

Nya lågspänningslaster och störningar i frekvensområdet 2 till 150 kHz

*Resultat från forskningsprojektet vid Luleå tekniska universitet,
samt en kartläggning av behovet på ytterligare forskning*

Math Bollen, Sarah Rönnberg

ISSN: 1402-1536
ISBN 978-91-7439-234-0

Luleå 2011

www.ltu.se

Sammanfattning

Denna rapport är en avrapportering av projektet ”Nya lågspänningslaster och störningar i frekvensområdet 2 till 150 kHz” som utfördes av elkraftgruppen vid Luleå tekniska universitet. Projektet har lett till ökade kunskaper om vågformsdistorsion. De följande konkreta resultaten kan nämnas:

- ✓ Emission i detta frekvensområde flödar framförallt mellan apparater och bara till en liten del mot nätet.
- ✓ Kondensatorn på nätsidan av gränssnittet mellan nätet och apparaten har ett dominerande inflytande på spridning av emission mellan apparater och mot nätet.
- ✓ För att kunna kvantifiera strömmen vid gränssnittet behövs det en uppdelning i primär och sekundär emission.
- ✓ Det finns olika sätt där laster ansluten till lågspänningsnätet kan påverka elnätskommunikation och tvärtom. Det gjordes en uppdelning i fem olika typer av växelverknig.

Som en del av projektet gjordes det även en kartläggning av forskningsbehovet vid integrering av nya laster (båda produktion och förbrukning) i lågspänningsnätet.

Vid grundtonsrelaterade fenomen (spänningsreglering och överbelastningar) finns det behov av att kvantifiera påverkan av nya laster genom acceptansgränsmetoden samt att studera förmågan att öka acceptansgränsen av nya metoder, som laststyrning, kommunikation och avancerade marknadsmodeller. Dessa nya metoder refereras till under namnet ”smarta elnät”. Vid grundtonsrelaterade fenomen finns det även behov att kartlägga de befintliga variationerna i spänning och ström genom att samla in och analysera mätdata från timavlästa elmätare.

För ej-grundtonsrelaterade fenomen (vågformsdistorsion under och över 2 kHz, snabba spänningsändringar) finns det ett större behov på dedikerade mätningar samt kontrollerade experiment. Utveckling av simuleringsmodeller och underlag för standardisering är också viktiga delar av det framtida forskningsbehovet.

Summary

This report is the final report of the project "New low-voltage equipment and disturbances in the frequency range 2 to 150 kHz" that was conducted by the power engineering group at Luleå University of Technology. The project has resulted in increased knowledge on waveform distortion. The following concrete results can be mentioned:

- ✓ Emission in this frequency range flows mainly between equipment and only a small part towards the grid.
- ✓ The capacitor on the grid side of the interface between the grid and the equipment has a dominating impact on the spread of the emission between equipment and towards the grid.
- ✓ To quantify the current at the interface it is necessary to make a distinction between primary and secondary emission.
- ✓ There are different ways in which equipment connected to the low-voltage grid can impact power-line communication and the other way around. A subdivision has been made in five different types of interaction.

As part of the project the need for further research has been mapped concerning the integration of new equipment (both production and consumption) in the low-voltage grid.

With power-system-frequency-related phenomena (voltage control and overloads) there is a need to quantify the impact of new equipment using the hosting-capacity method. There is also a need to study the increase in hosting capacity that can be achieved by new methods like demand response and curtailment, communication and advanced market models. These new methods are referred to under the name "smart grids". With power-system-frequency-related phenomena there is even the need to map the existing variations in voltage and current by collecting and analysing data from hourly-read electricity meters.

For non- power-system-frequency-related phenomena (waveform distortion below and above 2 kHz; rapid voltage changes) there is a bigger need for dedicated measurements and for controlled experiments. The development of simulation models and of a basis for standardisation is also part of the future research needs.

1 Bakgrund och problemställningen

Spänningens och strömmens avvikelser från sinusvågen har sedan länge varit ett ämne av akademisk forskning, utveckling och standardisering. Under årens gång har det byggts upp en stor volym av forskningsresultat, praktiska erfarenheter samt ett antal standarder om denna vågformsdistorsion. Forskningen, erfarenheter och standarder är riktade nästan utesluten till frekvensområdet under 2 kHz och till frekvenser som är en hel multipel av grundtonen 50-Hz. Begreppet ”övertonsdistorsion”, eller bara ”övertoner”, används därför ofta som synonym för vågformsdistorsion.

Under de senaste åren har det kommit utrustning på marknaden som också genererar störningar i frekvensområdet över 2 kHz, medan kunskaperna om dessa är mycket begränsade.

Elkraftgruppen vid Luleå tekniska universitet har startat forskning om vågformsdistorsion i frekvensområdet 2 till 150 kHz. Två tidigare projekt [1][2] har utförts av gruppen där bland annat designmetoder och emission från belysningsanläggningar har studerats. I detta projekt, som nu avrapporteras, var målet att titta närmare på emissionen i anläggningar och på spridningen av vågformsdistorsion mellan apparater, allt i frekvensområdet 2 till 150 kHz. Resultaten av projektet presenteras i [3] och sammanfattas i avsnitt 2 till och med 4.

Det gjordes även, under projektet och i andra projekt, studier av påverkan på elkraftsystemet av nya lågspänningslaster, utöver störningar i frekvensområdet 2 – 150 kHz. Det identifierades ett antal kvarstående utmaningar där det finns behov av ytterligare forskning. Resultaten av detta beskrivs i avsnitt 5.

