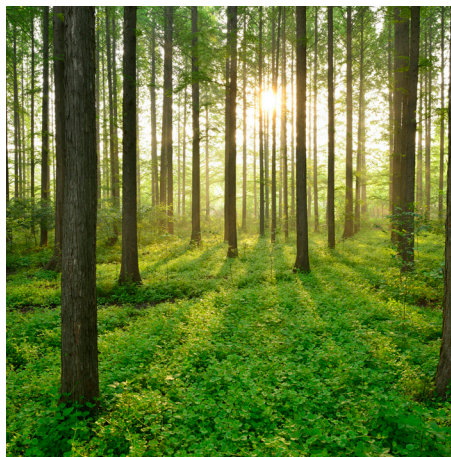
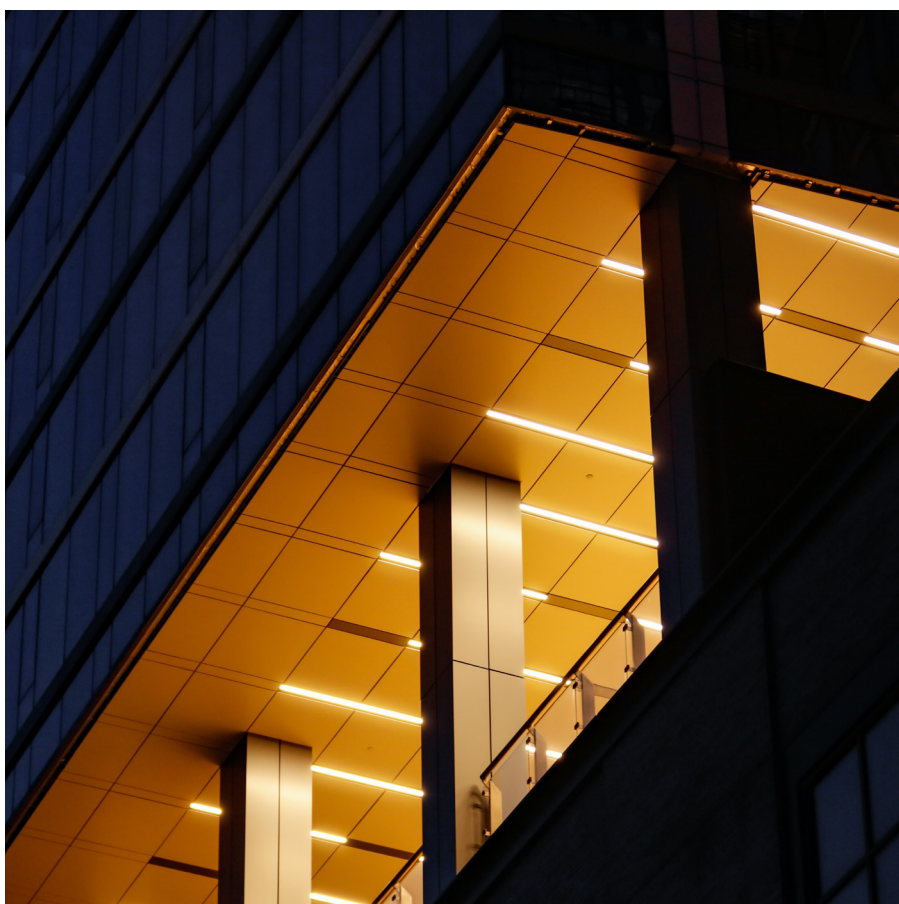


ÖVERTONER I LÅGSPÄNNINGSNÄT

RAPPORT 2023-973



RISK- OCH TILLFÖRLITLIGHETS-
ANALYS



Övertoner i lågspänningsnät

MATH BOLLEN, NASER NAKHODCHI

ISBN 978-91-7673-973-0 | © Energiforsk december 2023

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

Förord

Programmet *Risk- och tillförlitlighetsanalys* har följt projektet *Övertoner i lågspänningsnät*.

Projektet har fokuserat på att specificera de typiska befintliga spänningsövertonsnivåerna för olika laster (t.ex. bostäder, kontor och industri), i lågspänning nätverk och anledningen till att övertonsnivåerna som de är nu vid lågspänning. Projektet har också studerat om det är möjligt att förutsäga befintliga nivåer. Ett resultat är även en reflektion kring vad kommer att hända med de nivåer när en hel del ny utrustning (t.ex. EV -laddare och PV) läggs till samt hur olika belastningsgrupper (t.ex. kontor och gatubelysning) påverkar spänningsövertoner distorsion.

Projektet är finansierat av Göteborg Energi Forskningsstiftelse och Umeå Energi. Naser Nakhodchi på Luleå tekniska universitet har som del av sina doktorandstudier genomfört projektet och handletts av Math Bollen och Sarah Rönberg. Andra som har bidragit är Jil Sutaria, Roger Alves de Oliveira och Angela Espin Delgado.

Stort tack till programstyrelsen för deras engagemang i projektet:

- Jenny Paulinder, Göteborg Energi Nät (ordförande)
- Emil Welin, Vattenfall Eldistribution
- Petter Sandberg/Linus Hansson, Ellevio
- Geoffrey Jordaan, Svenska kraftnät
- Fredrik Andersson, Elinorr
- Magnus Brodin, Skellefteå Kraft Elnät
- Mattias Jonsson, Umeå Energi
- Hampus Halvarsson, Jämtkraft
- Johan Mikkelsen, Öresundskraft
- Henric Johansson, Jönköping Energi Nät
- Fredrik Byström Sjödin, Installatörsföretagen
- Carl Johan Wallnerström, Energimarknadsinspektionen (adjungerad)

Stockholm i december 2023

Susanne Stjernfeldt

Energiforsk AB
Forskningsområde Elnät Vindkraft och Solel

Sammanfattning

Elkvalitet handlar om avvikelser från ideal spänning och ström. Denna rapport riktar sig mot vågformsdistorsion, avvikelser från spänningen och strömmens sinusform, där övertoner är den dominerande komponent som kommer att behandlas mest i rapporten.

Rapporten börjar med en kort allmän översikt av elkvalitet samt en något mer detaljerad beskrivning av vågformsdistorsion. Efter det behandlas specifika resultat från projektet om övertonstorsion i låg- och mellanspänningsnät.

Transferimpedansen introduceras som grundläggande princip och tillämpas för att studera spridning av övertoner för låg- och mellanspänningsnät. Det visas att mellanspänningsnätet spelar en stor roll i spridning av övertoner. Nivåerna av framför allt femte och sjunde överton i lågspänningsnät bestäms till stor del av hur de sprids genom mellanspänningsnätet. Mätningar och korrelationsanalys, som utfördes i projektet, har bekräftat detta.

Mätningar har också använts för att studera aggregering av tredje och nionde överton i lågspänningsnät. Genom mätning av symmetriska komponenter har det visats att "nollföljdsövertoner" (3, 9, 15, osv) har en icke-försumbar nollföljdskomponent som spridas genom mellanspänningsnätet. Mätning av fasvinkel till femte överton har bekräftat tidigare modeller om utjämning mellan emission från enfas- och trefasapparater.

Acceptansgränsberäkningar har utförts för fordonsladdning; det har visats att övertoner kan sätta gränser på laddningen redan innan transformatorn blir överbelastad.

Sammanfattningsvis har projektet resulterat i en hel del nya kunskaper om spridning av övertoner i låg- och mellanspänningsnät. Dessa kunskaper kommer att bli till stor nytta vid anslutning av nya och flera apparater till distributionsnätet, framför allt vid anslutning av stora laddningsinstallationer och solcellsanläggningar till mellanspänningsnätet. Det visades dock också i projektet att detaljer av nätet och anslutna apparater har en stor påverkan på spridningen. Det betyder att det behövs fler detaljstudier och kontinuerlig mätning av nivåerna.

Nyckelord

Låg- och mellanspänningsnät, elkvalitet, övertoner, acceptansgräns, elbilsladdning

Summary

Power quality is about deviations from ideal voltage and current. This report concerns waveform distortion, deviations from the sinusoidal voltage and current, where harmonics are the dominant component that will be covered the most in the report.

The report begins with a brief general overview of power quality as well as a slightly more detailed description of waveform distortion. After that, the specific results from the project on harmonic torsion in low and medium voltage networks are dealt with in the various chapters.

The transfer impedance is introduced as a basic principle and applied to study the propagation of harmonics in low and medium voltage networks. It is shown that the medium voltage network plays a major role in the propagation of harmonics. The levels of especially the fifth and seventh harmonics in low-voltage networks are largely determined by how they are propagated through the medium-voltage network. Measurements and correlation analysis carried out in the project have confirmed this.

Measurements have also been used to study the aggregation of third and ninth harmonic in low voltage networks. By measuring symmetrical components, it has been shown that "zero-sequence harmonics" (3, 9, 15, etc.) have a non-negligible component that propagates through the medium voltage network. Measurement of the phase angle to the fifth harmonic have confirmed previous models of cancellation between emission from single-phase and three-phase devices.

Hosting capacity calculations have been performed for electric vehicle charging; it has been shown that harmonics can limit the charging even when the transformer is not overloaded.

In summary, the project has resulted in a lot of new knowledge about the propagation of harmonics in low and medium voltage networks. This knowledge will be of great use when connecting additional devices to the distribution network, above all when connecting large charging installations and photovoltaic plants to the medium voltage network. However, it was also shown in the project that details of the network and connected devices have a large impact on the spread of harmonics. This means that detailed studies and continuous measurement of the levels are needed.

Keywords: Low and medium-voltage networks; power quality; harmonics; interharmonics; electric-vehicle charging

Innehåll

1	Inledning	8
1.1	Projektorganisation	8
1.2	Rapportens innehåll	8
1.3	Publikationer från detta och relaterade projekt	9
2	Övertoner och vågformsdistorsion	11
2.1	Elkvalitet	11
2.2	Tiddomän och frekvensdomän	11
2.3	Variation med tid	13
2.4	Jämna toner	14
2.5	Olika komponenter	15
2.6	Övertonsnivåer i lågspänningsnät	15
2.6.1	Interferens	15
2.6.2	Gränsvärden	16
2.7	Källor till övertoner	16
2.8	Nuvarande nivåer	17
2.9	Framtida utmaningar	20
2.10	Konsekvenser av vågformsdistorsion	20
3	Spridning av övertoner	22
3.1	Transferimpedansen	22
3.2	Individuella och globala transferimpedansen	23
3.3	Spridning med kända värden för impedanserna	23
3.3.1	Källimpedansen	23
3.3.2	Transferimpedansen	26
3.3.3	Globala transferimpedansen	27
3.4	Osäkerheter i impedanserna	28
4	Mätningar	32
4.1	Korrelation mellan olika övertoner	32
4.2	Korrelation mellan låg- och mellanspänningsnät	33
4.3	Korrelation mellan olika mellanspänningsnät	34
4.4	Aggregering av 3e och 9e överton	34
4.5	Balanserade och obalanserade övertonskomponenter	35
4.5.1	Bostadsområde - strömmar	35
4.5.2	Bostadsområde - strömmar	36
4.5.3	Kontorsområde spänningar	37
4.5.4	Kontorsområde – strömmar	38
4.6	Mätningar vid flera distributionstransformatorer	39
4.7	Fasvinkel av 5e överton	41
4.8	Mätningar vid belysning	43
5	Acceptansgräns	45

5.1	En nedre gräns för acceptansgränsen	45
5.2	Acceptansgräns för elbilsladdning	46
5.3	Modellering av mellanspänningsnätet	47
6	Supratoner och mellantoner	50
6.1	Supratoner	50
6.2	Mellantoner	50
7	Slutsatser och rekommendationer	52
8	Referenslista	53

1 Inledning

Denna rapport beskriver resultat av ett projekt som finansierades till största delen av Göteborg Energis forskningsstiftelse samt Umeå Energi. Projektet pågick mellan januari 2019 och december 2022 och utfördes av Elkraftgruppen vid Luleå tekniska universitet i Skellefteå. Projektet delfinansierades även av Energimyndigheten och Energiforsk.

1.1 PROJEKTORGANISATION

Arbetet utfördes till största delen av Naser Nakhodchi som del av hans forskarstudier, med Math Bollen som huvudhandledare och Sarah Rönnberg som bihandledare. Rapporten skrevs av Math Bollen, till största delen baserat på forskning som utfördes inom Naser Nakhodchis forskarstudier. Delar av rapporten är baserade på forskning som utfördes av Tatiano Busatto, Jil Sutaria, Elena Gutiérrez-Ballesteros, Hamed Bakhtiari, Ángela Espín-Delgado, Sarah Rönnberg, Roger Alves De Oliveira, och Aurora Gil de Castro.

1.2 RAPPORTENS INNEHÅLL

Rapporten börjar (i kapitel 2) med en kort allmän översikt av elkvalitet samt en något mer detaljerad beskrivning av vågformsdistorsion. Efter det behandlas det specifika resultat från projektet om övertonstorsion i låg- och mellanspänningsnät.

Modeller för spridning av övertoner behandlas i kapitel 3. Transferimpedansen introduceras som grundläggande princip och tillämpas för låg- och mellanspänningsnät.

Resultat av analys från olika mätningar behandlas i kapitel 4: korrelationen mellan olika övertoner på samma mätställe; korrelationen mellan samma överton på olika källor; aggregering av tredje och nionde ton; spridning av symmetriska komponenter; fasvinkel av femte ton; samt aggregering av emission från belysning.

Kapitel 5 introducerar acceptansgränsen och presenterar en del beräkningar för att uppskatta acceptansgränsen av distributionsnätet för apparater som genererar övertoner. Det härleds en formel som ger ett nedre värde för acceptansgränsen och det visas resultat för elbilsladdning.

Kapitel 6 kort behandlar supratoner och mellantoner, två typer av vågformsdistorsion som inte specifikt behandlas i resten av rapporten.

Kapitel 7 sammanfattar slutsatser och rekommendationer från projektet.

1.3 PUBLIKATIONER FRÅN DETTA OCH RELATERADE PROJEKT

Innehållet i rapporten är relativt översiktligt; djupgående analyser och detaljer finns inte med. Vi ett antal ställen i rapporten refereras det till tidskriftsartiklar eller konferensbidrag där det finns mer djupgående analyser och eller mer detaljer. Dessa artiklar refereras till genom en bokstav (eller av genom ett siffor som är mer vanligt och som görs för andra referenser). Dessa artiklar finns i referenslistan mot slutet av rapporten, men även här.

[A] N. Nakhodchi, M. Bollen and T. Busatto, Transfer of Harmonics in Distribution Networks,"IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.37, No.3, pp.1617-1626, juni 2022.

[B] N. Nakhodchi, M. Bollen, Including load impedance uncertainty in harmonic impedance seen from a low-voltage customer, ICHQP, maj 2022

[C] Naser Nakhodchi, Math Bollen, Measurements of harmonic voltages at Multiple Locations in LV and MV networks, ICHQP 2020.

[D] Naser Nakhodchi, Math Bollen, Harmonic correlations matrices to present measurement results from single and multiple locations, Int Conf on Electricity Distribution, CIRED, september 2021.

[E] J. Sutaria, N. Nakhodchi, E. Gutierrez-Ballesteros, S. Rönnberg, M. Bollen, Comparing harmonic unbalance at multiple locations to characterize the unbalance, Int Conf on electricity distribution, CIRED, september 2021.

[F] Naser Nakhodchi, Hamed Bakhtiari, Math Bollen, Including uncertainties in harmonic hosting capacity calculation of a fast EV charging station utilizing Bayesian statistics and harmonic correlation, Electric Power Systems Research 214 (2023): 108933.

[G] Naser Nakhodchi, Math Bollen, Impact of Modelling of MV Network and Remote Loads on Estimated Harmonic Hosting Capacity for an EV Fast Charging Station, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 147 (2023): 108847.

[H] N. Nakhodchi, M. H. J. Bollen, Á. Espín-Delgado, S. K. Rönnberg, Deviation from linear summation law for large number of homogeneous LED lamps, Int Conf on electricity distribution CIRED, september 2021.

[I] N. Nakhodchi, R. Alves De Oliveira, and M. H. J. Bollen, Graphical Methods for Presenting Time-Varying Harmonics, CIRED, september 2021.

[J] Naser Nakhodchi, Math Bollen, Estimation of safe harmonic hosting capacity, Int Conf on Electricity Distribution, CIRED, september 2021.

[K]. M.H.J. Bollen. A. Gil de Castro, S.K. Rönnberg, Typical harmonic levels and spectra with low-voltage customers, CIRED 2019.

[L] S. Rönnberg, T. Busatto, M. Bollen, Impact of PV on Harmonics in Low-Voltage Networks, CIRED 2019.

[M] Aurora Gil-de-Castro, Math Bollen, Sarah Rönnberg, Variations in harmonic voltage at the sub-10-minute time scale, *Electric Power Systems Research*, Vol. 195, June 2021, 107163.

Utöver detta finns en del av resultat från projektet och från andra projekt om övertoner i de följande publikationer:

- M. H. J. Bollen, S. K. Rönnberg, D. Schwanz, N. Nakhodchi, V. Ravindran, Harmonics and wind power installations, *Int Conf on electricity distribution, CIRED*, September 2021.
- N. Nakhodchi, V. Ravindran, S. Rönnberg, M. Bollen, Application of transfer function method in a wind park for harmonic study, *Int Conf on electricity distribution, CIRED*, September 2021.
- S. Sudha Letha, M. H. J. Bollen, S. Rönnberg, A. Espin Delgado, Propagation of supraharmonics in a medium-voltage network, *Proc. 26th international conference on electricity distribution, CIRED*, September 2021.
- T. E. Castelo de Oliveira, M. Bollen, P. F. Ribeiro, P. M. S. de Carvalho, A. C. Zambroni, and B. D. Bonatto, "The Concept of Dynamic Hosting Capacity for Distributed Energy Resources: Analytics and Practical Considerations," *Energies*, vol. 12, no. 13, p. 2576, Jul. 2019.
- A. Espin-Delgado, S.K. Rönnberg, V. Ravindran, T. Busatto, M.H.J. Bollen, Summation law for supraharmonic currents (2 to 150 kHz) in low-voltage installations, *Electric Power Systems Research*, Vol.184, July 2020.
- Shimi Sudha Letha, Angela Espin Delgado, Sarah K. Rönnberg, Math Bollen, Evaluation of Medium Voltage Network for Propagation of Supraharmonics Resonance, *Energies*, accepted February 2021.
- V. Ravindran, N. Nakhodchi, S. Rönnberg and M. Bollen, Assessing time-varying harmonic interactions in a wind park, *IEEE Access*, accepted, April 2021.
- Alexandre Malfoy, Roger de Oliveira, Sarah Ronnberg, Harmonics in the Transmission and Distribution Grid and their Relation to Geomagnetically Induced Currents, *CIRED 2023*.
- Roger de Oliveira, Naser Nakhodchi, Rafael Salles, Sarah Ronnberg, Deep Learning Graphical Tool Inspired by Correlation Matrix for Reporting Long-term Power Quality Data at Multiple Locations, *CIRED 2023*.

Även följande avhandlingarna från Luleå tekniska universitet innehåller relevant material

- Naser Nakhodchi, Harmonics in low-voltage networks, June 2023
- Jil Jivrajbhai Sutaria, On supraharmonics in single phase and three phase installations, May 2023.
- Angela Espin Delgado, Propagation of supraharmonics in low-voltage networks, December 2022
- Vineetha Ravindran, Time-varying waveform distortion in low voltage network, May 2021.
- Tatiano Busatto, On waveform distortion in modern low-voltage installations with multiple nonlinear devices, December 2020.

