



**CHALMERS**

# Mikroproduktions påverkan på lågspänningsnät

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet Elektroteknik

Lukasz Lukiewicz

**INSTITUTIONEN FÖR ELEKTROTEKNIK**

---

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA  
Göteborg, 2020  
[www.chalmers.se](http://www.chalmers.se)



EXAMENSARBETE INOM HÖGSKOLEINGENJÖRSPROGRAMMET  
ELEKTROTEKNIK 2020

## **Mikroproduktions påverkan på lågspänningsnät**

Lukasz Lukiewicz



**CHALMERS**

Institutionen för Elektroteknik

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sverige 2020

Mikroproduktions påverkan på lågspänningsnät

Lukas Lukiewicz

© LUKASZ LUKIEWICZ. 2020

Examinator: Thomas Hammarström, Institutionen för Elektroteknik

Handledare: Pontus Claesson, HARRYDA ENERGI AB

Institutionen för Elektroteknik

Chalmers Tekniska Högskola

SE-412 96 Göteborg

Sverige

Telefon: +46 (0)31-772 1000

# FÖRORD

Detta examensarbete (15 hp) har utförts på uppdrag av Härryda Energi AB och är det sista steget i min utbildning till Elektroingenjör (180 hp) med inriktning elkraft på Chalmers Tekniska Högskola.

Först och främst vill jag tacka min handledare på Härryda Energi AB, Pontus Claesson som med sin omfattande kompetens och engagemang har stöttat och hjälpt mig under examensarbetets gång. Istället för att lista alla namn vill jag ge ett stort tack till alla på Härryda Energi som på ett eller annat sätt har bidragit till mitt arbete, vore det sig med sin sakkunnighet eller med konversationer om vardagliga ämnen som fått mig att känna mig varmt välkommen varje dag under hela perioden.

Ett stort tack riktas även mot min handledare och examinator Thomas Hammarström på Chalmers som tagit sig tid att hjälpa mig med mitt uppdrag.

## SAMMANFATTNING

Med samhällets strävan efter fossilfria energikällor ökar också intresset och därmed utbudet av solceller som lockar fler och fler personer. ”Gratis” energi som kommer med solstrålar är gynnsamt för anläggningsägaren som därmed, till viss utsträckning, kan bli självförsörjande. Vid momentan hög produktion och låg förbrukning, ofta på soliga sommardagar, uppstår även ett elöverskott som kommer att levereras till nätets andra kunder. För detta överskott får producenten en ekonomisk ersättning såvida den totala produktionen inte överskrider producentens egen totala årsförbrukning, detta kallas mikroproduktion.

Samarbetet för dock med sig ett problem för nätägaren eftersom den hittills konventionella distributionen saknade produktionskällor så långt ner i distributionsträdet. För att säkerställa en optimal elkvalité måste spänning och belastning ständigt övervakas och eventuella åtgärder vidtas för att hålla kvalitén inom acceptabla gränser. Ett elnät byggs och dimensioneras med avseende på att hålla spänningen över den lägre gränsen vid hög belastning. Denna inträffar under helt omvända omständigheter än för solcellsanläggningars maximala produktion som är av en snabbt varierande karaktär vilket medför potentiellt signifikanta spänningsökningar.

Just spänningsökningen i näten p.g.a. mikroproduktion är av stort intresse för Härryda Energi AB. I deras uppdrag undersöks några av de befintliga lågspänningsnäten i syfte att skapa en bild på den grad av påverkan mikroproduktionen kommer att ha på deras verksamhet och vilka åtgärder som kan och bör vidtas beroende på omständigheterna.

För arbetet väljs tre lågspänningsnät med skilda egenskaper som simuleras för låglastsituationer och stegvis ökande produktion. Fokus riktas på slutkundernas spänning och nätets maximalt tillåtna effektflyde.

De presenterade resultaten i form av en beräkningsmodell, avser att ge ett mått på gränsen för den tillåtna produktionen i specifika områden. Simulationer av verklighetsscenario och analys av olika lösningar ger bakgrund till ett förebyggande arbete och är till viss grad en vägledning om hur kommande solcellsanläggningar kan hanteras för att möta kvalitétkrav.

## SUMMARY

With the humanity striving towards use of solely renewable energy sources there is an increasing interest and development of solar panels that draws attention of more and more individuals. The nearly free energy provided with sunlight is a good resource for the solar installation owners making them, to some extent, energetically independent. High production during low consumption hours, mostly during sunny summer days, lead to excess energy that is fed back to the grid, an excess that the installation owner gets economically compensated for as long as the total yearly production does not exceed the yearly consumption. That is today called micro production.

That cooperation, although in a good direction, does create a new problem for the distribution grid owners since until a few years ago, the conventional distribution grids did not include energy production sources that far down the distribution tree. To guarantee quality for the provided electricity requires constant monitoring and possible measures to be taken so that the quality is kept within the acceptable range. A distribution grid is built and measured to keep the voltage levels above the lower limit during high consumption that occurs under completely different circumstances than these where the production from solar panels reaches its maximum. The solar energy production variates quickly as well which leads to potentially significant voltage rises.

Rising voltage caused by micro production is of great importance to HÄrryda Energi AB. The task on their behalf is to examine few of their low voltage grids in order to create an overview of what kind of impact the micro production will have on their operation and what kind of measures could and should be taken into consideration depending on different circumstances.

For this assignment will three low voltage grids with different properties be chosen and simulated for scenarios with low consumption and gradually increasing production. Focus is directed on the end-customers' voltage levels and the grids' highest allowed effect flows.

The presented results in form of a model to calculate the micro production limit for specific areas, simulations of probability scenarios and an analysis of different solutions form a background for work that will help with preventing the described problem and in some way give direction about how future micro production installations could be handled in order to be able to meet the quality requirements.

# INNEHÅLLSFÖRTECKNING

<b>FÖRORD</b> .....	
<b>SAMMANFATTNING</b> .....	
<b>SUMMARY</b> .....	
<b>INNEHÅLLSFÖRTECKNING</b> .....	
<b>1 INLEDNING</b> .....	<b>1</b>
1.1 Bakgrund .....	1
1.2 Syfte.....	1
1.3 Avgränsningar .....	1
1.4 Precisering av frågeställningen.....	2
<b>2 TEORETISK REFERENSRAM</b> .....	<b>3</b>
2.1 Mikroproduktion.....	3
2.2 Solcellsanläggning .....	3
2.3 Spänningsfall .....	6
2.4 Långsamma spänningsvariationer .....	6
2.5 Hög belastning .....	7
2.6 Låg belastning.....	8
2.7 Överlastskydd och utlösningvillkor .....	9
2.8 Acceptansgränsen .....	10
2.9 Spänningsreglering .....	10
2.9.1 Lindningskopplare och omsättning .....	11
2.9.2 Nätförstärkning.....	11
2.9.3 Reaktiv effektkompensering .....	11
<b>3 METOD</b> .....	<b>13</b>
3.1 Tillämpad teori .....	13
3.2 dpPower .....	14
3.3 Simulering och valda områden .....	15
3.3.1 Lågspänningsnät NS274.....	17
3.3.2 Lågspänningsnät NS345.....	18
3.3.3 Lågspänningsnät NS239.....	18
<b>4 VERKLIGHETSSCENARION</b> .....	<b>20</b>
4.1 NS274 .....	20
4.2 NS345 .....	23
4.3 NS239 .....	26



