

Rapport R20-1218-01

Konsekvenser av kablifiering i stamnätet

Elkvalitet, temporära överspänningar och interaktion

Oscar Lennerhag

Datum	2020-05-12
Mottagare	Robert Rogersten, Stefan Råström, Li Axrup – Svenska kraftnät
Kundens referens	983
Antal sidor	18
I ² G Projektnummer	1218
Författare	Oscar Lennerhag
Granskare	Jan Lundquist – Independent Insulation Group Robert Rogersten, Stefan Råström – Svenska kraftnät

Revisionshistorik

Datum	Revision	Beskrivning

Sammanfattning

Detta dokument beskriver möjliga konsekvenser vid kablifiering i stamnätet med avseende på elkvalitet, temporära överspänningar samt interaktion relaterad till kraftelektronik.

Erfarenheter från andra länder visar tydligt att införande av kablar i transmissionsnät medför tekniska risker. Vidare framgår att riskerna är svårbedömda och att en analys kräver ändamålsenliga nätmodeller och mätsystem som idag till stor del saknas.

Med dagens kunskap och verktyg går det därför inte att bedöma hur stor mängd kabel som kan introduceras i det svenska stamnätet med avseende på elkvalitet, överspänningar och interaktion. Arbete pågår dock inom Svenska kraftnät för att ge bättre förutsättningar för sådana analyser i framtiden.

Innehåll

Sammanfattning	3
Innehåll	4
1 Möjliga konsekvenser vid kablfiering i stamnätet	5
1.1 Elkvalitet	5
1.2 Temporära överspänningar	8
1.3 Interaktion	9
2 Erfarenheter från andra länder	10
2.1 Danmark	10
2.2 Nederländerna	10
2.3 Irland	11
2.4 Frankrike	11
3 Förutsättningar i Sverige	11
3.1 Modeller	12
3.2 Mätningar	12
4 Sammanfattning och slutsatser	12
5 Referenser	13

1 Möjliga konsekvenser vid kablifiering i transmissionsnät

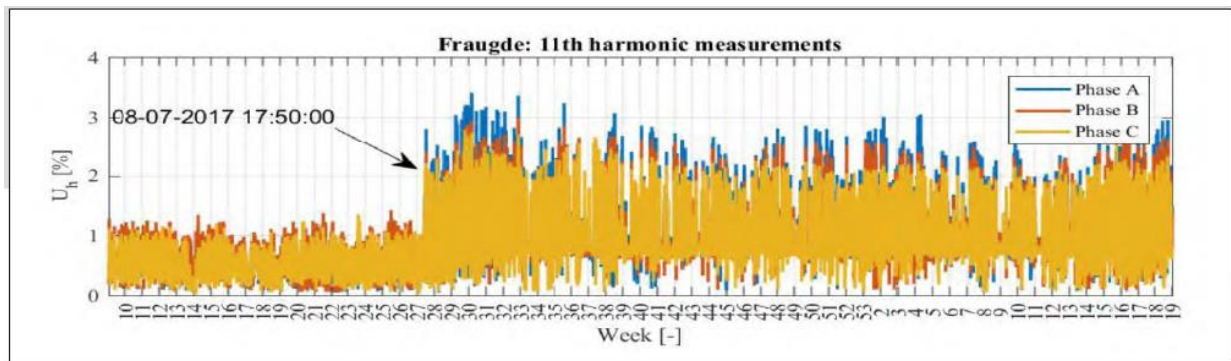
Detta dokument beskriver möjliga konsekvenser vid kablifiering i transmissionsnät med avseende på elkvalitet, temporära överspänningar samt interaktion relaterad till kraftelektronik.

1.1 Elkvalitet

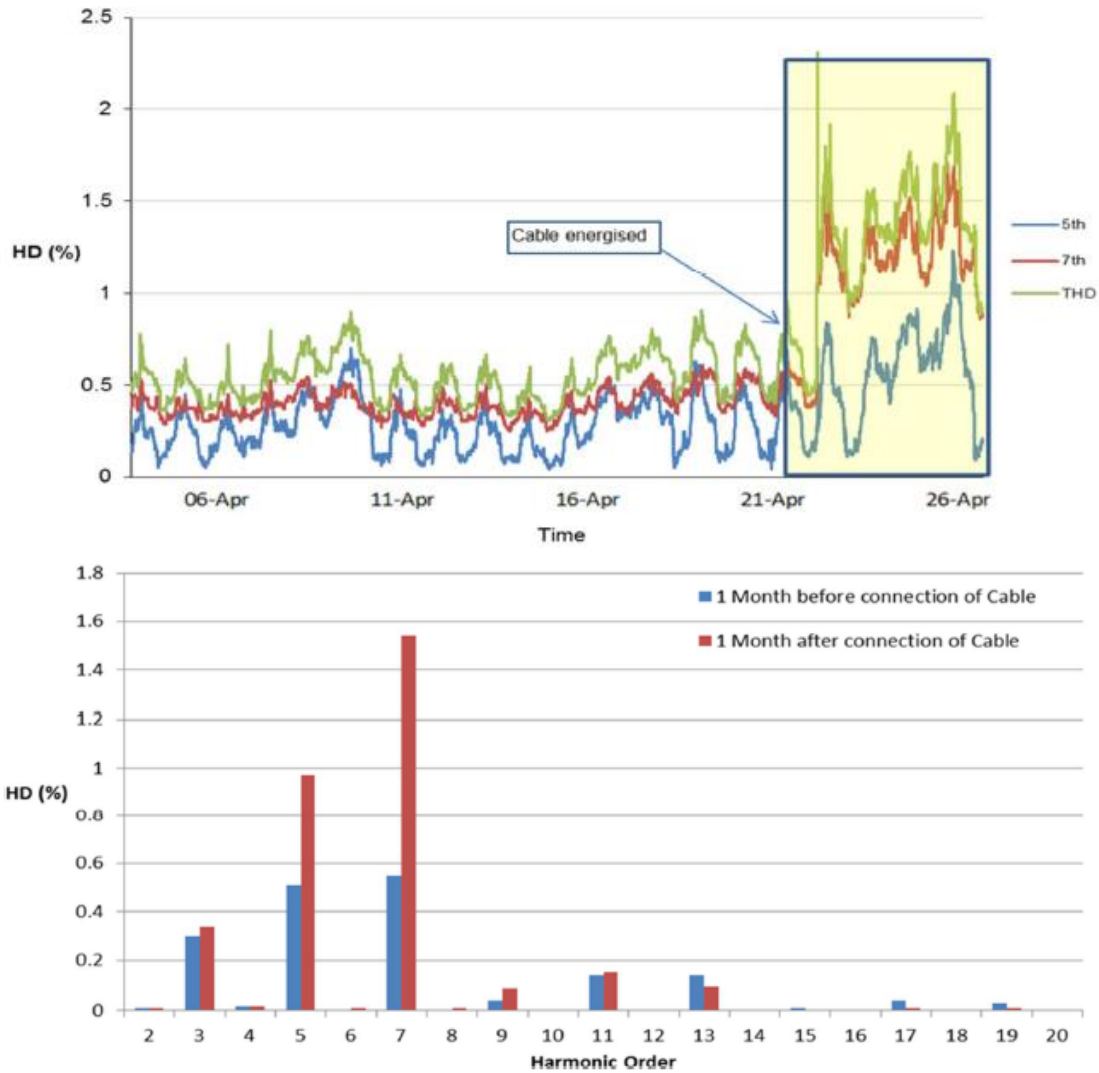
I ett växelströmsnät finns i varje punkt av nätet en frekvensberoende nätimpedans som i huvudsak bestäms av den induktans och kapacitans som kan beräknas eller uppmätas i punkten. Vid vissa frekvenser uppstår resonanser som gör att nätimpedansen förändras dramatiskt till att bli mycket lägre eller högre än vid övriga frekvenser. En resonans i nätimpedansen behöver dock inte innebära något problem så länge den inte sammanfaller med någon av nätets befintliga övertoner.