2 Övertoner och vågformsdistorsion

2.1 ELKVALITET

Elkvalitet handlar om den elektriska växelverkan mellan elnätet och apparater anslutna till nätet och även mellan olika apparater genom elnätet. Där det skrivs "apparater" här kan det också vara kompletta anläggningar eller kunder; principen är detsamma och skillnaden är inte relevanta för denna rapport. Växelverkan sker på följande sätt; en av apparaterna drar en ström som inte är sinusformig och/eller konstant ("emission av störningen"). Det resulterar i en spänning som inte är sinusformig och/eller konstant hos klämmorna av en annan apparat (spridning av störningen). Oftast brukar det inte påverka denna apparat, men ibland gör störningar att apparaten inte fungerar som var tänkt, det kallas för negativ påverkan eller "interferens". Det slutliga målet med allt som görs inom elkvalitet är att förebygga eller minska sannolikheten på interferens. Största delen av arbetet handlar dock om mätningar, beräkningar, studier, mm om störningar i spänning eller ström. Det gäller även för denna rapport, men som sagt det är interferensen som ska alltid finnas kvar i bakhuvudet.

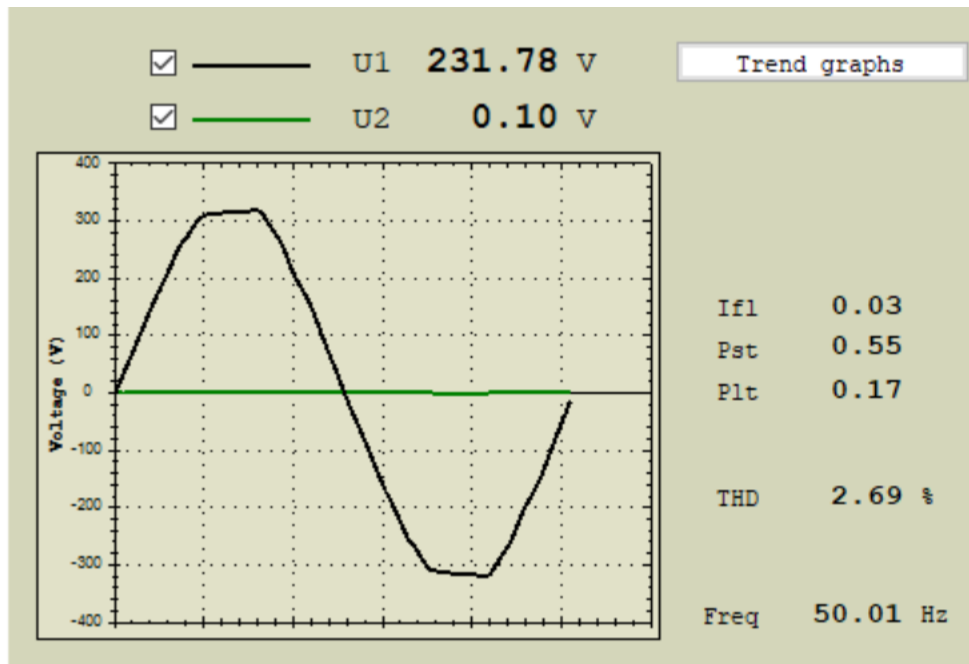
Det finns två typer av elkvalitetsstörningar, som behandlas på olika sätt: händelser och variationer. Variationer är störningar som finns hela tiden och där det kan göras en mätning när som helst. Ett exempel är övertoner (ämnet av denna rapport); där man brukar kvantifiera nivåerna genom ett värde över en 10-minutersperiod. För varje 10-minutersperiod finns det ett värde för varje ton (2a ton, 3e ton, 4e ton, osv). Andra exempel är snabba och långsamma spänningsvariationer, obalans, och frekvensvariationer. Variationerna är oftast mindre avvikelser från idealvärdet av spänningen och/eller strömmen.

Händelser är störningar som bara finns ibland och det handlar oftast om större avvikelser från idealvärdet. För att mäta en elkvalitetshändelse behövs det ett tröskelvärde; när tröskeln överskrids då har det detekterats en händelse och kan den mätas och kvantifieras. Ett exempel är spänningsdippar, som detekteras när spänningens effektivvärde blir kortvarig lägre än en viss tröskel. Tröskeln är oftast 90 % av märkspänningen.

Det finns ett flertal böcker och artiklar som ger översikter av elkvalitet, bland annat [1, 2, 3, 4]. Även de olika typer av störningar behandlas i olika detaljnivåer i flera böcker och många publikationer.

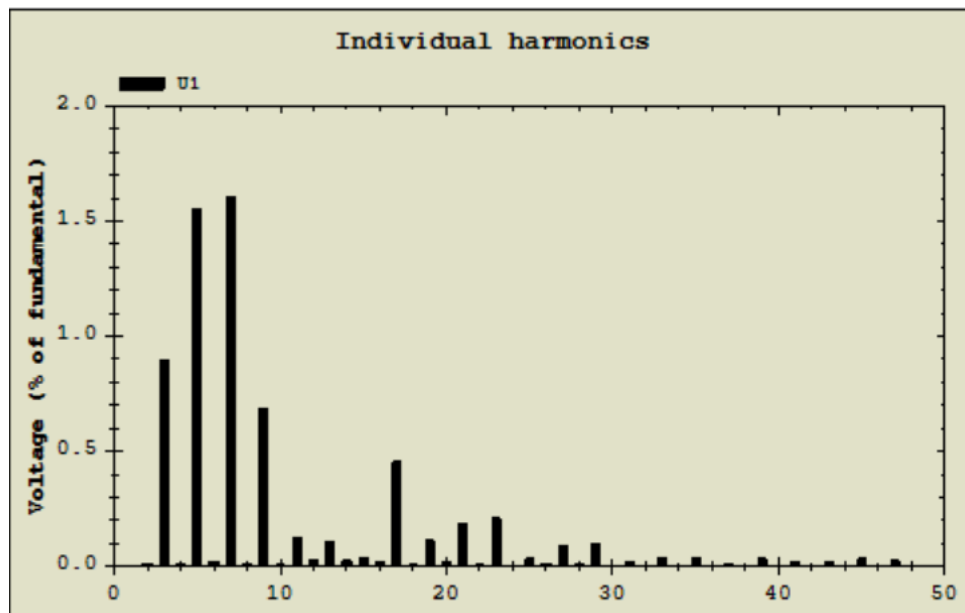
2.2 TIDDOMÄN OCH FREKVENSDOMÄN

Den dominerande komponenten i elnätets spänningar och strömmar har en frekvens nära 50 Hz (en periodtid på 20 millisekunder); ett exempel visas i Figur 1. Denna systemfrekvens varierar kontinuerligt inom det tillåtna spannet mellan 49,8 Hz och 50,2 Hz, men för denna rapport kommer vi att referera till systemfrekvensen som 50 Hz. Vid mätningen som visas i Figur 1 var frekvensen av den dominerande komponenten lika med 50,01 Hz.



Figur 1 Vågformen av spänningen i en lägenhet i Göteborg på en fredagsmorgon.

Det finns dock andra frekvenskomponenter också; närvaron av sådana icke-50-Hz komponenter kallas för "vågformsdistorsion", "övertonsdistorsion" eller bara "distorsion". Begreppet har sitt ursprung i att vågformen inte längre är en sinusvåg. Man skulle kunna beskriva vågformsdistorsionen i tidsdomänen, till exempel genom att ange hur mycket vågformens utseende avviker från en sinuskurva. Begreppet "crest factor" finns för detta men används sällan. Det saknas en definition för crest factor i standarden som kan tillämpas på mätningar, som det finns för spektrumet i IEC 61000-4-30 [5]. Beskrivning och analys av distorsionen görs nästan uteslutande genom de individuella frekvenskomponenterna i vågformen (dvs i frekvensdomänen). Utöver den dominerande komponenten på 50 Hz, finns det en del andra frekvenskomponenter, de flesta på udda multiplar av 50 Hz, så som 150 Hz, 250 Hz och 350 Hz. Frekvenskomponenter på multiplar av 50 Hz kallas för "övertoner" ("harmonics" på engelska). Spektrumet (dvs. komponenter av vågformen i frekvensdomän) visas i Figur 2.

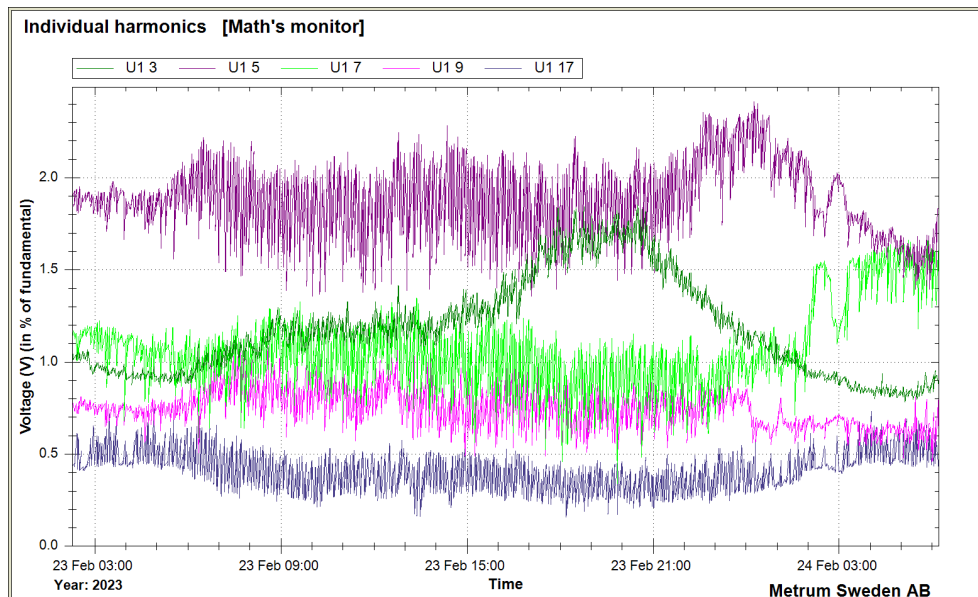


Figur 2 Spektrumet av spänningen i samma lägenhet som i Figur 1, några minuter senare på samma fredagsmorgon.

De dominerade komponenterna i spektrumet som visas i Figur 2 är på 250 Hz och 350 Hz; det som kallas 5e ton och 7e ton. Andra stark närvarande komponenter är 3e, 9e och 17e överton. Med undantag av 17e ton är det här ett ganska vanligt spektrum för lågspänningsnät. Komponenten vid 50 Hz kallas ofta för "grundtonen" ("fundamental frequency component" på engelska) även om det inte är samma sak som matematiska begreppet "grundton" som används för Fourierserier [6].

2.3 VARIATION MED TID

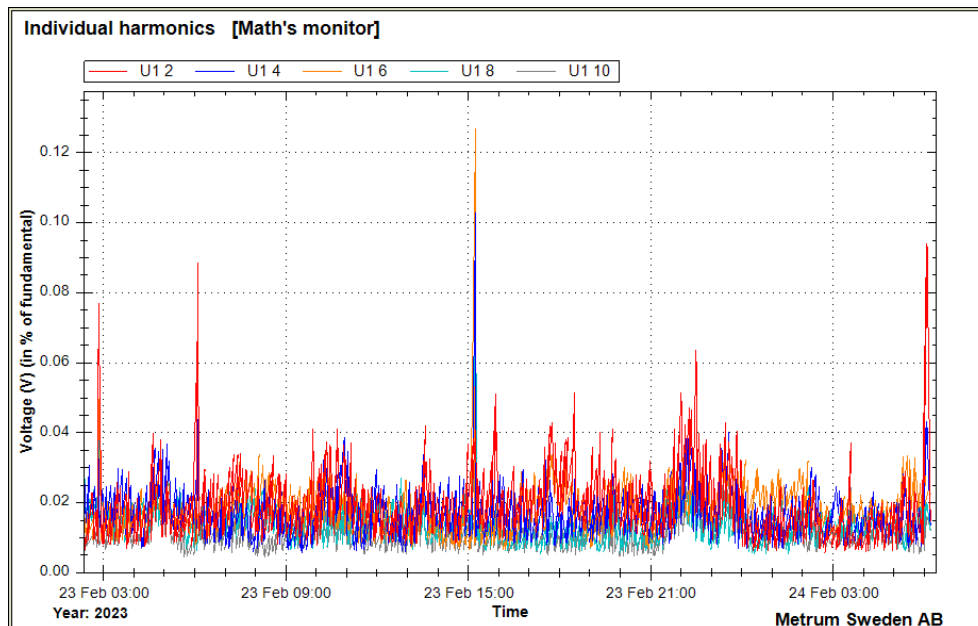
Övertoneernas amplitud är inte konstant över tid, utan visar variationer på tidskalor från mindre än en sekund till säsongsvariationer. Variationerna under en 24-timmars period, visas i Figur 3, för samma mätpunkt som i Figur 1 och Figur 2. Mätningar gjordes med en tidsupplösning på 10 sekunder, dvs att ett värde beräknades och lagrades i instrumentet över varje 10-sekundersperiod. Metoden för att beräkna 10-sekundersvärdet, och värden över andra perioder, definieras i IEC 61000-4-30 [5] och IEC 61000-4-7 [7]. De snabba variationerna, bland annat för 5e och 7e ton, under en stor del av dagen är på grund av hissarna. Variationerna i tredje ton är på grund av variationer i apparaterna anslutna hos kunder som matas från samma distributionstransformator; tredje tonen har högst amplitud på kvällarna. Vid denna mätpunkt finns det kring 400 lägenheter (och 12 hissar) anslutna till samma nätstation.



Figur 3 De fem starkaste frekvenskomponenter (3e, 5e, 7e, 9e och 17e ton) i en lägenhet i Göteborg, som funktion av tid, mellan torsdagsmorgon och fredagsmorgon.

2.4 JÄMNA TONER

Jämna toner brukar ha betydligt lägre amplitud än udda toner, som för detta fall visas i Figur 4. Största del av tiden är de väldigt låga (under 0,04 %), med högre nivåer under bara några sekunder. En del av de höga värden inträffar vid start av skrivaren på hemmakontoret, elektriskt i närheten av mätaren; orsaken till höga värden kring 3 på eftermiddag är okänt. Mätning av transformatorer är en kortvarig källa av jämna toner: mätningen kan orsakas av spänningssättningen av en transformator [4], av återkommande spänning efter en spänningsdip [4], och av geomagnetisk-inducerade strömmar [8]. Källorna till jämna toner är fortfarande inte väl kartlagda. I rapporten kommer framför allt udda toner att behandlas, men en stor del av resonemanget gäller också för jämna toner.



Figur 4 Jämna toner 2 t.o.m. 10 i en lägenhet i Göteborg, som funktion av tid, mellan torsdagsmorgon och fredagsmorgon.

2.5 OLIKA KOMPONENTER

Utöver udda och jämna övertoner finns det en del andra frekvenskomponenter i spänningens och strömmens vågform.

- Mellantoner ("interharmonics" på engelska): komponenter med frekvenser som inte är en heltalsmultipel av 50 Hz. Komponenter på 182 Hz och 282 Hz är exempel som fanns i spänningen i Sverige [9]. Andra källor av mellantoner är vindturbiner [10], solcellsanläggningar [11] och drivsystem [12]. Det finns begränsad med information om deras ursprung, förekomst, och spridning i elnätet. Det finns standardmetoder för att mäta och kvantifiera mellantoner i IEC 61000-4-30 [5], men vid tillfälliga eller permanenta mätningar och även i forskningen tas de oftast inte med. Mellantoner kommer kort att behandlas i kapitel 6.
- Supratoner ("supraharmonics" på engelska): komponenter med frekvenser mellan 2 kHz och 150 kHz. Supratoner har kommit på agendan ungefär 10 år tillbaka och det görs mätningar vid ett flertal universitet. Dessa mätningar har visat att en stor del av moderna lågspänningsapparater genererar supratoner. Det finns dock en del utmaningar med fältmätning av supratoner och många instrument har inte möjlighet att mäta supratoner; det fortfarande finns begränsad med information om nivåerna och spridning av supratoner i elnätet. En översikt av nivåerna på ett antal mätpunkter rund världen finns i [13]. Supratoner kommer att behandlas kort i kapitel 6.

2.6 ÖVERTONSNIVÅER I LÅGSPÄNNINGSNÄT

2.6.1 Interferens

Spänningar och strömmar i elnätet är aldrig helt fri från övertoner, men så länge nivåerna är låga finns det inga negativa konsekvenser av detta. Det finns inga specifika och välkända gränser som ska överskridas för att negativa konsekvenser ska inträffa

och det finns begränsat med kunskaper om vilka konsekvenserna är när de inträffar. En kort översikt av negativa konsekvenser av vågformsdistorsion visas i Avsnitt 2.10. Inom elkvalitet används begreppet "interferens" för att referera till negativa konsekvenser av vågformsdistorsion för komponenter i nätet eller för apparater anslutna till nätet. Det görs skillnad mellan störningar (avvikelser från ideal spänning eller ström) och interferens (negativa konsekvenser av dessa störningar). Övergripande syftet med allt arbete inom elkvalitet är att minska sannolikheten på interferens, men många forskningsstudier, permanenta och tillfälliga mätningar, och regelverket riktar sig mot störningar. Det betyder inte att detta arbete inte är relevant, att hålla koll på nivåerna av störningar är ju ett sätt att minska sannolikhet på interferens. Huvudsyftet (interferens) ska dock inte bortglömmas.

2.6.2 Gränsvärden

Även om det saknas information om när övertonsnivåerna blir så pass höga att det inträffar interferens, finns det ändå vissa gränsvärden som inte ska eller rekommenderas att inte överskrida. I Sverige definieras dessa av Energimarknadsinspektionen, myndigheten som har tillsyn på den reglerade delen av elmarknaden (dvs på elnätsföretagen). Senaste versionen av gränsvärden finns i föreskriften EIFS 2013:1 [14] och gränsvärden för leveranspunkten till lågspänningskunder visas i Tabell 1. Gränsvärdena gäller för 10-minuters intervall vilket betyder att man tillåter kortvariga höjningar av övertonsnivåerna. En diskussion om variationer i övertonsnivåer på tidskalor mindre än 10 minuter finns i [M] Det finns i Sverige inget absolut krav att hålla sig under gränsvärden, men vid interferens på grund av nivåerna över gränsvärden då ligger ansvaret på att hitta en lösning i första hand vid elnätsföretagen. Visas det sig att kostnaderna blir orimliga i förhållande till konsekvenserna, då behövs det inga åtgärder av elnätsföretaget. Det pågår just nu en utvärdering av föreskriften men det förväntas inga stora ändringar i gränsvärden, med undantag och 15e och 21e ton, där det förväntas en ökning av gränsvärden. Utöver gränsvärden för individuella övertoner anges också ett gränsvärde på 8 % för den totala övertonshalten. Notera att EIFS 2013:1 [14] inte anger gränsvärden för individuella spänningsövertoner högre än 25:e övertonen, gränsvärden för de högre övertonerna återfinns i exempelvis SS-EN 50160 [15].

