

PÅVERKAN PÅ NÄTET FRÅN STORA MÄNGDER SOLKRAFT

RAPPORT 2018:539



Påverkan på nätet från stora mängder solkraft

Läget och utmaningar vad gäller påverkan av stora mängder solkraft på framförallt lågspänningsnät

**MATH BOLLEN, SARAH RÖNNBERG,
OSCAR LENNERHAG**

ISBN 978-91-7673-539-8 | © Energiforsk oktober 2018

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

Förord

Denna rapport är en sammanställning av resultat från ett antal projekt som finansierades av Energiforsk, resultat och preliminära resultat från andra projekt, främst inom programmet Smarta Elnät, samt en del tillägg framförallt på diskussionsnivå.

Rapporten är del av resultatet i Överspänning från enfasanslutna solpaneler, Energiforskrappport 2018-506, men täcker mer än bara detta projekt.

Math Bollen från Luleå tekniska universitet i Skellefteå har lett projektet som också har bestått av Sarah Rönnberg, Luleå tekniska universitet och Oscar Lennerhag, Independent Insulation Group. Ett extra stort tack också till referensgruppen, som har bidragit till projektet:

- Sara Johansson, Vattenfall Energy Trading AB
- Nicklas Fredlund, Elverket Vallentuna AB
- Tokhir Gafurov, Mälarenergi AB
- Oscar Willén, She AB
- Andres Feurst, Öresundskraft AB
- Malin Westman, Skellefteå Kraft AB

Smarta Elnäts programstyrelse, som initierat, följt upp och godkänt projektet, består av följande ledamöter:

- Peter Söderström, Vattenfall Eldistribution AB (ordförande)
- Torbjörn Solver, Mälarenergi AB (vice ordförande)
- Mira Rosengren Keijser, Svenska kraftnät
- Patrik Björnström, Sveriges ingenjörer (Miljöfonden)
- Kristina Nilsson, Ellevio AB
- Björn Ållebrand, Trafikverket
- Ferruccio Vuinovich, Göteborg Energi AB
- Per-Olov Lundqvist, Sandviken Energi AB
- Claes Wedén, ABB AB
- Daniel Köbi, Jämtkraft AB
- Hannes Schmied, NCC AB
- Mats Bergström, Umeå Energi Elnät AB
- Magnus Sjunnesson, Öresundskraft AB
- Henric Johansson, Jönköping Energi AB
- David Håkansson, Borås Elnät AB
- Peter Addicksson, HEM AB
- Anders Fredriksson, Energiföretagen Sverige (adjungerad)

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

Vattenfall Eldistribution AB
Ellevio AB
Svenska kraftnät
Göteborg Energi AB
Elinorr ekonomisk förening
Mälarenergi Elnät AB
Kraftringen Nät AB
Jämtkraft AB
Umeå Energi Elnät AB
Öresundskraft AB
Karlstads Elnät AB
Jönköping Energi Nät AB
Halmstad Energi & Miljö Nät AB
Falun Elnät AB
Borås Elnät AB
AB Borlänge Energi
C4 Elnät AB
Luleå Energi AB
ABB AB
Trafikverket
Akademiska Hus
NKT Cables AB
NCC Construction Sverige AB
Storuman Energi AB

Stockholm i oktober 2018

Susanne Stjernfeldt
Energiforsk AB
Programområde Elnät, Vindkraft och Solel

Sammanfattning

Denna rapport sammanfattar läget med kunskaper och utmaningar vad gäller anslutning av stora mängder solkraft till elnätet. Inriktningen kommer att vara framförallt anslutning av ett stort antal små solcellsanläggningar. Information till rapporten kommer att tas från tidigare Energiforskprojekt, från andra pågående projekt på Luleå tekniska universitet och från andra publicerade och opublicerade källor.

Rapporten behandlar följande påverkningar av solkraft på elnätet: långsamma, mellansnabba och snabba spänningsvariationer; obalans; över-, mellan- och supratoner; överlast; brist på tröghetsmoment; okontrollerad ödrift; och selektivitet av skydd.

Rapporten även kortfattat beskriver likheter och skillnader vad gäller utmaningar vid storskalig användning av elbilsladdning.

En av de viktiga slutsatserna från de olika studier och resonemang som presenteras i denna rapport är att det finns en hel del osäkerheter vad gäller hur solkraft kommer att påverka lågspänningsnätet. För olika typer av fenomen finns det olika osäkerheter och olika nivåer av osäkerhet. Det påverkar till en stor del hur det bör ageras för att förebygga oacceptabla konsekvenser av stora mängder solkraft ansluten till lågspänningsnät.

Summary

This report summarizes the knowledge and challenges regarding the integration of large amounts of solar power to the power grid. The focus is on the connection of a large number of small photovoltaic installations. Information for the report has been obtained from earlier projects with Energiforsk, from other ongoing projects at Luleå University of Technology and from other published and unpublished sources.

The report addresses the following impacts of solar power on the grid: slow, medium and fast voltage variations; unbalance; harmonics, interharmonics and supraharmonics; overload; lack of inertia; uncontrolled island drift; and selectivity of protection.

The report also briefly describes similarities and differences in the challenges of large-scale use of electric vehicle charging.

One of the key conclusions from the various studies and reasoning presented in this report is that there are many uncertainties as to how solar power will affect the low voltage network. For different types of phenomena, there are different uncertainties and different levels of uncertainty. This largely influences which action should be taken to prevent unacceptable consequences of large amounts of solar power connected to low voltage networks.

Innehåll

1	Inledning	8
2	Långsamma spänningsvariationer	10
3	Mellansnabba spänningsvariationer	15
4	Snabba spänningsvariationer	17
5	Obalans	19
6	Övertoner	21
7	Mellantoner	24
8	Supratoner	25
9	Övrig påverkan	26
	9.1 Överlast av transformatorer och kablar	26
	9.2 Brist på tröghetsmoment	27
	9.3 Okontrollerad ödrift	28
	9.4 Påverkan på selektivitet av skydd	28
10	Elbilsladdning	29
	10.1 Överbelastning	29
	10.2 Långsamma spänningsvariationer	30
	10.3 Mellansnabba spänningsvariationer	30
	10.4 Snabba spänningsvariationer	30
	10.5 Obalans	30
	10.6 Övertoner	30
	10.7 Mellantoner	31
	10.8 Supratoner	31
11	Diskussion och slutsatser	32
12	Referenser	34

1 Inledning

Det har utförts ett antal projekt, finansierade av Elforsk och senare Energiforsk, om hur spänningskvalitet påverkas av stora mängder solcellsanläggningar anslutna till lågspänningsnätet. Projekten handlade om obalans [1], långvariga överspänningar [2], mellansnabba spänningsvariationer [3, 4], övertoner [5] och supratoner [5, 6].

En tidigare sammanställning av hur solcellsanläggningar (då refererat till som "mikroproduktion") kan påverka elnätet finns i en Elforskrapport från 2009 [7], som var till stor del baserad på kunskaper som erhållits i ett europeiskt projekt om distribuerad generering [8]; en stor del av rapportens innehåll blev även del av en bok om distribuerad generering [9].

Denna rapport sammanfattar läget med kunskaper och utmaningar vad gäller anslutning av stora mängder solkraft till elnätet. Inriktningen kommer att vara framförallt anslutning av ett stort antal små solcellsanläggningar. Information till rapporten kommer att tas från ovannämnda projekt, från andra pågående projekt på Luleå tekniska universitet och från andra publicerade och opublicerade källor. Rapporten är inte tänkt som en komplett beskrivning av forskningsläget men författarna har ändå försökt att ta med de senaste resultaten från forskningen och andra studier. Rapporten ska inte ses som en forskningsrapport; även om stora delar av rapporten gäller forskningsresultat kommer även information från andra källor att tas med samt en del allmänna observationer som inte är underbyggda av systematiska studier.

Ett viktigt begrep som kom upp redan 2004, i början av EU-DEEP projektet, och som också nämns i [7] är "acceptansgräns" ("Hosting capacity", på engelska). Acceptansgränsen introducerades som största mängden småskalig produktion (begreppet "distribuerad generering" användes i början) som kan anslutas till ett elnät utan att det leder till en oacceptabel minskning av nätets prestanda, och utan att det görs några investeringar eller andra förändringar i nätet. Konceptet har senare också används för ny eller ökad förbrukning och för studier på högre spänningsnivåer än distribution. En hel del acceptansgränsstudier har utförts då långsamma spänningsvariationer antas sätta gränser.

Vid studier av solkraftintegrering råder det ett flertal osäkerheter som på något sätt ska tas med i acceptansgränsberäkningar. Mest känt och diskuterat är variationer i solinstrålning över tid, delvis på grund av jorden som roterar runt sin axel och runt solen, och delvis på grund av variationer i molnighet. Det breda begreppet "intermittent" används för att beskriva båda, men bara det sistnämnda (variationer i molnighet) kan räknas som en osäkerhet. En hel del acceptansgränsstudier för solkraft använder uppmätta tidserier av solinstrålning, molnighet, eller produktion, ofta tillsammans med uppmätta tidserier av förbrukning eller spänning. Men det har även genomförts studier, bland annat i ovannämnda projekt, då ett fast värde av produktion används för att uppskatta marginalen som finns inom planering av distributionsnät.

Utöver variationen i produktion från solcellsanläggningar och förbrukning i lågspänningsnätet, finns det en annan typ av osäkerhet som ska tas med i

acceptansgränsberäkningar. För produktion och förbrukning finns det tidserier och utifrån dessa är det till exempel möjligt att ta fram en sannolikhetsfördelning. Antaganden ska göras så att dessa inte ändras för mycket under tidsintervallet som acceptansgränsberäkningen gäller för (till exempel fem år in i framtiden). Men för vissa osäkerheter finns det inga tidserier och sannolikhetsfördelningar. Detta gäller bland annat vilka kunder som kommer att ha solcellsanläggningar och hur dessa kommer att se ut. Informellt refereras detta till som "osäker osäkerhet" medan variationer i produktion och förbrukning refereras till som "säker osäkerhet". Här är det dock viktigt att påpeka att det rent matematiskt inte finns olika typer av osäkerhet. Även för antalet kunder som kommer att ha solcellsanläggningar om till exempel fem år kan det göras en sannolikhetsfördelning. När sannolikhetsfördelningen finns, kan samma matematiska metoder tillämpas som för variationer då det finns tidserier. Skillnaden finns dock i värdet och tolkningen av beräkningsresultat.