Nätimpedansen påverkas starkt av nätets sammansättning i form av andelen luftledning respektive kabel. Detta beror på att kablar karakteriseras av att kapacitansen är betydligt större än hos luftledningar. En konsekvens av en ökad andel kabel i transmissionsnätet är därför att nya resonanser introduceras, samt att de förekommande resonanserna skiftas mot lägre frekvenser, vilket ökar risken för att befintliga övertoner i ström och spänning förstärks [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10].

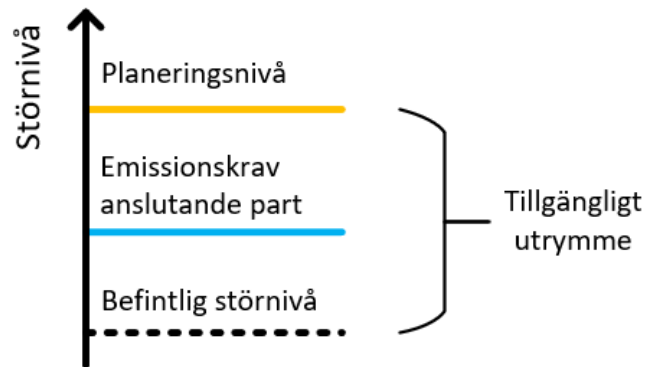
Några exempel på förstärkning av befintliga övertoner, efter idrifttagning av kablar, visas från Danmark [4] i Figur 1 och från Irland [8] i Figur 2. Då kabeln spänningssätts ökar kapacitansen i nätet vilket påverkar resonansförhållandena.



Figur 1. Förstärkning av 11:e ordningens överton efter idrifttagning av en 8 km lång 400 kV-kabel i Danmark [4].



Figur 2. Förstärkning av 5:e och 7:e ordningens övertoner efter idrifttagning av en 110 kV-kabel på Irland [8].



Figur 3. Exempel på gränser och nivåer som används vid tilldelning av störutrymme [11].

Svenska kraftnät ansvarar för att övertonsnivåerna i transmissionsnätet håller sig inom angivna gränser [12], [13]. För att åstadkomma detta tilldelas varje anslutande part en viss del av det utrymme som finns tillgängligt beroende på antagna planeringsnivåer och befintliga övertoner i nätet [11], se Figur 3. Ifall en anslutande part överskrider sin tilldelade emissionsnivå åligger det den anslutande parten att svara för/bekosta åtgärder för att reducera emissionsnivån till en acceptabel nivå.

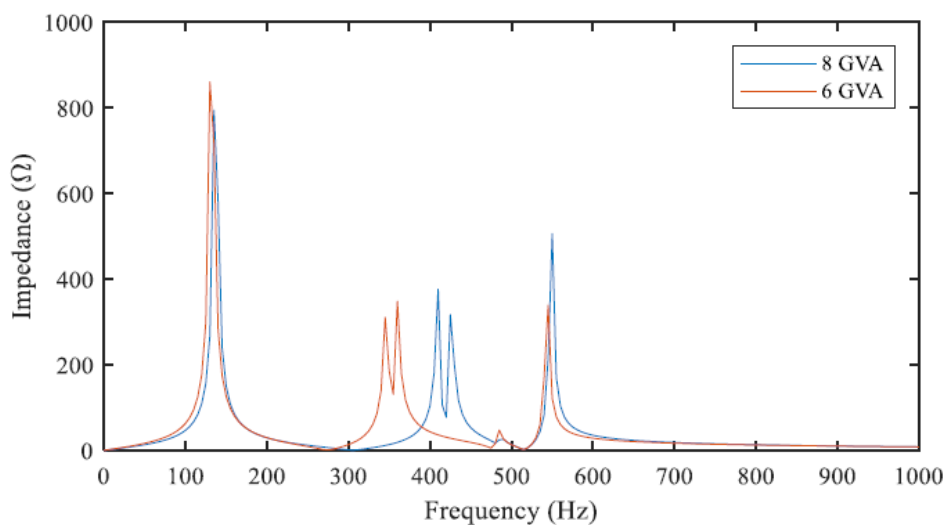
En förstärkning av befintliga övertoner i transmissionsnätet leder till en minskad marginal mellan planeringsnivåer och befintlig distorsion, vilket innebär att det finns mindre utrymme att tilldela nyanslutningar i framtiden [14].

