och studier med hjälp av realistiska nätmodeller.

Vad gäller de andra karaktistiker, då kommer det att bli en ökning i fasvinkelhoppet under felet på grund av ersättning av luftledningar med kablar. Det kommer också att bli en ökning av fasvinkelhoppet efter felet på grund av överföring av stora mängder av effekt över långt avstånd.

Ökning av mängden kapacitans ansluten till nätet (nya kablar, EMC filter vid kraftelektroniska apparater) påverkar dipptransienter där en minskning i oscillationsfrekvens och en ökning av amplituden förväntas. Även här behövs det dock detaljerade studier med hjälp av realistiska modeller

3.1.2.3 Immunitet

Ändringar i immunitet kommer att finnas till största delen på grund av nya typer av kraftelektroniska apparater. Det finns begränsat med studier om deras immunitet mot spänningsdippar. Från den begränsade mängden litteratur kan det dock redan konkluderas att övriga karakteristiker (utöver kvarstående spänning och varaktighet) kommer att påverka utrustning mer än förut. Det har också blivit tydligt, redan från den begränsade mängden litteratur, att det finns en stor spridning i hur utrustning uppför sig.

Risken finns fortfarande kvar att stora mängder utrustning (produktion så väl som förbrukning) kopplas bort samtidigt under en dipp. Osäkerheter i hur utrustning påverkas av de övriga karakteristikerna gör att det är svårt att uppskatta risken för en sådan storskalig bortkoppling. Den stora spridningen i hur utrustning uppför sig under en dipp ger dock en minskning av risken.

3.1.3 Rekommendationer

För att kunna kvantifiera hur spridningen påverkas av de olika ändringarna behövs det flera studier. Det gäller då delvis studier med förenklade modeller för att kunna beskriva vad som påverkar kvarstående spänningen och antalet dippar. Sådan information är också relevant för undervisning om elkvalitet samt andra sätt att sprida kunskaper om elkvalitet. Det rekommenderas att sådana studier utförs av akademiska forskare.

Utöver detta behövs det studier med detaljerade och verklighetsnära modeller för att kunna bedöma hur individuella nätanvändare och hela kundkollektivet påverkas av de olika ändringarna. För sådana studier behövs tillgång till stora mängder information om elnätet. Akademiska forskare brukar inte ha tillgång till denna information och rekommenderas att sådana studier utförs av elnätsföretag eller konsultföretagen på uppdrag av elnätsföretag.

Den stora utmaningen för forskningen är att utveckla kunskaper om hur modern kraftelektronisk utrustning påverkas av spänningsdippar och vilka konsekvenser det har för utrustningens immunitet. Det finns stora kunskapsbrister om påverkan av övriga karaktärstyper som obalans, fasvinkelhopp och dipptransienter. Här är det igen viktigt att resultat från forskningen sprids, som igen leder till rekommendationen att sådana studier utförs av akademiska forskare.

Det rekommenderas att definiera standardmetoder för att kvantifiera obalans och fasvinkelhopp från mätningar av spänningsdippar. Även för dipptransienter behövs det en sådan metod; här krävs det dock en del forskning först. Föreskrifter och standarder om störningstålighet borde ta med andra karakteristiker än bara kvarstående spänning och varaktighet.

Det behövs kunskapsspridning av dippens egenskaper åt tillverkare av utrustning. En uppdatering av checklistan enligt CIGRE arbetsgrupp C4.110 skulle vara ett bra första steg [62]. En sådant lista skulle kunna bli en rekommendation istället för en standard om störningstålighet.

3.2 TRANSIENTER PÅ GRUND AV PÅKOPPLING AV KAPACITANSER

3.2.1 Påkoppling av kapacitanser

Kapacitanser finns i olika former i elnätet: bland annat kondensatorbatterier, luftledning, kablar, och små kondensatorer vid nätdelen i elektroniska apparater. När en sådan kapacitans kopplas på blir det en oscillation som sprids genom nätet och som kan påverka utrustning ansluten till elnätet.

3.2.2 De viktigaste trenderna

3.2.2.1 *Emission*

Modern utrustning drar ofta liten eller ingen reaktiv effekt. Det har minskat behovet på kondensatorbatterier i låg- och mellanspänningsnäten. Antalet fall av påkoppling har därmed minskat.

Kablar istället för luftledningar på högre spänningar har en betydligt högre kapacitans. Antalet påkopplingar kommer inte att öka men de resulterande transienterna kommer att vara av lägre oscillationsfrekvens och förmodligen en högre amplitud.

Påkoppling av elektronisk utrustning ger också transienter. De är dock ofta av kort varaktighet på grund av den höga dämpningen i lågspänningsnät.

3.2.2.2 *Spridning*

Ändringar i spridning gäller framför allt oscillationsfrekvensen; den kommer att bli lägre på grund av högre andel kapacitans ansluten till nätet.

Högre andel kapacitans ansluten till nätet och mindre dämpning i modern utrustning kommer också att öka risken för förstärkning av oscillationerna i underliggande nät.

3.2.2.3 *Immunitet*

Lite är känt om hur modern utrustning påverkas av transienter på grund av påkoppling av kondensatorer.

3.2.3 Rekommendationer

Studier behövs för att bättre beskriva hur transienterna sprids genom nätet. Det behövs samma modeller för detta som för spridning av dipptransienter. Mest viktigt att studera är vad risken är att det inträffar en förstärkning av transienter vid lägre spänningsnivåer.

Det behövs studier av hur modern utrustning påverkas av transienter, framför allt när det finns förstärkning nära utrustningarnas klämmor. Det behövs forskning om karakteristiker av transienter samt om modellering av dämpningen.

Det behövs en standardmetod för att karakterisera transienternas karakteristiker från mätningar. En sådan metod skulle det göra enklare att samla statistik om transienterna förekomst och spridning.

På samma sätt som för dippar behövs det rekommendationer och/eller krav om utrustnings immunitet mot transienter. Rekommendationer skulle kunna kombineras med checklistan som nämndes i Avsnitt 3.1.3.

3.3 SPÄNNINGSDIPPAR PÅ GRUND AV PÅKOPPLING AV TRANSFORMATORER

3.3.1 Påkoppling av transformatorer

Påkoppling av en transformator leder till en sänkning av spänning och höga nivåer av övertoner; nivåerna är högst och mest långvariga för obelastade transformatorer.

3.3.2 De viktigaste trenderna

3.3.2.1 Emission

Det förväntas ingen stor ökning av totala antalet påkopplingar av transformatorer. Det kan dock bli en ökning lokalt på grund av förstärkning av nätet.

3.3.2.2 Spridning

Ökning av kapacitanser i nätet ger lägre resonansfrekvenser och därmed en högre risk för förstärkning av övertonerna som kommer från transmissionsnätet. Risken av temporära överspänningar ökar därmed. Framför allt långa växelströmskablar på högre spänningar kan orsaka detta. Även driftlägen med låg kortslutningseffekt kan ge samma konsekvenser.

3.3.2.3 Immunitet

Det finns mycket begränsat med information om hur dippar på grund av transformatorpåkoppling påverkar modern utrustning. Det har gjorts ett begränsat antal studier som dock huvudsakligen tyder på att modern utrustning kan vara känslig mot sådana händelser.

3.3.3 Rekommendationer

Det behövs flera studier, i detaljerade och verklighetsnära modeller av elnätet, för att få en bättre uppfattning av hur kablfiering på högre spänningsnivåer påverkar spridning av spänningsdippar på grund av transformatorpåkoppling.

Även här behövs det simuleringar och experiment för att få mer insyn i immunitet hos modern utrustning.

Vad gäller standardiseringen då finns det likadana rekommendationer som för dippar på grund av fel och för transienter.

4 Spänningsdippar på grund av kortslutningar och jordfel

4.1 ÖVERSIKT ÖVER PÅVERKAN

	Förändringar i emission	Förändringar i spridning	Förändringar i immunitet
Nya luftledningar	Fler fel	Ökning eller minskning av kvarstående spänning, beroende på var den nya ledningar finns	
Kablar istället för luftledningar	Färre fel	Ökning eller minskning av kvarstående spänning, beroende på kabelns placering. Förändringar i dipptransient och i fasvinkelhopp	
Seriekompenserade ledningar	Ingen eller mindre påverkan	Mer komplexa dipptransienter i början av dippen	
Vind- och solkraft	Endast indirekta effekter	Högre risk för storskalig mätning av transformatorer efter ett fel. Viss mindre ökning av kvarstående spänningen	Immuniteten i gränssnittet vid kraftelektronik skiljer sig från den för en synkron generator. Storskalig utlösning av vind- eller solkraft kan äventyra driftssäkerhet
Svaga drifttillstånd i transmissionsnätet		Lägre kvarstående spänning för de flesta felplatser	
Stora effektflöden över långa avstånd		Ökat fasvinkelhopp efter felbortkoppling på grund att av ledningen bortkopplas	
Modern kraftelektronisk utrustning	Påverkan förväntas bli liten	Kapacitansen hos EMC-filtret påverkar dipptransienter	Utrustning är känslig för mer än bara kvarstående spänning och dippens varaktighet. Otillräckligt med kunskaper om detta
Utrustning som betar sig likadant under en spänningsstörning		Kvarstående spänningen kan bli högre eller lägre, beroende på hur utrustningen betar sig	Storskaliga utlösningar kan äventyra transmissionssystemets driftsäkerhet. Otillräckligt med kunskaper om detta
Klimatförändringar	Fler fel		

4.2 ALLMÄN BESKRIVNING AV FENOMENEN

En kortslutning eller jordfel orsakar en hög ström vid felplatsen. Denna höga ström orsakar spänningsfall över en betydande del av elnätet. Vid felbortkoppling återhämtar sig spänningen snabbt, förutom för de delar av systemet som blir spänningslöst på grund av felbortkopplingen.

Vid ett fel i det (maskade) transmissionsnätet kommer kunderna bara att uppleva en spänningsdipp. Vid ett fel i det (radiella) distributionsnätet kommer de flesta kunder att uppleva en spänningsdipp, men vissa kommer att uppleva ett avbrott.

De huvudsakliga egenskaperna för spänningsdippar är spänningsfallet under felet (kvarstående spänning) och varaktigheten av detta spänningsfall (dippens varaktighet). Utöver dessa kan andra egenskaper påverka hur nätansluten utrustning reagerar på spänningsfallet.

- Obalans i spänningen under felet är olika för olika typer av fel. För enfas- och tvåfasfel skiljer sig spänningsfallet mellan de tre faserna, för trefasfel upplever de tre faserna samma spänningsfall.
- De påverkade spänningarna (fas-till-fas eller fas-till-neutral) förändras ofta i fasvinkel i samband med spänningsfallet; det kallas för "fasvinkelhopp" ("phase-angle jump" på engelska) eller "fashopp".
- Oscillationer kan uppstå i början och slutet av en dipp; dessa kallas för "spänningsdipptransienter" eller kort "diptransienter".
- På grund av transformatorns mättning vid spännings återhämtning kan ökade nivåer av udda och jämna övertoner uppstå efter bortkoppling av felet.
- På grund av återuppbyggnaden av luftgapets magnetfält med elektriska maskiner och resynkronisering av dessa maskiner kan spänningsmagnituden förbli reducerad en tid efter felbortkopplingen.

Transienter vid början och slutet av en spänningsdipp diskuteras i detalj i [3] och [4]; De andra fenomenen diskuteras i detalj i bland annat [5], [6] och [7].

I ett radiellt nät galler följande uttryck för kvarstående spänningen på grund av ett trefasfel.

$$U_{dip} = \frac{Z_F}{Z_S + Z_F} \cdot E \quad (2)$$

Där Z_F är impedansen mellan PCC och felet; Z_S källimpedansen vid PCC; PCC (engelska förkortning för "point of common coupling") är punkten för gemensam koppling mellan felet och platsen där spänningsfallet mäts, beräknas eller upplevs.

Detta uttryck gäller för radiella nät, främst för distributionsnät men också för vissa fel i transmissionsnätet. För ett maskat transmissionsnät gäller uttrycket vanligtvis inte, men ett liknande uttryck kan erhållas från relationen mellan spänningar och strömmar via transferimpedansmatrisen. En allmän formulering, som gäller för radiella och maskade nät, lyder så här:

$$U_{dip} = \frac{Z_{FF} - Z_{DF}}{Z_{FF}} \cdot E \quad (3)$$

Där Z_{FF} är källimpedansen vid felplatsen, och Z_{DF} överföringsimpedansen mellan felpositionen och platsen där spänningsfallet mäts, beräknas eller upplevs. Uttryck (2) kan erhållas från (3) genom att ersätta $Z_{FF} = Z_F + Z_S$ och $Z_{DF} = Z_S$.

För illustrativa ändamål, till exempel för att visa trenderna, antar vi i denna rapport att (2) håller.

4.3 FÖRÄNDRINGAR I EMISSION

Termen emission används till exempel i elkvalitets- och EMC-standarder oftast för variationer som övertoner (vågformsdistortion) eller elektromagnetisk strålning ("luftburen emission"). Termen kan dock också användas för händelser som spänningsdippar och transienter. Vid spänningsdippar på grund av kortslutningar och jordfel motsvarar emissionen felets förekomst. Förändringar i emission motsvarar förändringar i antal fel, förändringar i antal kluster av fel och förändringar i feltyper. Kluster av fel kan till exempel uppstå under åskväder eller andra perioder av dåligt väder.

4.3.1 Nya luftledningar

Nya luftledningar kommer att öka antalet kortslutningar och jordfel. Varje sådant fel resulterar i en spänningsdipp, vanligtvis på flera ställen i nätet. Åsknedslag är den vanligaste orsaken till fel på luftledningar, då särskilt ledningar i områden med hög åskfrekvens (ofta uttryckt som isokeraunisk nivå [8]) leder till fler spänningsdippar.

Närvaron av topplinor kan minska antalet fel på grund av åsknedslag, särskilt vid de högsta spänningsnivåerna (400 kV). Vid något lägre spänningsnivåer (130 kV, 220 kV) gör topplinor att åsknedslag leder till enfasfel istället för flerfasiga fel. En studie gjord för varvtalsstyrda drivsystem [9] visade att detta kommer att minska antalet oönskade bortkopplingar avsevärt. Det finns inte tillräckligt med kunskaper om konsekvenserna av symmetriska och osymmetriska spänningsdippar för modern utrustning för att veta om detta även gäller för sådan utrustning.

Nya luftledningar på mellan- eller lågspänningsnivå ger en ökning av emission. Åsknedslag på mellan- och lågspänningsledningar resulterar i en mycket högre andel flerfasiga fel än för luftledningar på högre spänningsnivåer. Byggandet av nya luftledningar på låg- eller mellanspänningsnivå är dock ovanligt i Sverige och i många andra länder. Nya förbindelser på dessa spänningsnivåer är nästan uteslutande i form av kablar.

4.3.2 Kablar istället för luftledningar

I många länder, inklusive Sverige, består nästan hela lågspänningsnätet och stora delar av mellanspänningsnätet av kablar. Ytterligare ersättning av luftledningar med kablar på dessa spänningsnivåer resulterar i färre kortslutningar och jordfel. Detta leder i sin tur till färre spänningsdippar.

Automatisk återinkoppling, för att undvika långa avbrott på grund av tillfälliga fel, är vanligt för luftledningar men inte för kablar. Återinkoppling på ett permanent fel resulterar i flera spänningsdippar, beroende på antalet försök. Automatisk återinkoppling används inte för kablar; detta minskar ytterligare antalet spänningsdippar vid byte av luftledningar till kablar.

På transmissionsnivå sker samma minskning av antalet fel vid utbyte av luftledningarna med jordkablar. Vanligtvis byts dock endast en liten del av transmissionsledningarna ut; därför är minskningen av antalet spänningsdippar sett från individuella kunder liten och ofta försumbar. Ett undantag är när luftledningar ersätts av kablar i transmissions- eller regionnätet runt en större stad eller nära en stor industrianläggning. Detta kan märkbart minska antalet kraftiga dippar för kunder i eller runt staden eller för den industriella installationen. Ersättning av luftledningar med kablar i en stor del av transmissionssystemet kommer att leda till flera stora tekniska utmaningar som ännu inte är lösta. Dessa utmaningar ligger utanför denna rapport.

I icke-direkt jordade system leder ett enfasigt jordfel till överspänningar i de friska faserna. Förekomsten av kablar i sådana nät ökar sannolikheten för en dubbelt jordfel ("cross-country fault", på engelska). Ett enfasigt jordfel i ett sådant system resulterar inte i en märkbar spänningsdipp vid klämmorna på nätanslutningen. Ett dubbelt jordfel, som involverar flera faser och hög felström, resulterar dock i en seriös spänningsdipp. Moderna kablar, avsedda för användning i icke-direkt jordade system, är dock utformade så att sannolikheten för dubbla jordfel förblir liten.

Bara för att undvika förvirring: kablar uppvisar visserligen fel, men deras antal är mycket lägre (när det uttrycks per kilometer per år) än antalet fel på luftledningar. Kabelfel tar generellt mycket längre tid att reparera, så att utbyte av luftledningar mot kablar förbättrar inte alltid leveranssäkerheten, men från dippens perspektiv är kablar en förbättring.

4.3.3 Ersättning av seriekompenserade ledningar

Detta förväntas inte leda till några märkbara förändringar i antalet fel på ledningar.

Installationen med seriekondensatorn innehåller dock flera komponenter, där varje komponent är en potentiell felplats. Detta kommer att ge en ökning av antalet fel. Ökningen kommer dock att vara liten; seriekompensation används för långa ledningar, så att antalet fel på den faktiska luftledningen fortfarande dominerar.

Ett fel i seriekondensatorinstallationen kommer också att vara långt från en station och därmed långt från kunder som kan vara känsliga för spänningsdippar. För att illustrera detta har kvarstående spänningen beräknats för sådana fel; resultaten visas i Tabell 1. En nominell spänning på 400 kV antas; ledningsimpedansen som används är 300 mΩ/km; kortslutningseffekterna som används är 5 % och 95 % värden för det brittiska 400 kV-nätet (se Tabell 5); Ekvation (2) har använts för att beräkna kvarstående spänningen. Även vid ett svagt nät och en relativt kort seriekompenserad ledning förblir dippen begränsad i storleken.

Tabell 1. Kvarstående spänning för fel i seriekompensatorinstallationen

Kortslutningseffekten vid stationen	Avstånd till felen			
	100 km	150 km	200 km	250 km
9 GVA	63%	72%	77%	81%
26 GVA	86%	90%	92%	94%

4.3.4 Vind- och solkraft

Vind- och solkraft påverkar inte direkt antalet spänningsdippar på grund av kortslutningar och jordfel. Det finns indirekta effekter genom byggandet av nya luftledningar för att ansluta stora vindkraftsanläggningar; detta diskuteras i Avsnitt 4.3.1.

4.3.5 Svaga drifttillstånd i transmissionssystemet

Detta förväntas inte leda till några förändringar i antalet fel.

4.3.6 Stora effektlöden över långa avstånd

Detta förväntas inte leda till några förändringar i antalet fel.

4.3.7 Modern kraftelektronisk utrustning

Varje ny enhet som är ansluten till nätet kommer att introducera en ny plats där ett fel kan uppstå. Detta gäller särskilt för stor utrustning och installationer som vindparker och HVDC förbindelser. Införandet av nya felplatser (förändringar i emission) på grund av de nya transmissionsledningarna som detta kräver diskuteras i Avsnitt 4.3.1. Förutom detta kommer ökningen av antalet fel på grund av ny utrustning och installationer i nätet troligen att vara begränsad eller även försumbar.

