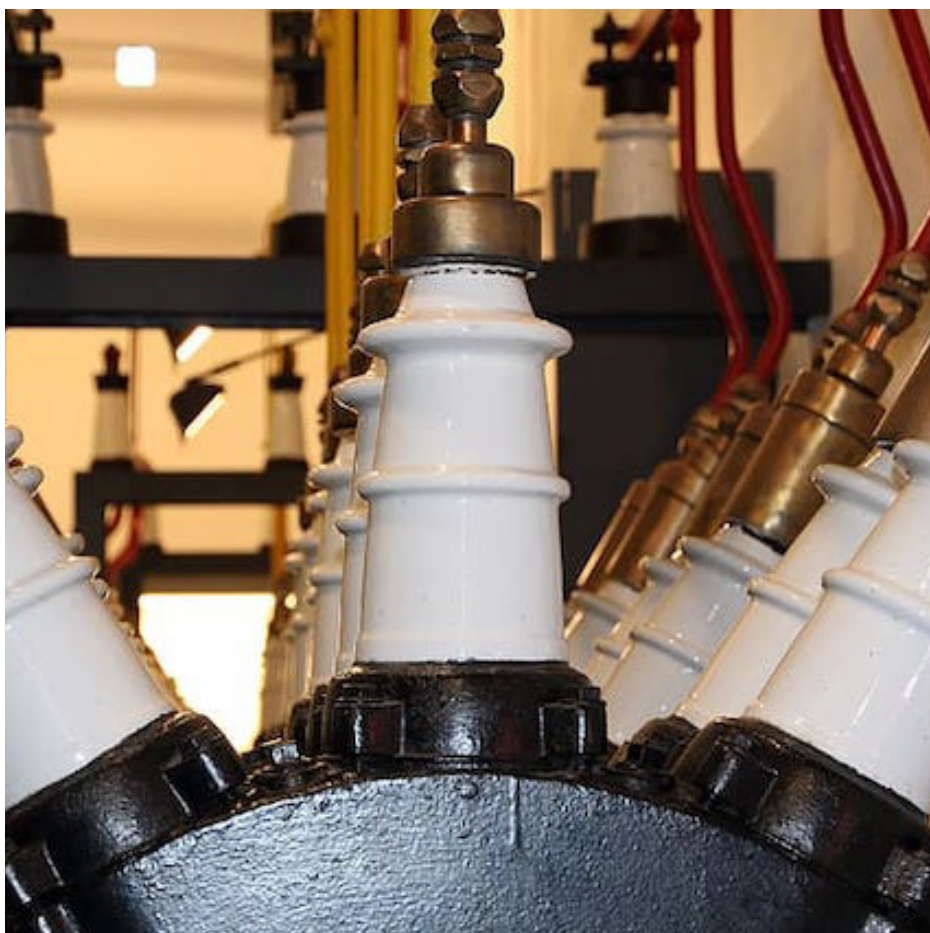


SUPRATONERS PÅVERKAN PÅ KABELAVSLUT

RAPPORT 2020:673



Supratoners påverkan på kabelavslut

ANGELA ESPIN-DELGADO, SARAH RÖNNBERG, SHIMI SUDHA LETHA & MATH BOLLEN

ISBN 978-91-7673-673-9 | © Energiforsk maj 2020

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

Förord

Övertoner i frekvensområdet 2 kHz till 150 kHz, så kallade supratoner, är ett relativt outforskat område och det finns kunskapsluckor kring hur de påverkar olika delar av kraftsystemet. I detta projekt har deras påverkan på kabelavslut analyserats närmare, och det har visat sig att supratoner kan ha en negativ inverkan på kabelavslut. En metod har utvecklats för att ge elnätsägare en möjlighet att göra en första riskbedömning av supratonernas inverkan på kabelavslut.

Projektet har genomförts inom ramen för Energiforsks industriforskningsprogram Underhåll av elnät, och referenspersoner från programmets styrgrupp har varit

- Robert Saers, ABB

Programmet Underhåll av elnät finansieras av ABB, Bodens Energi Nät, Borås Energi Nät, C4 Elnät, Ellevio, Eskilstuna Energi & Miljö, Falu Energi & Vatten, Göteborg Energi, Elinorr Ekonomisk förening som består av 16 elnätsföretag, E.ON Energidistribution, Jämtkraft Elnät, Jönköping Energi Nät, Karlstads El- och Stadsnät, Kraftringen Elnät, Luleå Energi, Skellefteå Kraft Elnät, Kungälv Energi, Mälarenergi Elnät, Nacka Energi, Svenska kraftnät, Tekniska verken i Linköping, Pite Energi, Umeå Energi Elnät, Vattenfall Eldistribution och Öresundskraft.

Lennart Kjellman,
Programansvarig Underhåll av elnät
Stockholm 18 maj 2020

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

Sammanfattning

Rapporten innehåller en studie över hur frekvenskomponenter i frekvensområdet mellan 2 och 150 kHz (supratoner) negativt kan påverka kabelavslut med resistiv fältstyrning. Resultaten visar att påverkan har både ett frekvens- och amplitudberoende och en metod har tagits fram för att kunna göra en första bedömning av risken. Metoden utgår från befintliga modeller som förenklats så att de kan användas som ett första steg i en riskbedömning. Ett förslag för en prestandaindikator, Q_{SH} , har tagits fram tillsammans med möjliga gränsvärden beroende på hur konservativ man väljer att vara. En förutsättning för att höga nivåer av supratoner ska uppstå i ett mellanspänningsnät är förekomsten av resonanser vid en frekvens där det finns supratonsemission. En detaljerad studie över ett befintligt mellanspänningsnät visar att sannolikheten för resonanser i detta frekvensområde är stor.

Summary

This report includes a study on how frequency components in the frequency range between 2 and 150 kHz (supraharmonics) can negatively affect cable termination with resistive field grading. The results show that the impact has both a frequency and amplitude dependence and a method has been developed to allow an initial assessment of the risk. The method is based on existing models that have been simplified so that they can be used as a first step in a risk assessment. A proposal for a performance indicator, Q_{SH} , has been developed together with possible limit values depending on how conservative one chooses to be. A prerequisite for high levels of supraharmonics to occur in a medium voltage network is the presence of resonances at a frequency where there is supraharmonic emission. A detailed study of an existing medium-voltage network shows that the probability of resonances in this frequency range is high.

Innehåll

1	Inledning	7
2	Supratoner	8
3	Resonanser i mellanspänningsnät	9
4	Påverkan på kabelavslut	16
4.1	Eagle Pass	17
4.2	Övriga dokumenterade fall, 2004–2019	18
5	Indikatorer och riskbedömning	20
5.1	Multipla frekvenskomponenter	24
6	Utmaningar för mätning av supratoner på mellanspänning	27
7	Slutsatser	29
8	Referenser	30

1 Inledning

Det finns starka indikationer på att höga nivåer av spänningsdistorsion i kHz-området (supratoner, eng. supraharmonics) leder till accelererad åldring av kabelavslut i mellan och högspänningsnät. Problemen med HVDC anläggningen vid Eagle Pass på gränsen mellan Mexiko och US är väldokumenterade [1] och har resulterat i en del följdstudier [2,3,4]. Problematiken vid Eagle Pass var relaterad till typen av fältstyrning i kabelavslut och skarvar.

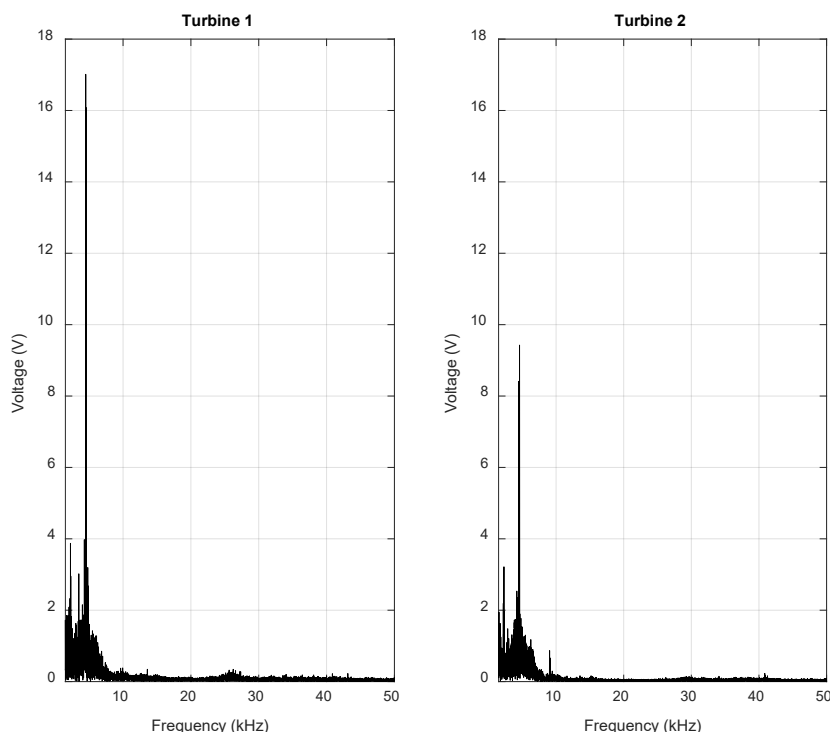
Emission av supratoner är dock inte begränsad till HVDC anläggningar. Numera finns spänningsstyva omriktare vid högfrekvent koppling på många ställen i nätet, även direktanslutna till hög- och mellanspänningsnät [5].

