



Spänningsvariationer och intermittent produktion

Elforsk rapport 14:42



O Lennerhag, M Bollen, S Ackeby, S Rönnberg

Juli 2014

ELFORSK

Spänningsvariationer och intermittent produktion

[Klicka här och skriv undertitel]

Elforsk rapport 14:42

Förord

Projektet *Spänningsvariationer och intermittent produktion* har genomförts under programmet Smart Grids 2010-2014. Målet var att studera variationer i produktion från solkraft och vindkraft för tidskalor mindre än 10 minuter samt konsekvenser av detta för spänningskvaliteten. Utifrån insamlad mätdata har bedömning av snabba variationer i spänning p.g.a. vind- och solkraft gjorts och jämförts med befintliga variationer i skalorna < 1 sekund och mellan 1 sekund och 10 minuter.

Math Bollen har varit projektledare för projektet och har arbetat tillsammans med Oscar Lennerhag och Susanne Ackeby på STRI samt Sara Rönnberg på LTU.

Smart Grids programmets programstyrelse består av följande ledamöter:

Peter Söderström, Vattenfall Eldistribution AB (ordförande)

Göran Ericsson, Svenska Kraftnät (vice ordförande)

Rolf Gustafsson, Mälarenergi AB

Susann Persson, Jämtkraft AB

Alexander Örning, HEM Nät AB

Martin Sandin, Göteborg Energi AB

Claudio Marchetti, ABB AB

Ingvar Hagman, NKT Cables AB

Anders Trana, Telia Sonera AB

Anders Bülund, Trafikverket

Hannes Schmied, NCC AB

Anders Johansson, SABO AB

Linda Karlsson, Siemens AB

Lawrence Jones, Alstom AB

Matz Tapper, Svensk Energi (adjungerad)

Susanne Olausson, Elforsk AB (programansvarig)

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

Svenska Kraftnät	Sandviken Energi Elnät AB
Vattenfall Eldistribution AB	Trollhättan Energi Elnät AB
Göteborg Energi AB	Borås Elnät AB
Skelefteå Kraft AB	Landskrona Stad
Mälarenergi Elnät AB	NKT Cables AB
Jämtkraft AB	SABO
Umeå Energi Elnät AB	Combitech AB
Öresundskraft AB	NCC Construction Sverige AB
Jönköping Energi Nät AB	ABB AB
Gävle Energi AB	TeliaSonera AB
Eskilstuna Energi & Miljö AB	Trafikverket
Sundsvall Elnät AB	Siemens AB
Härjeåns Nät AB	Elverket Vallentuna
Halmstad Energi & Miljö Nät AB	Alstom AB
Falu Elnät AB	Basprojektet
AB Borlänge Energi	

Stockholm i augusti 2014

Susanne Olausson
Elforsk AB
Programområde Överföring och Distribution

Sammanfattning

Denna rapport är resultatet av ett projekt finansierat av Elforsk och utfört av STRI tillsammans med Luleå tekniska universitet. Projektet behandlar spänningsvariationer i distributionsnät orsakade av sol- och vindkraft i två olika tidsskalor: 1 sekund – 10 minuter och under 1 sekund. Såväl mindre anläggningar anslutna mot lågspänningsnätet som större anläggningar anslutna mot mellanspänningsnätet studerades. För solkraft studerades även en enkel modell av sammanlagringseffekter.

Acceptansgränsen

Elnätet sätter gränsen på mängden sol- och vindkraft som kan anslutas innan tillförlitlighet eller spänningskvalitet äventyras. Den högsta tillåtna mängden ansluten produktion refereras till som "acceptansgränsen" (eng. "*hosting capacity*"). Det har gjorts flera studier, världen runt, då acceptansgränsen studerades och beräknades för överbelastning av komponenter och för långsamma spänningsvariationer (på tidsskalor av 10 minuter och längre). Det har hittills bara gjorts ett mycket begränsat antal studier för tidskalan mellan 1 sekund och 10 minuter samt för tidskalan under 1 sekund. Brist på mätdata och brist på prestandamått har bidragit till detta.

För båda tidskalorna sattes acceptansgränsen (begränsningen i mängden förnybar elproduktion som kan anslutas till nätet) i de flesta fall i denna studie av den maximalt tillåtna spänningshöjningen i nätet eller av belastningsförmågan hos komponenter i nätet, snarare än av de beräknade störnivåerna.

Tidskalan 1 sekund till 10 minuter

På denna tidskala används begreppet mellansnabba spänningsvariationer (eng. "*Very Short Variations*" - VSV) för att kvantifiera inverkan från sol- och vindkraft på spänningsvariationerna. Resultatet jämfördes med befintliga störnivåer från mätningar utförda på verkliga låg- och mellanspänningsnät, samt banmatningar. Det konstaterades i studien att de befintliga störnivåerna kan karaktäriseras som ett bakomliggande brus med pålagda toppar. Variationerna från vindkraft delar denna karaktär medans solkraft har en helt annan karaktär, med en avsaknad av brus och ett större antal toppar. Resultatet från studien antyder att en ökad mängd sol- och vindkraft under vissa förutsättningar kan leda till en ökning av dessa mellansnabba spänningsvariationer, eller VSV. Men det förväntas inga stora ökningar på de flesta ställen då det ansluts sol- eller vindkraft.

Konsekvenserna av en ökning av VSV kan vara bromsande eller accelererande moment för motorer, försämring av elektrisk utrustning där de elektroniska delarna påverkas av fluktueringar i matningsspänningen och små, men ändå oacceptabla, variationer på produktionsparametrar som exempelvis färg och diameter. Ytterligare studier behövs för att kunna bedöma vad som är acceptabla nivåer för VSV.

Det undersöktes även kort huruvida sol- och vindkraft kan orsaka ett ökat antal omkopplingar per dygn hos lindningskopplare, vilket kan leda till att de

slits ut i förtid. Resultatet visar framförallt att det inte förväntas ett ökat antal omkopplingar för sol- och vindkraft ansluten mot transformatorer då källimpedansen (transformatorn plus överliggande nät) har ett X/R-förhållande över 10.

Tidskalan under 1 sekund

På tidskalan under 1 sekund användes den väldokumenterade flimmerstandarden för att uppskatta flimmernivåerna, detta utifrån variationer i spänning orsakade av variationer i producerad effekt. Detta gjordes för såväl enskilda solkraftanläggningar som för sammanlagrad solkraft och för en vindkraftpark.

Från resultatet framgår att det i vissa fall med sammanlagrad solkraft kan uppstå flimmervärden i närheten av de angivna gränserna, men den maximalt tillåtna spänningshöjningen (för långsamma variationer) kommer att överskridas innan flimmernivåerna når oacceptabla nivåer. För vindkraft var samtliga flimmervärden med god marginal under de angivna gränserna.

Den befintliga flimmerstandarden är baserad på en 230 V 60 W glödlampa, men idag håller glödlampan på att fasas ur. Samtidigt påverkar spänningsvariationer andra typer av belysning på ett annat sätt, det konstateras bland annat att lågenergibelysning i allmänhet är mindre känslig mot snabba spänningsvariationer jämfört med glödlampor. Med detta i åtanke tyder resultatet från denna studie på att en ökad mängd sol- och vindkraft inte kommer leda till några problem vad gäller flimmer.

Resultat

I denna studie sågs inga indikationer på att en ökad mängd sol- och vindkraft kommer att leda till några större problem vad gäller spänningsvariationer i nätet, på tidskalor mindre än 10 minuter. Då det inte ännu finns något vedertaget mått på rekommenderade VSV-nivåer rekommenderas det dock att övervaka de befintliga nivåerna i nätet.

Summary

This report is the result of a project funded by Elforsk and carried out by STRI together with Luleå University of Technology. The aim of the project is to study voltage variations in distribution networks caused by solar and wind power in two time scales: 1 second – 10 minutes and below 1 second. Small production units connected to the low voltage grid as well as larger units connected to medium voltage will be studied. A simple model of aggregated solar power is also studied.

Hosting Capacity

The grid sets the limit on the amount of solar and wind power that can be connected before the reliability or power quality is compromised. The maximum amount of production that can be connected is referred to as the "hosting capacity". There have been several studies around the world where the hosting capacity was studied and calculated for overloading of components and slow voltage variations (on time scales of 10 minutes and longer). So far, only a very limited amount of studies have been made on the time scale between 1 second and 10 minutes and the time scale below 1 second. A lack of measurement data and performance indices have contributed to this.

For both time scales the hosting capacity (the limit in the amount of renewable energy that can be connected to the grid) was in most cases in this study determined by the maximum allowed voltage rise in the network or by the overloading of components, rather than by the calculated interference levels.

The time scale of 1 second to 10 minutes

In this time scale the concept of *Very Short Variations* (VSV) is used to quantify the impact from solar and wind power on the voltage variations. The results were compared with existing interference levels from measurements made on real low and medium voltage networks, as well as from stations feeding the railroad network. It was found in the study that the existing interference levels can be characterized as an underlying noise together with superimposed spikes. The variations found from wind power share this characteristic but in the case of solar power the noise was very low and instead the number of spikes was higher. The results from the study show that an increase in solar and wind power can under some circumstances cause an increase in VSV levels. However, major increases are not expected in most places where solar or wind power is connected.

The consequences of an increase in VSV levels can be braking or accelerating moments for motors, impairment of electrical equipment where the electronic parts are affected by fluctuations in the supply voltage and small, but still unacceptable, variations in production causing errors in e.g. color and diameter. It was concluded that further studies are needed to determine acceptable levels of VSV.

It was also examined whether solar and wind power can cause an increase in tap changes, leading to tap changers getting worn out prematurely. The results show that an increase in tap changes is not expected for solar or wind

power connected to transformers where the source impedance (transformer together with overlying network) has an X/R ratio above 10.

The time scale below 1 second

On the time scale below 1 second the well documented flickermeter standard is used to evaluate the flicker levels, this was done by evaluating variations in voltage caused by variations in production. This was done for small scale solar power (e.g. panels at the roof of a customer), aggregated solar power and also for a wind park.

From the results it could be seen that in certain cases of aggregated solar power flicker levels close to the limit could be seen. However, before the limit of acceptable flicker could be exceeded the maximum allowed voltage (for slow variations) exceeded the acceptable limits. For wind power, all flicker values were well below the limits.

The existing flickermeter standard is based on a 230 V 60 W incandescent lamp, but this type of lamp is gradually being replaced. Voltage variations will affect other types of lamps differently, with Compact Fluorescent Lamps (CFL) and LED lamps being less sensitive to voltage variations when compared to the 60 W incandescent lamp. With this in mind, the results from this study point to there being no cause for alarm regarding an increase in flicker levels due to solar and wind power.

Results

In this study there were no indications that an increase in solar and wind power will lead to any considerable problems with regards to voltage variations in the grid, on time scales less than 10 minutes. However, as there is no recognized standard regarding the recommended levels of VSV it is suggested to keep track of the existing levels in the grid.

Innehåll

1	Inledning	1
1.1	Struktur.....	2
2	Föreskrifter och metoder	3
2.1	Flimmer (IEC 61000-4-15).....	3
2.2	SS-EN 50160 - Spänningens egenskaper i elnätet för allmän distribution.....	4
2.3	EIFS 2013:1	5
2.4	Anslutning av mindre/större produktionsanläggningar till elnätet (AMP/ASP)	5
2.5	Mellansnabba Spänningsvariationer.....	6
2.5.1	Definition	6
3	Datakällor	7
3.1	1 s – 10 min	7
3.1.1	Solkraft	7
3.1.2	Vindkraft.....	7
3.1.3	Låg-/mellanspänningsnät och banmatningar.....	8
3.2	< 1 s	8
3.2.1	Solkraft	8
3.2.2	Vindkraft.....	9
4	Variationer 1 s – 10 min	10
4.1	Nätmodeller.....	10
4.1.1	Enskild, liten solcellsanläggning.....	10
4.1.2	Större solcellsanläggning.....	11
4.1.3	Sammanlagringseffekter solkraft	11
4.1.4	Enskilt vindkraftverk.....	12
4.1.5	Vindkraftpark	13
4.2	Variationer i aktiv och reaktiv effekt	13
4.2.1	Solkraft	13
4.2.2	Vindkraft.....	15
4.3	Befintliga Nivåer.....	17
4.3.1	Lågspänningsnät	17
4.3.2	Mellanspänningsnät	18
4.3.3	Banmatningar	20
4.4	Förväntade variationer i spänning	22
4.4.1	Solkraft, mindre anläggning	22
4.4.2	Solkraft, större anläggning	27
4.4.3	Solkraft, sammanlagringseffekter	28
4.4.4	Vindkraft, enskilt kraftverk	31
4.4.5	Vindkraftparker.....	34
4.5	Lindningskopplare	35
4.6	Konsekvenser av höga VSV-nivåer.....	37
5	Variationer < 1 s	39
5.1	Nätmodell	39
5.2	Resultat	39
5.2.1	Solkraft	39
5.2.2	Vindkraft.....	44
5.3	Flimmer och lågenergibelysning.....	45
6	Slutsatser och rekommendationer	48

6.1	1 sekund till 10 minuter	48
6.2	Under 1 sekund.....	49
6.3	Framtida arbete	49
7	Författarnas tack	51
8	Citerade arbeten	52
9	Appendix A	54
9.1	Kabelparametrar	54
10	Appendix B	56
10.1	Acceptansnivå vindkraftparker.....	56
11	Appendix C	58
11.1	Flimmerberäkningar över 1-minutersintervall	58
12	Appendix D	59
12.1	Ytterligare VSV Lågspänningsnät	59
12.2	Ytterligare VSV Mellanspänningsnät	60
12.3	Ytterligare VSV Banmatningar	62
12.4	Ytterligare VSV Solkraft.....	68
	12.4.1 Tracking	68
	12.4.2 Stationär.....	68
	12.4.3 Finland	69
12.5	Ytterligare VSV Vindkraft	69
	12.5.1 Skellefteå 12 MW	69
	12.5.2 Saxberget 20 MW.....	70

1 Inledning

Med intermittent produktion avses i detta projekt produktion som varierar i effekt för olika tidskalor, som till största delen inte kan förutses eller motverkas av elnätoperatören. Rent praktiskt motsvarar detta idag sol- och vindkraft. Som en följd av en ökad mängd sol- och vindkraft förväntas spänningsvariationer i tidskalan mellan 1 sekund och 10 minuter öka, men då det i dag inte finns några föreskrifter som gäller för den tidskalan behövs en kartläggning av dessa variationer. En annan frågeställning är huruvida spänningsvariationer på tidskalan under en sekund kommer att öka till följd av en ökad mängd sol- och vindkraft, vilket kan leda till oönskade effekter såsom flimmer.

Projektets syfte är att studera variationer i produktion från sol- och vindkraft och konsekvenser dessa har för spänningskvaliteten, för tidskalor mindre än 10 minuter. Projektet har följande delmål:

- Att studera variationer i aktiv och reaktiv effekt för tidskalan mellan 1 sekund och 10 minuter
- Att studera variationer i aktiv och reaktiv effekt för tidskalan mindre än 1 sekund
- Att studera konsekvenser av dessa variationer för spänningskvaliteten

För att nå de angivna målen är projektet uppdelat i ett antal delmoment som beskrivs nedan.

1. Insamling av mätdata att användas i delmoment 2 och 3. Data omfattar dels variationer i produktion från sol- och vindkraft och dels befintliga variationer i nätet.
2. Studie på variationer för tidskalan mellan 1 sekund och 10 minuter. Resultatet jämförs med befintliga nivåer i låg- och mellanspänningsnät samt med variationer inom denna tidskala för banmatningar.
3. Studie på variationer för tidskalan under 1 sekund. En bedömning görs av hur mycket flimmerintensiteten kommer att ökas på grund av sol- och vindkraft baserat på befintliga standarder och föreskrifter. Det kommer även att diskuteras kring nya typer av belysning och hur de påverkas av snabba spänningsvariationer.

Som en del i dessa aktiviteter ingår det också att beakta inverkan från nätets kortslutningseffekt på störnivåerna. Andra frågeställningar är ifall nuvarande flimmergränser är för låga och ifall nuvarande gränser för *Rapid Voltage Changes* (RVC) är för restriktiva för solcellsproduktion.

Projektet genomförs på uppdrag av Elforsk inom *Program Smart Grids* och utförs i samarbete med Luleå Tekniska Universitet (LTU) där elkraftgruppen har hjälpt till gällande analys av mätdata, som diskussionspartner vid tolkning av resultat och genom att bidra till rapporteringen.

1.1 Struktur

Utöver det inledande kapitlet innehåller rapporten följande:

Det andra kapitlet går igenom befintliga standarder och föreskrifter som används för att kvantifiera spänningsvariationer i olika tidskalor. I kapitlet presenteras också en av STRI framtagna metod för att kvantifiera spänningsvariationer i tidskalan mellan 1 sekund och 10 minuter.

I kapitel 3 presenteras den mätdata som används i projektet och vilka källor den kommer ifrån.

Variationer för tidskalan mellan 1 sekund och 10 minuter beskrivs och analyseras i kapitel 4. Här presenteras också de nätmodeller som har använts för denna studie. Kapitlet innehåller även en diskussion kring konsekvenser av spänningsvariationer i denna tidskala.

I kapitel 5 analyseras variationer för tidskalan under 1 sekund baserat på befintliga flimmerstandarder. Kapitlet avslutas med en diskussion kring nya typer av belysning och hur de påverkas av snabba spänningsvariationer.

Kapitel 6 avslutar rapporten genom att sammanfatta de resultat som framkommit och genom att presentera de rekommendationer och slutsatser som framkommit i projektet.

2 Föreskrifter och metoder

Inom området spänningsvariationer finns ett antal olika standarder som täcker in olika tidskalor och således tar hänsyn till olika fenomen, exempelvis flimmer, snabba spänningsändringar och övertoner. Följande avsnitt beskriver befintliga standarder och föreskrifter och presenterar en av STRI framtagna metod som är tänkt att komplettera befintliga standarder för variationer på en tidskala mellan 1 sekund och 10 minuter.

2.1 Flimmer (IEC 61000-4-15)

Flimmer definieras som variationer i luminositet som uppstår till följd av spänningsfluktuationer i frekvensområdet mellan 1 och 10 Hz. De flesta personer upplever flimmer som obehagligt och även flimmer som inte går att urskilja kan leda till huvudvärk och trötthet. För att kvantifiera ifall spänningsvariationer leder till märkbart flimmer har tidigare den så kallade "flimmerkurvan" använts. Den beskriver den lägsta spänningsvariation som leder till synbart flimmer som en funktion av variationens frekvens. I internationella standarder ges flimmerkurvor för standardiserade lampor: en 60 W 230 V glödlampa i Europa och en 60 W 120 V glödlampa i USA. En nackdel med flimmerkurvan är att den enbart gäller för vissa former av spänningsfluktuationer (fyrkantsvåg, sinus etc.).

För att kunna bestämma flimmernivån även i fall av oregelbundna fluktuationer utvecklades ett koncept för en flimmermätare, vilket finns beskrivet i standarden IEC 61000-4-15 [1]. Även här används en 60 W glödlampa som referens. Figur 1 visar principen bakom flimmermätaren.



Figur 1 – Från spänningsfluktuationer till flimmer

Kortfattat går standarden ut på att modellera kedjan lampa-öga-hjärna för att uppskatta flimmernivån utifrån uppmätta spänningsfluktuationer. Resultatet från flimmermätaren är ett tiominutersvärde (short term) på flimmernivån, P_{ST} , och ett tvåtimmarsvärde (long-term), P_{LT} , vilka fås genom att statistiskt processa den omedelbara flimmernivån. P_{ST} räknas ut genom följande uttryck:

$$P_{ST} = \sqrt{0.0314P_{99,9} + 0.0525P_{99} + 0.0657P_{97} + 0.28P_{90} + 0.08P_{50}} \quad (1)$$

där P_{90} motsvarar det värde som är större än 90 % av alla sampel etc. Gränsen för vad som anses acceptabelt är $P_{ST} = 1$, vilket är en nivå som 95 % av alla personer uppfattar som störande. P_{LT} räknas sedan ut enligt

$$P_{LT} = \sqrt[3]{\frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} P_{ST}(i)^3} \quad (2)$$

En frågeställning som har uppkommit sedan EU beslutat att fasa ut glödlampor är huruvida den nuvarande standarden har för hårt satta gränser för acceptabla flimmernivåer. Detta grundar sig i att de lampor som är tänkta att ersätta glödlampan är mindre känsliga för spänningsvariationer. Detta diskuteras i mer detalj i avsnitt 5.3.

2.2 SS-EN 50160 - Spänningens egenskaper i elnätet för allmän distribution

SS-EN 50160 specificerar parametrar och tillåtna avvikelser vid kundens sammankopplingspunkt i distributionsnätet på låg- och mellanspänningsnivå, under normala förhållanden. Tabell 1 beskriver i standarden angivna specifikationer i korthet:

Tabell 1 - Specifikationer SS-EN 50160 [2]

Parameter	Karaktäristik
Långsamma spänningsvariationer	10 min rms av fasspänningen ska alltid ligga inom +10/-15 % av nominellt värde och inom ±10 % under 95 % av en vecka.
Snabba spänningsvariationer (RVC/Flimmer)	LV: 5 % normalt sett, 10 % om det sker sällan. MV: 4 % normalt sett, 6 % sällan. $P_{LT} < 1$ under 95 % av en vecka.
Osymmetrisk spänning	10 min rms, ≤ 2 % skillnad mellan faser under 95 % av en vecka.
Övertoner (spänning)	<i>Total Harmonic Distortion</i> (THD) högst 8 % under 95 % av en vecka. Nivåer för individuella övertoner ges också.
Spänningsdippar	De flesta ska vara < 1 sekund och < 60 %.
Avbrott (Korta)	Avbrott upp till 3 min: ett tiotal - ett hundratal/år. 70 % kortare än 1 sekund.
Avbrott (Långa)	Avbrott längre än 3 min: mindre än 10-50 st/år.
Överspänningar (långvariga)	Ska understiga 1.6 kV rms.
Överspänningar (transienter)	Ska understiga 6 kV rms.
Variationer i frekvens	10 s medelvärde av frekvensen ska alltid ligga inom -6/+4 % och ±1 % under 95 % av en vecka.

2.3 EIFS 2013:1

Energimarknadsinspektionen har en samling föreskrifter, EIFS 2013:1, som behandlar krav som måste uppfyllas för att överföringen av el ska betraktas som av god kvalitet. Kortfattat kan EIFS 2013:1 anses vara en något striktare tolkning av SS-EN 50160, beskriven ovan. Undantaget är flimmer, då det inte ställs ytterligare krav i EIFS 2013:1 utöver de som redan finns i SS-EN 50160. Tabell 2 visar kortfattat de parametrar och värden som behandlas i EIFS 2013:1.

Tabell 2 - Specifikationer EIFS 2013:1 [3]

Parameter	Karaktäristik
Långsamma spänningsvariationer	10 min rms av fasspänningen ska alltid ligga inom ± 10 % av nominellt värde under en vecka.
Spänningsövertoner	$THD \leq 8$ % under en vecka. Värden för enskilda övertoner anges också. EIFS 2013:1 skiljer på övertoner för referensspänningar över/under 36 kV.
Osymmetrisk spänning	10 min rms av spänningssosymmetrin ≤ 2 % under en vecka.
Kortvarig spänningssänkning	EIFS 2013:1 anger två olika tabeller för referensspänningar över/under 45 kV som karaktäriserar spänningssänkningarna i tre olika områden.
Kortvarig spänningshöjning	Kortvariga spänningshöjningar karaktäriseras på ett liknande sätt som kortvariga spänningssänkningar, genom en tabell med tre olika områden.
Snabb spänningsändring	Anges för spänningar över/under 45 kV. $\Delta U_{stationär} \geq 3$ % maximalt 12/24 st per dygn $\Delta U_{max} \geq 5$ % maximalt 12/24 st per dygn

2.4 Anslutning av mindre/större produktionsanläggningar till elnätet (AMP/ASP)

AMP och ASP är handledningar som tagits fram av Svensk Energi. De behandlar nyanslutning av alla typer av produktionsanläggningar med huvudsaklig inverkan på lokal- (AMP) respektive regionnätet (ASP).