Resten av rapporten innehåller framförallt ett antal kapitel då olika påverkningar av solkraft behandlas, Kapitel 2 tom 9. Kapitel 10 innehåller en kort genomgång av samma fenomen som i Kapitel 2 tom 9, men med hänsyn till elbilsladdning i lågspänningsnät. Kapitel 11, till slutet, ger en överblickande diskussion om resultaten samt några allmänna tankar om vägen framåt.

2 Långsamma spänningsvariationer

Överspänningar på grund av solcellsanläggningar är ett välstuderat fenomen och det finns en hel del publikationer på ämnet. Vid trefasig anslutning av en solcellsanläggning med producerad effekt P per fas, blir spänningshöjningen i god approximation lika med:

$$\Delta U = \frac{RP}{U} \quad (1)$$

Då U är spänningen vid klämmorna av anläggningen och R den resistiva delen av källimpedansen vid klämmorna. Om överspänningsmarginalen är känd är det enkelt att uppskatta acceptansgränsen utifrån ekvationen.

Överspänningsmarginalen är då skillnaden mellan den högsta tillåtna spänningen (till exempel 110%) och högsta spänningen innan anslutning, under timmarna då det kan förväntas hög produktion. Eftersom både produktionen och spänningen innan anslutningen varierar mycket över tid (årliga, veckovisa, dagliga variationer och även variationer på kortare tidskalor) används ofta tidserier för att uppskatta överspänningsmarginalen.

Ekvation (1) gäller även vid enfasig anslutning, men då är det inte samma effekt eller resistans som vid trefasanslutningen. Effekten blir den totala effekten (även här effekten per fas, men den är inte längre en tredjedel av den totala effekten) och resistansen blir summan av resistansen i nolledaren och i fasledaren (istället för bara impedansen i fasledaren). Vid de flesta befintliga lågspänningsnät är resistansen i nolledaren ungefär lika som resistansen i fasledaren. Konsekvensen blir att spänningshöjningen vid enfasig anslutning blir omkring sex gånger så stor som vid trefasig anslutning av samma effekt.

I rapport [2] används data om källimpedansen för 50 000 lågspänningskunder, både jordfelsimpedansen och kortslutningsimpedansen. Från dessa data har det räknats ut vad spänningsökningen skulle vara vid anslutning av 6 kW solkraft, båda enfasig och trefasig. Tabell 1 visar hur många kunder som skulle få en spänningshöjning som är mer än en viss överspänningsmarginal. Vid en tillåten spänningshöjning på 3 % eller 5 % är det en stor andel (50 % respektive 25 %) av kunderna som inte skulle kunna ansluta 6 kW. Vid trefasig anslutning är det bara en liten del.

Tabell 1. Andel kunder då spänningshöjningen skulle överskrida vissa gränser

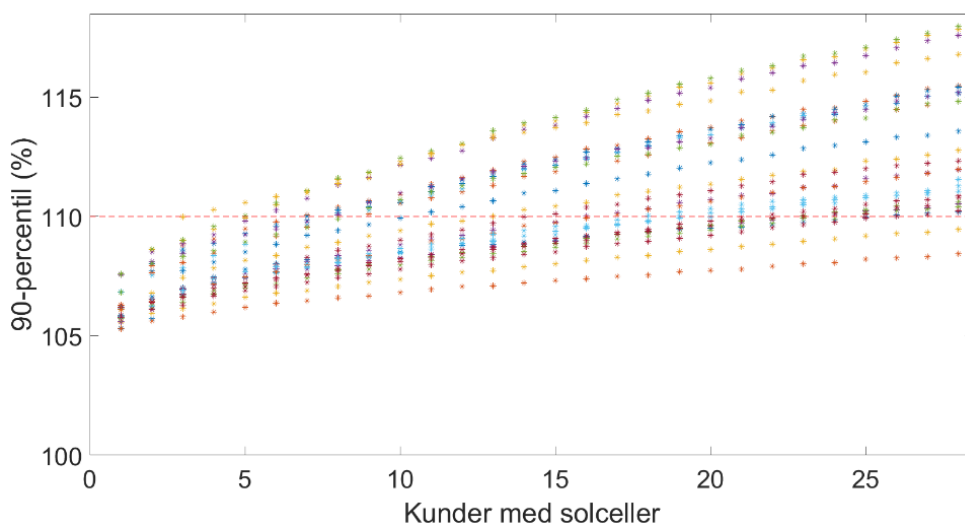
Högsta tillåtna spänningshöjning	3%	5%	10%
Andel kunder som överskrider detta vid enfasig anslutning av 6 kW	51%	25%	4,6%
Andel kunder som överskrider detta vid trefasig anslutning av 6 kW	0,5%	0,04%	0,002%

Enfasig anslutning av solcellsanläggningar leder inte bara till en överspänning i fasen som anläggningen är ansluten till. Det blir även en spänningssänkning i en eller två av de andra faserna. För fallen som studerades kom spänningen aldrig under 90 % av märkspänningen. Men underspänningar skulle kunna uppstå när det finns hög solkraftproduktion under tider av hög förbrukning (dvs låg

spänning). Studierna har inte direkt riktat sig mot denna situation och det behövs ytterligare datainsamling för att kunna bedöma risken till detta.

En metod utvecklades i [2] då acceptansgränsen beräknas på ett stokastiskt sätt. Det som tas med i metoden är osäkerheten vad gäller vilka kunder som kommer att ha solkraft och i vilken fas den kommer att anslutas. Det antas även en fördelning för förbrukning per fas och bakgrundspänningen under perioderna då det kan förväntas en hög inmatning från solcellsanläggningarna. Bakgrundspänningen är spänningen i lågspänningsnätet när det varken finns förbrukning eller produktion. Produktion från solcellsanläggningar antogs vara 6 kW per anläggning med inmatning i en fas.

Metoden har tillämpats på ett 6-kunders nät och på ett 28-kunders nät. Slutsatsen var att det bara går att ansluta ett fåtal sådana anläggningar innan risken blir för stor att spänningen överskrider 110 % av märkspänningen. Ett exempel på ett prestandaindex visas i Figur 1.



Figur 1. Prestandaindex (90-percentil av högsta spänning) för 28-kunders nät.

Innan det dras för hårda slutsatser om förmågan hos svenska elnät att ta emot solkraft, behövs det en diskussion om rimligheten hos slutsatserna.

- Det har antagits att alla anläggningar matar in 6 kW i samma moment. Det är inte sannolikt men ska tas som ett värsta fall. En del av anläggningarna kommer att ha en märkeffekt mindre än 6 kW. Lutningen och lutningens riktning kommer att vara annorlunda för olika anläggningar. Acceptansgränsen beräknades till 3 kunder med 6 kW solkraft eller 11 kunder med 4 kW solkraft för 28-kunders nätet.
- Det har antagits en acceptabel risk på 10 % att spänningen överstiger 110 % av märkspänningen. Observera att det inte betyder att spänningen kommer att vara högre än så under 10 % av tiden; det har inte tagits med några tidserier utan istället är det som beräknas ett värsta fall. Risken betyder då sannolikheten att det kommer att bli en fördelning av solcellsanläggningar över kunder och faser som ger en högsta spänning som överskrider 110 %.

Vid en acceptabel risk på 25 %, och samma 6 kW enfasiga anläggningar, blir acceptansgränsen lika med 8 kunder.

- Om kunder med större anläggningar skulle, av någon anledning, välja en trefasanslutning skulle acceptansgränsen också öka en hel del. Just nu pågår det en del studier för att kunna kvantifiera hur det påverkar acceptansgränsen. En anledning till att välja en trefasanslutning, utöver ett förbud att ansluta enfasigt, är att enfasanslutningen behöver en större säkring.
- En annan parameter som påverkar acceptansgränsen är bakgrundsspänningen. I basfallet varierade bakgrundsspänningen mellan 238 och 242 V. Att flytta hela intervallet med bara 2 V (mindre än 1 % av märkspänning) ökar acceptansgränsen från 3 till 6 kunder.
- Påverkan från belastningen på överspänningsrisken har visats begränsad för de fall som studerades. Men även här ska ögonen hållas öppna för att se om det finns fall då det kan inträffa en större förbrukning under årets bästa timmar för solkraft. Ett möjligt exempel skulle vara affärscenter som är alltid öppna mitt på dagen.

Just nu pågår det, som del av ett doktorandprojekt, studier då mer parametrar tas med i modellen. Vad gäller modellparametrar finns det två helt olika utmaningar. Först är det brist på detaljerade och tillgängliga data om hur spänningen och förbrukningen ser ut i befintliga lågspänningsnät. Det pågår en del mätkampanjer men för tillfället finns data ännu inte tillgänglig för forskning.

En mindre del mätdata samlades in i [2] och en av slutsatserna var att det behövs data, för förbrukningen och bakgrundsspänningen, med en tidsupplösning på 10 minuter, eftersom regelverket sätter krav på 10-minutersvärdet av effektivspänningen. Att använda 1-timmes upplösning kan överskatta acceptansgränsen.

Den andra utmaningen handlar om modeller för framtida beteende hos kunder. Några exempel på frågeställningar som är svåra att modellera:

- Hur många och vilka kunder kommer att ha solkraft?
- Hur stor kommer anläggningen att vara?
- Vad är panelernas lutning och i vilken riktning?
- Är anläggningen enfasig eller trefasigt ansluten? Vid enfasig anslutning, hur är fördelning av anläggningarna över faserna?