Vindkraftparker och stora solkraftparker anslutna till högre spänningsnivåer är källor till supratoner [6, 7] och deras emission kommer att injiceras direkt till mellan- eller högspänningsnätet. Utrustning som exempelvis elbilsaddare, växelriktare, värmepumpar är kända källor till supratoner på lågspänningsnät och på denna spänningsnivå finns också elnätskommunikation i detta frekvensområde [8]. Höga nivåer av supratoner på lågspänningsnäten kan spridas till mellanspänning.

Även om fenomenet att supratoner negativt kan påverka kabelavslut är känt så saknas en metod att kunna avgöra om och när det finns en förhöjd risk att detta inträffar. Det saknas kunskap kring förväntade nivåer av supratoner på mellanspänningsnät och det saknas också kunskap kring vilka nivåer som krävs och under vilka förutsättningar supratoner kan innebära en risk.

2 Supratoner

Supratoner (eng. supraharmonics) är distorsion av spänningen eller strömmens kurvform i frekvensområdet 2 till 150 kHz, dvs över (lat. supra) det frekvensområde som normalt definieras som övertoner. Supratoner har sitt ursprung i kraftelektronik med switchade nätdelar (oavsiktlig emission) och elnätssamfund (avsiktliga emission). Allt fler apparater och utrustning ansluten till låg och mellanspänning är källor till supratoner och denna typ av störning får allt mer uppmärksamhet av både industri och akademi [8, 9, 10, 11]. Typiska källor till supratoner på mellanspänningen är vindkraftturbiner [12], solkraft [13], statiska frekvensomriktare [10] och spänningsstyva omriktare i till exempel en Statcom (SVC Light). Källor anslutna till högspänningsnät är spänningsstyv HVDC (VSC-HVDC eller HVDC-light), kraftelektronik för att styra effektflöden (FACTS) och stora vindparker. [1]. Emissionen från denna typ av utrustning kan bestå av flera frekvenskomponenter inom supratonsområdet 2 till 150 kHz. Supratoner uppmätta vid anslutningspunkten av två olika turbiner (2.5 MW, 20 kV) inom samma vindkraftpark visas i Figur 1. Den högsta magnituden, 17 V vid turbin 1, ses vid 4,5 kHz, en smalbandig komponent ses också vid 2,2 kHz samt ett mer bredbandigt spektrum upp till cirka 10 kHz. I [10] rapporteras nivåer på 400 V vid 2 kHz i ett 70 kV nät och det beskrivs i bland annat [11] att supratoner kan spridas så långt som 16 km i ett mellanspänningsnät.



Figur 1 Supratoner i spänningen uppmätt fas-jord vid anslutningspunkten av två turbiner inom samma vindkraftpark

3 Resonanser i mellanspänningsnät

För att höga amplituder av supratoner ska uppstå i ett mellanspänningsnät så krävs att befintlig emission amplifieras av en resonans. För att avgöra hur sannolikt det är att resonanser uppstår i frekvensområdet 2 till 150 kHz har ett verkligt mellanspänningsnät studerats. Nätet består av en 33/11 kV transformator som matar 8 utgående ledare enligt Tabell 1.

Tabell 1 Detaljer över det studerade mellanspänningsnätet

Ledare	Kabellängd (km)	Antal transformatorer	Antal kunder
Ledare A	3,790	7	Hushåll 115 Industri 1
Ledare B	6,7663	4	114
Ledare C	5,0894	7	272
Ledare D	29,5824	25	313
Ledare E	4,445	8	332
Ledare F	20,0559	18	213
Ledare G	2,2002	6	275
Ledare H	39,5786	33	345

Den längsta sektionen i Ledare C är 0,4078 km lång med en kapacitans på 0,12 μF och en induktans på 0,12 mH. Resonansfrekvensen för den sektionen av kabeln är 42 kHz. Modellen med koncentrerade (50 Hz) värden för induktans och kapacitans kan användas för frekvenser upp till en fjärdedel av detta, 10 kHz i detta fall. Det visar att man behöver använda en modell med fördelade parametrar om man vill studera spridning av supratoner (med frekvensen upp till 150 kHz). Modellen som har utvecklats i Matlab och använts för simuleringarna har fördelade parametrar för induktans och kapacitans, dock koncentrerade resistanser som representerar dämpningen. Modellen är liknade som basmodellen i det brett används i beräkningsprogrammet ATP/EMTP: Den karakteristiska impedansen, vågutbredningshastighet och fördröjning ges av ekvation (3.1), (3.2) och (3.3)

$$Z_c = \sqrt{\frac{l}{c}} \quad (3.1)$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{lc}} \quad (3.2)$$

$$\tau = \frac{d}{v} \quad (3.3)$$

Där l och c är induktans och kapacitans per längdenhet, d är ledarens längd och v är utbredningshastighet. En förlustfri ledare med fördelade komponentvärden kombineras med koncentrerade resistanser. Beräkningar av den förlustfria ledningen görs enligt ekvationer (3.4) till (3.9):

$$e_r(t) - Z_c i_r(t) = e_s(t - \tau) + Z_c i_s(t - \tau) \quad (3.4)$$

$$e_s(t) - Z_c i_s(t) = e_r(t - \tau) + Z_c i_r(t - \tau) \quad (3.5)$$

där,

$$i_s(t) = \frac{e_s(t)}{Z} - I_{sh}(t) \quad (3.6)$$

$$i_r(t) = \frac{e_r(t)}{Z} - I_{rh}(t) \quad (3.7)$$

$$i_{sh}(t) = \frac{Z}{Z_c} e_r(t - \tau) - I_{rh}(t - \tau) \quad (3.8)$$

$$i_{rh}(t) = \frac{Z}{Z_c} e_s(t - \tau) - I_{sh}(t - \tau) \quad (3.9)$$

När förluster beaktas löses i_{sh} och i_{rh} genom att anta $\frac{R}{4}$ vid början och slutet av ledaren och $\frac{R}{2}$ i mitten. Den totala resistansen beräknas från resistans per längdenhet:

$$R = r \cdot d \quad (3.10)$$

Strömkällorna I_{sh} och I_{rh} kan då beräknas enligt::

$$i_{sh}(t) = \left(\frac{1+h}{2}\right) \left(\frac{1+h}{2} e_r(t - \tau) - h I_{rh}(t - \tau)\right) + \left(\frac{1+h}{2}\right) \left(\frac{1+h}{2} e_s(t - \tau) - h I_{sh}(t - \tau)\right) \quad (3.11)$$

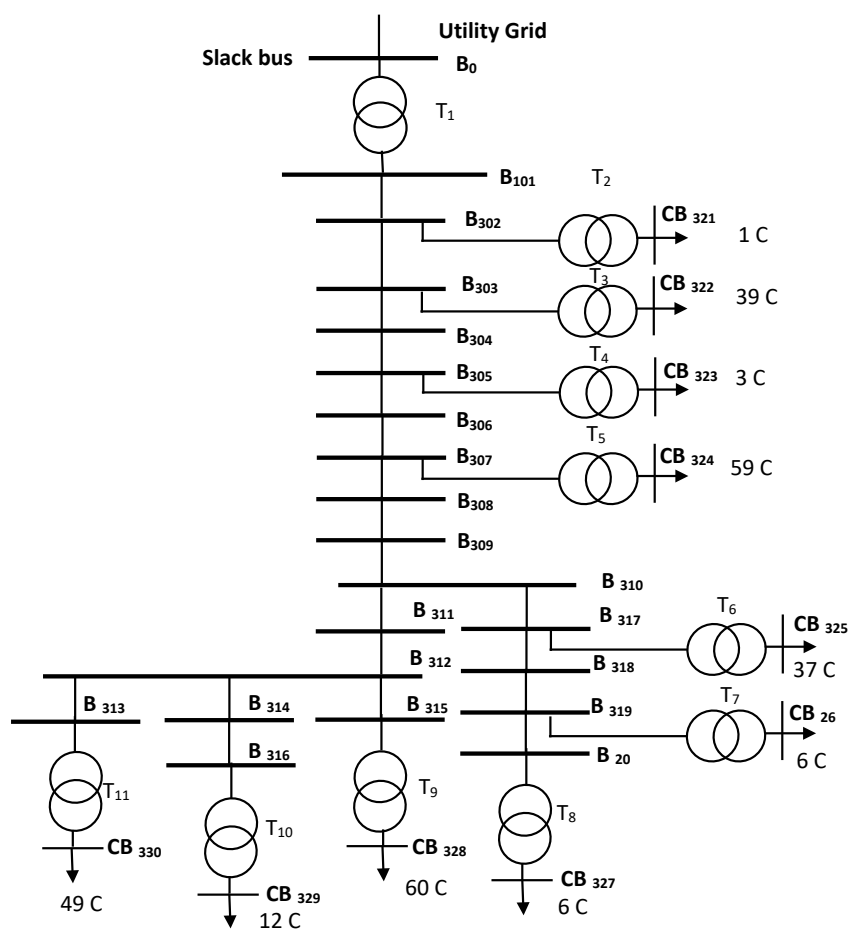
$$i_{rh}(t) = \left(\frac{1+h}{2}\right) \left(\frac{1+h}{2} e_s(t - \tau) - h I_{sh}(t - \tau)\right) + \left(\frac{1+h}{2}\right) \left(\frac{1+h}{2} e_r(t - \tau) - h I_{rh}(t - \tau)\right) \quad (3.12)$$

där,

$$\begin{aligned} Z &= Z_c + \frac{r}{4} \\ h &= \frac{Z_c - \frac{r}{4}}{Z_c + \frac{r}{4}} \\ Z_c &= \sqrt{\frac{l}{c}} \\ \tau &= d\sqrt{lc} \end{aligned}$$

r, l, c är resistans, kapacitans och induktans per längdenhet och ledningens längd representeras av d . För en förlustfri ledare är, $r = 0$, $h = 1$, and $Z = Z_c$.