Tabell 1. Gränsvärden för övertonsspänning i svenska lågspänningsnät enligt EIFS 2013:1

Överton	Gränsvärde	Överton	Gränsvärde	Överton	Gränsvärde
2	2,0 %	10	0,5 %	18	0,5 %
3	5,0 %	11	3,5 %	19	1,5 %
4	1,0 %	12	0,5 %	20	0,5 %
5	6,0 %	13	3,0 %	21	0,5 %
6	0,5 %	14	0,5 %	22	0,5 %
7	5,0 %	15	0,5 %	23	1,5 %
8	0,5 %	16	0,5 %	24	0,5 %
9	1,5 %	17	2,0 %	25	1,5 %

2.7 KÄLLOR TILL ÖVERTONER

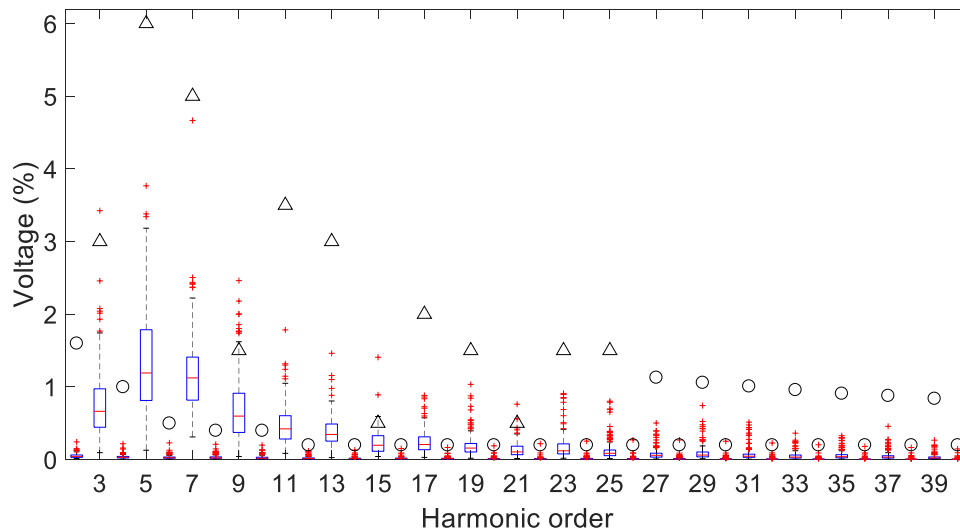
Det finns en del orsaker till vågformsdistorsion i elnätet. En mindre del uppstår vid konventionella produktionsenheter (synkronmaskiner), transformatorer och asynkronmaskiner, men största bidraget kommer från kraftelektronisk utrustning. Det

kan vara utrustning som är del av nätet, HVDC, eller utrustning ansluten till nätet. Utmaningen vid övertoner och annan vågformsdistorsion har under åren framför allt handlat om att begränsa emission vid utrustning, dvs att begränsa nivåer av övertoner i strömmen vid gränssnitten mellan utrustning av elnätet. Problemställningen har varit ganska lika under åren, men fokus har varit på olika typer av utrustning. Några exempel under åren har varit:

- HVDC länkar och stora kraftelektroniska omriktare var en dominerande källa av övertoner under en viss period. Mycket av det grundläggande arbetet om övertoner utvecklades för detta och bland annat amerikanska standarden IEEE 519 utvecklades för detta. Även de gamla svenska gränsvärden för övertoner [16] kommer från anslutning av stora omriktare för framför allt drivsystem.
- Storskalig användning av TV apparater i hushåll resulterade i källor av övertoner på miljontals punkter i nätet. Alla TV apparater hade ungefär samma vågform som resulterade i höga nivåer av övertoner på kvällen för 3e, 5e och 7e ton. IEC standarden om övertonsemission (IEC 61000-3-2 [17]) kom fram för att begränsa sådana höga nivåer.
- Moderna apparater innehåller nästan bara kraftelektronik i gränssnittet till elnätet (vattenkokaren kommer snart att vara ända undantaget) som resulterar i tiotals källor av övertoner i varje hushåll. Övergång från glödlampor till LED belysning var något som specifik fick uppmärksamhet bland elnätföretag, vid standardiseringen och i forskningen [18]. Systematiska studier, som utfördes bland annat av Elkraftgruppen vid Luleå tekniska universitet, visade dock att risken för höga nivåer var låg: det fanns ingen märkbar ökning av spänningsövertoner på grund av ändringar i belysningstyp [19, 20, 21].

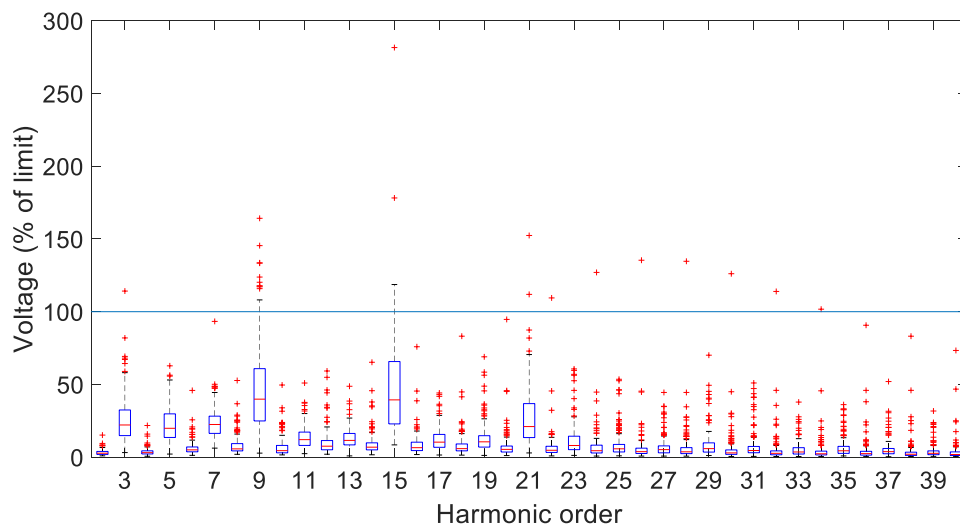
2.8 NUVARANDE NIVÅER

Nuvarande nivåer av övertoner i nätet orsakas till största delen av många små apparater med bidrag från ett fåtal stora anläggningar. En sammanställning av hur övertonsnivåerna varierar mellan olika mätpunkter (dvs., olika lågspänningsnät) visas i Figur 5. Figuren baseras på mätningar på 163 punkter, alla vid vägguttaget, jämfört med gränsvärden enligt två standarder. Detaljer om mätningarna visas i [K]. Mätningarna gjordes i 17 olika länder; en figur med bara svenska mätpunkter [L] visar ett liknande resultat.



Figur 5 Övertonsspänningar på 163 mätpunkter. Trianglarna anger gränsvärden enligt SS-EN 50160; cirkelarna enligt SS-EN 61000-2-2.

Figuren anger att det finns marginal mellan de befintliga nivåerna och gränsvärdena, för de flesta mätpunkterna. Undantag är 9e, 15e och 21e ton. Jämförelsen mellan nivåerna och gränsvärden visas tydligare i Figur 6, där en skalning har gjorts så att 100 % kommer överens med gränsvärden.



Figur 6 Övertonsnivåerna som procentdel av gränsvärden.

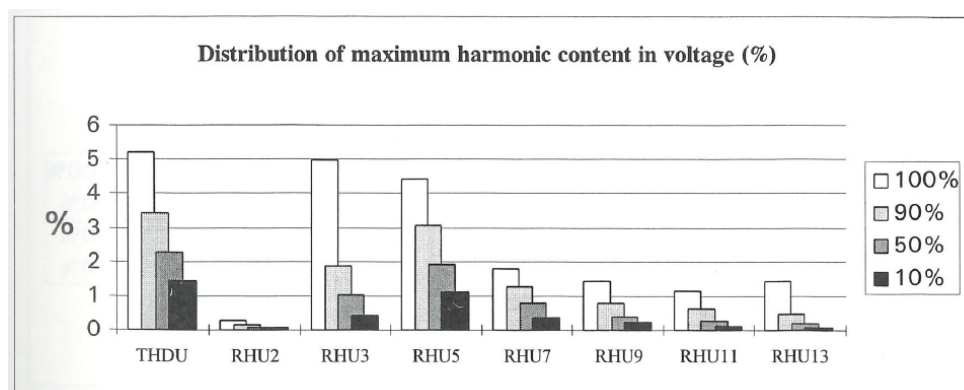
Enligt figuren är det några enskilda fall där nivåerna överskrider gränsvärdet, men systematiskt överskridande finns bara vid 9e och 15e ton.

Tabell 2, från samma studie, anger vilka övertoner i spänning som har högst amplitud. Det är tydligt att det är 5e och 7e ton som dominerar i de flesta lågspänningsnät. Vid 60 % av mätställen är det 5e och 7e ton som är de två högsta (97/163). Bara vid ett fåtal mätpunkter är det 3e ton som dominerar. Mätningarna gjordes till största delen under 2017 och 2018.

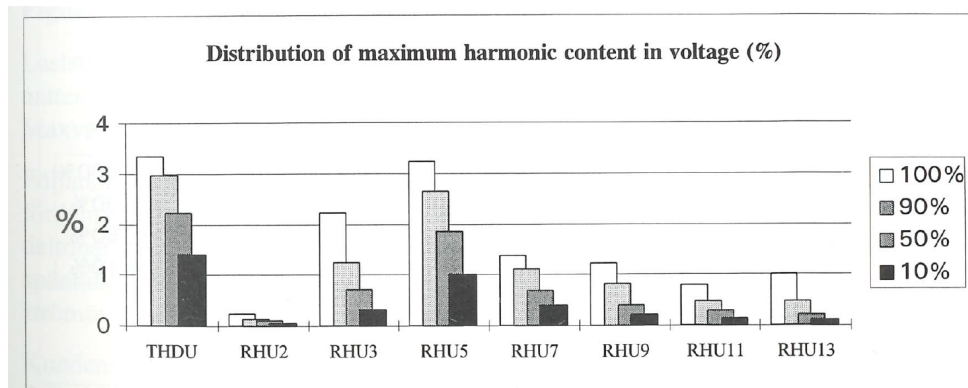
Tabell 2 Dominerande övertoner (antalet mätställen)

Högsta värdet för ton	Näst-högsta värdet för ton (antal mätpunkter)						
	Total	3	5	7	9	11	13
3	8 %		4	6	2		1
5	48 %	13		57	6	3	
7	34 %	5	40		7	3	
9	4 %	3	3	1			
11	5 %	1	1	5			1
23	1 %			1			

Här är det intressant att göra en jämförelse med mätningar som gjordes i Sverige mellan maj 1993 och augusti 1994 och som publicerades i ett Elforskrapport [22]. Figur 7 visar fördelningen av högsta nivåerna för 98 lågspännings effektkunder, Figur 8 för små lågspänningskunder. Det är svårt att göra en direkt jämförelse mellan 1993/1994 och 2017/2018, eftersom det finns olika typer av kunder och det har använts olika mätmetoder. Ändå tyder jämförelsen på att det har varit något av en minskning av nivåerna för 5e och framför allt 3e ton, medan 7e, 9e, 11e och 13e ton visar en ökning. Här är det viktigt att påpeka att det finns 25 år mellan mätningarna och att det har varit en väldigt stor utveckling i hushållsapparater och belysning. Sett från detta perspektiv har det inte ändrats så mycket i nivåerna av övertonsspänningar. Det rekommenderas att upprepa studien från 1993/1994 på ett mer systematiskt sätt och även att undersöka om det finns ytterliga studier gjorda som kan användas för att detektera trender.



Figur 7 Fördelning av högsta nivåer av övertoner bland 98 lågspänningseffektkunder, 1993/1994 [22].



Figur 8 Fördelning av högsta nivåer av övertoner bland 57 små lågspänningskunder, 1993/1994 [22].

2.9 FRAMTIDA UTMANINGAR

Det visades ovan att det finns marginaler mellan nuvarande nivåer och gränsvärden, med vissa undantag. Det betyder att det finns "utrymme för försämring", där det antas att det är gränsvärden som ska hållas. Med andra ord, ligger övertonsnivåer under gränsvärden men det finns interferens ändå, då är det på ägaren av apparaten att acceptera interferensen eller att ta åtgärder. Det kommer, i denna rapport, inte att tas upp interferens på grund av höga nivåer av övertoner, men det påpekas ändå att det finns brist på kunskaper om interferens vid moderna apparater på grund av övertoner. Det gäller för "vanliga toner" (udda toner under ungefär 1 kHz), men även mer för jämna toner, mellantoner, högre övertoner och supratoner.

En annan utmaning, som kommer att tas upp i rapporten, är att det är en ny typ av övertonskälla på väg in till nätet. Det handlar om solcellsanläggningar och fordonsladdning. Tillväxten av emission de senaste 30 – 40 åren har varit genom allt fler, allt mindre apparater, som exempelvis datorskärmar, telefonladdare och LED belysning. Vi pratar om effekter av några 100-tals watt eller mindre. För solcellsanläggningar och fordonsladdning blir det betydligt större anläggningar; några kW vid hushållstillämpningar, upp till 100-tals kW för snabbbladdning samt laddning av bussar, färjor, och lastbilar. Huvudutmaningen som var anledning till projektet som avrapporteras i denna rapport är hur dessa nya övertonskällor kommer att påverka övertonsnivåerna i framför allt lågspänningsnätet.

2.10 KONSEKVENSER AV VÅGFORMSDISTORSION

Konsekvenser av vågformsdistorsion kommer i tre olika typer:

- Interferens hos apparater anslutna till elnätet, hos nätanvändare. Det kan vara hos hushållskunder, hos kontor- eller kommersiella kunder, i industriella anläggningar men också i produktionsanläggningar.
- Interferens hos apparater som är det av elnätet; det kan till exempel handla om uppvärmning av transformatorer eller om oönskad utlösning av reläskydd.
- Behov på att göra ytterligare studier, att göra åtgärder i elnätet och/eller att minska emission från nya anläggningar (produktion eller förbrukning).

Sista konsekvenser är faktiskt det som händer mest oftast och målet är då förstärkt att förebygga de första två konsekvenserna.

Höga övertonsnivåer kan resultera i störningar på utrustning ansluten till nätet och negativa konsekvenser för utrustning i nätet. Höga övertonsströmmar kan resultera i överhettning och bildning av hotspots med speciellt distributionstransformatörer. Kablar kan också påverkas, men i mindre utsträckning än transformatorer. Övertonsspänningar, särskilt övertoner av högre ordning, resulterar i strömmar genom kondensatorbanker. Dessa strömmar kan i sin tur resultera i uppvärmning och bildning av hotspots; de kan också resultera i oönskad utlösning av dessa kondensatorbanker. En specifik fråga som har diskuterats mycket tidigare är den potentiella överhettningen av neutralledaren på grund av höga nivåer av trippeltoner (150 Hz, 3e ton; 450 Hz, 9e ton. osv) i lågspänningsnät.

En annan närelaterad effekt av höga övertonsnivåer är felaktig funktion av skyddsanordningar, särskilt oönskade utlösningar.

På kundsidan kan övertoner resultera i fel på kondensatorn på nätsidan av utrustning, felaktig funktion av styrning av utrustning, bildning av hotspots och mekaniska oscillationer i elektriska motorer, eller oönskad utlösning av utrustning. Det finns begränsad med information om hur modern elektronisk utrustning påverkas av övertoner, mellantoner och supratoner. Det kan vara att de helt enkelt inte påverkas av nuvarande nivåerna, men det kan också vara att det inte inses att problemen har med vågformsdistorsion att göra. Och då kan det bli problem i framtiden när nivåerna ökar, till exempel på grund av nya resonanser och emission från fordonsladdning och vätgasproduktion.

Konsekvenserna av mellantoner är alla relaterade till att de inte är synkroniserade med kraftsystemets frekvens. Denna "icke-synkroniseringsfrekvens" kan visas på DC-sidan av en likriktare och orsaka störningar där. Ljusflimmer med kompaktlysrör och LED-lampor är ett vanligt exempel [23][24][25].

3 Spridning av övertoner

Detta kapitel behandlar utveckling av modellerna för att studera spridning av övertoner i låg- och mellanspänningsnät. Även om projektet handlar om övertoner i lågspänningsnät kom det fram snabbt att mellanspänningsnätet spelar en stor roll i spridningen. Det är därför att inriktningen blev "låg- och mellanspänningsnät".

3.1 TRANSFERIMPEDANSEN

Begreppet "impedans" är grundläggande för nästan alla beräkningar i elnätet. Impedansen ger förhållandet mellan spänning och ström och det brukar vara spänning och ström på samma ställe i nätet. Konceptet "transferimpedans" utvidgar detta något och det är förhållandet mellan spänningen någonstans i nätet och strömmen någon annanstans i nätet. Det illustreras i Figur 9, där "K" kan antas att vara en källa av övertonsemission och "M" en mottagare av emissionen; det kan vara ett mätinstrument, en apparat som är känslig mot övertoner, eller bara någon punkt i nätet där det finns intresse till att veta nivåer av övertoner.

Transferimpedansen definieras som förhållandet mellan (övertons)spänningen hos M och (övertons)strömmen som injekteras hos K:

$$Z_{tr} = \frac{U_m}{I_k}$$



Figur 9 Transferimpedansen

Konceptet transferimpedans är ingenting nytt och har använts under många år [26, 27]; vid belastningsfördelningsberäkningar används vanligen en hel matris av sådana impedanser. Transferimpedansen har också använts för att modellera luftledningarna, för att studera hur störningar påverkar mätningar [28] och för att studera spridning av spänningsdippar på grund av fel [29].

Mer nyligen, i Elkraftgruppen vid Luleå tekniska universitet, har transferimpedansen använts för att studera spridning av övertoner i vindkraftparker [30], för att studera spänningsobalans, spänningsökning och övertoner på grund av solcellsanläggningar [31], och för att studera spridning av supratoner i lågspänningsnät [32]. Vid tidigare övertonsstudier kring solcellsanläggningar, som sammanfattas i [L] har det bara tagits med det lokala lågspänningsnätet. I detta projekt har även mellanspänningsnätet och andra lågspänningsnät anslutna till samma mellanspänningsnät tagits med i beräkningarna.

För att beräkna transferimpedansen, beräknas det först en transferadmittansmatris för delen av nätet som studeras. Det finns enkla metoder för att skapa admittansmatrisen

från impedans av alla komponenter i nätet. Impedansmatrisen nås genom att invertera admittansmatrisen. Det finns alternativa metoder som använder datorns beräkningskraft mer effektivt, men de har inte använts i detta projekt. Resultaten påverkas inte av detta, beräkningarna tar bara mer tid.

3.2 INDIVIDUELLA OCH GLOBALA TRANSFERIMPEDANSEN

I projektet skiljas det mellan den individuella transferimpedansen ("individual transfer impedance", på engelska) och den globala transferimpedansen ("overall transfer impedance", på engelska). Begreppen introducerades i [33] för att beskriva spridning av övertoner i vindkraftsanläggningar. De är inte något som används brett i litteraturen, men det har visats sig vara lämpliga begrepp för att beskriva hur individuella och multipla källor påverkar övertonsspänningen.

Begreppet "individuell transferimpedans" är samma som det som kallades "transferimpedans" i förra avsnitt, den anger hur mycket emission någon annanstans påverkar spänningsdistorsionen på en viss punkt i nätet. Den individuella transferimpedansen kan beräknas utan någon information om emissionen. Information om elnätet finns oftast enklare tillgängligt än information om emission, säkert där det gäller framtida utvecklingar. Finns det information om elnätet, då går det att räkna ut (den individuella) transferimpedansen.