Spänningsökning vid trefasig anslutning är en faktor sex mindre än vid enfasig anslutning. Det betyder att acceptansgränsen är större, men med något mindre än en faktor sex eftersom högsta fasspänningen innan anslutning är det som sätter gränsen. Vid stora mängder solkraft i nät där det redan finns en hög bakgrundsspänning kan det bli en utmaning ändå.

Framförallt vid enfasanslutning, men även vid trefasanslutning behövs det i slutändan åtgärder för att förebygga en stor risk för överspänningar. En del metoder studerades i [2]. Metoden som visade sig mest effektiv för enfasigt anslutna anläggningar är att göra en koordinerad anslutning. Det som görs då är att varje ny anläggning ansluts till fasen där spänningen är lägst innan anslutningen. Simuleringar visar att det då går att ansluta 6 kW enfasig solkraft vid

nästan alla kunder i 28-kundersnätet. Det som behöver utvecklas är en metod om hur (när på dagen; hur länge?) det ska mätas innan det kan bestämmas vilken fas man bör ansluta till. Även om mätningarna skulle vara begränsade, blir risken för överspänning ändå mindre än vid rent slumpmässig anslutning. För att kunna bedöma hur mycket risken minskar, behövs det mer studier och rekommendationer om hur sådant skulle behöva gå till i praktiken.

Det gjordes även en utvärdering av reaktiv-effektstyrning vid kunder. Slutsatsen var att den bara ger en begränsad minskning av risken för överspänning vid solcellsanläggningen, medan styrningen ger en stor ökning av risken för underspänning vid andra kunder.

Andra möjliga åtgärder är reaktiv-effektstyrning vid distributionstransformatoren och aktiv-effektstyrning vid solcellskunder. Reaktiv-effektstyrning kan då bestå av en shuntkondensator eller shuntreaktor på lågspänningssidan av transformatorn. Aktiv-effektstyrning kan bestå av nedstyrning av produktionen eller av lagring i en batterianläggning vid kunden.

Automatiska lindningskopplare vid distributionstransformatorer har också studerats i [2]. Lindningskopplare kan hålla spänningen på lågspänningssidan av transformatorn inom ett visst dödband. Spänningsvariationer som kommer från mellanspänningsnätet filtreras bort. En tillkommande fördel är att dödbandet kan flyttas upp och ner för att kompensera för årsvariationer i förbrukning och produktion.

Det har samlats in elkvalitetsdata i lågspänningsnät från ett stort antal platser i Sverige och utomlands. Data från mätställen i Sverige är underlag för Tabell 2. De flesta mätperioder var 27,5 timmar med undantag av 48/49 som var 21,5/24,5 timmar och 51/53 som var 182/202 timmar.

För dessa mätpunkter finns det gott om marginal, mer än 5 % både mot under- och överspänningsgränsen. Men slutsatsen kan inte generaliseras, bland annat eftersom valet av mätpunkter inte var representativt för ställen där det förväntas anslutas solcellsanläggningar. För denna, begränsade, kampanj är 10-minuters effektivvärdet av spänningen mellan 96,5 och 104,7 % av märkspänningen. Den dagliga variationen är upp till 4,4 %.

Tabell 2. Några resultat från en pågående mätkampanj efter spänningsvariationer i lågspänningsnät: lägsta och högsta 10-minuters effektivvärdet av spänningen över mätperioden samt skillnaden mellan dessa. Första kolumnen ger numret av mätserien.

	Mätställe	Lägsta (V)	Högsta (V)	Skillnad (V)
2	Lägenhet, stadsnät	231,6 V	237,5 V	6,0 V
5	Hotell, stadsnät	229,5 V	237,1 V	7,5 V
10	Hotell, stadsnät	222,9 V	231,9 V	9,1 V
13	Lägenhet, stadsnät	227,2 V	233,5 V	6,3 V
38	Sommarstuga, landsbygdsnät	221,9 V	231,4 V	9,4 V
41	Hotell, stadsnät	224,6 V	232,4 V	7,8 V
46	Villa, landsbygdsnät	228,6 V	234,1 V	5,5 V
47	Lägenhet, stadsnät	228,2 V	234,9 V	6,7 V
48	Universitet, stadsnät	228,2 V	234,8 V	6,6 V
49	Universitet, stadsnät	223,8 V	229,3 V	5,6 V
50	Villa, stadsnät	227,1 V	233,1 V	6,1 V
51	Villa, landsbygdsnät	222,2 V	232,3 V	10,0 V
52	Villa, landsbygdsnät	231,5 V	239,0 V	7,5 V
53	Villa, landsbygdsnät	226,0 V	235,0 V	9,0 V
54	Universitet, stadsnät	225,9 V	231,2 V	5,3 V
55	Restaurang, stadsnät	234,3 V	240,2 V	5,9 V
56	Restaurang, stadsnät	233,7 V	240,8 V	7,1 V
57	Sommarstuga, landsbygdsnät	226,7 V	232,9 V	6,2 V
58	Universitet, stadsnät	229,5 V	235,4 V	6,0 V

3 Mellansnabba spänningsvariationer

Vad gäller spänningsvariationer behandlas tidskalan mellan några sekunder och några minuter inte alls i standarder eller svenska regelverk. Tidskalan över några minuter ingår i långsamma spänningsvariationer (se Kapitel 2) medan tidskalan under några sekunder ingår i snabba spänningsvariationer (Kapitel 4). Begreppet "mellansnabba spänningsvariationer" används i denna rapport, det är inget vedertaget begrepp, det används bara i brist på något bättre.

Brist på standarder för mellansnabba spänningsvariationer har också lett till att det bara görs begränsad forskning här och att denna typ av elkvalitetsstörning sällan tas med i mätkampanjer.

En del av variationerna i produktion, på grund av växlande molnighet, finns i det mellansnabba området. Vid en ökande mängd solkraft förväntas det därför en ökning av nivåerna av mellansnabba spänningsvariationer. Men eftersom det saknas en metod för att kvantifiera mellansnabba spänningsvariationer är det inte möjligt att kvantifiera hur mycket solkraft bidrar till dessa spänningsvariationer. Med detta i bakhuvudet utvecklades det, i ovannämnda europeiska projekt, ett prestandaindex som refererades till som "very short variations", kort VSV [10, 11]. Det finns för tillfället ingen bra översättning, så vi använder förkortningen VSV här i rapporten.

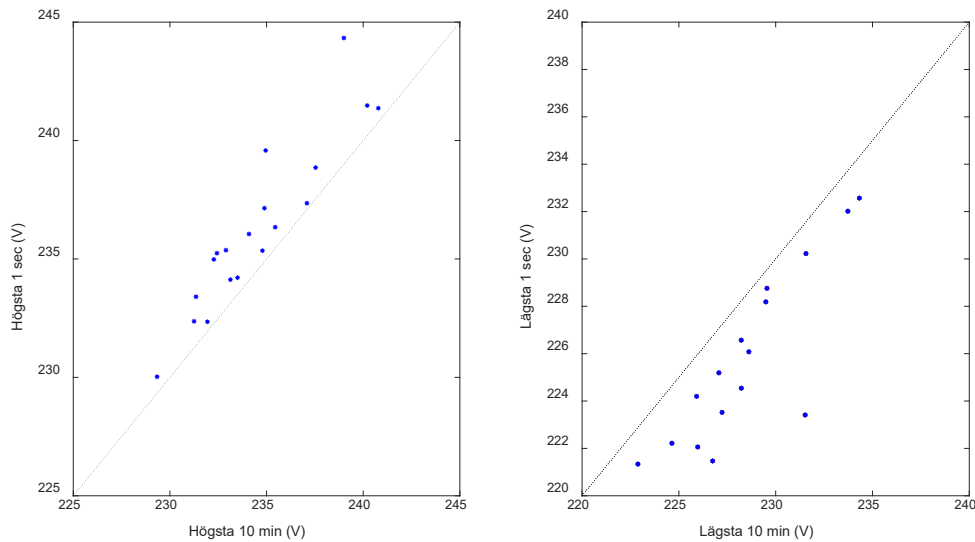
Det har utförts två projekt då mellansnabba spänningsvariationer studerades mer i detalj [3, 4]. Båda projekten kombinerar mätningar av befintliga variationer i spänning med uppmätta variationer i produktion genom att mata in dessa i en förenklad nätmodell. Då det är möjligt, har uppmätta tidserier för spänning och produktion tagits från samma tidsperiod så att externa fenomen som påverkar båda tas med på ett korrekt sätt. Källimpedansen på 50 Hz har använts som nätmodell i det första projektet; modeller av två befintliga nät användes i det andra projektet. I det första projektet studerades både vindkraft och solkraft, men bara resultat från solkraft tas med här.

Studierna visade på att det maximala tiominuters VSV som observerats vid analys av mätdata från olika typer av nät i olika delar av Sverige är 2,5 % (av nominell spänning). Medelvärdena är generellt låga där endast ett par värden ligger över 0,6 %. Att ansluta solkraft hos många kunder skulle ge ett bidrag till VSV mellan 0,5 % och 1,8 %. Det sistnämnda fallet är då alla sex kunder i ett landsbygdsnät skulle ha solcellsanläggningar anslutna till nätet. Då befintliga spänningsvariationer från mätningar inkluderades i fallstudierna är dessa den dominerande orsaken till de resulterande mellansnabba spänningsvariationerna.

En annan viktig slutsats från det första projektet var att mellansnabba spänningsvariationer ändrar karaktär vid anslutning av solkraft. Då det, utan solkraft, finns höga värden av VSV bara vid ett begränsat antal tidpunkter, kan sådana finnas en stor del av dagen när det blir många solcellanläggningar. Hur sådant skulle kunna påverka apparater anslutna till elnätet är okänt.