Erfarenheter från Danmark visar att även relativt korta kablar kan påverka övertonsnivåerna i ett förhållandevis stort geografiskt område [14]. Resonanserna påverkar, och påverkas, dessutom av förhållandena i grannländerna.

Även förhållandevis låga övertonsnivåer i transmissionsnätet kan ge upphov till elkvalitetsproblem på lägre spänningsnivåer till följd av systemresonanser. Ett exempel från Danmark, där man anslöt en ö till fastlandet med kablar via en havsbaserad vindpark, beskrivs i [5]. Efter att anslutningen tagits i drift började nätföretaget på ön få in klagomål från kunder på ön, varför man genomförde en elkvalitetsmätning. I 400 kV-stationen på fastlandet uppmättes en spänningsdistorsion av 0,84% och 0,54% för 11:e respektive 13:e övertonen, vilka ligger under planeringsnivåerna. På ön uppmättes motsvarande övertonsnivåer till 16,7% respektive 9,4% som med stor marginal överskrider planeringsnivåerna. Man kom fram till att orsaken till de höga övertonsnivåerna var en förstärkning av den befintliga spänningsdistorsionen på 400 kV till följd av systemresonanser.

Även driftläggningen av nätet och produktionsanläggningarna påverkar resonansförhållandena [14], [15], [16], [17], [18]. Detta innebär att man måste studera ett stort antal driftläggningar för att bedöma inverkan av en ökad kablifiering.

Inverkan av kablifiering beror också på nätstyrkan i den aktuella punkten, där ett svagare nät ger lägre resonansfrekvenser [6], [9], [19]. Figuren nedan visar ett exempel på impedansprofiler för två nät med samma topologi men olika nätstyrka [9]. En framtida avveckling av kärnkraftverk kommer att påverka nätstyrkan och måste därför beaktas.



Figur 4. Impedansprofil vid olika nätstyrkor [9].

Anslutning av havsbaserad vindkraft görs typiskt med långa HVDC- eller HVAC-kablar. Om vindkraftsparken ansluts med en lång HVAC-kabel kan denna ha stor påverkan på resonansförhållandena i det övriga nätet, vilket kan leda till förstärkning av övertoner samt ökad risk för temporära överspänningar [3], [6], [7], [14], [19], [20], [21], [22], [23]. Detta innebär att man som en del av nätutbyggnaden inte enbart kan ta hänsyn till den mängd kabel som kan installeras i transmissionsnätet – framtida vindkraftsanslutningar [24] kommer också att leda till en ökad mängd kabel i nätet. På samma sätt kommer kabelfiering i regionnäten att påverka förhållandena i transmissionsnätet, och vice versa.

Även framtida HVDC-anläggningar kommer att påverka elkvaliteten genom såväl emission av övertoner som inverkan på resonansförhållandena i nätet [25].

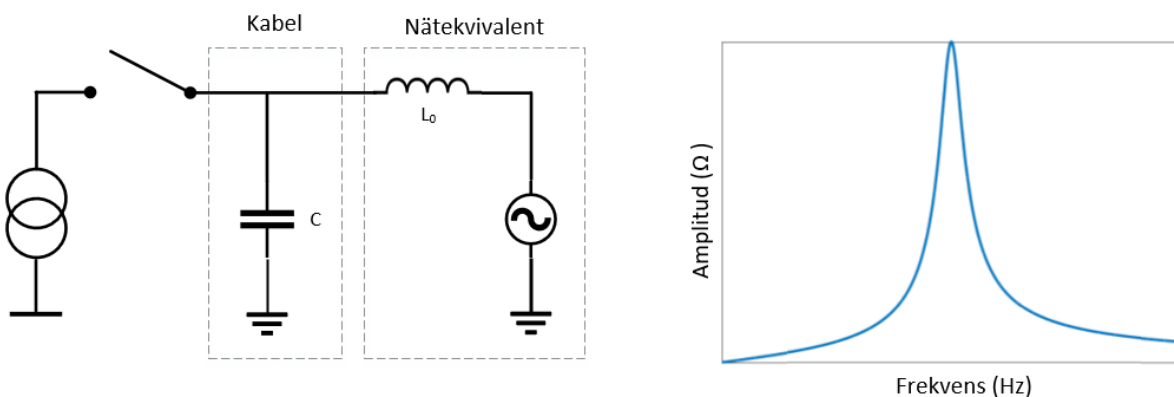
Utöver inverkan av eventuell kabelfiering förändras även lasterna i nätet genom energieffektivisering, småskalig produktion, nya datacenter, etc. Lasterna har stor inverkan på dämpningen av resonanser [17], [26], [27], [28] och en möjlig konsekvens av förändringarna ovan är, utöver förändringar i resonansfrekvenser, även minskad dämpning av resonanserna [1], [2], [9]. Kunskapen är begränsad vad gäller moderna lasters impedans vid övertonsfrekvenser, vilket leder till stora osäkerheter i studier av resonansfenomen i nätet.

Höga övertonsnivåer orsakade av resonanser kan till viss del hanteras med utbyggnad av filteranläggningar. Erfarenheter från Danmark visar dock att filter i huvudsak har en lokal inverkan i scenarier med stor andel kabel [14]. Eftersom en kabel kan påverka resonansförhållandena i ett stort geografiskt område konstaterar man vidare att antalet filteranläggningar som krävs ökar med mängden kabel i transmissionsnätet. Filter kan dessutom ge upphov till nya resonansfenomen och därigenom oavsiktliga förstärkningar av övertoner vid andra frekvenser.

För att kunna studera inverkan av kablar på elkvaliteten krävs ändamålsenliga nätmodeller och mätsystem [5], [6], [27], [29].