4.4	Analys av simuleringar .....	27
<b>5</b>	<b>GRÄNSVÄRDEMODELLEN .....</b>	<b>28</b>
5.1	Område för beräkning.....	28
5.2	Gränsvärdeberäkning för en grupp .....	29
5.3	Gränsvärdeberäkning för hela nätet.....	30
5.4	Analys och tillämpning av modellen .....	31
<b>6</b>	<b>ÅTGÄRDSSIMULERING .....</b>	<b>36</b>
6.1	NS274 .....	36
6.2	NS345 .....	38
6.2.1	Vidtagna åtgärder .....	38
6.2.2	Spänningsreglering för NS345 .....	40
<b>7</b>	<b>SLUTSATS .....</b>	<b>43</b>
7.1	Analys av resultat .....	43
7.2	Rekommendationer till fortsatt arbete .....	44
	<b>REFERENSER .....</b>	<b>45</b>
	<b>BILAGA 1 NS274 EFFEKT ENLIGT TAKYTA OCH MARGINAL I FÖRHÅLLANDE TILL SÄKRING.....</b>	
	<b>BILAGA 2 NS345 EFFEKT ENLIGT TAKYTA OCH MARGINAL I FÖRHÅLLANDE TILL SÄKRING.....</b>	
	<b>BILAGA 3 NS239 EFFEKT ENLIGT TAKYTA OCH MARGINAL I FÖRHÅLLANDE TILL SÄKRING.....</b>	
	<b>BILAGA 4 IMPEDANSVÄRDEN.....</b>	
	<b>BILAGA 5 EFFEKT BASERAD PÅ EKVIVALENT LAST .....</b>	

# 1 INLEDNING

Kapitlet beskriver en bakgrund till arbetet samt redogör för vad syftet är och vilka avgränsningar som görs. Slutligen följer precisering av frågeställning.

## 1.1 Bakgrund

Härryda Energi AB köper sin el av Vattenfalls regionnät och transformerar ner den i en 130 / 40 kV mottagningsstation. Distributionsområdet omfattas av Mölnlycke, Landvetter, Härryda, Skalmared och ända ut till Hindås. Totalt levererar företaget el till ca 14 000 kunder. [1]

Härryda Energi strävar alltid efter att el med god kvalitet levereras till slutkunder, det som är kravet för god kvalitet definieras bland annat i kapitel 2.4. Ständigt ökande kundnöjdhet och stabila nät säkerställs med åtgärder i form av noggranna beräkningar och dataanalyser för såväl enstaka ändringar som stora ombyggnationer av distributionsnätet.

En exponentiell ökning i antalet solcellsanläggningar i nätet uppmärksammades de tre senaste åren. Det ökade intresset kring ämnet väcker frågan inom hur snar framtid kommer mikroproduktionen leda till att åtgärder måste vidtas och vilka eventuella ändringar ska ske gällande hur näten dimensioneras. Begreppet mikroproduktion väcker uppmärksamhet hos fler och fler bolag som distribuerar el.

I Härryda Energi:s elnät finns det idag 197 anläggningar med produktion varav 196 av dessa är mikroproduktion. Den totala energin från mikroproduktion år 2019 är 700 MWh. [2] Härryda Energi:s elhandelskunder får i dagsläget en ersättning i form av spotpriset minus 2 öre per kWh levererad ut på nätet.

## 1.2 Syfte

Detta arbete omfattar en beskrivning och analys av problemet, dvs. hur spänningen i nätet påverkas av en ökad andel mikroproduktion.

Vidare är syftet att skapa ett underlag för hur kommande installationer av solcellsanläggningar kan hanteras samt vilka möjligheter finns för att förstärka befintliga nät och hur de nya bör dimensioneras.

## 1.3 Avgränsningar

Arbetets fokus läggs mest på lågspänningsnäten, eftersom påverkan är som störst i dessa. Arbetet beskriver bland annat hur mikroproduktionen ändrar spänningen i olika anslutningar samt effektflödet i nätet, men inte vilka störningar den kan orsaka som flimmer och övertoner.

Dessa bedöms icke-signifikanta, speciellt för trefasiga system, och har beskrivits väl i tidigare studier kring ämnet [3].

Avvägning görs även gällande enfasväxelriktare då trefasväxelriktare passar mer för framtidsbilden och utgör 95 % av alla solcellsanläggningar i bolagets befintliga nät. Då solcellsmodulernas verkningsgrad och effekt varierar, enligt kapitel 2.2, kommer den uträknade effekten i detta arbete bestämmas till 1 kW/6 m<sup>2</sup>.

Det spänningsintervallet som undersöks i detta arbete ligger i enlighet med rekommendationerna och inte kraven, båda beskrivs i kapitel 2.4

## 1.4 Precisering av frågeställningen

För att följa syftet kommer följande specifika ämnen att hanteras:

- Analys och beskrivning av hur spänningen i lågspänningsnätet påverkas på grund av mikroproduktion;
- Genom mätningar och simuleringar kartlägga och undersöka vilken omfattning av mikroproduktion som kommer att medföra problem för de utvalda studieområdena och installerade skydd;
- Härleda en modell som kan användas för att identifiera enskilda lågspänningsnät kapacitet för mikroproduktion;
- För de studerade områdena bestämma graden av påverkan samt analysera och jämföra möjliga lösningar.

## 2 TEORETISK REFERENSRAM

Detta kapitel har som syfte att beskriva såväl fundamentala som fördjupande faktadelar vilka i en större eller mindre utsträckning är kunskapsgrund till utförandemetoder och de frågeställningar som ska bearbetas.

### 2.1 Mikroproduktion

Begreppet mikroproduktion är inte klart definierat. Det kan beskrivas som en mindre produktionsanläggning som kan leverera en effekt om högst 1500 kW [4].

Det kan även beskrivas som en anläggning som framställer förnybar el från samma anslutningspunkt där förbrukningen sker, har en säkring om högst 100 A samt anmälts till nätkoncessionshavaren. [5]

Mikroproduktion förknippas oftast med en producent som har ett säkringsabonnemang om högst 63 A och som producerar förnybar el vars inmatning kan ske med en effekt om högst 43,5 kW, samt att anläggningsinnehavaren inte matar in mer el i nätet än vad hen tar ut under ett år [6] [7]. Detta definierar dock inte begreppet, utan talar egentligen om att om sådana krav uppfylls skall producenten inte betala någon anslutningsavgift.

Elen som produceras förbrukas i första hand av producenten själv, vid låg egenförbrukning uppstår dock ett överskott som kan matas ut på nätet. Nätägaren har en skyldighet att installera en separat mätare, alternativt en s.k. tvåvägsmätare, i syfte att mäta överskottselen som matas in på elnätet. Mängden överskottsel fördelas sen över tiden för att bestämma ersättningen. [7]

Mikroproduktion i form av solenergi utvecklas ständigt i takt med ökande intresse. I Sverige är denna en av strategiska faktorer i strävan för att landets elförbrukning ska bestå av 100 % förnybar energi år 2040. Länder som Tyskland, Italien och Danmark är Europas ledande för denna utveckling och erfarenhet från dem anses värdefull. [8]

### 2.2 Solcellsanläggning

En solcellsanläggning består av solceller som genom koppling i serie och parallella slingor bildar en så kallad solpanel. En eller flera solpaneler kopplade i samma mönster kopplas via en optimerare in till en växelriktare. Solcellen är systemets generator och är byggd av 2 motsatta halvledande material, vars funktion är att frigöra elektroner, som formar en PN-övergång (engelska: p-n junction; ”p” för positive och ”n” för negative). När fotoner från solstrålar träffar solcellens yta bildas elektronpar nära övergången och ett elektriskt fält tvingar laddningarna att separeras till en positiv och en negativ sida vilket resulterar i att en spänningspotential uppstår. Detta möjliggör ett elektronflöde i form av en likström [9].