I AMP anges bland annat att långsamma spänningsvariationer ska understiga 2.5 % och värden för flimmer anges också (från IEC 61000-3-7): $P_{ST} \leq 0.35$ och $P_{LT} \leq 0.25$ [4].

I ASP finns det ännu få rekommendationer för elkvalitet, men bland annat nämns att bidraget från varje produktionsenhet till P_{LT} ska understiga 0.1.

2.5 Mellansnabba Spänningsvariationer

I nuläget saknas standarder som behandlar tidskalan mellan 1 sekund och 10 minuter, det finns dessutom endast begränsad forskning på området. STRI har som en del i ett stort Europeiskt projekt [5] utvecklat en metod som kommer att användas i denna rapport för att kvantifiera hur mycket spänningsvariationerna för denna tidskala kommer att öka till följd av en ökad mängd sol- och vindkraft. Metoden kallas *Very Short Variations* (VSV) och var från början tänkt för att täcka in spänningsvariationer på en tidskala mellan 3 sekunder och 10 minuter. Orsaken till att just 3 sekunder anges som nedre värde är att det är det värde som anges i standarden IEC 61000-4-30 [6]. Det finns dock inga tekniska anledningar i metoden att sätta den undre gränsen till 3 sekunder.

2.5.1 Definition

Kort beskrivet så går VSV ut på att jämföra tresekunders och tiominuters rms-värden. Tiominutersvärdet U_{sh} (short time) beräknas som rms-värdet av tresekundsvärdena U_{vs} (very-short time) över föregående tiominutersintervall:

$$U_{sh}(t_k) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=k-N+1}^k U_{vs}^2(t_i)} \quad (3)$$

där N är antalet tresekundsvärden i det aktuella tiominutersintervallet och t_k det tidssampel som motsvarar slutet på det aktuella tiominutersintervallet.

Sedan beräknas skillnaden mellan tresekunders- och tiominutersvärden. Tresekunders VSV, ΔU_{vs} , definieras som:

$$\Delta U_{vs}(t_k) = U_{vs}(t_k) - U_{sh}(t_k) \quad (4)$$

där tiominutersvärdet U_{sh} beräknas som i (3), med skillnaden att värdet uppdateras var tredje sekund. Utifrån detta så beräknas sedan ett tiominuters VSV-värde:

$$\Delta U_{sh}(t_k) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=k-N+1}^k \Delta U_{vs}^2(t_i)} \quad (5)$$

där t_k motsvarar slutet på ett tiominutersintervall, som i (3).

Resultatet blir att spänningsvariationer över varje 10-minuters intervall kvantifieras genom tre värden:

- ✓ tiominuters effektivvärde (rms)
- ✓ tiominuters VSV-värde
- ✓ flimmervärde Pst

3 Datakällor

Som en del i projektet har data samlats in från sol- och vindkraftanläggningar på olika platser, både för tidskalan under 1 sekund och för tidskalan 1 sekund till 10 minuter. För att kunna jämföra inverkan från sol- och vindkraftsanläggningar på spänningen med befintliga störnivåer har data också samlats in från låg- och mellanspänningsnät, samt från banmatningar.

3.1 1 s – 10 min

Följande avsnitt ger en sammanfattning av data som erhållits på tidskalan 1 sekund till 10 minuter.

3.1.1 Solkraft

Data från solkraft som används i detta projekt kommer från tre olika källor: Luleå Tekniska Universitet (LTU), som har data från 3 olika anläggningar och Glava Energy Center, som har data från två anläggningar. Tabell 3 visar de anläggningar för vilka data erhållits på tidskalan 1 sekund till 10 minuter.

Solkraftdata finns för två olika typer av anläggningar: Stationär och tracking. Stationär är, precis som det låter, en anläggning med fasta solpaneler. Tracking innebär att panelerna har en viss förmåga att ändra sitt läge för att följa solen, vilket ökar den effekt som kan produceras jämfört med en stationär panel på samma plats.

Tabell 3 - Solkraftdata

Anläggning	Kapacitet	Upplösning	Typ
Piteå (LTU)	20 kW	1 s	Tracking
Skellefteå Stadshus (LTU)	20 kW	1 s	Stationär
Finland (LTU)	2 kW	1 s	Stationär
Arvika (Glava)	100 kW	6 s	Stationär
Arvika (Glava)	4 kW	6 s	Stationär

För samtliga anläggningar finns data för ungefär en månad.

3.1.2 Vindkraft

Vindkraftdata på tidskalan 1 sekund till 10 minuter har erhållits från två källor: Skellefteå Kraft, som har data från två anläggningar, och STRI, vilka visas i Tabell 4 nedan.

Tabell 4 - Vindkraftsdata

Anläggning	Kapacitet	Upplösning	Typ
Skellefteå Kraft	600 kW	1 s	Enercon E40, Fulleffektomriktare
Skellefteå Kraft	12 MW	1 s	Enercon E82, Fulleffektomriktare
Saxberget (STRI)	20 MW	1 s	Vestas V90, DFIG

Mätningarna från Skellefteå Kraft gjordes dels på 400 V-terminalen på ett 600 kW vindkraftverk med en fulleffektomriktare, dels på en 12 MW vindkraftpark i Skellefteå (6 st verk på 2 MW vardera) som är ansluten till 30 kV. Mätningarna från STRI utfördes i ställverket på Saxberget i Ludvika, vilket är en vindkraftpark med en total kapacitet på 20 MW, fördelad på 10 verk på 2 MW vardera, ansluten mot 55 kV. De verken är av typen Doubly-Fed Induction Generator (DFIG). För samtliga anläggningar finns data för ungefär en månad.

3.1.3 Låg-/mellanspänningsnät och banmatningar

På lågspänningsnätet finns mätningar från ett tiotal olika platser. Detta innefattar bland annat hotell, universitet och lägenheter i olika länder. Mätningarna har en tidsupplösning på 1-3 sekunder och är över ett fåtal dygn.

På mellanspänningsnätet finns det enbart mätningar från en plats, men under en månads tid. Dessa mätningar kommer från Skellefteå Kraft och är mätta på 10 kV med 1 sekunds upplösning.

Samtliga mätningar på banmatningar kommer från Trafikverket. Det finns mätningar under en månads tid på 4 olika platser med 6 sekunders upplösning. Spänningsnivån för dessa mätningar är 22 kV.

3.2 < 1 s

Följande avsnitt ger en sammanfattning av data som erhållits på tidskalan under en sekund.

3.2.1 Solkraft

På tidskalan under en sekund har data erhållits med 20 ms upplösning för de tre paneler som finns hos LTU. För varje panel har data erhållits för ett dygn, vilket valts ut utifrån det dygn som har störst variationer utifrån tiominuters VSV. Tabell 5 visar en översikt.

Tabell 5 - Solkraftdata < 1 s

Anläggning	Kapacitet	Upplösning	Typ
Piteå (LTU)	20 kW	20 ms	Tracking
Skellefteå Stadshus (LTU)	20 kW	20 ms	Stationär
Finland (LTU)	2 kW	20 ms	Stationär

3.2.2 Vindkraft

Data för vindkraft på tidskalan under en sekund har erhållits i form av vågformer på spänningar och strömmar. Detta innebär stora datamängder och en tidskrävande konvertering för mätningar över längre tidsperioder och data har erhållits för dels en period på 72 minuter samt ett flertal tio- och 1-minutersperioder. Tabell 6 sammanfattar den data som erhållits.

Tabell 6 - Vindkraftdata < 1 s

Anläggning	Kapacitet	Upplösning	Typ
Skellefteå Kraft	12 MW	Vågformer	Enercon E82, Fulleffektomriktare

4 Variationer 1 s – 10 min

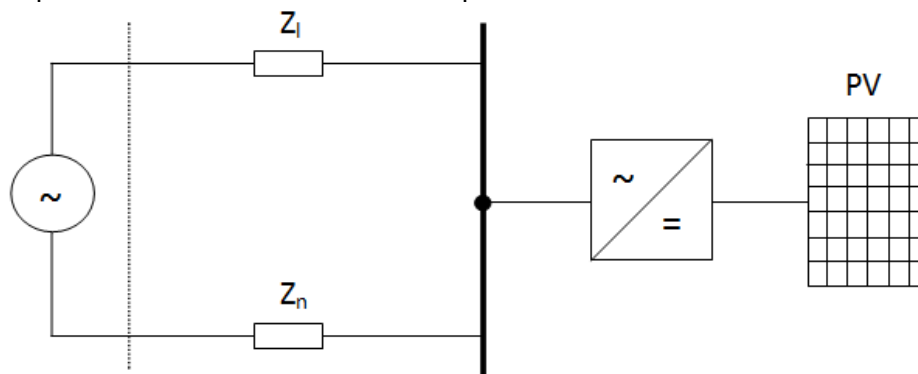
Den första halvan av analysdelen behandlar variationer på tidskalan 1 sekund till 10 minuter. Det mått som används för att kvantifiera inverkan från sol- och vindkraft på spänningskvaliteten är tresekunders och tiominuters VSV, som beskrivs mer ingående i kapitel 2.

4.1 Nätmodeller

För att kunna uppskatta inverkan från variationer i produktion på spänningen behövs en modell av nätet som sol- eller vindkraftverk ansluts till. Följande avsnitt beskriver de olika fall som använts i studien samt de antaganden som gjorts. Både enskilda, mindre produktionsanläggningar och större anläggningar kommer behandlas. Som en del i studien kommer också sammanlagringseffekter att uppskattas.

4.1.1 Enskild, liten solcellsanläggning

I det första fallet antas att en mindre¹ solcellsanläggning sitter ansluten på ett tak hos en kund i lågspänningsnätet. Spänningen vid den överliggande transformatorn antas vara styv (dvs. den påverkas ej av solcellsanläggningen) för att underlätta beräkningarna och nätet modelleras med hjälp av en spänningskälla samt en referensimpedans, designad för att möta kraven ställda i IEC 60725 [7]. Den impedans som används är framtagen för att på ett kontrollerat och verifierbart sätt testa hur mycket flimmer och övertoner en apparat ger. Den motsvarar ett nät som är sämre än 95 % av Europas nät. Figur 2 nedan illustrerar hur detta fall är modellerat. Z_l är impedansen i fasledaren och Z_n impedansen i neutralledaren.



Figur 2 - Modell som används i fall 1

Referensimpedansen har följande värden för 50 Hz [7]:

$$Z_l = 0.25 + j0.15 \, \Omega$$

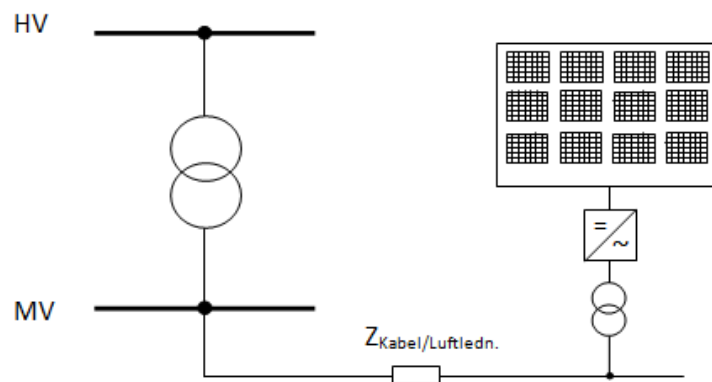
¹Mindre solcellsanläggning syftar i denna studie på en enskild kund med omkring 6 kW installerad effekt.

$$Z_N = 0.16 + j0.10 \, \Omega$$

Ett liknande fall kommer också att studeras där referensimpedansen byts ut mot en enkel modell av ett distributionsnät, där kabel och friliggande luftledning av olika storlek och längd jämförs.

4.1.2 Större solcellsanläggning

Det andra fallet behandlar en större solcellsanläggning på några hundra kW som sitter ansluten på en högre spänningsnivå, vilket visas i Figur 3.

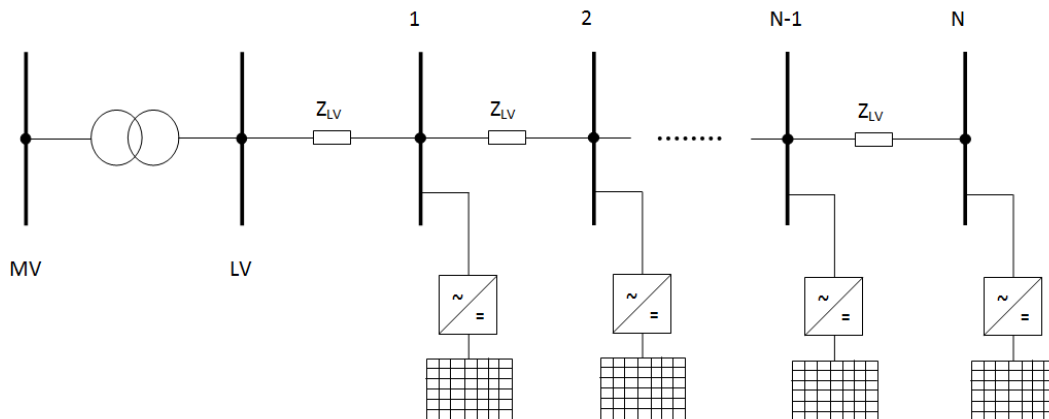


Figur 3 - Större solkraftanläggning

För att undersöka hur stora störnivåerna blir i olika fall kommer simuleringarna att göras för olika längd och typ av kabel samt för olika storlekar på solkraftparker.

4.1.3 Sammanlagringseffekter solkraft

Ett enkelt exempel på ett fall av sammanlagringseffekter är ett villaområde där ett antal hus är utrustade med solpaneler. I det tredje fallet studeras detta genom att modellera ett enkelt distributionsnät där ett flertal mindre solcellsanläggningar (återigen 6 kW per anläggning) ansluts på olika punkter, vilket visas i Figur 4 nedan.

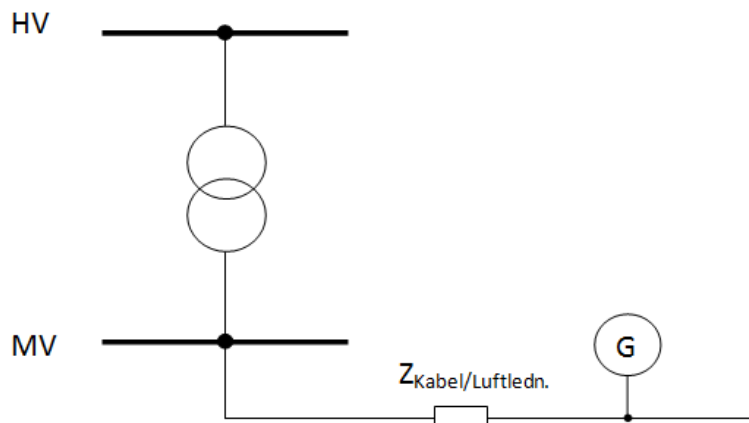


Figur 4 - Distributionsnät med flera mindre solcellsanläggningar

Då sammanlagringseffekter studeras kommer även skillnader i produktion mellan olika enheter att modelleras.

4.1.4 Enskilt vindkraftverk

I fallet med ett enskilt vindkraftverk antas det att vindkraftverket kopplas in en bit ut på mellanspänningsnätet. Längden och storleken på kabeln mellan anslutningspunkten och överliggande (mellanspänning/högspänning) transformator varieras sedan för att motsvara olika starka nät. Luftledningar kommer också att undersökas. Fallet illustreras i Figur 5.

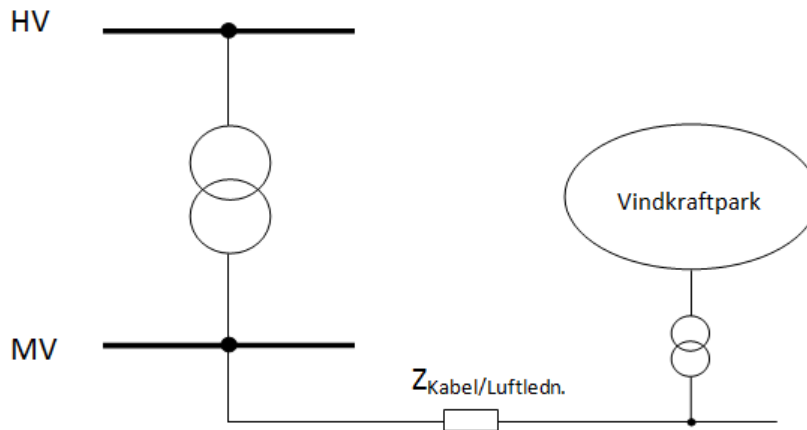


Figur 5 - Enskilt vindkraftverk kopplat mot mellanspänningsnätet

Ifall det sker en spänningsändring vid vindkraftverkets anslutningspunkt kommer i detta fall samma procentuella spänningsändring att ses i lågspänningsnätet, nedströms från vindkraftverket. Utifrån detta kan variationerna i spänning jämföras med befintliga variationer i lågspänningsnät.

4.1.5 Vindkraftpark

Detta fall har många likheter med föregående fall, skillnaden är att det istället för ett vindkraftverk ansluts en vindkraftpark, vilket visas i Figur 6.



Figur 6 - Vindkraftpark inkopplad mot mellanspänningsnätet

Jämfört med det förra fallet kommer spänningsnivån i detta fall antas vara högre. Den uppmätta effekten antas vara den effekt som skickas ut på nätet efter transformatorn vid vindkraftsparkens uppsamlingspunkt och spänningsvariationerna beräknas vid vindkraftsparkens anslutningspunkt till mellanspänningsnätet.

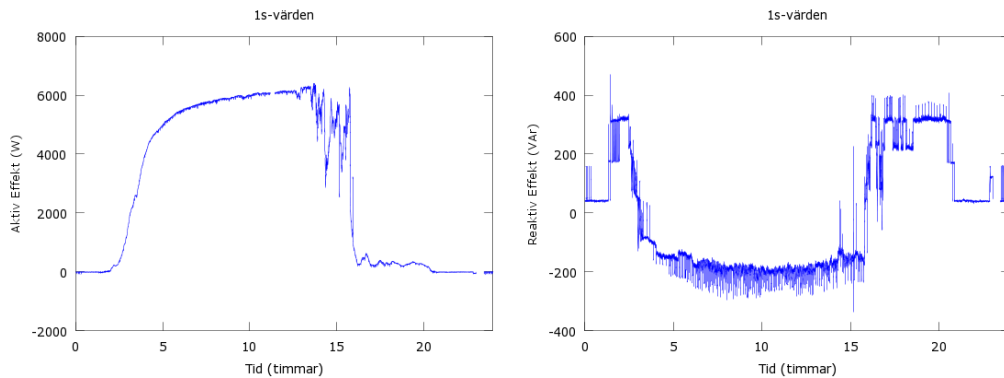
4.2 Variationer i aktiv och reaktiv effekt

I transmissionsnät gäller generellt att aktiv effekt påverkar frekvensen medans reaktiv effekt påverkar spänningen. I distributionsnät på låg- och mellanspänningsnivå är situationen annorlunda då den resistiva delen av kablar och luftledningar är en större del av den totala impedansen (lägre X/R-ratio), ibland även den dominerande delen. När det gäller variationer i producerad effekt så har de olika orsaker beroende på om det är sol- eller vindkraft. För en solkraftsanläggning så är det främst moln som orsakar variationer i produktion, medans det för ett vindkraftverk beror på variationer i vindhastighet och vindriktning.

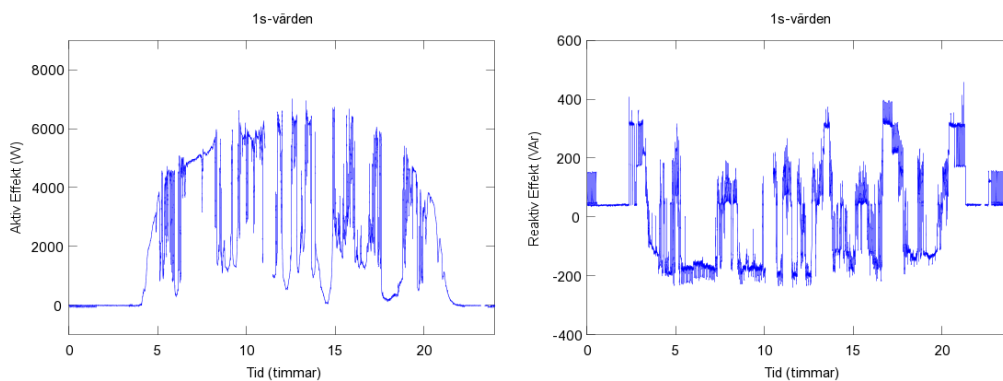
Följande avsnitt presenterar mätningar på aktiv och reaktiv effekt för sol- och vindkraftsanläggningar på olika platser och under olika dagar. Då det finns data från ett flertal anläggningar och under lång tid presenteras här endast några typfall.

4.2.1 Solkraft

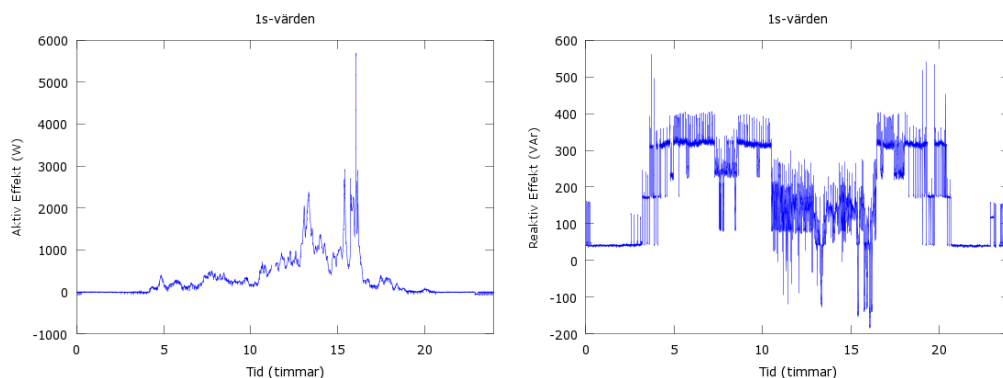
Figur 7, 8 och 9 visar 1-sekundersvärden för aktiv och reaktiv effekt uppmätt under tre olika dagar i juni: en dag utan någon större molnighet, en dag med växlande molnighet och en dag då det var mulet. Mätningarna är gjorda på en 20 kW-anläggning i Piteå, här nerskalad till omkring 6 kW. Observera att denna anläggning följer solen ("tracking"). Det dagliga förloppet av produktionen ser därför något annorlunda ut än man är van vid.