2 Experiment

Eftersom både emission och spridning av vågformsdistorsion i frekvensområdet 2 till 150 kHz var i stort sett okända fenomen vid början av projektet, ansågs det att en studie som var helt baserad på simuleringar, inte skulle ge tillförlitliga resultat. Det var helt enkelt för oklart om vilka fenomen som skulle dominera beteendet. För att kunna forma en bas för framtida simuleringar och för att skapa förtroende gällande resultatet för industrin och andra forskare, bestämdes det att utföra ett antal kontrollerade experiment i Pehr Högströmlaboratoriet i Skellefteå, som drivs av elkraftgruppen. Utöver detta utfördes det ett antal mätningar i verkliga elanläggningar.

I det mest avancerade experimentet byggdes det, i laboratoriet, en fulskalig elektrisk modell av en villa med tillgång till en stor del av den elektriska utrustningen som vanligen återfinns i en villa. Det valdes även att använda en 108-minuters körcykel innehållande ett stort antal av de möjliga kombinationerna av ansluten utrustning i en sådan anläggning. Körcykeln upprepades för olika typer av belysning medan resten av lasten inte ändrades. Se figuren och tabellen nedan, där A till C refererar till belysningen medan D till I refererar till olika grupper av apparater. Mer detaljer av experimentet visas i [4] och [5].

TABLE I
LOAD SWITCHING PATTERN USED DURING THE EXPERIMENTS.

	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45	48	51	54	57	60	63	66	69	72	75	78	81	84	87	90	93	96	99	102	105	108			
A																																							
B																																							
C																																							
D																																							
E																																							
F																																							
G																																							
H																																							
I																																							

TABLE II
DETAILS OF THE LIGHTING LOAD USED FOR THE FOUR SCENARIOS

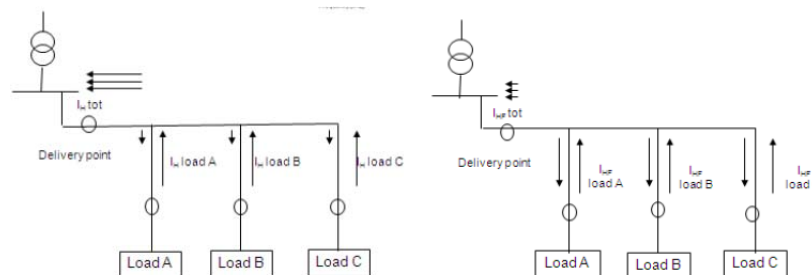
	"past"	"present60"	"future"	"far-future"
Load A	12 60-W incandescent	4 halogen + 4 60-W incandescent + 4 CFL	6 LED + 6 CFL	12 LED
Load B	18 60-W incandescent	6 halogen + 6 60-W incandescent + 6 CFL	9 LED + 9 CFL	18 LED
Load C	2 dimmable 60 W incandescent	2 dimmable 20-W CFL	2 dimmable 20-W CFL	2 dimmable LED

Figur 1, kopplingscykel som användes i de kontrollerade experiment samt fyra olika scenarior som studerades.

Det har även utförts ett antal mindre experiment, inklusive experiment där emission från elnätss kommunikation studerades samt ett antal mätningar vid verkliga elanläggningar. Av sistnämnda gruppen bör nämnas mätningar av vågformsdistorsion vid ett hotell i Skellefteå före och efter ersättning av glödlampor med lågenergibelysning. Mer detaljer av detta experiment visas i [6].

3 Växelverknning mellan olika apparater

Genom mätningar har det visats att störningar i frekvensområdet över 2 kHz kan spridas mellan apparater och i nätet på ett helt annat sätt än i frekvensområdet under 2 kHz. Skillnaden visas i figuren nedan [7][8]. För lägre frekvenser (bilden till vänster) flödar en stor del av emissionen från apparaterna till nätet (mot matningskällan) medan en liten del flödar mellan apparaterna. Den totala emissionen som flödar till nätet är med en ganska bra approximation summan av emissionen från alla enskilda apparater. För högre frekvenser (bilden till höger) är situation precis omvänd: största delen av emissionen flödar mellan apparater medan bara en liten del flödar till nätet.



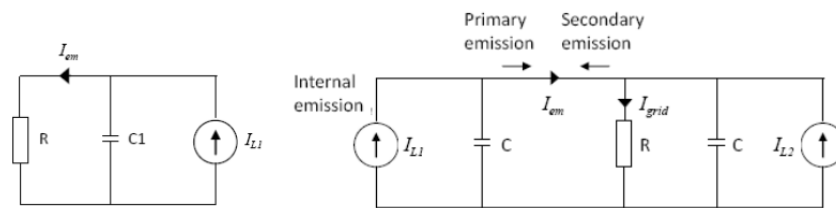
Figur 2. Spridning av vågformsdistorsion mellan apparater och till nätet för frekvenser under 2 kHz (vänster) och för frekvenser över 2 kHz (höger).