4.3.8 Utrustning som beter sig likadant under en spänningsstörning

Detta förväntas inte leda till några förändringar i antalet fel.

4.3.9 Klimatförändringar

Det är nu bortom allt rimligt tvivel att världsklimatet förändras och att detta främst kommer att vara kopplat till högre temperaturer. Det finns till och med tydliga tecken på att denna förändring accelererar [10, 11]. Den detaljerade konsekvensen av klimatförändringar för vädret i olika delar av världen är fortfarande ett pågående forskningsområde. Flera studier pekar dock på fler åskväder, kraftigare stormar och starkare åskintensitet [12]; andra studier tyder dock på en minskning av mängden åsknedslag [13].

En studie för det arktiska området [14] visade ungefär en fördubbling av sommarens åskintensitet vid seklets slut. Den exakta formuleringen i artikeln är att

"sommarens åskintensitet förväntas öka mellan 74 % och 150 % under perioden 2081 till 2100".

De flesta spänningsdippar beror på åsknedslag; förändringar i åskintensitet och -frekvens kommer alltså att ha stor inverkan på antalet dippar. Fördelningen av åskströmmar påverkar andelen flerfasiga fel på grund av åsknedslag. Det finns otillräcklig information om förändringar i åskvädrets karaktär för att dra några slutsatser om eventuell påverkan på antalet dippar.

En ökning av åskaktivitet kommer också att öka antalet skogsbränder [15]. Ökningen av temperaturen och ökad förekomsten av längre torrperioder har samma konsekvenser. Klimatförändringar har redan visat sig öka antalet och intensiteten av skogsbränder [16, 17], inte bara de som beror på åsknedslag. Detta kommer ytterligare att öka antalet fel och därmed antalet spänningsdippar.

4.4 FÖRÄNDRINGAR I SPRIDNING

En kortslutning eller ett jordfel ger en spänningsdipp på flera ställen i nätet; Generellt blir sänkningar mindre allvarliga längre bort från felsstället, enligt (2). Dippen har vissa egenskaper eller karakteristiker, där kvarstående spänning och varaktighet generellt är de mest beaktade. I detta kapitel beaktar vi dock också andra egenskaper. Spridningen betyder att samma fel ger upphov till dippar med olika egenskaper på olika platser i nätet. Förändringar i spridning betyder att samma fel ger en dipp med andra egenskaper än innan förändringen.

4.4.1 Nya luftledningar

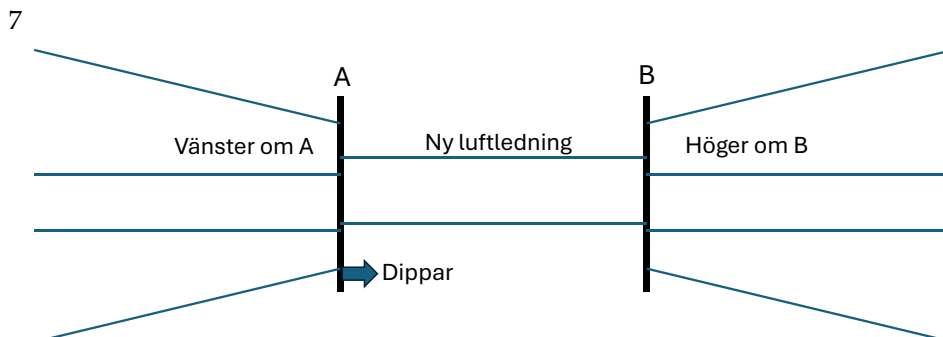
Att lägga till ytterligare luftledningar i transmissionsnätet kan, med hänvisning till (2), påverka både källimpedansen Z_S och impedansen till felet Z_F .

- Att lägga till en eller flera luftledningar mellan PCC och felet minskar impedansen till felet Z_F . Detta resulterar i en lägre kvarstående spänning, vilket ger mer allvarliga spänningsdippar.
- Att lägga till en eller flera transmissionsledningar i den del av nätet som matar felströmmen vid PCC, minskar källimpedansen Z_S . Detta resulterar i en högre kvarstående spänning och därmed mindre allvarliga spänningsdippar.

Detta kan ge intrycket att var man bygger en ny luftledning avgör om spänningsdippen blir mer eller mindre allvarlig. Det är fallet om man betraktar ett enda felställe. Dock kan fel uppstå var som helst i transmissionsnätet. Antalet allvarliga spänningsdippar (dvs. antalet fall av interferens, utrustning som löser ut på grund av dippar) kan öka eller minska. Det finns ingen allmän regel för detta, och varje fall behöver en separat studie.

Betrakta det förenklade transmissionsnätet i Figur 1; en ny luftledning byggs mellan stationerna A och B, intill den befintliga ledningen eller ledningarna mellan dessa två stationer. Det finns ytterligare ledningar kopplade till station A ("Vänster om A" i figuren) och ytterligare ledningar kopplade till station B ("Höger om B").

Bakom de flesta luftledningar i figuren finns ytterligare ett transmissionsnät med bland annat produktionsenheter som bidrar till felströmmen.



Figur 1. Transmissionsnät med en ny luftledning.

Målet med detta illustrativa exempel gäller kvarstående spänningen vid station A under ett fel var som helst i den angivna delen av nätet. Vid ett fel "Vänster om A" minskar den nya ledningen källimpedansen vid station A, vilket resulterar i odjupare dippar. Hur mycket det förbättrar situationen beror på antalet ledningar som är anslutna till station A och deras bidrag till felströmmen. Ju fler ledningar och ju större deras bidrag till felströmmen är, desto mindre påverkan från den nya luftledningen.

Ett fel på den nya ledningen mellan A och B kommer att leda till ytterligare spänningsdippar. Dessa fel kommer att resultera i allvarliga dippar (låg kvarstående spänning) eftersom felet ligger nära station A. Det elektriska avståndet (impedansen till felet) kommer att minskas ytterligare på grund av förekomsten av en parallell ledning [18].

För fel i den befintliga ledningen mellan A och B blir impedansen till felet mindre (igen för att det finns en parallell ledning), vilket resulterar i allvarligare dippar.

För fel på ledningarna "Höger om B" blir impedansen till felet också mindre, eftersom impedansen mellan station A och station B har blivit hälften av sitt ursprungliga värde. Resultatet är en ökning av antalet allvarliga fel.

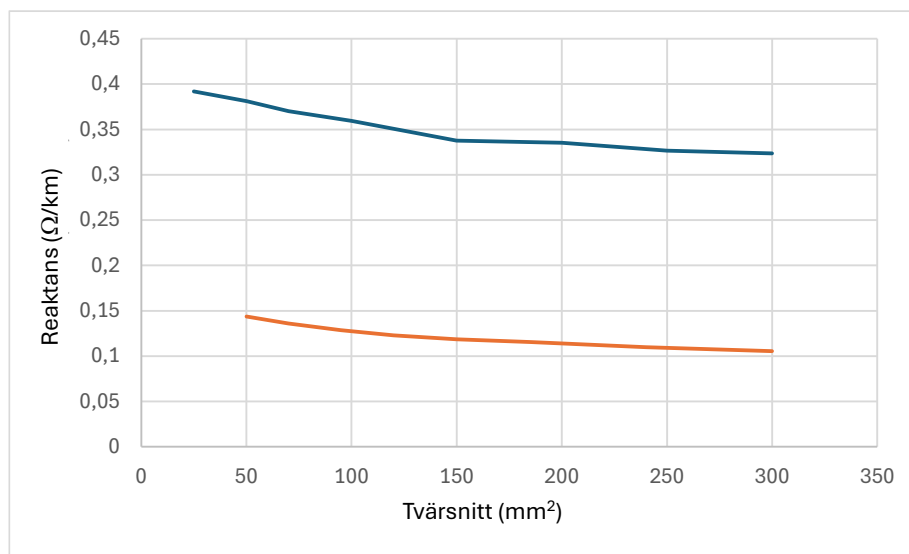
Om allt detta ökar eller minskar antalet dippar med kvarstående spänning under ett visst tröskelvärde (dvs antalet fall av interferens), beror starkt på valet av detta tröskelvärde. Om jämförelsen endast görs för dippar med kvarstående spänning under 70 % kan resultatet bli annorlunda än om jämförelsen görs för alla dippar med kvarstående spänning under 90 %. Resultatet beror också på antalet ledningar och längderna på ledningarna till vänster om A, mellan A och B, och till höger om B.

Det är inte möjligt att dra någon allmän slutsats; istället behövs en studie för varje enskilt fall.

4.4.2 Kablar istället för luftledningar

4.4.2.1 Förändring i kvarstående spänning

Kablar och luftledningar skiljer sig åt i kapacitans, induktans och resistans. Skillnaden påverkar spridning av spänningsdippar. Reaktansen för 33 kV XLPE-kablar och luftledningar jämförs i Figur 2, med data hämtade från [19]. Seriereaktansen (och därmed induktansen) är ungefär en faktor tre mindre för kablar än för luftledningar. Serieresistansen är ungefär densamma, för samma tvärsnittsarea.



Figur 2. Reaktans för 33 kV-kablar (röd linje, övre) och luftledningar (blå linje, nedre)

I ett distributionsnät bestäms källimpedansen, Z_s , i (2), mestadels av transformatorns impedans. Ersättning av luftledningar med kablar, på vardera sida av transformatorn, kommer inte att ha någon märkbar effekt på denna impedans. Impedansen till felet, Z_F , bestäms främst av impedansen av ledningar eller kablar mellan PCC och felet. Eftersom reaktansen hos en kabel är en faktor tre mindre än hos en luftledning, kommer impedansen för felet att vara lägre. Denna effekt är särskilt märkbar vid högre tvärsnittsarea, när reaktansen dominerar.

Fel på distributionskablar orsakar därför lägre kvarstående spänningar än fel på en luftledning, för samma avstånd mellan PCC och felet. Som diskuterades i Avsnitt 4.3.1, är antalet fel på kablar mycket lägre än på luftledningar. Det övergripande resultatet blir därför fortfarande en minskning av antalet dippar med kvarvarande fel under ett tröskelvärde, dvs en minskning av antal fall av interferens.

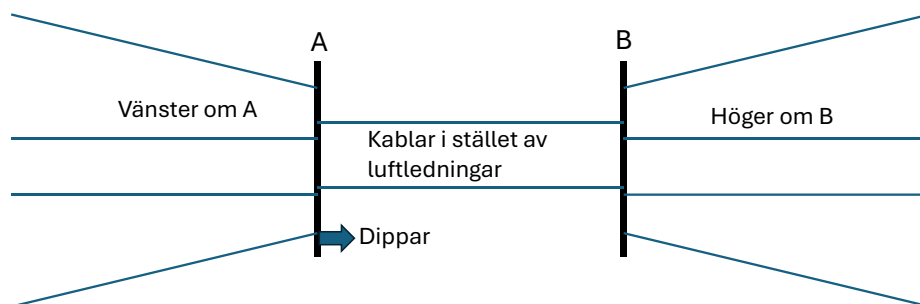
En översikt över seriereaktansen för transmissionskablar ges i Tabell 2, med data hämtade från [20]. Samma källa ger en seriereaktans på 0,39 Ω/km för 132 kV luftledningar och 0,37 Ω/km för 400 kV luftledningar. Tabellen visar att även för transmissionskablar är seriereaktansen ungefär en tredjedel av värdet för luftledningar.

Tabell 2. Seriemarkans (Ω/km) för transmissionskablar

Spänningsnivå	Kabelförskärning (mm^2)						
	400	500	630	800	1000	1200	1600
145 kV		0,13 Ω	0,125 Ω	0,12 Ω	0,115 Ω		
245 kV	0,145 Ω	0,137 Ω	0,134 Ω	0,128 Ω	0,123 Ω	0,199 Ω	0,113 Ω
420 kV			0,172 Ω	0,162 Ω	0,156 Ω	0,151 Ω	0,144 Ω

Dessutom kräver det ofta flera parallella kabelkretsar på transmissionsnivå för att nå samma överföringsförmåga som en luftledning. Detta minskar serieimpedansen med en faktor lika med antalet parallella kabelkretsar. Exempelnätet som presenteras i [21] innehåller åtta kabelanslutningar på 400 kV, vilka alla består av tre parallella kabelkretsar per förbindelse. Av 220 kV-kabelförbindelser består sex av tre parallella kretsar, och åtta av två parallella kretsar.

Samma transmissionsnät som i Figur 1 visas i Figur 3; istället för att lägga till en extra transmissionsledning ersätts luftledningen mellan stationerna A och B av en eller flera kablar. Spänningsdippar beaktas återigen för station A.



Figur 3. Transmissionsnätet där luftledningar ersätts av kablar.

Antalet dippar på grund av fel mellan station A och station B kommer att bli mycket färre när luftledningar ersätts med kablar, som diskuterats i Avsnitt 4.3.2. För sänkningar på grund av fel på de andra ledningarna gäller samma resonemang som för byggandet av nya ledningar, som diskuterats i Avsnitt 4.4.2. Sett från station A ger fel till vänster om station A en mindre kraftig sänkning (högre kvarstående spänning); fel till höger om station B ger en kraftigare sänkning (lägre kvarstående spänning).

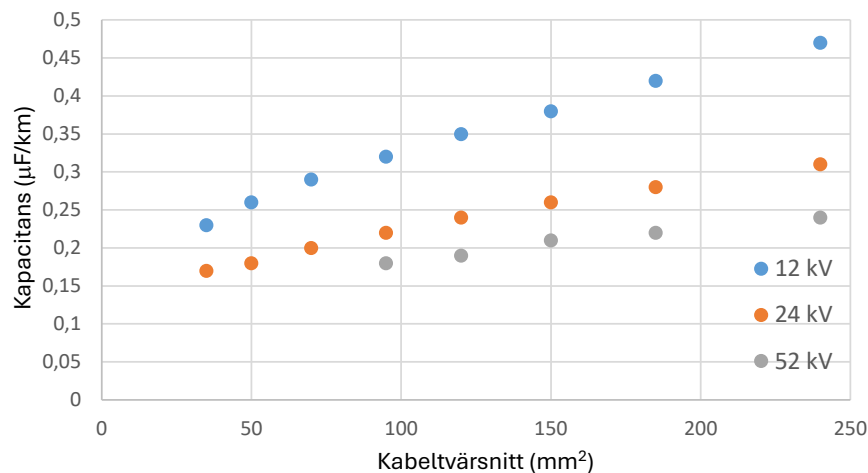
4.4.2.2 Förändring i fasvinkelhopp

Ersättningen av luftledningar med kablar ändrar X/R-förhållandet för källimpedans och/eller för impedans till felet i (2). Detta påverkar fasvinkelhoppet vid spänningsdippen [5]. Fel i kabelnät visar större fasvinkelhopp än fel i ett luftledningsnät.

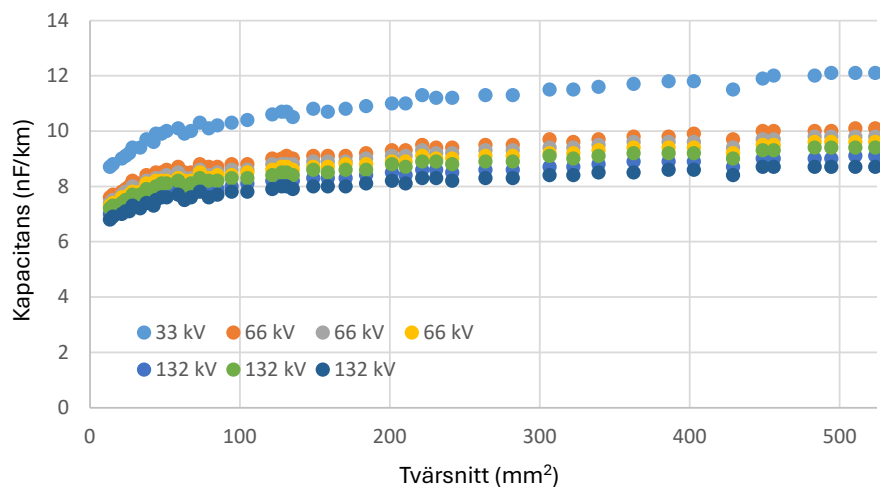
4.4.2.3 Förändring i spänningsdipptransienter

Kablar har en högre kapacitans (per kilometer) än luftledningar. En jämförelse görs i Figur 4 och Figur 5. Kapacitansvärdena, för både kablar och ledningar, beror på

spänningsnivå och tvärsnitt, och en luftledning ersätts vanligtvis inte av en kabel med samma tvärsnitt; Detta gör jämförelsen något svårare. Men om man tittar på värdena i allmänhet ligger kapacitansen i luftledningar oftast mellan 8 nF/km och 12 nF/km; kabelns kapacitans ligger oftast mellan 200 nF/km och 400 nF/km, vilket är en faktor 20 till 50 större. Figur 5 visar att kapacitansen inte bara beror på tvärsnittsarea.



Figur 4. Kabelkapacitans, som funktion av tvärsnittsarea och spänningsnivå [22].



Figur 5. Kapacitans hos luftledningar, som funktion av tvärsnittsarea för olika kabeltyper vid tre olika spänningsnivåer [20].

Ersättningen av luftledningar med kablar ökar därmed systemets kapacitans och resulterar i lägre resonansfrekvenser. För spänningsdippar blir detta synligt som en lägre frekvens av dipptransienterna (oscillationer vid början och slutet av en spänningsdipp). Förändringen är särskilt stor på transmissionsnivå där en luftledningskrets (cirka 12 nF/km) kan ersättas av tre kabelkretsar (med total kapacitans runt 600 nF/km). Information om kapacitans för transmissionskablar presenteras i Tabell 6.

Lägre oscillationsfrekvenser har vanligtvis lägre dämpning; Det finns också vanligtvis en högre risk att oscillationsfrekvensen vid transmissionsnivån ligger

nära resonansfrekvensen för ett låg- eller mellanspänningsnät. Allt detta är dock mycket platsberoende, och det är inte möjligt att dra några allmänna slutsatser om detta.

Allvarliga transienter vid dippens slut, i kabeldominerade transmissionssystem, diskuteras i [23]; resonansfrekvenser så låga som 100 Hz visas vara resultatet av simuleringar av det realistiska exempel nätet definierat i [21].

4.4.3 Seriekompenserade ledningar

Spänningsdippar på grund av fel på seriekompenserade ledningar kan delas in i två grupper, baserat på felets placering i förhållande till seriekondensatorn.

För trefasfel mellan seriekondensatorn och stationen där dippen beaktas, är spänningsdippen liknande som för ett fel på en icke-kompenserad ledning. Impedansen till felet bestäms av luftledningen mellan stationen och felet, och kvarstående spänningen erhålls från (2). Fasvinkelhopp och transient är som för fel på en icke-kompenserad ledning.

Vid enfas- och tvåfasfel spelar seriekondensatorn en roll, även när felet ligger mellan stationen och seriekondensatorn. Detta kan modelleras genom seriekoppling av plus-, minus- och nollföljds-kretsarna vid felplatsen.