En uppskattning av resonanser i utgående ledare C (se Figur 2) har gjorts. Den totala kabellängden för ledare C är 5,0894 km och från Tabell 2 och Tabell 3 fås den totala kapacitansen om 2,5208 μF .



Figur 2 Enlinjeschema för utgående ledare C med 272 kunder

Tabell 2 Kabellängder för utgående ledare C

Nod 1	Nod 2	Typ Kabel (C)/Transformator (T)	Längd (km)
B ₁₀₁	B ₀	T1	0,0000
B ₁₀₁	B ₃₀₂	C1	0,6442
B ₃₀₂	B ₃₀₃	C1	0,3147
B ₃₀₂	CB ₃₂₁	T2	-
B ₃₀₃	B ₃₀₄	C1	0,4873
B ₃₀₃	CB ₃₂₂	T3	0,0000
B ₃₀₄	B ₃₀₅	C2	0,0198
B ₃₀₅	B ₃₀₆	C2	0,0236
B ₃₀₅	CB ₃₂₃		-
B ₃₀₆	B ₃₀₇	C1	0,336
B ₃₀₇	B ₃₀₈	C1	0,3143
B ₃₀₇	CB ₃₂₄	T5	-
B ₃₀₈	B ₃₀₉	C1	0,2710
B ₃₀₉	B ₃₁₀	C3	0,0706
B ₃₁₀	B ₃₁₁	C3	0,0686
B ₃₁₀	B ₃₁₇	C6	0,5076
B ₃₁₁	B ₃₁₂	C1	0,3716
B ₃₁₂	B ₃₁₃	C1	0,2949
B ₃₁₂	B ₃₁₄	C4	0,2249
B ₃₁₂	B ₃₁₅	C1	0,3542
B ₃₁₃	CB ₃₃₀	T11	-
B ₃₁₄	B ₃₁₆	C5	0,0028
B ₃₁₅	CB ₃₂₈	T9	0,0000
B ₃₁₆	CB ₂₉	T10	0,0000
B ₃₁₇	B ₃₁₈	C6	0,0179
B ₃₁₇	CB ₃₂₅	T6	0,0000
B ₃₁₈	B ₁₉	C7	0,4078
B ₃₁₉	B ₂₀	C8	0,3576
B ₃₁₉	CB ₃₂₆	T7	0,0000
B ₃₂₀	CB ₃₂₇	T8	-

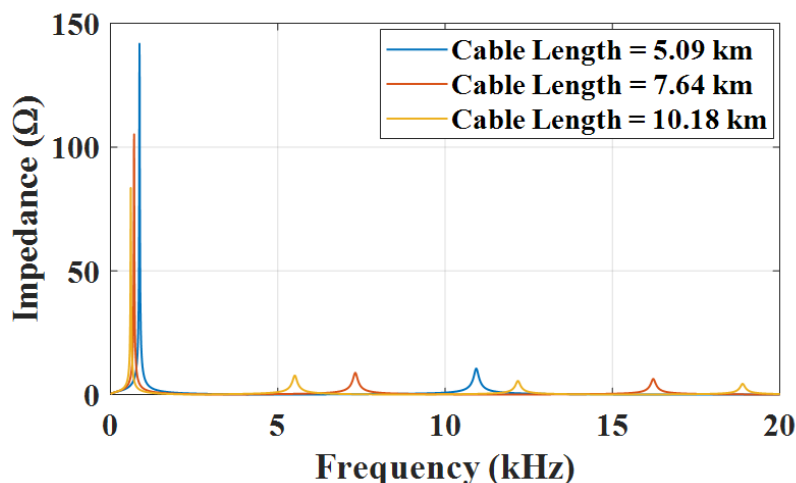
Tabell 3 Kabelparametrar

Kabel	Typ/ Specifikation	Z_{op} (Ω /km)	L (H/km)	B_{sh} (μ S/km)	C(F/km)
C1	ACJJ/150	0,206+0,0754i	2,4001e-04	188,5	0,6e-6
C2	AXCEL/150	0,206+0,0911i	2,9e-04	94,248	0,3e-6
C3	AXCL-OTT3x150/25	0,206+0,0942i	2,9985e-04	94,248	0,3e-6
C4	AXKJ/50/16	0,641+0,1257i	4e-04	62,832	0,2e-6
C5	FXKJ/35	0,493+0,1068i	3,3995e-04	94,248	0,3e-6
C6	AXCL-OTT3x95/16	0,32+0,1005i	3,1990e-04	94,248	0,3e-6
C7	AXCEL/95	0,32+0,0974i	3,1003e-04	94,248	0,3e-6
C8	AXCEL/50	0,641+0,1068i	3,3995e-04	94,248	0,3e-6

Tabell 4 Transformatorparametrar

Transformer	Specifikation	Impedans (Ω)
T1	16MVA, 33kV/11kV	0,0397+0,7854i
T2	0,5 MVA, 10kV/0.4kV	0,0033+0,0184i
T3	0,5 MVA, 10kV/0.4kV	0,0039+0,0181i
T4	0,315 MVA, 10kV/0.4kV	0,0069+0,0252i
T5	0,5 MVA, 10kV/0.4kV	0,0042+0,0178i
T6	0,2 MVA, 10kV/0.4kV	0,0109+0,0323i
T7	0,315MVA, 10kV/0.4kV	0,0072+0,0249i
T8	0,4 MVA, 10kV/0.4kV	0,0075+0,0239i
T9	0,5 MVA, 10kV/0.4kV	0,0051+0,0185i
T10	0,5 MVA, 10kV/0.4kV	0,0043+0,0171i
T11	0,5 MVA, 10kV/0.4kV	0,0043+0,0179i

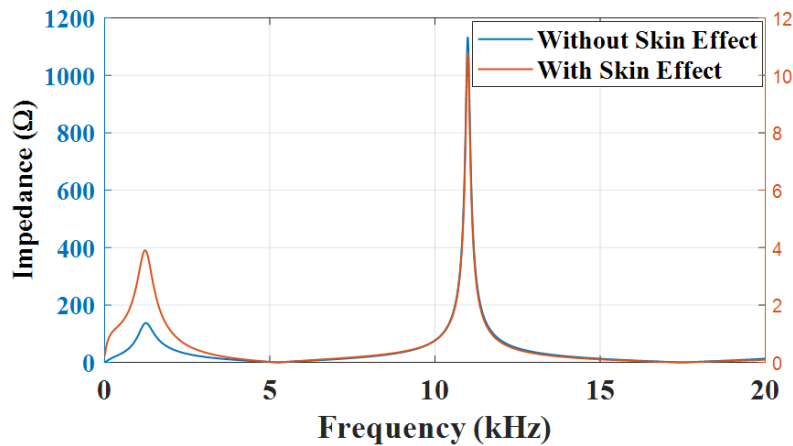
Den första resonansen i nätet (som visas i Figur 2), utan någon last ansluten, är vid 865 Hz och ytterligare en resonans hittas vid 11 kHz. För dessa beräkningar har källimpedansen på 10,5% av den 16 MVA stora 33kV/11kV transformatorn tagits med och skin effekten inkluderats. För att verifiera kabellängdens inverkan på resonanserna har totala kabellängden på 5,09 km ökat till 1,5 och 2 ggr ursprungslängden. Från kurvorna i Figur 3 kan man dra slutsatsen att magnituden på resonansen sjunker med ökad kabellängd och att resonansfrekvensen flyttas nedåt i frekvensen.



Figur 3 Impedans som funktion av frekvensen för ledare C utan ansluten last

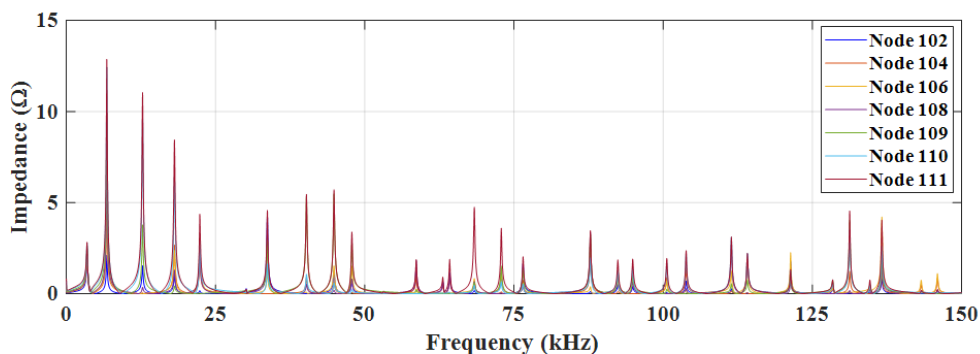
Laster med en storlek på 3,5 kW och 0,5 kvar har lagts till i simuleringen och resultatet visas i Figur 4. Anslutning av last dämpar resonanserna ytterligare, påverkan är större än påverkan från en fördubbling av totala kabellängden. Störst dämpning i bägge fallen fås vid första resonansen, anslutning av last minskar impedansen där cirka 40 ggr medan en fördubbling av kabellängden bara cirka 1,8 ggr. För ökad kabellängd flyttas resonanserna nedåt i frekvensområdet medan anslutning av last gör att första resonansen flyttas till en högre frekvens (från

865 Hz till 1255 Hz). Resultatet visar också tydligt inverkan från skin effekten och att den bör inkluderas i studier av detta frekvensområde.