Förklaringen till detta fenomen visade sig vara att nätets impedans (uppåt från leveranspunkten) huvudsakligen ökar med frekvensen medan apparaternas ingångsimpedans sett från nätet vid klämmorna, huvudsakligen minskar med frekvensen. Apparaternas ingångsimpedans bestäms hos många moderna apparater av en kondensator som är en del av ett EMC filter. Vid lite äldre typer av apparater (men som fortfarande tillverkas och förekommer på mycket marknaden) består ingången av en diodlikriktare med en stor kondensator på likspänningssidan. Under tiden att dioderna leder skapar kondensatorn en lågimpedans väg för emissionen från närliggande apparater. Mer detaljer om detta finns presenterade i [7] och [8].

Här bör det noteras att målet med EMC filtret är att minska emissionen från en individuell apparat, först och främst genom att apparaten klarar kraven som ställs i emissionsstandarder för höga frekvenser, i flesta fall över 150 kHz. Att filtrera bort emission från närliggande apparater är inte målet, det är inte något som tas med i emissionsstandarder och kan faktiskt vara till nackdel för apparaten. En del större apparater, som industriella drivsystem, är försedda med ett EMC filter som har en induktans på nätsidan. Spridning av emission vid högre frekvenser kan vid sådana apparater se helt annorlunda ut; men industriella anläggningar har inte tagits med i projektet.

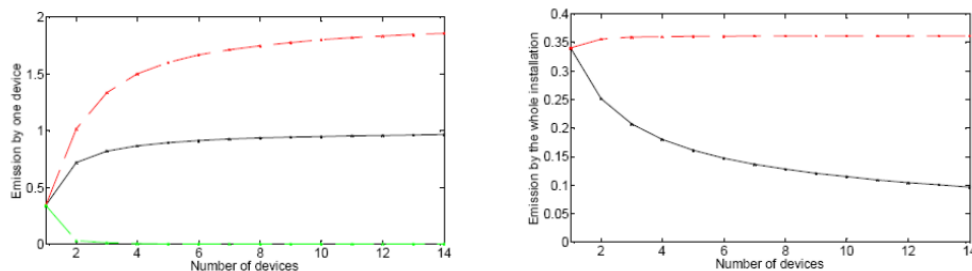
För att kunna kvantifiera spridningen mellan apparaterna och till nätet samt för att bedöma hur stor roll kondensatorn verkligen spelar för detta användes det en mycket enkel modell av en apparat. Modellen av en individuell apparat består då av en strömkälla som representerar "den interna emissionen på grund av de kraftelektroniska kopplingarna" samt en kapacitans som representerar kondensatorn på nätsidan av EMC filtret. Modellen för en apparat respektive för två apparater kopplade till nätet visas i figur 3. Resistansen R representerar nätets impedans uppåt från leveranspunkten. Bilden till höger visar även de två bidrag till

emission från en apparat: primär emission som drivs av kraftelektroniken i själva apparaten ("intern emission") och sekundär emission som drivs av kraftelektroniken i närliggande apparater.



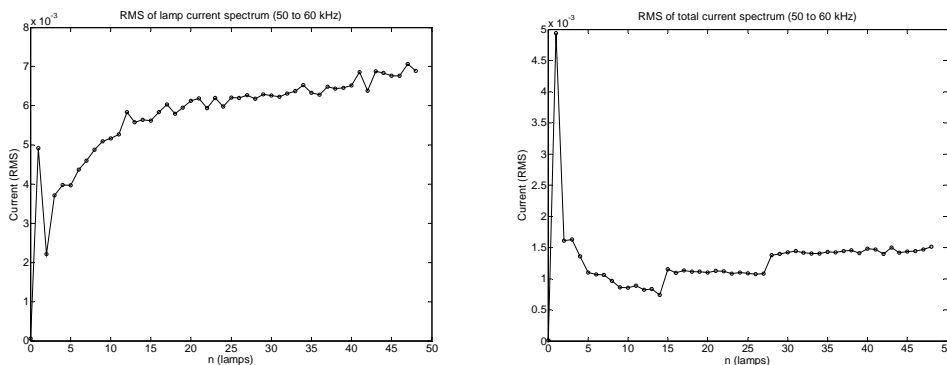
Figur 3. Modell för en apparat kopplad till nätet (till vänster) samt för två apparater kopplade till nätet (höger).

Med hjälp av modellen samt elkretsteori beräknades emission från en anläggning som funktion av antalet apparater; både den totala emissionen från anläggningen samt emissionen från individuella apparater. Det antogs då att alla apparater var lika, men att det fanns små skillnader i kopplingsfrekvens mellan apparaterna och det antogs typiska värden för kapacitansen och kopplingsfrekvensen. Resultaten visas i figur 4. Beräkningsresultatet visar att emissionen från en individuell apparat ökar med antalet apparater men att ökningen begränsas. För hela anläggningen så minskar emissionen i frekvensdomänen starkt med antalet apparater medan det högsta värdet av amplituden i tidsdomänen är till stor del oberoende av antalet apparater i anläggningen. Modellen samt ytterligare beräkningar finns i [9].



Figur 4. Beräknad emission från den individuella apparat (vänster) och från hela anläggningen (höger) som funktion av antalet apparater. De röda och gröna kurvorna visar de högsta och lägsta värdena av amplituden i tidsdomän medan de svarta kurvorna visar amplituden i frekvensdomän.