En direkt konsekvens av mellansnabba spänningsvariationer är att det högsta 1-sekundersvärdet av spänningen är större än det högsta 10-minutersvärdet, och tvärtom för de lägsta värdena. Som en del av mätkampanjen i Tabell 2, görs det

också mätningar av mellansnabba spänningsvariationer. En del första resultat, för mätpunkter i Sverige, visas i Figur 2. Vid 16 olika mätpunkter, vägguttag i lågspänningsnät, har högsta och lägsta värdet beräknas för 10-minuters och 1-sekunders effektivvärdet. Skillnaderna är upp till 8 V för lägsta värdet och upp till 5 V för högsta värdet.



Figur 2. Statistik om högsta och lägsta värden av spänningen vid 16 olika mätpunkter i Sverige. Mätperioden var något över 24 timmar vid de flesta av mätpunkterna.

Det finns fall då högsta 1-sekundersvärdet sätter gränsen på nätets prestanda. Ett exempel av detta är faktiskt solpaneler själva som kopplas bort av ödriftsdetekteringen redan när spänningen överskrider ett visst tröskelvärde under några sekunder (i Sverige 111 %, 60 sekunder; 115 %, 200 ms). Variationer på tidskalan under 10 minuter kan inte försummas då.

Slutsatsen av studier om mellansnabba spänningsvariationer [3, 4] är att det inte finns antydningar att de kommer att bli ett stort problem vid ökade mängder solkraft i lågspänningsnätet. Men å andra sidan kommer påverkan inte att vara försumbar heller, varför man bör hålla koll på fenomenet i alla fall. En del studier behövs för att se vilka möjliga konsekvenser det skulle bli vid höga nivåer av mellansnabba spänningsvariationer.

Utöver det rekommenderas det i [3, 4] fortsatt datainsamling av både befintliga nivåer av mellansnabba spänningsvariationer och variationer i aktiv och reaktiv effekt vid solcellsanläggningar. En särskild brist på data finns då det gäller sammanlagringseffekter. Det gäller sammanlagring mellan olika solcellsanläggningar i närheten av varandra, men även sammanlagring mellan solcellsanläggningar och befintliga variationer. Nämnad data kan hjälpa till att lära mer om sammanlagringen.

Utöver datainsamling och -analys behövs det utveckling av lämpliga prestandaindex. Ovannämnda forskningsprojekt är del av en pågående kartläggning och utveckling av prestandaindex för mellansnabba spänningsvariationer.

4 Snabba spänningsvariationer

Variationer på tidskalan kortare än några sekunder refereras till som "snabba spänningsvariationer". Det finns enligt EN 50160 två olika typer av snabba spänningsvariationer: (individuella) snabba spänningsändringar, mer allmänt känt som "steg i spänning"; och kontinuerliga snabba spänningsändringar, ibland känt som "spänningsflimmer".

Som mått för snabba spänningsvariationer finns det

- Kortvarigt flimmerindex (Pst)
- Långvarigt flimmerindex (Plt)
- Antalet steg som överstiger till exempel 2 % av märkspänning

Det visades i [3] att variationer i solinstrålning har mycket begränsad påverkan på flimmerindexen. Bara vid stora mängder solkraft och under vissa antaganden (stark korrelation i produktion mellan anläggningar) kan det uppstå bidrag som överskrider $Pst=0,35$. Men även det kommer bara i undantagsfall leda till störande nivåer av ljusflimmer.

Det som har visats sig kunna ge ett större bidrag till Pst är att kraftelektroniken i växelriktaren inte betar sig stationärt även när solinstrålningen är konstant. Det är bland annat MPPT¹ som kan leda till ändringar i spänningens amplitud och därmed till ett högt värde på flimmerindexen.

Höga värden på flimmerindexen kan också uppstå på ett indirekt sätt genom två helt olika fenomen: lindningskopplare vid transformatorer och överspänningsskydd vid solcellsanläggningar. I båda fall är det ett ökande antal individuella snabba spänningsändringar som är resultat av detta.

Stora variationer i produktion från solkraft kan leda till flera extra kopplingar av lindningskopplaren vid transformatorn som matar området med solkraft. Varje koppling blir ett steg i spänning och därmed ett bidrag till flimmerindexen. Lindningskopplare brukar sitta på högspännings-mellanspänningstransformatoren vid tryckpunkten från överliggande nät. Steget i spänningen är då omkring 1,5 %. En sådan transformator matar ett stort geografiskt område, tiotals kvadratkilometer eller mer. Snabba variationer i solinstrålning på grund av växlande molnighet jämnas ut och det blir bara dagliga variationer och ändringar i vädret² som visas vid transformatorn. Utöver det är det nästan bara variationer i aktiv effekt på grund av variationer i solinstrålningen och de kommer att ha en begränsad påverkan på spänningen vid tryckpunkten eftersom X/R förhållandet är stort.

En utveckling som diskuteras är att förse distributionstransformatorer (från mellanspänning till lågspänning) med automatiska lindningskopplare (se Kapitel 2). Då blir situationen annorlunda på tre olika sätt: steget vid dessa lindningskopplare är ofta 2,5 % vilket betyder en större påverkan på Pst vid varje steg; det geografiska området är mycket mindre vilket betyder att det blir mer

¹ "Maximum Power Point Tracker"

² Och solförmörkelser förstås.

variation i spänningen och därmed fler kopplingar; X/R-förhållandet är mindre vilket gör att variationer i aktiv effekt ger större variationer i spänningen.

När distributionstransformatorer förses med automatiska lindningskopplare bör det göras en bedömning av antalet kopplingar som kan förväntas.

Solcellsanläggningar är försedda med överspänningsskydd för att förebygga okontrollerad ödrift. På en solig dag, i ett nät med stor andel solkraft, kan det uppstå en situation då spänningen regelbundet kommer över tröskelvärdet för överspänningsskyddet, vilket leder till att anläggningen kopplas bort. Detta ger då en sänkning av spänningen och efter en viss tid kopplas anläggningen in igen med en ny överspänning som konsekvens. De upprepade in- och urkopplingarna ger upprepade steg i spänning och höga Pst-värden.

Urkoppling av en solcellsanläggning på grund av ett fel i anläggningen ger också ett steg i spänning, men det är ett sällsynt fenomen som inte behöver ytterligare studier.

Det finns en del saker, även vid snabba spänningsändringar, som behöver utredas. De sammanfattas kort nedan.

- Vad blir konsekvensen för snabba spänningsvariationer av att ha automatiska lindningskopplare vid distributionstransformatorer.
- Hur nära kan man komma till överspänningssgränsen innan upprepade in- och urkopplingar av solcellsanläggningar kommer att ge oacceptabla värden på snabba spänningsvariationer.
- Tilldelning av störutrymme till solcellsanläggningar; sammanlagring av snabba spänningsvariationer mellan olika solcellsanläggningar samt mellan solcellsanläggningar och andra laster eller befintliga snabba spänningsvariationer.

Det ska även observeras att Pst inte längre är ett mått på ljusflimmer. Det finns anledningar att hålla Pst kvar som ett mått på snabba spänningsvariationer men det finns troligen behov av att utveckla nya index för att kvantifiera risken på ljusflimmer med modern (LED) belysning. Bland annat mellantoner kan leda till ljusflimmer utan att det ger ett högt värde på flimmerindex.

Även vid snabba spänningsvariationer är det viktigt att skilja mellan enfasanslutna och trefasanslutna anläggningar. Samma variation i effekt vid enfasanslutning ger ungefär sex gånger så stora variationer i spänning. Här är det extra viktigt att en del trefasanläggningar körs på en fas vid låga nivåer av solinstrålning. Då kan konsekvensen av snabba spänningsvariationer vara större än förväntat.

5 Obalans

Obalans i spänningen uppstår framförallt vid enfasig anslutning av apparater, som solcellsanläggningar. Trefasanslutna solcellsanläggningar har ibland ett reglersystem som bara använder en av faserna vid låg produktion. Under den tiden ger den också upphov till obalans, men eftersom det är vid låg produktion blir konsekvensen mindre.

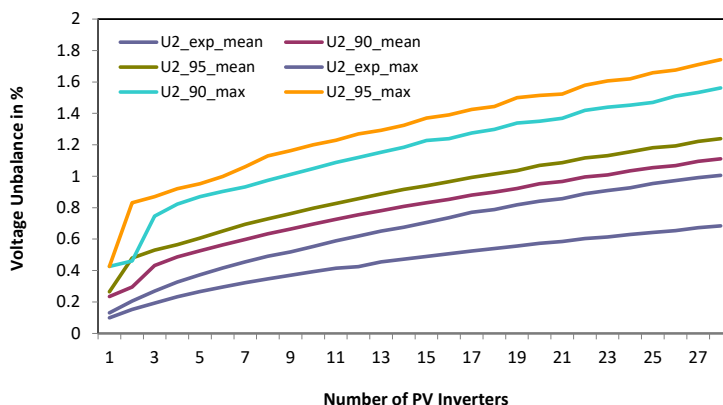
Obalans, för detta kapitel, kvantifieras genom minusföljdsspänningens amplitud. Skillnader mellan fasspänningarna refereras också till som obalans men det tas med vid långsamma spänningsvariationer i Kapitel 2.

Simuleringar har gjorts av förväntad obalans vid slumpmässig enfasig anslutning av solkraft i lågspänningsnät, som av ett projekt om obalans [1]. Resultaten sammanfattas i Tabell 3, där värdena är uppskattade från figurer i [1].

Tabell 3. Sannolikhet att minusföljdsspänningen överskrider 1 % eller 1,5 % av märkspänning, mitt på dagen på en solig dag, vid ökade antal kunder med solkraft i ett 6-kunders nät.