Beroende på typ av solpanel kan denna även fungera vid partiell skuggning. Detta eftersom om en portion av panelen skuggas, kan strömmen fortfarande passera genom en bypassdiod

och panelen fortsätta generera effekt. Solcellens effekt varierar beroende på faktorer så som solinstrålning och temperatur. För att hela effekten ska vara tillgänglig krävs en solcellsreglering, nämligen MPPT (Maximum Power Point Tracking). MPPT är optimeraren som slingor av solpaneler är kopplade via och styrs i syfte att alltid arbeta vid den effekt som kan maximalt uppnås för tillfället. [10].

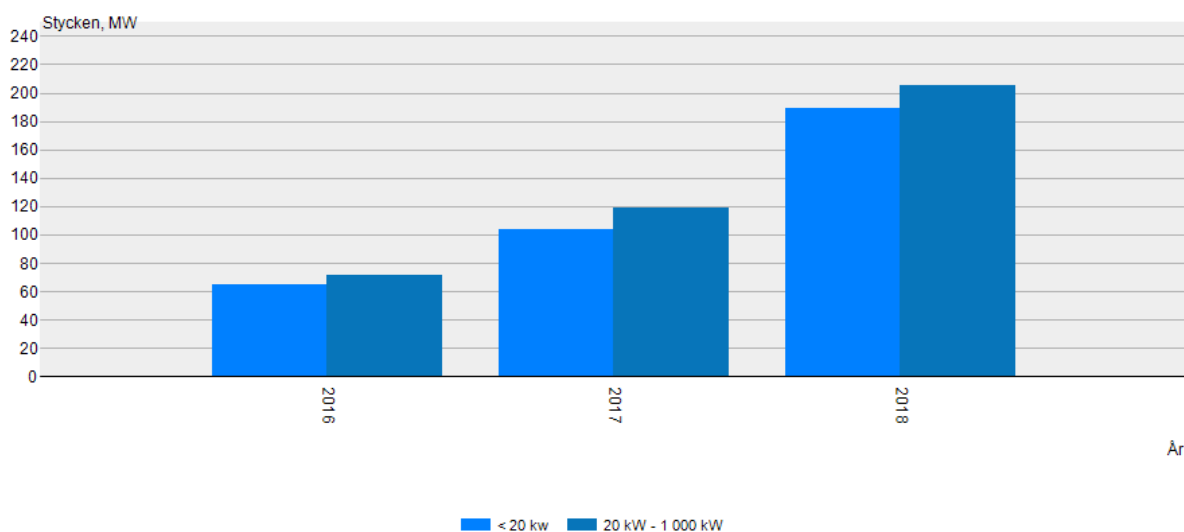
Solinstrålningen som är avgörande för produktionen i en solcellsanläggning når som mest i Sverige ett värde på omkring  $900 \text{ W/m}^2$  [11]. För solpaneler anges ofta två olika effekter, den ena berör standardiserade provningsförhållanden (STC, standardised testing conditions) där solinstrålningen beräknas till  $1000 \text{ W/m}^2$ , den andra effekten NOCT (Normal Operation Cell Temperature) med en specificerad solinstrålning på  $800 \text{ W/m}^2$  och solcellstemperatur på  $45 \text{ }^\circ\text{C}$  bedöms lämpligare för de verkliga förhållandena [10]. Beroende på typ av solceller varierar dess verkningsgrad kring 15-22% [12] och effekten, under provningsförhållanden, vilken ligger mellan 160 W – 370 W [13][14].

Såvida likströmmen från solcellsmodulerna inte ska användas i kretsar med likströmsapparater måste den strömmen omvandlas till växelström med hjälp av en växelriktare. Den inmatade likspänningen från solcellsmodulerna omvandlas till växelspänning med en verkningsgrad på 93 % – 95 % som senare matas ut till huvudcentralen (dvs det skåpet där effekt från fasskenorna fördelas till olika laster). Växelriktaren är även den enhet som mäter och analyserar data från de anslutna optimerarna för att senare skicka styrsignaler för produktionen [15]. Växelriktaren måste vara försedd med olika säkerhetsskydd i form av till exempel över-/underspänningsskydd samt ö-driftsskydd. Det första skyddet handlar om det spänningsintervallet under vilket växelriktaren får arbeta, alltså där produktionen kan ske. Detta intervall hos en växelriktare ligger mellan -15 % och +11 % av nominell spänning på 230,94 V. Skulle spänningen hamna utanför det intervallet stängs all produktion av [16]. På liknande sätt krävs ett skydd för oönskad ö-drift. Med ö-drift menas situationer där det inträffat ett fel i det allmänna distributionsnätet som leder till ett avbrott. Sådana fel kan identifieras med exempelvis fasskifts- eller frekvensderivataskydd och begränsas av intervallet 47 Hz – 51Hz. Utan ett sådant skydd skulle produktionsanläggningen fortsätta leverera el till lasten i samma anslutningspunkt och mata eventuellt överskott ut till distributionsnätet [16][17].

Allmänna intresset för produktion av förnybar energi ökar med ständig utveckling av solcellsmoduler, stabiliserade priser för de flesta anläggningstyper samt ekonomiska fördelar i form av investeringsstöd, skattereduktion och ersättning för överskottsel. Allt detta bidrar till en ökning i antalet nätanslutna solcellsanläggningar i Sverige [18].

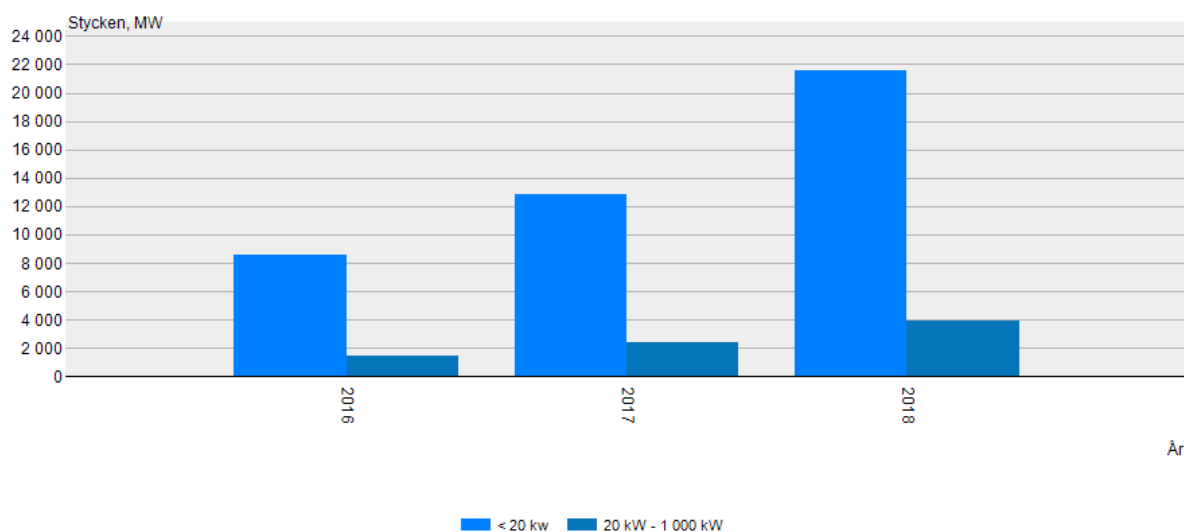
Under en 3-års period (2016-2018) har det noterats att den installerade effekten för nätanslutna solcellsanläggningar har mer eller mindre fördubblats varje år [19].