I ett parallellprojekt gjordes mätningar av emissionen från belysningsanläggningar av olika storlek. En del av mätresultatet visas i figur 5 [2][10]. Kurvorna i figur 5 motsvarar de svarta kurvorna i figur 4. Både mätningar och beräkningar visar en ökning av emissionen från individuella apparater samt en minskning av den totala emissionen från anläggningen. Skillnaderna i detaljer mellan mätningar och beräkningar beror i huvudsak på den mycket förenklade modellen (där bland annat intern emission antogs vara konstant) samt på svårigheten att noggrant kvantifiera den uppmätta emissionen.



Figur 5. Uppmät emission i frekvensdomän från en individuell apparat (vänster) och från hela anläggningen (höger) som funktion av antalet apparater. Observera skillnaden i horisontell skalan med förra figuren. Den stegvisa ökningen av emissionen i bilden till höger beror på det ökande kvantiseringsbruset vid ändring av mätapparatsens upplösning under experimentet.

Även om det finns skillnader mellan modellen och mätningarna antyder ändå den stora överensstämmelsen att kondensatorerna spelar en viktig roll i hur spridningen av emissionen blir dels mellan apparaterna och dels mellan apparaterna och nätet. Det är en viktig utgångspunkt för framtida studier, inklusive simuleringar, om spridning av emission i frekvensområdet 2 – 150 kHz.

4 Växelverknning mellan elnätskommunikation och apparater

Elnätskommunikation genererar mycket större signaler i frekvensområdet 9 till 95 kHz (i form av spänningar och strömmar) än apparaterna hos slutkunderna. Samma kondensator som orsaker flödet av emissionen mellan apparater har också visat sig ansvarig för en del av interferensproblem mellan apparater och elnätskommunikation. Sändaren ser en lägre impedans mot apparaterna än mot nätet vilket innebär att största delen av strömmen som injekteras av sändaren flödar till apparaten vid slutkunderna och inte till nätet och mottagaren.

Baserat på ett stort antal mätningar både i verkliga anläggningar och i laboratoriet föreslogs det en indelning i fem olika typer för växelverkan mellan elnätskommunikation och apparater hos slutkunder. Dessa fem typer sammanfattas i tabellen nedan (figur 6), där det bör noteras skillnaden mellan växelverkan ("disturbance") som bara är ett fenomen och interferens ("interferens") som anger en situation där utrustning eller elnätskommunikation inte fungerar som det ska på grund av växelverkan. Indelningen i fem olika typer av växelverknning presenteras i [11] där det även presenteras flera mätexempel. Ytterligare mätexempel presenteras i [7], [8], [12], [13] och [14].

	Disturbance	Interference
I	Voltage or current distortion due to end-user equipment at frequencies used for communication	The communication signal drowns in the disturbance and the communication does not succeed.
II	The end-user equipment creates a low-impedance path at the communication frequency.	Only a small amount of the communication signal arrives at the receiver and the communication does not succeed.
III	The communication signal results in large currents through the end-user equipment.	Reduction in life-length and incorrect operation of the equipment.
IV	Non-linear end-user equipment exposed to the communication signal results in currents at other frequencies.	Any possible adverse impact due to the new frequency components, including interference with communication.
V	Distortion of the voltage waveform due to the communication signal.	Incorrect operation of the end-user equipment.

Figur 6. Översikt av växelverknning mellan elnätskommunikation och apparater vid slutanvändare.

5 Fortsätt forskningsbehov

Det som här har gjorts är en inventering av forskningsbehovet på ett större område: ”integrering av nya laster i lågspänningsnätet”. Nya laster kan gälla både förbrukning och produktion. Skillnaden mellan dessa båda finns i riktningen av det aktiva effektflödet (riktningen av den aktiva effekten). Vad gäller reaktiv effekt och vågformsdistorsion finns det inga stora skillnader mellan förbrukning och produktion ansluten till lågspänningsnätet.

5.1 Spänningsreglering

Spänningsfallet i lågspänningsnätet beror till största delen på de aktiva effektflödena. En direkt konsekvens av det är att ny förbrukning medför risk för underspänningar medan ny produktion medför risk för överspänningar. Tabellen nedan visar hur mycket produktion behövs i lågspänningsnätet för att ge 1 % höjning i spänningen [15][16]. Det varierar mycket på längden av ledningen eller kabeln och på arean av ledningen eller kablar.

	50 m	200 m	500 m	2 km
25 mm ²	15 kW	3.8 kW	1.5 kW	380 W
50 mm ²	30 kW	7.6 kW	3.0 kW	760 W
120 mm ²	70 kW	18 kW	7.2 kW	1.8 kW
240 mm ²	140 kW	36 kW	14 kW	3.6 kW

Figur 7. Storleken på en produktionsanläggning ansluten till lågspänningsnätet som ger 1% spänningshöjning, för olika längder och ytan av ledning eller kabel.

Tabellen kan också tolkas som mängden extra förbrukning som ger 1 % ytterlig sänkning i spänning. De högsta spänningsändringar uppstår vid nya laster ansluten till längre ledningar eller kablar med mindre area; sådana finns i landsbygdsnät där spänningsvariationerna redan är stora. Överspänningar vid ny produktion eller underspänningar vid ny förbrukning förväntas inte uppstå i stadsnät.

Eftersom det här är ett problem som uppstår först och främst i landsbygdsnät kommer det att finnas behov på enkla billiga lösningar. Komplicerade lösningar med kommunikation och avancerade spänningsstyrning är inte det första man ska satsa på här. Något som bör studeras är att utrusta en del av den nya produktionen med överspänningsövervakning och en del av den nya förbrukningen med underspänningsövervakning. I det senare fallet kan man tänka sig större laster där tidpunkter för elanvändning är mindre kritisk som elbilar och vitvaror. Det ska ingå i studien vilka dynamiska fenomen som kan komma att uppstå till exempel genom att flera apparater kopplas in och ut samtidigt.