Vid ett fel mellan seriekondensatorn och den andra stationen är situationen annorlunda. Impedansen till felet bestäms nu av seriekopplingen mellan ledningsinduktansen och seriekondensatorns kapacitans. Det absoluta värdet av denna impedans är mindre än ledningens impedans; Kvarstående spänningen är därmed lägre än för samma felplats på en icke-kompenserad ledning. Den höga strömmen genom seriekondensatorn ger en hög spänning över seriekondensatorn. För att undvika skador på seriekondensatorn skyddas den av varistorer som kopplar strömmen förbi kondensatorn. Detta orsakar en omedelbar förändring i impedansen till felet och därmed ett nytt steg i spänningsmagnitud med tillhörande fasvinkelhopp och transient.

4.4.4 Vind- och solkraft

På grund av stor produktion från solkraft i låg- och mellanspänningsnätet kan effektlödet genom transformatorer mellan hög- och mellanspänningsnätet vara lågt mitt på dagen. Om ett fel uppstår vid en högre spänningsnivå under en sådan period med låg transformatorbelastning, blir transformatorns mättning på grund av spänningsåterhämtning efter felet mer allvarig. Lång och kraftig transformatormättning efter ett fel har observerats för fel som inträffar under de tidiga morgontimmarna [24]. En stor andel solenergi i distributionsnätet kan göra att detta också sker mitt på soliga dagar. En konsekvens av övergången till solenergi är därför att kraftig transformatormättning vid spänningsåterhämtning efter ett fel kommer att inträffa oftare.

Stor andel av vind- och solkraft leder också till andra drifttillstånd, vilket kan påverka spridningen av spänningsdippar på grund av fel. Detta kommer att diskuteras i Avsnitt 4.4.5.

Stora mängder solenergi kopplad till distributionsnätet kommer, om solkraften inte löser ut på grund av spänningsdippen, delvis att upprätthålla spänningen i distributionsnätet. Detta påverkar inte spänningsdippen i transmissionsnätet, men det gör dippen mindre allvarligt för utrustning och kunder som är anslutna till låg- eller mellanspänningsnät. Effekten kvantifieras för synkrogeneratorer i [25, Avsnitt 6.6.1], där spänningsdippar i distributionsnätet på grund av fel i transmissionsnätet studeras. Närvaron av en stor synkrogenerator på mellanspänningssidan av transformatorn ger en betydande minskning av antalet djupa dippar. Antalet mindre allvarliga dippar minskar bara lite.

Sol- och vindkraft ger bara en liten minskning i antalet dippar; dessa installationer är normalt inte anslutna nära sådana transformatorer; deras bidrag till felströmmen är mycket mindre; och för djupa dippar är deras bidrag mestadels noll.

4.4.5 Svaga drifttillstånd i transmissionssystemet

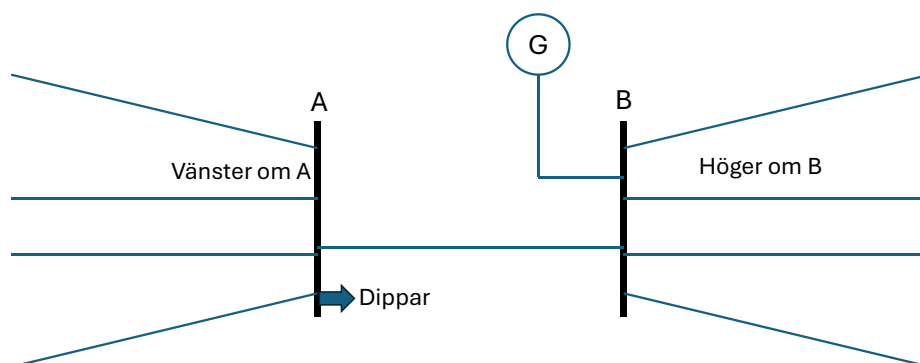
En stor mängd vind- och solkraft leder till situationer där nettoförbrukningen (förbrukning minus vind- och solkraftproduktion) blir liten eller till och med negativ. Detta resulterar i drifttillstånd med ett begränsat antal konventionella produktionsenheter (med synkronmaskiner) kopplade till högre spänningsnivåer. Sådana tillstånd kallas ibland för "svaga drifttillstånd" eftersom kortslutningseffekten är då låg på många ställen i transmissionsnätet. Denna lägre kortslutningseffekt gör också att ett fel resulterar i en djup dipp över ett större geografiskt område.

4.4.5.1 Dippar på grund av fel i transmissionsnätet

En studie gjordes för Storbritanniens transmissionsnät, där de äldsta kraftverken togs ur drift och de resulterande förändringarna på dippfrekvensen beräknades [26]. Antalet spänningsdippar per år beräknades när ökande mängder konventionell produktion (ansluten till transmissionsnätet) ersattes av produktion som inte skulle bidra till felströmmen. Att ersätta 40 % av konventionell produktion gav en ökning med cirka 30 % av antalet dippar. Vid dippar på grund av enfasfel beror ökningen på systemjordningen. För modellen som användes i studien var minskningen i antalet dippar på grund av enfasfel mindre än minskningen i antalet dippar på grund av trefasfel.

Det visades vidare att ökningen av antalet dippar kan variera mycket mellan olika ställen i transmissionsnätet. Detta bekräftas i [27], där det också visas att ökningen av antalet dippar per år beror på hur länge systemet är i ett svagt drifttillstånd.

Effekten av ett stort kraftverk på kvarstående spänningen illustreras kvalitativt med hjälp av Figur 6. Precis som i tidigare figurer är intresset i spänningsdippar (kvarstående spänning) som upplevs vid station A. Några kvantitativa resultat kommer att presenteras längre ner.



Figur 6. Transmissionsnät runt ett stort kraftverk (G)

Vid ett fel till vänster om station A bidrar kraftverket till kortslutningseffekten vid PCC (vid station A). När kraftverket är ur drift kommer kortslutningseffekten att vara lägre och kvarstående spänningen därmed också lägre. Minskningen av kortslutningseffekten beror på antalet ledningar kvar från station A (med undantag för ledningen där felet finns), antalet ledningar till höger om station B och bidraget från alla dessa till kortslutningseffekten vid PCC.

Vid trefasfel mellan A och B påverkar inte generatorns närvaro kvarstående spänningen vid station A. För osymmetriska (enfasiga och tvåfasiga) fel finns det en påverkan eftersom plus-, minus- och nollföljds-kretsar påverkas olika av kraftverkets bidrag till fel.

Vid fel till höger om station B kommer kraftverket att stödja spänningen vid station B och på så sätt även resultera i en högre kvarstående spänning vid station A. Effekten av detta beror bland annat på längden på ledningen mellan stationerna A och B. Ju längre ledningen, desto mindre påverkan. För en kort ledning kan dess impedans försummas, och kraftverkets påverkan sker återigen endast genom dess påverkan på kortslutningseffekten.

4.4.5.2 Spänningsdipp på grund av fel i distributionsnät

Spänningsdippar på grund av fel i distributionsnät påverkas mycket mindre av produktionsenheter i transmissionsnätet; källimpedans för dessa dippar bestäms huvudsakligen av transformatorimpedansen vid PCC; se Avsnitt 4.2.

4.4.5.3 Påverkan av kortslutningseffekten på kvarstående spänning

Som diskuterades i Avsnitt 4.4.5.1, är påverkan från ett kraftverk starkt kopplad till dess bidrag till kortslutningseffekten vid PCC. I detta avsnitt kommer påverkan att kvantifieras.

Kvarstående spänningen under en dipp i ett radiellt nät kan beräknas från (2); för en kortslutningseffekt (vid PCC) lika med S_k , och en nominell spänning lika med U_{nom} , kan uttrycket för kvarstående spänningen omformuleras som:

$$U_{dip} = \frac{Z_F}{Z_F + \frac{(U_{nom})^2}{S_k}} \quad (4)$$

Vid härledningen av detta uttryck har fasvinkelhoppet försummats. Uttrycket bör inte användas för en noggrann beräkning av kvarstående spänning. Uttrycket används här endast för att illustrera förändringar i kvarstående spänning.

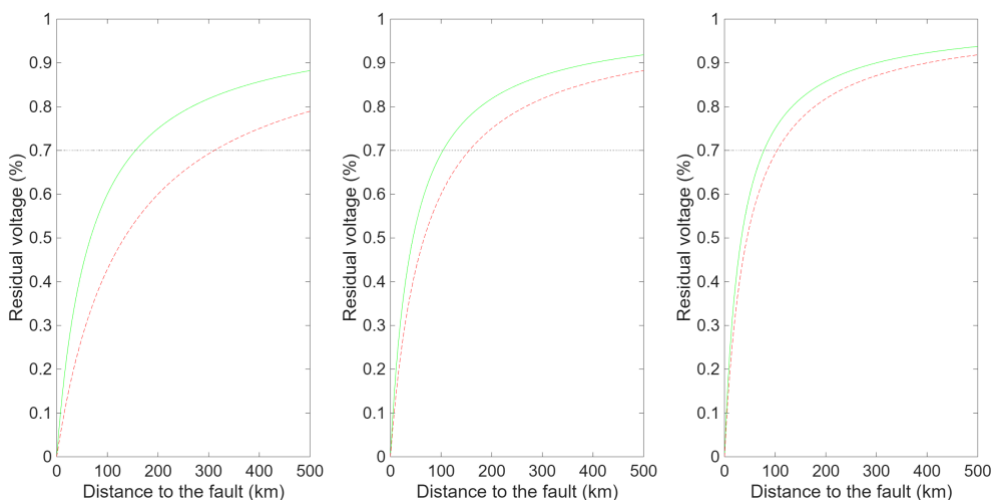
Uttryck (4) kan omformuleras till:

$$U_{dip} = \frac{1}{1 + \frac{(U_{nom})^2}{S_k \cdot Z_F}} \quad (5)$$

Kvarstående spänning beror endast på produkten av kortslutningseffekten (vid PCC) och impedansen till felet. Impedansen per kilometer är ungefär samma för olika luftledningar. Därför beror kvarstående spänningen, som en god approximation, endast på produkten av kortslutningseffekten och avståndet till felet. Att halvera kortslutningseffekten (till exempel för att en stor produktionsenhet är ur drift) innebär att ett fel dubbelt så långt bort ger samma kvarstående spänning.

Detta illustreras i Figur 7 för tre fall. Det antas att kraftverket bidrar med 4000 MVA till kortslutningseffekten vid PCC. För kurvan till vänster (←) är den totala kortslutningseffekten, inklusive kraftverkets bidrag, 8000 MVA. För ett fel till vänster om station A i Figur 6, är det bidraget till kortslutningseffekten genom station A. För ett fel till höger om station B i Figur 6 är det bidraget till kortslutningseffekten genom station B. Det har antagits att ledningen mellan station A och station B har en försumbar påverkan på kvarstående spänningen vid station A.

Resultaten ges i figuren för avstånd upp till 500 km. Sådana långa ledningar är ovanliga, särskilt i delar av nätet kring stora kraftverk. Avståndet bör tolkas som ett "elektriskt avstånd", definierat till exempel som i (3).



Figur 7. Kvarstående spänning med (grön heldragen) och utan (röd streckad) ett stort kraftverk; för kortslutningseffekter (med stort kraftverk i drift) lika med 8000 MVA (← vänster), 12 000 MVA (mitten) och 16 000 MVA (höger)→).

Den gröna heldragna kurvan i Figur 7 (diagrammet till ← vänster) anger kvarstående spänningen som en funktion av avståndet till felet när generatoren är i drift (dvs. för en kortslutningseffekt på 8000 MVA). När kraftverket inte är i drift

minskar kortslutningseffekten med 50 % och relationen mellan avstånd och kvarstående spänning följer den röda streckade linjen. För samma felplats är kvarstående spänningen lägre när kraftverket är ur drift.

Den svarta streckade horisontella linjen i figuren motsvarar 70 % av nominell spänning. När en installation löser ut för en kvarstående spänning under detta värde, kommer den att lösas ut för alla fel närmare det motsvarande avståndet till felet. Betrakta återigen fallet till ← vänster: när kraftverket är i drift ger ett fel på 155 km avstånd en kvarstående spänning på 70 %; när kraftverket inte är i drift gäller detta vid fel vid 310 km. Installationen kommer därför att drabbas av fler bortfall på grund av spänningsdipp. För fel bortom nästa station finns det inte nödvändigtvis ett linjärt samband mellan det elektriska avståndet till felet och antalet fel. Att generatoren inte är i drift kommer därför inte nödvändigtvis att leda till dubbelt så många bortfall av installationen, men den allmänna trenden kommer att vara en betydande ökning av antalet bortfall.

De andra två diagrammen i Figur 7 visar motsvarande resultat för ett starkare transmissionsnät. För diagrammet i mitten är det totala bidraget till kortslutningseffekten 12 000 MVA. För diagrammet till höger → är detta värde 16 000 MVA. Eftersom kraftverket har ett relativt lägre bidrag till kortslutningseffekten är dess påverkan på kvarstående spänningen mindre.

4.4.5.4 Påverkan på antalet dippar per år

Ovanstående diskussion gäller kvarstående spänningen och antalet dippar för ett specifikt drifttillstånd i transmissionsnätet. Ju svagare nätet, desto lägre kvarstående spänning och desto fler fel kan leda till bortfall av installationen.

I praktiken varierar kortslutningseffekten under året. Svaga drifttillstånd (låga kortslutningseffekter) uppstår till exempel endast när hög produktion av förnybar el sammanfaller med låg förbrukning och låg export (med andra ord när få stora produktionsenheter är i drift). Effekten av dessa svaga drifttillstånd på antalet dippar över året (och därmed antalet bortfall av anläggningen) beror på hur många timmar per år sådana drifttillstånd inträffar.

Det nämndes tidigare att åsknedslag är ett stort bidrag till antalet spänningsdippar. Frekvensen av åsknedslag är högre under sommaren än under vintern. För att kvantifiera effekten av svaga drifttillstånd är det dessutom viktigt att veta hur ofta de inträffar under sommarsäsongen.

Beräkningarna som resulterar i Figur 7, har erhållits genom att använda en förenklad modell av transmissionsnätet. Genom att använda elektriskt avstånd istället för fysiskt avstånd kan modellen göras mer realistisk, men det finns fortfarande några antaganden kvar i modellen. För att få realistiska värden av konsekvensen av svaga drifttillstånd behövs mer realistiska modeller för transmissions- och regionnät, inklusive bidraget från kraftverken (på alla spänningsnivåer) till kortslutningseffekten.

4.4.6 Stora effektflyden över långa avstånd

Ett fel på en lång transmissionsledning ger en djup dipp för kunder som är anslutna nära ena sidan av den ledningen, om felet ligger nära en av terminalerna. För kunder som är anslutna nära den andra terminalen, blir dippen på grund av felet mindre.

Bortkoppling av ledningen, som görs av skyddet, ger i en förändring i spänningens magnitud och fasvinkel jämfört med värden innan felet. Förändringen i spänningens magnitud är i nästan alla fall liten (kriterier för drift av transmissionsnätet säkerställer detta), men förändringen i fasvinkel kan vara betydande (kriterier för drift täcker endast spänningens magnitud, inte dess fasvinkel), vilket potentiellt kan leda till utlösning av känslig utrustning.

Ju större effektflyde före felet, desto större förändring i fasvinkeln. Införandet av vind- och solkraft, men också införandet av internationella elmarknader, leder till en ökning av stora effektflyden över långa avstånd.

Vinkelskillnaden δ över en transmissionsledning är relaterad till den aktiva effekt P som överförs genom ledningen, enligt följande uttryck:

$$P = \frac{V_s \cdot V_r}{X} \cdot \sin \delta \quad (6)$$

Där V_s och V_r är spänningsmagnitud vid sändande respektive mottagande sida; och X den reaktiva delen av ledningsimpedansen.

Den resistiva delen av impedansen är oftast liten för en transmissionsledning, i vilket fall (6) håller. När man inkluderar den resistiva delen R av ledningsimpedansen erhålls följande uttryck:

$$P = \frac{V_s \cdot V_r}{\sqrt{X^2 + R^2}} \cdot \cos \theta \cdot \sin \delta - (V_r)^2 \cdot \frac{R}{\sqrt{X^2 + R^2}} \quad (7)$$

Där $\theta = \arctan\left(\frac{R}{X}\right)$ är impedansvinkeln för transmissionsledningens impedans.

Med hänvisning till (6), leder förlusten av en transmissionsledning till en ökning av reaktansen X mellan de två stationerna. Efter en kort transient kommer det aktiva effektflydet att vara lika som före ledningens bortkoppling; därmed ökar vinkelskillnaden δ mellan stationerna.

Betrakta, som ett illustrativt exempel, bortkoppling av en av de två ledningarna mellan de två stationerna. Värdet av X kommer att fördubblas; Med samma aktiva kraftflyde efter händelsen kommer värdet av $\sin \phi$ att fördubblas.

I praktiken finns det ofta flera vägar att överföra effekt i ett transmissionsnät och efter att ledningen har kopplats bort kommer förändringen i fasvinkelskillnad att spridas över sändande och mottagande sida av ledningen. Fasvinkelhopp upp till 30° kan förväntas vid utlösning av en lång och högbelastad transmissionsledning. Ett fall där ett vindkraftverk utsätts för ett 20° fasvinkelhopp beskrivs i detalj i [28].

4.4.7 Modern kraftelektronisk utrustning

Utrustningen som är ansluten till nätet har normalt begränsad påverkan på spridningen av spänningsdippar, med undantag för produktionsenheter. Produktionsenheter upprätthåller spänningen under dippen och detta resulterar i spänningsdippar med högre kvarstående spänning.

Asynkron- och synkronmotorer kopplade till nätet upprätthåller den plusföljdsspänningen och minskar minusföljdsspänningen [29]. Resultatet är en ökning av kvarstående spänningen och en minskning av spänningsobalansen under dippen.

Kraftelektronisk utrustning beter sig annorlunda. De flesta sådana apparater visar en minskning av strömmen under felet. Detta resulterar i dippar med marginellt högre kvarstående spänning, men effekten är liten. Viss utrustning (inklusive en stor del av modern belysning) håller konstant effekt under dippen [63], vilket resulterar i djupare dippar.

Den största effekten av modern kraftelektronisk utrustning är inte förändringen av kvarstående spänning, utan den extra kapacitansen som är ansluten till nätet via denna utrustning. Majoriteten av modern kraftelektronisk utrustning innehåller en liten kondensator på nätsidan av gränssnittet med nätet. Alla dessa kondensatorer tillsammans resulterar i en ganska stor kapacitans, vilket kan ge en betydlig minskning av resonansfrekvensen av låg- och mellanspänningsnäten. Detta resulterar i lägre oscillationsfrekvenser i början och slutet av en spänningsdipp. Det ökar också risken för förstärkning av dipptransienter som har sitt ursprung i transmissionsnätet.

En simuleringsstudie av spridning av dippar till laddningsstationer för elfordon i lågspänningsnätet [30] visar en förstärkning av dipptransienter på grund av kapacitansen vid laddningsstationen. I simuleringen nådde amplituden av oscillationerna i början av dippen 2,7 pu. Värdet kommer i verkligheten att vara lägre, eftersom de flesta dämpningskällor inte inkluderades i modellen. Man kan dock fortfarande förvänta en betydande förstärkning; värdet vid 130 kV var endast 0,2 pu.

Mätdata behövs om spridning av balanserade (lika spänningar i de tre faserna) och obalanserade (olika spänningar) spänningsdippar från spänningsnivån där felet uppstår till utrustningens klämmor. Ytterligare simuleringar behövs för att studera effekten av till exempel solkraftsanläggningar, batterianläggningar, och fordonsladdning ansluten till låg- och mellanspänningsnätet.