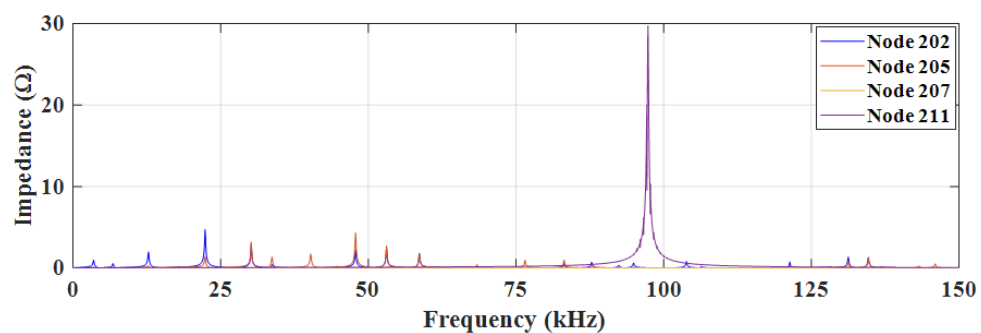


Figur 4 Frekvenssvar för ledare C med ansluten last.

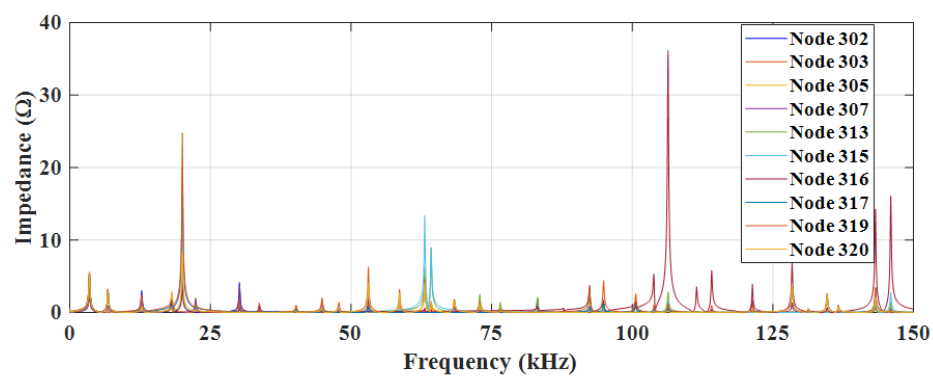
Simuleringen av utgående ledare C utökades med ledare A och B och samtliga resonanser i supratonsområdet för ett antal noder i varje utgående grupp visas i Figur 5, Figur 6 och Figur 7. Resultaten visar att det är mycket sannolikt att det finns resonanser någonstans i supratonsområdet. Var dessa resonanser uppstår och med vilken magnitud varierar beroende på totala kabellängden och karakteristiken på anslutna laster. Antalet resonanser ökar med ökat antal utgående ledare (ökad total kabellängd) vilket ökar risken att en resonans uppstår vid en frekvens där det också finns supratoner. Samtidigt så sjunker impedansens magnitud vid resonanserna vilket minskar risken för att supratoner amplifieras till höga nivåer.



Figur 5 Impedans mot frekvens sett från mellanspänningssidan av transformatorn, matande ledare A



Figur 6 Impedans mot frekvens sett från mellanspänningssidan av transformatorn, matande ledare B



Figur 7 Impedans mot frekvens sett från mellanspänningssidan av transformatorn, matande ledare C

4 Påverkan på kabelavslut

För kabelavslut i mellanspänningsnät är det mycket lämpligt att använda ett material med elektriska egenskaper anpassade för att styra elektriska fältet vid skarvar och kabelavslut. Materialet (fältstyrningsmassa) används för att fördela elektriska fältet i övergången mellan isolationen och metalledaren. Användning av fältstyrningsskikt är billigare och minskar storleken på skarvar och kabelavslut, jämfört med geometrisk fältstyrning [1]. Fältstyrningsmassan består av kompositer vars elektriska konduktivitet är fältberoende, vilket uppnås med hjälp av fyllnadsmedel såsom kiselkarbid (SiC) och zinkoxidvaristor material (ZnO-VM) [14]. Fältstyrning och isolation av kablar är i sig ett komplext område men ligger utanför omfattningen av denna studie, intresserade läsare refereras till exempelvis [15, 16, 17, 18]. Fältstyrningsmassa som ger resistiv fältstyrning kan gå sönder på grund av accelererad åldrande orsakad av supratoner. Åldrande sker på grund av att den resistiva fältstyrningsmassan, genom sin design, har hög konduktivitet vid supratonsfrekvenser [3]. Detta resulterar i "hotspots" på ytan av fältstyrningsskiktet och efterföljande fel i kabelavslutets isolering [1, 2]. En förenklad bild över ett kabelavslut med resistiv fältstyrning visas i Figur 8. Fältstyrningsskiktet (Stress-grading layer) har som funktion att styra fördelningen av det elektriska fältet mellan den halvledande skärmen (semiconductive screen) och metalledaren (conductor). Höga nivåer av fältet kan leda till partiella urladdningar med en degradering av isolationsmaterialet som följd [19]. Fältstyrningsskiktet är designat för att skapa en jämn fördelning av det elektriska fältet och detta fungerar väl för nätfrekvensen (50/60 Hz). När kabelavslutet utsätts för spänningar med en högre frekvens blir det elektriska fältet distorderat och områden där det elektriska fältet koncentreras utsätts för hög stress (high-stress region markerat i Figur 8). Den temperaturökning som uppstår i kabelavslutet beror på förluster både i fältstyrningsskiktet och i isoleringen [2, 20]. Förlusterna i isolationen kommer från kapacitiva strömmar medan förlusterna i fältstyrningsskiktet är resistiva. Förlusterna i isolationsskiktet är relaterade till förlustfaktorn $\tan(\delta)$, spänningen V samt vinkelhastigheten ω enligt följande samband som gäller för sinusformad spänning:

$$P_d = C \tan(\delta) \omega V^2 \quad (4.1)$$

Där C är den totala kapacitansen sedd i Figur 8. Ekvivalenta former av ekvation (4.1) har också använts av författaren till [19]. Fältstyrningsmaterialet modelleras som en icke-linjär resistans på grund av att konduktiviteten, $\sigma(E)$, är fältberoende. Konduktiviteten är unik för varje material och ökar för halvledande material med elektriska fältet enligt:

$$\sigma(E) = \sigma_0 \exp(kE) \quad (4.2)$$

Där σ_0 och k är positiva konstanter vars värde har bestämts utifrån experiment utförda i [14, 17, 19] och E är det elektriska fältet. För de indikatorer som föreslås i

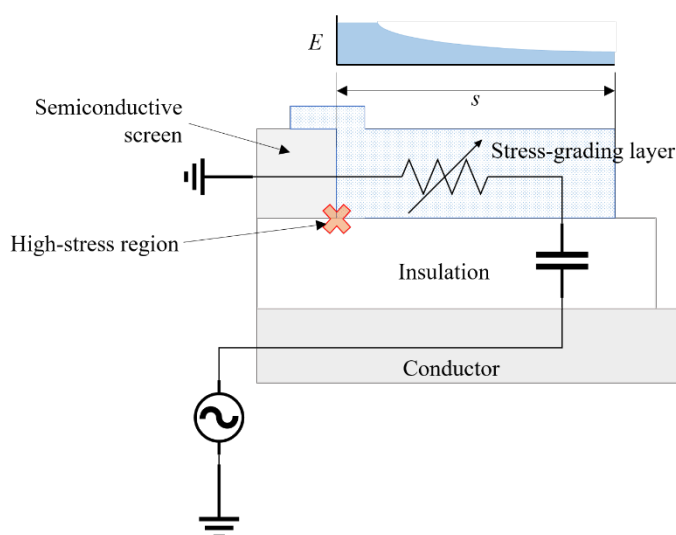
Sektion 5 används en approximation av (4.2) enligt [15] baserat på teorin att elektriska fältstyrkan har ett maximalt värde E_{lim}

$$\sigma(E_{lim}) = \varepsilon\omega \quad (4.3)$$

Där ω är vinkelhastigheten för spänningen och ε är den dielektriska konstanten för fältstyrningsmaterialet. Effektförlusterna och därmed värmeutvecklingen som uppstår i fältstyrningsmaterialet P beror på det elektriska fältet E och konduktiviteten av materialet $\sigma(E)$ enligt:

$$P = E^2\sigma(E) \quad (4.4)$$

Högre elektriskt fält leder till högre förluster och fältstyrkan ökar med ökande frekvens på spänningen.