Den "globala transferimpedansen" kvantifierar hur mycket multipla källor, på olika ställen i nätet, bidrar till spänningsdistorsionen. Här behövs det en del antaganden om emission: hur emissionen är spridd över de olika källorna och hur sammanlagringen är mellan de olika källorna. I referens [A] definieras den globala transfer impedansen $O_r(f)$ på följande sätt:

$$O_r(f) = \sqrt[\alpha]{\sum_{k=1}^N [H_{rk}(f)]^\alpha}$$

där r är det mottagande stället i nätet (där som det finns intresse i att veta övertonsspänningarna), $k = 1:N$ är alla ställen där det finns källor av övertoner, och α är aggregeringsexponenten som har antagits. Aggregeringsmodellen enligt IEC 61000-3-6 [34] har använts här, där $\alpha = 2$ är används i de flesta beräkningar.

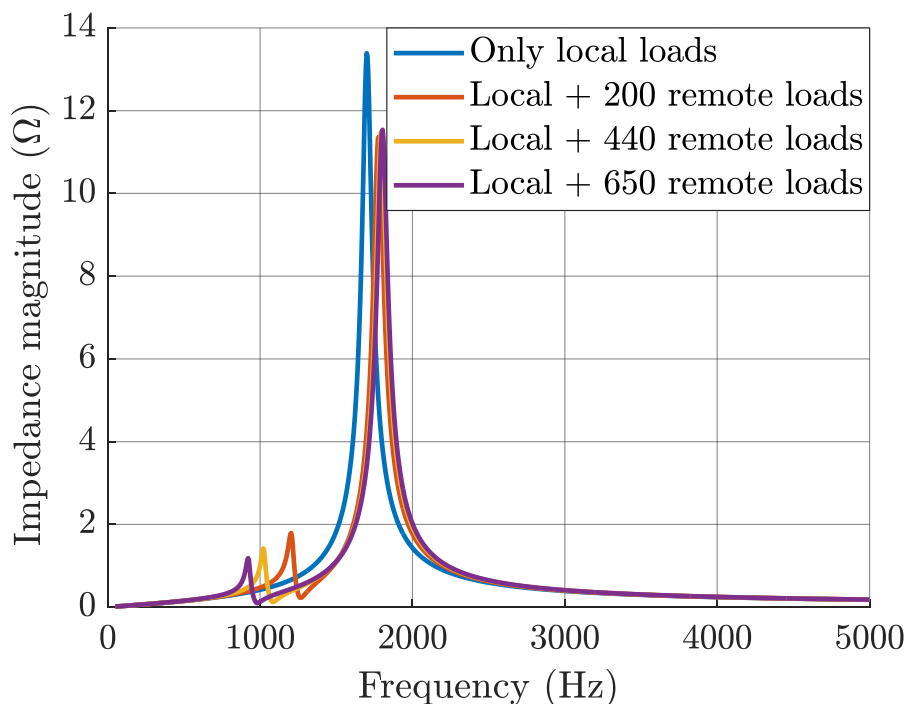
Aggregeringsexponenten används för att hantera utjämnningseffekten, dvs., för att kompensera för det faktum att övertonernas fasvinkel kan variera mellan olika källor och detta gör att man inte får en linjär ökning av amplituden med antalet källor.

3.3 SPRIDNING MED KÄNDA VÄRDEN FÖR IMPEDANSERNA

En studie av spridningen visas i detalj i referens [A], där en viktig slutsats är att mellanspänningsnätet och andra lågspänningsnät (anslutna till samma mellanspänningsnät) spelar en stor roll för spridning av övertoner.

3.3.1 Källimpedansen

Figur 10 visar källimpedansen, för en övertonskälla som skulle ansluta sig direkt på lågspänningssidan av distributionstransformator, för fyra olika nätkonfigurationer.



Figur 10 Källimpedansen för olika antal avlägsna kunder.

Figuren visar två toppar i impedansen; det är här som en relativ liten amplitud i strömövertoner kan leda till höga spänningsövertonsnivåer. Högsta toppen finns något under 2 kHz; den är på grund av en parallellresonans mellan distributionstransformatorns induktans och all kapacitans ansluten till det lokala lågspänningsnätet. Numera är det huvudsakligen kapacitans hos lågspänningsapparater som bidrar till den totala kapacitansen; bidraget från lågspänningskablar kan försummas. Det är denna resonans som har tagits med bland annat i referens [L] där det visas att kapacitans från nya solcellsanläggningar kan leda till en signifikant minskning av denna resonansfrekvens (dvs., resonansfrekvensen flyttas till en lägre frekvens).

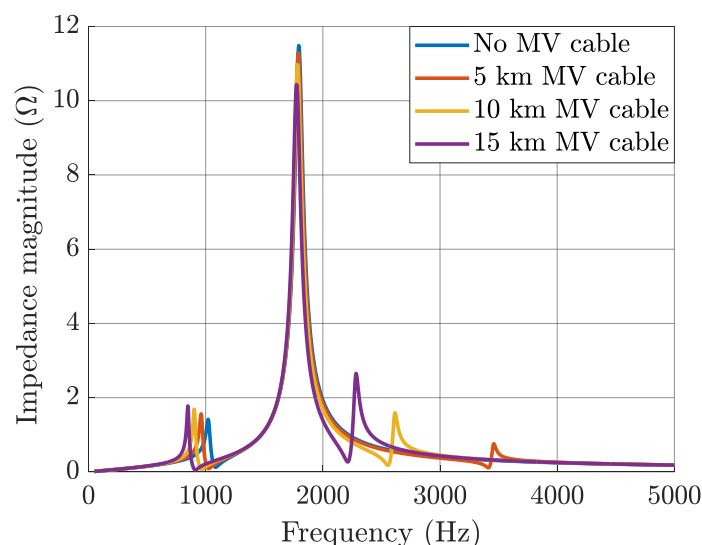
Det finns också en topp i impedansen kring 1 kHz; det är en kombination av en serieresonans och en parallellresonans nära varandra i frekvensen. Som vid alla (överton)resonanser finns det en induktans och en kapacitans inblandade; induktansen är huvudsakligen induktansen av transformatorn som matar in till mellanspänningsnätet, medan kapacitansen bestäms av mellanspänningskablar och apparater anslutna till lågspänningsnätet. Det har inte tagits med här att det skulle finnas kondensatorbatterier anslutna till mellanspänningsnätet; sådana brukar resultera i höga värden för impedansen i frekvensområdet kring 5e och 7e ton. Denna förenklade beräkning ger intrycket att toppen kring 2 kHz är betydligt högre än den kring 1 kHz. Här ska det dock påpekas att det har använts ganska enkla modeller, där bland annat ökning av dämpning vid frekvensen (till exempel på grund av skinneffekten) inte har tagits med. Denna ökade dämpning kommer att leda till att impedansen vid resonansfrekvensen minskar i amplitud. Det finns dock stora osäkerheter i modellerna för kundernas impedans, så att det bestämdes att göra en begränsning till ganska enkla modeller och i stället diskutera osäkerheterna i resultat på grund av detta.

En annan sak som måste tas med i bedömning av figuren är att det finns betydligt mer emission kring 1 kHz än kring 2 kHz. När resonanser flyttas till under 500 Hz, blir det höga emissionsnivåer som riskeras att förstärkas.

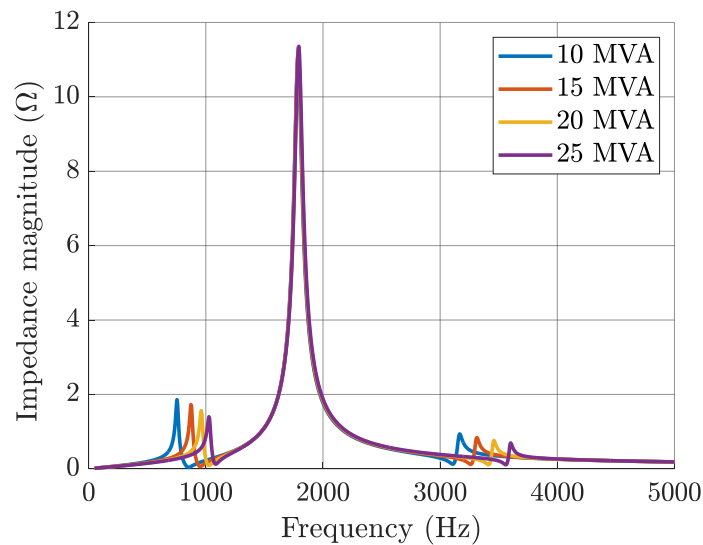
Tillbaka till Figur 10, där det visas hur resonansfrekvenserna ändras när flera avlägsna kunder tas med i modellen. Modellen utan avlägsna kunder ("only local loads") kommer överens med modellen som har använts förut (bland annat i referens [L]). Att ta med mellanspänningsnätet och avlägsna kunder har bara en mindre påverkan på resonansstoppen kring 2 kHz; den blir något högre i frekvens och något mindre i amplituden men allt detta är inom osäkerheter på grund av osäkerheten i modellen för kundimpedansen.

Att ta med mellanspänningsnätet och avlägsna kunder introducerar en ny topp kring 1 kHz, som flyttar till lägre frekvenser ju fler avlägsna kunder det tas med i modellen. Detta visar på vikten av att ta med mellanspänningsnätet och avlägsna kunder i övertonsberäkningarna.

Ytterligare resultat visas in Figur 11 och Figur 12 mer mellanspänningskablar (högre kapacitans) ger en ytterligare minskning av resonansfrekvensen kring 1 kHz; större transformatorer (lägre induktans) ger en ökning av denna frekvens. Det introduceras också nya resonanser över 2 kHz. Här finns det dock så stora osäkerheter i modeller, att vi inte kommer att dra slutsatser om dessa här. Supratoner (frekvenser över 2 kHz) behandlas i stället i Kapitel 5.



Figur 11 Källimpedans vid olika mängden kabel i mellanspänningsnätet.



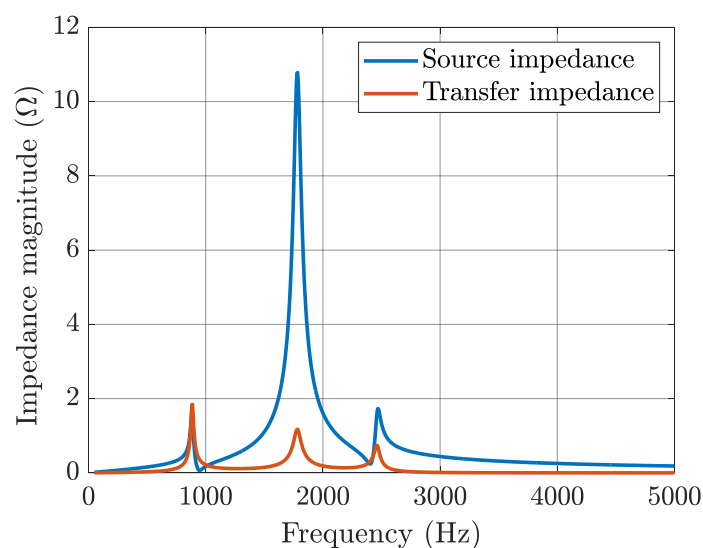
Figur 12 Källimpedans vid olika storlek av transformatorn som matar in till mellanspänningsnät

3.3.2 Transferimpedansen

Figur 13 visar både källimpedansen och transferimpedansen på samma skala. Vid 1 kHz är amplituderna av källimpedansen ("source impedance") och transferimpedansen jämförbara; vid högre frekvenser är det källimpedansens amplitud som är betydligt högre. Övertonsspänningen blir summan av:

- emission i lokala nätet gånger källimpedansen,
- emission i avlägsna näten gånger transferimpedansen.

Emission i avlägsna näten är betydligt större, eftersom det finns flera av sådana medan det bara finns ett lokalt nät. Det förväntas därför att spänningsdistorsion vid den första toppen bestäms mest av emission från avlägsna kunder och mindre av emission från lokala kunder. Något förenklat gäller det att "spänningsdistorsionen i lågspänningsnätet bestäms i huvudsak av mellanspänningsnätet".

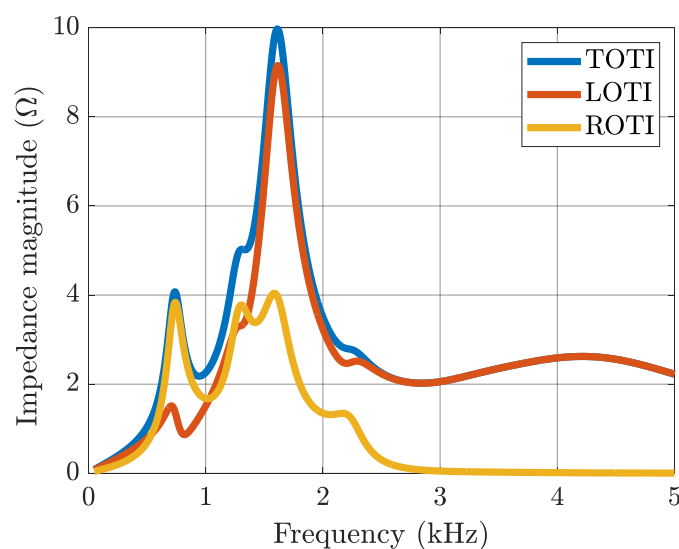


Figur 13 Källimpedansen och transferimpedansen till samma ställa i nätet.

Resultat som visas i Figur 10 tom Figur 13 beräknades för ett generaliserat mellanspänningsnät; det gjordes även beräkningar för ett specifikt mellanspänningsnät, men slutsatserna var ganska lika. Detaljer visas i referens [A].

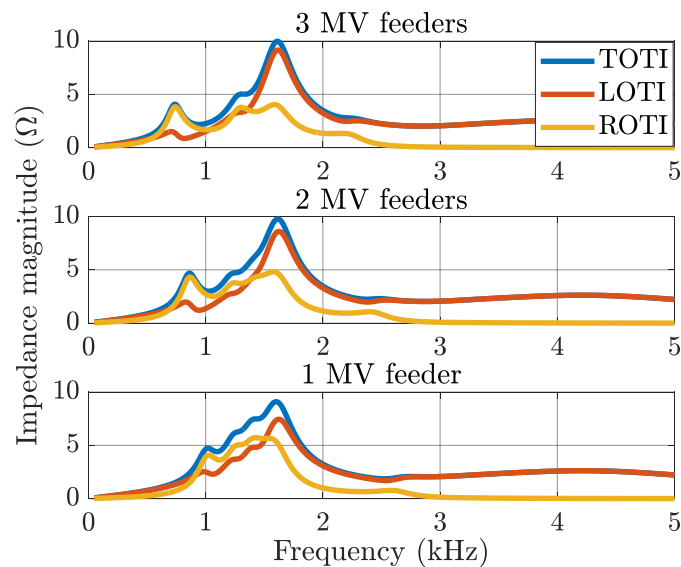
3.3.3 Globala transferimpedansen

För att kunna kvantifiera hur och för vilka frekvenser emission från lokala eller avlägsna källor dominerar har den globala transferimpedansen beräknats; resultat visas i Figur 14 och Figur 15, där TOTI, LOTI och ROTI står för "total overall transfer impedance", "local overall transfer impedance" och "remote overall transfer impedance".



Figur 14 Globala transferimpedanserna från lokala lågspänningsnät (LOTI), från avlägsna lågspänningsnät (ROTI) och totalen (TOTI)

Det som tydligt visas i Figur 14 är att bidraget från avlägsna kunder (ROTI) dominerar upp till ungefär 1 kHz; för högre frekvenser är det emission från kunder anslutna till det lokala lågspänningsnätet (LOTI) som dominerar. Figur 15 visar hur storleken av mellanspänningsnätet påverkar de globala transferimpedanserna. För större nät (fler matarkablar) flyttas den första resonanstoppen (under 1 kHz) till lägre frekvenser, medan den totala globala transferimpedansen (TOTI) inte påverkas signifikant.



Figur 15 Globala transferimpedanserna för olika storleken av mellanspänningsnät

De sista två figurerna (Figur 14 och Figur 15) har beräknats för ett mer realistiskt elnät än de tidigare figurerna. Det förenklade, mer generella, nätet ger rätt resonansfrekvens men för att få rätt impedans som funktion av frekvens mellan resonansfrekvenserna behövs det en mer detaljerad och verklighetsnära modell. Den huvudsakliga slutsatsen, att mellanspänningsnätet spelar en stor roll, gäller dock fortfarande.

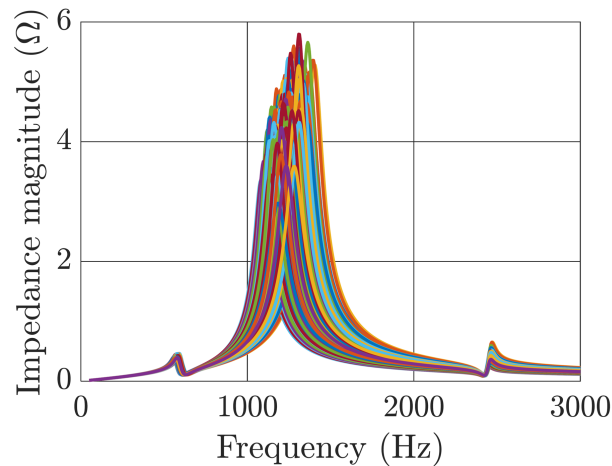
3.4 OSÄKERHETER I IMPEDANSERNA

En av slutsatserna från studien som visades i Avsnitt 3.3 är att impedansen som representerar kunden ska tas med i beräkningarna. Det finns dock mycket begränsad information om hur stor denna impedans är inom övertonsområdet. Det som har använts här i beräkningarna är impedansmodellen som kom fram från mätningar som gjordes i Tyskland för ett antal år sedan. Det hittades inga andra relevanta modeller i litteraturen; att komma fram till sådana generiska modeller kräver många och kontrollerade mätningar och det finns få universitet som har resurser för detta. Det kan dock antas, även om det är utan bevis hittills, att impedanserna för tyska hushåll är ganska lika som för svenska hushåll, så länge det inte finns någon elvärme. För stadsmiljö är det ett rimligt antagande.

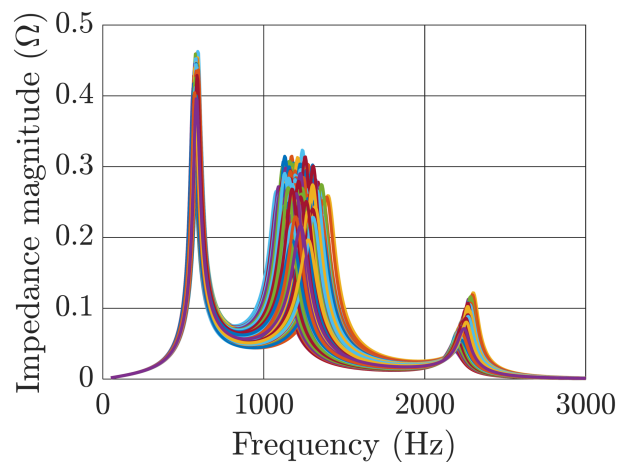
Det gjordes en studie (beskrivet i detalj i referens [B]) om hur mycket osäkerhet i kundimpedanserna påverkar käll- och transferimpedansen. För detta har det förenklade generella nätet från Avsnitt 3.3 använts. Det har introducerats osäkerhet i kundimpedansen genom att anta en sannolikhetsfördelning för varje krets-komponent i modellen för denna impedans. Käll- och transferimpedanserna har beräknats för 1000 slumpmässigt valda värden för dessa komponenter. Resultat visas i Figur 16 för källimpedansen och i Figur 17 för transferimpedansen.