4.4.8 Utrustning som beter sig likadant under en spänningsstörning

Vind- och solkraftsanläggningar är exempel där många enheter beter sig på samma sätt. Det kan ha en märkbar eller till och med betydande effekt på hur en spänningsdipp sprider sig.

Andra exempel på förbrukningssidan är laddning av elfordon och elektriska värmepumpar. Liknande beteende kan handla om storskalig utlösning av utrustning av samma typ, vilket skulle vara ett immunitetsproblem. Den massiva utlösningen kan också påverka spridning av dippen, och därmed kvarstående

spänning för annan utrustning. Storskalig utlösning av produktion kan leda till djupare dippar. Storskalig utlösning av förbrukning kan leda till dippar med högre kvarstående spänning. Denna påverkan på spridningen beror också på vilken spänningsnivå som utrustningen är ansluten och på när under dippen utrustningen löser ut.

Även när utrustningen stannar kvar till under felet, påverkar utrustningens beteende spänningen under dippen. Detta beror på hur strömmen till apparaterna påverkas av dippen. Elmotorer (synkrona och asynkrona) beter sig som en spänningskälla bakom en reaktans, där reaktansen har ett värde på cirka 0,2 pu (med nominell effekt för motorn som bas). Resultatet är att elmotorer orsakar en ökning av kvarstående spänningen i distributionsnätet jämfört med spänningen i transmissionsnätet. En studie av uppmätta spänningsdippar, registrerade före 2000, [29, 31, 32] visade att spridningen av dippar från transmissions- till distributionsnätet kunde förklaras med denna spänningskälla-bakom-reaktansmodell. Modellen visade sig gälla för både balanserade och obalanserade dippar.

Typen av utrustning som är ansluten till distributionsnätet har förändrats mycket sedan 2000 och det är tveksamt om modellen som användes i [29, 31, 32] fortfarande gäller. Den största påverkan är för utrustning som går ner till nästan noll aktiv effekt och för utrustning som håller konstant effekt under felet. Den senare skulle inkludera installationer för laddning av elfordon. En kvarstående spänning på 70 % ger en 43 % ökning av strömmen och därmed ett ytterligare spänningsfall motsvarande 1,43 gånger spänningsfallet före felet.

När fordonsladdning har möjlighet att stödja nätet under ett fel eller generellt är i V2G (fordon-till-nät) läge kan detta förbättra spänningen under felet. En studie av 22 dubbelriktade laddare [33] visade att de ger en stor ökning av kvarstående spänningen, från 35 % till 58 % av nominell spänning.

En studie med simuleringar för laddningsanläggningar i ett lågspänningsnät [30] beaktade endast laddningen. Detta gav en liten ökning av kvarstående spänningen, från 80 % vid 130 kV till 82,3 % och 81,6 % i lågspänningsnätet.

Att kvantifiera dessa effekter är mycket svårt utan detaljerad information om hur apparater reagerar på spänningsdippen.

4.4.9 Klimatförändringar

Klimatförändringar förväntas inte påverka spridning av dippar.

4.5 FÖRÄNDRINGAR I IMMUNITET

När spänningsdippen, efter att ha spridits från felplatsen, når utrustningens klämmor, kan det påverka utrustningens prestanda. Det finns sällan fall utan någon påverkan, men när påverkan är liten och utrustningens prestanda håller sig inom sina krav sägs utrustningen vara immun. Några förändringar som nämns i Avsnitt 2.3 ändra denna immunitet. Detta diskuteras vidare nedan.

4.5.1 Nya luftledningar

Att bygga nya luftledningar förväntas inte påverka utrustningens immunitet mot spänningsdippar.

4.5.2 Kablar istället för luftledningar

Ersättning av kablar med luftledningar förväntas inte påverka utrustningens immunitet mot spänningsdippar.

4.5.3 Ersättning av seriekompenserade ledningar

Ersättning av seriekompenserade ledningar med ledningar utan seriekompensation förväntas inte påverka utrustningens immunitet mot spänningsdippar.

4.5.4 Vind- och solkraft

Nätanslutning för vind- och solkraftsanläggningar skiljer sig från anslutningen för konventionell elproduktion (gas, olja, vattenkraft, kärnkraft, kol). Medan konventionell produktion är ansluten via en synkronmaskin, är vind- och solkraft för de flesta installationer kopplad via en kraftelektronisk omriktare. Detta får flera oavsiktliga konsekvenser; en av dem är installationernas förändrade immunitet mot spänningsdippar. För synkronmaskiner är immunitet mot spänningsdippar relaterade till vinkelstabilitet och överström. Dessa fenomen är väl förstådda, även om de inte alltid är lätta att lösa, särskilt för stora maskiner. Fenomenen är också likadana för alla synkronmaskiner.

Påverkan av spänningsdippar och deras olika egenskaper på växelriktare i vind- och solkraftsanläggningar är fortfarande mindre förstådd. Påverkan skiljer sig också mellan olika växelriktare. Immunitet av kraftelektroniska omriktare mot dippar diskuteras i Avsnitt 4.4.7.

En annan konsekvens av bristande immunitet av vind- och solkraftsanläggningar är risken för storskalig utlösning på grund av ett fel i transmissionsnätet. Tidiga generationer av vind- och solkraftanläggningar var ofta utrustade med känsligt skydd mot ödrift. Spänningsdippen på grund av felet löste ut ödriftskyddet och kopplade bort produktionsenheterna inom ett stort geografiskt område. Med stor andel vind- och solkraft kan detta leda till plötsligt bortfall av en stor mängd produktion. Tillsammans med bortfall av ledningen med felet kan detta ge instabilitet och ett stort elavbrott. Krav på störningstålighet finns i de flesta länder, men rädslan kvarstår att storskalig utlösning av vind- eller solkraft kan leda till ett stort elavbrott. Mer om detta i Avsnitt 4.5.8.

4.5.5 Svaga drifttillstånd i transmissionssystemet

Ökad förekomst av svaga drifttillstånd förväntas inte påverka utrustningens immunitet mot spänningsdippar.

4.5.6 Stora effektlöden över långa avstånd

Ökningen av stora effektlöden över långa avstånd förväntas inte påverka utrustningens immunitet mot spänningsdippar.

4.5.7 Modern kraftelektronisk utrustning

Modern kraftelektronisk utrustning reagerar annorlunda på spänningsdippar än mer klassisk utrustning. Detta gäller delvis skillnader i utrustningens immunitet mot kvarstående spänning och dippens varaktighet, men också skillnader i immunitet mot andra dippkaraktistiker. Det senare är särskilt relevant eftersom immunitetskrav i standarder och nätkoder nästan uteslutande baseras på kvarstående spänning och dippens varaktighet.

Olika aspekter av modern utrustnings immunitet mot spänningsdippar diskuteras i ett flertal artiklar, mestadels baserade på simuleringar, men några också baserade på experiment. Några exempel, visserligen ofullständiga, från litteraturen.

- Spänningsdipp vid laddning av elfordon kan förkorta batteriernas livscykel [34].
- PWM-likriktare har högre immunitet mot dippar med hög kvarstående spänning än nätkommuterade (6-puls eller 12-puls) likriktare; För djupa dippar har nätkommuterade likriktare högre immunitet. [35]. För alla typer av omriktare är effekten större för balanserade dippar än för obalanserade dippar.
- Både balanserade och obalanserade dippar påverkar DC-länkens spänning, batterispänning och batteriström för elfordonsladdare. Simuleringarna visar också att obalanserade dippar har större påverkan än balanserade dippar; och att effekten av obalanserade dippar också beror på typen av obalanserad dip [30]. Studierna visar också att uppmätta dippar har större påverkan än syntetiska dippar (med samma kvarstående spänning och varaktighet). Detta innebär att andra karaktistiker än kvarstående spänning och varaktighet bör beaktas vid studier av apparatens immunitet mot spänningsdippar.
- Flera dippkaraktistiker, utöver kvarstående spänning och varaktighet, påverkar spänningar och strömmar i en laddningsinstallation avsevärt [30, 36]. Detta avgjordes genom att jämföra påverkan av uppmätta och syntetiska spänningsdippar.
- Enligt en studie presenterad i [37] resulterar en spänningssänkning på 30 % (kvarstående spänning på 70 %) i kraftiga oscillationer i likspänning och batteriströmmar.
- Växelriktare som stöder nätet visar en högre ström under en spänningsdipp närmare PCC mellan växelriktaren och felet [38].
- Oscillationer i spänning och ström uppstod med en likriktare som använde dq-transform under dippar med relativt hög kvarstående spänning [39]. Studien visade återigen att andra karaktistiker än kvarstående spänning

och varaktighet bör beaktas för utrustningens immunitet mot spänningsdippar.

- En studie efter immunitet av vindkraftverk mot spänningsdippar [40] visar att både kvarstående spänning och fasvinkelhopp bör beaktas.

4.5.8 Utrustning som beter sig likadant under en spänningsstörning

Apparater av samma typ beter sig ofta likadant under en spänningsdipp; Nästan samtliga upplever interferens, eller så upplever nästan ingen av dem interferens. Detta påverkar inte immuniteten hos enskilda apparater, men det kan göra en anläggning mer känslig för spänningsdippar eftersom en redundant apparat kan bete sig likadant.

Från ett transmissionsnätsperspektiv kan storskalig utlösning av utrustning under en dipp (antingen produktions- eller konsumtionsutrustning) äventyra driftsäkerheten.

Krav på störningstålighet (immunitet mot spänningsdippar) för utrustning anges vanligtvis i termer av kvarstående spänning och varaktighet. Till exempel kräver SAE-standarden J2894-1 [41] att laddare måste förbli anslutna om spänningen sjunker till 80 % under två sekunder. En kvarstående spänning under 80 % kan leda till storskalig bortkoppling av många sådana laddare. Tillverkare kan välja komponenterna och skyddsinställning så att skyddet kopplar bort enheten när spänningen sjunker strax under tröskelvärdet. Förekomsten av ett standardkrav kan i så fall öka risken för storskalig bortkoppling.

Dessutom händer det att utrustningen inte uppfyller kraven. En australiensk studie av 25 standard växelriktare för solcellsanläggningar [42] visade att flera av dem inte uppfyllde kraven på immunitet mot spänningsdippar. Att en stor del av växelriktare löser ut under en spänningsdipp kan äventyra driftsäkerheten i transmissionsnätet. Till exempel minskade, enligt studien, produktion från flera växelriktare till 15 % eller mindre av värdet före dippen, i upp till flera minuter. Studien visade också signifikant olika beteende mellan växelriktare.

Även när utrustning uppfyller kraven behöver den inte vara immun mot karakteristiker som fasvinkelhopp och dippransienter. En stor osäkerhet kvarstår om hur modern kraftelektronik reagerar på dessa icke-standardiserade karakteristiker av spänningsdippar.

Den goda nyheten är att antalet tillverkare av små apparater ökar och att det finns mycket större mångfald i kraftelektroniska gränssnitt än tidigare. Detta minskar risken för storskalig utlösning av utrustning ansluten till nätet.

4.5.9 Klimatförändringar

Klimatförändringar förväntas inte påverka utrustningens immunitet mot spänningsdippar.

5 Transienter på grund av inkoppling av kapacitanser

5.1 ÖVERSIKT ÖVER PÅVERKAN

En översikt över effekterna på emission, spridning och immunitet ges i Tabell 3; fler detaljer finns i kommande avsnitt.

Tabell 3. Översikt över förändringar som påverkar sannolikheten för interferens; påkoppling av kapacitanser

	Förändringar i emission	Förändringar i spridning	Förändringar i immunitet
Nya luftledningar	Påkoppling av luftledningar	Det gör nätet starkare, men minskar också oscillationsfrekvensen	
Kablar istället för luftledningar	Påkoppling av kablar	Stor minskning av oscillationsfrekvensen Ökad risk för förstärkning	
Seriekompenserade ledningar	Att byta ut dem kan kräva fler shuntkondensatorer och/eller fler luftledningar	Den subsynkrona resonansen kan ha en påverkan	
Vind- och solkraft		Förändringar i resonansfrekvens Ökad risk för förstärkning	Installationer kan vara känsliga för transienter
Svaga drifttillstånd i transmissionsnät	Det kan behövas att kondensatorer kopplas oftare	Lägre resonansfrekvenser	
Stora effektflöden över långa avstånd	Det kan behövas att kondensatorer kopplas oftare		
Modern kraftelektronisk utrustning	Mindre behov för kondensatorbatterier i distributionsnät Transienter med påkoppling av individuella apparater.	Risk för förstärkning vid laddningsstationer eller solparker	Utrustningen kan vara känslig för transienter
Utrustning som beter sig likadant			Storskalig bortkoppling av utrustning, men mindre problem än vid fel
Klimatförändringar			

5.2 ALLMÄN BESKRIVNING AV FENOMENEN

5.2.1 Grundläggande uttryck

Spänningssättningen av en kapacitans C mot ett nät med induktans L resulterar i en spännings- och strömoscillation, kallad en "kopplingstransient". Oscillationsfrekvensen är lika med resonansfrekvensen mellan kapacitansen och induktansen:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (8)$$

Induktansen är en del av källimpedansen vid kapacitansens klämmor.

Kapacitansen kan vara i form av ett kondensatorbatteri, en växelströmskabel eller nätsidans kondensator med en kraftelektronisk apparat som ansluter till nätet. I detta kapitel använder vi den allmänna termen "kapacitans" för att täcka allt detta.

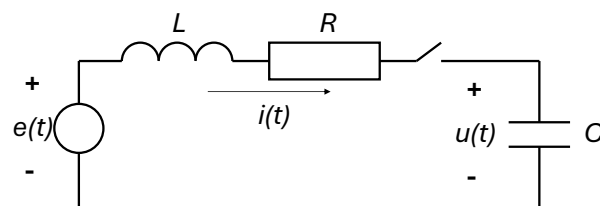
För påkoppling av ett kondensatorbatteri, kan (8) omformuleras i termer av kortslutningseffekt S_k och storlek på kondensatorbatteriet Q , vilket resulterar i följande uttryck:

$$f_r = \sqrt{\frac{S_k}{Q}} \cdot f_0 \quad (9)$$

Där $f_0 = 50$ Hz är kraftsystemets frekvens.

5.2.2 Dämpningens roll i nätet

Ekvation (8) gäller under antagandet att det inte finns någon dämpning i systemet. För att inkludera dämpningen, som alltid finns i nätet, anta att källimpedansen är seriekopplingen mellan en induktans L och en resistans R , som visas i Figur 8.



Figur 8. Kretsmodell för anslutning av en kapacitans till ett induktivt galler, inklusive dämpning i galleret.

Från denna figur kan följande uttryck för resonansfrekvensen härledas [7, avsnitt 6.3.3.1]:

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} \quad (10)$$

Dämpningstidskonstanten τ för oscillationen bestäms av förhållandet mellan induktansen och resistansen:

$$\tau = \frac{2L}{R} \quad (11)$$

Detta kan omformuleras genom att införa ξ som X/R-förhållandet av källimpedansen vid 50 Hz:

$$\xi = \frac{X}{R} = \frac{2\pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot L}{R} \quad (12)$$

Detta resulterar i följande uttryck för dämpningstidskonstanten:

$$\tau = \xi \cdot 6.4 \text{ ms} \quad (13)$$

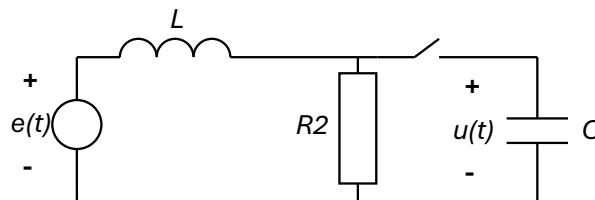
X/R-förhållandet är, för högre spänningsnivåer, i intervallet 5 till 15. Därför skulle dämpningstidskonstanten vara, enligt (13), cirka 60 ms och oscillationen skulle fortsätta i några cykler av kraftsystemets frekvens. Ovanstående uttryck tar inte hänsyn till dämpning på grund av shuntresistans. Uttrycket tar inte heller hänsyn till ökningen av resistans med frekvensen för transformatorer, kablar och luftledningar. Det senare gör att dämpningen är högre vid högre oscillationsfrekvenser. För transformatorer ökar resistansen nästan linjärt med frekvensen. Dämpningstidskonstanten skulle vara omkring 12 ms för en 250 Hz oscillation när transformatorimpedansen dominerar, cirka 6 ms för en 500 Hz oscillation och cirka 3 ms för en 1000 Hz oscillation. För ledningar och kablar ökar resistansen, som en grov approximation, med roten av frekvensen. Den resulterande dämpningstidskonstanten skulle vara cirka 25 ms för en 250 Hz-oscillation, cirka 20 ms för en 500 Hz-oscillation och cirka 15 ms för en 1000 Hz-oscillation.

Typiska oscillationsfrekvenser ligger i intervallet 300 till 1000 Hz. Dämpning från systemresistans och belastning bestämmer dämpningstidskonstanten.

Oscillationen varar vanligtvis mellan 0,25 och 0,5 cykler. Toppspänningar för vanlig påkoppling ligger generellt i intervallet 1,1 till 1,5 pu [43].

5.2.3 Roll för shunt dämpning

Utöver dämpningen i nätet finns även dämpning på grund av utrustningen som är ansluten till nätet. Denna dämpning kan bero på resistiva enheter kopplade till samma spänningsnivå som den påkopplade kapacitansen. Detta kan modelleras som en shuntresistans som visas i Figur 9.



Figur 9. Kretsmodell för anslutning av en kapacitans till ett induktivt nät, inklusive shunt dämpning.

Den resulterande oscillationsfrekvensen är [44]:

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{1}{(2R_2C)^2}} \quad (14)$$

Den motsvarande dämpningstidskonstanten är:

$$\tau = 2RC \quad (15)$$

Tänk på påkoppling av en 20 µF-kondensator, som del av ett EMC-filter, till en lågspänningsskena med källinduktans 1 mH. En shuntresistans lika med 100 Ω per fas antas (motsvarande cirka 500 W förbrukning vid 50 Hz). Ekvationer (14) och (15) ger en oscillationsfrekvens på 1125 Hz och en dämpningstidskonstant på 4 ms. Att minska shuntresistansen (öka dämpningen; öka aktiva effekten) kommer att minska oscillationsfrekvensen något och avsevärt minska dämpningstidskonstanten, som visas i Tabell 4.

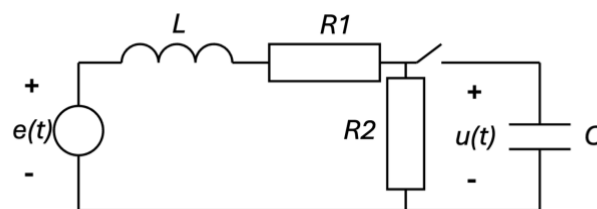
Tabell 4. Effekten av shuntresistans på oscillationsfrekvens och dämpningstidskonstant

Shuntresistans	Oscillationsfrekvens	Dämpningstidskonstant	Effekt per fas
100 Ω	1125 Hz	4 ms	0,5 kW
50 Ω	1123 Hz	2 ms	1,1 kW
25 Ω	1141 Hz	1 ms	2,2 kW
10 Ω	1023 Hz	0,4 ms	5,3 kW

En minskning av shuntresistansen motsvarar en ökning av den aktiva effekten. Det är dock viktigt att inse att denna resistans är värdet som gäller för oscillationsfrekvensen, runt 1100 Hz i detta fall, och att detta värde sällan är detsamma som det som motsvarar den aktiva effektförbrukningen vid 50 Hz.