Figur 7 - Aktiv och reaktiv effekt – mestadels solig dag



Figur 8 - Aktiv och reaktiv effekt - växlande molnighet

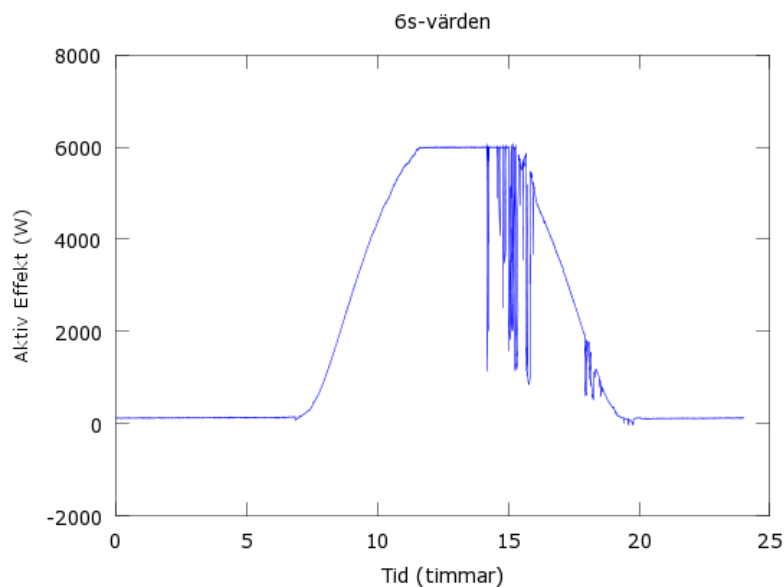


Figur 9 - Aktiv och reaktiv effekt - mulen dag

Utifrån dessa bilder framgår det att karaktärstiken på den effekt som en solkraftanläggning producerar kan skilja sig mycket mellan olika dagar. Under dagar då det inte är några moln och dagar då det är mulet är variationerna små. Under dagar med växlande molnighet varierar den producerade effekten däremot kraftigt, i värsta fall mellan maximal produktion och nästan ingen produktion alls under bara några minuter. Skillnaderna visas kanske bäst i Figur 7: dagen börjar solig och produktionen är hög och konstant. Vid 12-tiden börjar det att bli delvis molnigt, produktionen är fortfarande hög men varierar mycket. Vid 15-tiden blir himlen

helt täckt; produktion blir konstant igen men på en mycket lägre nivå än tidigare.

Mätningar erhöles även från en 4 kW-anläggning i Glava Energy Center där omriktarens märkeffekt var lägre än solcellernas toppeffekt. Figur 10 visar aktiv effekt för en dag i april för den anläggningen. I det här fallet fanns mätdata tillgänglig med 6 sekunders upplösning, varav ekvation (3)-(5) fick justeras för att ta hänsyn till att U_{vs} var sexsekundersvärden istället för tresekundersvärden.

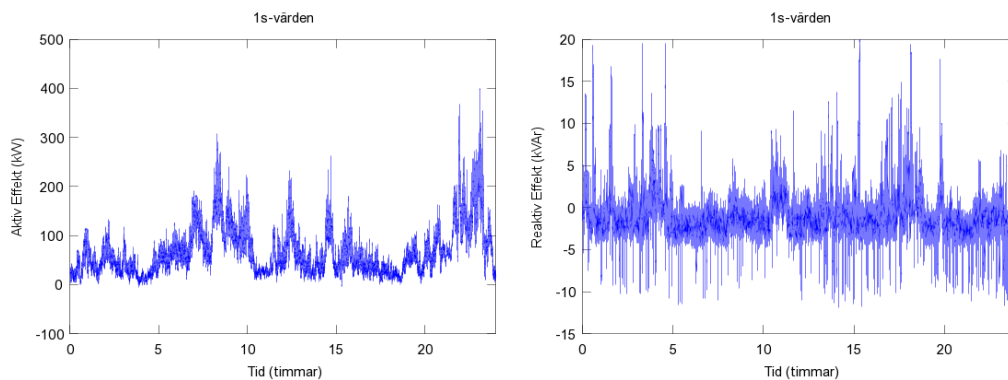


Figur 10 - Effektbegränsning, solkraft

Från bilden framgår det tydligt hur effekten begränsas mitt på dagen då produktionen från solcellerna når omriktarens maxvärde.

4.2.2 Vindkraft

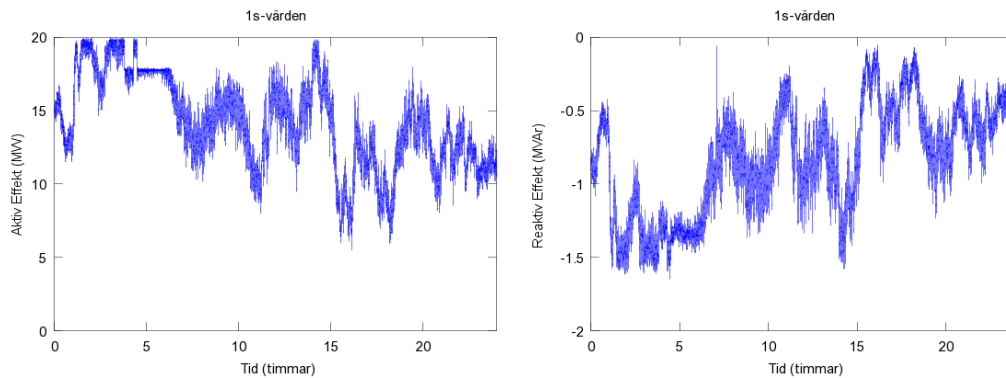
Figur 11 visar aktiv och reaktiv effekt för ett 600 kW vindkraftverk under ett dygn.



Figur 11 - Aktiv och reaktiv effekt för ett 600kW vindkraftverk

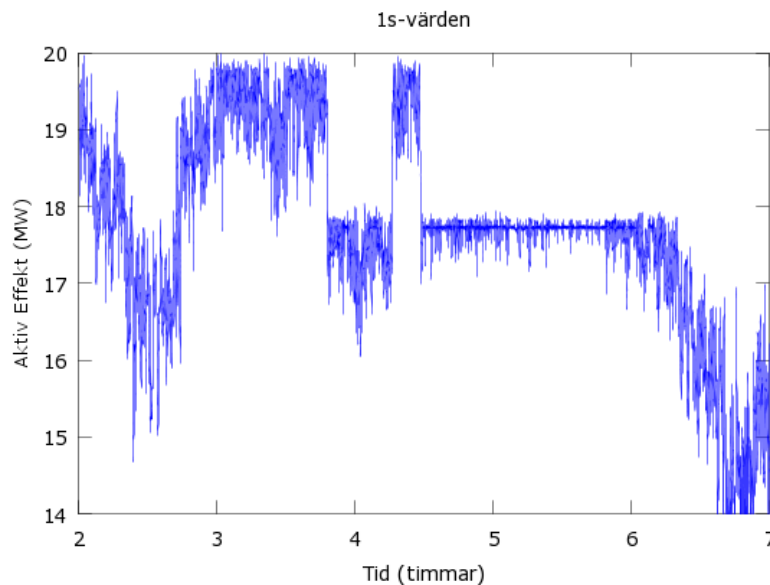
Jämfört med solkraft varierar effekten från vindkraft till synes mer slumpmässigt och den tydliga variation mellan dag och natt som finns hos solkraft framgår inte i här.

I Figur 12 visas aktiv och reaktiv effekt för en 20 MW vindkraftpark under en 24-timmarsperiod.



Figur 12 - Aktiv och reaktiv effekt för en 20 MW vindkraftpark

Effekten från en större vindkraftpark varierar på ett liknande sätt som det enskilda, mindre vindkraftverket. Vissa skillnader kan dock urskiljas vilket diskuteras mer nedan. Figur 13 visar aktiv effekt mellan 02.00 och 07.00.



Figur 13 - Aktiv effekt 02.00 - 07.00

Från figuren framgår det att effekten under vissa perioder ser ut att begränsas. I det här fallet ligger den producerade effekten nära 20 MW för att sedan begränsas ner till 18 MW, där den är relativt konstant. Detta beror förmodligen på att det blåser kraftigt, varav de flesta verk producerar omkring nominell effekt medans ett av verken kopplas bort. Det fanns ingen information tillgänglig om anledningen till bortkopplingen. Relevant för detta projekt är att det kan förekomma snabba steg i produktionen vid bortkoppling och återinkoppling av individuella turbiner i parken.

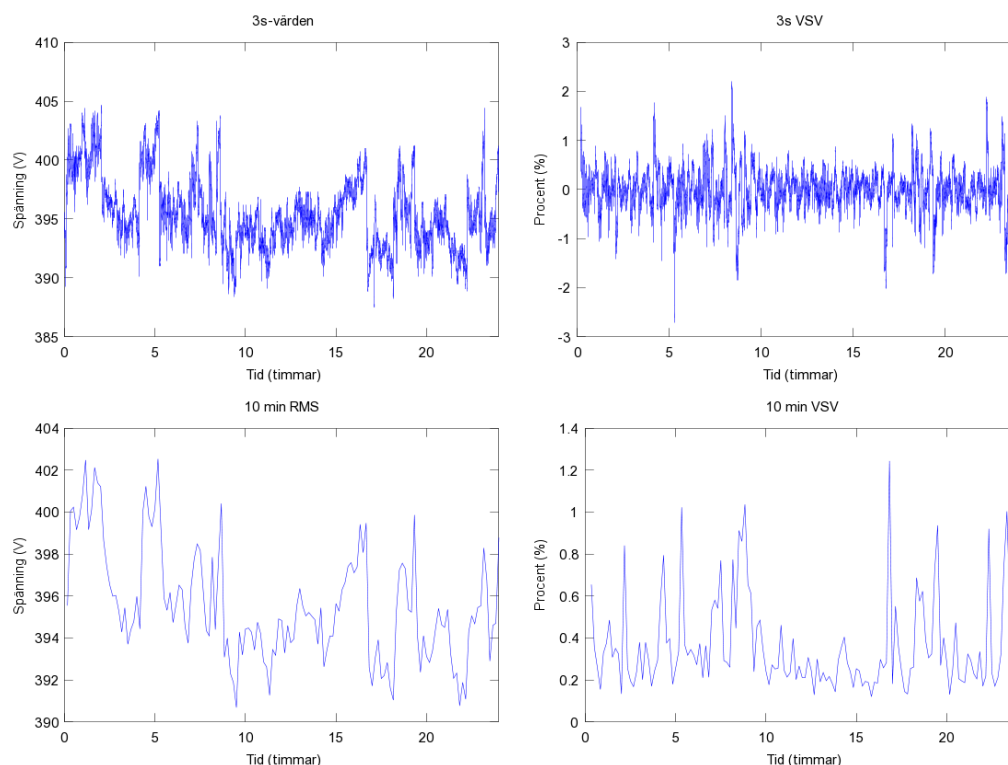
4.3 Befintliga Nivåer

Som en del i insamlandet av mätdata erhöles också mätningar gjorda på låg- och mellanspänningsnät samt mätningar från banmatningar. Dessa används för att uppskatta ifall spänningsvariationer till följd av sol- och vindkraft kommer att leda till större variationer i spänningen än vad som uppstår normalt sett.

Följande avsnitt presenterar tresekundersvärden, tiominuters rms-värden samt tresekunders och tiominuters VSV för olika spänningsnivåer. Data finns från ett flertal platser och dagar och ytterligare data utöver det som visas här finns i Appendix D.

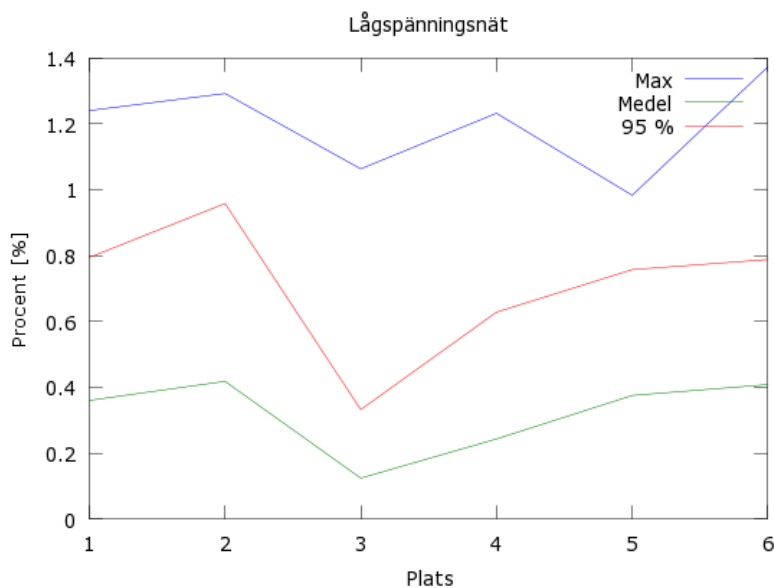
4.3.1 Lågspänningsnät

Figur 14 visar mätningar gjorda på en lägenhet i Ludvika under en 24-timmarsperiod.



Figur 14 - Spänning och VSV för en lägenhet i Ludvika

Kurvorna till vänster visar tresekundersvärden och tiominuters rms. Den övre högra figuren visar skillnaden mellan dem, tresekunders VSV, angiven i procent av den nominella spänningen och den nedre högra figuren visar tiominuters VSV, som räknas ut som rms-värdet av tresekunders VSV över 10 minuter. Tresekunders VSV uppträder i detta fall som ett antal positiva och negativa toppar pålagda på vad som framstår som brus. De toppar som framgår i tresekunders VSV framgår även i tiominuters VSV. Figur 15 och Tabell 7 nedan visar max, medel och 95-percentilen för tiominuters VSV under ett dygn för olika platser på denna spänningsnivå.



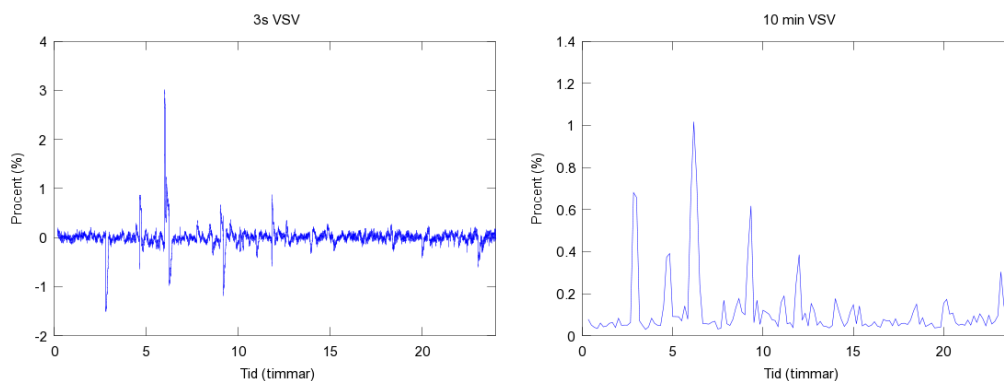
Figur 15 - Max, medel och 95 % för 10 min VSV för olika platser

Tabell 7 - Max, medel och 95 % för 10 min VSV för olika platser i lågspänningsnätet

Plats	Max 10 min VSV (%)	Medel 10min VSV (%)	95 %
1 Lägenhetshotell, Ludvika	1,240	0,360	0,794
2 Sommarstuga, Borlänge	1,292	0,418	0,958
3 Kontor, Ludvika	1,063	0,124	0,332
4 Hotell, Shanghai	1,232	0,243	0,628
5 Lägenhet, Valencia	0,983	0,375	0,757
6 Universitet, Valencia	1,373	0,408	0,788

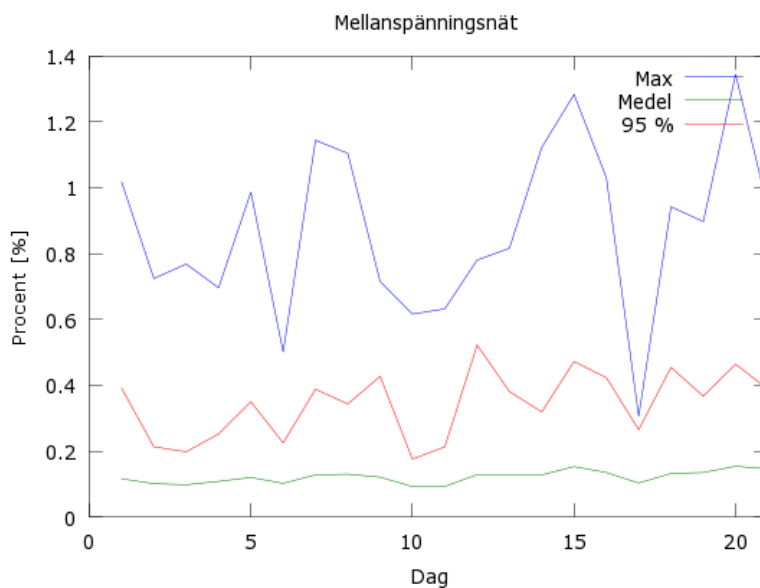
4.3.2 Mellanspänningsnät

Figur 16 visar tresekunders och tiominuters VSV för mätningar gjorda på ett mellanspänningsnät under en 24-timmarsperiod. VSV-värden anges återigen i procent av nominell spänning.



Figur 16 - VSV-värden för ett mellanspänningsnät

Det brus som ligger bakom topparna är i detta fall betydligt lägre på mellanspänningsnätet än i lågspänningsnätet. Även här syns positiva och negativa toppar i ungefär samma storleksordning som i lågspänningsnätet. Figur 17 och Tabell 8 nedan visar max, medel och 95-percentilen för tiominuters VSV för 21 olika dygn från denna plats.



Figur 17 - Max / medel och 95 % i mellanspänningsnätet

Tabell 8 - Max, medel och 95 % för 10 min VSV för mellanspänningsnätet

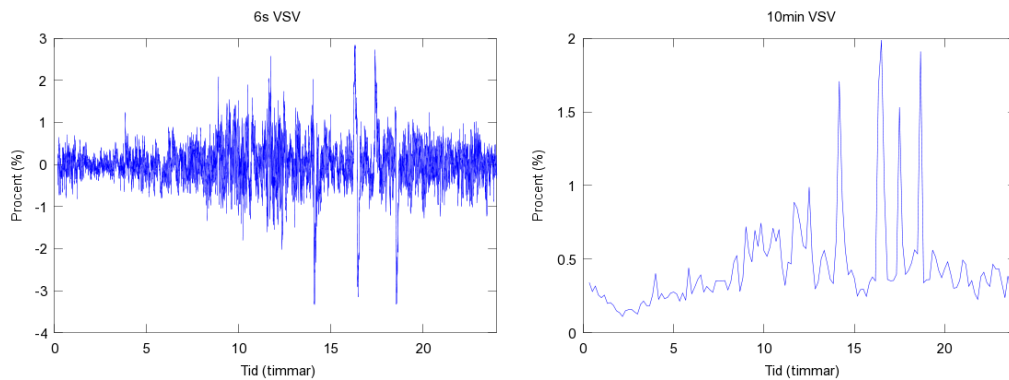
Datum	Max 10 min VSV (%)	Medel 10 min VSV (%)	95 %
1	1,017	0,116	0,391
2	0,724	0,101	0,213
3	0,768	0,098	0,198

4	0,696	0,108	0,252
5	0,986	0,120	0,350
6	0,501	0,102	0,225
7	1,144	0,128	0,388
8	1,104	0,130	0,343
9	0,715	0,121	0,427
10	0,616	0,094	0,176
11	0,632	0,094	0,213
12	0,780	0,129	0,522
13	0,816	0,129	0,381
14	1,122	0,128	0,319
15	1,283	0,153	0,472
16	1,030	0,135	0,423
17	0,306	0,103	0,265
18	0,942	0,132	0,454
19	0,897	0,135	0,367
20	1,344	0,154	0,464
21	0,937	0,146	0,388

Observationen att "brus är betydligt lägre" visas i tabellen genom att skillnaden mellan max, 95 % och medel är mycket större än för lågspänningsnätet.

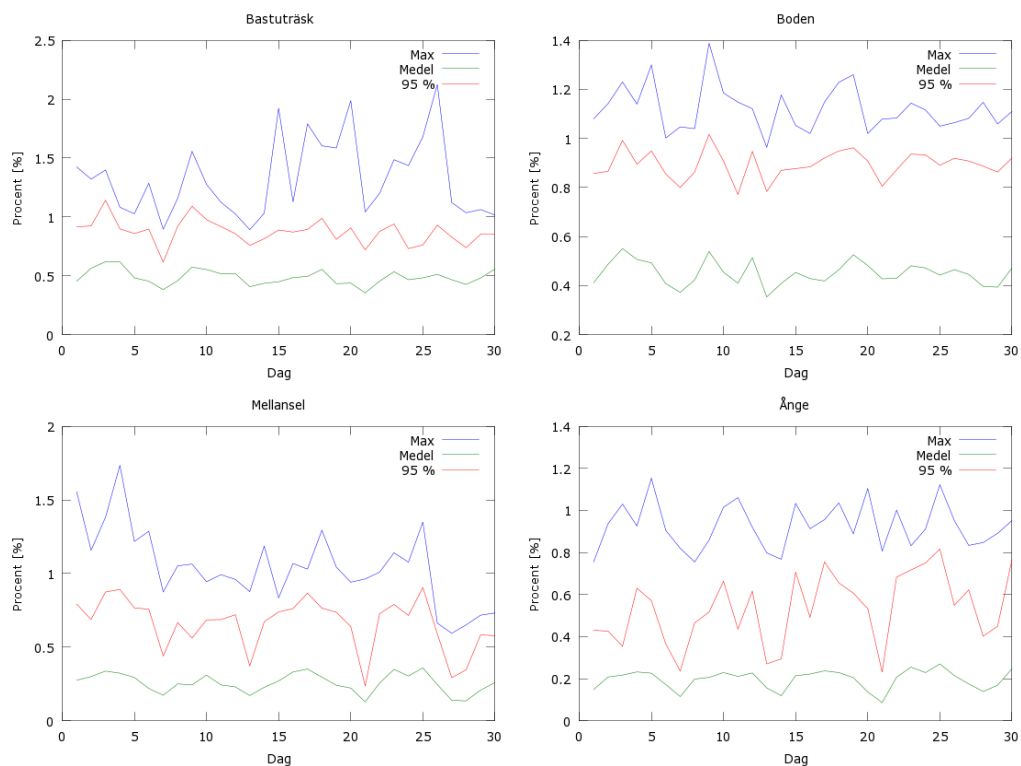
4.3.3 Banmatningar

För banmatningar fanns data tillgänglig med en upplösning på 6 sekunder varav ekvation (3)-(5) fick justeras på samma sätt som beskrivs i slutet på sektion 4.2.1. Figur 18 visar sexsekunders och tiominuters VSV under ett dygn i Bastuträsk. VSV-värden anges i procent av nominell spänning.



Figur 18 - VSV-värden för banmatningar i Bastuträsk

Från figurerna ovan framgår det att banmatningarnas karaktär i detta fall är lik den som återfinns i låg- och mellanspänningsnätet. Brusnivån ligger närmare den i lågspänningsnätet än den i mellanspänningsnätet och för tiominuters VSV uppvisar banmatningarna här högre maxvärden än både låg- och mellanspänningsnätet. Detta beror till viss del på att det finns hälften så många värden att tillgå vid beräkning av tiominuters VSV, då mätningarna på banmatningar har 6 sekunders upplösning, varvid de enskilda topparnas inflytande på tiominutersvärdet ökar. Figur 19 nedan visar max, medel och 95-percentilen för tiominuters VSV för banmatningar på 4 olika platser under en månads tid.



Figur 19 - Max, medel och 95 % - Banmatningar

Viss skillnad kan ses på resultaten från de olika platser som data har inkommit för på men generellt så uppvisar bakgrundsmätningarna på olika spänningsnivåer likartade resultat: positiva/negativa toppar överlagda på brus som varierar något i amplitud för olika platser.