1.2 Temporära överspänningar

Temporära överspänningar (*eng. Temporary Overvoltages, TOV*) kan t.ex. uppstå vid jordfel, lastfrånkoppling eller som en konsekvens av resonanser, så kallade resonanta överspänningar. Ett exempel på hur resonanta överspänningar kan uppstå vid inkoppling av en transformator visas i figuren nedan [15], [17].



Figur 5. Exempel på parallellresonanskrets.

Kabelkapacitansen och nätinduktansen bildar tillsammans en parallellresonanskrets, vilken karaktäriseras av en hög impedans vid resonansfrekvensen. När transformatorn spänningssätts kommer den genom sina elektriska och magnetiska egenskaper att bete sig om en övertonsströmkälla där strömkomponenten vid 100 Hz dominerar, följt av komponenten vid 150 Hz. Om strömmens övertonsinnehåll sammanfaller med parallellresonansen kan detta leda till höga överspänningar med lång varaktighet [15], [17]. Jämfört med åsk- eller kopplingsöverspänningar sprids resonanta överspänningar vanligtvis till större delar av kraftsystemet, varför ett större antal komponenter påverkas [14], [15].

Dämpningen spelar stor roll för TOV:er eftersom det är impedansen vid resonansfrekvensen som tillsammans med övertonsströmmen bestämmer de resulterande överspänningarna.

Som en konsekvens av en ökad kablifiering i transmissionsnätet ökar också risken för resonanta överspänningar, eftersom kabelkapacitansen bidrar till att sänka resonansfrekvensen. Det finns ett flertal exempel i litteraturen där man rapporterat resonansfrekvenser i området 100-150 Hz [3], [7], [23], [30], [31], [32], även i Sverige [33].

Risken för resonanta överspänningar vid transformatorinkoppling kan minskas genom användning av synkroniserad inkoppling [17], [33], [34]. Synkroniseringen är dock av begränsad nytta vid fel (t.ex. åskfel på en närliggande ledning), eftersom den efterföljande felbortkopplingen i praktiken medför en okontrollerad spänningssättning av transformatorerna.

För att det ska uppstå allvarliga resonanta överspänningar orsakade av transformatorinkoppling eller felbortkoppling i närheten av transformatorer, krävs i regel en parallellresonans vid 100 eller 150 Hz. Det är därför möjligt att ange en gräns för mängden kabel som kan anslutas utan att risken för temporära överspänningar påverkas signifikant. För att en sådan bedömning ska kunna göras krävs dock ändamålsenliga nätmodeller som är lämpade för resonansanalys. Ändrad driftläggning (N-1-situationer, etc.) och andra förändringar i nätet (framtida anslutningar av havsbaserad vindkraft, lastens utveckling, avveckling av kärnkraft, etc.) som påverkar resonanserna måste också beaktas.

1.3 Interaktion

Moderna kraftsystem innehåller en ökande andel kraftelektronik, till exempel i form av HVDC-länkar och vindkraftparker. Kraftsystem innehållande en stor andel kraftelektronik har flera fördelar, men de innebär också en ökad komplexitet jämfört med traditionella kraftsystem.

Begreppet interaktion (*eng. harmonic stability*) syftar i detta dokument till interaktion mellan nätimpedansen (i form av resonanser) och olika typer av utrustning, eller mellan olika utrustningar. Ett välkänt exempel på interaktion är så kallad subsynkron resonans, vilket syftar till svängningar vid frekvenser under den synkrona frekvensen (50 Hz) [35], [36].

På grund av kontrollsystemets bandbredd kan modern kraftelektronik ge upphov till interaktion vid relativt höga frekvenser (hundratals Hz till ett flertal kHz), med höga övertonsnivåer eller instabilitet som konsekvens [8], [25], [37], [38], [39], [40], [41].

En ökad andel kabel leder till fler resonanser samt resonanser vid lägre frekvenser, vilket kan öka risken för interaktion [37], [41], [42].

För att kunna studera interaktion krävs ändamålsenliga analysmetoder och nätmodeller, samt detaljerade modeller av kraftelektronikbaserad utrustning [43], [29].

2 Erfarenheter från andra länder

Följande avsnitt sammanfattar erfarenheter från andra länder som har publicerat mycket information om konsekvenser av kablar på transmissionsnivå.

2.1 Danmark

I Danmark togs ett politiskt beslut 2008 gällande riktlinjer för kablifiering av stora delar av kraftsystemet [44]. Som skäl till beslutet nämns bland annat ökningen i antalet vindkraftparker, vilken ledde till ett stort behov av utbyggnad och förstärkning av nätet, samt opposition mot nya luftledningar. För att klara de utmaningar som en storskalig kablifiering innebär, valde man att starta forskningsprojektet DANPAC med ett flertal doktorander. Projektet syftade till att ta fram riktlinjer för ett kabelbaserat transmissionsnät, med hänsyn tagen till tekniska och ekonomiska förutsättningar.

Den danska transmissionsnätsoperatören Energinet.dk har tack vare framtagande av ändamålsenliga nätmodeller och mätsystem för övertonsmätningar goda förutsättningar för att genomföra analyser av elkvalitet med hänsyn till nya kabelinstallationer. Exempel på studier som publicerats är [5], [14], [45], [46], [47].

Nedan följer en kort sammanfattning av de danska erfarenheterna [14]:

- Även relativt korta kablar kan ha negativ inverkan på elkvaliteten i ett stort geografiskt område.
- Förstärkning av övertoner kan ändras drastiskt vid olika driftlägen.
- Att kablifiera stora delar av transmissionsnätet kan innebära en betydande risk för både befintliga och nya anläggningar i Danmark.
- En stor mängd kabel i ett visst område begränsar mängden kabel som kan anslutas på andra platser i systemet.
- Användning av 400 kV-markkablar måste utvärderas från ett systemperspektiv, eftersom det med dagens teknik endast är möjligt att ha en begränsad andel kabel i nätet. Följaktligen måste kablar användas på ett försiktigt sätt med hänsyn till framtida utvecklingar av nätet, som exempelvis anslutning av havsbaserad vindkraft eller framtida nätutbyggnader i närheten av städer eller naturskyddsområden. Det är således viktigt att enbart använda kablar där det är som mest nödvändigt.