Antalet kunder med solkraft	Sannolikhet att högsta bidrag från solkraft överstiger 1 %	Sannolikhet att högsta bidrag från solkraft överskrider 1,5 %
2	20 %	0 %
3	35 %	5 %
4	60 %	20 %
5	65 %	20 %
6	70 %	30 %

Resultat för 28-kunders nät visas i Figur 3. Det som är relevant för elnätsoperatören är situationer då spänningskvaliteten blir oacceptabel vid en av kunderna. Då är det 90e och 95e percentil för högsta minusföljdsspänning (orange och ljusblå kurvor) som ska tas hänsyn till. De överskrider 1 % av märkspänningen när mellan 5 och 7 kunder har solkraft och 1,5 % när mellan 23 och 28 kunder har solkraft.



Figur 3. Statistiska mått på minusföljdsspänning på grund av ökande antal solcellsanläggningar i 28-kundersnät

Beroende på hur mycket obalans det redan finns i nätet innan anslutningen av solkraft, då kan det tillåtas mellan 1 % och 1,5 % obalans från solkraft.

Vid tolkning av resultat är det två saker som är viktiga att ta med i bedömningen:

- Beräkningarna gjordes under antagandet att alla solcellsanläggningar matar in 6 kW i en fas på samma moment. Det är inte bara större anläggningar än vad som kan förväntas vara enfasigt anslutna; det är också osannolikt att alla enheter har sin högsta produktion vid samma moment. Obalansen är därför en överskattning och acceptansgränsen en underskattning.
- Vid studier av långsamma spänningsvariationer (Kapitel 2) kom det fram att acceptansgränsen var bara 1 eller 2 i 6-kundersnätet och 3 till 4 i 28-kundersnätet. Det betyder att överspänningarna kommer att begränsa antalet kunder med solkraft innan obalans gör det. Samma antaganden gjordes vid obalansberäkningar som för långsamma spänningsvariationer. Jämförelsen mellan obalans och spänningshöjning gäller därför fortfarande.

På samma sätt som förut finns det anledning att hålla koll på läget med obalansen. Vissa lösningar mot överspänningar (som lindningskopplare vid distributionstransformatorer) minskar inte obalansen och obalans kan därmed komma att sätta gränsen.

Under studien har det också visat sig att det inte finns mycket information om obalans i lågspänningsnätet just nu, dvs. innan anslutning av solkraft. Det finns begränsat med mätningar och bara lite information om hur stor obalansen typiskt är i svenska lågspänningsnät. När det finns mätdata finns det bara information om amplitud av minusföljdsspänning, inte om fasvinkeln. Fasvinkeln behövs för att kunna uppskatta aggregeringen mellan bakgrundsobalans och obalans från solcellsanläggningar. En sak som skulle behövas, vid bredare tillämpning än bara solkraft, är en vedertagen definition av fasvinkel till obalans. Det saknas också modeller för minusföljdimpedans hos lågspänningskunder.

6 Övertoner

Spänningen och strömmen i elkraftsystemet är inte en perfekt sinusvåg. Avvikelsen från sinusvågen kallas för "vågformsdistorsion" och baserat på frekvensen kan det skiljas mellan tre typer av komponenter i distorsionen:

1. Övertoner: heltalsmultipler av kraftsystemfrekvensen³, upp till 2 kHz.
2. Mellantoner: övriga komponenter upp till 2 kHz.
3. Supratoner: komponenter över 2 kHz upp till 150 kHz.

Övertoner behandlas i detta kapitel; mellantoner och supratoner i Kapitel 7 respektive Kapitel 8.

Konsekvenser av solcellsanläggningar för övertonsdistorsion av spänningen studerades i [5]. Det visades att emission av övertoner från solcellsanläggningar är liten men inte helt försumbar. Mätningar gjordes av Luleå tekniska universitet som en del av några tidigare projekt, universitetet utför även fortsatt kontinuerliga mätningar.

En jämförelse har gjorts mellan emission från solcellsanläggningar och emission från hushållskunder. Det finns inte tillräckligt med underlag för att kunna göra en stor statistisk jämförelse, men baserat på ett begränsat antal mätningar har följande preliminära slutsatser dragits:

- Övertonsemission från solpaneler har ett högsta värde som är i storleksordningen hälften av högsta värdet för hushållskunder.
- Högsta värdet för solpaneler inträffar mitt på dagen medan högsta värdet för hushållskunder inträffar på kvällen.
- Emission från hushållskunder mitt på dagen är omkring hälften av värdet på kvällen.

Utifrån detta är förväntningen att stora mängder solkraft i lågspänningsnät kommer att leda till en ökning av övertonsemission mitt på dagen, men att dagens högsta värde inte kommer att öka. Eftersom det är dagens högsta värde som är relevant i planering av elnät, förväntas emission av övertoner från solcellsanläggningar inte ha någon påverkan på planeringen.

Emissionsnivåer från solcellsanläggningar varierar med produktionen. En ökning av produktionen ger över huvud taget en ökning av emissionen, men det finns inga allmänna relationer som gäller för alla anläggningar. Skillnaden mellan olika anläggningar är större än skillnaden mellan olika produktionsnivåer för de flesta anläggningarna. Osäkerheter i emission finns framförallt i val av växelriktare, något som inte kan förutses i planeringsfasen. Men en slutsats som troligen kan dras redan nu är att det kommer att vara stor diversitet mellan växelriktare och därmed en stor utjämning⁴ av emission mellan anläggningar. Även det bidrar till att det inte förväntas en ökning av de högsta emissionsnivåerna vid stora mängder solkraft i lågspänningsnät.

³ Kraftsystemfrekvensen är nära 50 Hz i Sverige.

⁴ Eller i elkvalitetsspråk: det blir stora aggregerings- eller sammanlagringseffekter.

Detta betyder inte att spänningsdistorsionen inte kommer att påverkas. Anslutning av ett stort antal solcellsanläggningar kommer att ändra resonansfrekvensen i lågspänningsnät. Kapacitans hos anläggningar⁵ ger en minskning av resonansfrekvensen. Beräkningar från de två exempelnäten visar på en resonansfrekvens över 2 kHz för situationen utan solceller och runt 850 Hz när samtliga hus har en solcellsanläggning installerad, med en förstärkning av magnituden av närliggande övertoner som följd. Vid en ökande mängd solcellanläggningar förväntas det därför en ökning av spänningsdistorsionen på grund av förstärkning vid resonansfrekvensen. Det förväntas även en minskning av spänningsdistorsionen för något högre frekvenser på grund av ändringar i impedansen som funktion av frekvens.

Det finns begränsad information om nuvarande resonansfrekvenser i lågspänningsnät och om vilka värden på kapacitans som kan förväntas för solcellsanläggningar. Även här behövs det mer underlag för att kunna göra en specifik bedömning av hur stora mängder solkraft kommer att påverka övertonsnivåerna. Men redan med nuvarande information har slutsatsen dragits att det förväntas en ökning av spänningsdistorsionen eftersom resonansfrekvensen kommer att sjunka. Kring resonansfrekvensen kommer det att bli en förstärkning av emission från apparater anslutna till nätet. Det kommer även att bli en förstärkning av spänningsdistorsionen som kommer från mellanspänningsnätet.

Även här finns det brist på information om befintliga nivåer på övertoner i lågspänningsnät. Acceptansgränsen bestäms till en stor del av marginalen mellan befintliga nivåer och gränsvärden. Alla nämnda osäkerheter gör att det kommer att bli stora osäkerheter i acceptansgränsen.

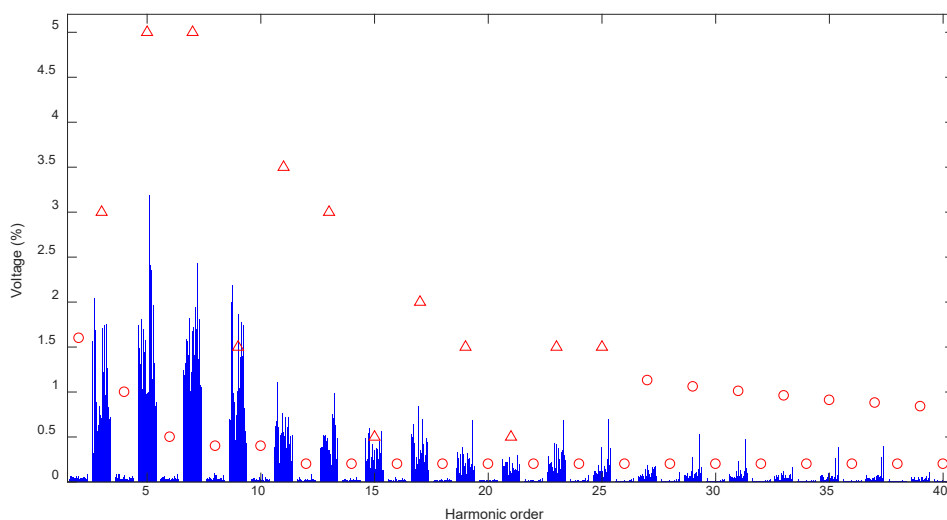
Som del av en mätkampanj⁶ gjordes det mätningar av spänningsdistorsion på olika platser i svenska lågspänningsnät. Alla mätningar gjordes vid vägguttaget och mätningarna pågick under en period mellan en och tre timmar. De 47 mätningarna var fördelade på följande sätt:

- Café eller restaurang: 14
- Hotell eller mötesrum i hotell: 11
- Kontor eller universitet: 11
- Bostad: 5
- Flygplats: 5
- Sjukhus: 1

Resultat från mätningarna visas i Figur 4: spektrum för alla 47 mätpunkter i en och samma figur. Gränsvärden är rödmarkerade, där trianglarna anger gränsvärden enligt svensk föreskrift EIFS 2013:1, medan cirklarna anger kompatibilitetsnivåerna enligt SS-EN 61000-2-2 för frekvenserna då det inte finns gränsvärden i EIFS 2013:1.

⁵ Kapacitans finns bland annat som del av kondensatorn på nätsidan av EMC-filtret mellan växelriktaren och nätet.

⁶ Samma som nämndes i Kapitel 2 och Kapitel 3.



Figur 4. Befintliga nivåer av övertoner på 47 punkter i svenska lågspänningsnät, röda trianglar och cirklar anger gränsvärden enligt EIFS2013:1 respektive EN 61000-2-2.