4.4 Förväntade variationer i spänning

För att beräkna den relativa spänningsförändringen till följd av den aktiva och reaktiva effekt som tillkommer med distribuerad generation används följande förenklade samband, som i praktiken gäller på distributionsnivå [8], [9]:

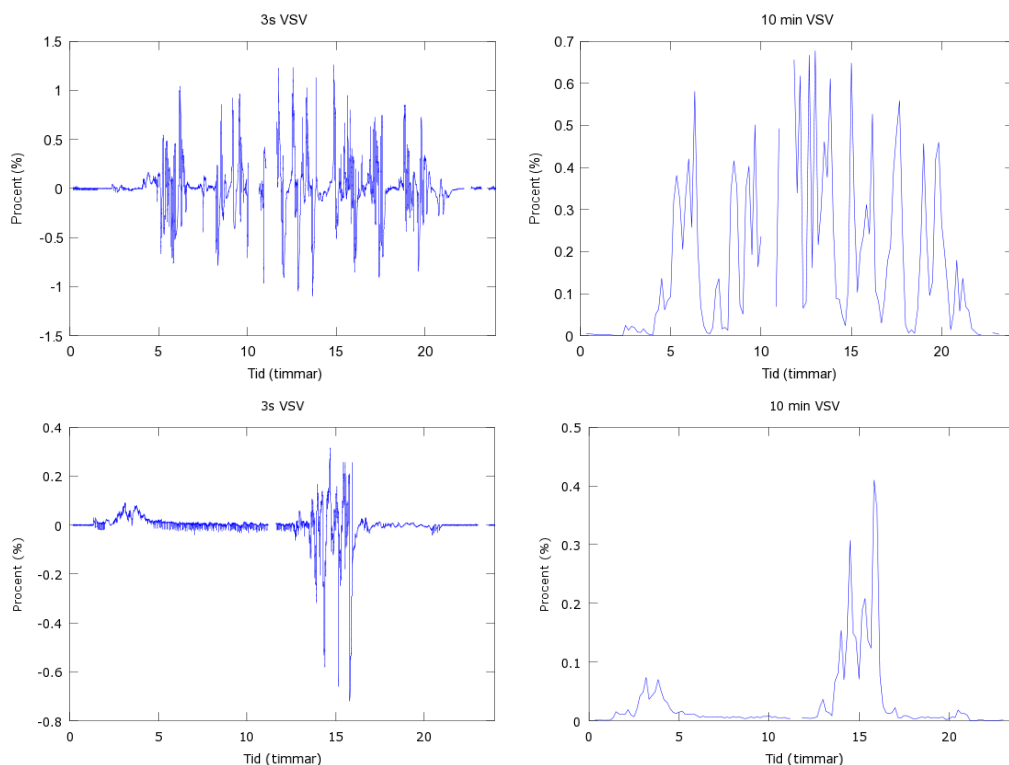
	$\frac{\Delta U}{U} \approx \frac{RP + XQ}{U^2}$	(6)
--	--	-----

Där U är det nominella värdet på spänningen, R och X resistansen och reaktansen sedda från generatorterminalen och P och Q den aktiva och reaktiva effekt som tillförs. Den beräknade spänningsförändringen läggs sedan på den befintliga spänningen och detta används för att räkna ut tresekunders och tiominuters VSV. Detta kommer att göras på två olika sätt: både genom att variationerna läggs ihop med den nominella spänningen, för att studera enbart de variationer som tillkommer från distribuerad generering, men också genom att i några fall lägga på de beräknade variationerna på den uppmätta spänningen, detta för att visualisera hur störnivåerna påverkas.

4.4.1 Solkraft, mindre anläggning

I det första fallet studeras en mindre solkraftanläggning med en installerad effekt på ca 6 kW² och nätet modelleras enligt avsnitt 4.1.1. Beräkningar har utförts både med den angivna referensimpedansen samt med lågspänningskablar och luftledningar med olika längd för att approximera ett enkelt distributionsnät. Data som har använts har skalats om för att motsvara rätt effekt. Figur 20 visar tresekunders och tiominuters VSV för solkraftanläggningen i Piteå ansluten mot referensimpedansen. De övre två bilderna visar en dag med växlande molnighet (samma som i Figur 8) och de nedre två visar en mestadels solig dag, samma som i Figur 7. Avbrotten i graferna beror på att mätinstrumentet inte mätt under vissa perioder. Detta har dock en försumbar inverkan på resultatet.

²6 kW för att representera typisk installerad effekt från en fastighet, som en villa.

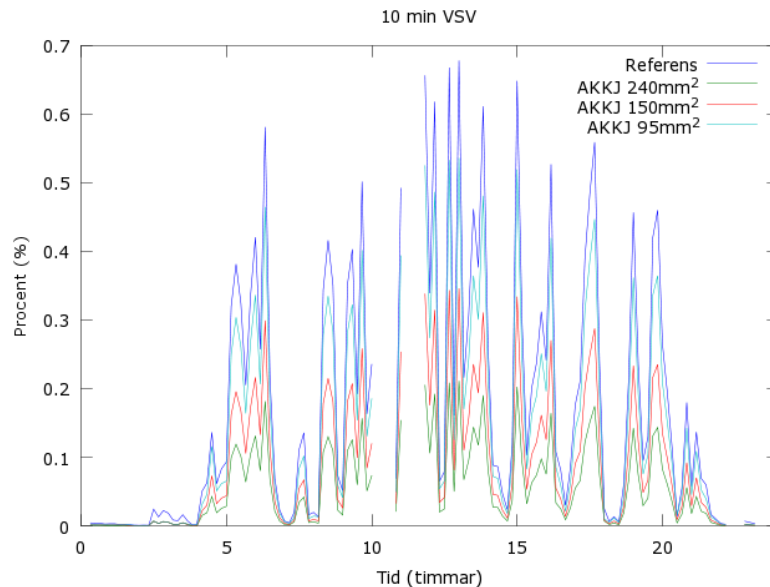


Figur 20 - VSV-värden för två solkraftanläggningar. Observera skillnaden i vertikal skala.

Om man jämför dagen med växlande molnighet (de övre två bilderna) med mätningar på låg- och mellanspänningsnätet, samt banmatningar, så uppvisar tresekunders VSV här i princip inget brus alls, samtidigt som antalet toppar är större. Detta syns även på tiominuters VSV som skiljer sig i karaktär från bakgrundsmätningarna. Den dag som var mestadels solig, vilken visas i de nedre två bilderna, uppvisar däremot en annan karaktär. Nämnvärda nivåer på tresekunders och tiominuters VSV uppvisas enbart under den period på dagen då det är växlande molnighet.

Beräkningarna gjordes också för lågspänningskablar av olika längd och typ³. Figur 21 visar en jämförelse mellan markkablar av olika typ och referensimpedansen, för en kabellängd på 1 km under en dag med växlande molnighet.

³ Markkablar som användes: AKKJ 3x240, 3x150 och 3x95mm². Specifikationer finns i appendix. Urvalet har skett utifrån vilka som är vanliga i det svenska lågspänningsnätet [13], [27], samt utifrån SS 424 14 24 för att kontrollera att kablarna är rimligt dimensionerade [10].

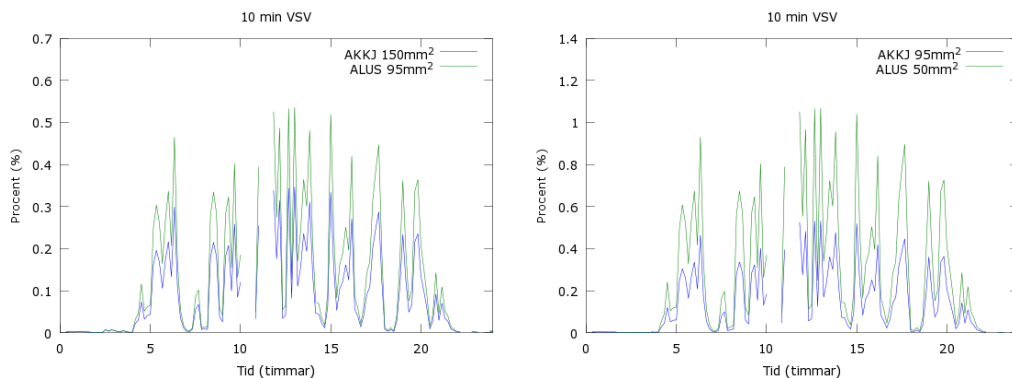


Figur 21 - Tiominuters VSV för markkablar

Det framgår från figuren att ett enkelt distributionsnät med kabellängder som understiger 1 km uppvisar lägre störnivåer jämfört med referensimpedansen för de kablar som undersökts i den här studien.

Det undersöktes också huruvida störnivåerna skiljer sig ifall luftledningar⁴ används istället för markkabel. Man ska då hålla i åtanke att det vid överföring av samma effekt används luftledningar med lägre ledararea än ifall markkabel istället används. Detta möjliggörs av luftens kylande och isolerande egenskaper. En luftledning med en ledararea på 50 mm² klarar ungefär samma ström som en 95 mm² markkabel och en 95 mm² luftledning klarar ungefär samma ström som en 150 mm² markkabel, förutsatt att de är gjorda av samma material [10]. Figur 22 visar en jämförelse mellan markkablar och luftledningar med samma belastningsförmåga.

⁴ Luftledningar som användes: ALUS 4X95 och 4X50mm². Specifikationer finns i appendix. Urvalet har skett utifrån vilka som är vanliga i det svenska lågspänningsnätet [13], [27], samt utifrån SS 424 14 24 för att kontrollera att kablarna är rimligt dimensionerade [10].



Figur 22 - Tiominuters VSV för markkablar (AKKJ) och luftledningar (ALUS) med samma belastningsförmåga

Från figuren framgår det att störnivåerna ökar ifall luftledning används istället för markkabel. En sammanställning av max, medel och 95-percentilen på tiominuters VSV för de fall som undersökts visas i Tabell 9. För 240 mm² AKKJ finns ingen motsvarande luftledning att jämföra med, men då det är en vanlig kabel i det svenska distributionsnätet redovisas resultatet ändå.

Tabell 9 - Max, medel och 95 % av 10 min VSV för olika lednings- och kabellängder

Impedans	Max 10 min VSV (%)	Medel 10 min VSV (%)	95 %
Referens	0,677	0,168	0,580
AKKJ 240mm² 500 m	0,105	0,026	0,090
AKKJ 240mm² 1km	0,211	0,052	0,181
AKKJ 150mm² 500 m	0,173	0,043	0,149
AKKJ 150mm² 1km	0,346	0,086	0,299
AKKJ 95mm² 500 m	0,268	0,066	0,232
AKKJ 95mm² 1 km	0,535	0,133	0,465
ALUS 95 mm² 500 m	0,266	0,066	0,232
ALUS 95 mm² 1 km	0,532	0,132	0,465
ALUS 50 mm² 500 m	0,533	0,132	0,465
ALUS 50 mm² 1 km	1,067	0,265	0,930

I endast ett fall överstiger störnivåerna de som beräknades mot referensimpedansen, detta då 1 km ALUS 50 mm² används. I praktiken bör detta dock ses som ett väldigt ovanligt fall. Som en jämförelse uppvisar de befintliga störnivåerna i lågspänningsnätet ett maxvärde på 1,24 %, ett medelvärde på 0,36 % och en 95-percentil på 0,79 %. För att komma upp i impedansvärden som motsvarar referensimpedansen krävs långa kablar eller

luftledningar. Appendix A ger en översikt över vilka kabellängder som motsvarar referensimpedansen.

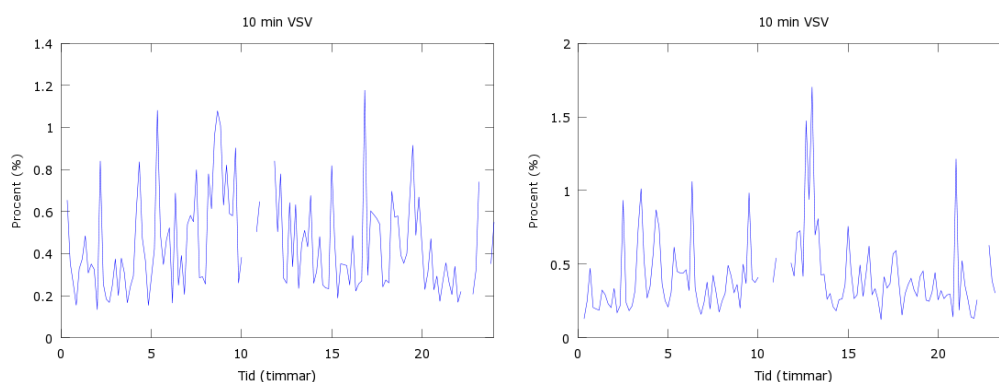
Beräkningar gjordes också på transformatorns impedans och för en typisk 400 kVA 10/0.4 kV transformator med $U_k = 5\%$ beräknades Z till

$$Z \approx 0.004 + j0.02 \Omega$$

vilket är försumbart jämfört med referensimpedansen, samt de kabelimpedanser som undersökts.

Det kontrollerades också huruvida tiominuters rms av spänningen låg på rimliga nivåer och den spänningshöjning som beräknades vid anslutning mot referensimpedansen var 1,55 % av nominell spänning vid maximal produktion, vilket ligger under de gränser som används i Sverige (2,5 % spänningsökning för en produktionsanläggning enligt AMP och totalt sett 10 % avvikelse från nominell spänning enligt EIFS2013:1).

Det undersöktes också hur störnivåerna påverkades ifall de beräknade spänningsvariationerna från solkraft lades ihop med mätningarna från lågspänningsnätet. Figur 23 visar tiominuters VSV då en solcellsanläggning var ansluten mot referensimpedansen i två olika fall. Mätningarna på lågspänningsnätet som användes är samma som i sektion 4.3.1, men i det ena fallet har de förskjutits något i tid.



Figur 23 - Tiominuters VSV för solkraft pålagd på befintliga nivåer, två fall

I det ena fallet har störnivåerna ökat i mitten av dagen, där de tidigare var låga. Detta är till följd av de spänningsvariationer som associeras med solkraften. Tidigt och sent på dagen ligger nivåerna kvar på samma nivå som innan. Spänningsvariationerna från lågspänningsnätet och solkraft sammanfaller på så sätt att mängden toppar ökade, speciellt i mitten av dagen, utan att den maximala störnivån ökade. I det andra fallet, till höger i figuren, sammanfaller spänningsvariationerna på ett annat sätt där följderna blev en ökning av maxvärdet på störnivåerna mitt på dagen, även om antalet toppar inte ökade lika mycket. Tabell 10 sammanfattar resultatet.

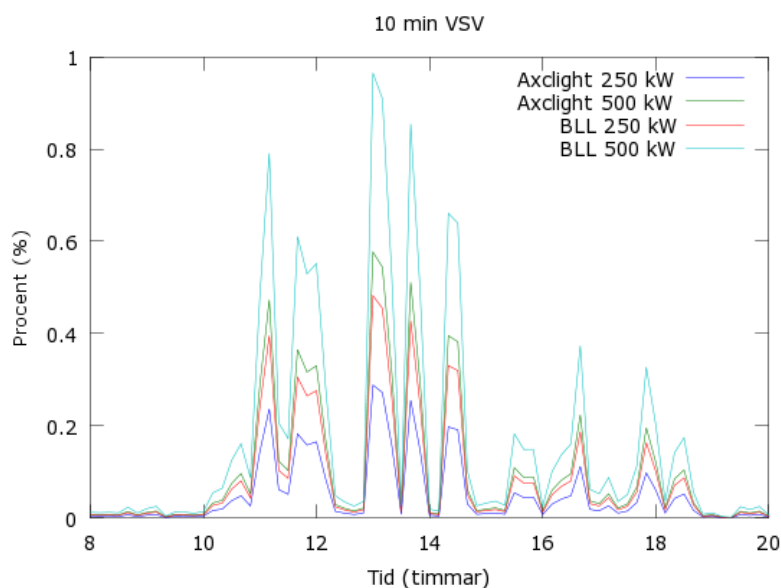
Tabell 10 - Max, Medel och 95 % av 10 min VSV

Fall	Max 10min VSV (%)	Medel 10min VSV (%)	95 %
1	1,177	0,438	0,903
2	1,703	0,406	0,934

Från tabellen framgår det att medelvärdet och 95-percentilen i stort sett är lika, medans maxvärdet är det som påverkas mest.

4.4.2 Solkraft, större anläggning

I det andra fallet studerades olika stora solkraftanläggningar som antogs vara anslutna mot mellanspänningsnätet (10 kV) 10 km från överliggande transformator. Data som användes kom från 100 kW-anläggningen i Glava och effekten skalades upp för att studera hur stor park som krävs för att orsaka störnivåer i samma storleksordning som de befintliga på mellanspänningsnätet. Figur 24 visar tiominuters VSV för olika stora anläggningar. Kablar som användes var Axclight TT 95 mm² (markkabel) och BLL 62 mm² (luftledning)⁵.



Figur 24 - Tiominuters VSV för olika stora anläggningar med markkabel och luftledning

Från figuren framgår det att det för en solkraftpark på 500 kW kan uppstå störnivåer i samma storleksordning som de befintliga i mellanspänningsnätet, ifall luftledning används. Detta utan att uppnå spänningshöjningar som är oacceptabla utifrån angivna gränser. Ifall istället markkabel används är störnivåerna lägre. I dagsläget är den största solkraftanläggning som finns i

⁵ Se appendix för specifikationer. Mellanspänningskablar har valts ut utifrån vilka som är vanligast i det svenska mellanspänningsnätet och dimensioneringen har skett utifrån SS 424 14 16 och EN 50182 [28], [29].

Sverige Glava Energy Center, med en total effekt på omkring 210 kW. I februari 2014 förväntas dock Sveriges första MW-park vara färdigbyggd längs E18 utanför Västerås [11].

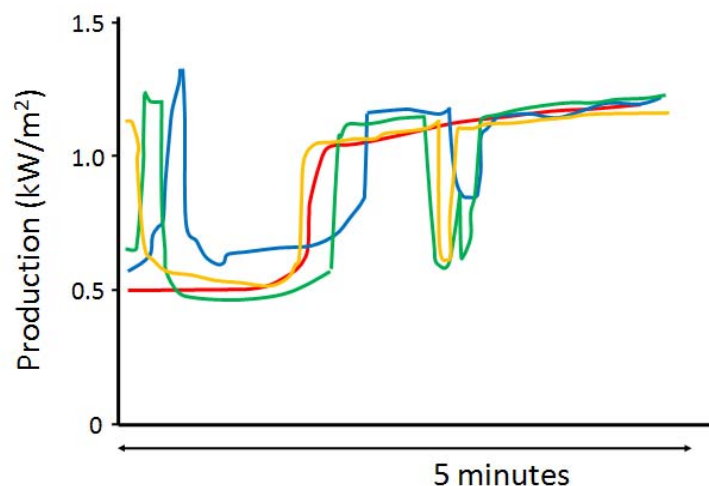
Tabell 11 visar max, medel och 95-percentilen mellan 08.00 och 20.00 för olika stora anläggningar med markkabel och luftledning.

Tabell 11 - Max, medel och 95 % av 10 min VSV

Fall	Max 10 min VSV (%)	Medel 10 min VSV (%)	95 %
Axclight 250 kW	0,288	0,027	0,165
Axclight 500 kW	0,577	0,054	0,330
BLL 250 kW	0,482	0,045	0,276
BLL 500 kW	0,964	0,089	0,551

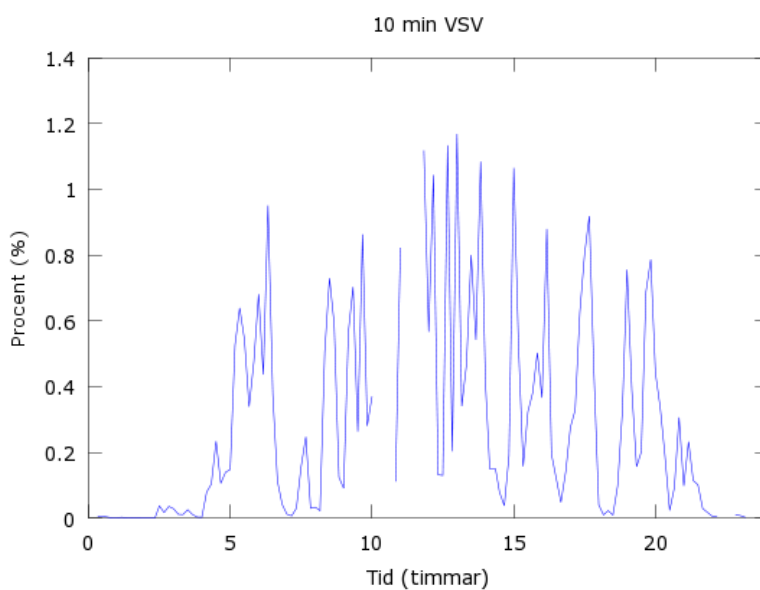
4.4.3 Solkraft, sammanlagringseffekter

Sammanlagringseffekter för solkraft modellerades enligt Figur 4 i avsnitt 4.1.3. I lågspänningsnätet som modellerades antogs det ligga 15 bostäder, med ett avstånd på 100 m mellan varje [12], [13]. De kablar som användes vid beräkningarna var samma som i avsnitt 4.4.1. Vid beräkning av sammanlagringseffekter antogs det att de bostäder som hade solkraft installerad var anslutna i de noder som låg längst bort från transformatorn. Detta för att studera ett värsta fall. Samtliga paneler använder samma data för producerad effekt (återigen nerskalad till 6 kW), men för varje anläggning försköts mätvärdena för att ta hänsyn till att de sitter på olika platser. I [9] och [14] diskuteras variation i producerad effekt mellan olika hus med solkraft under passage av ett moln. Figuren från [9] reproduceras nedan.



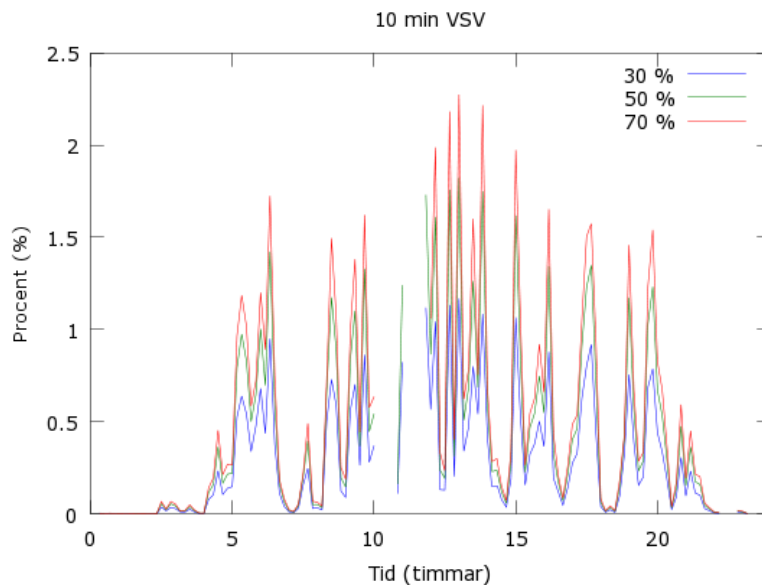
Figur 25. Uppmätt produktion från solkraft vid fyra olika hus i samma gata under passage av ett moln.

Utifrån figuren beslutades att använda en förskjutning på 10 sekunder mellan produktionsenheterna. Figur 26 visar tiominuters VSV för noden längst bort från transformatorn, i ett fall då 30 % av alla bostäder har installerad solkraft. Den kabel som användes i det här fallet var AKKJ 240 mm².



Figur 26 - Tiominuters VSV för 30 % andel solkraft med AKKJ 240mm²

Även ifall denna kabel, som är den mest tilltagna i denna studie, används är störnivåerna i detta fall i samma storleksordning som de befintliga i lågspänningsnätet. Figur 27 visar tiominuters VSV för olika andelar solkraft under ett dygn med växlande molnighet och Tabell 12 visar max/medel och 95-percentilen av tiominuters VSV för olika andel solkraft.