Här bör det även påpekas att nätet förväntas klara krav på spänningsvariationer även under reservdrift. Konsekvensen är då att det bör finnas ett visst utrymme under vanlig drift för att ta emot ny produktion och ny förbrukning. Det betyder inte att problemet är mindre, eftersom nätet måste klara alla driftsituationer; men det betyder däremot att problemet inte kommer att

uppstår så ofta i början. Sett från nätanvändarens synpunkt betyder det igen att laster inte behöver bortkopplas ofta.

En ytterligare problematik är att spänningsvariationer i lågspänningsnät inte är kartlagda, så att det inte är känt hur stor problemet kommer att vara. En del av nya elmätare har möjligheten att mäta spänningen med en tidupplösning av 1 timme eller 10 minuter. Sådana mätningar kan vara en bas för kartläggningen. Utöver det behövs det mätningar med en högre tidupplösning.

En studie där en statistisk överspänningsgräns används visas i [15] och [17]. Slutsatsen av studien är att acceptansgränsen kan ökas med mer än en faktor två bara genom att acceptera överspänningen eller ta hand om produktionen under 1 % av tiden.

5.2 Överbelastningar

Medan spänningsvariationer sätter gränser för lågspänningsnät i landsbygden, så är det strömmarna som sätter gränser i stadsnät. Även här måste nätet klara reservdrift så att det sannolikt finns en viss marginal för att tillåta nya laster. Men, som vissa händelser vintern 2010 har visat, så är lasten även i stadsnät inte helt känd.

Den nuvarande lösningen är att bygga ut nätet genom ytterligare transformatorer och kablar. Men det skulle behövas forskning mot möjligheterna att använda alternativa metoder. Samtidigt som det är en högre kundtätthet i stadsnät, så är det å andra sidan svårare att bygga ut nätet, detta innebär att det är intressant att här även titta på något mer komplicerade och dyrare metoder.

Ett extra utrymme är bra i stadsnät eftersom det behövs någon form av kommunikation mellan nätet och lasterna för att kunna styra laster på ett sådant sätt att överbelastningar förbyggs. Kommunikationen gör det också möjligt att införa dynamiska belastbarhetsgränser till komponenter i nätet. Under vintern kan samma komponent överföra mer effekt än under sommaren. Det är framförallt viktigt i Sverige där de högsta belastningarna finns under vintern. Nackdelen med dynamiska belastbarhetsgränser är att det finns en högre risk att nätet inte kommer att klara vissa lastsituationer. Genom att kunna koppla ut vissa laster vid behov minskar denna risk. Ökning av acceptansgränsen för ny produktion i regionnät med dynamiska belastbarhetsgränser behandlas i [18] och [19]. I [19] behandlas det också andra metoder att öka acceptansgränser när överbelastningar är den begränsade faktorn.

Stora mängder ny produktion kommer också att leda till överbelastningar. Som det visas i [15] kommer risken för överbelastningen inte att ökas innan den högsta produktionen överstiger summan av den högsta och den lägsta förbrukningen.

Utöver och i kombination med dynamiska överbelastbarhetsgränser finns det ett flertal andra metoder som bör studeras. Att bortkoppla laster (produktion eller förbrukning) är ett viktigt hjälpmedel att begränsa risken för överbelastning. Det behövs en kommunikationsinfrastruktur och en ersättningsmekanism innan sådan laststyrning kan användas. Olika marknadsmodeller bör studeras inklusive en realtidsmarknad [20].

Införandet av elbilar kan komma att förändra belastningen i lågspänningsnätet mycket. Det blir inte bara den totala elförbrukningen som kommer att ökas, men framförallt ett förändrat

belastningsmönster som kan bli en utmaning för elnätet. Hittills är det fortfarande helt okänt hur stor och hur snabbt övergången till elbilar kommer att bli samt hur belastningsmönstret kommer att bli efter införandet av elbilar. Studier som utfördes av EPRI visar på att första hindret kommer att bli överbelastningsproblem i landsbygdsnät [20].

Samma som vid överspänningar finns det ingen detaljerad information om belastningar i lågspänningsnät. Det behövs en kartläggning av dessa, med information från timavlästa elmätare som bas och ytterligare mätningar med en högre tidupplösning.

5.3 Vågformsdistorsion, 0 – 2 kHz

Alla nya laster som kommer att anslutas till lågspänningsnätet i Sverige förväntas ha ett kraftelektroniskt gränssnitt mot nätet (I andra länder (t.ex. Storbritannien nämns) elvärme som ett alternativ för gas eller olja; men det är inte fallet i Sverige.). Kraftelektroniska gränssnitt har stora fördelar vad gäller vikt, storlek, effektivitet och styrbarhet men sett från lågspänningsnätet innebär dessa gränssnitt en källa till övertonsdistorsion.

Mätningar av emission från nya laster och simuleringar i de fall då dessa laster ännu inte finns är självklart en viktig del av studierna. Men det är inte individuella lasternas emission som är det mest intressanta. Det är i stället emissionen av de nya lasterna tillsammans med befintliga lasterna som bör studeras. Experimentet som beskrivs i Figur 1 är ett exempel där emission från sådan blandad last har studeras. Se [4] för en studie av blandad last med olika typer av belysning.