Figur 8 Förenklad bild över ett kabelavslut med resistiv fältstyrning

En förenkling har gjorts utifrån Figur 8 där spänningen över fältstyrningsskiktet (stress-grading layer) ges utifrån en spänningsdelning och är proportionell mot spänningen som finns mellan ledaren och den halvledande skärmen (semiconductive screen). Antaget värsta fallet där konduktiviteten ges av (4.3) så kan förlusterna uttryckas som:

$$P_{sg} = aV^2\sigma(E) = aV^2\varepsilon\omega \quad (4.5)$$

Där a är en faktor som tar hänsyn till impedansförhållandet i spänningsdelningen och geometrin i fältstyrningsskiktet. Denna förenkling ger ett uttryck för förlusterna i fältstyrningsskiktet liknande ekvation (4.1) där förlusterna ökar linjärt med frekvensen och mer än linjärt med spänningen.

4.1 EAGLE PASS

Fel i kabelavslutningar med resistiv fältstyrning inträffade under idrifttagningsstadiet av Eagle Pass back-to-back HVDC anläggningen, som ansluter USA AEP Texas Central Companys transmissionsnät med det mexikanska

Comisión Federal de Electricidads transmissionsnät. Efter det att problemet undersökts upptäcktes att orsaken till felet var förekomsten av höga nivåer av distorsion på en frekvens som motsvarande en multipel av switchfrekvensen hos den spänningsstyva omriktaren (VSC). Distorsionen vid 12,4 kHz (tio gånger switchfrekvensen som låg på 1,24 kHz) hittades med en amplitud mellan 13% och 40% av fasspänningen på 10,4 kV. Distorsionen förstärktes av en lokal resonans i systemet och den maximala amplituden för vågformen, inklusive över/supratoner, var 37 kV [1]. Laboratorietester utfördes för att bekräfta att orsaken till felet var supratoner. Tre typer av kabelavslut testades, två med resistiv fältstyrning och en av geometrisk typ. De tre kabelavsluten utsattes för stress under olika förhållanden och tiden till ett fel mättes. I alla kabelavslutningar med resistiv fältstyrning uppstod ett fel inom 470 timmar. Ingen av avsluten av geometrisk typ uppvisade något fel under testet. Ett kabelavslut utsattes för en 50 Hz spänning överlagrad med en supratonsspänning från 7,5 till 8,5 kHz, med en amplitud som motsvarar 18% av den totala spänningen; toppvärdet på spänningens vågformen var 45 kV; omgivningstemperaturen var 80° C och kabelavslutet havererade efter 445 timmars testvaraktighet. Studien drog slutsatsen att högre frekvenser leder till högre förluster i fältstyrningen och desto högre supratonsfrekvens desto större är sannolikheten att kabelavslutet havererar. Tiden till fel beror på amplituden och frekvensen för supratonerna, och omgivningens temperatur.

4.2 ÖVRIGA DOKUMENTERADE FALL, 2004–2019

Kabelavslut med resistiv fältstyrning har testats i följande fall. Ming et al., [2] rapporterar att fältfördelningen i gränssnittet mellan isolation och ledare störs under supratonsspänningar, vilket resulterar i hotspots på ytan av kabelavslutet. Hotspots skapas av kapacitiva strömmar vars amplitud är proportionella mot spänningens frekvens. Banerjee och Jayaram [3] visar att ju högre amplitud på supratonsspänningen, desto större ökning av temperaturen vid kabelavslutets yta. Denna relation är icke-linjär. Spänningens toppvärde beror på nätspänningens amplitud tillsammans med amplituden på den överlagrade supratonsspänningen, även om nätspänningen (50/60 Hz) klart dominerar så uppstår hotspots främst beroende på supratonskomponenten. Följaktligen kan en vågform med en enda högfrekvent komponent användas för att testa driftsfall i vilka supratoner överlagras på nätspänningen. Detta förenklar experiment och analys. Patel et al. [21] har studerat den applicerade vågformens utseende och visar att vissa vågformer påverkar mer än andra. Detta tyder på att vilken typ av supratonsemission som finns i signalen spelar en viss roll för den termiska effekten. Shaker et al. [22] och Abbasi et al [23] har studerat modelleringen av den värme som genereras i materialet på grund av förluster.

Tabell 6 visar en sammanfattning av den genomgång av litteraturen som beskrevs i föregående avsnitt. Efter att ha studerat litteraturen, har författarna till denna rapport kommit till slutsatsen att, för att ett fel ska uppstå i kabelavslutningen på grund av supratoner måste kabelavsluten ha resistiv fältstyrning samt vissa andra villkor måste uppfyllas. Dessa villkor kan ses som en kedja av händelser och beskrivs enligt följande:

1) Höga nivåer av supratonsspänningar måste finnas i mellanspänningsnätet. Höga nivåer som de som rapporterats i [1] kan inträffa när det finns en resonansfrekvens i systemet som sammanfaller med frekvensen för supratonerna som injiceras in i nätet.

2) De höga nivåerna av supratonsspänningarna måste påverka fältstyrningen i kabelavsluten tillräckligt för att orsaka höga förluster på en nivå som kan skapa hotspots i fältstyrningsskiktet.

3) Temperaturen på ytan av de hotspots som uppstår genom att kabelavslutet exponeras för höga nivåer av supratoner måste vara tillräckligt hög och förbli hög tillräckligt länge för att orsaka en nedbrytning av fältstyrningsmaterial [21], vilket så småningom kommer att leda till ett fel i kabelavslutet. Hur hög denna temperatur måste vara och hur länge den måste vara så hög beror förmodligen delvis på utformningen av kabelavslutet.

Tabell 5 Översikt av rapporterade fall

	V_1 (kV)	V_{peak} (kV)	supratonsfrekvens. (kHz)	$V_{SH-peak}$ (kV)	V_{SH}/V_1 förhållande (%)	Varaktighet	Resultat/temperaturökning på ytan	Single/multiple components	V_{rated} (kV $\cdot$ L)
Eagle Pass [1]	10,4	37	1,26; 3,78; 12,4	6	40	Okänt	Fel uppstod/-	Multipla	24
Paulsson et al. [1]	26,2	45	8	8	22	445 tim	Fel uppstod/-	Sinus, singel	24
Ming et al. [2]	0	14,1	22	14,1	-	40 min	Hotspots, 9°C	Sinus, singel	Okänt
Banerjee, Jayaram [3]	13	40	7	18,4	100	Okänt	Hotspots, 25°C	Sinus, singel	15
Patel et al. [21]	-	18,4	3	-	-	90 tim	Hotspots, 8°C	PWM	15
Shaker et al. [22]	-	12	4	-	-	1 tim	Hotspots, 10°C	Fyrkantvåg	15
Abbasi et al. [23]	3,2	4,5	-	-	-	43 min	Fel uppstod, 194°C	DC	Okänt

5 Indikatorer och riskbedömning

Fokus i denna studie är att ge riktlinjer och rekommendationer för att kunna identifiera när det finns en ökad risk för fel i kabelavslut. De två egenskaperna hos supratoner som har beaktats är frekvens och amplitud. Följande antaganden har gjorts:

- Med undantag av konduktiviteten hos fältstyrningsmaterialet antas alla parametrar konstanta i förhållande till frekvens och spänning
- Konduktiviteten längs fältstyrningsskiktet är jämt fördelat och har ett linjärt förhållande till frekvensen.
- Förlusterna i kabelavslutet kan modelleras enligt (4.1) och (4.5)
- Systemet är linjärt så superpositionsprincipen håller.

Värmeutvecklingen i kabelavslutet ges av följande samband:

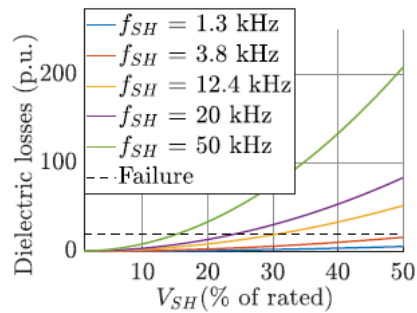
$$Q = P_{sg} + P_d = (a + C \tan(\delta)) \omega V^2 \quad (5.1)$$

Där $C \tan(\delta)$ beror på kabelavslutets design. Förlusterna i kabelavslutet vid märkspänning är $Q_{rated} = f(V_{rated}^2 \omega_{rated})$. Ekvation (5.1) kan lösas för olika supratonsamplituder och frekvenser. Förlusterna på grund av supratonskomponenten Q_{SH} , i förhållande till förlusterna vid märkspänning Q_{rated} kan uttryckas:

$$Q_{pu} = \frac{Q_{SH}}{Q_{rated}} = \frac{(a + C \tan(\delta)) \omega_{SH} V_{SH}^2}{(a + C \tan(\delta)) \omega_{rated} V_{rated}^2}$$