Figur 27 - Tiominuters VSV för olika andel solkraft med AKKJ 240mm²

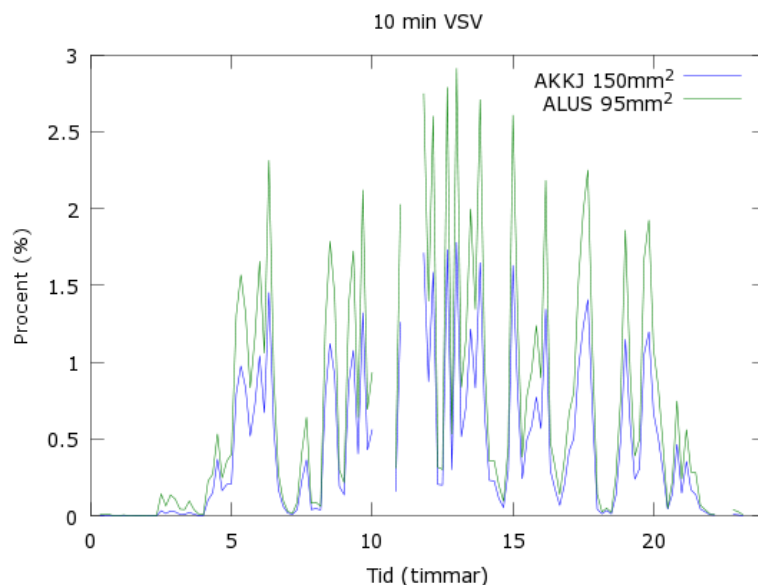
Tabell 12 - Max, medel och 95 % av 10 min VSV

Andel	Max 10min VSV (%)	Medel 10min VSV (%)	95 %
30 %	1,168	0,279	0,951
50 %	1,823	0,424	1,423
70 %	2,274	0,506	1,652

Resultaten visar att störnivån nästan fördubblas om andelen installerad solkraft ökar från 30 till 70 %.

Det undersöktes också huruvida en ökad mängd solkraft gav upphov till orimliga spänningsnivåer. Fallet då 70 % av bostäderna hade installerad solkraft gav en spänningshöjning på 5,15 %. Om detta är acceptabelt beror på de lokala förhållandena. Om spänningen innan anslutningen var mindre än 104,85% kommer nätet att klara sig enligt EIFS2013:1. AMP ger bara riktlinjer för anslutning av individuella anläggningar. Utifrån detta kan det konstateras att störnivåerna i vissa fall kan överskrida de befintliga i lågspänningsnätet utan att tiominuters rms på spänningen hamnar utanför acceptabla nivåer i befintliga standarder.

En jämförelse gjordes även mellan markkabel och luftledning med samma belastningsförmåga i ett fall med 30 % andel installerad solkraft. Kablar som jämfördes var 150 mm² AKKJ och 95 mm² ALUS och resultatet visas i Figur 28.



Figur 28 - Tiominuters VSV för markkabel/luftledning vid 30 % andel solkraft

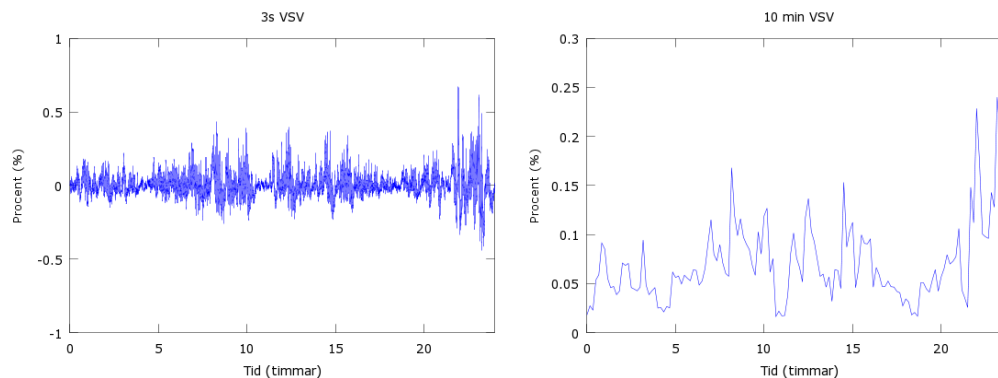
Båda kablarna uppvisar störnivåer som är större än de befintliga i lågspänningsnätet vid 30 % andel installerad solkraft och ifall luftledning används istället för markkabel ökar störnivåerna nämnvärt (då det behövs mindre yta för att överföra samma mängd effekt med en luftledning, vilket leder till större resistans). I detta fall var den maximala spänningshöjningen på tiominuters rms 6,68 %, vilket kan ge upphov till oacceptabla spänningar enligt EIFS2013:1, beroende på de lokala förhållandena.

4.4.4 Vindkraft, enskilt kraftverk

I fall 4 studerades ett 600 kW vindkraftverk anslutet en bit ut på mellanspänningsnätet⁶ (10 kV). Figur 29 visar tresekunders och tiominuters VSV då vindkraftverket var anslutet med en kabel⁷ 10 km från HV/MV-transformatorn.

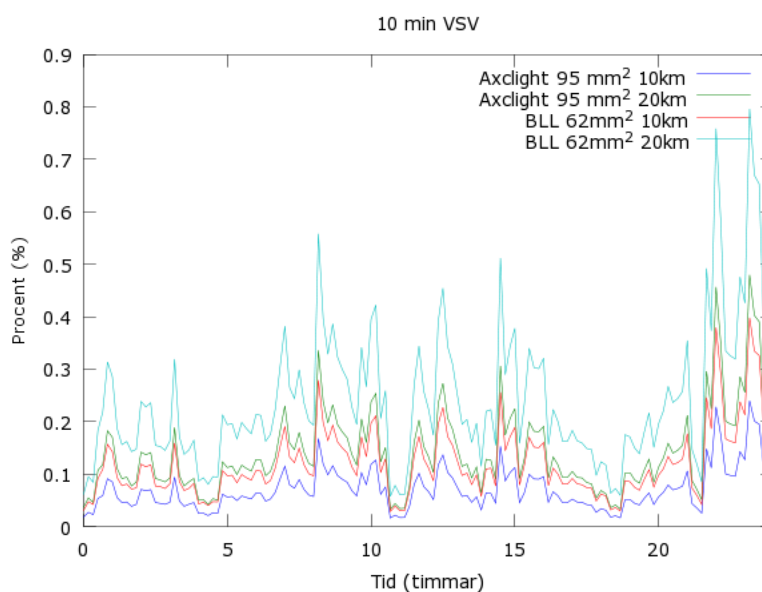
⁶Anslutning av enskilda vindkraftverk sker vanligtvis i mellanspänningsnätet (10-20 kV).

⁷Mellanspänningskabel som användes i detta fall var Axclight TT 95 mm². Se appendix för specifikationer.



Figur 29 - VSV-värden för enskilt vindkraftverk

Variationerna har i detta fall större likheter med de som återfinns på lågspänningsnätet och banmatningar än med de orsakade av solkraft. Figur 30 visar tiominuters VSV för markkabel och luftledning av olika längd och Tabell 13 visar max, medel samt 95-percentilen på störnivåerna för olika kabeltyper och längder⁸. Axclight är markkabel och BLL luftledning.



Figur 30 - Tiominuters VSV för olika markkablar /luftledningar

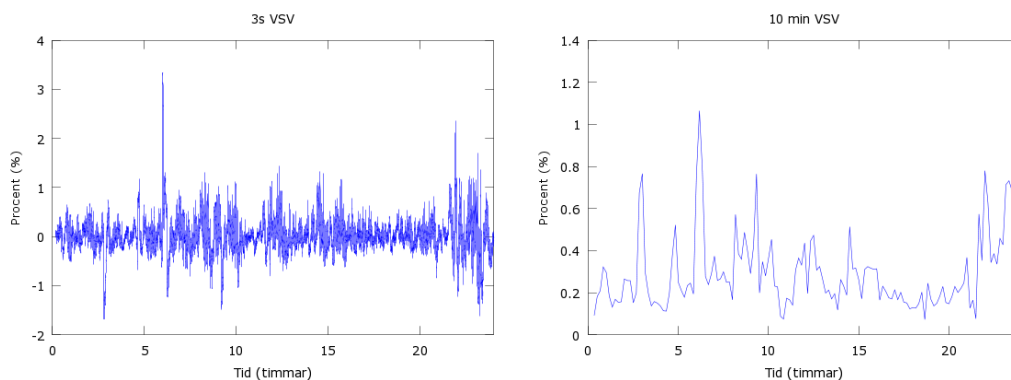
⁸ Markkabel/luftledningar som användes var Axclight TT 95 och 150 mm² och BLL FeAl 62 och 99 mm². Se appendix för specifikationer. Kablarna har valts ut utifrån vilka som är vanligast i det svenska mellanspänningsnätet och dimensioneringen har kontrollerats utifrån SS 424 14 16 och EN 50182 [28], [29].

Tabell 13 - Störnivåer för olika kablar

Kabellängd	Max 10min VSV (%)	Medel 10min VSV (%)	95 %
Axclight 150 mm ² 10 km	0,155	0,047	0,096
Axclight 150 mm ² 20 km	0,310	0,093	0,191
Axclight 95 mm ² 10 km	0,239	0,073	0,148
Axclight 95 mm ² 20 km	0,479	0,398	0,296
BLL 62 mm ² 10 km	0,398	0,123	0,246
BLL 62 mm ² 20 km	0,796	0,246	0,492
BLL 99 mm ² 10 km	0,250	0,077	0,154
BLL 99 mm ² 20 km	0,500	0,154	0,309

I samtliga fall ligger störnivåerna under de befintliga i mellanspänningsnätet som presenterades i avsnitt 4.3.2. Precis som för lågspänningsnätet noterades att störnivåerna är högre ifall luftledning används. På samma sätt som i tidigare avsnitt undersöktes även tiominuters rms-värdet på spänningen. Fallet med 20 km luftledning av typen BLL 62 mm² gav en maximal ökning av tiominuters rms på 2,50 % av nominell spänning, vilket ligger på gränsen för vad som är acceptabelt enligt AMP.

De variationer som uppkommit från vindkraftverket lades också på de befintliga mätningarna på mellanspänningsnätet. Tresekunder och tiominuters VSV för detta visas i Figur 31 och Tabell 14, i fallet då 20 km BLL 62 mm² luftledning användes.



Figur 31 - VSV-värden från vindkraft pålagda på befintliga mätningar

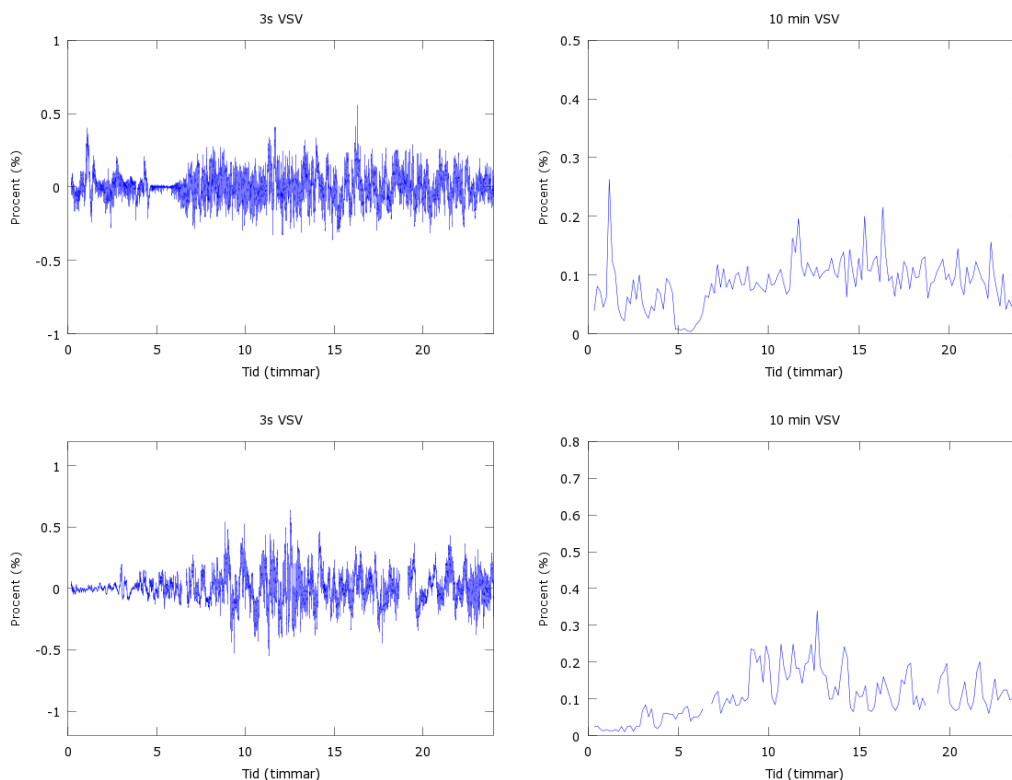
Tabell 14 - Max, medel och 95-percentilen av 10 min VSV

	Max 10min VSV (%)	Medel 10min VSV (%)	95 %
Utan vindkraft	1,017	0,116	0,391
Med vindkraft	1,065	0,289	0,458

Jämfört med de befintliga nivåerna på mellanspänningsnätet, från avsnitt 4.3.2, uppvisar tresekunders VSV här en märkbar ökning i det bakomliggande bruset. Tiominutersvärdena ökade också något i nivå.

4.4.5 Vindkraftparker

I det femte fallet studerades ett antal vindkraftparker anslutna mot mellanspänningsnätet. För att jämföra karaktärstiken mellan vindkraftparker av olika storlek skalades effekten först ner så att vindkraftparkernas effekt var i samma storleksordning som vindkraftverket i föregående avsnitt. Utifrån detta räknades tresekunders och tiominuters VSV ut och resultatet visas i Figur 32 och Tabell 15 för en 20 MW vindkraftpark vid Saxberget i Ludvika samt en 12 MW vindkraftpark i Skellefteå, båda nerskalade till 600 kW. I detta fall var vindkraftparkerna anslutna 10 km från överliggande transformator och samma kabel som i fallet med det enskilda vindkraftverket användes.



Figur 32 - VSV-värden för två vindkraftparker, nerskalade för jämförelse

Tabell 15 - Max, medel och 95-percentilen av 10 min VSV

	Max 10min VSV (%)	Medel 10min VSV (%)	95 %
Saxberget	0,263	0,087	0,145
Skellefteå	0,339	0,108	0,233

Karaktären på variationerna är i båda fallen lik den för det enskilda kraftverket i föregående avsnitt och de steg i effekten som kunde ses i Figur 13 i avsnitt 4.2.2 hade inte någon nämnvärd inverkan på störnivåerna. För vindkraftparken i Skellefteå är det maximala tiominutersvärdet större än i de andra fallen, men generellt ligger värdena på liknande nivåer. Den period då värdena är nära 0 är då parken inte producerar.

För att uppskatta de maximala förväntade störnivåerna från en vindkraftpark räknades först den maximala kapaciteten ut. Detta redovisas i Appendix B. Störnivåerna räknades sedan ut utifrån detta och resultatet visas i Tabell 16 nedan för olika kablar.

Tabell 16 - Max, medel och 95-percentilen av 10 min VSV

	Max 10min VSV (%)	Medel 10min VSV (%)	95 %
BLL 62mm²	0,664	0,117	0,342
BLL 99mm²	0,626	0,110	0,322
Axclight 95mm²	0,621	0,110	0,324
Axclight 150mm²	0,618	0,110	0,325

Utifrån detta borde inte anslutning av vindkraftparker leda till några större ökningar i tiominuters VSV. Däremot kan det leda till en ökning av nivån på bruset i tresekunders VSV, som konstaterats tidigare i detta kapitel.

4.5 Lindningskopplare

En fråga som ställts både från referensgruppen och i tidigare rapporter [15], [16] är huruvida en ökning av långsamma spänningsvariationer orsakade av sol- och vindkraft kan leda till att lindningskopplare kopplar oftare, vilket kan leda till att de slits ut i förtid. I [16] konstateras det till exempel att vindkraft ansluten mot nät med en låg X/R-ratio kan ge en förhöjd frekvens för lindningskopplare. Ökat slitage av lindningskopplare ligger egentligen utanför denna studie, men varje koppling av lindningskopplare ger en snabb spänningsändring på mellan 1 och 2 % (typiskt värde 1,67 %). En ökning av kopplingsfrekvensen ger därmed en ökning av antalet snabba spänningsvariationer och därmed också VSV.

Avståndet mellan sol-/vindkraftanläggningar och transformatorn påverkar inte frekvensen av kopplingen; den bestäms bara av spänningsvariationer på mellanspänningssidan av transformatorn. Storleken på produktionsenheten begränsas dock av belastningsförmågan eller spänningsfallet över kabeln. Ett ökat avstånd till transformatorn leder alltså till en mindre produktionsenhet, vilket i sin tur begränsar frekvensen av kopplingen.

Värsta fallet, med största möjliga produktionsanläggning, kan inträffa för en anläggning som finns i närheten av transformatorn. Installerad effekt kan då överstiga märkeffekt av transformatorn. Även många produktionsenheter fördelade över distributionsnät kan leda till ett ökat antal kopplingar. För att kvantifiera detta behövs det data om långsamma variationer i produktion och förbrukning över en längre period. Data var inte tillgänglig i detta projekt i tillräckligt mängd för att kunna utföra några utförliga studier, varav resultatet nedan bör ses som en uppskattning.

En enkel modell togs fram för att beräkna antalet omkopplingar per dygn. Den baseras på en lindningsomkopplare med ett dödband på 1 % och spänningssteg på 1,67 %. Tidsfördröjningen sattes till 60 sekunder och antalet omkopplingar beräknades sedan för mätningar på spänning i befintliga nät. För sol- och vindkraft antogs ett fall med ett 10 kV distributionsnät och en 15 MVA transformator⁹, där transformatorns impedans representerar det överliggande nätet. Data som använts kommer från vindkraftparken i Skellefteå och solkraftparken i Glava. Det studerades även ett fall med en lägre X/R-ratio men i övrigt samma parametrar, detta för att uppskatta inverkan av X/R-ration på antalet kopplingar. Resultatet visas i Tabell 17 nedan.

Tabell 17 - Antal omkopplingar / dygn i olika fall

Plats	Antal omkopplingar / dygn
Mellanspänningsnät	6
Banmatningar	5
Vindkraft 12 MW	0
X / R = 14	
Vindkraft 12 MW	6
X / R = 5	
Solkraft 1 MW	0
X / R = 14	
Solkraft 1 MW	0
X / R = 5	

⁹Data för transformatorparametrar från [30].

Resultaten överrensstämmer med [16]. Vindkraft ansluten mot nät med en hög X/R-ratio verkar inte orsaka en ökning i antalet kopplingar per dygn, men om X/R-ration istället är låg kan variationer i produktion leda till fler kopplingar. För solkraft kunde ingen risk för ett ökat antal kopplingar per dygn ses för de fall som studerats här.

Det ska återigen förtydligas att de snabba spänningsvariationer som studeras i detta projekt inte orsakar en ökning av antalet omkopplingar. Däremot kan ett ökat antal omkopplingar ge en ökning av de snabba spänningsvariationerna.

4.6 Konsekvenser av höga VSV-nivåer

Studien visar att det, under vissa förutsättningar, kan förekomma högre nivåer av VSV än det som är vanligt i det nuvarande läget. En fråga som direkt kommer upp är vad konsekvenserna av detta är för apparaterna anslutna till nätet.

Det har under flera år pratats om skadade apparater på grund av svaga nät. Det har föreslagits att det kunde finnas ett samband mellan nätets källimpedans (nätstyrkan) och livslängden på apparater, men något sådant samband har inte kunnat bevisas. Indirekta samband är mer sannolika förklaringar, som att det finns större variationer i (långsamma och snabba) spänningsvariationer i svaga nät och att övertonsnivåer och spänningsobalanser också är högre i dessa nät. Utöver det består svaga nät oftast av luftledning som är mer utsatta för atmosfäriska överspänningar.

Men den frågan som ska ställas här är: om alla andra störnivåer är lika, kommer högre nivåer av VSV då att minska apparaternas livslängd?

I [17] och [18] ges ett antal exempel på konsekvenser av snabba spänningsvariationer (utöver ljusflimmer):

- ✓ Kontrollåtgärder för kontrollsystem som verkar på spänningens vinkel.
- ✓ Bromsande eller accelererande moment för motorer.
- ✓ Försämring av elektrisk utrustning där fluktueringen hos matningsspänningen går fram till de elektroniska delarna.
- ✓ Små variationer i hastigheten hos motorer ger små, men ändå oacceptabla variationer i produktionsparametrar. Variationer på färg och diameter nämns specifikt som exempel.

Alla direktanslutna motorer kommer att få ökad mekanisk påverkan på grund av snabba spänningsvariationer. Det är inte tydligt vad som är värre för motorer: kontinuerliga variationer och låg amplitud eller tillfälliga större variationer.

Även vid drivsystem kan det finnas påverkan eftersom spänningsvariationer delvis (eller om man har otur: förstärkt) kan återfinnas på likspänningsled som bestämmer motorns hastighet.

Det som är okänt är hur omriktare vid själva vind- och solkraftanläggningarna påverkas av snabba spänningsvariationer och spänningssteg. I princip kan modern kraftelektronik styras mycket snabbt och anpassas efter, till exempel

spänningen i nätet med en tidsupplösning på millisekunder. Men i praktiken brukar tidskonstanterna av reglerkretsarna vara betydligt långsammare för att förebygga instabilitet.

Konsekvensen av detta kan vara att snabba variationer i spänning ger en överspänning på likspänningsled som i sin tur minskar livslängden hos komponenter. Ytterligare studier skulle behövas för att kunna bedöma vad acceptabla nivåer är för VSV.

Utöver det kan det vara rådligt att informera tillverkare av utrustning om vilka nivåer på VSV som kan förväntas nu och i framtiden.

5 Variationer < 1 s

Den andra halvan av analysdelen behandlar variationer på tidskalan under en sekund. De mätningar som framkommer i denna del av projektet jämförs med den befintliga standarden för flimmer, som beskrivs i avsnitt 2.1.

5.1 Nätmodell

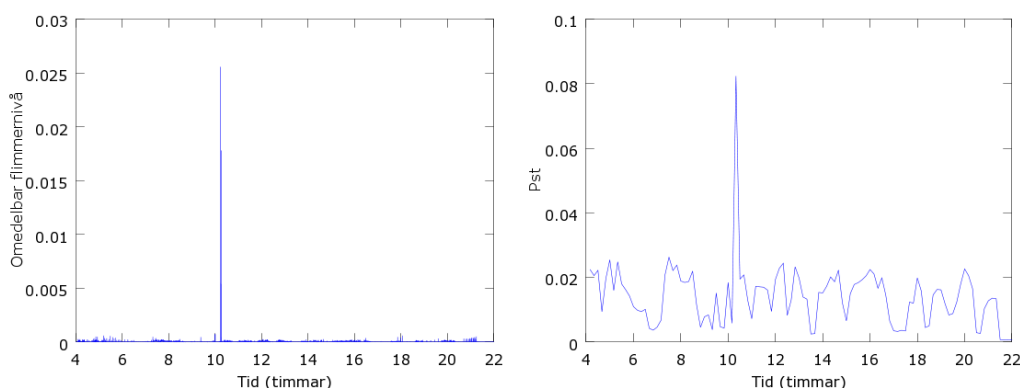
Den referensimpedans som beskrivs i avsnitt 4.1.1 är avsedd för flimmermätningar, varvid den kommer att användas även i denna del av studien för beräkningar av flimmer från enskilda anläggningar på lågspänningsnätet. För beräkningar på vindkraft i mellanspänningsnätet och för sammanlagring av solkraft i lågspänningsnätet kommer samma kabeltyper och metodik som i föregående kapitel användas.