Nästa steg blir, bland annat, att upprepa denna typ av kontrollerade experiment för andra typer av nya laster, samt att utveckla metoder för att förutse emissionen av blandad last utan att behöva utföra experiment. Mätningar eller beräkningar av den nya apparatens vågform skulle kunna vara basen till en sådan prognos.

Efter utveckling av modeller för att förutse emission av en installation med blandad last, behövs det utveckling av stokastiska metoder för att generera en population av emissionskurvor för olika kunder. En sådan population används i sin tur för att förutse statistiska nivåer av spänningsdistorsion i nätet. Risken att spänningsdistorsion överskrider tillåtna värden är ett viktigt mått för att kvantifiera påverkan av en ny typ av last på lågspänningsnätet.

Den allra största delen av laster som finns ansluten till lågspänningsnätet är massproducerade apparater som enkelt finns tillgänglig. Lågspänningskunder köper idag utrustning och ansluter själva till nätet och det ska de fortsatt kunna göra i framtiden utan att behöva bry sig om övertonsdistorsion i nätet. Vid större individuella kunder anslutna till högra spänningsnivåer kan det ställas emissionskrav från tillåtna nivåer av övertonsdistorsion [21]. Att ställa sådana emissionskrav på en anläggning ansluten till lågspänningsnätet är inte lämplig, möjligen dock ett undantag för vissa industriella lågspänningskunder.

I stället för att ställa krav på anläggningar behövs det krav på individuella apparater i emissionsstandarder. Eftersom elnätsföretagen inte kan ställa ytterliga krav på en anläggning ansluten till lågspänningsnätet är det viktigt att emissionskraven är tillräckliga för att täcka alla situationer. Det är precis detta som leder till långa diskussioner, bland annat i

standardiseringsorgan, mellan elnätsföretag och tillverkare av utrustning. Elnätsföretagen vill inte bära risken att de behöver göra dyra åtgärder i nätet för att förebygga höga nivåer av övertonsspänning medan tillverkare inte vill bära risken att deras produkter blir för dyra. Sett från samhället kan detta sista vara ett hinder mot införandet av energieffektiva apparater.

Det skulle vara intressant att undersöka om det finns alternativa lösningar som kan fördela risken på en rättvisare rätt och som även minskar de samhällsekonomiska kostnaderna. Man skulle kunna tänka sig fall där elnätsägaren gör investeringar i distributionsnätet i sådana fall att spänningsdistorsionen blir för hög. Kostnaderna för detta skulle då kunna läggas på nätanvändare genom nättarifferna. Detaljerna av detta beror på tariffreglering, men de totala samhällsekonomiska kostnaderna kan vara lägre för en sådan lösning än om man inför hårda emissionskrav som träffar alla som köper en viss apparat. Till exempel skulle man betala lite mer i elnätstariffer men istället betala mindre när man köper lågenergibelysning. För att kunna göra en samhällsekonomisk bedömning behövs det, förutom ekonomiska modeller, en kartläggning av den befintliga överdistorsionen samt hur den kommer att påverkas av nya laster.

Elektronisk instabilitet är något som ofta nämns i diskussioner som ett skräckscenario som kan ge jättehöga nivåer av övertonsdistorsion och som även skulle kunna leda till storskaliga skador och driftstörningar för apparater anslutna till lågspänningsnätet. Det har i mätningar visats på höga distorsionsnivåer mellan neutral och jordledare i ett lågspänningsnät som matas från en UPS [22] som möjligen är relaterade till elektronisk instabilitet. Men det är fortfarande mycket oklart om sådant är möjligt i allmänna lågspänningsnät och i så fall hur sannolikt det är att det inträffar. Det finns olika scenarior som skulle kunna leda till instabilitet och därmed höga övertonsnivåer; vissa scenarior innehåller resonans mellan kondensatorer och induktanser medan det är reglersystemen som ligger till grund för instabilitet i andra scenarier. Men något som alla scenarier har gemensamt är en situation där det inte längre finns någon dämpning. En del av denna dämpning av övertonsnivåer vid resonanser fås av glödlampor, som är rent resistiva. Ersättning av glödlampor med andra typer av belysning kan leda till en ökning av distorsionsnivå vid resonanser och möjligen till väldigt höga nivåer om dämpning uteblir.

Det som krävs är ett försök att åstadkomma elektronisk instabilitet i ett realistisk laboratoriummodell av en del av lågspänningsnätet. Den fullskaliga modellen av en villakund, som refererades till förut, kan användas som bas för en sådan studie. Villkoren för elektronisk instabilitet, som kommer fram från teoretiska studier ska då reproduceras i laboratoriet.

5.4 Vågformsdistorsion, 2 - 150 kHz

Elkraftgruppen i Skellefteå har blivit ledande i studierna av det här frekvensområdet efter två avhandlingar [1][2], en licentiatuppsats [3] och ett flertal tidskriftartiklar och konferensbidrag. Men det finns mycket kvar att göra. Brist på kunskaper, och därmed forskningsbehov, finns även vad det gäller befintliga laster anslutna till lågspänningsnätet eftersom det här är ett ganska nytt forskningsområde. Det kommer troligen att bli en ökning av distorsionsnivåerna i detta frekvensområde. När det gäller en del av lasterna är det emissionskravet som ställs vid lägre frekvenser som leder till användning av laster med aktivt gränssnitt, och därmed generering av störnivåer på högre frekvenser, men det kan också ha andra fördelar som bättre

styrbarhet och lägre vikt. Det som behövs i detta frekvensområde är fortsatta studier på emission från nya apparater; studier om spridning av emission till nätet inklusive sammanlagring mellan apparater; och studier om konsekvenser av vågformsdistorsion.