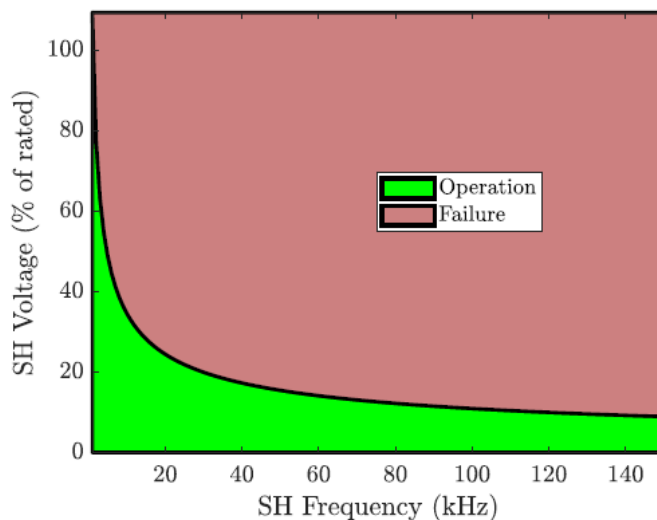
$$Q_{pu} = \frac{\omega_{SH} V_{SH}^2}{\omega_{rated} V_{rated}^2} = \frac{f_{SH} V_{SH}^2}{f_{rated} V_{rated}^2} \quad (5.2)$$

Där f och V är frekvens och spänningens magnitud. Detta tillvägagångssätt användes också av Sonerud et al. [4]. För att avgöra om supratonsspänningen utgör en risk för kabelavsluten används de nivåer som uppmättes vid Eagle Pass och som beskrivs i [1] och Avsnitt 4.1.1. Förhållandena vid Eagle Pass fallet används som ett riktmärke, $Q_{pu-fail}$, som jämförs mot andra Q_{pu} på grund av supratoner som kan uppstå i mellanspänningsnät. $Q_{pu-fail}$ beräknas genom att summera de uppmätta komponenterna vid 1,26 kHz (3,12 kV), 3,78 kHz (0,85 kV) och 12,4 kHz (4,16 kV). Riktmärket $Q_{pu-fail} \approx 20$, dvs. ett fel uppstod i kabelavsluten vid Eagle Pass på grund av att supratonsspänningar orsakade förluster som var 20 gånger högre än de vid märkspänning. Förlusterna visas i Figur 9 som en funktion av amplituden på supratonerna, $f_{rated} = 60 \text{ Hz}$ och $V_{rated} = 13,9 \text{ kV}$ har använts i (5.2) för att beräkna kurvorna.



Figur 9 Förluster som en funktion av supratonspänning för olika frekvenser, streckad linje avger var ett fel uppstod vid Eagle Pass.

Om man antar att $Q_{pu-fail}$ exakt motsvarar de förhållanden som krävs för att ett fel ska uppstå så kan risk/ingen risk områden definieras där $Q_{pu} < 20$ innebär ingen risk och $Q_{pu} > 20$ innebär en risk. Alla kombinationer av f_{SH} och V_{SH} som ligger i det rosa området ovanför den svarta kurvan ($Q_{pu-fail}$) i Figur 10 innebär således en risk för att det ska uppstå ett fel på kabelavslutet.



Figur 10 Gräns mellan risk/ingen risk enligt Eagle Pass fallet.

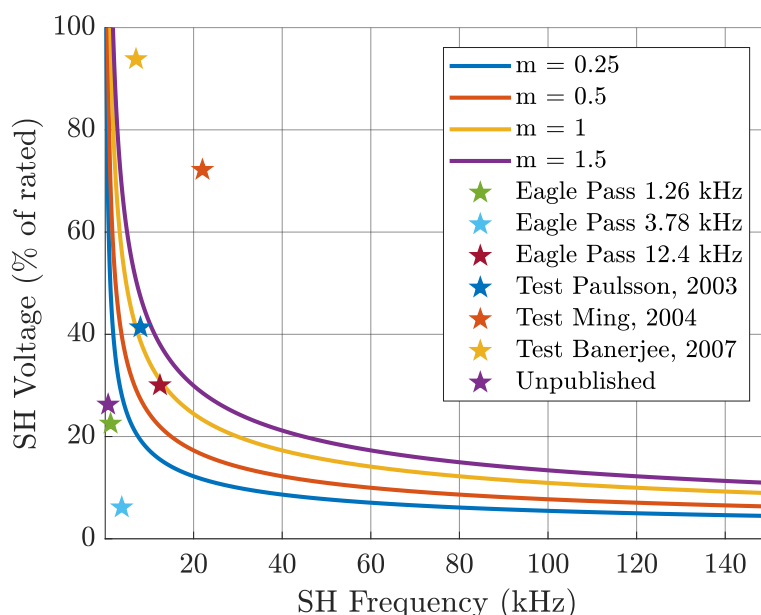
Det finns en osäkerhet i huruvida den valda gränsen kan gälla som ett absolut gränsvärde för alla kabelavslut. Det kan tänkas att nivåerna vid Eagle Pass var lägre när felet inträffade och för att hantera denna osäkerhet föreslås en faktor m så att $Q_{pu-fail} = 20m$ vilket ger:

$$Q_{pu-fail} = \frac{f_{SH} V_{SH}^2}{f_{rated} V_{rated}^2} = 20m \quad (5.3)$$

Vilket kan skrivas som:

$$\frac{V_{SH}}{V_{rated}} \cdot 100\% = \sqrt{\frac{Q_{pu-fail} f_{rated}}{f_{SH}}} = \sqrt{\frac{20m f_{rated}}{f_{SH}}} \quad (5.4)$$

Ekvation (5.4) definierar kurvor (gränsvärden) för en given f_{rated} , gränsvärden för olika m visas i Figur 11



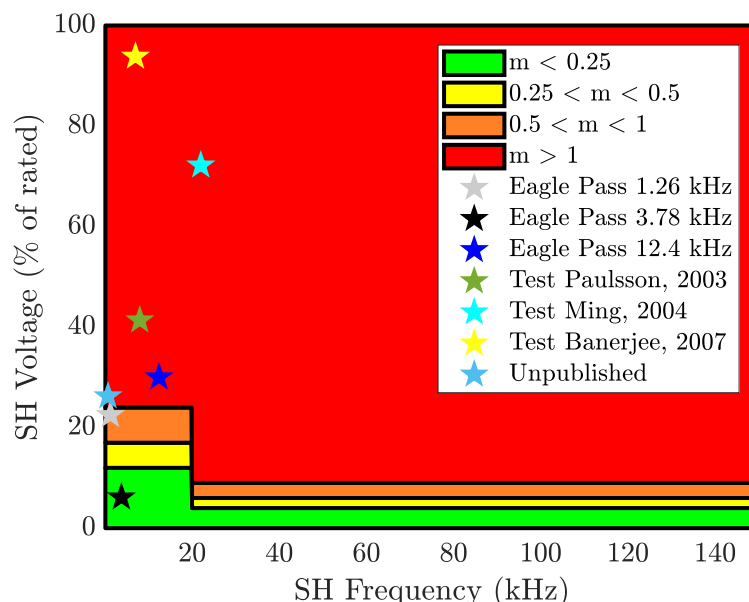
Figur 11 Gränsvärden för olika värden på m baserat på Eagle Pass fallet. Stjärnor representerar övriga fall enligt Tabell 6 samt ett opublicerat fall.

För att ytterligare förenkla så kan man sätta gränsvärdet baserat på resultaten för f_{SH} och V_{SH} för $m=0,25$; $0,5$ och 1 . Detta leder till de föreslagna riskområden som visas i Figur 12 där m ger en indikation om hur stor risken är.

- Rött område ($m \geq 1$), ingen övre gräns
- Orange område ($m < 1$), $V_{SH}=24\%$ och 9% för f_{SH} lägre och högre än 20 kHz respektive
- Gult område ($m \leq 0,5$), $V_{SH}=17\%$ och 6% för f_{SH} lägre och högre än 20 kHz respektive
- Grönt område ($m \leq 0,25$), $V_{SH}=12\%$ och 4% för f_{SH} lägre och högre än 20 kHz respektive

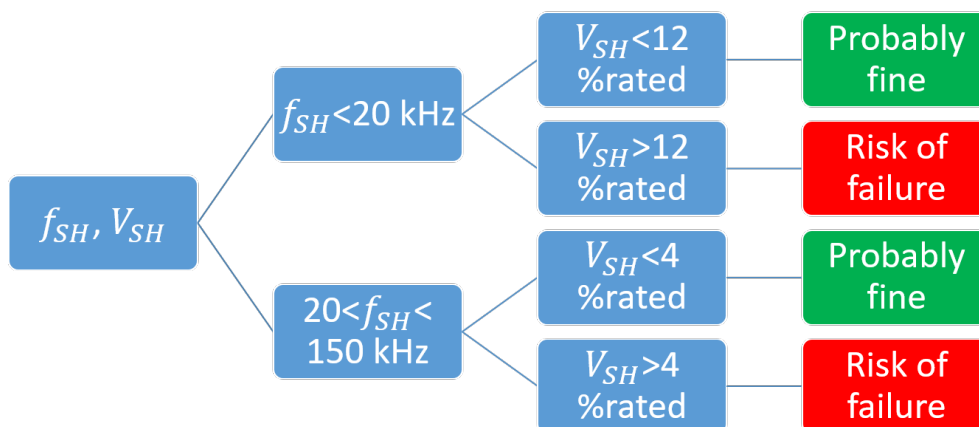
Hur man använder dessa områden beror på hur konservativ man väljer att vara. De fall som finns publicerade har jämförts mot de föreslagna gränserna och

resultatet visas i Figur 12, *Unpublished* representerar ett opublicerat fall där fel uppstod i kabelavslut i ett mellanspänningsnät.



Figur 12 Föreslagna riskområden för olika värden på m baserat på Eagle Pass fallet. Stjärnor representerar övriga fall enligt Tabell 6 samt ett opublicerat fall.