5.2 Resultat

Då en väldokumenterad standard finns för flimmer kommer den att användas för att uppskatta inverkan på flimmernivåerna från sol- och vindkraft. Spänningen beräknas från aktiv och reaktiv effekt på samma sätt som beskrivs i avsnitt 4.4 och används sedan som indata till en algoritm som är baserad på standarden för flimmermätare, som beskrivs i avsnitt 2.1.

5.2.1 Solkraft

Figur 33 nedan visar den omedelbara flimmernivån samt P_{ST} för 20 kW-anläggningen i Piteå, återigen nerskalad till omkring 6 kW och med strömmen injicerad mot referensimpedansen, mellan 04.00 och 22.00 under en dag med varierande molnighet i juni månad.

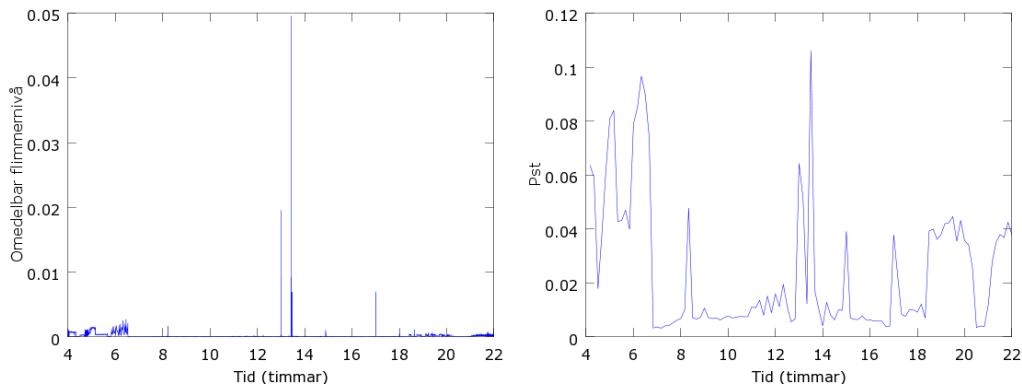


Figur 33 - Omedelbar flimmernivå och P_{ST} för anläggningen i Piteå

Det maximala värdet på P_{LT} som beräknades i detta fall var 0,036.

Figur 34 visar den omedelbara flimmernivån samt P_{ST} för 20 kW-anläggningen på Skellefteå Stadshus (även den nerskalad till 6 kW), mellan 04.00 och

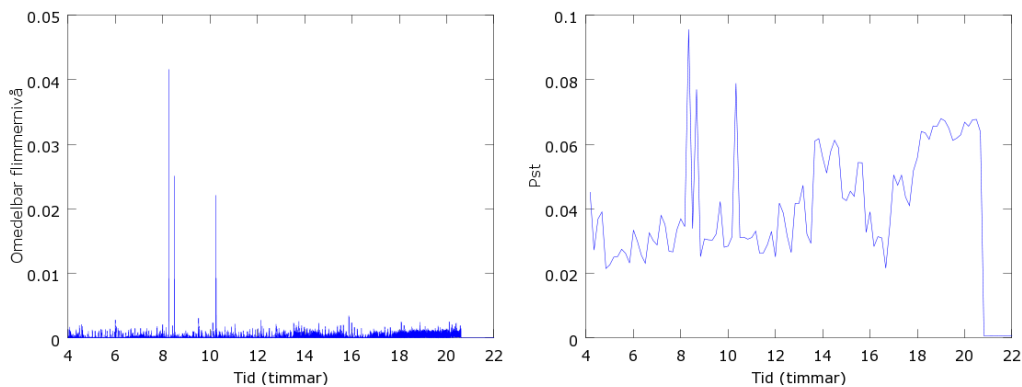
22.00 under en dag med varierande molnighet under juni månad. Anläggningen var även i detta fall ansluten mot referensimpedansen.



Figur 34 - Omedelbar flimmernivå och P_{ST} för anläggningen i Skellefteå

I det här fallet var det maximala värdet på P_{LT} 0,072. Noterbart i figuren är det flimmer som kan ses mellan 04.00 och 06.00 och det ska hållas i åtanke att mätningen är utförd i Piteå, där solen går upp omkring 01.20 i juni, varav det inte är otänkbart med växlande molnighet vid den tidpunkten.

Figur 35 visar den omedelbara flimmernivån samt P_{ST} för anläggningen i Finland, återigen mellan 04.00 och 22.00 under en dag med varierande molnighet i juni. Anläggningen var även i detta fall ansluten mot referensimpedansen.



Figur 35 - Omedelbar flimmernivå och P_{ST} för anläggningen i Finland

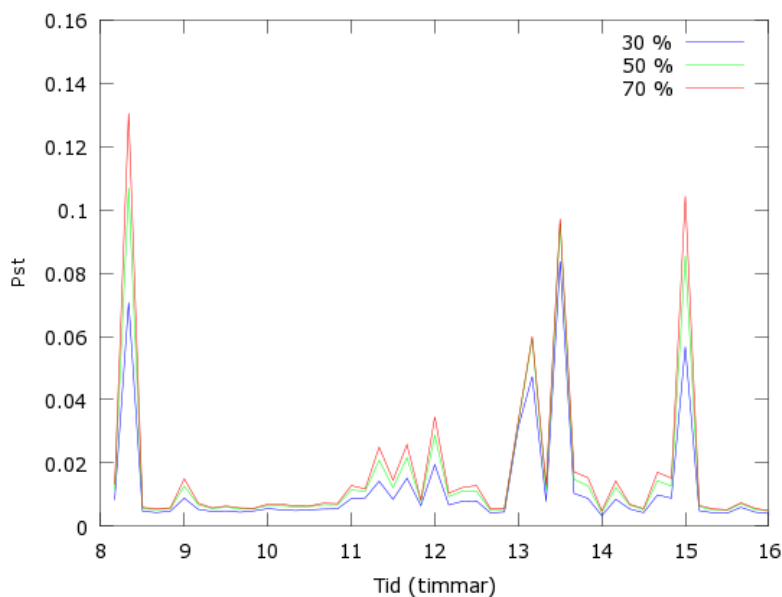
I det här fallet var det maximala värdet på P_{LT} 0,065. Tabell 18 sammanfattar resultaten.

Tabell 18 - P_{ST} (Max, Medel, 95 %) och P_{LT} (Max)

	Max P_{ST}	Medel P_{ST}	95 % P_{ST}	Max P_{LT}
Piteå	0,082	0,013	0,023	0,036
Skellefteå	0,106	0,022	0,073	0,072
Finland	0,096	0,038	0,0067	0,065

I samtliga fall uppvisas flimmernivåer som ligger under gränserna för vad som är tillåtet med avseende på bidraget från en individuell produktionsanläggning ($P_{ST} \leq 0.35$ och $P_{LT} \leq 0.25$ enligt AMP, $P_{LT} < 1$ under 95 % av en vecka enligt EN50160).

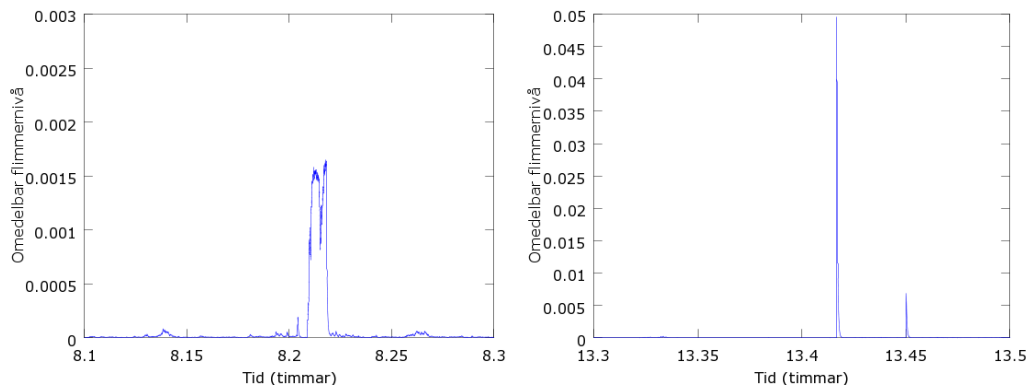
Det studerades även hur flimmernivåerna påverkades av sammanlagring. Figur 36 visar P_{ST} för olika andel installerad solkraft för samma 240 mm² kabel som användes i föregående kapitel, mellan 08.00 och 16.00. Mätdata som användes kommer från anläggningen i Skellefteå (då den uppvisat de största flimmernivåerna).



Figur 36 - P_{ST} för olika andelar installerad solkraft

Från figuren framgår att flimmernivåerna är generellt låga och värdet på P_{ST} ligger i samtliga fall på acceptabla nivåer. I detta fall behöver 50 % av alla hushåll ha solpaneler för att uppnå samma flimmernivåer som visas i den högra grafen i Figur 34. I det fallet var en anläggning ansluten mot referensimpedansen, medans det i detta fall användes kablar med lägre impedans än referensimpedansen. Det maximala värdet på P_{LT} som beräknades vid 70 % installerad solkraft var i detta fall 0,056.

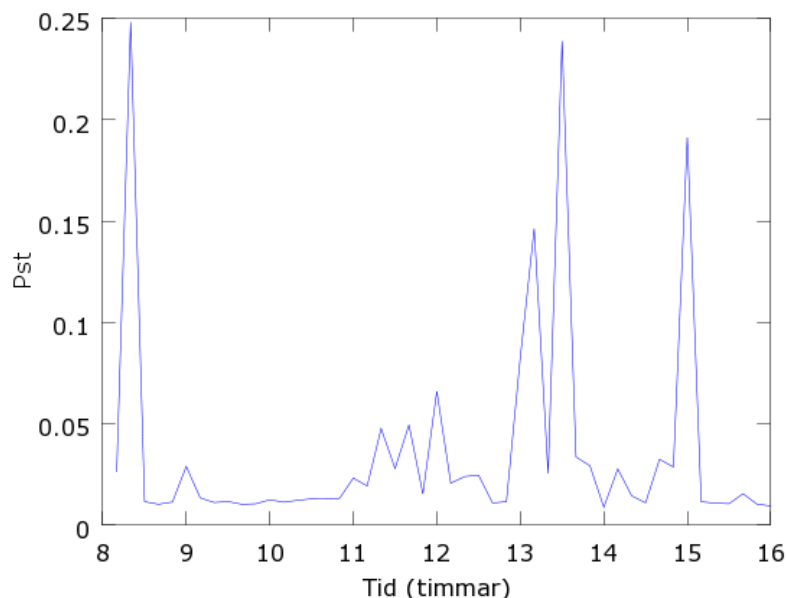
Som en följd av sammanlagringen har också förhållandet mellan toppen omkring 08.30 och topparna mellan 13.00 och 14.00 ändrats. Förklaringen till detta ligger i att karaktären av snabba spänningsfluktuationer är olika. Figur 37 visar den omedelbara flimmernivån med hög upplösning för de aktuella tidpunkterna, då anläggningen var ansluten mot referensimpedansen.



Figur 37 - Omedelbar flimmernivå med högre upplösning. Obs. skillnad i vertikal skala, den horisontella skalan är densamma.

Från figurerna framgår det att det på morgonen finns snabba spänningsfluktuationer över en längre period, medan det på eftermiddagen bara finns sådana över en kort period, som dock resulterar i ett mycket högre värde på den omedelbara flimmernivån. Sammanlagringen blir helt annorlunda för dessa två fall.

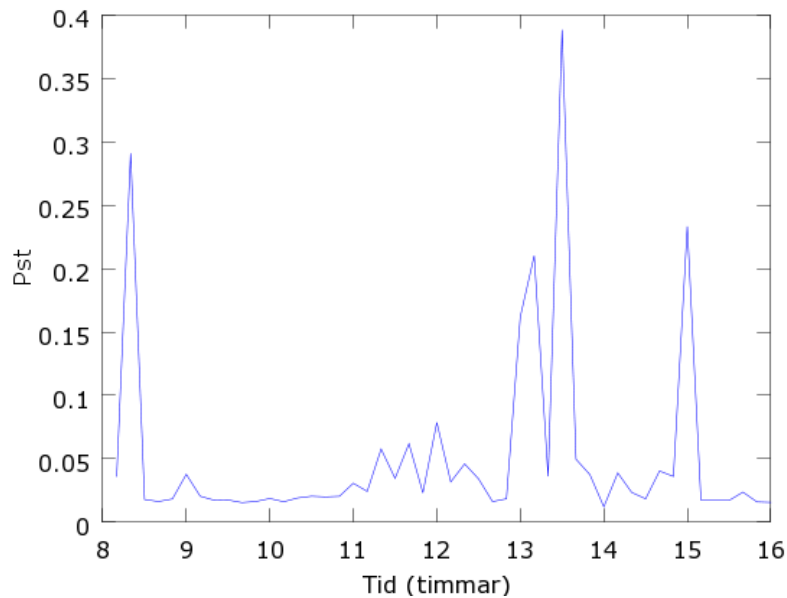
Flimmernivåerna undersöktes också för andra kablar än de som togs med i basfallet. Ifall 95 mm² kabel användes uppnåddes den maximalt tillåtna spänningshöjningen i en nod (som har valts till 10 % i denna studie) då 40 % av alla hus hade installerad solkraft. Figur 38 visar de beräknade värdena för P_{ST} i detta fall.



Figur 38 - P_{ST} vid 40 % installerad solkraft med 95 mm² kabel

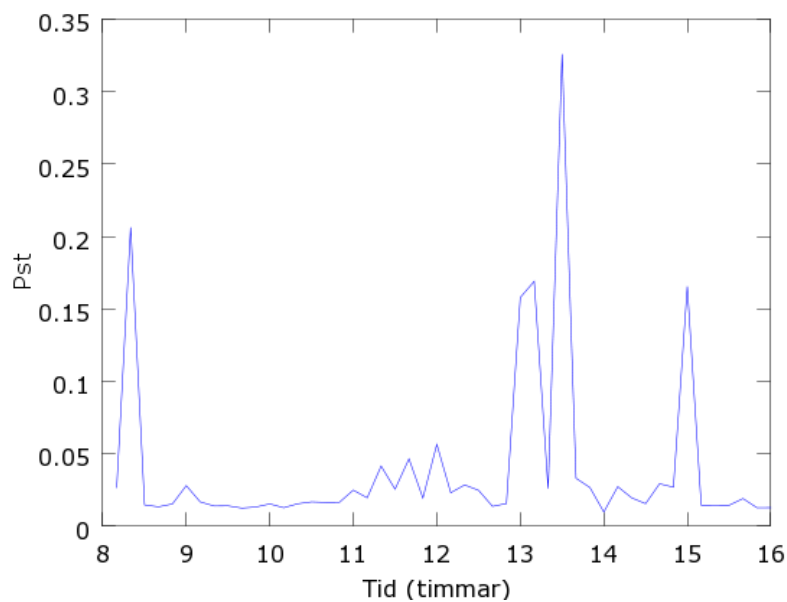
Det maximala värdet på P_{LT} som beräknades i detta fall var 0,124. Samtliga värden ligger under de riktlinjer som ges i AMP. Det är alltså spänningshöjningen som sätter begränsningen snarare än flimmernivåerna i detta fall.

Ifall istället 50 mm² luftledning används kan bara omkring 20 % av alla hus ha installerad solkraft utifrån den maximalt tillåtna spänningshöjningen. Figur 39 visar de beräknade värdena för P_{ST} i detta fall.



Figur 39 - P_{ST} vid 20 % installerad solkraft med 50 mm² kabel

Det maximala värdet på P_{LT} som beräknades i detta fall var 0,187. I detta fall ligger ett värde på P_{ST} över den gräns som anges i AMP. Detta är dock då spänningshöjningen är 10 %, vilket mest sannolikt inte skulle vara acceptabelt i ett verkligt fall. Figur 40 visar P_{ST} ifall ett hus mindre har installerad solkraft, vilket ger en maximal spänningshöjning (omkring 7 %) som möjligen är tillåten.



Figur 40 - P_{ST} vid 15 % installerad solkraft med 50 mm² kabel

I detta fall ligger även P_{ST} under de gränser som anges i AMP.

Återigen konstaterades det att gränserna för maximalt tillåten spänningshöjning sätter begränsningen snarare än de flimmernivåer som kan uppnås vid sammanlagrad solkraft.

5.2.2 Vindkraft

Data som har används för att studera flimmer från vindkraft består av ett intervall på strax över en timme (72 minuter), ett antal tiominutersintervall samt ett antal 1-minutersintervall. Tio- och 1-minutersintervallen har valts ut baserat på vilka intervall som uppvisat störst skillnad mellan maximal och minimal uppmätt effekt.

Till att börja med beräknades P_{ST} för det längre intervall som erhöles (72 minuter). Vid beräkningen var vindkraftsparken ansluten mot 20 kV-nätet, 10 km från överliggande transformator. Kabeln som användes var en 92 mm² markkabel. Effekten på parken skalades om så att full produktion motsvarar en spänningshöjning på 2.5 %, detta för att undersöka ett värsta fall utifrån ASP/AMP. Resultatet visas i Tabell 19.

Tabell 19 - P_{ST} -värden för det längre intervallet

Intervall (7/8 -13)	P_{ST} -värde
00:00-00:10	0,00961
00:10-00:20	0,00998
00:20-00:30	0,00997
00:30-00:40	0,01024
00:40-00:50	0,00875
00:50-01:00	0,00853
01:00-01:10	0,00824

I samtliga fall ligger P_{ST} långt under de gränser som anges i AMP.

Sedan beräknades P_{ST} för de tiominutersintervall som valts ut utifrån skillnaden i maximal/minimal effekt. Tabell 20 visar P_{ST} för de erhållna intervallen under samma förutsättningar som i föregående fall.

Tabell 20 - P_{ST} -värden för erhållna tiominutersintervall

Intervall	P_{ST} -värde
15/8 05:34-05:44	0,02012
18/8 12:47-12:57	0,01651
19/8 02:02-02:12	0,01822
19/8 03:02-03:12	0,01794

I detta fall är de beräknade värdena på P_{ST} ungefär dubbelt så stora som för det längre intervallet som erhöles. Även i detta fall ligger dock P_{ST} långt under gränserna i AMP.

Det erhöles även data för ett flertal 1-minutersintervall. Då P_{ST} enligt standarden beräknas över en tiominutersperiod fick algoritmen anpassas för att använda sig av 1-minutersperioder istället. Ett utförligare resonemang kring detta finns i Appendix C. P_{ST} beräknades sedan för de 1-minutersintervall som erhöles, resultatet visas i Tabell 21.

Tabell 21 - P_{ST} -värden för erhölesna 1-minutersintervall

Intervall	P_{ST} -värde
15/8 03:35-03:36	0,02125
15/8 06:15-06:16	0,02250
15/8 07:09-07:10	0,02071
18/8 12:12-12:13	0,01355
19/8 00:16-00:17	0,02330
19/8 00:56-00:57	0,01586
19/8 01:29-01:30	0,01661

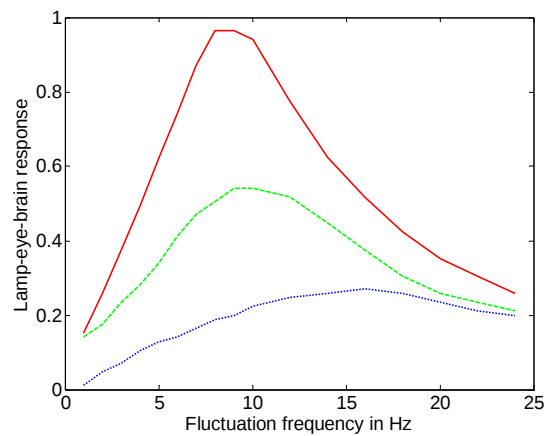
Värdena är i detta fall i samma storleksordning som de tidigare resultaten och ligger långt under de gränser som anges i AMP.

5.3 Flimmer och lågenergibelysning

I detta kapitel har spänningsvariationer på tidskalan under 1 sekund kvantifierats genom flimmerindex: P_{ST} och P_{LT} . Dessa index är mått på spänningsvariationer som utvecklades framförallt för att bedöma risken för oacceptabla nivåer av ljusflimmer vid belysning. När indexen utvecklades var glödlampor den dominerande typen av belysningskälla så flimmerindexen är baserade på en 230 Volts 60 Watt glödlampa.

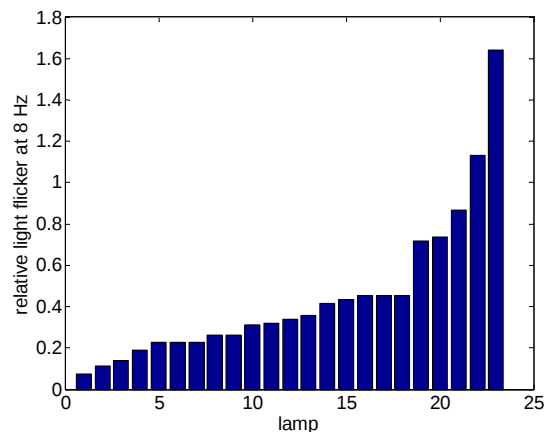
Andra typer av belysning (till exempel lysrör, CFL eller LED belysning) påverkas av spänningsvariationer på ett annat sätt och värdet på P_{ST} kan inte längre direkt användas för att uppskatta risken för oacceptabla nivåer av flimmer.

I Figur 41 jämförs ljusflimmer vid samma spänningsvariationer för tre typer av belysning. Över hela frekvensområdet är glödlampan känsligare, det vill säga samma spänningsvariationer ger mer flimmer. Med andra ord: för lysrör kan det tillåtas högre amplituder av spänningsvariationer innan det uppstår oacceptabla flimmernivåer. Samma resultat visas för halogenlampor, CFL och LED lampor i [19].



Figur 41 – Lampa-ögon-hjärna modellen för en glödlampa (röd); ett lysrör med magnetiskt drivdon (grön) och ett lysrör med elektroniskt drivdon (blå) [19].

I Figur 42 jämförs ett 20-tal CFL från olika tillverkare med en glödlampa. Variationerna i ljusintensitet uppmättes vid samma 8 Hz-variation i spänningsamplitud. Variationerna för en glödlampa sattes lika med ett. Det framgår från figuren att de flesta lampor hade mindre än hälften av ljusvariationerna som en glödlampa, men fyra hade ungefär lika och en hade 60 % högre ljusvariationer. Det kan därför inte sägas att lågenergibelysning alltid är mindre känslig än glödlampor.



Figur 42 – Känslighet av olika CFL för spänningsvariationer med en frekvens på 8 Hz.

En jämförelse mellan 8 nya CFL och 8 nya LED lampor presenterades i [20]. Det visas även här stora variationer mellan olika typer av CFL och LED lampor. För en modulationsfrekvens upp till 12 Hz är alla CFL och LED mindre känsliga än en vanlig glödlampa. Från 13 Hz och uppåt kommer vissa LED att vara känsligare än en vanlig glödlampa och från 20 Hz och uppåt kommer även vissa CFL att vara känsligare.

Med hänsyn till att lågenergibelysning i allmänhet är mindre känslig mot snabba spänningsvariationer än glödlampor skulle det behövas en översyn av standarder och regelverket för snabba spänningsvariationer. Det kan även behövas ett helt nytt regelverk där det t.ex. också ställs krav på känslighet hos olika typer av belysning.

Med hänsyn till resultat från denna studie kommer slutsatserna inte att vara särskilt annorlunda. Flimmernivåerna från vindkraft ligger redan långt under de befintliga nivåerna så utbytet av glödlamporna kommer inte att göra någon skillnad.