2.2 Nederländerna

Den nederländska transmissionsnätsoperatören TenneT ser ett allt större behov av kablar i transmissionsnätet samtidigt som mängden havsbaserade vindkraftparker ökar. För att hantera de utmaningar som uppstår till följd av en större mängd kabel i transmissionsnätet har ett flertal studier genomförts, t.ex. [3], [20], [21], [22], [23], [26], [48], [49], [50], [51].

Det framgår av studierna att de långa AC-kablar som används för anslutning av havsbaserad vindkraft sänker resonansfrekvenserna i nätet (resonansfrekvenser omkring 100 Hz har noterats i sammankopplingspunkten), vilket ökar risken för temporära överspänningar och en förstärkning av befintliga övertoner [3], [23]. Man konstaterar att studier som behandlar förstärkning av övertoner samt risken för temporära överspänningar till följd av kabelprojekt eller anslutning av havsbaserad vindkraft måste genomföras som en del av planeringsprocessen [3], [21].

Referens [20] och [21] beskriver den metod som används av TenneT för att utvärdera risken för förstärkning av övertoner samt höga TOV:er till följd av anslutning av stora havsbaserade vindparker.

I syfte att genomföra denna typ av studier används en ändamålsenlig modell av det holländska kraftsystemet samt mätresultat från ett stort antal elkvalitetsmätare utplacerade i nätet.

2.3 Irland

Traditionellt har man inte haft nämnvärda elkvalitetsproblem i det irländska transmissionsnätet eftersom majoriteten av alla icke-linjära laster ansluts på distributionsnivå, samtidigt som transmissionsnätet i huvudsak består av luftledningar. På grund av en kombination av nya övertonskällor, t.ex. vindparker som ansluts till transmissionsnätet, samt en ökad andel kabel, finns risk för att planeringsnivåerna för övertoner överskrids. För att undersöka konsekvenserna av dessa förändringar har den irländska transmissionsnätsoperatören EirGrid genomfört ett flertal studier, t.ex. [6], [19], [30], [52].

I [30] undersöks hur stor andel kabel som skulle kunna installeras inom en 100 km lång sträcka som del av projektet Grid West. Som ett första alternativ undersöktes en lösning med 10 km 400 kV-kabel och 90 km luftledning. Det konstaterades att detta alternativ inte var genomförbart på grund av en signifikant risk för allvarliga temporära överspänningar. Kabel på 220 kV-nivån undersöktes också, och det konstaterades att detta skulle vara ett möjligt alternativ förutsatt att kabellängden på sträckan understiger 30 km. Förstärkning av övertoner beaktades inte i studien.

För att bedöma inverkan på elkvaliteten från planerade kabelinstallationer genomförs elkvalitetsmätningar på ett flertal platser i närheten av den framtida kabeln. Mätresultaten återskapas sedan i en detaljerad nätmodell som innefattar hela det irländska transmissionsnätet. Studier genomförs därefter för att bedöma inverkan av den nya kabeln vid anslutningspunkten samt på andra platser i nätet [6], [19]. Om planeringsnivåerna för övertoner överskrids så undersöks möjliga åtgärder, som till exempel filterinstallationer. För att kunna genomföra denna typ av studie krävs både ändamålsenliga nätmodeller samt en lämplig mätinfrastruktur.

2.4 Frankrike

Den franska transmissionsnätsoperatören RTE beslutade 2010 att ta fram en ändamålsenlig modell av hela det franska 400 kV-nätet i syfte att kunna studera framtida kabel-, HVDC- och FACTS-projekt [43], [29]. Exempel på studier som publicerats från Frankrike för att studera inverkan av AC-kablar är t.ex. [31], [32] och [53]. Utifrån dessa studier har man dragit slutsatsen att temporära överspänningar samt förstärkning av befintliga övertoner är svåra att förutse, och de måste därför studeras på planeringsstadiet.

RTE har gjort ett flertal studier avseende interaktion mellan HVDC-installationer och nätet, t.ex. [41], [43], [54], [55]. I detta syfte använder man dels detaljerade modeller, dels realtidssimulatorer tillsammans med kopior av de kontrollsystem som används i de faktiska installationerna [43]. Studierna har visat att det under vissa förutsättningar kan uppstå oönskad interaktion med oscillationer eller instabilitet som följd. Ett exempel presenteras i [43], där HVDC-länken INELFE mellan Frankrike och Spanien kopplades bort till följd av en interaktion mellan HVDC-installationen och det omgivande kraftsystemet.

3 Förutsättningar i Sverige

Även om man kan tillgodogöra sig en del av erfarenheterna från andra länder går det inte att generalisera hur stor andel kabel som ett transmissionsnät kan innehålla. Som exempel har Sverige och Danmark helt olika geografiska förutsättningar, och med tanke på de större avstånden i Sverige är luftledningar det naturliga teknikvalet med undantag för platser där det inte är möjligt att använda luftledningar, till exempel i storstadsområden. Sverige har inte heller haft samma utbyggnad av

havsbaserad vindkraft som t.ex. Danmark, Frankrike och Nederländerna. Sammantaget innebär detta att Sverige inte har haft samma behov av att kablifiera delar av transmissionsnätet, varför ändamålsenliga nätmodeller och mätinfrastruktur till stor del saknas.

På grund av framtida kabelprojekt i Stockholmsområdet, en ökad andel kraftelektronik samt ombyggnation av seriekondensatorer, pågår arbete inom Svenska kraftnät för att ta fram ändamålsenliga modeller och mätsystem.

3.1 Modeller

De modeller som man idag använder inom Svenska kraftnät för beräkningar av lastflöde, stabilitet och felströmmar är inte lämpade för resonansanalyser.