Elnätskommunikation, som blir allt viktigare med avancerade elmätare och andra nya lösningar som går under namnet ”smarta elnät”, utnyttjar i många fall frekvensområdet 9 till 95 kHz. En studie av vågformsdistorsion i området 2 – 150 kHz måste därför ta med växelverknigen mellan elnätskommunikation och apparater ansluten till nätet. En översikt av de olika typerna av växelverknig visas i avsnitt 4 och i [11].

Studie av emission från nya laster samt aggregering mellan nya och befintliga laster kommer fortfarande att behöva mycket mätningar: kontrollerade experiment i laboratoriet samt fältmätningar i befintliga anläggningar. Utveckling av relevanta och reproducerbara kontrollerade experiment kommer att vara en viktig bas för forskning på detta frekvensområde. Exempel av kontrollerade experiment visas i [4] och [10].

Vad gäller spridning av emission behövs det fortsatt kontrollerade experiment, men det är även dags att utveckla simuleringsmodeller som ger en större flexibilitet än experiment. Nuvarande resultat, presenterad i avsnitt 3 och i [9], anger att det är kondensatorn som spelar en stor roll, men det behövs mer detaljerade modeller för att kunna studera spridningen på ett mer kvantitativt sätt. Sådana modeller samt kunskaper om aggregering mellan apparater, är ett viktigt underlag för standardiseringen.

Mer detaljerade modeller behövs också för att studera resonanser. Att resonanser kan inträffa mellan laster visas i [3] men hittills har fenomenen inte studerats i detalj. Det behövs en kombination av mätningar och simuleringar för sådana studier. Simuleringar behövs för att designa experiment, medan mätningar behövs för att uppskatta dämpningen och för att verifiera simuleringsmodellerna. Förväntningen är att de högsta distorsionsnivåerna kommer att uppstå i samband med resonanser. Det är därför viktigt med studier av resonanser även om deras sannolikhet att inträffa kan var låg.

Vad gäller påverkan på apparater behövs det långtidsprov, där de höga nivåerna på grund av elnätskommunikation ska studeras först. Näst därefter blir det påverkan av stora apparater (t.ex. laddning av elbilar) på små apparater (t.ex. LED belysning) som bör studeras. Påverkan av apparater anslutna till elnätet är fortfarande till största delen okänd. Men det behövs kvantitativa kunskaper om detta som underlag för standarder inom detta frekvensområde.

5.5 Snabba spänningsändringar

Vissa nya laster kan leda till en ökning av antalet snabba spänningsändringar i lågspänningsnätet. Det gäller bland annat värmepumpar i landsbygdsnät, men även laster som är utsatt för laststyrning.

Det finns troligen inga direkta konsekvenser av snabba spänningsändringar på nätet eller på apparater anslutna till nätet. Konsekvenserna blir istället flimmar och märkbara ändringar i ljusintensitet (blinkningar) vid belysning. Glödlampor anses vara mest känsliga mot flimmar (dvs största variationer i ljusintensitet från variationer i spänningens amplitud) men det finns misstankar att vissa typer av lågenergibelysning är lika, om inte ännu mer känsliga. En

minskning av emission av övertoner (under 2 kHz) kan leda till en ökning av känslighet mot flimmer.

En fortsatt forskning behövs bland annat för att kartlägga relationen mellan emissionskrav som ställs för övertoner och den känslighet som belysning har för flimmer.

6 Slutsatser

Projektet ”Nya lågspänningslaster och störningar i frekvensområdet 2 till 150 kHz” har lett till ökade kunskaper om vågformsdistorsion. De följande konkreta resultaten kan nämnas:

- ✓ Emission i detta frekvensområde flödar framförallt mellan apparater och bara till en liten del mot nätet.
- ✓ Kondensatorn på nätsidan av gränssnittet mellan nätet och apparaten har ett dominerande inflytande på spridning av emission mellan apparater och mot nätet.
- ✓ För att kunna kvantifiera strömmen vid gränssnittet behövs det en uppdelning i primär och sekundär emission.
- ✓ Det finns olika sätt där laster ansluten till lågspänningsnätet kan påverka elnätets kommunikation och tvärtom. Det gjordes en uppdelning i fem olika typer av växelverknings.

Som en del av projektet gjordes det även en kartläggning av forskningsbehovet vid integrering av nya laster (båda produktion och förbrukning) i lågspänningsnätet. Det identifierades forskningsbehov vid fem olika påverkningar av nya laster på prestandan av lågspänningsnätet:

- ✓ Spänningsreglering;
- ✓ Överbelastningar;
- ✓ Vågformsdistorsion, 0 – 2 kHz;
- ✓ Vågformsdistorsion, 2 – 150 kHz;
- ✓ Snabba spänningsändringar.