De tre uppmätta frekvenskomponenterna vid Eagle Pass har bedömts individuellt i Figur 12. Komponenten vid 12,4 kHz ligger nära gränsen för $m > 1$ medan de två andra komponenterna vid 1,26 och 3,78 kHz ligger under gränsen för $m < 0,5$. Metoden som visas i Figur 12 får anses mer konservativ än den som visas i Figur 11. Den konservativa metoden hade kunnat förutspå det opublicerade fallet där kabelavslut gått sönder (*Unpublished* i Figur 11 och Figur 12) medan metoden som visas i Figur 11 klassificerar de uppmätta nivåerna som riskfria. Då det ännu saknas detaljerad kunskap kring vilka exakta supratonsamplituder och frekvenser som kan leda till ett fel är rekommendationen att utgå från den mer konservativa metoden och göra en mer detaljerad studie om nivåerna överskrider det gröna fältet i Figur 12. Utifrån den mer konservativa metoden har beslutsträdet i Figur 13 tagits fram för att göra en första bedömning om specifika supratoner kan orsaka ett fel i kabelavslut i mellanspänningsnät.



Figur 13 Beslutsträd för en första bedömning om supratoner med viss amplitud och frekvens kan utgöra en risk för kabelavslut i mellanspänningsnät.

Om vi utgår från exempelnetet i Figur 2 och antar att en vindkraftsturbin på 800 kVA, 10 kV injicerar supratoner på 2% av märkström vid den högsta resonansfrekvensen i Figur 6. En ström på 0,92 A i nod 316 (35 Ω, 105 kHz) skulle då resultera i en fasspänning på 0,56% vilket ligger klart inom det "säkra" området (dvs. under 4% märkspänning). I detta fall skulle det krävas en ström på 6,6 A (14% av märkströmmen) alternativt en resonans av magnituden 250 Ω för att det ska uppstå en risk för kabelavsluten.

5.1 MULTIPLA FREKVENSKOMPONENTER

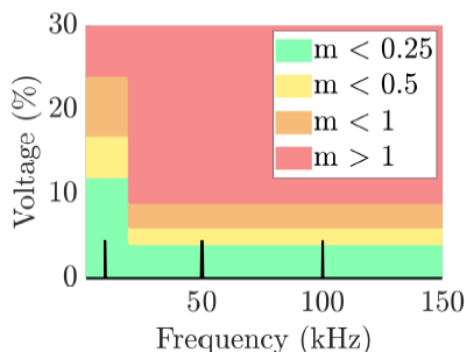
Det finns inga kända systematiska studier av fall där kabelavslut utsätts för multipla frekvenser. Rekommendationen för att kunna identifiera när en risk potentiellt föreligger blir därför att utvärdera dessa fall i två steg där beslutet om åtgärder baseras på värsta utfallet av de två stegen.

1. Jämför varje frekvenskomponent individuellt mot de föreslagna gränsområdena i Figur 11 eller använd beslutsträdet i Figur 13.
2. Beräkna förlusterna enligt ekvation (5.2) och summera resultatet enligt

$$Q_{pu-sum} = \sum_{SH=1}^N \frac{V_{SH}^2 f_{SH}}{V_{rated}^2 f_{rated}} \quad (5.5)$$

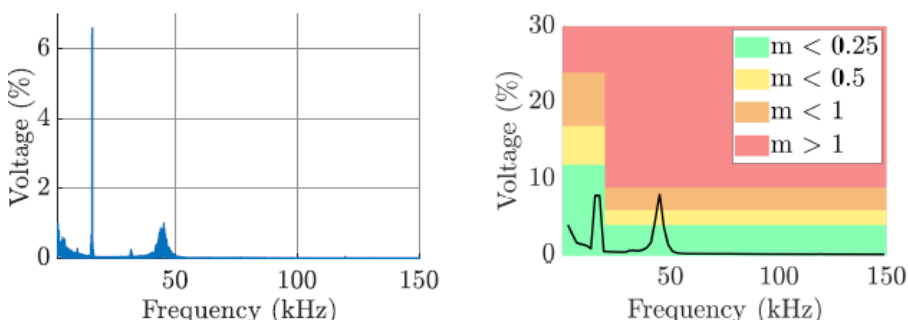
Där N är antalet frekvenskomponenter. Basera beslutet på 25% av $Q_{pu-fail}$ från Eagle Pass, dvs. värden på $Q_{pu-sum} > 5$ innebär en risk för kabelavslutet.

Metoden exemplifieras med spektrumet som visas i Figur 14. Två av de individuella komponenterna (50 kHz och 100 kHz) når det gula fältet och kan utgöra en risk för kabelavslutet. En beräkning av Q_{pu-sum} enligt (5.5) ger $Q_{pu-sum} = 6$.



Figur 14 Exempel på utvärdering av en signal med tre frekvenskomponenter

Exemplet i Figur 14 med tre distinkta smalbandiga komponenter är en simulerad signal och i verkligheten består supratonsemissionen inte sällan av många komponenter med ett mer bredbandigt spektrum (jämför Figur 1 och Figur 15). Tills en standardiserad mätmetod för supratoner finns så föreslås aggregering i 2 kHz band enligt IEC 61000-4-30 innan utvärdering enligt den ovan beskrivna två-stegs metoden.



Figur 15 Utvärdering (höger) av en uppmätt signal (vänster) bestående av både smal- och bredbandiga komponenter.

Signalen i Figur 15 med en 5 Hz frekvensupplösning har först aggregerats till 2 kHz band. Efter Steg 1 ses att den bredbandiga komponenten runt 45 kHz når det orangea området enligt Figur 15. Steg 2 ger

$$Q_{SH} = \sum_{B=1}^{74} \frac{V_B^2 f_B}{V_{rated}^2 f_{rated}} \quad (5.6)$$

Där V_B och f_B är amplitud och central frekvens för frekvensband B . Vi låter igen Eagle Pass vara referensfall, $Q_{EPass} = 20 * 0,25 = 5$. Indikatorn Q_{SH} för spektrumet i Figur 15 är 14, vilket motsvarar en förhöjd risk för ett fel i kabelavslutet.

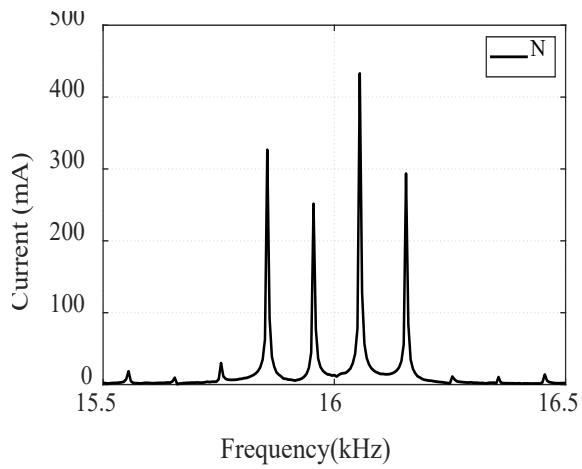
Författarna till [21] visar att en temperaturhöjning i kabelavslutet stabiliseras efter ca sex timmar med konstant pålagd supratonspänning vid 3 kHz.

Värmeutvecklingen som uppstår vid exempelvis ett blixtnedslag är således för kortvarig för att orsaka denna typ av fel, den högfrekventa spänningen måste ligga på under en längre tid. Ett förslag på hur man utvärderar Q_{SH} statistiskt är att

beakta 99% värdet över 10 minuters intervall och sedan aggregera dessa till ett 2 timmars värde på samma sätt som man gör med P_{ST} och P_{LT} för flimmer. Mätning kan utföras under en längre tid, exempelvis en vecka, men mer kunskap behövs om hur accelererat åldrandet av kabelavslutet är under dessa förhållanden.

6 Utmaningar för mätning av supratoner på mellanspänning

Det finns ett antal stora utmaningar med att utföra mätningar på mellanspänningsnivå. De mättransformatorer som vanligtvis finns i nätstationer är inte tillförlitliga för frekvenser över cirka 1 kHz [24, 25, 26]. Istället rekommenderas resistiva/kapacitiva spänningsdelare med tillräckligt god bandbredd. Det rekommenderas också att använda ett högpasfilter för att filtrera bort nätspänningen och de lågfrekventa övertonerna. Standard elkvalitetsinstrument klass A har vanligtvis inte tillräckligt hög samplingsfrekvens för att på ett korrekt sätt kunna reproducera signaler över 2,5 kHz (50e övertonen) även om ett antal instrument nu börjar finnas på marknaden. Det finns idag inte heller någon standardiserad mätmetod för supratoner. IEC 61000-4-30 och IEC 61000-4-7 beskriver mätmetoder i ett informativt annex för mätningar mellan 2 och 150 kHz (IEC 61000-4-30) och 2 till 9 kHz (IEC 61000-4-7). De båda standarderna ger något olika rekommendationer, IEC 61000-4-30 rekommenderar en 1024 kHz samplingsfrekvens och ett 10 perioders mätfönster (för ett 50 Hz system). För varje mätfönster tas 32 mätintervall om 512 sampel (0,5 ms). En FFT ger då en 2 kHz frekvensupplösning. IEC 61000-4-7 förespråkar ett mätfönster som är 200 ms långt med där signalen samplas kontinuerligt vilket resulterar i en frekvensupplösning på 5 Hz som sedan grupperas in i 200 Hz frekvensband. Beskrivningen av metoderna i de båda standarderna är inte helt tydlig vilket ger ett visst tolkningsutrymme som ytterligare kan bidra till att metoderna ger olika resultat. En jämförelse av de båda metoderna visar att de kan ge signifikant skilda resultat [27] och det är viktigt att veta vilken metod som använts för att kunna tolka resultaten. Det finns för- och nackdelar med båda metoder, metoden i IEC 61000-4-30 samplar inte hela signalen, endast 8% av det 10 perioder långa mätfönstret samplas. När supratoner varierar i både frekvens och tid finns risken att viktig information missas och reproducerbarheten blir lägre. Metoden i IEC 61000-4-7 återger hela signalen men ökar också datamängden. Supratoner varierar ofta något i frekvens och att använda 200 Hz band ökar risken att emissionen "delas" mellan två närliggande band. Som exempel kan nämnas en typisk emission från en utrustning med PWM vilken kan ses i Figur 16. Signalen består av två komponenter ± 50 Hz på ömse sidor av switchfrekvensen (16 kHz i detta fall) och dessa komponenter kan delas mellan två 200 Hz band eller tillhöra samma band beroende på switchfrekvensen.