## Nätanslutna solcellsanläggningar, antal och installerad effekt, fr.o.m. år 2016 -



Figur 2.1 Installerad effekt (MW) för nätanslutna solcellsanläggningar i hela landet. Effekten 20 kW – 1000 kW tas med men det är enbart den lägre delen av intervallet som kan representera privata anläggningar då den installerade effekten sällan överstiger 20kW [19]<sup>1</sup>

## Nätanslutna solcellsanläggningar, antal och installerad effekt, fr.o.m. år 2016 -



Figur 2.2 Antalet nätanslutna solcellsanläggningar i hela landet. Effekten 20 kW – 1000 kW tas med men det är enbart den lägre delen av intervallet som kan representera privata anläggningar då den installerade effekten sällan överstiger 20kW [19]

<sup>1</sup> Figur 2.1 visar den installerade effekten och figur 2.2 antalet nätanslutna solcellsanläggningar (Axelbeskrivningen kan inte ändras då den kommer från en källa).

## 2.3 Spänningsfall

När en ledning belastas med en ström utvecklas en effekt och förluster. Förlusterna orsakas av värmen som bildas på grund av laddningen som uppstår och leder till en spänningsvariation mellan två punkter på ledningen [20].

Spänningsvariationen i ett konventionellt distributionsnät där enbart förbrukning sker kallas istället för spänningsfall och kan beräknas enligt formeln:

$$\frac{\Delta U}{U_1} = \frac{R_k * P + X_k * Q}{U_1^2} \quad (2.1) [21]$$

Där  $\Delta U$  är huvudspänningsfallet (V),  $U_1$  är huvudspänningen (V),  $R_k$  och  $X_k$  är ledningens kortslutningsresistans respektive kortslutningsreaktans ( $\Omega$ ),  $P$  och  $Q$  är den aktiva (W) respektive reaktiva effekten (VAr). Ledningens resistans och reaktans är orsakerna till spänningsfall som ökar med kabellängden och minskar med ledararean samt ledarmaterialet som kan vara aluminium eller koppar, just dessa faktorer är av största vikt när ledningarna i ett lågspänningsnät ska dimensioneras [19]. Vad som menas med att ledningar orsakar spänningsfall kan beskrivas med ohms lag:

$$\text{För växelström:} \quad U = Z * I \quad (2.2) [22]$$

Där  $U$  är huvudspänningen (V),  $Z$  är impedansen, alltså summan av resistansen och reaktansen ( $\Omega$ ) och  $I$  är strömmen (A). Eftersom ledningens impedans är konstant, om strömmen som lasten kräver ökar måste även spänningen öka vilket innebär att spänningsnivån vid källan måste vara högre än den vid lasten. På samma sätt skapas spänningsökning vid mikroproduktion. En solcellsanläggning producerar en viss mängd effekt, om den effekten inte kan förbrukas närmast punkten måste den matas ut på nätet, för att det ska vara möjligt måste växelriktarens spänning öka proportionellt till avståndet till andra punkter vilket också medför en spänningsökning för anläggningsägaren.

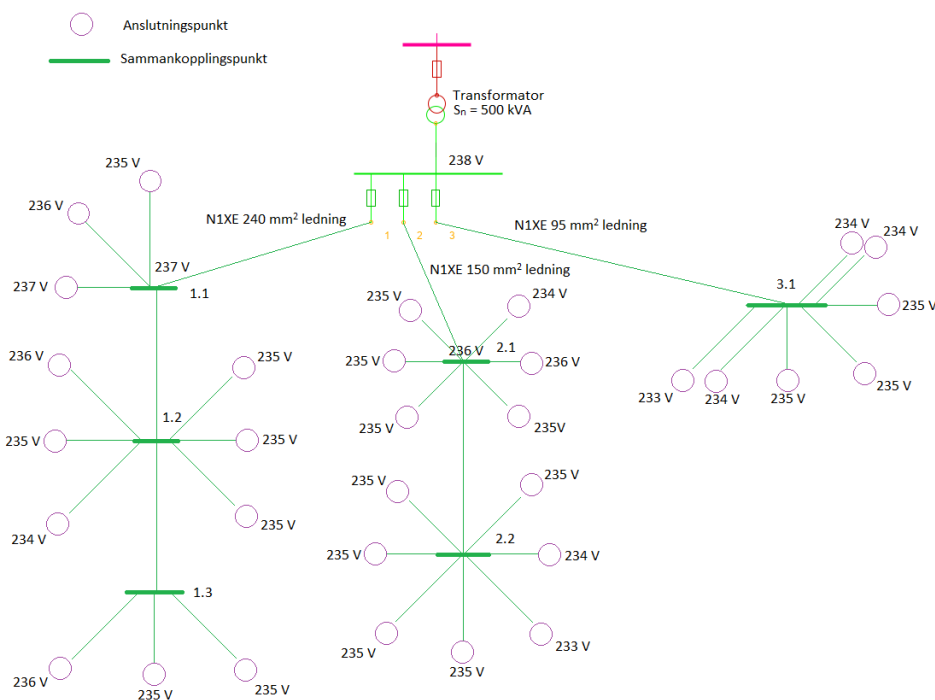
Den andra orsaken till att spänningsfall uppstår i lågspänningsnätets centrum är pga. transformatorns tomgångs och driftförluster [23]. Trots att transformatorns kortslutningsimpedans är relativt liten och minskar med effektstorleken så är det ett stort effektlöde som distribueras vilket kan ackumulera till en icke försumbar nivå. Detta gäller särskilt när spänningen den matas med överdimensioneras för att klara av hög last, vilket lämnar en mindre spänningsmarginal för situationer med låg förbrukning och hög mikroproduktion [21].

## 2.4 Långsamma spänningsvariationer

Spänningen kommer att variera vid olika laster, perioder och tiden på året. Det finns särskilda krav på hur mycket spänningen får avvika från referensvärdet. Med referensvärdet menas generellt nominell systemspänning och för lågspänningsnät ligger denna på 400 V trefas eller 230,94 V fasspänning. Långsamma spänningsändringar, vilka uppkommer just vid exempelvis mikroproduktion definieras av Energimarknadsinspektionen [24] enligt följande:

2 § Under en period motsvarande en vecka ska förekommande tiominutersvärden av spänningens effektivvärde vara mellan 90 procent och 110 procent av referensspänningen.

Detta innebär att det tillåtna spänningsintervallet i ett lågspänningsnät ligger mellan 208 V – 254 V och med hänsyn till gränsvärden för en växelriktare innebär det att vid hög produktion möts kraven inte längre redan innan produktionen stoppas. Utöver kravet på långsamma spänningsvariationer finns även rekommendationer gällande för två extremfall som beroende på årstid och tid på dagen kan förekomma. De två extremfallen är maximal belastning med ingen produktion samt minimal belastning med full produktion, i de fallen är det rekommenderade avvikelsevärde  $\pm 5\%$  av referensspänningen [24] vilket innebär ett intervall mellan 219,5 V – 242,5 V och speglas bättre som huvudspänning på 380 V – 420 V. Nedan bild illustrerar hur spänningen varierar i ett nät där enbart förbrukning sker.