Shunt- och seriedämpning

För att vara komplett beaktade vi också fallet med både serie- och shunt-dämpning. Motsvarande kretsmodell visas i Figur 10.



Figur 10. Kretsmodell för anslutning av en kapacitans till ett induktivt nät, med både serie- och shunt-dämpning.

Den resulterande oscillationsfrekvensen är [44]:

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1 + \frac{R_1}{R_2}}{LC} - \left(\frac{1}{2R_2C} + \frac{R_1}{2L}\right)^2} \quad (16)$$

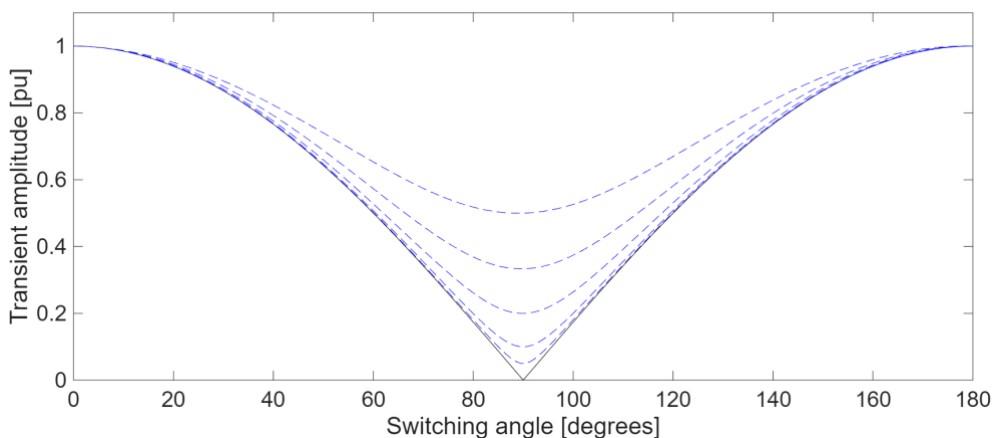
Den motsvarande dämpningstidskonstanten är:

$$\tau = \frac{1}{\frac{1}{2R_2C} + \frac{R_1}{2L}} \quad (17)$$

En alternativ lösning i detta fall är att ersätta hela nätverket till vänster om kapacitansen med ett Thevenin-ekvivalent. Källimpedansen kommer att vara en R-L-seriekoppling och modellen i Figur 8 kan användas.

5.2.5 Synkroniserad påkoppling och amplitud av transienten

För att begränsa kopplingstransientens amplitud används så kallad "synkroniserad koppling", där påkopplingen sker nära spänningens nollgenomgång. Det begränsar transientens amplitud men gör den inte lika med noll. Amplituden på transienten som funktion av spänningens fasvinkel vid kopplingen visas i Figur 11. Figuren är baserat på ekvationerna som presenteras i [7, Avsnitt 6.3.3.1]. Den vertikala skalan motsvarar 1 pu storleken på spänningens vågform ($\sqrt{2}$ gånger rms-spänningen). Den heldragna kurvan i figuren är det förenklade uttrycket, där amplituden av transienten är lika med spänningen precis innan kopplingen. De streckade kurvorna gäller för oscillationsfrekvenser lika med (från botten till toppen), 1000 Hz, 500 Hz, 250 Hz, 150 Hz och 100 Hz. X/R-förhållandet hålls konstant vid $X/R = 10$. En minskning av oscillationsfrekvensen, på grund av ökad kapacitans eller minskad nätstyrka (ökning av induktans), gör det svårare att minska storleken på transienten genom synkroniserad påkoppling.



Figur 11. Amplituden av transienten på grund av påkoppling av en kapacitans, som funktion av fasvinkeln, för olika värden av oscillationsfrekvensen; uppifrån och ner: 100 Hz, 150 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz.

Transienten, i tidsdomänen, är en dämpad sinusvåg med amplitud enligt Figur 11, oscillationsfrekvens enligt (16) och dämpningstidskonstant enligt (17), eller ett av de förenklade uttrycken. Denna transient är superponerad på grundtonens spänning (50 Hz) efter påkopplingen.

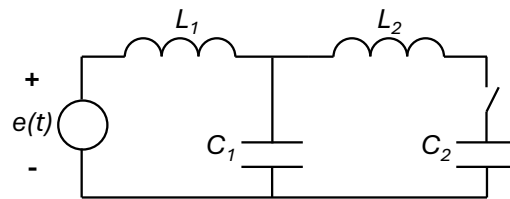
5.2.6 Back-to-back påkoppling

När en kapacitans påkopplas finns det ofta annan kapacitans i närheten. Detta kallas "back-to-back påkoppling". Denna term användes ursprungligen bara när

det fanns två eller fler kondensatorbatterier i samma station, men fenomenet gäller mer allmänt.

Back-to-back-påkoppling ger transienter med två frekvenskomponenter (med referens till Figur 12:

- En högfrekvent komponent (oscillationsfrekvens f_1) mellan seriekopplingen av kapacitanserna (C_1 och C_2) och induktansen L_2
- En lågfrekvent komponent (oscillationsfrekvens f_2) mellan den parallellkopplingen av kapacitanserna och källinduktansen (L_1).



Figur 12. Kretsmodell för back-to-back-påkoppling av en kapacitans

När de två kapacitanserna är placerade nära varandra, $L_2 \ll L_1$, är de två oscillationsfrekvenserna ungefär:

$$f_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_s \cdot L_2}} \quad (18)$$

Där $C_s = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}$ är kapacitansen för seriekopplingen av C_1 och C_2 .

$$f_2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{(C_1 + C_2) \cdot L_1}} \quad (19)$$

Den högfrekventa oscillationen kommer att läggas ovanpå den lågfrekventa oscillationen, där det totala toppvärdet kan bli summan av amplituderna för de enskilda oscillationerna.

5.2.7 Påkoppling av kablar och luftledningar

Spänningssättningen av en luftledning eller kabel resulterar också i en kopplingstransient. Betrakta en luftledning eller kabel med kapacitans per kilometer C och längd ℓ . Kabeln är ansluten till transmissionsnätet på ett ställe med nominell spänning U_0 och kortslutningseffekt S_k . Oscillationsfrekvensen, enligt (8), blir då, enligt [29, Avsnitt 6.5.4]:

$$f_r = \frac{1}{2\pi \cdot U_0} \cdot \sqrt{\frac{\omega \cdot S_k}{\ell \cdot C}} \quad (20)$$

Vid påkoppling av kablar och luftledningar bör deras distribuerade karaktär beaktas, när korta tidsskalor är relevanta. För dessa korta tidsskalor är det elektromagnetiska-vågfenomen som avgör beteendet. En oändligt lång ledning eller kabel kan representeras av dess vågimpedans, några hundratals ohm. Modellen, med vågimpedansen, håller tills den första reflekterade vågen

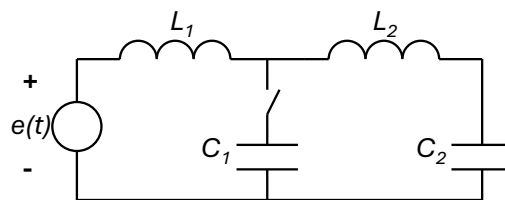
återvänder till kopplingsplatsen. Efter några reflektioner beter sig ledningen eller kabeln återigen som serie/parallellkoppling av kapacitans, induktans och resistans.

Betrakta en utbredningshastighet för den elektromagnetiska vågen lika med 300 km/ms (300 000 km/s) för luftledningar. För en 150 km lång ledning är den reflekterade vågen tillbaka vid utgångspunkter efter 1 ms. För resonansfrekvenser omkring 1 kHz kan ledningen distribuerade karaktär ha stor betydelse för resultatet. Hastigheten för kablarnas utbredning är lägre, kring 150 km/ms. För en 30 km kabel kommer den reflekterade vågen tillbaka efter 0,4 ms. Den distribuerade modellen skulle behövas över 2,5 kHz.

Fokus i detta kapitel gäller lägre resonansfrekvenser. För den typ av allmän beskrivning av fenomenen, som i detta kapitel, behövs sådana detaljer inte. För detaljerade studier av specifika fall rekommenderas att beakta den distribuerade karaktären hos långa ledningar och kablar.

5.2.8 Förstärkning av transienten

Förekomsten av flera kapacitanser (som kondensatorbatterier eller kablar) kan resultera i transienter med högre amplitud längre ner i nätet än nära den kopplade kondensatorn. Fenomenet kallas "spänningsamplifikation" eller "förstärkning av transienten". Kretsmodellen visas i Figur 13.



Figur 13. Kretsmodellen för att beskriva spänningsförstärkning vid påkoppling av en kapacitans

När resonansfrekvenserna i primär- och sekundärkretsen är ungefär lika, kan amplituden av oscillationen i sekundärkretsen (spänning över C_2) vara högre än amplituden i primärkretsen (spänning över C_1). Den ekvivalenta kretsen i Figur 13 inkluderar inte resistansen i primär- och sekundärkretsen. Resistansen gör att förstärkningen är begränsad. Spänningar upp till fyra gånger den normala toppspänningen har observerats på grund av förstärkning; i dessa fall innehöll både primär- och sekundärkretsar ett kondensatorbatteri.

5.3 FÖRÄNDRINGAR I EMISSION

I detta fall handlar emission om spänningssättning (påkoppling) av kapacitanser. Det kan vara kondensatorbatterier, kablar, luftledningar eller utrustning med kapacitans vid klämmorna. Förändringar i emission motsvarar alltså förändringar i antalet gånger kapacitanser kopplas på.

5.3.1 Nya luftledningar

Påkoppling av en luftlednings är kapacitanskoppling. Tillägg av nya luftledningar kommer därmed att öka antalet kopplingshändelser.

5.3.2 Kablar istället för luftledningar

Att lägga till kablar ökar antalet kopplingshändelser. Att ersätta kablar med luftledningar ökar inte antalet händelser. Det kan till och med minska antalet händelser, eftersom kablar inte är utrustade med automatisk återinkoppling efter ett fel. Transienter på grund av kabelpåkoppling har dock ofta en lägre resonansfrekvens än transienter på grund av påkoppling av luftledningar. Detta diskuteras vidare i Avsnitt 5.4.1 och Avsnitt 5.4.2.

5.3.3 Ersättning av seriekompenserade ledningar

Detta förväntas inte påverka antalet kopplingshändelser.

5.3.4 Vind- och solkraft

Förekomsten av vindkraft eller solkraft i sig påverkar inte antalet kopplingshändelser. Anslutning av särskilt stora vindkraftsanläggningar leder dock ofta till nya kablar eller luftledningar. Detta ökar i sin tur antalet kopplingshändelser.

5.3.5 Svaga drifttillstånd i transmissionssystemet

Detta kan kräva mer frekvent påkoppling av kondensatorbatterier.

5.3.6 Stora effektlöden över långa avstånd

Detta kan kräva mer frekvent påkoppling av kondensatorbatterier.

5.3.7 Modern kraftelektronisk utrustning

Modern utrustning hos slutanvändare är mestadels baserad på kraftelektronik. Medan asynkronmaskiner, som tidigare utgjorde en stor del av elförbrukningen, hade en betydande reaktiv effektförbrukning, har kraftelektronisk utrustning endast en liten förbrukning eller ibland till och med en produktion av reaktiv effekt. Resultatet är att behovet för kondensatorbatterier i distributionsnät minskar; detta ger i sin tur en minskning av antalet kopplingshändelser.

Modern kraftelektronisk utrustning innehåller ofta ett EMC-filter med en kondensator på nätsidan. Påkopplingen av denna kondensator är en form av kapacitanspåkoppling. Ett ökande antal av sådana apparater kommer därmed att leda till en ökning av antalet kopplingshändelser.

5.3.8 Utrustning som beter sig likadant under en spänningsstörning

Detta förväntas inte påverka antalet kopplingshändelser.

5.3.9 Klimatförändringar

Detta förväntas inte påverka antalet kopplingshändelser.

5.4 FÖRÄNDRINGAR I SPRIDNING

I detta avsnitt betraktar vi som spridning förekomsten av oscillationer på olika platser i nätet, på grund av påkopplingshändelsen, även oscillationerna vid kopplingsplatsen. Man skulle kunna påstå att spänningsoscillationer vid kopplingsplatsen är den faktiska emissionen från störningen, men den diskussionen ligger utanför denna rapports omfattning.

5.4.1 Nya luftledningar

Tabell 5 ger oscillationsfrekvenserna vid påkoppling av en luftledning, erhållna från (20), för olika ledningslängder och kortslutningseffekter. En ledningskapacitans lika med 11 nF/km har antagits. De kortslutningseffekter som valts är 5 % och 95 % värdena, för varje spänningsnivå, av de värden som publicerats för det brittiska transmissionsnät [29, Avsnitt 6.4.5.4]. På grund av detta är spänningsnivåerna som används i tabellen också de som används i Storbritannien.

Tabell 5. Resonansfrekvens för olika ledningslängder, spänningsnivåer och kortslutningseffekter.

	66 kV		132 kV		275 kV		400 kV	
	0,75 GVA	2.6 GVA	1 GVA	4.1 GVA	6 GVA	15 GVA	9 GVA	32 GVA
5 km	5,0 kHz	9,3 kHz	2,9 kHz	5,8 kHz	3,4 kHz	5,4 kHz	2,9 kHz	5,4 kHz
15 km	2,9 kHz	5,4 kHz	1,7 kHz	3,4 kHz	2,0 kHz	3,1 kHz	1,6 kHz	3,1 kHz
50 km			910 Hz	1,8 kHz	1,1 kHz	1,7 kHz	900 Hz	1,7 kHz
100 km					760 Hz	1,2 kHz	640 Hz	1,2 kHz
200 km							450 Hz	850 Hz

Resonansfrekvenserna ligger generellt över 1 kHz, förutom för långa ledningar, 50 km eller mer, som är anslutna till svaga platser i nätet. Eftersom resten av nätet generellt också innehåller kapacitans i form av luftledningar eller kablar, är ovanstående värden endast en approximation. De ger dock en indikation på vilken storleksordning av oscillationsfrekvenser man kan förvänta sig vid spänningssättning av en ledning.

Som nämns i Avsnitt 6.3.1, är byggandet av nya luftledningar typiskt kopplat till byggandet av nya stationer och transformatorer. Om dessa nya transformatorer byggs nära befintliga transformatorer ökar intensiteten av sympatisk interaktion och därmed längre varaktighet, lägre kvarstående spänning, och högre nivåer av övertoner vid påkoppling av en transformator.

5.4.2 Kablar istället för luftledningar

Samma resonemang som för påkoppling av ledningar (Avsnitt 5.4.1 och (20)) gäller för påkoppling av kablar. Skillnaden ligger i kapacitansen per kilometer, som är mycket högre för kablar än för luftledningar. Både induktans och kapacitans beror på kabelns konstruktion, men värdena ligger inom ett relativt litet intervall.

Kabeldata som presenteras i [20] för XLPE-isolerade kopparkablar har använts för att erhålla värden för kapacitansen per kilometer för högspänningskablar. Resultaten visas i Tabell 6. Värdena ligger mellan 127 nF/km och 350 nF/km. Kapacitansen minskar något med spänningsnivån; även inom samma spänningsnivå finns det en viss spridning i värden.

Tabell 6. Kapacitans per kilometer högspänningskablar,

Spänningsnivå	Tvärsnitt (mm ²)						
	400	500	630	800	1000	1200	1600
66 kV		252 nF	261 nF	280 nF	350 nF		
145 kV		169 nF	191 nF	201 nF	229 nF		
245 kV	140 nF	150 nF	159 nF	182 nF	182 nF	201 nF	229 nF
420 kV			127 nF	150 nF	159 nF	182 nF	201 nF

De uppskattade resonansfrekvenserna för kablar sammanfattas i Tabell 7, där en kapacitans lika med 200 nF/km (medelvärde över alla värden i Tabell 6) har använts.

Tabell 7. Oscillationsfrekvens, vid påkoppling av en kabel, för olika kabellängder, spänningsnivåer och kortslutningseffekter.

	66 kV		132 kV		275 kV		400 kV	
	0,75 GVA	2.6 GVA	1 GVA	4.1 GVA	6 GVA	15 GVA	9 GVA	32 GVA
5 km	1,2 kHz	2,2 kHz	680 Hz	1,4 kHz	795 Hz	1,3 kHz	670 Hz	1,3 kHz
15 km	680 Hz	1,3 kHz	390 Hz	790 Hz	460 Hz	725 Hz	385 Hz	730 Hz
50 km			215 Hz	430 Hz	250 Hz	400 Hz	210 Hz	400 Hz
100 km					180 Hz	280 Hz	150 Hz	280 Hz

Kabellängden i första kolumnen är den totala längden på alla kabelkretsar. En 5 km förbindelse med tre kabelkretsar skulle innebära 15 km kabellängd i tabellen.

5.4.3 Ersättning av seriekompenserade ledningar

Närvaron av den seriekompenserade ledningen introducerar en resonansfrekvens under 50 Hz. Spänningssättning av en kapacitans skulle antända denna resonansfrekvens tillsammans den högre frekvensresonansen mellan kapacitansen och den induktiva delen av källimpedansen.

5.4.4 Vind- och solkraft

Stora vindparker innehåller stora mellanspänningsuppsamlingsnät som ändrar nätets resonansfrekvens. Förekomsten av ytterligare kapacitans, i detta fall i form av kablar, kommer vanligtvis att förskjuta resonansfrekvensen till lägre värden. Anslutning av vindparken till resten av nätet sker ofta också i form av kablar, vilket ytterligare minskar resonansfrekvensen.

Stora solcellsparker, vanligtvis anslutna till mellanspänningsnätet, har också ett uppsamlingsnät bestående av kablar. Men kablar är vanligare vid mellanspänning, så påverkan blir generellt mindre.

Förekomsten av kablar i uppsamlingsnät ökar också risken för förstärkning. Utrustningen som är ansluten till uppsamlingsnätet har nästan uteslutande ett kraftelektroniskt gränssnitt. Det finns vanligtvis begränsad dämpning i uppsamlingsnätet, så att oscillationerna kan nå höga amplituder vid förstärkning.

Som nämnts tidigare sker sådan förstärkning när resonansfrekvenserna är lika vid två spänningsnivåer. En större installation kan flytta resonansfrekvensen för den lägre spänningsnivån närmare resonansfrekvensen vid den högre spänningsnivån. Installationen kan också flytta den längre bort. Det finns alltså ingen allmän slutsats att dra om skillnaden i risken för förstärkning för solparker och vindparker.

5.4.5 Svaga drifttillstånd i transmissionssystemet

Svagare drifttillstånd kännetecknas av en lägre kortslutningseffekt och en större källinduktans. Detta resulterar i lägre resonansfrekvenser enligt (8) och (20). För kapacitanser anslutna till låg- och mellanspänningsnät är effekten av detta liten. För kapacitanser kopplade till transmissionsnätet kan detta ge en betydande skillnad.