Figur 16 Supratoner från en PWM utrustning med switchfrekvens 16 kHz

Denna studie rekommenderar att använda en aggregering över 2 kHz i enlighet med IEC 61000-4-30 även om 200 Hz aggregering ger bättre möjlighet att identifiera mycket smalbandiga komponenter. Ekvation (5.6), Q_{SH} , är oberoende av vilken aggregering som valts då den tar hänsyn till summeringen av energin.

7 Slutsatser

En metod för att bedöma risken för att fel ska uppstå i kabelavslut har föreslagits. Metoden är tänkt som en första utvärdering för att avgöra om detaljerade studier eller åtgärder behövs för kabelavslut i ett mellanspänningsnät. Ett förslag för en prestandaindikator, Q_{SH} , har tagits fram tillsammans med möjliga gränsvärden beroende på hur konservativ man väljer att vara. Här bör noteras att det föreslagna gränsvärdet är baserat på ett enda dokumenterat fall och ytterligare studier behövs för att verifiera detta. Vilken amplitud och frekvens supratoner har får en stor betydelse för när en risk kan uppstå för kabelavslut med resistiv fältstyrning. Högre amplitud och högre frekvens leder till ökad risk, förhållandet är linjärt gällande frekvens och kvadratisk för supratonsspänningens amplitud. Studien visar också att det är mycket sannolikt att det förekommer resonanser i frekvensområdet för supratoner. En första uppskattning kan göras baserat på total kabellängd i nätet.

8 Referenser

- [1] Paulsson, L., Ekehov, B., Halen, S., Larsson, T., Palmqvist, L., Edris, A. A. & Mehraban, B. (2003). High-frequency impacts in a converter-based back-to-back tie; the Eagle Pass installation. IEEE Transactions on Power Delivery, 18(4), 1410-1415.
- [2] Li Ming, F. Sahlen, S. Halen, G. Brosig and L. Palmqvist, "Impacts of high-frequency voltage on cable-terminations with resistive stressgrading," Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Solid Dielectrics, 2004. ICSD 2004., Toulouse, France, 2004, pp. 300-303 Vol.1.
- [3] S. Banerjee and S. H. Jayaram, "Thermal Effects of High-Frequency Voltage on Medium Voltage Cable Terminations," 2007 IEEE International Conference on Solid Dielectrics, Winchester, 2007, pp. 669-672.
- [4] B. Sonerud, T. Bengtsson, J. Blennow and S. M. Gubanski, "Dielectric heating in insulating materials subjected to voltage waveforms with high harmonic content," in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 16, no. 4, pp. 926-933, August 2009.
- [5] K. Temma, F. Ishiguro, N. Toki, I. Iyoda and J. J. Paserba, "Clarification and measurements of high frequency harmonic resonance by a voltage sourced converter," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 20, no. 1, pp. 450-457, Jan. 2005
- [6] Rönnberg, S., & Bollen, M. (2016). Power quality issues in the electric power system of the future. The Electricity Journal, 29(10), 49-61.
- [7] Meyer, Jan, et al. "Future work on harmonics-some expert opinions Part II-supraharmonics, standards and measurements." 2014 16th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP). IEEE, 2014.
- [8] Rönnberg, S. K, et al. (2017). On waveform distortion in the frequency range of 2 kHz–150 kHz—Review and research challenges. Electric Power Systems Research, 150, 1-10
- [9] S. Rönnberg & M. Bollen, Propagation of supraharmonics in the low voltage grid, Report 2017:461 Energiforsk
- [10] O. Lennerhag, A. Dernfalk, and P. Nygren, "Supraharmonics in the presence of static frequency converters feeding a 16.7 Hz railway system," in 2020 International Conference on Harmonics and Quality of Power, March 2020, pp. 1–6.
- [11] A. Novitskiy, S. Schlegel, and D. Westermann, "Analysis of supraharmonic propagation in a MV electrical network," in 2018 19th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), May 2018, pp. 1–6.
- [12] K. Yang, M. H. J. Bollen, and E. O. A. Larsson, "Aggregation and amplification of wind-turbine harmonic emission in a wind park," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 30, no. 2, pp. 791–799, April 2015.

- [13] A. Mohos and J. Ladányi, "Emission measurement of a solar park in the frequency range of 2 to 150 khz," in 2018 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE), Aug 2018, pp. 1024–1028.
- [14] F. P. Espino-Cortes, S. Jayaram, and E. A. Cherney, "Stress grading materials for cable terminations under fast-rise time pulses," IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 13, no. 2, pp. 430–435, April 2006
- [15] S. A. Boggs, "Theory of a field-limiting dielectric," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 9, no. 3, pp. 1391–1397, July 1994.
- [16] T. Christen, L. Donzel, and F. Greuter, "Nonlinear resistive electric field grading part 1: Theory and simulation," IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 26, no. 6, pp. 47–59, November 2010.
- [17] X. Qi, Z. Zheng, and S. Boggs, "Engineering with nonlinear dielectrics," IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 20, no. 6, pp. 27–34, Nov 2004.
- [18] J. Rhyner and M. G. Bou-Diab, "One-dimensional model for nonlinear stress control in cable terminations," IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 4, no. 6, pp. 785–791, Dec 1997.
- [19] S. Banerjee, "A study of high frequency voltage effects in medium voltage cable terminations," Master's thesis, University of Waterloo, 2008.
- [20] T. Bengtsson, F. Dijkhuizen, L. Ming, F. Sahlen, L. Liljestränd, D. Bormann, R. Papazyan, and M. Dahlgren, "Repetitive fast voltage stresses causes and effects," IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 25, no. 4, pp. 26–39, July 2009
- [21] U. Patel, S. H. Jayaram, A. El-Hag, and R. Seetahpathy, "MV cable termination failure assessment in the context of increased use of power electronics," in 2011 Electrical Insulation Conference (EIC), June 2011, pp. 418–422
- [22] Y. O. Shaker, A. H. El-Hag, U. Patel, and S. H. Jayaram, "Thermal modeling of medium voltage cable terminations under square pulses," IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 21, no. 3, pp. 932–939, June 2014
- [23] V. Abbasi, S. Hemmati, and M. Moradi, "Effects of stress grading materials' properties on the performance of 20-kV cable terminations," Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering, vol. 15, no. 1, pp. 56–64, 2019.
- [24] Klatt, M., Meyer, J., Elst, M., & Schegner, P. (2010, September). Frequency Responses of MV voltage transformers in the range of 50 Hz to 10 kHz. In Proceedings of 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power-ICHQP 2010 (pp. 1-6). IEEE.
- [25] Meyer, J., Stiegler, R., Klatt, M., Elst, M., & Sperling, E. (2011, June). Accuracy of harmonic voltage measurements in the frequency range up to 5 kHz using conventional instrument transformers. In 21st International Conference on Electricity Distribution-CIRED.
- [26] Zavoda, F., Rönnerberg, S., Bollen, M., Meyer, J., & Desmet, J. (2015). CIGRE/CIRED/IEEE working group C4. 24-New measurement techniques in

the future grid. In International Conference and Exhibition on Electricity Distribution: 15/06/2015-18/06/2015.

- [27] A. Grevenier, J. Meyer, and S. Rönnberg. "Comparison of measurement methods for the frequency range 2–150 kHz (supraharmonics)." 2018 IEEE 9th International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS). IEEE, 2018.

SUPRATONERS PÅVERKAN PÅ KABELAVSLUT

Rapporten visar att supratoner, det vill säga övertoner i frekvensområdet 2 till 150 kilohertz, kan ha inverkan på kabelavslut med resistiv fältstyrning och att det kan leda till att komponenter bryts ner i förtid.

Här har forskarna tittat närmare på vilka risker som förknippas med fenomenet supratoner. Rapporten beskriver en metod som kan användas för att göra en första riskbedömning och för att avgöra om detaljerade studier eller åtgärder behövs för kabelavslut i ett mellanspänningsnät. Metoden ger en vägledning kring hur påverkan ser ut, och kan justeras beroende på hur konservativ man vill vara i sina beräkningar.

Ett nytt steg i energiforskningen

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



Energiforsk