Vid solkraft visades det att nivåerna i undantagsfall skulle kunna ligga vid gränsarna av vad som är tillåtet under det nuvarande regelverket. Det gjordes inte en specifik analys av vilka modulationsfrekvenser som inträffar på grund av solkraft, men det är mest sannolikt att bidraget framförallt finns i de lägre modulationsfrekvenserna. Det är för dessa frekvenser som CFL och LED belysning är mindre känsliga än glödlampor, så flimmerproblemet kommer att bli ännu mindre.

6 Slutsatser och rekommendationer

I detta projekt har inverkan från intermittent produktion på spänningen för tidskalor på 1 sekund till 10 minuter och under 1 sekund studerats.

6.1 1 sekund till 10 minuter

På tidskalan 1 sekund till 10 minuter har ett flertal olika fall studerats med olika stora anläggningar och under olika förutsättningar. Resultaten tyder på att småskalig distribuerad generation, exempelvis en mindre solcellsanläggning hos en kund, inte kommer att öka störnivåerna i denna tidskala nämnvärt. Detta gäller också för mindre vindkraftverk förutsatt att de är anslutna på en lämplig spänningsnivå.

Från resultaten framgick det att tresekunders VSV i låg-/mellanspänningsnätet och banmatningar kan karaktäriseras som brus med pålagda positiva och negativa toppar. Vindkraft uppvisar en liknande karaktär medans solkraft i princip saknar brus, samtidigt som antalet toppar är större. En annan slutsats är att solkraft som förväntat främst kan leda till ökade variationer under dagtid, medans vindkraft kan leda till ökade variationer oavsett tid på dygnet.

Ifall flera solcellsanläggningar ansluts i samma lågspänningsnät kan det resultera i en märkbar ökning av störnivåerna jämfört med de befintliga nivåerna i lågspänningsnätet. I ett scenario då 30 % av alla hushåll i samma lågspänningsnät hade installerad solkraft uppnåddes störnivåer i samma storleksordning som de befintliga.

Anslutningar av mindre vindkraftparker förväntas inte leda till en nämnvärd ökning av störnivåerna med hänsyn till kablarnas belastningsförmåga och tillåtna nivåer på spänningsökningen. Däremot kunde en viss ökning av bruset i tresekunders VSV noteras.

I dagsläget finns det ingen solkraftpark i Sverige i en sådan storleksordning att den kan orsaka en ökning av störnivåerna jämfört med de befintliga i mellanspänningsnätet. I februari 2014 förväntas dock en park i MW-storlek tas i drift. En solkraftanläggning i den storleken kan orsaka störnivåer i samma storleksordning som de befintliga ifall den ansluts mot ett svagt nät. Det rekommenderas att göra mätningar vid denna anläggning av så väl spänningsvariationer som variationer i ström, med lämplig tidsupplösning (1-sekunders medelvärden). Data kan då användas i senare utredningar.

En annan slutsats är att ökade variationer jämfört med befintliga kan uppnås utan att spänningen hamnar utanför de gränser som är angivna i befintliga standarder, beroende på lokala förhållanden.

Det konstaterades också att störnivåerna blir högre ifall luftledning används istället för markkabel. Då har det antagits samma överföringsförmåga för kabel och motsvarande luftledning i jämförelsen.

Det undersöktes också huruvida spänningsvariationer förknippade med sol- och vindkraft kan leda till att lindningskopplare slits ut i förtid. Resultaten tyder på att vindkraft i vissa fall med låg X/R-ratio kan leda till en ökad mängd omkopplingar per dygn, vilket också stöds av tidigare resultat från andra studier [16]. Det ökade antalet kopplingar kommer i sin tur att leda till mer spänningsvariationer i tidskalan mellan 1 sekund och 10 minuter.

Sammanfattningsvis verkar det inte finnas någon anledning för oro för ökade störningsnivåer i denna tidskala. Men eftersom det visade sig att nivåerna kan bli högre i vissa fall och att de ändras i karaktären, rekommenderas det att övervaka detta. Det som behövs för detta är att definiera lämpliga indikatorer, som bland annat kan kvantifiera skillnaden mellan olika karaktärer i spänningsvariationer i denna tidskala. Det visades i denna studie att VSV är en bra bas för sådana indikatorer.

6.2 Under 1 sekund

På tidskalan under en sekund studerades inverkan på flimmernivåer från sol- och vindkraft.

Resultaten tyder på att enskilda, mindre solcellsanläggningar inte förväntas ha någon större inverkan på flimmernivåerna i nätet. Ifall flera kunder på samma radial har solkraft installerad kan i vissa fall flimmernivåer uppnås som är i närheten av de gränser som anges i AMP, men detta är i fall då spänningshöjningen i nätet är betydligt högre än vad som är acceptabelt i de flesta verkliga nät. Begränsningen ("acceptansgränsen" eller "hosting capacity") kommer då att ställas av spänningshöjningen, inte av flimmernivåerna. Det behövs dock mer mätningar på sammanlagrad solkraft för att kunna dra tydligare slutsatser kring hur flimmernivåerna påverkas av växlande molnighet i sådana fall.

För vindkraft erhöles data för ett sammanhängande intervall på 72 minuter och ett flertal tio- och 1-minutersintervall. I samtliga fall som undersökts var flimmernivåerna en till två storleksordningar under gränserna för vad som är acceptabelt. Perioderna valdes något slumpmässigt, men under en dag med varierande vindhastighet då det förväntas de högsta flimmernivåerna. Resultatet anger att värdena för det mesta är mycket låga. Det kan inte uteslutas att det förekommer höga flimmernivåer vissa tider som råkade missas vid val av tidsintervall, men det anses inte vara sannolikt.

Det ska också noteras att äldre typer av vindkraftverk med asynkronmaskiner orsakar mer flimmer än moderna vindkraftverk [21], [22]. Alla mätningar som används i detta projekt är från moderna vindkraftverk. I denna studie har inte heller någon vikt lagts vid vilken typ av omriktare som vindkraftverk är anslutna emot, men olika typer av omriktare kan också orsaka flimmer.

6.3 Framtida arbete

För att bättre kunna studera möjliga ökning av spänningsvariationer i tidskalan mellan 1 sekund och 10 minuter rekommenderas det att kartlägga befintliga VSV-nivåer i låg- och mellanspänningsnätet. Även om sol- och vindkraft troligen inte kommer att öka nivåerna märkbart kan det bli en

ändring i karaktären av spänningsvariationerna i denna tidskala. Att bevaka detta anses vara en bra idé.

Mer mätningar behövs på sammanlagringseffekter för solkraft, på tidskalor mellan 1 sekund och 10 minuter. Här finns det antydningar att nivåerna kan bli högre än befintliga nivåer vid ett större antal solpaneler anslutna till ett svagt lågspänningsnät.

Studien visar på en möjlig ökning av antalet snabba spänningsändringar (spänningsteg) när långsamma variationer i vindkraft eller solkraft ger en ökning av kopplingsfrekvensen för lindningskopplare. Det skulle behövas ytterligare studier med lämplig data om produktion och förbrukning för att kunna kvantifiera fenomenet. Även här behövs det information om befintliga nivåer av antalet snabba spänningsändringar (kopplingar av lindningskopplare).

Studierna som presenterades i denna rapport var riktade mot variationer i produktion på grund av variationer i vindhastighet och solinstrålning. För tidskalor över 1 sekund är det att anses som den mest sannolika källan till variationer. För flimmer (tidskalan under 1 sekund) kan det finnas fenomen i reglerkretsen vid omriktaren eller vid vindturbinen. Påverkan av tornen på flimmer är väldokumenterad [23], [24] och [21]. Studien i denna rapport visar att själva variationerna i vind och sol bara ger små eller mycket små bidrag till flimmer. Men vissa periodiska fenomen i reglerkretsen (t.ex. att uppdatera en inställning varje sekund [25]) kan leda till höga flimmernivåer. Utveckling av ett standardtest, eller regelbundna mätningar på anläggningar under en längre tid (t.ex. en vecka) rekommenderas för bevaka utvecklingarna.

Det största behovet för fortsatt arbete anses vara gällande vilka konsekvenserna blir av ökande VSV-nivåer och hur lämpliga gränsvärden ska sättas.

7 Författarnas tack

En referensgrupp bildades i samband med projektet och har bidragit med värdefulla insikter och kommentarer. Den består av: Ingvar Hagman, NKT Cables och Rolf Gustafsson, Mälarenergi Elnät AB.

Data och annan hjälp har erhållits från:

Mats Wahlberg, Skellefteå Kraft Elnät AB

Mats Häger, Trafikverket

Christer Bergeland, Fortum/Glava Energy Center

8 Citerade arbeten

- [1] "IEC 61000-4-15 - Flickermeter - Functional and design specifications".
- [2] "SS-EN 50160 - Spänningens egenskaper i elnät för allmän distribution".
- [3] "EIFS 2013:1 - Föreskrifter och allmänna råd om krav som ska vara uppfyllda för att överföringen av el ska vara av god kvalitet," Energimarknadsinspektionen, 2013.
- [4] Svensk_Energi, "AMP - Anslutning av mindre produktionsanläggningar," 2011.
- [5] M. Bollen, M. Häger och C. Schwaegerl, "Quantifying voltage variations on a time scale between 3 seconds and 10 minutes," i *18th international conference on electricity distribution*, 2005.
- [6] "SS-EN 61000-4-30: Mät och provningsmetoder - Mätning av spänningsgodhet och elkvalitet".
- [7] "IEC 60725: Considerations on reference impedances for use in determining the disturbance characteristics of household appliances and similar electric equipment".
- [8] M. Bollen och I. Gu, *Signal Processing of Power Quality Disturbances*.
- [9] M. Bollen och F. Hassan, *Integration of Distributed Generation in the Power System*, 2011.
- [10] "SS 424 14 24 - Regler för dimensionering av ledningsnät för lågspänning".
- [11] "Kraftpojkarna," [Online]. Available: <http://www.kraftpojkarna.se/solpark.html>.
- [12] S. Ackeby, M. Bollen och J. Munkhammar, "Prosumer with demand-response," *Elforsk Rapport 13:59*, 2013.
- [13] N. Högnert och D. Petterson, "Undersökning av förlustförändringar i lågspänningsnät uppkomna av minkroproduktion med solceller," Högskolan Väst, Trollhättan, 2013.
- [14] E. C. Kern, E. M. Gulachenski och G. A. Kern, "Cloud effects on distributed photovoltaic generation: Slow transients ad the Gardner, Massachusetts photovoltaic experiment," *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol. 4, nr 2, pp. 184-190, 1989.
- [15] Y. Yang och M. Bollen, "Power quality and reliability in distribution networks with increased levels of distributed generation," *Elforsk Rapport 08:39*, 2008.
- [16] S. Nursebo, P. Chen och O. Carlson, "The Effect of Wind Power Integration on the Frequency of Tap Changes of a Substation Transformer," 2013.
- [17] J. Schlabbach, D. Blume och T. Stephanblome, *Voltage Quality in Electrical Power Systems*, IET, 2001.
- [18] *Guide to Quality of Electrical Supply for Industrial Installation. Part 5: Flicker and Voltage Fluctuations*, Paris: International Union for Electricity

Applications, 1999.

- [19] R. Cai, "Flicker interaction studies and flickermeter improvement," *Eindhoven University of Technology*, 2009.
- [20] K. Chmielowiec, "Flicker effect of different types of light sources," i *Electrical Power Quality and Utilisation (EPQU), 2011 11th International Conference on*, 2011.
- [21] T. Thiringer och J.-A. Dahlberg, "Periodic pulsations from a three-bladed wind turbine," *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol. 16, nr 2, pp. 128-133, 2001.
- [22] T. Thiringer, T. Petru och S. Lundberg, "Flicker contribution from wind turbine installations," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 19, nr 1, pp. 157-163, 2004.
- [23] N. Jenkins, R. Allan, P. Crossley, D. Kirschen och G. Strbac, *Embedded Generation*, London: Institution of Electrical Engineers, 2000.
- [24] T. Thiringer, "Power quality measurements performed on a low-voltage grid equipped with two wind turbines," *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol. 11, nr 3, pp. 601-606, 1996.
- [25] B. Bletterie och H. Brunner, "Solar shadows," *Power Engineer*, vol. 20, nr 1, pp. 27-29, 2006.
- [26] Svensk_Energi, "ASP - Anslutning av större produktionsanläggningar".
- [27] K.-J. Andersson, "Komponentuppdelning av elnätet på lokalnivå," Stockholm, 2008.
- [28] "SS 424 14 16 - Kraftkablar - PEX-isolerad kabel med märkspänning 7/12 kV till 21/36 kV - Konstruktion och provning," 2012.
- [29] "EN 50182 - Ledare för luftledning koncentriskt uppbyggd av runda trådar".
- [30] Alstom, *Network Protection & Automation Guide - Protective Relays, Measurement and Control*, 2011.

9 Appendix A

9.1 Kabelparametrar

Tabell 22 och Tabell 23 presenterar beteckning och parametrar för de markkablar och luftledningar som använts i studien.

Tabell 22 - Markkabel

Beteckning	Ytarea mm ²	Resistans Ohm / km	Induktans mH / km	Belastnings- förmåga
SE-N1XE-AS (AKKJ) 1 kV	95	0,320	0,230	164
SE-N1XE-AS (AKKJ) 1 kV	150	0,206	0,230	210
SE-N1XE-AS (AKKJ) 1 kV	240	0,125	0,230	272
Axclight TT 12 / 24 kV	95	0,320	0,320/0,360	240
Axclight TT 12 / 24 kV	150	0,206	0,320/0,330	310

Tabell 23 - Luftledning

Beteckning	Ytarea mm ²	Resistans Ohm / km	Reaktans (50 Hz) Ohm / km	Belastnings- förmåga
ALUS 1 kV	50	0,641	0,300	140
ALUS 1 kV	95	0,320	0,300	220
BLL 24 kV (FeAl)	62	0,535	0,320	259
BLL 24 kV (FeAl)	99	0,336	0,300	348

Tabell 24 visar de kabellängder som krävs för att motsvara ungefär samma impedans som referensimpedansen för olika kabeltyper.

Tabell 24 - Kabellängd och impedans (i Ω)

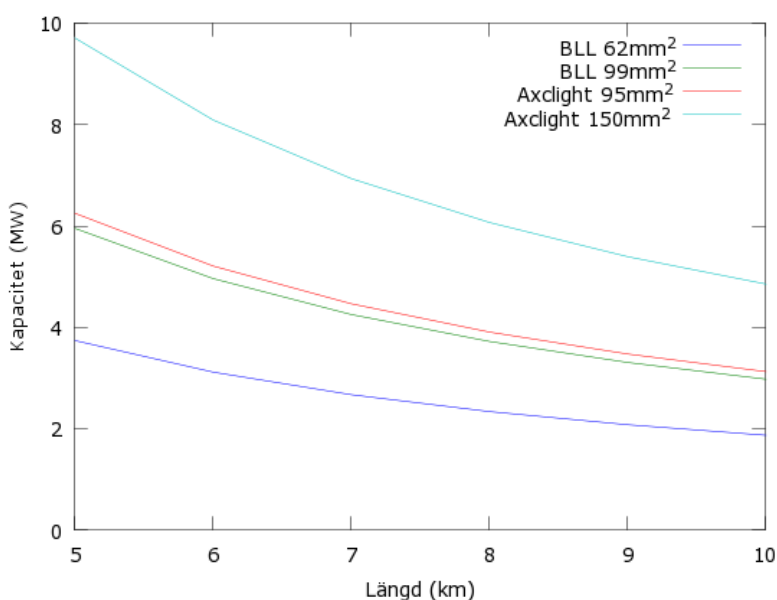
Kabel	Längd	Resistans	Reaktans
Referens	-	0,4	0,250
AKKJ 3X95	1250 m	0,4	0,090
AKKJ 3X150	2000 m	0,4	0,144
AKKJ 3X240	3200 m	0,4	0,231
ALUS 4X50	625 m	0,4	0,188
ALUS 4X95	1250 m	0,4	0,377

Det krävs alltså långa kablar eller luftledningarna för att komma upp i värden som motsvarar referensimpedansen. Detta är väntat då referensimpedansen ska motsvara ett fall som är sämre än 95 % av Europas elnät, den representerar således ett svagt nät.

10 Appendix B

10.1 Acceptansnivå vindkraftparker

Anslutning av vindkraftparker med en kapacitet på max 10-20 MW sker vanligtvis på 10-20 kV spänningsnivå. Den möjliga anslutningseffekten varierar beroende på kapaciteten i det lokala nätet. Den maximala kapaciteten hos en vindkraftpark med avseende på maximal spänningshöjning (2,5 % enligt ASP/AMP) räknades ut och resultatet visas i figuren nedan för olika kablar och längder. I detta fall antogs vindkraftparken vara ansluten på 20 kV-nivån. Vid beräkning av maximal kapacitet antogs att vindkraftparken bara injicerar aktiv effekt. Resultatet visas i Figur 43.



Figur 43 - Kapacitet med avseende på kabellängd

Maximal kapacitet med avseende på kablarnas belastningsförmåga kontrollerades också, resultatet sammanfattas i Tabell 25 nedan.

Tabell 25 - Max kapacitet utifrån belastning och tillåten spänningshöjning

Kabel	Max Kapacitet (Belastning)	Max Kapacitet (Spänning, 10km)
BLL 62 mm²	8,9 MW	2 MW
BLL 99 mm²	12 MW	3,0 MW
Axclight 95 mm²	8,3 MW	3,2 MW
Axclight 150 mm²	10,7 MW	5 MW

Från resultaten framgår det att samtliga kabeltyper begränsas av spänningsökningen för en kabellängd på 10 km.

11 Appendix C

11.1 Flimmerberäkningar över 1-minutersintervall

För att få en uppfattning om hur pass mycket resultatet kommer att påverkas ifall 1-minutersintervall används istället för tiominutersintervall räknades P_{ST} ut för varje minut med den anpassade algoritmen, under ett av intervallen som redovisas i avsnitt 5.2.2. Resultatet visas i Tabell 26 för varje 1-minutersintervall.

Tabell 26 - P_{ST} för 1-minutersintervall

Intervall	P_{ST} -värde
19/8 02:02-02:03	0,01732
19/8 02:03-02:04	0,01777
19/8 02:04-02:05	0,01775
19/8 02:05-02:06	0,01898
19/8 02:06-02:07	0,01717
19/8 02:07-02:08	0,01907
19/8 02:08-02:09	0,01592
19/8 02:09-02:10	0,01938
19/8 02:10-02:11	0,01674
19/8 02:11-02:12	0,01887

P_{ST} beräknat över varje 1-minutersintervall är i samtliga fall nära det värde på P_{ST} som beräknades för hela tiominutersperioden (0,01822). Största avvikelserna är -13 % och +6 %, som anses vara acceptabla för denna studie. Utifrån detta bestämdes det att värden beräknade över 1-minutersintervall kan användas som en indikation av storleken på P_{ST} över ett 10-minutersintervall.

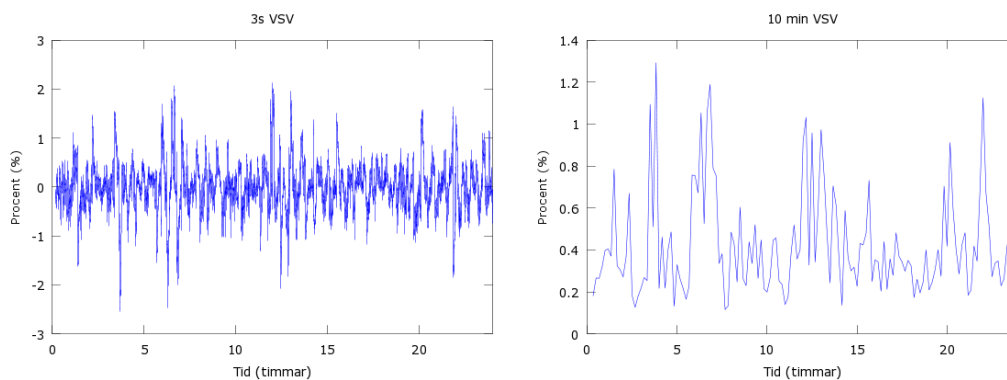
12 Appendix D

Detta appendix redovisar ytterligare data som använts i studien.

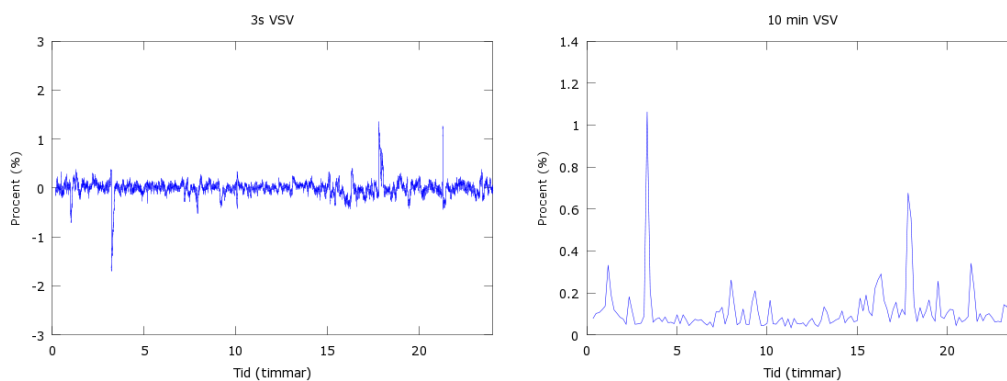
12.1 Ytterligare VSV Lågspänningsnät

Följande figurer visar tresekunders och tiominuters VSV för olika platser i lågspänningsnätet.

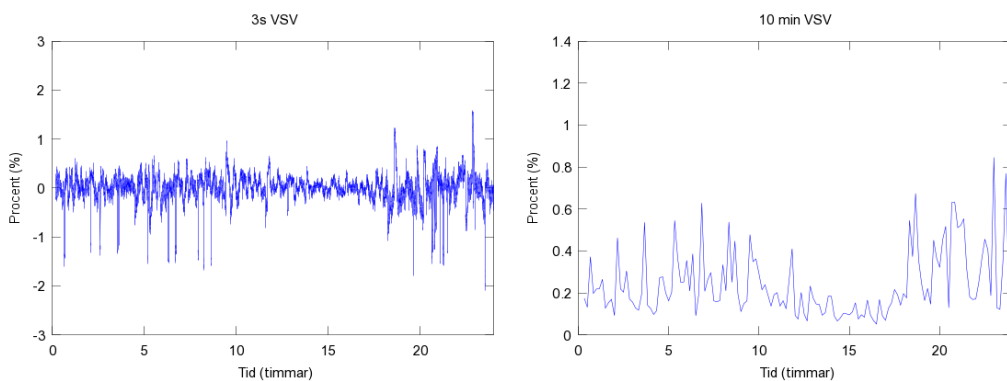
Sommarstuga, Borlänge



Kontor, Ludvika



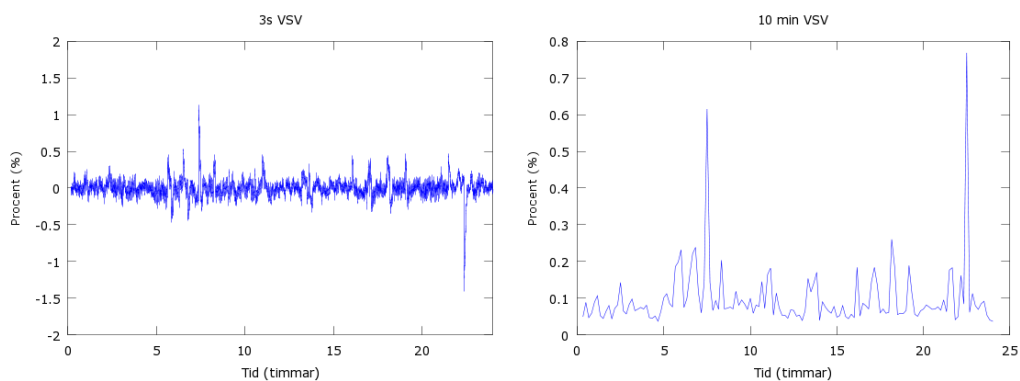
Hotell, Shanghai



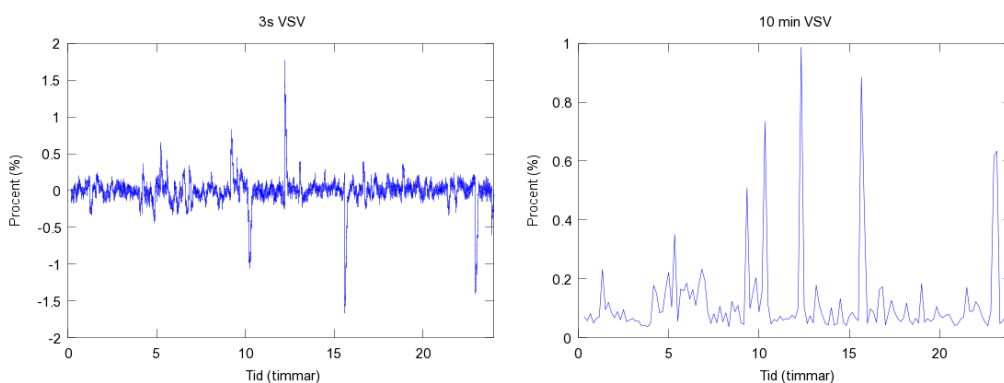
12.2 Ytterligare VSV Mellanspänningsnät

Följande figurer visar tresekunders och tiominuters VSV för några olika dagar i mellanspänningsnätet. Observera skillnader i vertikal skala.