Det visas att osäkerheterna i kundimpedanserna leder till stora osäkerheter i käll- och transferimpedansen. En noggrann observation av figurerna visar dock att de sistnämnda osäkerheterna är begränsade till resonansstopparna kring 1500 Hz; resonansstopparna kring 700 Hz är relativt oberoende av osäkerheterna i kundimpedansen. Resonansen kring 1500 Hz beror på impedanser av kunderna anslutna till det lokala lågspänningsnätet; här finns det ett begränsat antal kunder med

liten möjlighet till utjämning pga. variationer i fasvinklar. Resonansen kring 800 Hz beror på impedanserna av alla kunder, där det finns mycket större möjlighet till utjämning. Det som kallas för "centrala-limit teorem" säger att osäkerhet i medelvärdet minskar med roten av antalet bidrag till medelvärdet. Antalet bidrag är i detta fall antalet kunder i lokala lågspänningsnätet eller totala antalet kunder. Resonansstoppen kring 2200 Hz visar också en ganska stor osäkerhet på grund av osäkerhet i kundimpedansen, framför allt i amplitud, dock mindre än mellan 1000 Hz och 1500 Hz.



Figur 16 Källimpedansen som funktion av frekvens för många olika värden av kundimpedansen

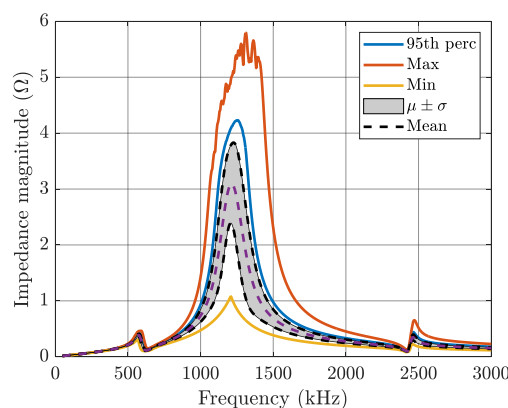


Figur 17 Transferimpedansen som funktion av frekvens för många olika värden av kundimpedansen; observera skillnaden i vertikal skala jämfört med Figur 16.

En av slutsatser som kan dras från detta handlar om variationer i käll- och transferimpedanser på grund av utrustning hos kunder som kopplas in och ur. Antar man en viss, ganska kort, period, till exempel en söndagseftermiddag mellan 12:00 och 16:00 kan det förväntade värdet av kundimpedansen antas konstant. Faktiska värdet av impedansen beror mycket på vilka apparater som är anslutna till nätet och det i sin tur beror på folkets aktivitetsmönster. Det kommer att finnas variationer mellan individuella hushåll men genomsnittet över alla hushåll för ett mellanspänningsnät kan antas konstant.

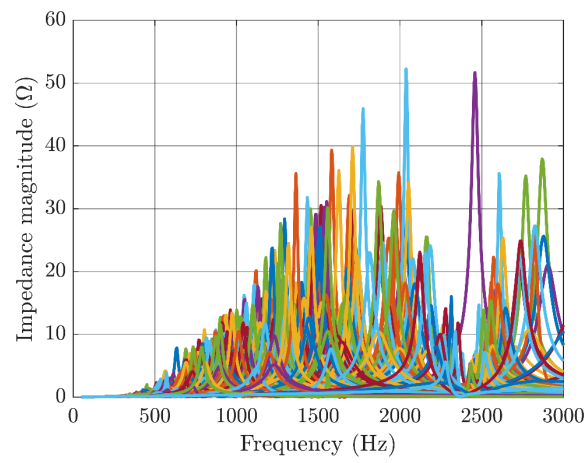
I stokastiska termer betyder det att förväntade värdet är känt medan det finns en sannolikhetsfördelning som kvantifierar osäkerheten; det som var underlag till Figur 16 och Figur 17 Resultat kan tolkas så här: under en viss period (som söndagseftermiddag) kommer impedanstoppet på grund av mellanspänningsnätet (kring 800 Hz i detta exempel) vara ganska konstant, medan impedanstoppet på grund av lågspänningsnätet (mellan 1000 Hz och 1500 Hz) varierar mycket i båda frekvens och amplitud, när det kopplas på och av utrustning i det lokala lågspänningsnätet. Det blir därför betydligt större variationer över tid för övertonsspänning mellan 1000 Hz och 1500 Hz än för den kring 800 Hz.

Resultaten presenteras, för källimpedansen, på ett något annorlunda sätt i Figur 18. Här kvantifieras osäkerheten i källimpedansen genom att ange 95-percentilen samt medelvärdet och standardavvikelsen. Högsta och lägsta värde, som resulterar från en sådan Monte-Carlosimulering beror mycket på antalet sampel (1000 i detta fall) och försiktighet ska beaktas i tolkning av värdena. Det som figurer dock visar är en stor spridning (ungefär gråa området) av impedansen och därmed en stor variation i övertonsnivåerna även om lasten är genomsnittligt konstant i sammanställning.



Figur 18 Osäkerhet i källimpedansen på grund av osäkerhet i kundimpedansen.

Hittills har det antagits att kundimpedansen är känd, eller i alla fall att det finns en känd fördelningsfunktion. Så är dock inte fallet i verkligheten: det finns som sagt begränsat med information om kundimpedansen och även genomsnittlig kundimpedans är till stor del okänd. Denna osäkerhet har modellerats i referens [B] genom att anta en hög korrelation mellan kundimpedanserna. Det finns fortfarande samma osäkerhet i kundimpedansen, men det har antagits att de är alla nästan lika. Resultat av 1000 slumpmässigt valda värden visas i Figur 19. Det som figuren visar är att källimpedansen kan vara "nästan vad som helst". På samma sätt kan slutsatsen dras att källimpedansen kommer att ändras mycket vid tid av dagen, veckan och året.



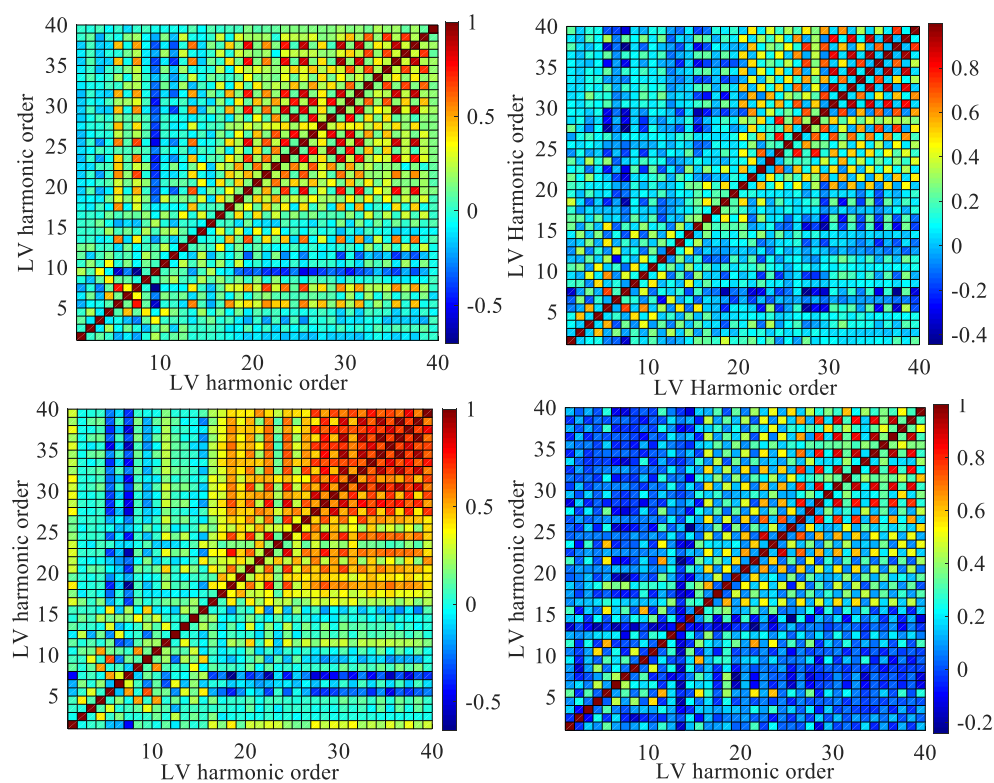
Figur 19 Källimpedans som funktion av tid, för många olika värden av kundimpedanser, dock lika för alla kunder.

4 Mätningar

Projektet har haft tillgång till mätningar av övertonsspänningar på lågspänningssidan vid 30 distributionstransformatorer under en period av ungefär 1,5 år. Vi kommer att referera till staden där mätningarna utfördes som Birkhamn, för att inte behöva identifiera den.

4.1 KORRELATION MELLAN OLIKA ÖVERTONER

Korrelationskoefficienten har beräknats mellan tidserier för olika toner och resultat presenterats för spänningarna på lågspänningssida av 6 olika transformatorer i Birkhamn, i Figur 20. Detaljerna finns i referens [C] och [D]. Det som figuren visar är att det finns stora skillnader mellan individuella mätpunkter. Det finns till exempel en hög positiv korrelation mellan 5e och 7e överton vid tre av mätpunkterna, men för fjärde mätpunkten finns det en låg korrelation. Det finns också höga positiva korrelationer mellan flera högre toner, men inte mellan alla, för de flesta mätpunkter. Det finns i allmänhet en låg korrelation mellan låga toner och höga toner, men även det gäller inte för alla mätpunkter.



Figur 20 Korrelation mellan tidserier av övertonsspänningar vid fyra olika transformatorer.

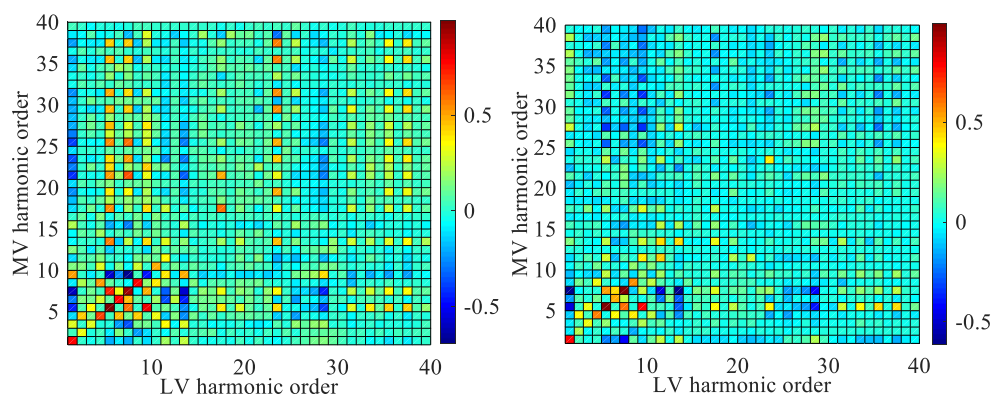
Det går inte att dra många allmänna slutsatser från dessa korrelationsmatriser, men matrisen är ett sätt att presentera mätresultat och att dra slutsatser om individuella mätpunkter. Om det finns en hög korrelation mellan olika frekvenser, då tyder det på ett gemensamt ursprung. Det kan, i sin tur, hjälpa till att identifiera de dominerade övertonskällor.

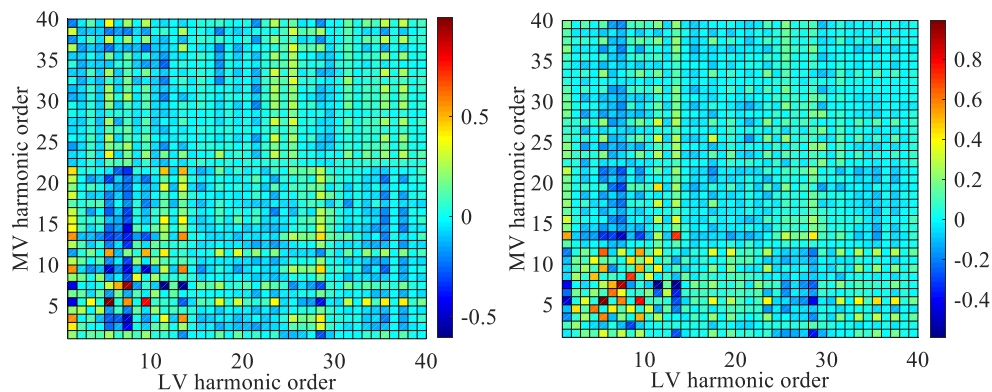
Här ska det läggas till något om tolkningen. En hög (positiv eller negativ) korrelation betyder att punkterna ligger nära en rak linje. Det betyder att avvikelser från medelvärdet varierar på samma (eller precis på motsatt) sätt. Det tyder på att det finns ett gemensamt ursprung för variationerna; medelvärdet kan dock ha ett helt annat ursprung.

En tillämpning av metoden har varit att studera om det finns ett gemensamt ursprung för övertonsnivåer mellan olika faser. Detaljer av detta hittas i referens [D] där det har använts mätningar i ett bostadsområde (12 hushållskunder) som matas från samma transformator. Det finns hög positiv korrelation mellan spänningar för samma överton, i samma fas, men olika kunder. För olika faser, men samma kund, fanns det hög positiv korrelation upp till 13e överton, men inte för 9e och 12e överton. För högre frekvenser fanns det låg korrelation. Det finns olika möjliga förklaringar till detta: till exempel att amplituden för tonerna tom. 13 bestäms av totala mängden emission under samma mellanspänningsnät; på grund av stora antalet apparater blir det en jämn fördelning över faserna. Det behövs ytterligare studier för att kunna bekräfta detta. Att 9e och 12e överton uppför sig annorlunda har att göra med att de är huvudsakligen av nollföljds-karaktör och därmed blockeras till en större del av distributionstransformatorn.

4.2 KORRELATION MELLAN LÅG- OCH MELLANSPÄNNINGSNÄT

Korrelationsmatrisen har också använts för att jämföra övertonsspänningar i låg- och mellanspänningsnät. Resultat visas för fyra transformatorer i Figur 21. Även här finns det skillnader mellan transformatorer, men för alla finns det en hög positiv korrelation för 5e och 7e överton. Det finns höga positiva korrelationer för vissa andra övertoner också, men huvudsakligen blir det låg korrelation efter ungefär 11e överton. Slutsatsen från detta är att 5e och 7e överton uppstår på grund av all emission i eller under mellanspänningsnätet medan de högre tonerna uppstår i lågspänningsnätet.





Figur 21 Korrelation mellan övertoner på låg- och mellanspänningssida av fyra transformatorer

Mätresultat från korrelationsmatriserna bekräftar resultat från beräkningarna av käll- och transferimpedanser i Kapitel 3 av rapporten. För 3e och 9e överton förväntas det ingen hög korrelation, eftersom de till en större del blockeras av transformatorerna, men att det skulle finnas en hög positiv korrelation för lägre frekvensen är något som kom också fram från transferimpedanserna. Där kom det också fram att högre frekvenser skulle uppstå i lågspänningsnätet och därmed ha en låg korrelation med nivåerna i mellanspänningsnätet; även detta bekräftas av figuren.

4.3 KORRELATION MELLAN OLIKA MELLANSPÄNNINGSNÄT

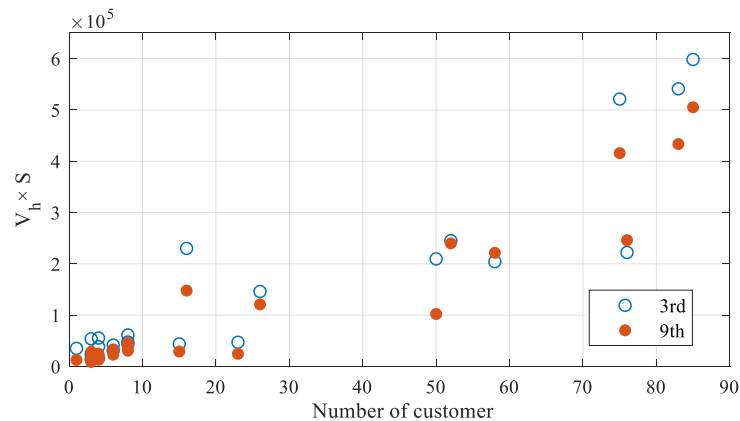
Korrelationerna har beräknats för 5e och 7e överton för tre mellanspänningsnät som matas från samma 40-kV nät. Resultat visas i Tabell 3. För 5e överton finns det höga positiva korrelationer, som nästan bara kan vara för att 5e överton uppstår i 40-kV nätet. För 7e överton är korrelation hög men det kan ha att göra med att det finns liknande tidsvariationer av källorna som orsakar 7e överton. Om det skulle, till exempel, vara på grund av datorskärmar i kontorshus, då skulle det förväntas lika tidsvariationer för olika mellanspänningsnät.

Tabell 3 Korrelation mellan olika mätpunkter för 5e och 7e ton.

	5e ton			7e ton			
	MSP A	MSP B	MSP C	MSP A	MSP B	MSP C	
MSP A	1,000			MSP A	1,000		
MSP B	0,995	1,000		MSP B	0,625	1,000	
MSP C	0,977	0,975	1,000	MSP C	0,616	0,831	1,000

4.4 AGGREGERING AV 3E OCH 9E ÖVERTON

Det har gjorts en uppskattning av den sammanlagda emissionen av 3e och 9e överton för alla kunder på lågspänningssidan av transformatorerna i Birkahamn. Detaljerna visas i referens [C]. Vertikala skalan anger uppmätta spänningsdistorsionen multiplicerat med transformatorns märkeffekt. Per-unit impedansen av distributionstransformatorer är relativt oberoende av märkeffekten; impedansen är därmed ungefär omvänt proportionell med märkeffekten; spänning gånger märkeffekten är därmed en uppskattning av strömmen. Resultat visas i Figur 22



Figur 22 Uppskattade emission vid 3e och 9e överton, som funktion av antalet kunder per distributionstransformator.

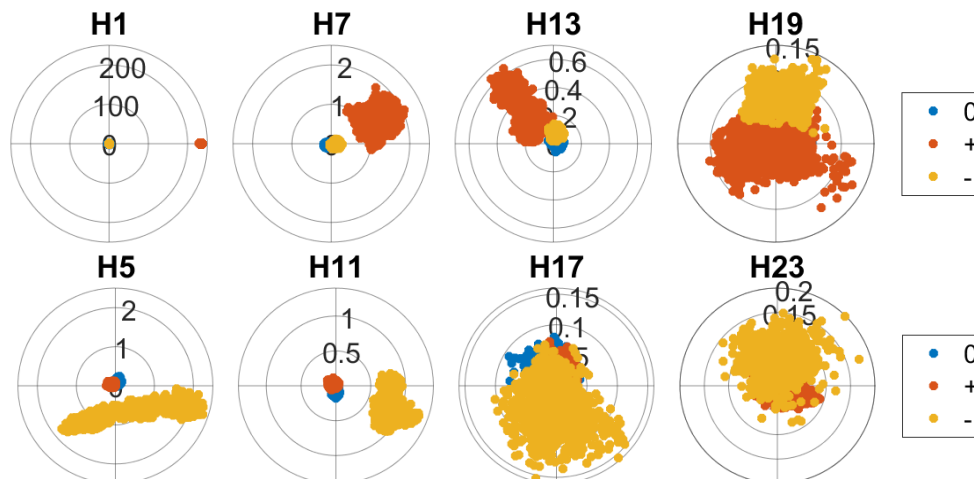
Det som figuren visar är att emission vid 3e och 9e överton är ungefär proportionell med antalet kunder anslutna till transformatorn. Det finns begränsat med aggregering mellan kunderna. Här ska det påpekas att resultat från några andra studier i projektet leder till andra slutsatser för 9e överton. Frågan om aggregeringen är därmed fortfarande inte helt besvarat.