Mätpunkterna är inte representativa för nät då det kan förväntas stor andel solkraft, men resultaten ger något intryck i alla fall. Och intrycket är att marginalen är stor mellan befintliga nivåer och gränsvärden. Undantag till detta är 9e ton och 15e ton. Här finns det mätpunkter då de befintliga nivåerna redan överskrider gränsvärdena. Bland mätpunkterna med sådana höga värden fanns det fem kontor, ett hotell och ett café.

En kartläggning gjordes av övertonsnivåerna hos lågspänningskunder som del av ett examensarbete på Luleå tekniska universitet [12, 13]. Mätpunkter var då framförallt i landsbygdsnät medan mätpunkterna som var underlag till Figur 4 var framförallt i stadsnät. Nivåerna från [12, 13] var höga framförallt för tonerna 5, 15 och 21.

Slutsatsen från studierna i [5] var att det förväntas en mindre del emission från solcellsanläggningarna men framförallt en ökning av nivåerna vid höga frekvenser (1 kHz till 2 kHz) på grund av resonanserna. Mätningar i Figur 4 visar stora marginaler i frekvensbandet mellan 1 kHz och 2 kHz. Det betyder att risken på oacceptabla nivåer är, för tillfället i alla fall, begränsad. Men, som sagt, mätkampanjen var begränsad och inte representativ, så behovet på mer mätningar kvarstår.

För att kunna uppskatta acceptansgränsen behövs det också mer information om hur lågspänningsanläggningar ska modelleras vid övertonsfrekvensen. Det finns även en brist på kunskaper om sammanlagring av övertoner från olika källor.

7 Mellantoner

Mellantoner är frekvenskomponenter, upp till 2 kHz, då frekvensen inte är en heltalsmultipel av kraftsystemfrekvensen. Mängden forskning och därmed mängden kunskap är begränsad även på internationell nivå.

Det har inte gjorts någon specifik studie i Sverige om emission av mellantoner från solcellsanläggningar men detta ingår i ett större projekt om växelverkan mellan solkraft och LED-belysning som bedrivs av Luleå tekniska universitet [14]. Det pågår och har gjorts en del studier i andra länder om mellantoner från solcellsanläggningar. En del av studierna visar på att mellantoner kan uppstå på grund av kraftelektroniken, där framförallt MPPT nämns som källan för mellantoner. Preliminära, ännu ej publicerade, resultat visar på att låga nivåer av ljus, i gryningen och skymningen, kan leda till emission av mellantoner. Snabba variationer i solinstrålningen (skuggning, växlande molnighet) är också en möjlig källa av mellantoner.

Det finns en brist på detaljerade studier om hur mycket mellantoner som genereras av solcellsanläggningar. Delvis är det för att mellantoner inte står på agendan vid de flesta mätningarna och därmed inte studeras. Delvis är orsaken en stor brist på allmänt accepterade metoder för att beräkna nivåer av mellantoner från uppmätta spänningar och strömmar.

En av konsekvenserna av mellantoner är att de kan leda till ljusflimmer vid LED-belysning. Som det nämndes i Kapitel 2 är det befintliga måttet på snabba spänningsvariationer, Pst, inte längre ett mått på ljusflimmer. Det finns anledningar att behålla Pst som ett mått på snabba spänningsvariationer men det finns troligen behov av att utveckla nya index för att kvantifiera risken på ljusflimmer med modern (LED) belysning. Mellantoner är en typ av störning som ska tas med i studier om påverkan av solcellsanläggningar på lågspänningsnätet.

De största utmaningarna vid uppskattning av acceptansgränsen, vad gäller mellantoner, är brist på kunskaper om emissionsnivåer samt brist på modeller för sammanlagring. Bakgrundnivåerna för mellantoner förväntas⁷ vara låga. Modeller för spridning av mellantoner är samma som för spridning av övertoner.

⁷ Förväntningen baseras framförallt på att det inte finns många kända källor till mellantoner anslutna till lågspänningsnätet. Även det borde kollas genom mätningar.

8 Supratoner

Supratoner är frekvenskomponenter i området mellan 2 kHz och 150 kHz.

Supratoner från solcellsanläggningar studerades, tillsammans med övertoner, i ett Energiforskningsprojekt [5]. Gällande emission av supratoner (distorsion mellan 2 kHz och 150 kHz) så visar mätningar att dessa injiceras av växelriktare avsedda för solcellsanläggningar på frekvenser under 20 kHz, dessutom kan det förekomma multiplar av dessa frekvenser. I detta frekvensområde förväntas det en hel del resonanser som kan påverka hur supratonerna sprids i lågspänningsnätet. Precis som i övertonsområdet (Kapitel 6) så förväntas solcellsanläggningarna påverka impedansen i frekvensområdet mellan 2 och 150 kHz och riskerar på så sätt att bidra till en förändring i supratonsnivåer injicerade av andra apparater. För detta frekvensområde är spridning och samverkan mellan anslutna apparater än mer komplext och inom detta område behövs mer forskning innan några generella slutsatser kan dras.

Ett projekt om spridning av supratoner finansierades av Elektraprogrammet [18] och resulterade bland annat i en översiktsartikel där bland annat forskningsutmaningar definieras [19].

9 Övrig påverkan

9.1 ÖVERLAST AV TRANSFORMATORER OCH KABLAR

Alla påverkningar som har studerats och diskuterats i föregående kapitel handlar om spänningar i lågspänningsnät. Något som inte var med där är att det finns en ökad risk för överbelastning av transformatorer, kablar och luftledningar vid stora mängder solkraft i lågspänningsnätet.

Det har i tidigare projekt visats, på ett enkelt sätt, att risken för överbelastning kan komma att öka när den installerade effekten av distribuerad generering överstiger summan av lägsta och högsta förbrukning. Vid solkraft gäller värden för högsta och lägsta förbrukning under timmar av året då det kan förväntas hög produktion. Enligt samma resonemang blir det hög risk för överbelastning när installerad effekt överskrider summan av transformatorns (eller kabelns, luftledningens) belastningsförmåga och lägsta förbrukningen.

För att få en uppskattning av acceptansgränsen vad gäller överlast av transformatorer antas att lägsta förbrukningen är noll, att alla solcellsanläggningar skickar ut deras installerade effekt på samma moment, att transformatorns belastningsförmåga är lika med märkeffekten och att reaktiv effekt kan försummas. Vi antar även att anläggningarnas märkeffekt är 6 kW.

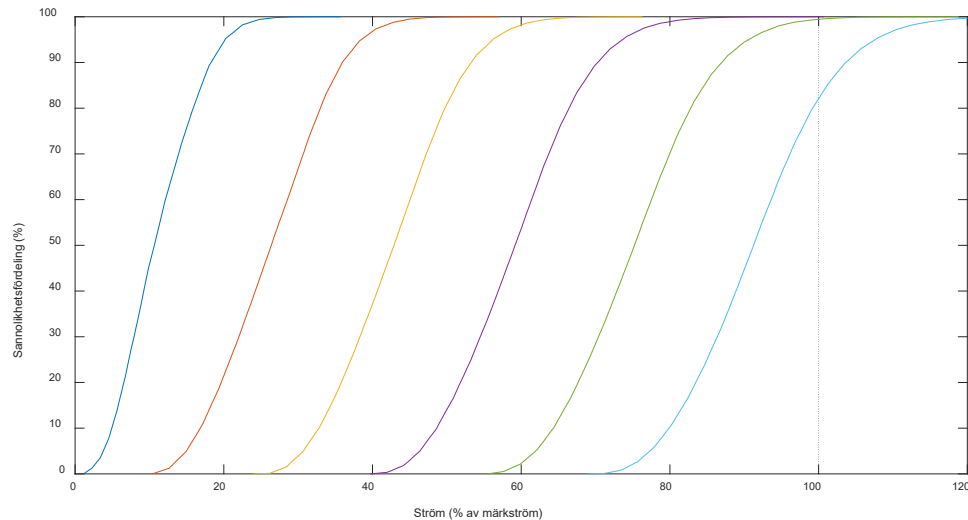
I ett landsbygdsnät, med en 100 kVA transformator, kan det i så fall ansluta 17 anläggningar trefasigt, eller 5 enfasigt om alla finns i samma fas. Sistnämnda skulle kunna vara en begränsning (exemplnätet hade 6 kunder) men sannolikheten att alla ansluts till samma fas är liten⁸. I ett tätbygdsnät, med en 800 kVA transformator, finns det utrymme för 133 trefasigt anslutna anläggningar eller 44 enfasigt anslutna i samma fas. Det finns transformatorer som matar mer än 133 kunder, så det kan uppstå situationer med risk för överbelastning av transformatorer när en väldigt stor del av lågspänningskunder har solpaneler på taket.

När det gäller enfasigt anslutna solcellsanläggningar är sannolikheten att det finns 44 i en fas försumbar⁹. Det gjordes en simulering istället, på samma sätt som det gjordes simuleringar för överspänningar och obalans. I simuleringarna antogs det att varje kund med solkraft hade en 6 kW anläggning som var enfasigt ansluten, att förbrukningen per fas var uniformt fördelad mellan 0 och 250 W och att det totalt sett var 225 kunder anslutna på en 800 kVA transformator. Resultat från simuleringarna visas i Figur 5, som är en något omarbetad version av en figur i [15]. Figuren visar sannolikhetsfördelningen av högsta ström per fas genom transformatorn, mitt på en solig dag. Bara vid 120 kunder med solkraft finns det en märkbar sannolikhet för överbelastning av transformatorn.

⁸ $(1/3)^6$ eller $1/729$ (0,14 %) blir det matematiska svaret, då det antas att fördelningen är slumpmässig över faserna.

⁹ 10^{-21} eller "väldigt väldigt liten".