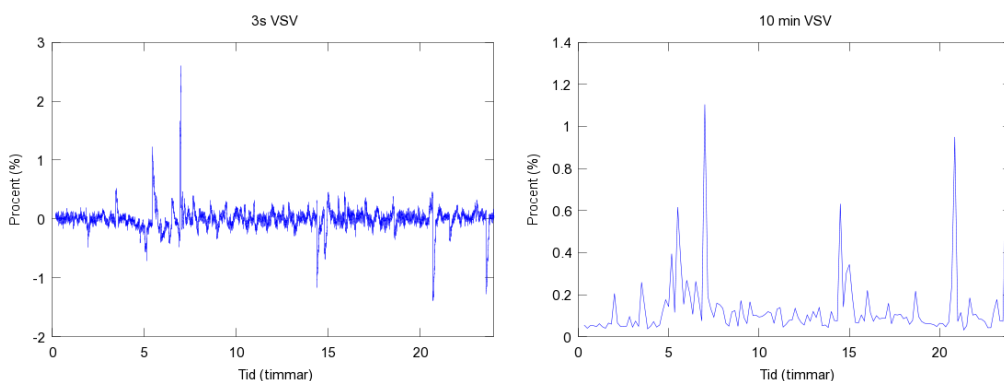
2013-08-03



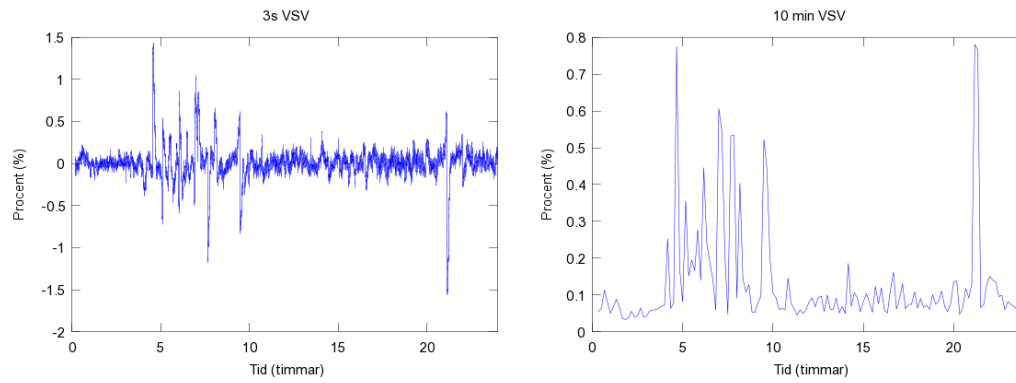
2013-08-05



2013-08-08



2013-08-12



12.3 Ytterligare VSV Banmatningar

Tabell 27 - Max / Medel / 95 % för 10 min VSV, Ånge

Datum	Max	Medel	95 %
1	0,755	0,148	0,430
2	0,937	0,208	0,426
3	1,030	0,217	0,354
4	0,926	0,232	0,630
5	1,153	0,226	0,571
6	0,905	0,172	0,365
7	0,820	0,115	0,237
8	0,755	0,198	0,465
9	0,859	0,206	0,517
10	1,015	0,229	0,663
11	1,061	0,211	0,436
12	0,920	0,227	0,616
13	0,798	0,156	0,270
14	0,768	0,119	0,294
15	1,033	0,214	0,707
16	0,913	0,222	0,492
17	0,956	0,237	0,755
18	1,036	0,229	0,655
19	0,889	0,205	0,607
20	1,104	0,137	0,533
21	0,807	0,086	0,231
22	1,001	0,207	0,683
23	0,832	0,255	0,717
24	0,911	0,229	0,750
25	1,122	0,270	0,816
26	0,952	0,215	0,549
27	0,834	0,175	0,622
28	0,847	0,139	0,402
29	0,891	0,169	0,449
30	0,952	0,247	0,766

Tabell 28 - Max / Medel / 95 % för 10 min VSV, Bastuträsk

Datum	Max	Medel	95 %
1	1,425	0,454	0,917
2	1,321	0,564	0,923
3	1,399	0,620	1,142
4	1,082	0,618	0,898
5	1,027	0,483	0,859
6	1,286	0,454	0,897
7	0,896	0,383	0,616
8	1,157	0,459	0,921
9	1,557	0,574	1,091
10	1,277	0,554	0,977
11	1,125	0,518	0,918
12	1,026	0,520	0,858
13	0,892	0,408	0,759
14	1,032	0,437	0,815
15	1,923	0,450	0,889
16	1,129	0,485	0,872
17	1,790	0,495	0,894
18	1,604	0,555	0,988
19	1,586	0,434	0,810
20	1,988	0,438	0,907
21	1,043	0,355	0,721
22	1,200	0,455	0,877
23	1,486	0,535	0,940
24	1,436	0,467	0,731
25	1,681	0,483	0,762
26	2,125	0,512	0,931
27	1,122	0,467	0,829
28	1,036	0,427	0,739
29	1,063	0,482	0,856
30	1,016	0,558	0,856

Tabell 29 - Max / Medel / 95 % för 10 min VSV, Boden

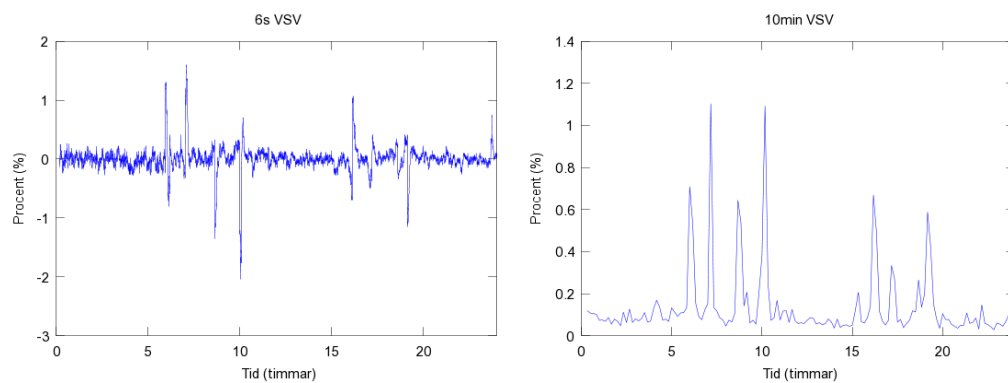
Datum	Max	Medel	95 %
1	1,080	0,412	0,857
2	1,142	0,487	0,866
3	1,230	0,551	0,992
4	1,140	0,507	0,895
5	1,299	0,493	0,949
6	1,002	0,408	0,855
7	1,047	0,373	0,800
8	1,040	0,423	0,863
9	1,388	0,539	1,016
10	1,185	0,455	0,908
11	1,148	0,410	0,772
12	1,121	0,514	0,947
13	0,964	0,354	0,784
14	1,177	0,409	0,870
15	1,053	0,454	0,877
16	1,020	0,429	0,884
17	1,148	0,419	0,920
18	1,229	0,465	0,949
19	1,260	0,526	0,962
20	1,020	0,482	0,908
21	1,079	0,428	0,805
22	1,083	0,430	0,872
23	1,144	0,481	0,936
24	1,116	0,472	0,933
25	1,050	0,443	0,891
26	1,064	0,465	0,919
27	1,082	0,446	0,908
28	1,147	0,397	0,887
29	1,059	0,394	0,863
30	1,110	0,472	0,920

Tabell 30 - Max / Medel / 95 % för 10 min VSV, Mellansel

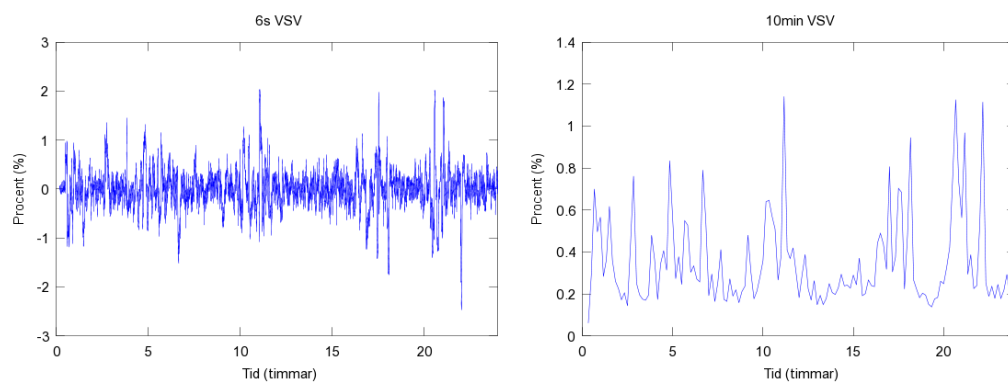
Datum	Max	Medel	95 %
1	1,555	0,275	0,792
2	1,158	0,300	0,688
3	1,382	0,337	0,874
4	1,735	0,323	0,892
5	1,218	0,294	0,766
6	1,287	0,219	0,758
7	0,875	0,173	0,440
8	1,052	0,250	0,667
9	1,064	0,243	0,562
10	0,944	0,310	0,685
11	0,992	0,243	0,687
12	0,960	0,230	0,720
13	0,877	0,171	0,373
14	1,186	0,227	0,672
15	0,835	0,270	0,739
16	1,068	0,331	0,762
17	1,030	0,351	0,867
18	1,294	0,296	0,765
19	1,044	0,241	0,737
20	0,941	0,222	0,640
21	0,963	0,128	0,236
22	1,009	0,255	0,727
23	1,141	0,349	0,790
24	1,077	0,304	0,715
25	1,350	0,359	0,905
26	0,663	0,246	0,590
27	0,594	0,139	0,292
28	0,651	0,135	0,346
29	0,717	0,208	0,583
30	0,732	0,259	0,578

Nedan följer även ett urval av figurer från mätningarna på banmatningar.

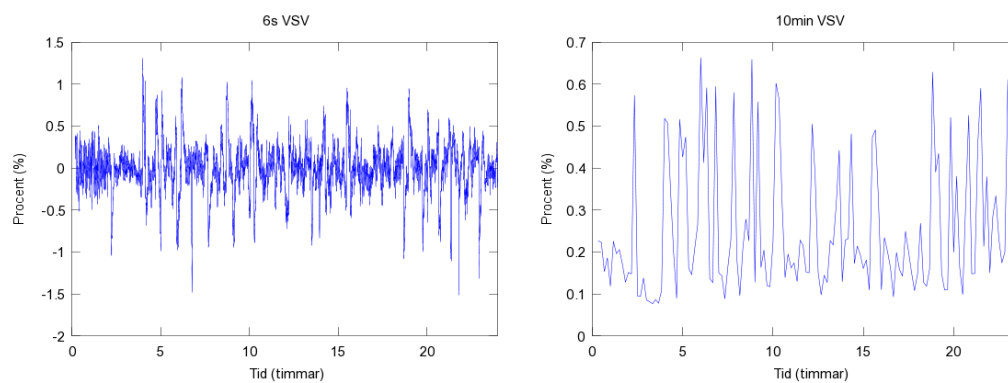
Ånge 2013-09-20



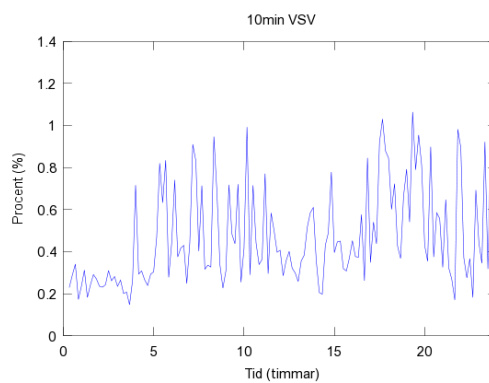
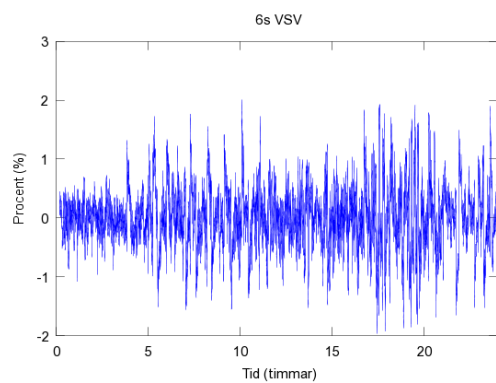
Mellansel 2013-09-23



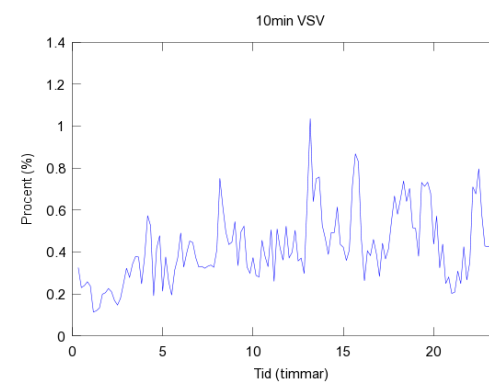
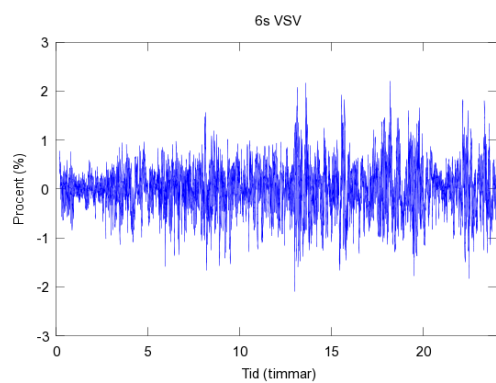
Mellansel 2013-09-26



Boden 2013-09-26

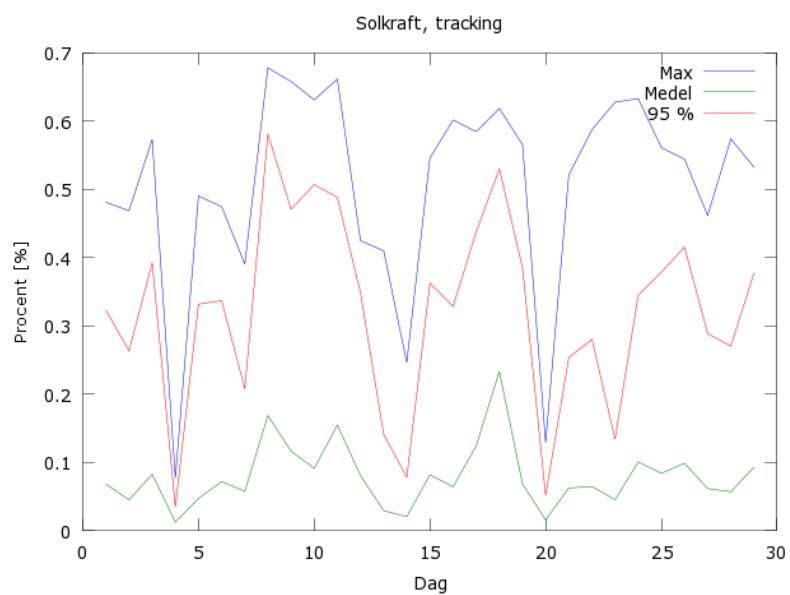


Bastuträsk 2013-09-28

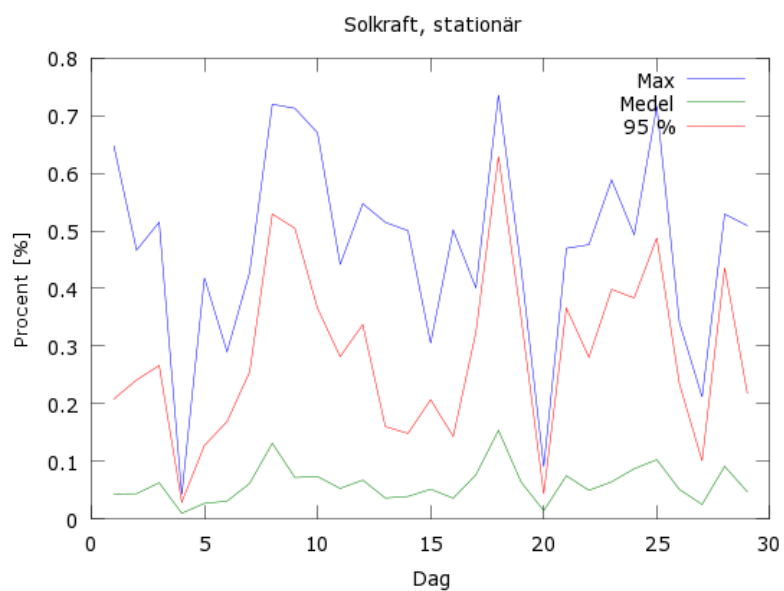


12.4 Ytterligare VSV Solkraft

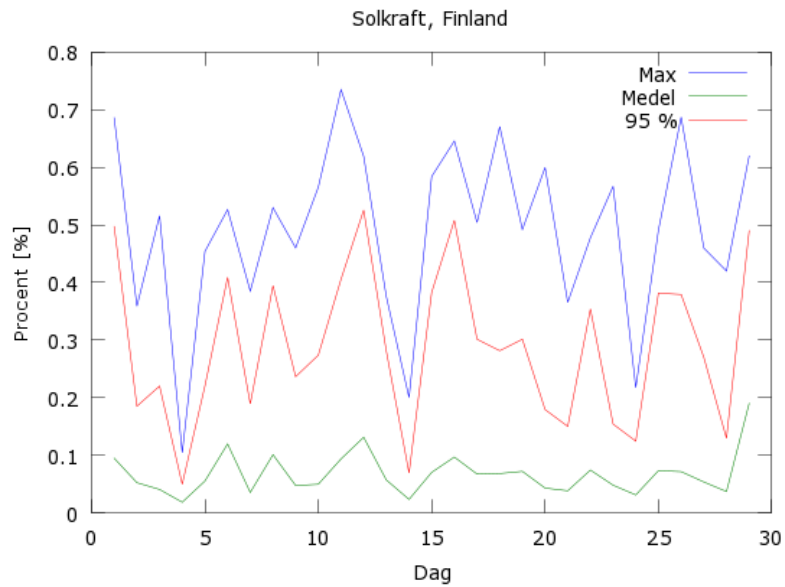
12.4.1 Tracking



12.4.2 Stationär



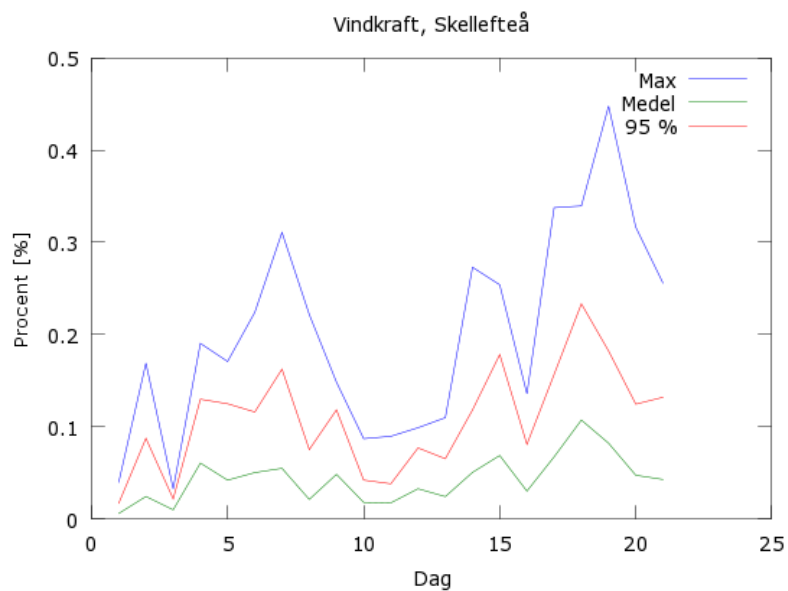
12.4.3 Finland



12.5 Ytterligare VSV Vindkraft

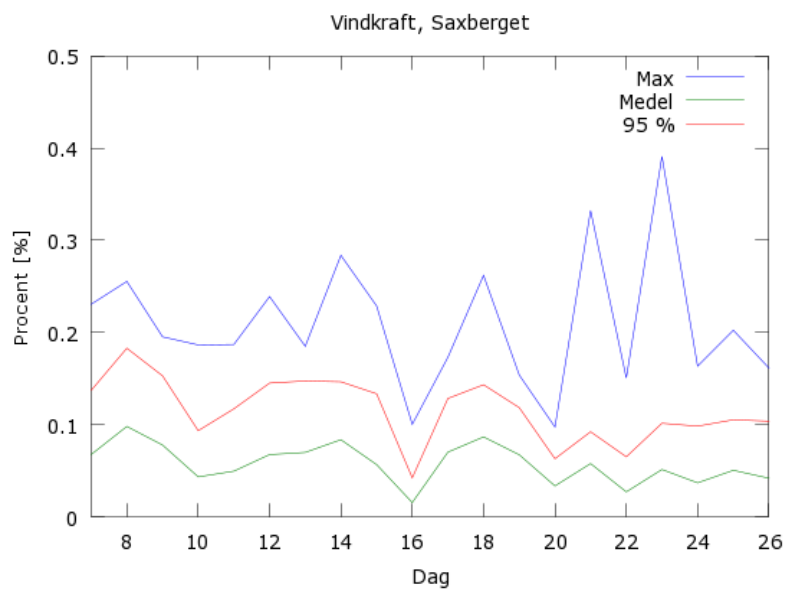
12.5.1 Skellefteå 12 MW

Nerskalad till 600 kW, under samma förutsättningar som det första exemplet i avsnitt 4.4.5.



12.5.2 Saxberget 20 MW

Nerskalad till 600 kW, samma förutsättningar som förra bilden.



ELFORSK

SVENSKA ELFÖRETAGENS FORSKNINGS- OCH UTVECKLINGS - ELFORSK - AB

Elforsk AB, 101 53 Stockholm. Besöksadress: Olof Palmes Gata 31
Telefon: 08-677 25 30, Telefax: 08-677 25 35
www.elforsk.se