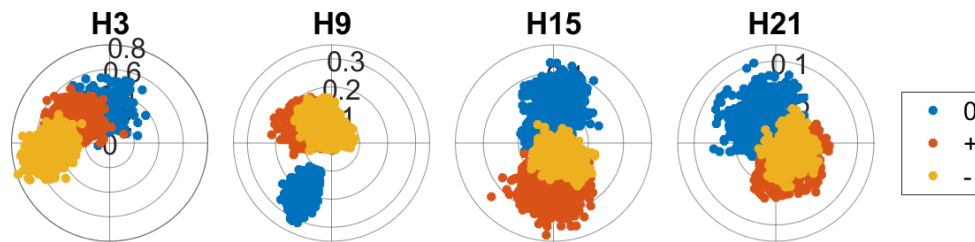
4.5 BALANSERADE OCH OBALANSERADE ÖVERTONSKOMPONENTER

Det har gjorts mätningar för amplitud och fasvinkel av övertonsspänning vid tre olika mätställen. Detaljer av mätningar och mätresultat visas i referens [E]. Amplitud och fasvinkel av övertonerna har använts för att beräkna symmetriska komponenter och för att bedöma huruvida övertonsspänningar är balanserade i ett trefassystem.

4.5.1 Bostadsområde - strömmar

Figur 23 visar resultat för övertonsspänningar i ett bostadsområde. För grundtonen (H1), 7e överton, 13e överton och 19e överton skulle det, i ett perfekt symmetriskt trefassystem, bara finnas en plusföljdskomponent (röda prickar). För grundtonen, 7e och 13e överton är det en bra approximation. För 19e överton visas det dock en stor minusföljdskomponent. Observera att fasvinkeln av grundtonen är noll enligt definitionen av fasvinkeln som har använts här.





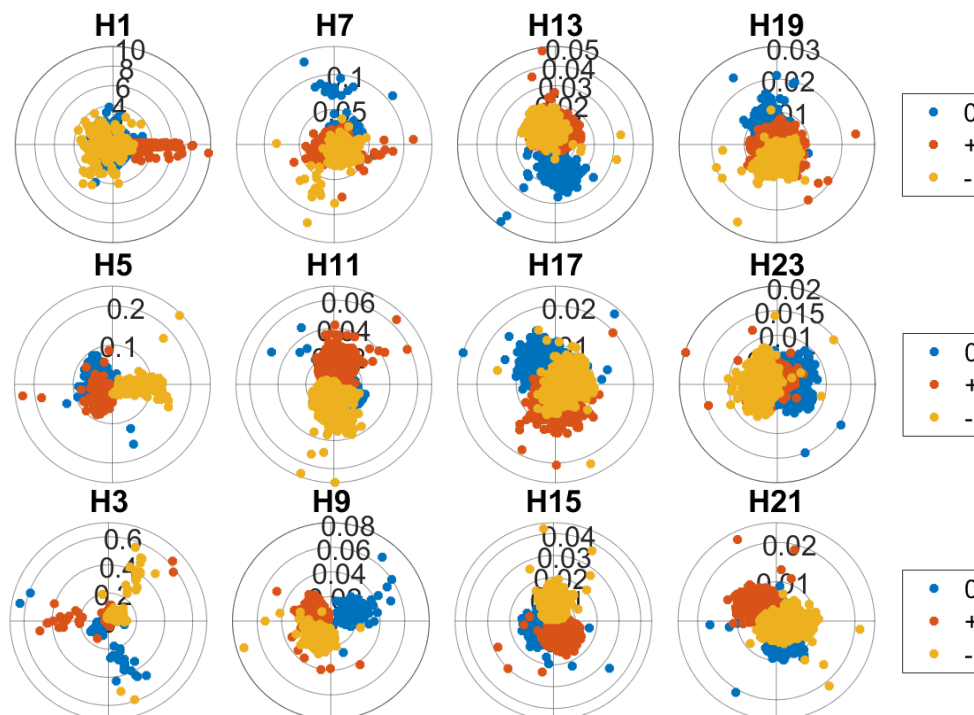
Figur 23 Övertonsspänningar i ett trefasnät, presenterat som komplexa symmetriska komponenter; 0, +, - refererar till noll-, plus-, och minusföljdskomponent.

För 5e, 11e, 17e och 23e överton förväntas det att minusföljdskomponent (gula prickar) skulle dominera och så är fallet för 5e och 11 överton. För 17e och 23 överton finns det dock en stor andel nollföljds- och plusföljdskomponenter.

För 3e, 9e, 15e och 21e överton förväntas det att nollföljdskomponenten (blåa prickar) skulle dominera. Det är dock inte fallet alls. För alla dessa fyra övertoner finns det en stor andel plus- och minusföljdskomponenter i övertonsspänningar.

4.5.2 Bostadsområde - strömmar

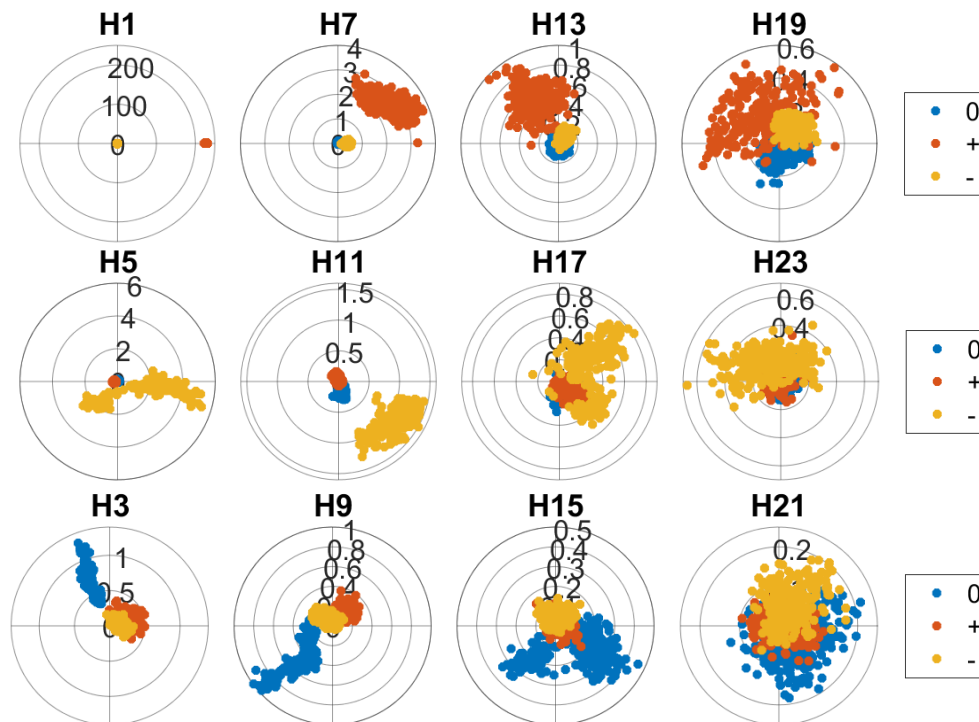
Resultat för strömmen vid en av kunderna i bostadsområdet visas i Figur 24. Strömmens symmetriska komponenter inte har fördelningen som man skulle förvänta för ett symmetriskt trefassystem. Även grundtonsströmmen innehåller mer än bara plusföljdskomponenten. Det betyder att det inte finns någon jämn fördelning av lasterna över de tre faserna. Här handlar det om strömmen för en hushållskund, där det brukar finnas olika apparater anslutna till olika faser.



Figur 24 Övertonsströmmar vid en hushållskund, presenterat som komplexa symmetriska komponenter;

4.5.3 Kontorsområde spänningar

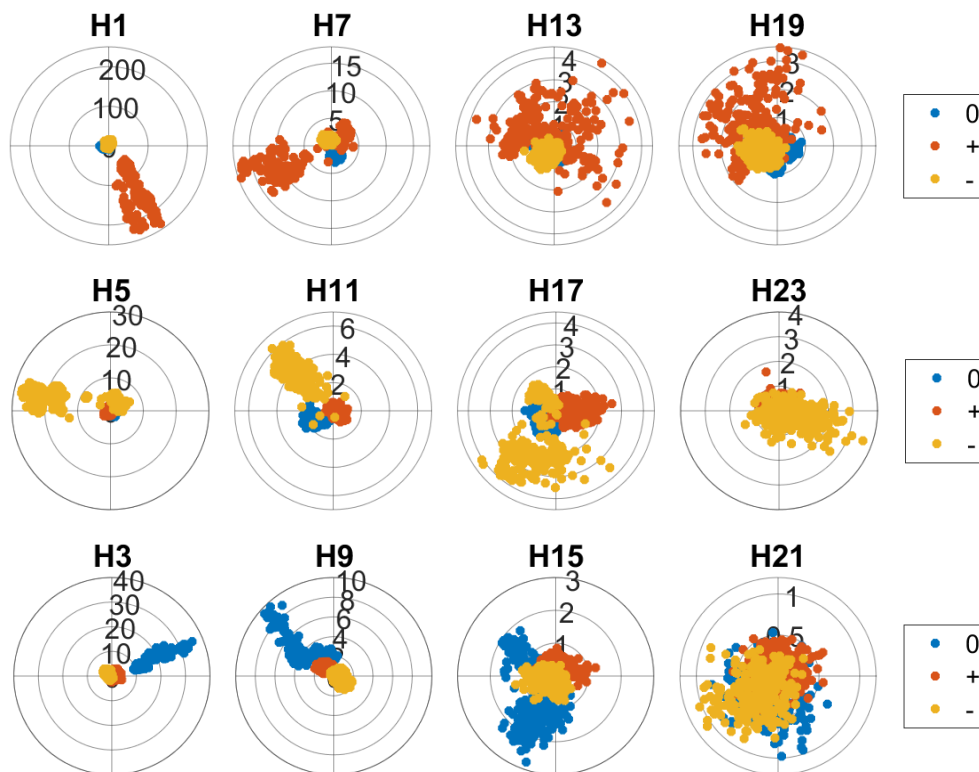
Mätningarna har upprepats i två områden där det fanns en stor del kontorslast; strömmarna för en av dessa visas i Figur 25. Jämfört med hushållsområdet finns det mer balans för 13e, 17e, 19e och 23e överton. Men även här blir obalansen större vid högre frekvenser. Observera 5e övertonsspänning som rör sig över ungefär 180 grader i fasvinkel, med ibland en amplitud nära noll. Den mest sannolika förklaringen till detta är att 5e övertonsspänning orsakas av både enfas- och trefaslaster. Under vissa timmar jämnar bidragen ut varandra och den resulterande 5e är övertonsspänningen nära noll.



Figur 25 Övertonspänningar (symmetriska komponenter) vid en kontorslast.

4.5.4 Kontorsområde – strömmar

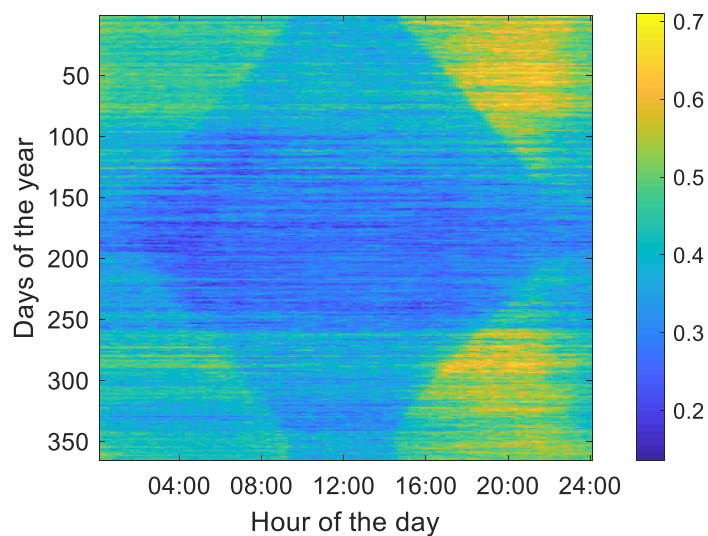
Strömmen vid ett av kontorsområden visas i Figur 26. Förloppet visar betydligt mindre osymmetri än vid hushållskunden.



Figur 26 Övertonsströmmar (symmetriska komponenter) vid en kontorslast.

4.6 MÄTNINGAR VID FLERA DISTRIBUTIONSTRANSFORMATORER

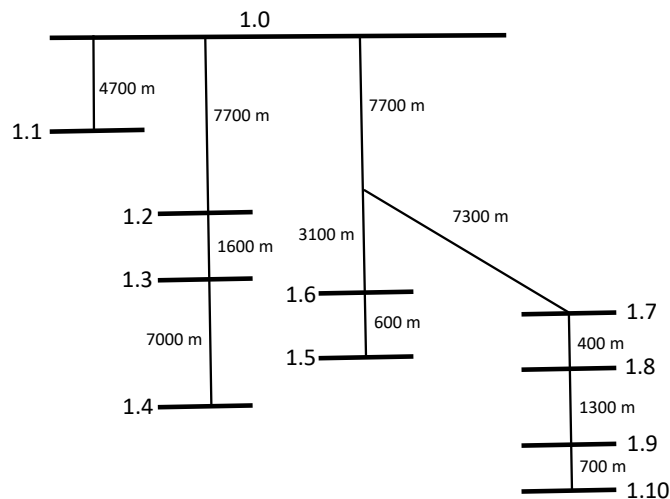
Det har gjorts mätningar vid ett 30-tal distributionstransformatorer i Birkhamn. Ett exempel visas i Figur 27; flera exempel av resultat visas i referens [1] och i [35].



Figur 27 9e-övertons spänning som funktion av tid-på-dagen och tid-på-året.

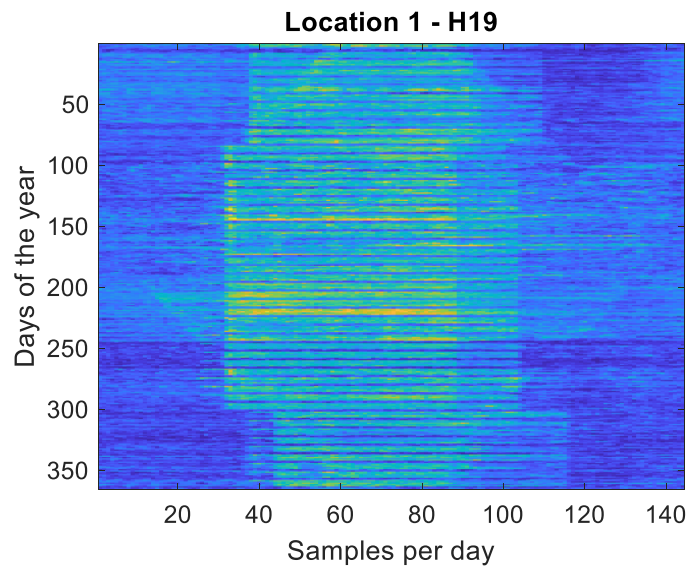
Det som visas i Figur 27 är hur nivåerna av 9e övertonsspänning varierar under dagen och under året. Rutan i blått som syns tydligt i figuren överensstämmer med solens uppgång och solens nedgång. En möjlig, och enligt författaren sannolik, förklaringen är att det har med gatubelysningen att göra. Det kan vara emission från gatubelysningen, nivåerna är lägre när solen är över horisonten, men det kan också vara att koppling av gatubelysningen ändrar transfer- och källimpedanserna. De högsta nivåer av 9e överton inträffar under kvällstid, vintern och hösten, efter solens nedgång. Belysning i hushåll är en sannolik förklaring.

Likadan representation visas i [35] för 10 mätpunkter, alla på lågspänningssidan av distributionstransformatorn. Figur 28 anger mellanspänningsnätet som förbinder de 10 mätpunkterna; 1.0 i figuren är inmatningen från högspänningsnätet; 1.1 tom 1.9 är position av distributionstransformatorena där mätningarna har gjorts på lågspänningssidan. Det finns fler distributionstransformatorer anslutna till detta mellanspänningsnät men de anges inte i figuren.



Figur 28 Del av mellanspänningsnätet i Birkahamn, med mätpunkterna angivna

Ett annat exempel, som ger ett annat mönster, visas i Figur 29. Mönstret som visas i figuren kommer från kontorstiderna; emission (i detta fall av 19e överton) är högre under kontorstiden än utanför kontorstiderna. Mönstret flyttas en timme över sommaren på grund av sommartid; mätarens klocka ställs inte om vid sommartid. Även solens uppgång och nedgång är synliga i figuren.

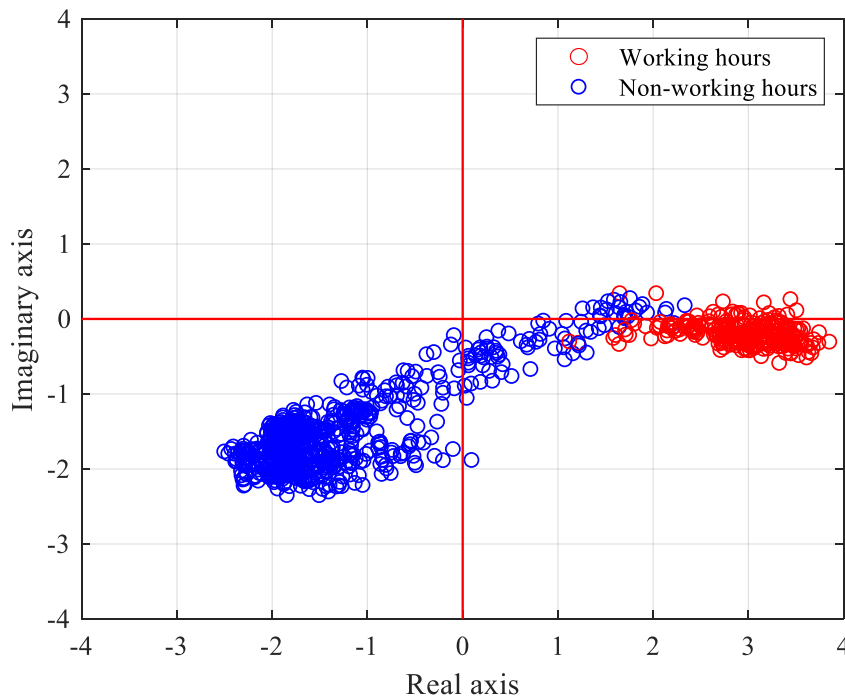


Figur 29 19e-tonns spänning som funktion av tid-av-dagen och tid-av-året.

En genomgång av resultat i [35] visar att det finns många frekvenser och mätpunkter där övertonsnivåer visar en tydlig ökning eller sänkning vid solens uppgång eller nedgång. Det finns fall där nivåerna är lägre under dagtid men också fall där nivåerna är betydligt högre under dagtid. Sådant tyder på en ändring i resonanserna vid på- och fränkoppling av belysning.