I syfte att säkra elförsörjningen kring Stockholm på längre sikt kommer transmissionsnätet i regionen att byggas ut. På grund av begränsade möjligheter till nybyggnation av luftledningar, samt önskemål att minska den befintliga mängden luftledningar i regionen i syfte att frigöra marken för annan användning, kommer nätutbyggnaden att innefatta ett flertal kabelförbindelser. Inom ramen för dessa kabelprojekt har en detaljerad nätmodell tagits fram för Stockholmsområdet i syfte att studera TOV:er till följd av låga resonansfrekvenser [33]. Motsvarande modeller för resterande delar av transmissionsnätet finns inte i dagsläget, men arbete pågår med att ta fram modeller för att kunna genomföra denna typ av studier i framtiden.

För att kunna genomföra övertonsstudier och interaktionsstudier krävs även ändamålsenliga modeller av HVDC-anläggningar och vindkraftparker. I dagsläget saknas i många fall sådana modeller, men avsikten är att Svenska kraftnät i framtiden ska ställa krav på leverans av ändamålsenliga modeller i samband med nya projekt. Sådana krav ingår t.ex. i den danska nätkoden [56].

3.2 Mätningar

Mätningar av transienter och övertoner behövs för validering av nätmodeller, samt för att bedöma långtidseffekter på elkvaliteten. Idag finns inte någon mätinfrastruktur som möjliggör storskalig mätning för dessa syften, och de spänningstransformatorer som vanligtvis används i transmissionsnätet idag är inte lämpade för mätning av övertoner eller transienter [57].

För att bedöma långtidseffekter, t.ex. med hänsyn till nätets utveckling samt förändringar av laster och generering, behövs mätningar över en längre tidsperiod.

Arbete pågår inom Svenska kraftnät för att i framtiden kunna utföra kvalificerade mätningar, t.ex. i syfte att kunna validera nätmodellerna.

4 Sammanfattning och slutsatser

Att med dagens förutsättningar kunna uppskatta den mängd kabel som kan introduceras i det svenska transmissionsnätet är svårt av följande skäl:

- Elkvalitetsproblem kan uppstå i ett relativt stort frekvensområde, och det kan räcka med en förhållandevis liten mängd kabel för att skifta en resonans på så sätt att befintliga övertoner förstärks. En förstärkning av övertoner kan göra det svårare för nyanslutningar i framtiden.
- Olika driftlägen har stor inverkan på resonansförhållanden i nätet och måste beaktas vid studier.
- Även förhållandevis korta kablar kan ha inverkan på resonanser i ett stort geografiskt område.

- Kablifieringar i det svenska transmissionsnätet kan påverka resonansförhållanden i våra grannländer, vilket också bör beaktas. På samma sätt påverkas Sverige av kablifieringar i våra grannländer.
- Kvalificerade analyser av övertoner/resonanser kräver ändamålsenliga nätmodeller som till stor del saknas idag. För att bedöma hur våra grannländer påverkar, och påverkas, krävs dessutom ändamålsenliga nätmodeller av deras nät.
- Ändamålsenliga elkvalitetsmätningar behövs i syfte att verifiera modeller och bevaka långtidseffekter. I dag saknas förutsättningar för att genomföra sådana mätningar i stor skala.
- Mängden kabel som kan introduceras i transmissionsnätet beror även på utvecklingen i övriga delar av nätet, t.ex. förändringar i laster, tillkommande förnybara energikällor och HVDC-anläggningar, utvecklingen i regionnäten samt avveckling av kärnkraftverk.
- Resonansproblem kan till viss del hanteras med filteranläggningar. Filter kan dock ge upphov till nya resonansfenomen och därigenom oavsiktliga förstärkningar av övertoner vid andra frekvenser. För att kunna bedöma inverkan av filter krävs ändamålsenliga nätmodeller.
- Med mer kabel i nätet blir resonansförhållandena mer komplexa vilket kan öka risken för interaktion.
- För att studera interaktion krävs detaljerade modeller av kraftelektronikbaserad utrustning, samt ändamålsenliga nätmodeller.

Erfarenheter från andra länder visar tydligt att införande av kablar i transmissionsnät medför tekniska risker. Vidare framgår att riskerna är svårbedömda och att en analys kräver ändamålsenliga nätmodeller och mätsystem. Med dagens kunskap och verktyg går det därför inte att bedöma hur stor mängd kabel som kan introduceras i det svenska transmissionsnätet med avseende på elkvalitet, överspänningar och interaktion. Arbete pågår dock inom Svenska kraftnät för att ge bättre förutsättningar för sådana analyser i framtiden.

5 Referenser

- [1] S. Rönnberg och M. Bollen, "Power quality issues in the electric power system of the future," *The Electricity Journal*, vol. 29, pp. 49-61, 2016.
- [2] S. Rönnberg, M. H. J. Bollen, R. Langella, F. Zavoda, J.-P. Hasler, P. Ciufu, V. Cuk och J. Meyer, "The expected impact of four major changes in the grid on the power quality – a review," *Cigre Science & Engineering*, vol. 8, pp. 5-13, 2017.
- [3] K. Jansen, B. Van Hulst, C. Engelbrecht, P. Heslen, K. Velitsikakis och C. Lakenbrink, "Resonances due to Long HVAC Offshore Cable Connections: Studies to verify the Immunity of Dutch Transmission network," i *IEEE PowerTech*, Eindhoven, 2015.
- [4] C. F. Flytkjaer, B. Badrzadeh, M. Bollen, Z. Emin, L. Kocewiak, G. Lietz, S. Perera, F. F. Da Silva och M. Val Escudero, "Power Quality Trends in the Transition to Carbon-Free Electrical Energy System," *CIGRE Science & Engineering*, vol. 17, pp. 21-29, 2020.
- [5] C. Flytkjaer Jensen, "Harmonic background amplification in long asymmetrical high voltage cable systems," *Electric Power Systems Research*, vol. 160, pp. 292-299, 2018.