Figur 2.3 Illustration av ett konventionellt lågspänningsnät under hög last. Bilden visar hur spänningen varierar i de olika sammankopplings- (gröna, tjocka sträck) och anslutningspunkterna (lila cirklar) [26]

## 2.5 Hög belastning

Varje distributionsnät planeras och byggs för att kunna leverera effekt med acceptabel spänning till alla kunder i nätet. För att dimensionering av nätet skall vara möjlig måste det förväntade värdet på maximal förbrukning vara känt, ett sätt att uppskatta den maximala effekten som ska levereras är Velanders metod. Metoden är lämplig för bland annat samhällsdistribution, om slutkundernas energiförbrukning per år kan uppskattas kan de värden användas för att beräkna belastningen enligt formeln:

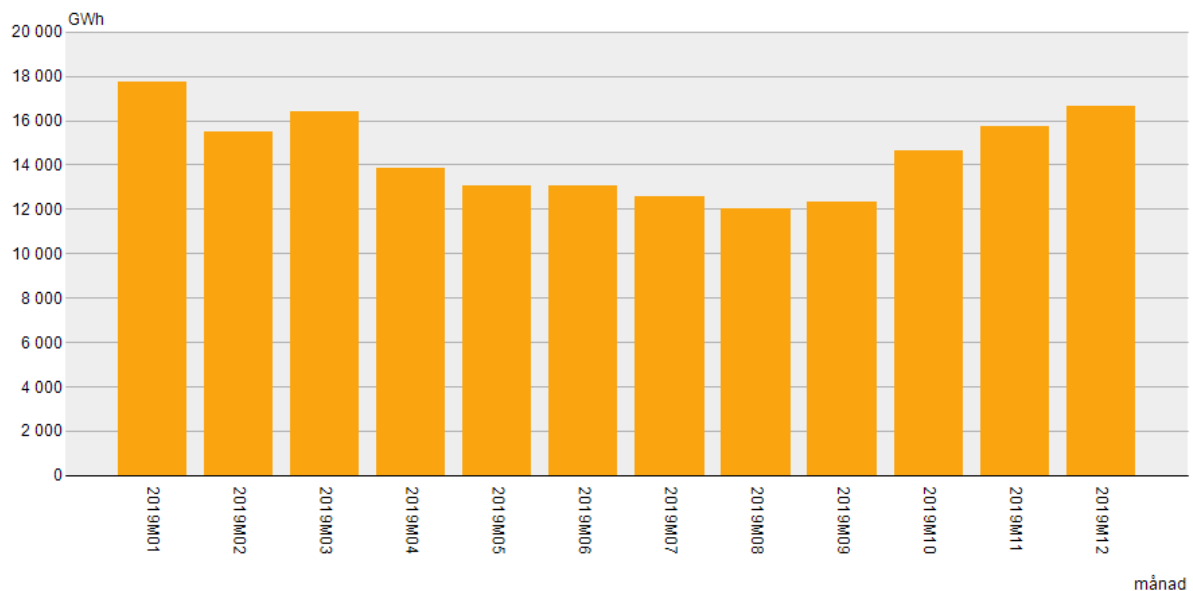


$$P=k_1*W+k_2\sqrt{W} \quad (2.3) [27]$$

Där P är den sammanlagrade belastningen (kW), W är slutkundernas förbrukning per år (kWh/år),  $k_1$  och  $k_2$  är Velanderkonstanter och bestäms av hustyp och uppvärmningssätt.

Den högsta belastningen inträffar under vinterårstiden då mycket uppvärmning krävs på grund av svagt solljus och låga temperaturer vilket också innebär att mikroproduktion är som lägst.

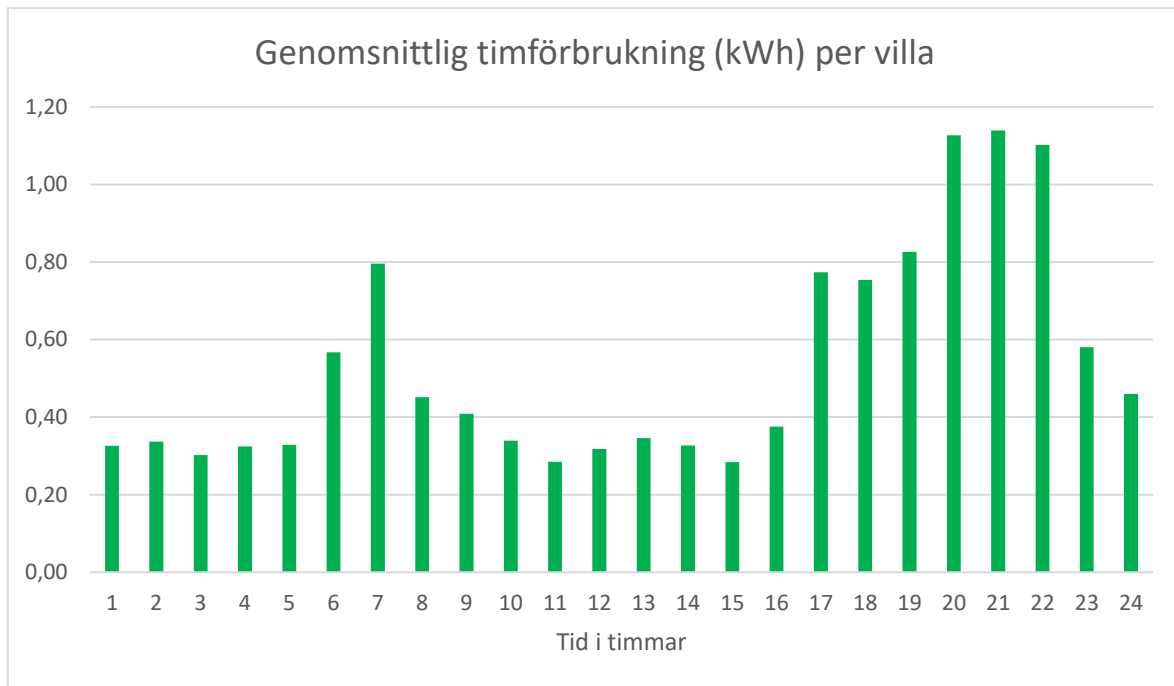
Elanvändning, GWh efter månad. summa förbrukad el.



Figur 2.4 Elanvändning för alla bostäder i Sverige 2019 [28]

## 2.6 Låg belastning

Låg belastning är den lägsta möjliga förbrukningen ett hushåll kan ha, vilket inträffar under sommarårstiden och då speciellt under dagens varmaste timmar. Med detta avses situationer där ingen är hemma vilket medför att elförbrukningen kommer enbart från apparater som kräver el alla timmar under dygnet, alltså kyl, frys, eventuell luftkonditionering samt standby-apparater i form av TV, datorer etc. Sådan förbrukning bedöms totalt hamna på ca 0,3 kW [29] vilket kan leda till stora spänningsökningar i nätet då produktionen från solcellsanläggningar är som störst och den effekten som i det fallet inte förbrukas i anslutningspunkten vänder åt motsatt håll då den måste ta vägen till andra ställen genom transformatorstationen.



Figur 2.5 Genomsnittlig timförbrukning av el (kWh) i ett villaområde en varm sommardag (juni 2019) [29]

## 2.7 Överlastskydd och utlösningvillkor

Formeln för beräkning av aktiv och reaktiv effekt kan skrivas som:

$$P = \sqrt{3} U * I * \cos\varphi \Leftrightarrow I = \frac{P}{\sqrt{3} U * \cos\varphi} \quad (2.4) [30]$$

$$Q = \sqrt{3} U * I * \sin\varphi \Leftrightarrow I = \frac{Q}{\sqrt{3} U * \sin\varphi} \quad (2.5) [30]$$

Där  $U$  är huvudspänning (V) och  $\cos\varphi$  samt  $\sin\varphi$  är reella och imaginära delen av strömmen  $I$  (A),  $\varphi$  är fasförskjutningsvinkeln mellan spänning och ström och anger om lasten är av kapacitiv eller induktiv karaktär.