Vid grundtonsrelaterade fenomen (spänningsreglering och överbelastningar) finns det behov av att kvantifiera påverkan av nya laster genom acceptansgränsmetoden samt att studera förmågan att öka acceptansgränsen av nya metoder, som laststyrning, kommunikation och avancerade marknadsmodeller. Dessa nya metoder refereras till under namnet ”smarta elnät”. Vid grundtonsrelaterade fenomen finns det även behov att kartlägga de befintliga variationerna i spänning och ström genom att samla in och analysera mätdata från timavlästa elmätare.

För ej-grundtonsrelaterade fenomen (vågformsdistorsion, snabba spänningsändringar) finns det ett större behov på dedikerade mätningar samt kontrollerade experiment. Utveckling av simuleringsmodeller och underlag för standardisering är också viktiga delar av det framtida forskningsbehovet.

7 Referenser

- [1] Martin Lundmark, The zone concept: design of low-voltage installations considering the spread of high frequency harmonics, doktorandavhandling, Luleå tekniska universitet, 1 december 2010.
- [2] Anders Larsson, On high-frequency distortion in low-voltage power systems, disputation, doktorandavhandling, Luleå tekniska universitet, 23 mars 2011.
- [3] Sara Rönnerberg, Power line communication and customer equipment, licentiatuppsats, Luleå tekniska universitet, 28 april 2011.
- [4] S. K Rönnerberg, M.H.J. Bollen, M Wahlberg, Harmonic emission before and after changing to LED and CFL – Part I: laboratory measurements for a domestic customer, Int Conf on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), Bergamo, Italy, September 2010.
- [5] S. Rönnerberg, M. Wahlberg, M. Bollen, Total conducted emission from a customer in the frequency range 2 to 150 kHz with different types of lighting, Int. Conf. on Electricity Distribution, Frankfurt, Germany, June 2011.
- [6] S.K. Rönnerberg, M. Wahlberg, M.H.J. Bollen, Harmonic emission before and after changing to LED and CFL – Part II: Field measurements for a hotel, Int Conf on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), Bergamo, Italy, September 2010.
- [7] S. Rönnerberg, M. Wahlberg, M. Bollen, A. Larsson, M. Lundmark, Measurements of interaction between equipment in the frequency range 9 to 95 kHz, Int. Conf. on Electricity Distribution, Prague, June 2009.
- [8] S. K. Rönnerberg, M. Wahlberg, E.O.A. Larsson, M.H. J. Bollen, C.M. Lundmark, Interaction between equipment and Power Line Communication: 9-95 kHz, Bucharest Power Tech, July 2009.
- [9] S. Rönnerberg, A. Larsson, M. Bollen, J.-L. Schanen, A simple model for interaction between equipment at a frequency of some tens of kHz, Int. Conf. on Electricity Distribution, Frankfurt, Germany, June 2011.
- [10] E.O.A. Larsson, M.H.J. Bollen, Measurement result from 1 to 48 fluorescent lamps in the frequency range 2 to 150 kHz, Int Conf on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), Bergamo, Italy, September 2010.
- [11] S. K. Rönnerberg, M. H. J. Bollen, M. Wahlberg, Interaction between narrowband power-line communication and end-user equipment, IEEE Transactions on Power Delivery, in print.
- [12] S. K. Rönnerberg, M. Wahlberg, M. H. J. Bollen, C.M. Lundmark, Equipment currents in the frequency range 9-95 kHz, measured in a realistic environment, Int Conf on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), Wollongong, Australia, September 2008.
- [13] S. Rönnerberg, M. Lundmark, M. Wahlberg, M. Andersson, A. Larsson, M. Bollen, Attenuation and noise level – potential problems with communication via the power grid, Int Conf on Electricity Distribution (CIRED), Vienna, May 2007.
- [14] M.O.J. Andersson, S.K. Rönnerberg, C.M. Lundmark, E.O.A. Larsson, M. Wahlberg, M.H.J. Bollen, Interfering signals and attenuation - potential problems with

communication via the power grid, Nordic Distribution Automation Conference (Nordac), Stockholm, August 2006.

- [15] Math Bollen, Fainan Hassan, Integration of distributed generation in power systems, Wiley IEEE Press, July 2011.
- [16] Yongtao Yang, Math Bollen, Power quality and reliability in distribution networks with increased levels of distributed generation, Elforsk report 08:39, March 2008.
- [17] M.H.J. Bollen, F. Hassan, Y. Yang, Limitations set by the distribution network against the large-scale integration of distributed energy resources, Int Conf on Integration of DER and RES, Nice, France, December 2008.
- [18] Mikael Wämundson, Math Bollen, Jan Lundquist, Riskanalysmetod vid vindkraftintegrering i regionnät, Elforskreport 10:89, September 2010.
- [19] N. Etherden, M.H.J. Bollen, Increasing the Hosting Capacity of Distribution Networks by Curtailment of Renewable Energy Resources, IEEE Power Tech, Trondheim, June 2011.
- [20] Math Bollen (projektledare), Anpassning av elnäten till ett uthålligt energisystem - Smarta mätare och intelligenta nät, Energimarknadsinspektionen, 1 december 2010, EI R2010:18.
- [21] M. Bollen, M. Häger, M. Olofsson, Allocation of emission limits for individual emitters at different voltage levels: flicker and harmonics, CIGRE Sessions, Paris, France, August 2010, paper C4-106.
- [22] C.M. Lundmark, S. K. Rönnberg, M. Wahlberg, E.O.A. Larsson, M. H. J. Bollen, EMC Filter Common Mode Resonance , Bucharest Power Tech, July 2009.