5.4.6 Stora effektflöden över långa avstånd

Detta förväntas inte påverka spridning av transienter i spänning.

5.4.7 Modern kraftelektronisk utrustning

Modern kraftelektronisk utrustning är mestadels utrustad med en kondensator vid klämmorna, som del av ett EMC-filter. Varje kondensator kan vara liten, men tillsammans kan de ha en betydande påverkan på resonansfrekvensen och därmed på spridning av kopplingstransienter. Modern kraftelektronisk utrustning bidrar också mindre till dämpningen, så förstärkningen är sannolikt större. Detta kan vara ett problem i vindparker, stora solcellsanläggningar och i stora laddningsstationer för elfordon, där all utrustning är ansluten via ett kraftelektroniskt gränssnitt.

5.4.8 Utrustning som beter sig likadant under en spänningsstörning

Detta förväntas inte påverka spridning av transienter i spänning.

5.4.9 Klimatförändringar

Detta förväntas inte påverka spridning av transienter i spänning.

5.5 FÖRÄNDRINGAR I IMMUNITET

5.5.1 Nya luftledningar

Detta förväntas inte påverka immuniteten mot transienter i spänning.

5.5.2 Kablar istället för luftledningar

Detta förväntas inte påverka immuniteten mot transienter i spänning.

5.5.3 Ersättning av seriekompenserade ledningar

Detta förväntas inte påverka immuniteten mot transienter i spänning.

5.5.4 Vind- och solkraft

Vindturbiner och växelriktare för solkraft kan vara känsliga för transienter i spänning, särskilt när det finns förstärkning i uppsamlingsnätet. När en transient påverkar vind- och solkraftsanläggningar över ett stort geografiskt område kan detta påverka driftsäkerheter i transmissionsnätet. Förstärkning av transienterna kommer sannolikt inte att ske i flera installationer samtidigt, så att dessa värsta fall har en mindre sannolikhet att utlösa en stor del av produktionen.

5.5.5 Svaga drifttillstånd i transmissionssystemet

Detta förväntas inte påverka immuniteten mot transienter i spänning.

5.5.6 Stora effektflöden över långa avstånd

Detta förväntas inte påverka immuniteten mot transienter i spänning.

5.5.7 Modern kraftelektronisk utrustning

Utrustning med kraftelektroniskt gränssnitt kan vara känslig för transienter på grund av spänningssättning av kapacitanser. Drivsystem med diodlikriktare front-end visades i [45] vara känsliga för transienter på grund av kondensatorbatteriets påkoppling och upplevde regelbunden oönskad bortkoppling.

Interna resonanser inuti utrustningen kan vara ett problem. Det finns ingen information om detta, men resonanserna förväntas vid högre frekvenser än resonanser i nätet.

Minskningen av resonansfrekvens, som kommer att vara en följd av flera av förändringarna, kommer också att göra transienternas påverkan på vissa typer av utrustning mer allvarlig. Utlösningen av drivsystem med diodlikriktare front-end beror på överspänning på DC-sidan. Amplituden på överspänningen ökar med minskad oscillationsfrekvens och med mindre kapacitans på DC-sidan. Något liknande kan uppstå med modern kraftelektronisk utrustning, eftersom de ofta fortfarande innehåller en kondensator för energilagring.

5.5.8 Utrustning som beter sig likadant under en spänningsstörning

En kopplingstransient som har sitt ursprung i transmissionsnätet kommer att upplevas av utrustning över ett stort geografiskt område. När det finns likheter i utrustningens känslighet för transienter i spänning kan detta leda till oönskad utlösning av en betydande mängd produktion och/eller förbrukning. Detta kan i sin tur äventyra driftsäkerheten.

Risken är lägre vid påkoppling av kapacitanser än vid fel. Vid ett fel kommer skyddet att ta bort komponenten där felet finns vilket kommer att göra systemet svagare. Systemets tålighet för storskalig utlösning av produktion eller förbrukning är mindre direkt efter felbortkopplingen än vid normal drift. Påkoppling av en kapacitans har normalt bara en liten påverkan på systemets styrka, så att systemets tolerans är större.

Den goda nyheten är också här att olika elektroniska apparater beter sig olika. Det minskar risken för storskalig bortkoppling. Detta är dock fortfarande ett område där det behövs ytterligare studier.

5.5.9 Klimatförändringar

Detta förväntas inte påverka immuniteten mot transienter i spänning.

6 Transformatorpåkoppling

6.1 EFFEKTER AV DE OLIKA FÖRÄNDRINGARNA

En översikt över effekterna av olika förändringar på emission, spridning och immunitet, relaterade till påkoppling av transformatorer, ges i Tabell 8. Detaljer ges i kommande avsnitt.

Tabell 8. Översikt över förändringar som påverkar sannolikheten för interferens; transformatorpåkoppling

	Förändringar i emission	Förändringar i spridning	Förändringar i immunitet
Nya luftledningar	Det leder också ofta till fler transformatorer	Mindre allvarliga dippar; spridning av dippen över ett större område; förändringar i resonansfrekvens; Allvarligare sympatisk interaktion	
Kablar istället för luftledningar		Låga resonansfrekvenser som resulterar i resonansöverspänning	
Seriekompenserade ledningar		Inga stora förändringar	
Vind- och solkraft	Ytterligare transformatorer som ska kopplas	Förstärkning av övertonsnivåerna i uppsamlingsnätet	Utlösning av utrustning och skydd
Svaga drifttillstånd i transmissionsnät		Allvarligare dippar; spridning av dippar över ett större område; högre risk på temporär överspänning	
Stora effektflöden över långa avstånd			
Modern kraftelektronisk utrustning		Kondensatorer ger lägre resonansfrekvens och kan ge förstärkning av övertonsnivåer.	Otillräckligt med kunskaper om detta
Utrustning som beter sig likadant			Möjlig storskalig utlösning; men brist på information
Klimatförändringar	Fler åsknedslag och flera automatiska återinkopplingar		

6.2 ÖVERSIKT AV FENOMENET

Påkoppling / spänningssättning av en transformator är en form av induktanspåkoppling. Transienten vid spänningssättning av en RL-seriekoppling

(den vanliga modellen för detta) är en dämpad likströmskomponent i strömmen. Det som skiljer transformatorns påkoppling är det icke-linjära sambandet mellan det magnetiska flödet i kärnan och magnetiseringsströmmen. Den magnetiska mättningen i kärnan ger höga nivåer av övertoner i strömmen.

Ur ett matematiskt och kretsteoretiskt perspektiv är spänningsstörningen orsakad av transformatorpåkoppling en transient. Enligt terminologi och definitioner inom elkvalitet är det en spänningsdipp. I detta kapitel kommer vi att använda termen spänningsdipp samtidigt som vi är medvetna om att det matematiskt är en transient.

6.2.1 Likströmskomponenten i strömmen

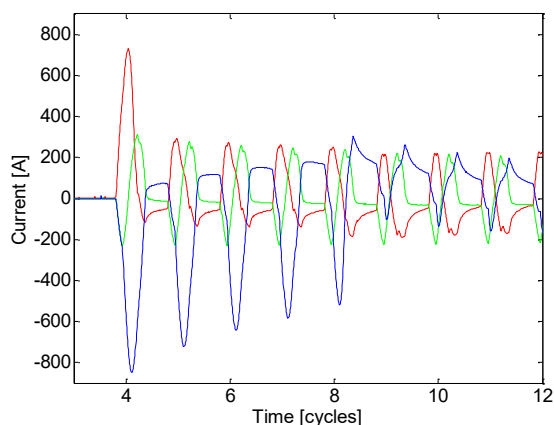
Dämpningstidskonstanten för likströmskomponenten i transformatorns påkopplingsström är:

$$\tau = \frac{L}{R} \quad (21)$$

När en icke-belastad transformator aktiveras, är induktansen L i ekvationen huvudsakligen magnetiseringsinduktansen, som är mycket stor. Man kan därför förvänta sig långa tidskonstanter. Denna likströmskomponent i strömmen kan leda till mättnad av strömtransformatorer. Detta är en viktig fråga för skydd av kraftsystemet, men mindre relevant för elkvalitet.

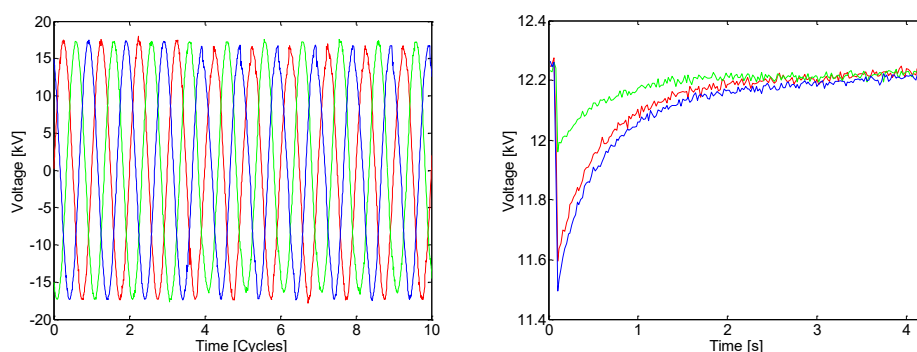
6.2.2 Mättning och vågformsförvrängning

Problemet med spänningsdippar på grund av transformatorpåkoppling är de icke-linjära fenomen som uppstår när transformatorkärnan går in i mättning. En liknande likströmskomponent som i strömmen förekommer också i transformatorns magnetiska flöde. Beroende på fasvinkeln på spänningen resulterar detta i kraftig mättning, stora magnetiseringsströmmar, spänningsdippar och kraftig spännings- och strömdistorsion. Ett exempel på strömmens vågform, mätt vid påkoppling av en transformator, visas i Figur 14 [7, Avsnitt 6.2.2.8]. Figuren visar att strömmen går i pulser, vilket motsvarar de perioder då krafttransformatorn går in i mättning. Efter ungefär fem perioder går strömtransformatorn i mättning på grund av likströmskomponenten, och vågformen på sekundärsidan av strömtransformatorn (vågformen som instrumentet registrerar) är inte längre en bra representation av strömmen på primärsidan (strömmen i nätet).



Figur 14. Transformatorströmmen, uppmätt under påkoppling, i tiddomän.

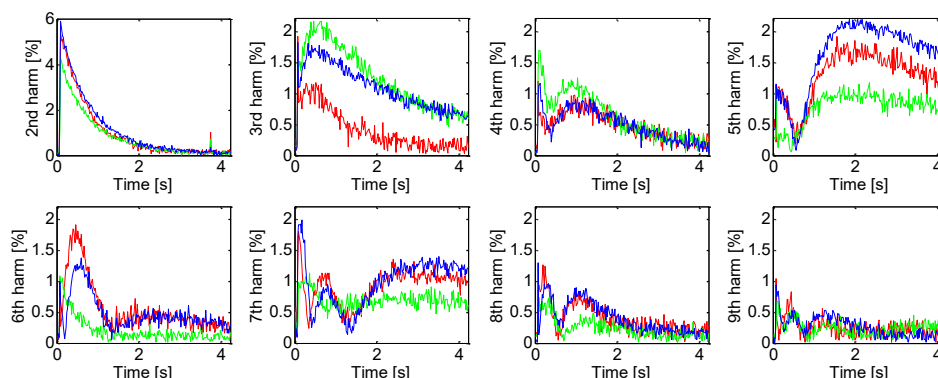
Spänningsdippen på grund av spänningssättningen av en icke-belastad 10-kV-transformator (samma händelse som resulterade i strömmen som visas i Figur 14) visas i Figur 15 [7, Avsnitt 6.2.2.8]. Figuren ← till vänster visar spänningens vågform under några perioder. Figuren till höger → visar RMS-spänningen (beräknad över en period) under några sekunder.



Figur 15. Spänningsdipp på grund av påkoppling av en 10-kV-transformator; vågformer (← vänster) och RMS-spänning som funktion av tid (höger →).

Händelsens karaktär visas bäst i rms-spänningen: ett kraftigt fall i spänningen när transformatorn spänningssätts, följt av en långsam och obalanserad återhämtning av spänningen. Den obalanserade karaktären hos spänningen är en viktig egenskap för spänningsdippar på grund av påkoppling av en transformator.

Spänningsdippen på grund av transformatorpåkoppling är också förknippat med höga nivåer av spänningsdistorsion, som visas i Figur 16. Spänningsdistorsionen domineras initialt av andra övertonen, med höga nivåer av övriga jämna övertoner. Efter ett tag kommer de låga ordningens udda övertoner att dominera spektrumet.



Figur 16. Övertoner 1 tom 8 av spänningen på grund av påkoppling av en transformator; notera skillnaden i vertikal skala för den andra övertonen.

Vid normal drift av elnätet är jämna tonerna låga, men några procents distorsion för udda övertoner av lägre ordning är ganska vanligt. Förekomsten av jämna övertoner är därför en bättre indikator för transformatorpåkoppling än höga övertonsnivåer i allmänhet.

6.2.3 Sympatisk interaktion

Spänningssättningen och efterföljande mätning av en transformator resulterar i obalanserad och distorderad spänning vid transformatorn och på andra platser i nätet. Dessa spänningsstörningar kan leda till mätning av närliggande transformatorer. De obalanserade och distorderade strömmarna från dessa transformatorer kan i sin tur leda till ytterligare mätning av den påkopplade transformatorn. Detta fenomen kallas "sympatisk interaktion" [46, 47].

Den sympatiska interaktionen resulterar i en långsammare minskning av kopplingsströmmens amplitud när andra transformatorer finns i närheten. Vid övertonresonans kan dessa långvariga kopplingsströmmar leda till temporär överspänning (se Avsnitt 6.2.4.)

Vid studier av påkoppling av en transformator är det viktigt att inkludera transformatorer i närheten av transformatorn som påkopplas.

6.2.4 Temporär överspänning

Övertonsströmmar på grund av transformatorpåkoppling resulterar i övertonsspänningar i nätet. Övertonsspänningen är lika med produkten av övertonströmmen och källimpedansen vid övertonsfrekvensen (Ohms lag). När källimpedansen har en resonans nära en av övertonsfrekvenserna kan detta resultera i höga nivåer av spänningsdistorsion. På grund av sympatisk interaktion blir varaktigheten av den höga spänningsdistorsionen ännu längre om flera transformatorer finns nära varandra.

Dessa långvariga distorderade vågformer, med toppspänningar högre än vanliga spänningen, kallas "temporär överspänning" eller "resonansöverspänning" [48, 49, 50].

6.3 FÖRÄNDRINGAR I EMISSION

Emission är i detta fall spänningssättningen av transformatorn. Förändringar i emission är alltså förändringar i antalet gånger en transformator spännsätts.

6.3.1 Nya luftledningar

Byggandet av nya luftledningar är ofta kopplat till byggandet av nya stationer och nya transformatorer. Närvaron av fler transformatorer kommer sannolikt också att öka antalet påkopplingar.

Genomsnittligt förväntas bara en mindre ökning av det totala antalet påkopplingar men på vissa ställen i nätet kan det bli en stor ökning.

6.3.2 Kablar istället för luftledningar

Detta påverkar inte antalet påkopplingar av transformatorer.

6.3.3 Ersättning av seriekompenserade ledningar

Detta påverkar inte antalet påkopplingar av transformatorer.

6.3.4 Vind- och solkraft

Vind- och solkraftsanläggningar inkluderar transformatorer. Detta gäller särskilt för stora vindkraftsanläggningar, med en turbingenerator för varje vindturbin. För kunder som är anslutna till nätet någon annanstans kommer endast påkopplingen av huvudtransformatorn (mellan uppsamlingsnätet och det offentliga nätet) att resultera i en märkbar spänningsdipp vid påkoppling av en transformator. Ökande mängder vind- och solkraft ger fler sådana transformatorer och därmed även fler transformatorpåkopplingar.

Genomsnittligt förväntas bara en mindre ökning av det totala antalet påkopplingar men på vissa ställen i nätet kan det bli en stor ökning.

6.3.5 Svaga drifttillstånd i transmissionsnätet

Detta påverkar inte antalet påkopplingar av transformatorer.

6.3.6 Stora effektlöden över långa avstånd

Detta påverkar inte antalet påkopplingar av transformatorer.

6.3.7 Modern kraftelektronisk utrustning

Detta påverkar inte antalet påkopplingar av transformatorer.

6.3.8 Utrustning som beter sig likadant under en spänningsstörning

Detta påverkar inte antalet påkopplingar av transformatorer.

6.3.9 Klimatförändringar

Klimatförändringar kommer enligt flera studier (se avsnitt 4.3.9) att leda till fler åsknedslag och därmed fler fel på grund av åsknedslag och flera fall av automatisk återinkoppling efter sådana fel.

Automatisk återinkoppling för en transmissionsledning innebär endast att ledningen kopplas in igen. Automatisk återinkoppling på distributionsnivå innebär att ledningen och transformatorerna som matas från den ledningen kopplas in. Automatisk återinkoppling blir då spänningssättning av ett flertal transformatorer, med tillhörande spänningsdipp, obalans och övertonsdistorsion. En mellanspänningsluftledning matar flera transformatorer, vilket gör att händelsen är allvarligare än att en enda transformator kopplas på. Sådana distributionstransformatorer är dock vanligtvis belastade vid återinkopplingen, vilket gör händelsen mindre allvarlig. Som visas i [51] är sådana händelser en stor källa till antalet spänningsdippar.

6.4 FÖRÄNDRINGAR I SPRIDNING

Spridning av en spänningsstörning avser relationen mellan den faktiska händelsen (påkoppling av en transformator) och den resulterande spänningsstörningen (spänningsdippen) någonstans i nätet. Spänningsstörningen vid transformatorn betraktas i detta kapitel också som spridning.

6.4.1 Nya luftledningar

Att bygga nya luftledningar kommer att stärka nätet, minska källimpedansen och därmed minska spänningssänkningen vid transformatorn som påkopplas. Att bygga nya luftledningar kommer också att möjliggöra spridningen av händelsen över ett större geografiskt område. Längre bort från transformatorn kan sänkningen vara mer kraftig. Båda fenomen påverkar antalet och storleken av spänningsdippar för en kund som är ansluten till elnätet.

Att bygga nya luftledningar förändrar också nätets övertonsimpedans. Detta påverkar risken för temporär överspänning. Temporär överspänning förekommer dock sällan i transmissionsnät med endast luftledningar.

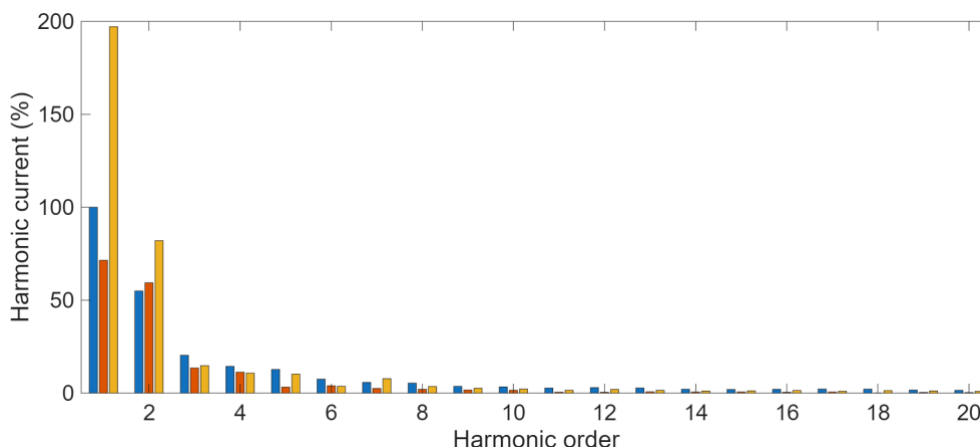
6.4.2 Kablar istället för luftledningar

Förekomsten av långa växelströmskablar vid högre spänningsnivåer minskar nätets resonansfrekvens avsevärt, vilket till exempel diskuteras i Avsnitt 4.4.2.3 och Avsnitt 5.4.2. Om denna resonansfrekvens motsvarar en lägre ordningens överton som härstammar från transformatorns påkoppling, kan detta leda till höga nivåer av övertonsdistorsion under en längre period, temporär överspänning.