Insättning av formel (2.4) och (2.5) i (2.1) ger:

$$\Delta U = \sqrt{3} R_k * I * \cos\varphi + \sqrt{3} X_k * I * \sin\varphi \quad (2.6)$$

Vilket visar att spänningsfallet är proportionerlig mot strömmen i ledaren. Ju mer ström i ledningarna desto högre effekt och spänningsvariation. I en belastad ledare bildas värme, tåligheten för olika värmenivåer skiftar mellan olika typer av ledarisation. Om temperaturen blir för hög kommer kabelisationen att börja smälta, alltså skadas. Istället för att använda sig av maximalt tillåten temperatur en ledare kan arbeta under sätts istället gränsen i form av maximal ström som får passera genom den, nämligen märkströmmen. För att undvika att ledningen förstörs vid för hög last installeras ett överlastskydd, oftast i form av en säkring, vilken ställs in så att den löser ut vid ström lägre än märkströmmen. På samma sätt som hos en ledare uppstår det alltså en temperaturändring för specifik ström som orsakar att säkringen smälter och löser ut [31].

I matande ledningar, mellan en transformator och anslutningspunkter, utöver överlastskydd skall en sådan säkring även fungera som ett kortslutningsskydd. [32] Om ett jordfel inträffar någonstans på gruppen i ett lågspänningsnät skall säkringen bryta strömflödet inom 5 sekunder. Skyddet dimensioneras efter den lägsta kortslutningsströmmen vilken uppstår i en punkt längst ut på ledningen [33]. Om utlösningvillkoret inte uppfylls måste säkringen bytas till en mindre och om säkringens storlek är mindre än den strömmen ledningen belastas med måste ledningen ersättas med en grövre ledare.

## 2.8 Acceptansgränsen

Varje lågspänningsnäts funktionalitet påverkas av en mängd faktorer. Krav och rekommendationerna för spänningsvariationer beskrivna i kapitel 2.4 kan ses som en styrlinje för distributören för att säkerställa att elen som levereras till slutkunder är av acceptabel kvalitet. Som framkommer av formlerna 2.1 och 2.6 påverkas spänningsvariationen av flera faktorer som i sin tur samspelar med varandra. Ett starkt, konventionellt nät, som dimensionerats med grova ledningar och består av korta sträckor mellan transformator och slutkunder kommer med störst sannolikhet begränsas enbart av den maximala effekt som tillåts genom transformatorn, alltså dess märkeffekt. I ett svagt nät med höga impedansvärden kommer däremot spänningen att hamna utanför det angivna intervallet långt innan märkeffekten nås<sup>2</sup>.

Genom att ansluta fler generatorer i form av mikroproduktion tillkommer en ny faktor, inverkan av effektflöde från flera källor. Effekt genererad från en solcellsanläggning kommer att förbrukas först av källor i samma anslutningspunkt samt därefter av andra närliggande punkter vid eventuellt överskott. Eftersom sträckan är kortare kommer spänningsfallet minska, alternativt öka i förhållande till värdet vid ingen produktion. Med ökande andel nätanslutna solceller kommer den ändringen att gradvis stiga i märkbarhet och som resultat påverka funktionaliteten, gränsen för en acceptabel nivå av den påverkan kallas acceptansgränsen (engelska: hosting capacity). [34]

## 2.9 Spänningsreglering

För att säkerställa en god elkvalité måste spänningen som elen överförs med justeras så att den uppfyller krav beskriven exempelvis i kapitel 2.4. Det finns olika metoder för reglering beroende på graden av variationen och de aktuella omständigheterna.

---

<sup>2</sup> Oftast är transformatorn dimensionerad så att en effektmarginal finns för att framtida kunder ska kunna ansluta samt att undvika att den arbetar under maximal kapacitet.

### 2.9.1 Lindningskopplare och omsättning

En distributionstransformator omvandlar spänning genom lindningar som går i dess kärna. Primär och sekundär sida har ett specifikt antal lindningsvarv och förhållandet mellan de varven är omsättningen. Spänningen regleras i enlighet med:

$$\text{Omsättning:} \quad \frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1} \quad (2.7) [35]$$

Där  $U_1$  och  $U_2$  är spänningen på primära respektive sekundära sidan (V),  $N_1$  och  $N_2$  är antalet varv på primära respektive sekundära sidan. För varje transformator anges dess märkspänning, exempelvis 10 / 0,4 kV vilket innebär att transformatorn omvandlar 10 kV från högspänningssidan ner till 400 V på lågspänningssidan, detta förhållande kan variera beroende på den inställningen som valts för omsättningskopplaren. Omsättningen för en distributionstransformator kan justeras oftast för 5 olika steg där nummer 3 är märksteg och gäller för märkspänning. Med varje steg ändras spänningsomsättningen med  $\pm 2,5\%$  vilket ger ett omsättningsintervall på  $\pm 5\%$  totalt. Steg 1 och 5 ger den högsta respektive lägsta omsättningen. Om en 10 / 0,4 kV transformator som står på steg 3 matas med en högspänning på 10 250 V skulle det ge en lågspänning på 410 V och kan därmed ställas om till steg 2 för att justera spänningen tillbaka till det önskade värdet på 400 V.

Omsättningen kan justeras manuellt, fjärrstyrt eller automatiskt. I de två första fallen måste det ske under ett avbrott vilket kräver både arbete och planering, automatisk justering innebär att istället används en lindningskopplare som reglerar spänningen så att den hålls inom det angivna intervallet. Fjärrstyrt och automatisk justering är en extra kostnad [36].

### 2.9.2 Nätförstärkning

För varje anslutningspunkt i en station dimensioneras ledningar utefter de krav som måste uppfyllas för att god kvalitet ska kunna säkerställas. Ledningarnas resistiva, reaktiva och induktiva egenskaper påverkar det spänningsfallet som uppstår vid överföring av effekt. Vid eventuella förändringar i nätet, exempelvis vid ökande andel lokal mikroproduktion kan de ledningarna som dimensionerats tidigare visa sig inte längre vara tillräckliga och behovet av byte till grövre ledararea kan uppstå.

### 2.9.3 Reaktiv effektkompensering

Den effekten som förs över med ledningar kallas för skenbar effekt som är summan av aktiv och reaktiv effekt. Aktiv effekt är den önskade, användbara effekten medan den reaktiva effekten förknippas ofta med en förlust och ska helst minimeras. Eftersom många laster samt ledningar är både resistiva och induktiva kräver den induktiva delen en reaktiv effekt. Därmed behövs den reaktiva effekten för att kunna transportera den aktiva.

Vid överföring i högspänningsnätet kan den reaktiva effekten inte överföras allt för långa sträckor då den orsakar ett för stort spänningsfall, i det syfte används bland annat generatorer

och kraftelektronik placerade längs med ledningarna som kan både konsumera och producera den reaktiva effekten i syfte att kompensera för den reaktiva effekten som krävs för överföring. Genom att kompensera för den reaktiva effekten görs mer utrymme för den aktiva effekten och spänningsfallet minskar [37].

I ett lågspänningsnät med mikroproduktion kommer spänningen att öka signifikant om produktionen är maximal och förbrukningen är låg. Solcellsanläggningarnas växelriktare är inställda på att arbeta under effektfaktor 1 då den aktiva effekten är som tidigare beskrivet den användbara. Eftersom dagens växelriktare är mer avancerade är de ofta överdimensionerade för att kunna producera maximal installerad effekt med effektfaktor 0,9. Därmed kan växelriktaren användas i syfte att reglera spänningen genom att producera både aktiv och reaktiv effekt. Med en överdimensionerad växelriktare kan alltså elkvalitén förbättras utan att medföra en kostnad för varken ägaren eller distributören. Nackdelen är dock att det behöver överföras mer effekt i form av förluster i nätet vilket snabbt kan överskrida transformatorns märkeffekt [36].

## 3 METOD

Detta kapitel avhandlar de steg och verktyg som utförts respektive använts under arbetet.

### 3.1 Tillämpad teori

För att kunna undersöka hur mikroproduktion påverkar egenskaper hos ett lågspänningsnät samt bestämma hur graden av den påverkan stiger med ökande andel solcellsanläggningar måste de faktadelarna beskrivna i kapitel 2 anpassas och tillämpas för att uppnå detta syfte.