Observera att acceptansgränsen vid hänsyn till överspänningen var i storleksordningen 5 kunder. Överbelastning kommer i alla fall inte redan i början sätta en gräns på antalet kunder som kan ansluta solkraft till ett lågspänningsnät.



Figur 5. Sannolikhetsfördelning för högsta ström (per fas) genom en 800 kVA transformator vid (vänster till höger) 20, 40, 60, 80, 100 och 120 utav 225 kunder med 6 kW enfasigt anslutna solcellsanläggningar.

Beräkningarna ovan gäller för distributionstransformatorn. Det kan också uppstå överbelastning av kablar eller luftledningarna när ett antal kunder med låg last (som tex sommarstugor) ansluter stora solcellsanläggningar.

9.2 BRIST PÅ TRÖGHETSMOMENT

Vid väldigt stora mängder solkraft ansluten till nätet kan det uppstå situationer då transmissionsnätets stabilitet äventyras. Frekvensstabilitet är det som diskuteras mest, men även andra typer av stabilitet (vinkelstabilitet, spänningsstabilitet) kan försämrats. Det som troligen mest äventyrar stabilitet i den närmaste framtiden är vindkraft, men vid väldigt stora mängder solkraft kommer även det att bidra till risken för instabilitet.

Frekvensstabilitet är relativt enkelt att beskriva, något som säkerligen har bidragit till att det har kommit högst upp på agendan vad gäller stabilitetsfrågor i transmissionsnät. Det som bestämmer frekvensstabiliteten är det totala tröghetsmomentet tillgängligt till systemet och storleken av största mängden produktion eller förbrukning som kan kopplas ur ("dimensionerande fel"). En studie om påverkan av vindkraft på mängden tröghetsmoment presenteras i [16], då det bland annat görs en bedömning av hur mycket vind- och solkraft¹⁰ som kan anslutas till kraftsystemet i Norden innan det finns en märkbar ökning av risken för frekvensinstabilitet. Slutsatsen med studien var att systemet klarar kring 20

¹⁰ Rapporten [16] handlar bara om vindkraft, men resonemanget gäller också vid en kombination av solkraft och vindkraft. Värdet skulle troligen vara något annorlunda eftersom variationer av vind- och solkraft är annorlunda.

TWh vind- och solkraft i Sverige utan någon märkbar ökning av risk. Upp till 40 TWh finns det en riskökning bara under ett begränsat antal timmar. För 50 TWh eller mer blir det en ökad risk under många timmar. Studien i [16] har inte utrett om risken blir oacceptabel, bara att risken ökar.

9.3 OKONTROLLERAD ÖDRIFT

Det finns en risk för okontrollerad ödrift av solcellsanläggningar tillsammans med en del av förbrukningen redan för de första anläggningarna som ansluts till lågspänningsnätet. Men det finns en väldigt liten risk att driften kommer att vara stabil och kunna pågå under en längre tid än ett antal sekunder. Det finns begränsat med forskning gjort på detta i Sverige och i planeringen antas det helt enkelt att skyddet mot ödrift kommer att ta bort anläggningen omedelbart ifall ödrift inträffar.

Under den korta tiden mellan uppstående av ödrift (nätet kopplas bort genom öppning av en brytare i lågspännings- eller mellanspänningsnätet) och bortkoppling av solcellsanläggningar av skydd mot ödrift, kan det uppstå ovanliga överspänningar. Det finns lite kunskap om detta och fenomenet är till största delen outrett.

9.4 PÅVERKAN PÅ SELEKTIVITET AV SKYDD

Distribuerad generering ansluten till lågspänningsnätet kan bidra till felströmmen och därmed påverka selektiviteten hos skydd. En studie om hur skydd påverkas av en synkrogenerator ansluten till lågspänningsnätet visas i Kapitel 3 av [17]. Det visas att en 40 kVA generator vid en 200 kVA transformator kan göra det omöjligt att komma fram till en selektiv inställning av överströmsskyddet.

Bidraget av solcellsanläggningar till felströmmen är betydligt mindre eller i vissa fall även helt försumbart. Men vid ökade krav på störningstålighet av småskalig produktion kan det bli ökade bidrag med oselektivitet som konsekvens.

10 Elbilsladdning

Medan de olika projekten om påverkan av solcellsanläggningar på lågspänningsnät utfördes har det kommit en utveckling till som kan ha en liknande påverkan eller till och med försämra situationen i kombination med solkraft. Det gäller laddning av elektriska fordon och då framförallt laddning av personbilar både hemma hos ägaren och vid individuella laddstolpar på offentliga platser. Vid större anläggningar kommer det sannolikt göras en bedömning av hur nätet påverkas men en sådan bedömning kommer inte att göras för små anläggningar.

Påverkan av laddningen kommer delvis att vara densamma, delvis annorlunda, jämfört med påverkan från solcellsanläggningar. I detta kapitel kommer det att göras en första bedömning av förväntade likheter och skillnader.

10.1 ÖVERBELASTNING

Anslutning av elbilsladdning på lågspänningsnätet betyder en ökning av förbrukning. Då finns det två marginaler som kan komma att minska från och med den första elbil som ansluts:

- Marginalen mellan högsta (netto) förbrukning och belastningsförmågan av transformatorn, kablar och luftledningar.
- Marginalen mellan lägsta spänning och lägsta acceptabla spänning

Vid solkraftintegrering är det, i första hand, bara en minskning i marginalen mellan högsta spänningen och högsta acceptabla spänningen.

Det finns en viktig skillnad till mellan solkraft och elbilsladdning: solkraftproduktionen är begränsad till vissa timmar på året (mitt på soliga dagar, framförallt sen vinter, vår och sommar); elbilsladdning kan ske när som helst på dagen.

I distributionsnät brukar det finnas en stor marginal mellan högsta förbrukning och belastningsförmågan. I glesbygdsnät är det spänningsfallet som sätter gränsen, medans det i tätbygdsnät används en marginal för att kunna använda transformatorn och vissa kablar och luftledningar som en reservmatningsväg.

Även här finns det en stor brist på information om hur stor marginalen egentligen är i praktiken. En annan sak som är okänd är hur laddningsmönster för elbilar kommer att se ut. Det finns information om hur bilarna används men mest sannolikt kommer elbilar, i början, inte att ha samma användningsmönster som bilen i allmänt. Det är inte heller säkert när under tiden som bilen står parkerad den kommer att laddas. Det finns en stor skillnad i risken för överbelastning mellan laddning av alla bilar på eftermiddagen eller tidig kväll och laddning spridd över natten.

10.2 LÅNGSAMMA SPÄNNINGSVARIATIONER

Beräkningsmetoden blir precis samma för laddning som för solcellsanläggningar, där den enda skillnaden är ett minustecken före den aktiva effekten. Även om beräkningsmetoden är lika finns det ändå en hel del skillnader i utförandet och i konsekvenserna.

Alla solcellanläggningar anslutna till samma lågspänningsnät har ungefär samma variation i produktion mot tid; det är inte fallet för laddning av elbilar. Det kan uppstå situationer då en stor del av bilarna laddas men det kommer också att finnas åtminstone en del spridning av laddning över tid. Aggregeringseffekter behöver kartläggas.

Hög produktion från solkraft är begränsad till vissa timmar av året, och det finns en stark korrelation med tid på dagen. Så är inte fallet med laddningen. Laddningen kan ske i princip när som helst under dagen och kan variera mycket från dag till dag. Här finns det sannolikt även en veckovariation som inte finns hos solkraft.

Största utmaningen kommer att vara att det kan finnas laddning av elbilar under timmarna med årets högsta förbrukning. Det är då som marginalen mellan spänningen och underspänningsgränsen är lägst och det är denna marginal som sannolikt kommer att bestämma acceptansgränsen.

10.3 MELLANSNABBA SPÄNNINGSVARIATIONER

Mätningar visar att minst en del av befintliga laddningsanläggningar har en starkt varierande förbrukning på tidskalor mellan några sekunder till någon minut. Det förväntas leda till en ökning av nivåerna på mellansnabba spänningsvariationer.

10.4 SNABBA SPÄNNINGSVARIATIONER

De snabba variationer i effekt som nämns i förra avsnittet kan även bidra till en ökning av flimmerindexen. Som angavs förut är flimmerindexet, Pst, inte längre ett mått som har en stark relation till sannolikhet för ljusflimmer vid LED-belysning. Även här kommer behovet upp att lära oss mer om hur störningar i spänning påverkar ljusintensitet och ljusflimmer.

10.5 OBALANS

För obalans kan samma modell användas för laddning som för solcellsanläggningar. Skillnaderna mellan laddning och solcellsanläggningar som ska tas med i bedömningen är samma som för långsamma spänningsvariationer enligt Avsnitt 10.2.

10.6 ÖVERTONER

Mätningarna visar att solcellsanläggningar har låga nivåer av övertoner men det behöver inte gälla för laddningsanläggningar. En anledning att det finns låga nivåer av övertoner från solcellsanläggningar är att det behövs ett visst

reglersystem för att kunna styra effekten från solcellerna in till nätet. En sidoeffekt av detta är att det är enkelt att hålla övertonsnivåerna låga.

Vid laddning (och andra former av förbrukning) finns det mindre behov på avancerade styralgoritmer varför det kan förväntas högre nivåer av övertoner på emissionsidan. Just nu finns det begränsad information om hur emissionsspektrumet från elbilsaddning ser ut.

Problemet med en ändring av resonansfrekvensen på grund av ökad kapacitans kommer att finnas vid elbilsaddning på samma sätt som vid solcellsanläggningar. En viktig frågeställning här är huruvida kapacitansen kommer att finnas kvar ansluten till nätet även när laddningen inte pågår.

10.7 MELLANTONER

Det finns ingen information om mellantoner från laddningsanläggningar.

10.8 SUPRATONER

Laddningsanläggningar är en seriös källa av supratoner och kommer att bidra till högre emissionsnivåer. Huruvida det leder till högre nivåer av spänningsdistorsion kan inte bedömas utan betydligt mer studier på området.