- [6] M. Val Escudero, A. Martin, L. Fisher och I. Dudurych, "Technical challenges associated with the integration of long HVAC cables and inverter based renewable generation in weak transmission networks: The Irish experience," i *CIGRE Session*, Paris, 2018.
- [7] M. H. J. Bollen, S. Mousavi-Gargari and S. Bahramirad, "Harmonic resonances due to transmission-system cables," in *International Conference on Renewable Energies and Power Quality*, Cordoba, 2014.
- [8] J. Kilter et al., "MIGRATE - Critical PQ phenomena and sources of PQ disturbances in PE rich power systems," 2016.
- [9] O. Lennerhag och M. Bollen, "Power system impacts of decreasing resonance frequencies," i *International Conference on Harmonics and Quality of Power*, Ljubljana, 2018.
- [10] C. F. Jensen, L. H. Kocewiak och Z. Emin, "Amplification of Harmonic Background Distortion in Wind Power Plants with Long High Voltage Connections," i *CIGRE Session*, Paris, 2016.
- [11] M. Häger och M. Bollen, "Elforsk rapport 10:06 - Fördelning av störutrymme," 2010.
- [12] Svenska kraftnät, "TR06-01: Tekniska riktlinjer för elkvalitet - Del 1: Spänningens egenskaper i stamnätet," 2006-01-03.
- [13] Svenska kraftnät, "TR06-02: Tekniska riktlinjer för elkvalitet - Del 2: Planerings- och emissionsnivåer, mätmetoder och ansvarsfördelning avseende elkvalitet i stamnätet," 2006-01-03.
- [14] Energinet.dk, "Technical issues related to new transmission lines in Denmark," 2018.
- [15] CIGRE WG C4.502, "TB 556 - Power System Technical Performance Issues Related to the Application of Long HVAC Cables," CIGRE, Paris, 2013.
- [16] IEEE PES Wind Plant Collector System Design Working Group, "Harmonics and Resonance Issues in Wind Power Plants," IEEE, 2011.
- [17] O. Lennerhag och M. Bollen, "Impact of Uncertainties on Resonant Overvoltages," i *International Conference on Power Systems Transients*, Perpignan, 2019.
- [18] M. Bollen, S. Aceby, H. Jansson och M. Jonsson, "Using transfer impedances to study harmonic resonances due to AC cables in a transmission system," i *CIGRE Symposium*, Lund, 2015.
- [19] M. Val Escudero, S. Murray, J. Ging, B. Kelly och M. Norton, "Harmonic Analysis of Wind Farm Clusters Using HV-AC Underground Cables in the Irish Transmission Network," i *CIGRE Session*, Paris, 2014.
- [20] R. de Groot, F. van Erp, K. Jansen, J. van Waes, M. Hap och L. Thielman, "Method for Harmonic and TOV Connection Impact Assessment of Offshore Wind Power Plants - Part I: Harmonic distortion," i *Wind Integration Workshop*, Stockholm, 2018.
- [21] K. Jansen, R. de Groot, B. Hulst, K. Velitsikakis och C. Engelbrecht, "Method for Harmonic and TOV Connection Impact Assessment of Offshore Wind Power Plants - Part II: Impact Assessment," i *Wind Integration Workshop*, Stockholm, 2018.

- [22] K. Velitsikakis och C. Engelbrecht, "Proposed Method for Evaluating Temporary Overvoltages in Transmission Systems due to Low Harmonic Order Resonances," i *CIGRE Symposium*, Dublin, 2017.
- [23] K. Velitsikakis, N. Papazacharopoulos, C. Engelbrecht och K. Jansen, "Future Offshore Grid Connections via Long HVAC Cables: Impact Study to the 400-kV Dutch Transmission System," i *EEUG Meeting*, Birmingham, 2016.
- [24] Svensk vindenergi, "100 procent förnybart 2040 - Vindkraft för klimatnytta och konkurrenskraft," Oktober 2019.
- [25] CIGRE WG B4.67, "AC side harmonics and appropriate harmonic limits for VSC HVDC," CIGRE, Paris, 2019.
- [26] F. Barakou, M. Bollen, S. Mousavi-Gargari, O. Lennerhag, P. Wouters och E. Steennis, "Impact of load modeling on the harmonic impedance seen from the transmission network," i *International Conference on Harmonics and Quality of Power*, Belo Horizonte, 2016.
- [27] CIGRE JWG C4/B4.38, "TB 766 - Network Modelling for Harmonic Studies," CIGRE, Paris, 2019.
- [28] J. Arrillaga och N. R. Watson, *Power System Harmonics*, second edition, Chichester: Wiley, 2003.
- [29] S. Denetière, A. Parisot, E. Milin och A. Dalmau Pons, "Resonance and insertion studies with EMTP: Working with large scale network models," i *International Conference on Power Systems Transients*, Delft, 2011.
- [30] N. Cunniffe, M. Val Escudero, A. Mansoldo, E. Fagan, M. Norton och C. Ellis, "Investigating the Methodology and Implications of Implementing Long HVAC Cables in the Ireland and Northern Ireland Power System," i *CIGRE Session*, Paris, 2016.
- [31] Y. Fillion och S. Deschanvres, "Background harmonic amplifications within offshore wind farm connection projects," i *International Conference on Power Systems Transients*, Cavtat, 2015.
- [32] Y. Vernay, S. Deschanvres och Y. Fillion, "RTE experiences with the insertion of long EHVAC insulated cables," i *CIGRE Session*, Paris, 2014.
- [33] O. Lennerhag, R. Rogersten och S. Råström, "A Parallel Resonance Investigation in Stockholm's Future Cablified Transmission Grid: A Prospective Study on Transformer Energization," i *IEEE Transmission & Distribution*, Chicago, 2020.
- [34] CIGRE WG A3.07, "TB 263 - Controlled Switching of HVAC Circuit Breakers - Guidance for further applications including unloaded transformer switching, load and fault interruption and circuit breaker uprating," CIGRE, Paris, 2004.
- [35] J. W. Ballance och S. Goldberg, "Subsynchronous resonance in series compensated transmission lines," i *IEEE PES Winter Meeting*, New York, 1983.
- [36] M. Bahrman, E. Larsen, R. Piwko och H. Patel, "Experience with HVDC-Turbine-Generator Torsional Interaction at Square Butte," *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, Vol. %1 av %2PAS-99, nr 3, pp. 966-975, 1980.