I syfte att skapa en klar bild av påverkan antas beräknings- samt simuleringsscenario ha egenskapen av maximal produktion och minimal belastning. Eventuella förluster elimineras även för beräkning genom val av effektfaktor till 1, alltså kommer all produktion endast vara aktiv effekt.

Formlerna 2.1 samt 2.6 är två sätt att beräkna spänningsfallet, dock vid ovannämnd antagande resulterar detta istället i en spänningsökning. Denna kan beräknas om de resterande variablerna är kända. Eftersom mikroproduktionens påverkan beror på mängden installerad effekt är det lämpligt att bestämma gränsen just för denna faktor, vilket kräver att formeln modifieras. Rekommendationen för spänningsvariation ger redan en av variablerna som krävs för att bestämma spänningsskillnaden enligt:

$$\Delta U = U_1 - U_2 = U_1 - U_n \quad (3.1) [38]$$

Där  $\Delta U$  är spänningsskillnaden (V),  $U_1$  är den övre spänningsgränsen (V) och  $U_2$  känd referensspänning (V) och motsvarar  $U_n$ . Eftersom  $U_1$  och  $U_n$  är kända är det enkelt att bestämma spänningsskillnaden.

Utöver värden på spänningsnivåer krävs det att värdet på kortslutningsimpedansen är känd, det värdet kan beräknas enligt följande:

$$\text{Transformator:} \quad z_{\text{trafo}} = z_k * \frac{U_n^2}{S_n} \quad (3.2) [39]$$

$$\text{Kabel:} \quad z_{\text{kabel}} = R_k + jX_k \quad (3.3) [39]$$

Där  $z_k$  är transformatorns kortslutningsimpedans ( $\Omega$ )  $U_n$  är nominell spänning (V), och  $S_n$  är märkeffekt (kVA) samt  $z_{\text{kabel}}$  är kabelns kortslutningsimpedans ( $\Omega$ ). Impedansvärden för detta arbete är dock kända från källa som beskrivs senare.

Med kända spännings-, impedansvärden samt att reaktiv effekt elimineras då det enbart produceras aktiv effekt kan den maximala trefaseffekten  $P_{\text{max}}$  beräknas enligt:

$$P_{\text{max}} = \frac{\Delta U * U_n}{R_k} \quad (3.4)$$

För att erhålla den maximalt tillåtna effekten, i det fallet för trefasigt ansluten produktion, måste resistansvärdet för lågspänningsnätets respektive grupper vara känd. Detta beräknas med ekvivalent schema, ett sätt att omvandla de enskilda lasterna till en gemensam som erhålls enligt:

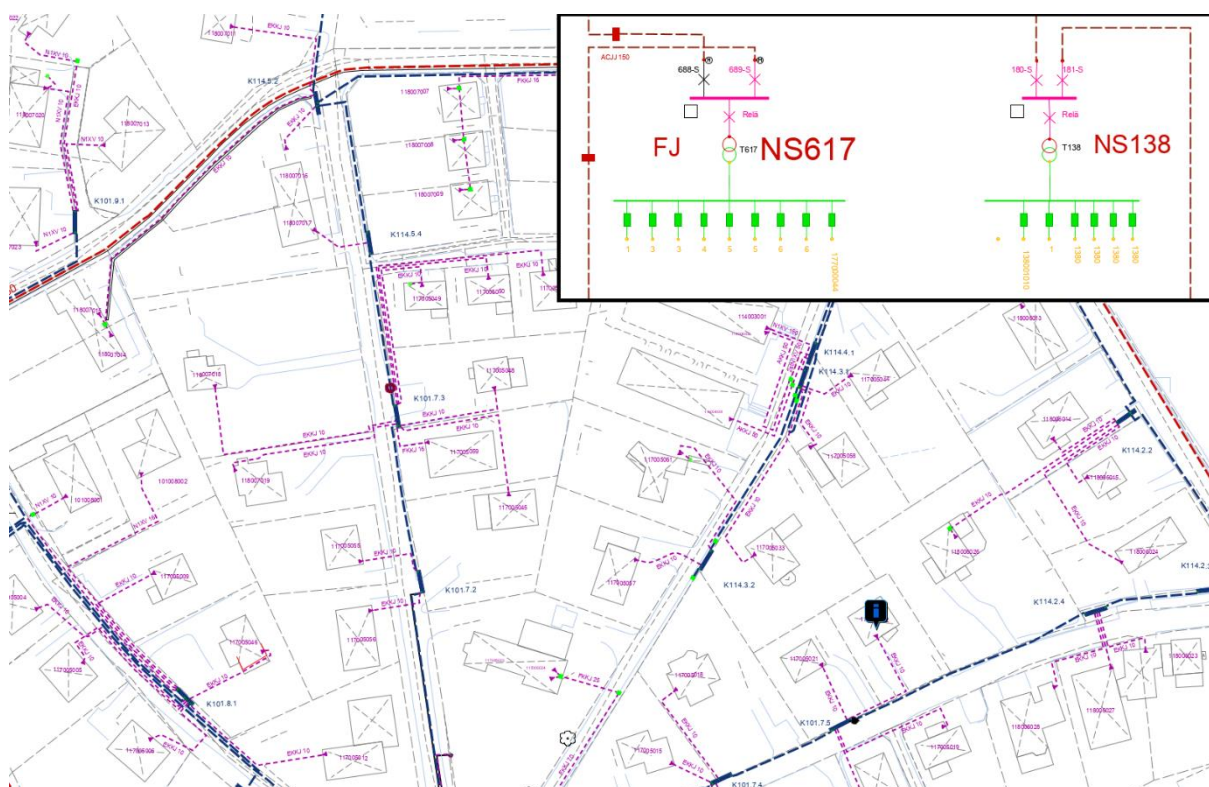
Last i serie:  $R_{ekv} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots$  (3.5) [22]

Last i parallellkoppling:  $R_{ekv} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots}$  (3.6) [22]

Där  $R_{ekv}$  är den ekvivalenta lasten ( $\Omega$ ), alltså summan av de enskilda laster  $R_X$  ( $\Omega$ ), där X är de olika punkterna.

## 3.2 dpPower

Som beräknings- och simuleringsverktyg används programmet dpPower. Det har utvecklats av företaget Digpro på platformen dpSpatial och är en elapplikation för nätinformationssystem (NIS). Programmet gör det möjligt för användaren, i det fallet Härryda Energi, att skapa en fullständig replik av hela deras distributionsområde i form av en karta eller schema.