Att ersätta luftledningar med kablar minskar resonansfrekvensen och resulterar i ökad spänningsdistorsion för lägre ordningens övertoner. Övertonsspänningen är produkten av den övertonsströmmen och källimpedans vid övertonsfrekvens (Ohms lag). Båda kommer att kort diskuteras nedan.

Övertonsspektrumet för påkopplingsströmmen visas i Figur 17.

Grundtonskomponenten (50 Hz) används som referens; övertonskomponenterna uttrycks i procent av grundtonsströmmen. Figuren erhålls genom att ta den diskreta Fourier transformationen (DFT), över fönstret från 4e till 8e perioden, av vågformen som visas i Figur 14. Övertonsvärdena erhålls genom att ta rms över fyra värden, 12,5 Hz från varandra, centrerade kring övertonsfrekvensen. De tre färgerna motsvarar de tre fasströmmarna. Värdena anges i procent av grundtonsströmmen i fas A.

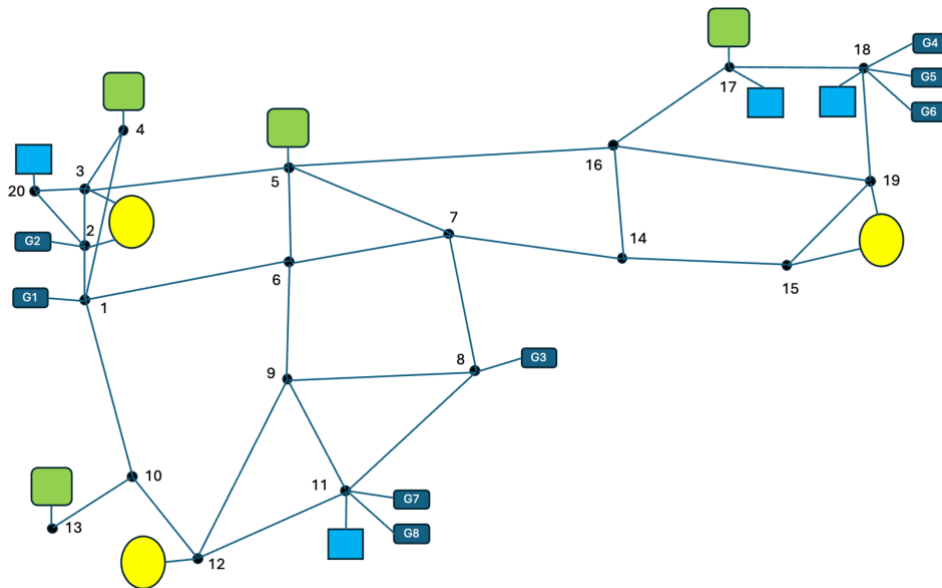


Figur 17. Spektrumet av övertonsströmmen, i procent av grundtonen, av strömmen under de första fyra perioderna efter påkoppling av en transformator.

Spektrumet domineras starkt av den andra övertonen; övertonernas amplitud minskar snabbt med ökande ordning. Som visas i Figur 16, så är det initialt för emissionen. Längre in i händelsen dominerar lägre ordningens udda övertoner. Figuren visar också en stor obalans för grundtonen, och även för vissa övertoner.

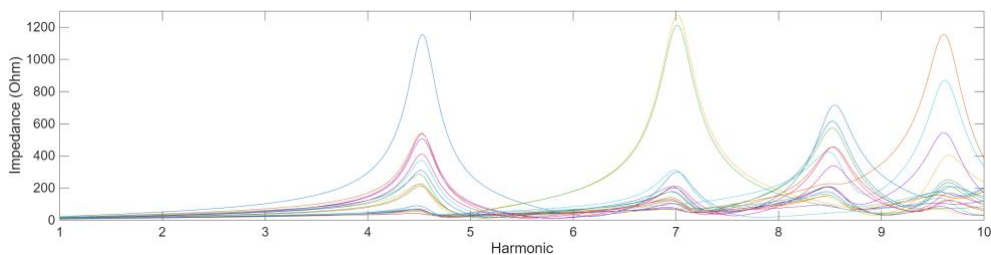
Transformatorpåkoppling i ett nät med ett betydande antal högspänningskablar studeras i [23, 48, 49]. Studierna visar att höga nivåer av övertonsspänning och höga amplituder av temporär överspänning kan förväntas i sådana elnät. Att ersätta upp till fem luftledningar ger resonansfrekvensen ner till cirka 100 Hz.

För att illustrera kablarnas påverkan, betrakta exemplet som visas i Figur 18. Nätet baseras på kartan över det svenska 400 kV-transmissionsnätet enligt Svenska kraftnät [52]. De gula ellipserna representerar de tre största städerna i södra Sverige: Göteborg (nod 2 och 3), Stockholm (nod 15 och 19) och Malmö (nod 12). De gröna rutorna visar inmatning från andra delar av transmissionsnätet, modellerat som reaktans bakom en (50-Hz) spänningskälla. De blå rutorna indikerar HVDC-länkar till grannländerna. De mörkblåa rektanglarna indikerar stora kraftverk. En induktans motsvarande 1 mH/km och en kapacitans motsvarande 12 nF/km har använts för alla luftledningar. Serieresistans har tagits något högre än 50-Hz-värdet för att inkludera skin-effekter. Resistiva laster lades till för alla noder för att modellera dämpning vid lägre spänningsnivåer.



Figur 18. Exempel 400 kV-nät, baserat på transmissionsnätet i södra Sverige.

Källimpedansen för alla noder i modellen har beräknats som en funktion av frekvensen. Resultaten visas för frekvenser upp till 500 Hz (överton 10) i Figur 19.

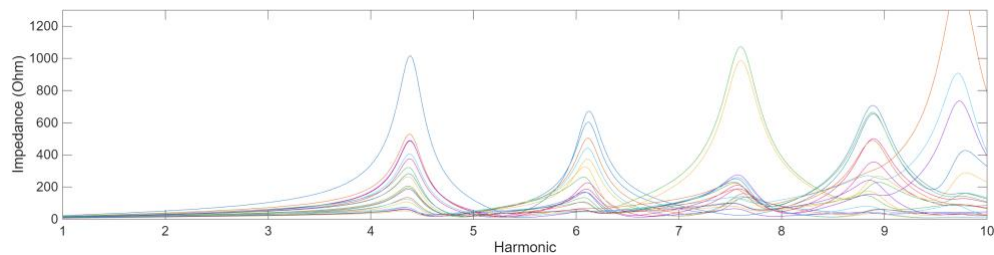


Figur 19. Källimpedans kontra frekvens, för 20 noder i 400 kV-nätet som visas i Figur 18, baskonfiguration med endast luftledning.

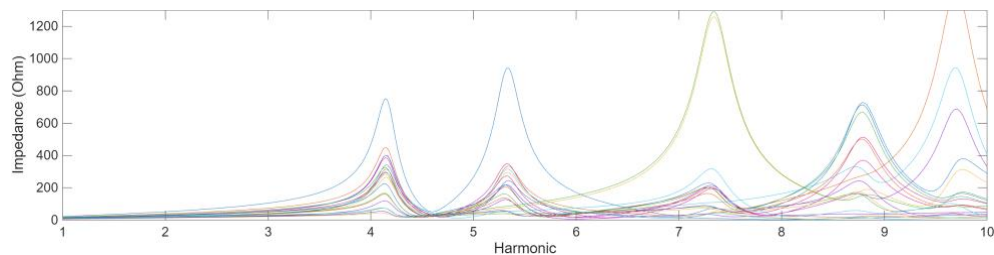
De lägsta resonansfrekvenserna finns mellan överton 4 och överton 5. Flera resonanser är också synliga vid högre frekvenser. Observera att inga hårda slutsatser bör dras från vare sig frekvensen eller amplituden på resonanserna i figuren; en mycket mer detaljerad och noggrann modell behövs för det ändamålet. De siffror som presenteras här syftar endast till att illustrera de olika trenderna.

Som nästa steg ersätts transmissionsledningarna runt Göteborg (alla i modellen 15 km långa) med kablar. Baserat på exemplet på nätet som presenteras i [21] valdes tre parallella kabelkretsar. Baserat på [20] användes 1600 mm², 420 kV-kablar, med en kapacitans motsvarande 200 nF/km och en induktans motsvarande 0,78 mH/km.

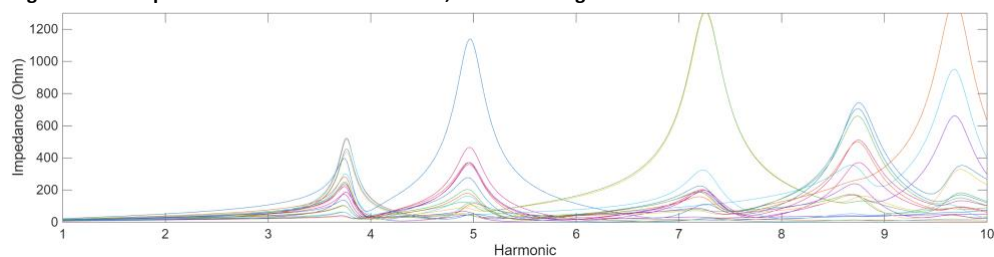
Den resulterande impedansen som funktion av frekvensen, för alla noder, visas i Figur 20 tom Figur 23.



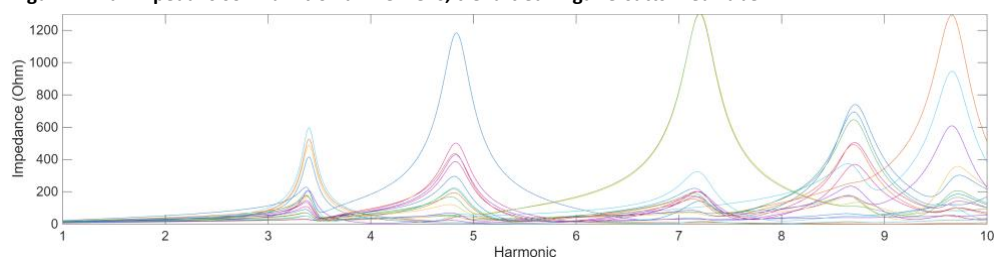
Figur 20. Källimpedans som funktion av frekvens, en luftledning ersätts med kabel.



Figur 21. Källimpedans som funktion av frekvens, två luftledningar ersätts med kabel.



Figur 22. Källimpedans som funktion av frekvens, tre luftledningar ersätts med kabel.



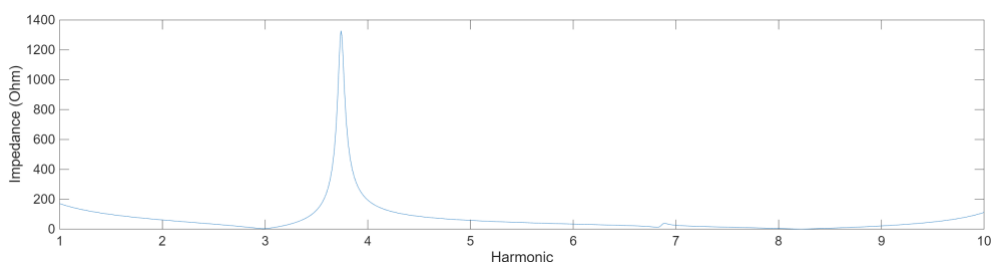
Figur 23. Källimpedans som funktion av frekvens, fyra luftledningar ersätts med kabel.

Ersättningen av luftledningar med kablar resulterar i en förskjutning av resonanserna till lägre frekvenser. I detta fall skiftar den första resonansen från ton 4,5 till ton 3,5. Några av de andra resonanserna skiftar också till lägre frekvenser.

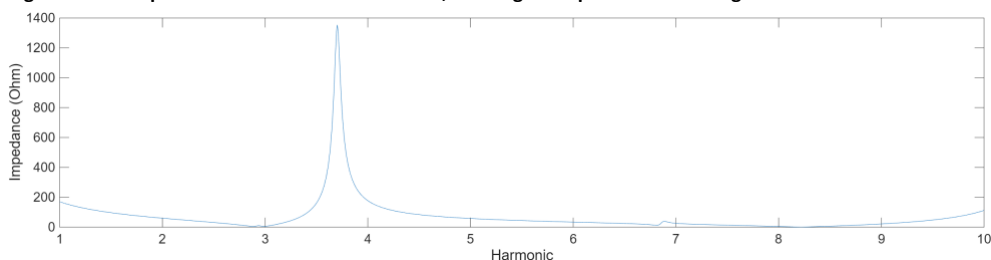
6.4.3 Ersättning av seriekompenserade ledningar

För att visa effekten av seriekompenserade ledningar på resonansfrekvensen skapades en förenklad nätmodell. I modellen matas en 400 kV-station av två 500 km långa seriekompenserade ledningar (var och en 70 % kompenserad) och två 100 km långa icke-kompenserade ledningar. En kortslutningseffekt på 7000 MVA antogs bakom var och en av de fyra ledningarna.

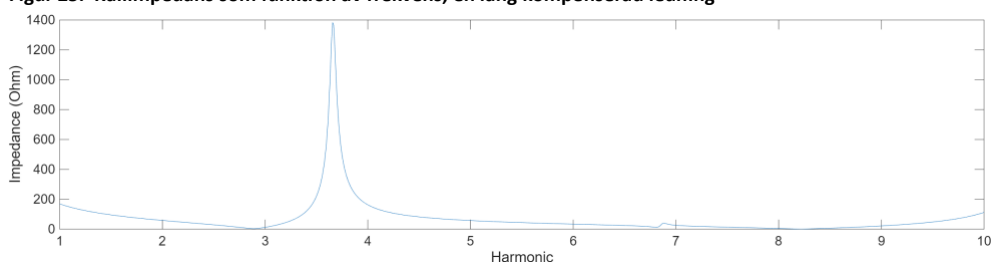
Källimpedansen upp till överton 10 (500 Hz) vid stationen visas i Figur 24. Beräkningarna har upprepats för en och två av de långa icke-kompenserade ledningarna; resultaten visas i Figur 25 och Figur 26.



Figur 24. Källimpedans som funktion av frekvens, två långa kompenserade ledningar



Figur 25. Källimpedans som funktion av frekvens, en lång kompenserad ledning



Figur 26. Källimpedans som funktion av frekvens, alla ledningar icke-kompenserade

Jämförelse av figurerna visar en mindre minskning av resonansfrekvensen och en liten ökning i resonansens amplitud.

Ersättning av seriekompenserade ledningar sker dock sällan utan att andra ändringar görs. En sådan ersättning skulle troligen innebära att nya stationer och ytterligare ledningar byggs. Effekten av dessa förändringar på resonansen kommer att vara större än själva ersättningen.

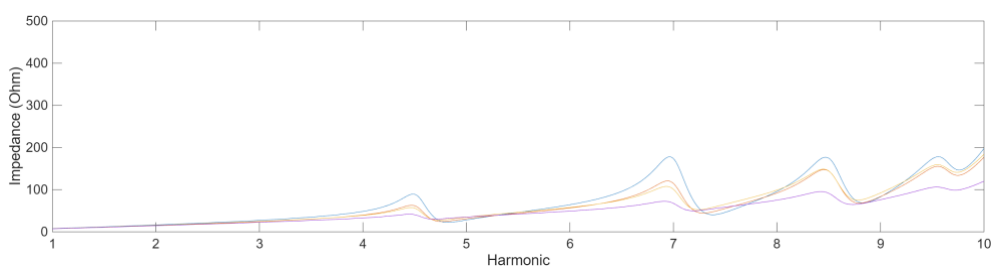
6.4.4 Vind- och solkraft

Övertoner på grund av påkoppling av en transformator kan förstärkas i uppsamlingsnätet vid vind- eller solkraftsanläggningarna. Särskilt när förstärkning också sker i transmissionsnätet kan detta leda till allvarliga nivåer av temporära överspänning i uppsamlingsnätet. Resonansfrekvensen för uppsamlingsnät i en vindpark ligger, baserat på en studie av några artiklar, mellan 500 Hz och några kHz [53]. Det finns alltså bara en liten risk att lägre ordningens övertoner, de som är dominerande under påkoppling av en transformator, kommer att förstärkas. Det rekommenderas dock starkt att beakta denna resonansfrekvens när man studerar den potentiella påverkan av temporär överspänning på vindkraftsanläggningar.

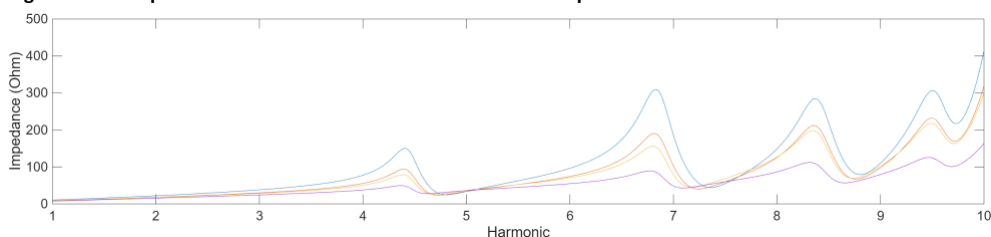
Kapacitansen i uppsamlingsnätet kan också påverka källimpedans vid transformatorn och därmed påverka övertonsnivåerna. Den största påverkan förväntas från kablar som kopplar vindparken till transmissionsnätet. Detta är särskilt ett problem i havsbaserade parker, där luftledning inte är ett alternativ.

6.4.5 Svaga drifttillstånd i transmissionsnätet

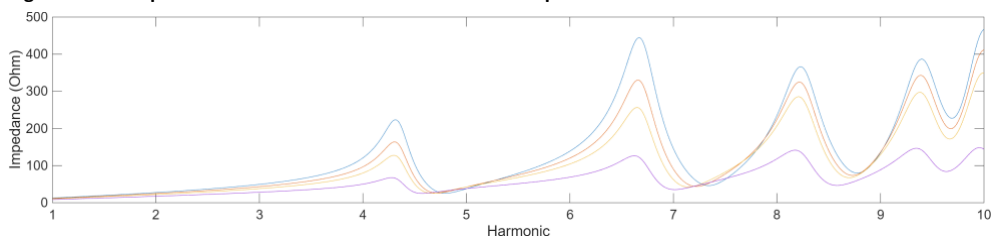
Ett svagare transmissionssystem ger en djupare spänningsdipp vid transformatorn som påkopplas. Det leder också till att dippen sprids över ett större geografiskt område. Simuleringarna av källimpedansen för stationer i södra Sveriges transmissionsnät har upprepats för en och två stora produktionsenheter ur drift på västkusten. Resultaten visas i Figur 27 (båda enheterna i drift) Figur 28 (en enhet i drift) Figur 29 (ingen enhet i drift). Endast impedanserna för stationerna runt Göteborg, i modellen, visas i diagrammen.