11 Diskussion och slutsatser

En av de viktiga slutsatserna från de olika studier och resonemang som presenteras i denna rapport är att det finns en hel del osäkerheter vad gäller hur solkraft kommer att påverka lågspänningsnätet. För olika typer av fenomen finns det olika osäkerheter och olika nivåer av osäkerhet. Det påverkar till en stor del hur det bör ageras för att förebygga oacceptabla konsekvenser av stora mängder solkraft ansluten till lågspänningsnät.

Acceptansgränsmetoden är ett bra sätt att strukturera studierna och som ett kommunikationsverktyg mellan de olika intressenterna. Men vid stora osäkerheter kan det leda till stora osäkerheter i acceptansgränsen med konsekvensen att det inte går att komma till ett beslut om vad som ska göras. Här finns å ena sidan risken att det blir oacceptabel tillförlitlighet eller spänningskvalitet i lågspänningsnät; och på andra sidan finns risken att det ställs orimliga krav på solcellsanläggningar.

Påverkan och agerandet vad gäller elbilsladdning är liknande i stora drag men skiljer sig vad gäller detaljerna. Diskussionen nedan gäller först och främst för solkraftintegrering men är inte mycket annorlunda för elbilsladdning.

Det finns en del fenomen (påverkningar på nätet) då även enkla studier redan ger mycket information om hur nätet kommer att påverkas och som kan ge en uppskattning av vad acceptansgränsen är. Det gäller överbelastning, långsamma spänningsvariationer (överspänning och underspänning) och till en viss del spänningsobalans (minusföljdspänning). Här finns det osäkerhet i hur kunder kommer att agera i framtiden, till exempel hur många och vilka kunder kommer att installera solcellsanläggningar. Det går egentligen inte att minska denna osäkerhet, allt som kan göras är att använda stokastiska modeller för att bedöma planeringsriskerna. Vad gäller åtgärder är det då viktigt att ha ett antal lösningar till hands med olika ledtider för att anpassa nätet ifall nivåerna blir oacceptabla.

En annan osäkerhet är att även de befintliga nivåerna till stor del är okända. Planeringsmetoder för distributionsnät är till stor del baserade på att ha sådana marginaler att det inte behövs information om vad marginalerna egentligen är. Det har resulterat i tillförlitliga distributionsnät med låga driftkostnader. Men nackdelen är att det inte finns detaljinformation om spänningar och strömmar i distributionsnätet. Timavlästa mätare gör att information om effektflöden i alla fall finns. En del av beräkningarna om långsamma spänningsvariationer kan utföras med hjälp av data om förbrukningen men det finns två viktiga begränsningar. Krav på långsamma spänningsvariationer gäller 10-minuters värden medan elförbrukning mäts med 1-timmes tidsupplösning. En jämförelse har visat att timvärden inte kan användas när det behövs 10-minuters tidsupplösning. En annan begränsning är att spänningsvariationer som kommer från mellanspänningsnätet inte går att modellera på detta sätt. Kortfattat: det behövs mer mätningar av spänning i lågspänningsnätet.

För andra fenomen finns det en del modelleringsutmaningar kvar. Det gäller framförallt övertoner. Här är det svårt att veta vad emissionen från

solcellsanläggningar kommer att vara; även kapacitans av anläggningar och hur det påverkar resonansfrekvensen är inte känt. Befintliga nivåer av övertoner är på samma sätt okända som för långsamma spänningsvariationer. Osäkerhet i modellering av befintliga lågspänningskunder för övertonsstudier bidrar till utmaningen.

Även här går det i teorin att modellera alla osäkerheter i en stor stokastisk modell, men resultaten kommer att bli svåra att använda. Det kommer att finnas en för stor spridning i möjliga värden av acceptansgränsen för att kunna använda resultaten som underlag för planering av distributionsnät. Men sådana studier kan ändå visa på möjliga trender som att det troligen blir en minskning av resonansfrekvensen i lågspänningsnät.

Den goda nyheten är att det finns en hel del produktkrav på anläggningar som ansluts till lågspänningsnätet. Det sätter gränsen på hur mycket övertoner som kommer att genereras av utrustning. Gränserna kan inte garantera att det inte blir en överskridning av gränsvärden och att det inte blir interferens (apparater som inte funkar som de ska). Det är osannolikt att det inte kommer att bli några problem alls, men det är inte sannolikt heller att det kommer att bli många problem.

Istället för att sätta hårdare krav på solcellsanläggningar eller att göra förebyggande åtgärder i elnätet kan det vara en rimligare lösning att istället satsa på kunskapsuppbyggnad. Metoder för att bygga upp kunskaper kan vara att utföra forskning, att utföra mätningar och att utveckla riktat undervisningsmaterial. En satsning på alla tre låter mest rimligt. Kunskaperna kan då användas för de fall då det blir problem som oacceptabla nivåer och/eller interferens.

Då finns det till slut fenomen där det fortfarande finns stora problem med modellering av hur störningar uppstår, hur de sprider sig, vad rimliga nivåer är och/eller vad konsekvenserna är. Det gäller snabba spänningsvariationer, mellansnabba spänningsvariationer, mellantoner och supratoner. Här ska det fortsättas med forskningen för att lära mer om fenomenen och eventuella konsekvenser för utrustning ansluten till näten.

Sammanfattningsvis finns det behov på flera studier om acceptansgräns för lågspänningsnät, behov på fortsatt forskning, behov på en stor satsning på mätningar i lågspänningsnät, och behov på spridning av kunskaper.

12 Referenser

- [1] Daphne Schwanz, Math Bollen, Sarah Rönnerberg, Obalans från enfasig anslutna solpaneler., Elforsk rapport 2015:130
- [2] Överspänning från enfasanslutna solpaneler, Energiforsk rapport, på gång.
- [3] Oscar Lennerhag, Math Bollen, Susanne Aceby, Sarah Rönnerberg, Spänningsvariationer och intermittent produktion, Elforsk rapport 2014:42
- [4] Susanne Aceby, Magnus Speychal, Fortsättningsprojekt spänningsvariationer och intermittent produktion, Energiforsk rapport 2018:472
- [5] Tatiano Busatto, Math Bollen, Sarah Rönnerberg, Photovoltaics and harmonics in low-voltage networks, Energiforsk rapport 2018:473
- [6] Sarah Rönnerberg, Propagation of supraharmonics in the low voltage grid, Energiforsk rapport 2017:461.
- [7] Math Bollen, Mikrogenerering och elnätet – Bedömning av påverkan vid stora mängder mikrogenerering på lågspänningsnätet, Elforsk rapport 09:49.
- [8] EU-DEEP (The birth of a European Distributed Energy Partnership that will help the largescale implementation of distributed energy resources in Europe),
- [9] Math Bollen, Fainan Hassan, Integration of distributed generation in the power system, Wiley – IEEE Press, 2011.
- [10] M.H.J. Bollen, M. Häger, C. Schwaegerl, Quantifying voltage variations on a time scale between 3 seconds and 10 minutes, Int. Conf. on Electric Distribution Systems (CIRED), Turin, Italy, June 2005.
- [11] M.H.J. Bollen, I.Y.H. Gu, Characterization of voltage variations in the very-short time scale, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.20, No.2 (April 2005), pp.1198-1199.
- [12] Yvonne Ruwaida, Övertenshalten i lågspänningsnät – En studie i elkvalitet, Examensarbete Luleå tekniska universitet, 2015.
- [13] Yvonne Ruwaida, David Holmberg, Math Bollen, Mapping of harmonic levels in the low-voltage network, 23rd Int Conf of Electricity Distribution (CIRED), June 2015.
- [14] Växelverkan mellan solpaneler och lågenergibelysning, projekt på Luleå tekniska universitet finansierat av Energimyndigheten.
- [15] Math Bollen, Sarah Rönnerberg, Hosting capacity of the power grid for renewable electricity production and new large consumption equipment, Energies, 2017, 10, 1325, pp.1-28 (open access).
- [16] Rujiroj Leelaruji, Math Bollen, Synthetic inertia to improve frequency stability and how often it is needed, Energiforsk Report 2015:224, December 2015.
- [17] Math Bollen, Mikrogenerering och Elnätet - Bedömning av påverkan vid stora mängder mikrogenerering på lågspänningsnätet, Elforsk rapport 09:49
- [18] Sarah Rönnerberg, Math Bollen, Propagation of supraharmonics in the low voltage grid, Energiforsk rapport 2017-461.
- [19] Sarah K. Rönnerberg et al., On waveform distortion in the frequency range of 2 kHz-150 kHz – review and research challenges, Electric Power Systems Research, Vol. 150, pp.1-10, 2017.

PÅVERKAN PÅ NÄTET FRÅN STORA MÄNGDER SOLKRAFT

Stora mängder solkraft kommer på olika sätt att påverka lågspänningsnätet. Här sammanfattas kunskap från olika studier och rapporten ger en översikt av utmaningarna och hur elnätsföretag bör agera för att bemöta och förebygga oacceptabla konsekvenser.

En av de viktiga slutsatserna är osäkerheten kring hur solkraft påverkar lågspänningsnätet. Olika typer av fenomen innebär olika osäkerheter och olika nivåer av osäkerhet. Det påverkar hur man bör agera för att förebygga oacceptabla konsekvenser av stora mängder solkraft som ansluts till nätet.

Rapporten behandlar bland annat

- långsamma, mellansnabba och snabba spänningsvariationer
- obalans
- över-, mellan- och supratoner
- överlast
- brist på tröghetsmoment
- okontrollerad ödrift
- selektivitet av skydd

Här beskrivs också kortfattat likheter och skillnader vad gäller utmaningar vid storskalig användning av elbilsaddning.

De här resultaten utgör en bra grund för framtida forskning och utveckling men också en viktig referens för elnätsföretag som behöver kunna avgöra vilka fenomen som ska tas med i bedömningen av framtida distributionsnät.

Ett nytt steg i energiforskningen

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