4.7 FASVINKEL AV 5E ÖVERTON

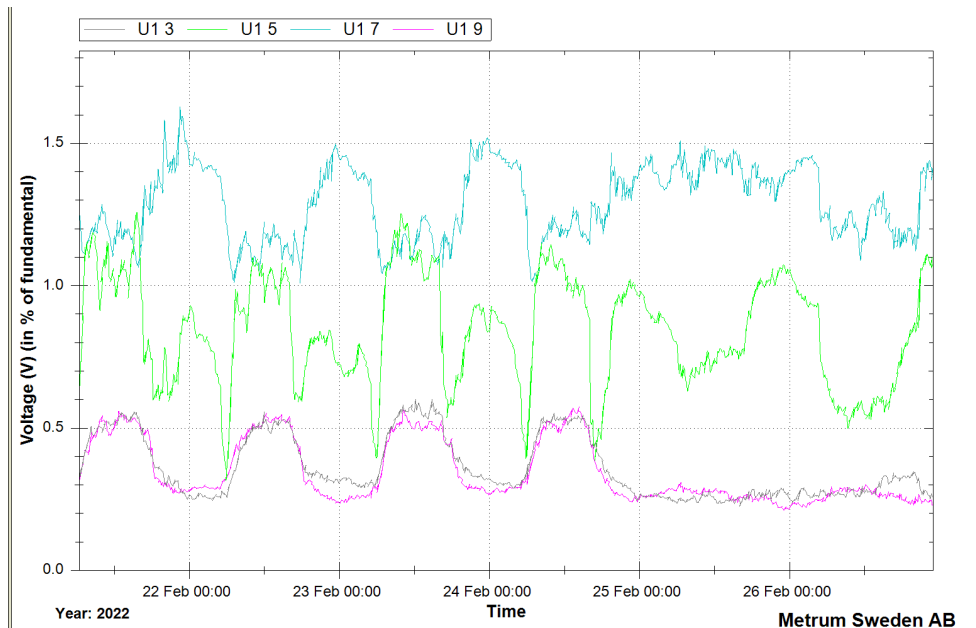
Det gjordes mätningar av övertonsspänningar på lågspänningssidan av distributionstransformatorn som matar ett kontorsområde. Mätaren ger både amplitud och fasvinkel av övertonerna. Figur 30 visar den komplexa 5e-tonsspänning under en vecka, där det anges om mätvärden gäller för kontorstimmar (rött) eller icke-kontorstimmar (blått).



Figur 30 Variation av 5e-tonsspanning under en vecka; kontorstimmar markeras som röda; icke-kontorstimmar som blåa.

Utanför kontorstider dominerar 5e övertons emission från trefaslaster; under kontorstid blir det även emission från enfaslaster. Det finns ungefär 180° fasskillnad mellan 5e överton från enfas- och trefaslaster. Vid vissa timmar är summan av dessa två bidrag nära noll; konsekvensen blir en 12-timmars period i amplituden av 5e tons spänning. Detta 12-timmars mönster är synligt i en stor del av staden, inte bara vid denna distributionstransformator. Ett exempel av detta mönster visas i Figur 31 under fyra arbetsdagar och helgen. Den stora variationen i 3e och 9e övertonernas amplitud sammanfaller med kontorstiderna under arbetsdagar; under helgen varierar nivåerna betydligt mindre. Variationerna i 5e överton visar ett maximum under kontorstiden, ett maximum till under kväll och natt, samt låga värden vid början och slutet av kontorstiderna. Det är här som övertonsspänningen ändrar fäsvinkel.

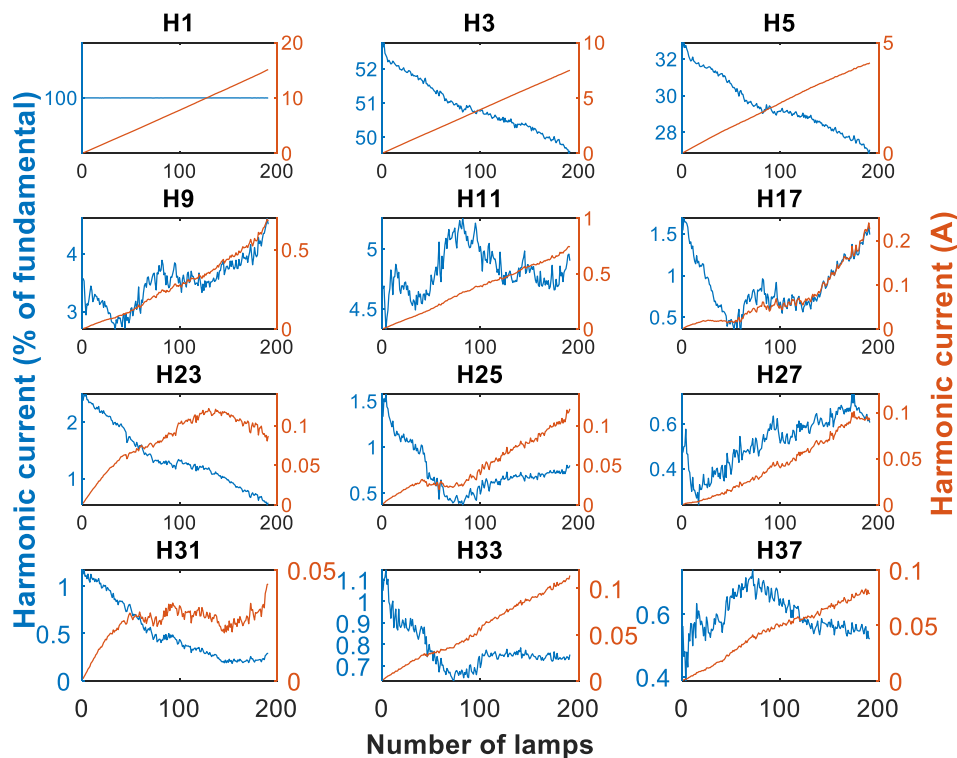
Denna kombination av emission från trefas- och från enfasutrustning är sannolikt vanligt i stadsområden, men det har inte visats ett sådant tydligt mönster i andra städer. Det kan dock finnas liknande mönster i andra städer, som ännu inte har upptäckts på grund av brist på analys av mätdata. Det ska tas i beaktning vid analys av mätningarna att ökande emission kan ge både en ökning och en sänkning av övertonsspänningen.



Figur 31 3e, 5e, 7e och 9e tonsspänning vid vägguttaget på ett kontor.

4.8 MÄTNINGAR VID BELYSNING

Eftersom gatubelysning verkar kunna ha en stor påverkan på övertonerna (se Avsnitt 3.5 och [35]) skulle det behövs mer information om emission från ett stort antal lampor. Att utföra ett kontrollerat experiment med gatubelysning har en del praktiska problem, men i stället har det analyserats mätningar från 200 LED lampor för hushållsbruk. Det fanns tillgång till mätning av övertoner från 1 till 200 identiska LED lampor; varje lampa hade 12 W förbrukning och gav 806 lumen vid 2700 K färgtemperatur. Supratoner från dessa lampor har studerats i ett tidigare projekt [36]; till projektet som avrapporteras i denna rapport har bara data från övertoner använts. Vågformen av spänning och ström fanns tillgängligt med hög tidsupplösning, så att både övertoner och supratoner kunde beräknas på ett enkelt sätt. Det som registrerades var strömmen av hela anläggningen (1 till 200 lampor) samt strömmen till en referenslampa. Detaljerna av studien samt en del ytterligare resultat visas i referens [H]. En del av resultatet visas i Figur 32: grundtons- och övertonsströmmen som funktion av antalet lampor. Figuren visar att strömmen ökar ungefär linjärt med antalet lampor för de flesta övertonerna.



Figur 32 Emission för olika övertoner av en anläggning vid 1 till 200 lika lampor.

Det låter sannolikt att det finns en stor del lampor av lika fabrikat som del av gatubelysning i en stad. Det betyder att emissionen från varje armatur har samma amplitud och fasvinkel och det inte kan räknas med stor sammanlagring mellan lamporna. För vissa frekvenser (23e överton och 31e överton i detta fall) visas det att den totala emissionen (i ampere) kommer att minska efter ett visst antal lampor. Det skulle betyda ett mindre bidrag från lamporna till spänningsdistorsionen. Nivåerna är dock låga och det har dock bara gjorts mätningar på en typ av lampa, så det kan inte dras allmänna slutsatser om detta.

5 Acceptansgräns

Acceptansgränsen ("hosting capacity" på engelska) infördes i 2004 [37] som ett sätt att kvantifiera hur mycket distribuerad generering påverkar distributionsnätet.

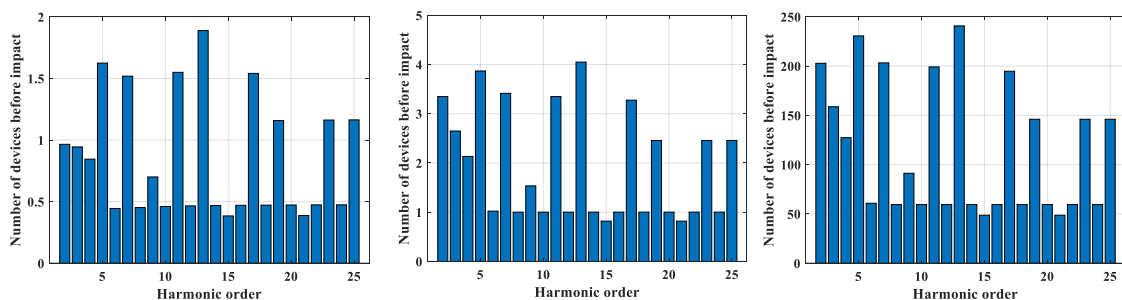
Acceptansgränsen definieras som mängden ny produktion eller förbrukning som kan anslutas till elnätet utan en oacceptabel försämring av tillförlitlighet eller spänningskvalitet. Det publicerades ganska nyligen en översikt av litteraturen om acceptansgränsberäkningar för solcellsanläggningar och lågspänningsnät [38].

Observationen i översikten var att majoriteten av studierna handlar om överspänning eller överbelastning; det fanns väldigt begränsat med studier om acceptansgräns i relation till övertoner.

En studie om hur solcellsanläggningar påverkar övertonsnivåer visas i referens [L]. En av slutsatserna var att påverkan av emissionen från solcellanläggningar är begränsad. Emission från solcellsanläggningar är i allmänt ganska begränsad. Det kan finnas specifika fall, till exempel vid solcellsanläggningar i kontorsområden där det redan finns höga övertonsnivåer mitt på dagen och där emission från solcellsanläggningar lyfter nivåerna över gränsvärden. Som det visas i referens [K] och [L] finns det dock stora marginaler på de flesta ställen. Undantag är 9e, 15e och 21e överton. Det finns dock begränsat med emission vid dessa frekvenser från trefasanläggningar. Emission från laddningsanläggningar för elfordon kan dock bli ett problem i framtiden och det finns studier om detta i referens [F], [G] och [J].

5.1 EN NEDRE GRÄNS FÖR ACCEPTANSGRÄNSEN

Det härleds i [J] en enkel ekvation för att snabbt kunna göra en första uppskattning av acceptansgränsen. Det som metoden resulterar i är en nedre gräns; den faktiska gränsen kommer mest sannolikt att vara betydligt högre men att uppskatta den kommer också att kräva betydligt mer information och beräkningar. Det som antas är att alla apparater genererar övertoner precis vid gränsen av emissionsstandarderna (IEC 61000-3-2). Det antas också att det inte finns någon sammanlagring alls mellan apparater. Resultat visas i Figur 33 för tre punkter i nätet, där det även har antagits att marginalen för övertonsspänningen är en tiondedel av gränsvärdet.



Figur 33 Nedre gräns för acceptansgränsen vid en lågspänningskund (← vänster); på lågspänningsvidan av en distributionstransformator (mitten) och på mellanspänningsvidan av inmatning från högspänningsnätet (höger →).

Det som visas i figuren är hur många apparater, med märkström 16 A eller mindre, det kan anslutas utan att man behöver bry sig om övertoner. Som nämndes har det valts en tiondedel av gränsvärdet som marginal. Anledningen för detta var resonemanget att en ökning med en tiondedel av gränsvärdet borde inte vara något problem. Skulle

nivåerna ligga så nära gränsen redan, då skulle det sannolikt bli en överskridning av gränsvärden i (nära) framtiden i alla fall.

En första observation från Figur 33 är att acceptansgränsen är lägst för jämna toner. Det finns dock sällan någon märkbar emission av jämna toner, så dessa gränser är inte relevanta i praktiken. För de tre ställen som visas i figuren kan det dras följande slutsatser:

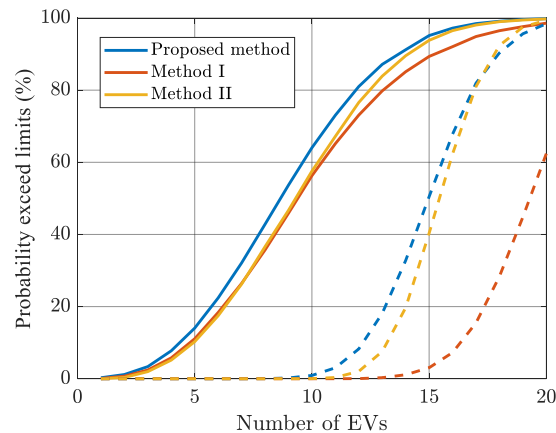
- Vid kunden kan det anslutas en eller två nya apparater som har övertonsemission precis vid tillåtna gränsvärden,
- Alla kunder tillsammans på distributionstransformatorn kan ansluta två till tre sådana apparater.
- Alla kunder tillsammans på hsp/msp-transformatorn kan ansluta 100 till 200 sådana apparater.

Det visades förut att marginalen mellan befintliga nivåer och gränsvärden är ofta hälften av gränsvärden eller större. Det skulle betyda att det kan anslutas fem gånger så mycket nya apparater än enligt figuren. Notera att det har antagits att apparatens emission är lika med gränsvärdet för klass A utrustning som anges i IEC 61000-3-2 [16], detta ger en konservativ acceptansgräns som snarare gäller större apparater med hög emission. Detta gäller inte exempelvis belysning, mindre TV-apparater, eller vattenkokare.

Det med övertoner är dock sällan så enkelt som det ser ut. Här har det antagits att impedansen ökar linjärt med frekvensen. Det gäller inte längre nära resonansfrekvensen och det kan leda till en minskning av acceptansgränsen. Metoden gäller inte heller för stora anläggningar, över 16 A märkström. Mer detaljer om studien finns i referens [J].

5.2 ACCEPTANSGRÄNS FÖR ELBILSLADDNING

Mätningar har gjorts av laddning av elfordon vid en installation för snabbladdning, med 150 kW märkeffekt. Mätningarna har använts för att skapa en stokastisk modell av laddningen och denna modell har använts för att få fördelningsfunktioner av övertonsspänningar vid ökande antal elbilar som laddas samtidigt. Från detta har det beräknats sannolikheten att minst en av övertonerna överskrider gränsen, som funktion av antalet bilar som laddas samtidigt; resultat visas i Figur 34. En detaljerad beskrivning av de tre metoder som använts och som visas i Figur 34 återfinns i [F]

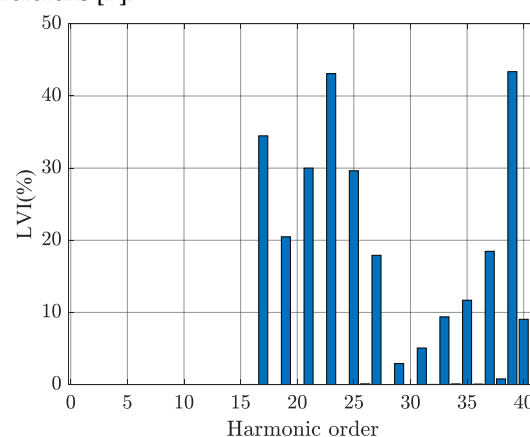


Figur 34 Sannolikheten att övertonsspänningen överskrider gränsen: individuella övertoner (rak linje); THD (streckad linje)

Första observationen från figuren är att THD är inget lämpligt mått för att sätta gränsen. Vid 10 bilar är det, till exempel, fortfarande nästan noll sannolikhet att THD överskrider gränsen, medan sannolikheten att en eller flera individuella övertoner överskrider gränsen är kring 60 %.

En annan observation är att acceptansgränsen, antalet bilar som kan anslutas, starkt beror på vilken sannolikhet som är acceptabel. Om det ska vara 100 % säkerhet att nivåerna håller sig under gränsvärden, då är acceptansgränsen bara en eller två bilar. Anses 10 % risk acceptabelt, då kan det laddas fem bilar samtidigt.

Det har också gjorts en bedömning om vilka övertoner som först överskrider gränsvärden; resultat visas Figur 35. Det visas vara de höga övertonerna, 15 och högre, som överskrider gränsvärdena först. Att till exempel nivåerna för 39e överton överskrids ofta tyder på att det kan även bli oacceptable nivåer av supratoner. Detaljer av studien visas i referens [F].



Figur 35 Fördelning av övertoner som sätter acceptansgränsen.

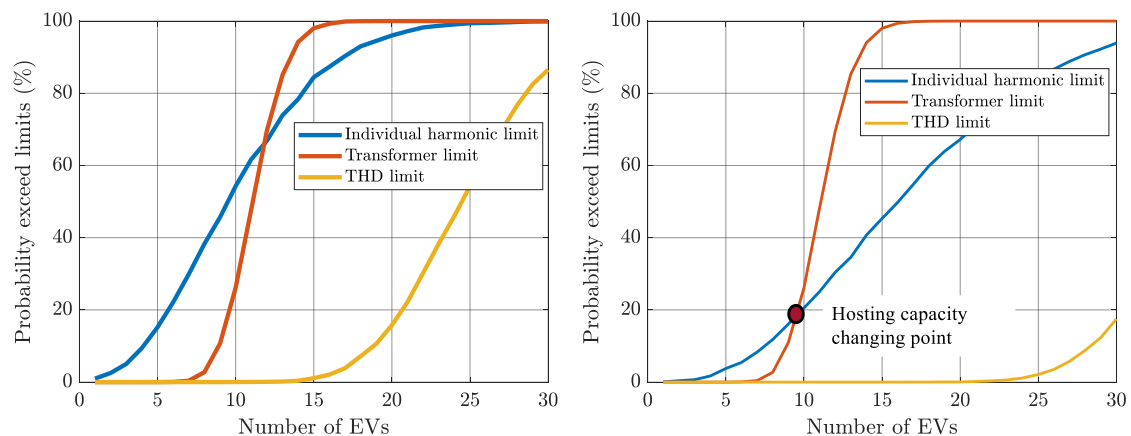
5.3 MODELLERING AV MELLANSPÄNNINGSNÄTET

Beräkningar i förra avsnitt utfördes för en enkel modell av elnätet: en impedans som ökar linjärt med frekvensen. Som det har visats i tidigare kapitel finns det

begränsningar med sådana modeller. Det har därför gjorts en studie för att bedöma hur viktig modellen för källimpedansen är vid beräkning av acceptansgränsen. Det visades att modellen som används för att beräkna källimpedansen spelar en stor roll i den resulterade acceptansgränsen. En del av resultat visas i Figur 36 och Figur 37. Mer detaljer finns i referens [G].