Figur 27. Källimpedans som funktion av frekvens för båda stora produktionsenheterna i drift.



Figur 28. Källimpedans som funktion av frekvens för en stor produktionsenhet i drift.



Figur 29 Källimpedansen som funktion av frekvens för båda stora produktionsenheterna ur drift.

Att ta produktionsenheterna ur drift förskjuter resonansfrekvenserna till lägre värden och ökar impedansens toppvärde. Båda kan leda till ökad spänningsdistorsion under transformatorns påkoppling, och därmed en högre risk för temporär överspänning.

6.4.6 Stora effektflöden över långa avstånd

Ingen påverkan av stora effektflöden över långa avstånd på spridning av spänningsdippar förväntas.

6.4.7 Modern kraftelektronisk utrustning

Kondensator i EMC-filtret med modern kraftelektronisk utrustning kan leda till en minskning av resonansfrekvensen för låg- och mellanspänningsnät. Som visas i [54] är resonansfrekvenserna i låg- och mellanspänningsnät vanligen på 500 Hz

och högre. Emissionen från transformatorns påkoppling är liten för dessa frekvensområden och ingen större påverkan förväntas.

6.4.8 Utrustning som beter sig likadant under en spänningsstörning

Ingen påverkan på spridning av dippar förväntas.

6.4.9 Klimatförändringar

Ingen påverkan på spridning av dippar förväntas.

6.5 FÖRÄNDRINGAR I IMMUNITET

6.5.1 Nya luftledningar

Ingen påverkan på immuniteten mot spänningsdippar förväntas.

6.5.2 Kablar istället för luftledningar

Ingen påverkan på immuniteten mot spänningsdippar förväntas.

6.5.3 Ersättning av seriekompenserade ledningar

Ingen påverkan på immuniteten mot spänningsdippar förväntas.

6.5.4 Vind- och solkraft

6.5.4.1 Drift av anläggningen

Vind- och solkraftsanläggningar kan vara känsliga för dippar på grund av transformatorpåkoppling. Kraven för störningstålighet är baserade på spänningsdippar på grund av kortslutningar och ibland även för spänningsdippar på grund av jordfel. Påkoppling av en transformator ger dock generellt bara dippar med hög kvarvarande spänning, vilket anläggningen ska tolerera. Förekomsten av spänningsobalans och höga nivåer av jämna övertoner kan dock göra att anläggningen inte tål dippen. Den potentiella påverkan av jämna övertoner på grund av transformatorpåkoppling på vindkraftsanläggningar nämndes första gången i [55]. och upprepades i andra publikationer, t.ex. [6], men inga större studier gjordes för att kvantifiera detta.

Sympatisk interaktion mellan turbintransformatorer nära varandra i en vindpark studeras i [56], där det kallas "sympatisk interaktion". Det finns en del sympatisk interaktion mellan transformatorer i olika delar av parken. Särskilt när en transformator aktiveras i nära anslutningen till transmissionsnätet visar de andra transformatorerna sympatisk interaktion.

Temporär överspänning på grund av spänningssättning av en 220/22-kV transformator i en vindpark visas i [57]. Överspänningstoppas på upp till 1,35 pu observeras för resonansfrekvenser (kallade "naturliga frekvenser") mellan 460 Hz och 680 Hz. Både längden på 220 kV-transmissionsledningen och längden på 22 kV-kablarna påverkar överspänningstopparna.

Studien som presenteras i [58] undersöker effekten av påkoppling av huvudtransformatorn i en solpark. Hög övertonsdistorsion uppstår under kopplingen på grund av en resonansfrekvens nära femte övertonen. Författarna nämner fränkoppling av kunderna som en möjlig konsekvens av detta.

Effekten av spänningsdippar från transformatorpåkoppling på DFIG-baserade vindkraftverk studeras i [59]. Det har visats att sådana dippar kan ha stora effekter på DC-länkens spänning och på rotorströmmen. Detta kan leda till att vindkraftverket löser ut på grund av överspänning eller överström.

En jämförelse görs i [60] mellan dippar på grund av transformatorpåkoppling och dippar på grund av ett osymmetriskt fel; dipparna har samma kvarstående spänning och varaktighet. Deras påverkan på ett vindkraftverk vid DFIG är dock helt annorlunda. Dippar på grund av transformatorpåkopplingen resulterar i högre distorsion i rotorströmmen, högre överspänning på DC-sidan, längre varaktighet av oscillationerna i vridmoment och längre tid för DFIG att återhämta sig. Det rekommenderas i [60] att båda händelserna beaktas olika vid studier om störningstålighet. Samma rekommendation ges i [6].

6.5.4.2 Skyddsutlösning

Höga nivåer av övertonsströmmar i vind- eller solkraftsanläggningar, särskilt vid förstärkning, kan leda till oönskad utlösning av skyddet i installationen.

Studien som presenteras i [61] visar ett samband mellan närvaron av geomagnetiska inducerade strömmar och oönskad utlösning av skyddet med vindparker. Denna oönskade utlösning är sannolikt relaterad till de höga nivåerna av distorsion som är förknippad med geomagnetiskt inducerade strömmar. Det underliggande fysiska fenomenet, transformatormättning, är detsamma som vid påkoppling av en transformator. Oönskad utlösning av skydd i vindparker kan därför också förekomma på grund av påkoppling av en transformator, särskilt när sympatisk interaktion och förstärkning spelar en roll.

6.5.5 Svaga drifttillstånd i transmissionssystemet

Ingen påverkan på immuniteten förväntas.

6.5.6 Stora effektflyöden över långa avstånd

Ingen påverkan på immuniteten förväntas.

6.5.7 Modern kraftelektronisk utrustning

Det finns begränsad information om immuniteten hos modern kraftelektronisk utrustning mot spänningsdippar på grund av transformatorpåkoppling, utöver det som nämns i Avsnitt 6.5.4. Det ges dock en del tankar nedan, baserade på erfarenheter av övertonspåverkan i allmänhet, inte på studier eller litteraturöversikter.

- Spänningsobalansen under dippen på grund av transformatorpåkoppling varar längre än obalansen vid en dipp på grund av ett fel. Modern utrustning har visat sig vara känslig för obalans under en dipp.

- De udda övertonerna under en transformatorpåkoppling brukar vara av samma storleksordning som under vanlig drift. Inga ytterligare effekter på utrustningen förväntas på grund av udda övertoner.
- Jämna övertonen i spänning visar normalt låga nivåer. De relativt höga nivåerna vid transformatorpåkoppling kan påverka styralgoritmen negativt eller till och med leda till mättning av transformatorerna inuti utrustningen.

6.5.8 Utrustning som beter sig likadant under en spänningsstörning

Precis som vid spänningsdippar på grund av fel finns det risk för storskalig utlösning av utrustning under en dipp på grund transformatorpåkoppling. Att göra några uttalanden om sannolikheten för detta skulle kräva mer insikt i hur sådana händelser påverkar modern utrustning och även här rekommenderas ytterligare studier.

6.5.9 Klimatförändringar

Ingen påverkan på immuniteten förväntas.

7 Referenser

- [1] S. Rönnberg, M. Bollen, Power quality issues in the electric power system of the future, *The electricity journal* 29, no. 10 (2016): 49-61.
- [2] Power quality and EMC issues with future electricity networks, CIGRE Technical Brochure 719, 2018.
- [3] M. Bollen, A. Uosef, Voltage dip transients and auxiliary equipment in nuclear power stations, *Energiforsk Rapport* 2024–1090.
- [4] M. Bollen, A. Uosef, Impact of voltage dip transients originating in transmission grids on industrial installations, *IEEE Power Tech*, 2025.
- [5] M. Bollen, *Understanding power quality problems*. New York: IEEE press, 2000.
- [6] R. A. de Oliveira, M. H. J. Bollen, Susceptibility of large wind power plants to voltage disturbances — recommendations to stakeholders, *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 10, no. 2, pp. 416-429, March 2022,
- [7] M. Bollen, I. Y. H. Gu. *Signal processing of power quality disturbances*. John Wiley & Sons, 2006.
- [8] R. H. Golde, The frequency of occurrence and the distribution of lightning flashes to transmission lines, *Electrical Engineering*, vol. 64, no. 12, pp. 902-910, Dec. 1945.
- [9] M. Bollen, D. Karlsson, O. Lennerhag, Different fault types and voltage dips in relation to shielding of subtransmission lines, *Int Conf on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, 2016.
- [10] R. S. Nerem et al. Climate-change–driven accelerated sea-level rise detected in the altimeter era." *Proceedings of the national academy of sciences* 115, no. 9 (2018): 2022-2025.
- [11] T. V. Callaghan et al. A new climate era in the sub-Arctic: Accelerating climate changes and multiple impacts. *Geophysical Research Letters* 37, no. 14 (2010).
- [12] C. Price, D. Rind, Possible implications of global climate change on global lightning distributions and frequencies. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 99(D5), 1994, 10823-10831.
- [13] D. L. Finney, et al. A projected decrease in lightning under climate change. *Nature Climate Change*, 8(3), 2018, 210-213.
- [14] Y. Chen, et al. Future increases in Arctic lightning and fire risk for permafrost carbon, *Nature Climate Change* 11, no. 5 (2021): 404-410.
- [15] F. J. Pérez-Invernón, et al. Variation of lightning-ignited wildfire patterns under climate change." *Nature communications* 14, no. 1 (2023): 739.
- [16] M. W. Jones, et al. Climate change increases the risk of wildfires. *JSTOR*, (2020), <https://www.jstor.org/stable/resrep51248>.

- [17] G. Di Virgilio, et al. Climate change increases the potential for extreme wildfires. *Geophysical Research Letters* 46, no. 14 (2019): 8517-8526.
- [18] M. H. J. Bollen, Fast assessment methods for voltage sags in distribution systems, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 32, no. 6, pp. 1414-1423, Nov.-Dec. 1996.
- [19] GEC Alstom protective relays application guide, Third edition, 1987.
- [20] Network protection & automation guide, Alstom, 2011.
- [21] O. Lennerhag, Power system model for resonance studies, Doctoral thesis, Luleå University of Technology, 2018, <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1249815/FULLTEXT02>.
- [22] <https://www.zmscable.com/zms-cables/Power-Cable/Medium-High-Voltage-Power-Cable-MV-HV>
- [23] O. Lennerhag, J. Lundquist, M. H. J. Bollen, Temporary detuning of cablified transmission grids for mitigation of resonant overvoltages, in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 37, no. 2, pp. 1050-1057, April 2022
- [24] E. Styvaktakis, M. H. J. Bollen, Signatures of voltage dips: transformer saturation and multistage dips, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 18, no. 1, pp. 265-270, Jan. 2003.
- [25] M. Bollen, F. Hassan, Integration of distributed generation in the power system, Wiley / IEEE Press, 2011.
- [26] M. Speychal, M. H. J. Bollen, K. Linden, Impact of increasing levels of DER on the dip frequency in transmission systems, *International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS)*, Stockholm, Sweden, 2006.
- [27] M.H.J. Bollen, M. Speychal, K. Lindén, Impact of increasing amounts of wind power on the dip frequency in transmission systems, *Nordic Wind Power Conference*, Helsinki, Finland, May 2006.
- [28] R. A. de Oliveira, M. H. J. Bollen, Susceptibility of large wind power plants to voltage disturbances — recommendations to stakeholders, *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 10, no. 2, pp. 416-429, March 2022.
- [29] M.H.J. Bollen, On voltage dip propagation, *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, July 2001, Vancouver, Canada.
- [30] R. A. de Oliveira, M. H. J. Bollen, Impact of voltage dips originated in the transmission grid on EV charging stations, *Int Conf on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, 2022.
- [31] M. H. J. Bollen, M. Hager, C. Roxenius, Effect of induction motors and other loads on voltage dips: theory and measurements, *IEEE Power Tech*, 2003.
- [32] M. H. J. Bollen, On voltage dip propagation. *Power Engineering Society Summer Meeting*, 2001.

- [33] V. A. Katić, A. M. Stanisavljević, B. P. Dumnić, B. P. Popadić, Impact of V2G operation of electric vehicle chargers on distribution grid during voltage dips, IEEE EUROCON 2019 -18th International Conference on Smart Technologies, Novi Sad, Serbia, 2019, pp. 1-6,
- [34] Z. Wang, X. Guo, J. Li, X. Wang, Impact of voltage sags on electric-vehicle charger and critical voltage sag determination, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 31, no. 3, pp. 1397-1399, June 2016.
- [35] S. Hui, X. Yonghai, Study on the impact of voltage sags on different types of electric vehicle chargers. In 2016 China International Conference on Electricity Distribution (CICED), August 2016.
- [36] Y. Zhang, Z. Zhu, Z. Deng, M. Wang, Research on the impact of voltage sag characteristics in China on electric vehicle charging: BMW Brilliance Electric Vehicle as an example. Electric Power Systems Research, 226, 109894, 2024.
- [37] X. Guo, J. Li, X. Wang, Impact of grid and load disturbances on electric vehicle battery in G2V/V2G and V2H mode, 2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Montreal, QC, Canada, 2015,
- [38] I. Khan, A. S. Vijay, S. Doolla, Investigating the effect of various voltage sags on grid supporting inverters, 2020 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), Jaipur, India, 2020,
- [39] Y. Guan, Y. Xiao, L. Qin, S. Sun, X. Liu, Q. Yao, An admittance modeling method of grid-tied converter in $\alpha\beta$ -frame under voltage sag, IEEE Transactions on Transportation Electrification, vol. 10, no. 2, pp. 3613-3629, June 2024
- [40] X. Pan, W. Liang, J. Guo, X. Sun, H. Chen, Parameter estimation by considering both voltage dip and phase angle jump for DFIG-based WTGs in distribution grids, IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 15, no. 4, pp. 2170-2181, Oct. 2024.
- [41] J2894/1, Power quality requirements for plug-in electric vehicle chargers, SAE International.
- [42] L. Callegaro, G. Konstantinou, C. A. Rojas, N. F. Avila, J. E. Fletcher, Testing evidence and analysis of rooftop PV inverters response to grid disturbances, IEEE Journal of Photovoltaics, vol. 10, no. 6, pp. 1882-1891, Nov. 2020.
- [43] R. S. Bayless, J. D. Semlen, D. E. Traux, W. E. Reid, Capacitor switching transformer transients, IEEE Transactions on Power Delivery, vol.3, no.1, pp.349-357, January 1988.
- [44] Obtained with help from ChatGPT.
- [45] V. E. Wagner, J. P. Staniak and T. L. Orloff, Utility capacitor switching and adjustable-speed drives, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 27, no. 4, pp. 645-651, July-Aug. 1991.
- [46] H. Bronzeado, R. Yacamini, Phenomenon of sympathetic interaction between transformers caused by inrush transients. IEE Proceedings-Science Measurement and Technology, 142(4), 1995, 323-329.

- [47] H. S. Bronzeado, P. B. Brogan, R. Yacamini, Harmonic analysis of transient currents during sympathetic interaction. *IEEE Transactions on Power Systems*, 11(4), 2002, 2051-2056.
- [48] O. Lennerhag, M. Bollen. Impact of uncertainties on resonant overvoltages." *International Conference on Power Systems Transients (IPST)*. 2019.
- [49] O. Lennerhag, M. H. J. Bollen, Impact of uncertainties on resonant overvoltages following transformer energization, *Electric Power Systems Research* 187 (2020): 106503.
- [50] B. Gustavsen, Study of transformer resonant overvoltages caused by cable-transformer high-frequency interaction, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 25, no. 2, pp. 770-779, April 2010.
- [51] E. Styvaktakis, M. H. J. Bollen, I. Y. H. Gu, Expert system for classification and analysis of power system events, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 17, no. 2, pp. 423-428, April 2002.
- [52] <https://www.svk.se/om-kraftsystemet/om-transmissionsnatet/transmissionsnatetskarta>
- [53] Daphne Schwanz, On transfer functions for power quality studies in wind power and solar PV parks, *Doctoral thesis, Luleå University of Technology*, 2019.
- [54] N. Nakhodchi, M. H. J. Bollen, Including load impedance uncertainty in harmonic impedance seen from a low-voltage customer, *International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, Naples, Italy, 2022.
- [55] M. H. J. Bollen, G. Olguin, M. Martins, Voltage dips at the terminals of wind power installations. *Wind energy*, 8(3), 2005, 307-318.
- [56] J. Peng, H. Li, Z. Wang, Assessment on energization sequence for reducing sympathetic interaction between wind turbine transformers. *Wind Energy*, 18(12), 2015, 2121-2134.
- [57] A. Fouad, M. Elshahed, M. Sayed, M. Gilany, Harmonic resonance overvoltage due to main transformer energization in large wind farms, Zafarana, Egypt. *Ain Shams Engineering Journal*, 10(4), 2019, 731-743.
- [58] G. Singh, S. McGuinness, C. Miller, M. Stephens, M. McGranaghan, Effects of PV transformer energization on power quality. In *2018 18th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, 2018.
- [59] R. A. De Oliveira, M. Bollen, C. Chen, R. C. Leborgne, Evaluation of the DFIG-based wind turbine subjected to transformer-energizing voltage dips, *Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics (NORPIE)*, Narvik, Norway, 2019.
- [60] R. A. de Oliveira, C. Chen, M. H. J. Bollen, R. Chouhy Leborgne, Comparative analysis of transformer-energizing and fault-caused voltage dips on the dynamic behavior of DFIG-based wind turbines" *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT-Europe)*, The Hague, Netherlands, 2020.

- [61] R. A. de Oliveira, R. S. Salles, S. K. Rönnberg, M. P. de Carli, R. C. Leborgne, Harmonic anomalies due to geomagnetically induced currents as a potential cause of protection mal-trips at the south Atlantic anomaly area, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 39, no. 2, pp. 1124-1136, April 2024.
- [62] CIGRE JWG C4.110, Voltage dip immunity of equipment and installations, CIGRE TB 412, 2010.
- [63] S. Sakar, A. Bagheri, S. Rönnberg, M- Bollen, Susceptibility of LED street lamps to voltage dips. *Lighting Research & Technology*, 52(8), pp.1040-1056, 2020.

TRENDER I SPÄNNINGSDIPPAR OCH TRANSIENTER

Rapporten ger en kartläggning hur dippar och transienter påverkas av förändringar som ersätta luftledningar med kablar; svaga driftlägen i transmissionsnät; anslutning av moderna kraftelektroniska apparater till elnätet; och klimatförändring.

Det förväntas märkbara ändringar i spridning och det behövs ytterligare studier för att kunna kvantifiera detta och för att få mer insyn i dessa förändringar. Det förväntas också märkbara förändringar i immunitet av utrustning mot dippar och transienter. Det finns dock en stor brist på kunskapen om immunitet av modern utrustning mot dippar och transienter.

Ett nytt steg i energiforskningen

Forskningsföretaget Energiforsk initierar, samordnar och bedriver forskning och analys inom energiområdet samt sprider kunskap för att bidra till ett robust och hållbart energisystem. Energiforsk är ett politiskt neutralt och icke vinstutdelande aktiebolag som ägs av branschorganisationerna Energiföretagen Sverige och Energigas Sverige, det statliga affärsverket Svenska kraftnät, samt gas- och energiföretaget Nordion Energi.

Läs mer på energiforsk.se.