- [37] X. Wang, F. Blaabjerg och W. Wu, "Modeling and Analysis of Harmonic Stability in an AC Power-Electronics-Based Power System," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 29, nr 12, pp. 6421-6432, 2014.
- [38] C. Yoon, H. Bai, R. Narcis Beres, X. Wang, C. Leth Bak och F. Blaabjerg, "Harmonic Stability Assessment for Multiparalleled, Grid-Connected Inverters," *IEEE Trans. on Sustainable Energy*, vol. 7, nr 4, pp. 1388-1397, 2016.
- [39] X. Wang och F. Blaabjerg, "Harmonic Stability in Power Electronic-Based Power Systems: Concept, Modeling, and Analysis," *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 10, nr 3, pp. 2858-2870, 2019.
- [40] C. Buchhagen, C. Rauscher, A. Menze och J. Jung, "BorWin1 – First Experiences with harmonic interactions in converter dominated grids," i *International ETG Congress*, Bonn, 2015.
- [41] H. Saad och Y. Fillion, "Analysis of Harmonics and Resonances in HVDC-MMC Link Connected to AC grid," i *International Conference on Power Systems Transients*, Seoul, 2017.
- [42] L. Kocewiak, J. Hjerrild och C. Leth Bak, "Wind turbine converter control interaction with complex wind farm systems," *IET Renewable Power Generation*, nr Special Issue: European Wind Energy Association 2012, pp. 1-10, 2012.
- [43] S. Dennetiere, H. Saad, Y. Vernay, P. Rault, C. Martin och B. Clerc, "Supporting Energy Transition in Transmission Systems," *IEEE power & energy magazine*, pp. 48-60, 2019.
- [44] Energinet.dk, "Danish Cable Policy," 2014.
- [45] W. Wiechowski och P. Borre Eriksen, "Selected Studies on Offshore Wind Farm Cable Connections - Challenges and Experience of the Danish TSO," i *2008 IEEE PES General Meeting*, Pittsburgh, 2008.
- [46] C. Leth Bak och F. da Silva, "High voltage AC underground cable systems for power transmission – a review of the danish experience, part 1," *Electric Power Systems Research*, vol. 140, pp. 984-994, 2016.
- [47] C. Leth Bak och F. da Silva, "High voltage AC underground cable systems for power transmission – A review of the Danish experience, part 2," *Electric Power Systems Research*, vol. 140, pp. 995-1004, 2016.
- [48] H. Khalilnezhad, M. Popov, L. van der Sluis, J. de Jong, N. Nenadovic och J. Bos, "Assessment of Line Energization Transients when Increasing Cable Length in 380 kV Power Grids," i *International Conference on Power Systems Technology*, Wollongong, 2016.
- [49] L. Wu, "Impact of EHV/HV Underground Power Cables on Resonant Grid Behavior," Eindhoven University of Technology, 2014.
- [50] H. Khalilnezhad, M. Popov och L. van der Sluis, "Influence of Long EHV AC Underground Cables on the Resonance Behavior of the Dutch Transmission System," i *IEEE PES General Meeting*, Boston, 2016.
- [51] F. Barakou, A. Pistaris, P. Wouters och E. Steennis, "Study of series resonance overvoltage at LV side of transmission transformer during EHV cable energization," i *International Conference on Power Systems Transients*, Seoul, 2017.

- [52] TEPCO, "Assessment of the Technical Issues relating to Significant Amounts of EHV Underground Cable in the All-island Electricity Transmission System," 2009.
- [53] Y. Vernay, J. Dufour och J.-P. Taisne, "Electrical studies performed to insert long AC cables in the French grid - first conclusions," i *International Conference on Insulated Power Cables*, Versailles, 2011.
- [54] H. Saad, A. Schwob och Y. Vernay, "Study of Resonance Issues between HVDC link and Power System Components using EMT Simulations," i *Power Systems Computation Conference*, Dublin, 2018.
- [55] H. Saad, Y. Fillion, S. Deschanvres, Y. Vernay och S. Dennetiere, "On Resonances and Harmonics in HVDC-MMC Station Connected to AC Grid," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 32, nr 3, pp. 1565-1573, 2017.
- [56] Energinet.dk, "Requirements for generators - Simulation model requirements," 2018.
- [57] "IEC/TR 61869-103 - Instrument transformers – The use of instrument transformers for power quality measurement," Ed. 1.0, 2012.

Om författaren

Oscar Lennerhag har en civilingenjörsexamen i elkraftsystem från Chalmers. Efter examen arbetade han ett flertal år på STRI, bland annat med frågor som rör elkvalitet (mätningar och analys samt modellering och simuleringar). Sedan 2017 arbetar han som specialist på Independent Insulation Group, med fokus på transientberäkningar (däribland temporära överspänningar till följd av resonanser i system med långa kablar) och spridning av övertoner. Oscar genomför även en industridoktorering i samarbete med Luleå Tekniska Universitet där han tar fram matematiska modeller som kan hantera ett stort antal osäkerheter, applicerat på spridning av övertoner och temporära överspänningar.

Oscar har publicerat ett flertal tekniska artiklar om elkvalitet och temporära överspänningar, och han har även skrivit ett kapitel om elkvalitet i boken *Springer Handbook of Power Systems*.

Oscar är eller har varit medlem i följande CIGRE-arbetsgrupper:

- CIGRE JOINT WORKING GROUP C4/B4.38 – Network Modelling for Harmonic Studies
- CIGRE WORKING GROUP C4.46 – Evaluation of TOVs in Power Systems due to Low Order Harmonic Resonances
- CIGRE WORKING GROUP C4.48 – Overvoltage Withstand Characteristics of Power System Equipment 35-1200 kV
- CIGRE JOINT WORKING GROUP B1/C4.69 – Recommendations for the insulation coordination on AC cable systems

Om I²G

Independent Insulation Group är ett oberoende konsultbolag som tillhandahåller tjänster inom elkraftsystem och högspänningsteknik. Företaget grundades av sex tidigare STRI-anställda. Huvudkontoret ligger i Ludvika och företaget finns även i Göteborg, Gävle och Vadstena.