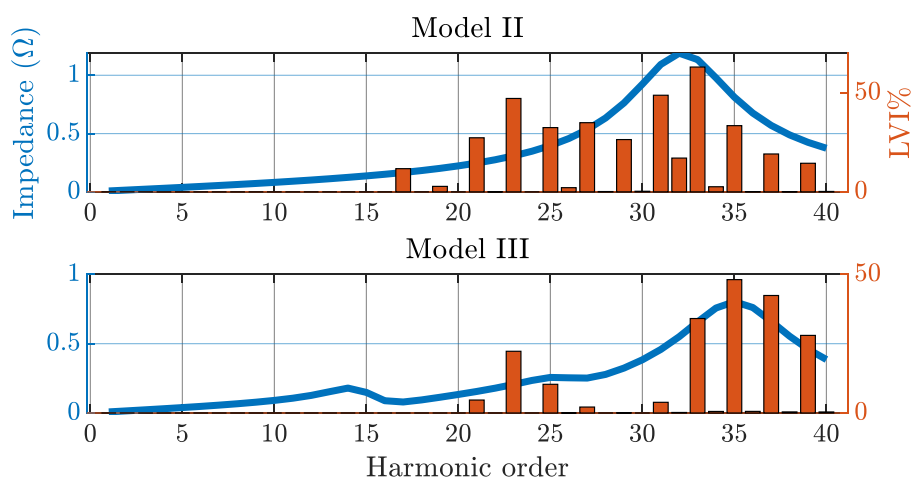
Figur 36 visar sannolikhet att övertongsgränsen överskrids som funktion av antalet bilar som laddas samtidigt. Att använda en mer detaljerad modell (till höger) minskar sannolikheten att gränsvärden överskrids och därmed ökar acceptansgränsen. För 10 % acceptabel risk ökar acceptansgränsen från 4 till 7 bilar.

En annan relevant observation från figuren är att, vid mindre än 20 % acceptabel risk, kommer övertoner att sätta gränsen innan transformatorn blir överbelastad. Det betyder att det är viktigt att ta med övertoner i bedömning eftersom det kan vara höga nivåer av övertoner utan att transformatorns märkeffekt överskrids.



Figur 36 Sannolikheten att övertonsspänningen överskrider gränsen: bara lågspänningsnätet i modellen (← vänster); låg- och mellanspänningsnätet i modellen (höger →).

Figur 37 visar vilka övertoner som överskrider gränsvärdena. Det finns vissa skillnader baserade på modellen, men i båda fall är det de högre övertoner som sätter gränsen.



Figur 37 Impedansen mot frekvens (blå linje) och fördelning av toner som sätter acceptansgränsen (röda staplar): bara lågspänningsnät (ovan); låg- och mellanspänningsnät i modellen (nedan)

För att beräkna acceptansgränsen behövs det en modell som tar med lokala lågspänningsnätet, mellanspänningsnätet och avlägsna lågspänningsnät. Detaljerna av mellanspännings- och lågspänningsnät kan påverka acceptansgränsen; det betyder i praktiken att det behövs separata beräkningar för varje ny anläggning. Det som även här är utmaningen är modellen för kundimpedansen för de högre frekvenserna. Det behövs en seriös satsning på att få lämpliga modeller för kundimpedansen till en frekvens av minst 2 kHz.

6 Supratoner och mellantoner

6.1 SUPRATONER

Rapporten och forskningsprojekt har till största delen riktat sig till övertonsområdet, frekvensen upp till 2 kHz. Det har senaste åren blivit ett ökat intresse i frekvensområdet mellan 2 kHz och 150 kHz, som oftast refereras till som "supratoner" [39], även om begreppet har ännu inte blivit del av någon standard.

En stor del av forskningen om supratoner handlar om emission från individuella apparater och aggregering inom installationer. Det finns begränsat med forskning om spridning av supratoner i låg- eller mellanspänningsnät. Två sådana studier har gjorts, under de senaste åren, av Elkraftgruppen vid Luleå tekniska universitet. Referens [40] studerar spridning av supratoner i ett landsbygdsnät med 6 kunder. Det visas att resonanser är vanliga och att kundernas impedans har en stor påverkan på spridningen. Det också visas att supratoner inte alltid stannar i samma anläggning men kan spridas till andra kunder anslutna till samma lågspänningsnät. En stor källa av supratoner, som elbilsladdning eller en solcellsanläggning kan ge höga nivåer bland flera kunder anslutna till samma lågspänningsnät.

En studie om spridning i mellanspänningsnät presenteras i [41]. Även här är slutsatsen att det kan uppstå resonanser vid många frekvenser. En stor solcellsanläggning eller laddningsanläggning ansluten till mellanspänningsnätet kan därmed leda till höga nivåer av supratoner för en stor del av kunder i flera lågspänningsnät.

Utmaningen som nämndes vid acceptansgränsberäkningar och spridning av övertoner, att det saknas lämpliga modeller för högre frekvenser, blir en även större utmaning vid supratoner. För detta frekvensområde saknas också till stor del gränsvärden, även om IEC 61000-2-2 anger kompatibilitetsnivåer, vilket försvårar acceptansgränsberäkningar.

6.2 MELLANTONER

Som det har nämnts förut, då finns det tre olika typer av komponenter i vågformsdistorsion: övertoner, mellantoner och supratoner. Skillnaden mellan supratoner och mellan/övertoner är deras högre frekvens. Begreppet supratoner brukar användas för komponenter över 2 kHz upp till 150 kHz, även om det ännu inte finns någon standardiserad definition av begreppet.

Mellantoner finns i samma frekvensband som övertoner, upp till 2 kHz. Mellantoner skiljer sig från övertoner genom att de inte är synkroniserade med grundtonen (kraftsystemets frekvens, ofta refererad till som "50 Hz" men inte exakt lika med 50 Hz). Det är denna skillnad som gör att det finns en del andra konsekvenser av mellantoner än av övertoner. Mellantoner är framför allt kända för att de kan leda till ljusflimmer med LED belysning eller kompakta lysrör. Det finns också en del andra potentiella konsekvenser av mellantoner, som alla har att göra med att de är osynkroniserade med grundtonen. Detta kan leda till en lågfrekvent oscillation på mellanspänningsidan av en likriktare eller växelriktare, som i sin tur kan trigga en instabilitet i regleralgoritmen.

Det finns också skillnader på hur mellantoner och övertoner uppstår, men inte i deras spridning. En komponent på 258 Hz sprids på lika sätt som en komponent på 250 Hz. Skillnaden i hur de uppstår gör att sammanlagringseffekterna är annorlunda. Att två apparater genererar samma frekvens på mellantoner är inte så vanligt; höga nivåer på grund av många små apparater är därför mindre sannolikt. Det har dock gjorts begränsad forskning på aggregering av mellantoner; det behövs ytterliga studier om detta. Det behövs också studier om huruvida mellantoner från stora laddningsinstallationer eller solcellsanläggningar kan sprida över ett större område via mellanspänningsnätet. Även här är det permanent mätning som rekommenderas. För en noggrann analys av mellantoner behövs det icke-standardiserade mätningar; IEC 61000-4-30 ger bara ett värde för bandet mellan två övertoner.

7 Slutsatser och rekommendationer

Det finns en stor del slutsatser och rekommendationer i de olika artiklarna som skrevs som del av projektet [A-M] vid rapporten; några av de viktigaste sammanfattas här.

- Det finns relativt låga nivåer av övertonsspänningar i de svenska lågspänningsnäten. Även om det fanns mätningar vid bara ett begränsat antal mätpunkter kan ändå slutsatsen dras att marginalen vid de flesta mätpunkterna är minst lika med hälften av gränsvärden. Undantag är 9e, 15e och 21e överton, där nivåerna ibland redan överskrider nivåerna.
- Jämfört med början av 90-talet har det fram till början av 2020-talet varit en minskning av 3e och 5e överton i spänning och en ökning av 7e, 9e, 11e och 13e överton.
- För att kunna beräkna käll- och transferimpedans, som är nödvändiga vid övertonsstudier i lågspänningsnät, är det essentiellt att ta mellanspänningsnätet och avlägsna lågspänningsnät med i modellen. Det gäller framför allt vid lägre frekvenser, under 1 till 1,5 kHz. För högre frekvenser visar modellerna som har används här att det räcker med att modellera det lokala lågspänningsnätet. Det finns dock begränsningar i modeller och slutsatsen gäller sannolikt inte allmänt.
- Gatubelysning har en icke försumbar påverkan på övertonsnivåerna; det är otydligt om det är på grund av emissionen eller om koppling påverkar käll- och transferimpedanser.
- Emission från anläggningar för elbilsladdning kan ha en stor påverkan på övertonsnivåerna; det gäller framför allt de höga frekvenserna.
- Det kan inte antas i övertonsstudier för låg- och mellanspänningsnät att systemet är symmetriskt; det ska inte bara tas med den dominerande (plus-, minus-, eller nollföljds) komponent men också de andra två.
- För att kunna förstå variationer i 5e-tonsspänning är det viktigt att ta med information och kunskaper om fasvinkeln.
- Spridning av supratoner är svårt att förutse för att det finns resonanser överallt.

Baserad på studierna formuleras det följande rekommendationer.

- Det behövs mer kontinuerliga mätningar av övertoner i låg- och mellanspänningsnät för att bättre kunna kartlägga nivåer och följa trender. Det behövs även en sammanställning av historiskt data för att kunna identifiera tidigare trender.
- Det behövs ytterligare studier för att kartlägga emission och spridning av övertoner, mellantoner och supratoner från fordonsladdning. Det gäller anslutningar av mindre anläggningar till lågspänningsnätet men också anslutningar till högspänningsnätet.
- Det behövs en seriös forskningssatsning för att komma till lämpliga modeller för impedans av apparater och anläggningar anslutna till lågspänningsnätet.
- Det behövs en seriös forskningssatsning på konsekvenser av höga övertonsnivåer för apparater anslutna till lågspänningsnät.
- Forskning om emission och spridning av supratoner ska fortsättas.

8 Referenslista

[A] N. Nakhodchi, M. Bollen and T. Busatto, Transfer of Harmonics in Distribution Networks,"IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.37, No.3, pp.1617-1626, juni 2022.

[B] N. Nakhodchi, M. Bollen, Including load impedance uncertainty in harmonic impedance seen from a low-voltage customer, ICHQP, maj 2022

[C] Naser Nakhodchi, Math Bollen, Measurements of harmonic voltages at Multiple Locations in LV and MV networks, ICHQP 2020.

[D] Naser Nakhodchi, Math Bollen, Harmonic correlations matrices to present measurement results from single and multiple locations, Int Conf on Electricity Distribution, CIRED, september 2021.

[E] J. Sutaria, N. Nakhodchi, E. Gutierrez-Ballesteros, S. Rönnberg, M. Bollen, Comparing harmonic unbalance at multiple locations to characterize the unbalance, Int Conf on electricity distribution, CIRED, september 2021.

[F] Naser Nakhodchi, Hamed Bakhtiari, Math Bollen, Including uncertainties in harmonic hosting capacity calculation of a fast EV charging station utilizing Bayesian statistics and harmonic correlation, Electric Power Systems Research 214 (2023): 108933.

[G] Naser Nakhodchi, Math Bollen, Impact of Modelling of MV Network and Remote Loads on Estimated Harmonic Hosting Capacity for an EV Fast Charging Station, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 147 (2023): 108847.

[H] N. Nakhodchi, M. H. J. Bollen, Á. Espín-Delgado, S. K. Rönnberg, Deviation from linear summation law for large number of homogeneous LED lamps, Int Conf on electricity distribution CIRED, september 2021.

[I] N. Nakhodchi, R. Alves De Oliveira, and M. H. J. Bollen, Graphical Methods for Presenting Time-Varying Harmonics, CIRED, september 2021.

[J] Naser Nakhodchi, Math Bollen, Estimation of safe harmonic hosting capacity, Int Conf on Electricity Distribution, CIRED, september 2021.

[K]. M.H.J. Bollen. A. Gil de Castro, S.K. Rönnberg, Typical harmonic levels and spectra with low-voltage customers, CIRED 2019.

[L] S. Rönnberg, T. Busatto, M. Bollen, Impact of PV on Harmonics in Low-Voltage Networks, CIRED 2019.

[M] Aurora Gil-de-Castro, Math Bollen, Sarah Rönnberg, Variations in harmonic voltage at the sub-10-minute time scale, Electric Power Systems Research, Vol. 195, June 2021, 107163.

[1] R.C. Dugan, F. McGranaghan, H. W. Beaty, S. Santoso, Electrical power systems quality, New York: McGraw-Hill, 1996.

- [2] Math Bollen, Understanding power quality – voltage sags and interruptions, Wiley, 2000.
- [3] Angelo Baghini, Handbook of power quality, Wiley, 2008.
- [4] Math Bollen, Irene Gu, Signal processing of power quality disturbances, Wiley, 2006.
- [5] IEC 61000-4-30, Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-30: Testing and measurement techniques - Power quality measurement methods.
- [6] Steven W. Smith, The scientist and engineer's guide to digital signal processing, Chapter 13, Continuous signal processing, <https://www.dspguide.com/>
- [7] IEC 61000-4-7, Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-7: Testing and measurement techniques - General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto.
- [8] Roger Alves de Oliveira, Applications of unsupervised deep learning for analysing time-varying power quality big data, avhandling, Luleå tekniska universitet, oktober 2023.
- [9] F. Wang, M.H.J. Bollen, Measurement of 182 Hz interharmonics and their impact on relay operation, IEEE Int. Conf on Harmonics and Quality of Power, October 2000, Orlando, FL.
- [10] Kai Yang, Math H.J. Bollen, Interharmonic currents from a Type-IV wind energy conversion system, Electric Power Systems Research 143 (2017): 357-364.
- [11] V. Ravindran, S. K. Rönnberg, T. Busatto and M. H. J. Bollen, Inspection of interharmonic emissions from a grid-tied PV inverter in North Sweden, 18th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), Ljubljana, Slovenia, 2018.
- [12] M. R. Rifai, T. H. Ortmeyer and W. J. McQuillan, Evaluation of current interharmonics from AC drives, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 15, no. 3, pp. 1094-1098, July 2000.
- [13] S. K. Rönnberg, A. Gil-De-Castro, R. Medina-Gracia, Supraharmonics in European and North American Low-Voltage Networks, IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), Palermo, Italy, 2018.
- [14] Föreskrift EIFS 2013:1, Energimarknadsinspektionens föreskrifter och allmänna råd om krav som ska vara uppfyllda för att överföringen av el ska vara av god kvalitet EIFS 2013:1
- [15] SS-EN 50160, Spänningens egenskaper i elnät för allmän distribution
- [16] SS 421 1811, Spänningsgodhet i lågspänningsnät för allmän distribution, 1989.
- [17] IEC 61000-3-2:2018, Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-2: Limits - Limits for harmonic current emissions (equipment input current ≤ 16 A per phase).
- [18] Sarah Rönnberg, Emission and interaction from domestic installations in the low voltage electricity network, up to 150 kHz, doktorsavhandling, Luleå tekniska universitet, 2013.
- [19] S. K. Rönnberg, M. H. J. Bollen, M. Wahlberg, Harmonic emission before and after changing to LED and CFL – Part I: Laboratory measurements for a domestic customer, 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power - ICHQP 2010, Bergamo, Italy, 2010.

- [20] S. K. Rönnberg, M. Wahlberg, M. H. J. Bollen, Harmonic emission before and after changing to LED and CFL — Part II: Field measurements for a hotel, 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power - ICHQP 2010, Bergamo, Italy, 2010.
- [21] S. K. Rönnberg, M. Wahlberg, M. H. J. Bollen, Harmonic emission before and after changing to LED lamps — Field measurements for an urban area, 15th International Conference on Harmonics and Quality of Power, Hong Kong, China, 2012.
- [22] Begränsning av övertoner i elnät inom tätort, Elforsk Rapport 97:3, januari 1997.
- [23] T. Keppler, N. R. Watson, J. Arrillaga, and Shiun Chen, "Theoretical assessment of light flicker caused by sub- and interharmonic frequencies," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 18, no. 1, pp. 329–333, Jan. 2003.
- [24] T. Tayjasanant, W. Wang, C. Li, and W. Xu, "Interharmonic-Flicker Curves," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 20, no. 2, pp. 1017–1024, Apr. 2005.
- [25] J. Drapela, R. Langella, J. Slezinger, and A. Testa, "Generalized lamp model for light flicker studies," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 154, pp. 413–422, 2018.
- [26] S. A. Schelkunoff, Representation of impedance functions in terms of resonant frequencies, *Proceedings of the IRE*, vol. 32, no. 2, pp. 83-90, Feb. 1944.
- [27] Abstracts of technical articles from bell system sources, *The Bell System Technical Journal*, vol. 14, no. 4, pp. 724-727, Oct. 1935..
- [28] Rinus van Houten, Electromagnetic compatibility in high-voltage engineering, doktorsavhandling, tekniska universitet Eindhoven, 1990.
- [29] Gabriel Olguin, Stochastic assessment of voltage dips, caused by faults in large transmission systems, doktorsavhandling, Chalmers tekniska högskola, 2003.
- [30] Kai Yang, On harmonic emission, propagation and aggregation in wind power plants, doktorsavhandling, Luleå tekniska universitet, 2015.
- [31] Daphne Schwanz, On transfer functions for power quality studies in wind power and solar PV Plants, doktorsavhandling, Luleå tekniska universitet, 2019.
- [32] Ángela Espín Delgado, Propagation of supraharmonics in low-voltage networks, doktorsavhandling, Luleå tekniska universitet, 2022.
- [33] K. Yang, M. Bollen, L. Yao, Theoretical emission study of windpark grids: Emission propagation between windpark and grid, 11th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation, Lisbon, Portugal, 2011.
- [34] IEC TR 61000-3-6:2008, Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-6: Limits - Assessment of emission limits for the connection of distorting installations to MV, HV and EHV power systems.
- [35] Roger Alves de Oliveira, Math Bollen, Harmonic voltage versus time of day and time of year - results from a measurement campaign, Luleå University of Technology, August 2023
- [36] Espín-Delgado, A., Rönnberg, S., Busatto, T., Ravindran, V., & Bollen, M. (2020). Summation law for supraharmonic currents (2–150 kHz) in low-voltage installations. *Electric Power Systems Research*, 184, 106325.
- [37] M.H.J. Bollen, M. Hager, Power quality: interactions between distributed energy resources, the grid, and other customers, *Electrical Power Quality and Utilisation Magazine* 1, no. 1 (2005): 51-61.
- [38] Enock Mulenga, On the hosting capacity of distribution networks for solar power, doktorsavhandling, Luleå tekniska Universitet, 2021.

- [39] S.K. Rönnerberg, et al., On waveform distortion in the frequency range of 2 kHz–150 kHz—Review and research challenges, *Electric Power Systems Research* 150 (2017): 1-10.
- [40] Ángela Espín Delgado, Jil Sutaria, Sarah Rönnerberg, Evaluation of the probability of supraharmmonic interference in low-voltage networks, *IEEE Transactions on Power Delivery*, November 2022
- [41] Shimi Sudha Letha, Angela Espin Delgado, Sarah K. Rönnerberg, Math H.J. Bollen. Evaluation of medium voltage network for propagation of supraharmonics resonance." *Energies* 14, no. 4 (2021): 1-17.

ÖVERTONER I LÅGSPÄNNINGSNÄT

Den här rapporten handlar om vågformsdistorsion, avvikelser från spänningen och strömmens sinusform. Rapporten presenterar en hel del nya kunskaper om spridning av övertoner i låg- och mellanspänningsnät. Kunskapen är av stor nytta vid anslutning av ytterliga apparater och anläggningar till distributionsnätet, till exempel vid anslutning av stora laddningsinstallationer och solcellsanläggningar till mellanspänningsnätet. Det visas sig också att detaljer av nätet och anslutna apparater har en stor påverkan på spridning. Det betyder att det behövs detaljstudier och kontinuerlig mätning av nivåerna.

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.