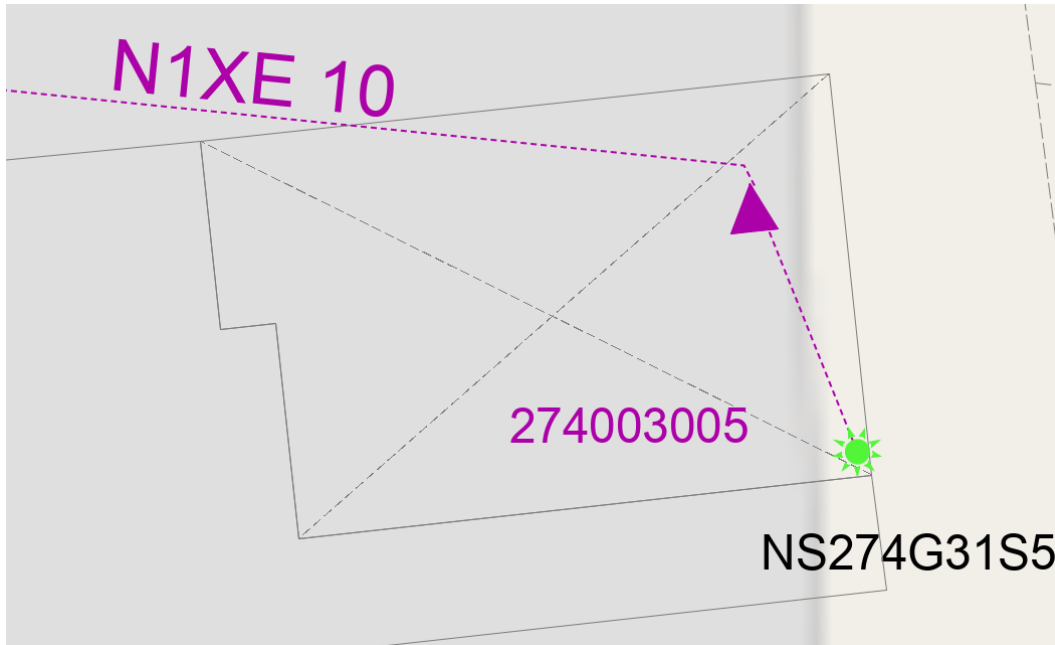


Figur 3.1 Bild på arbetsytan i dpPower, karta över lågspänningsnät samt en bild av schemavyn (uppe till höger), de gröna nummerade sträckan är nätstationens utgående grupper

För att kunna skapa en bild av det verkliga området erbjuder programmet ett stort utbud av tjänster, bl.a. kommunala kartor, möjlighet att placera, koppla och redigera elnätets alla möjliga komponenter, utföra beräkningar för allt från specifika områden under bestämda förhållanden till fullständiga beräkningar av hela nätet.

Varje användare kan skapa eget förändrings sätt, en arbetsvy, som antingen kan vara självständig eller kommer att innehålla eventuella uppdateringar som görs av andra användare då dpPower är en webbklient.

Beräkningar och simuleringar utförs med hjälp av dpPower Analyzer, ett verktyg som hantlar inställda värden från respektive komponenter som tas med i beräkningen och rapporterar alla tänkbara resultat.



Figur 3.2 Bilden visar en solcellsanläggning (grön solsymbol) kopplat till en anslutningspunkt (lila trekantssymbol) som matas med en N1XE 10mm<sup>2</sup> –ledning.

### 3.3 Simulering och valda områden

I syfte att undersöka hur ökande andel solcellsanläggningar kommer påverka ett lågspänningsnätets funktionalitet utförs simuleringar för tre olika nät. De utvalda lågspänningsnäten väljs med hänsyn till olika egenskaper vilket kommer att ge olika resultat och grad av påverkan.

Simuleringar och beräkningar utförs med hänsyn till låg last. I kapitel 2.6 är det angivet att den lägsta förbrukningen ett hushåll kan ha under en varm sommardag ligger på ungefär 0,3 kW. I dpPower Analyzer finns en inställning för beräkning där lasten kan baseras på transformatorns märkeffekt, dvs. en procentuell andel av vad den kan distribuera. Förbrukningen 0,3 kW multipliceras med antalet anslutna kunder och den transformatorbaserade lasten ställs in utefter det erhållna värdet på låglastförbrukning.

Det som anges som matning från högspänningssidan är värden från av företaget tidigare utförda impedansberäkningar för hela distributionsnätet. Dessa värden är kontrollerade och stämmer väl överens med det som kan noteras i företagets bevakningsenhet.

Förberedande arbete inför simuleringar består av ett antal steg:

1. Med hjälp av kartbilden och mätverktyget mäts alla takytor på befintliga hushåll för respektive nät. Hus som helt eller till stor del är skuggade simuleras ej som mikroproducenter.



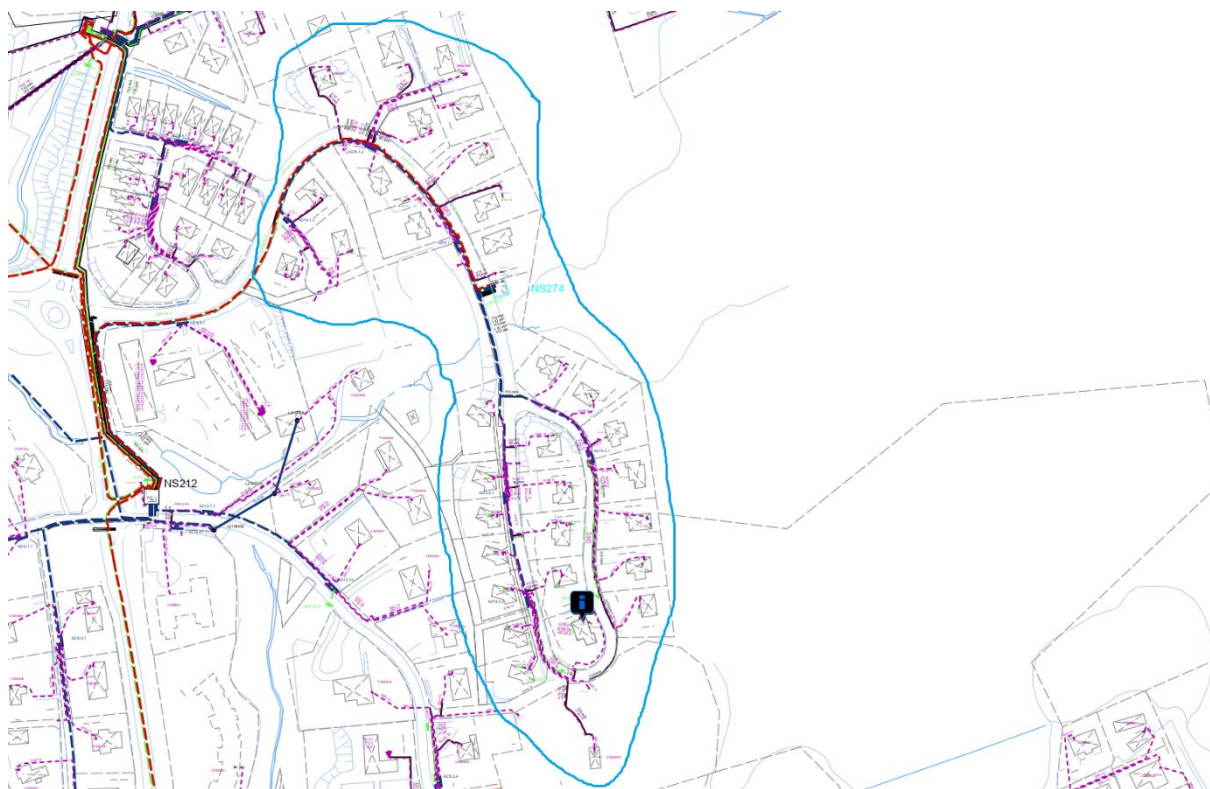
2. Data förs in i ett Excel-ark där utifrån erhållna ytor beräknas den effekten som är möjlig att installera, mängden effekt per kvadratmeter takyta är förbestämd i kapitel 1.3 till 1 kW / 6 m<sup>2</sup>.
3. Solcellsanläggningar för respektive hushåll placeras i arbetsytan och kopplas till anslutningspunkten (som i figur 3.2).
  - 3.1. Effekten för solcellerna ställs in utefter beräkningen med takytor.
  - 3.2. Effektfaktorn ställs in till 1.
  - 3.3. Faskoden ställs in till L1-L2-L3-N (Trefas) med obalansskydd.
4. Därefter utförs simuleringsserie med förinställda beräkningsdata och andelen anslutna solceller ökar med 25 % per simulering.
5. Resultat från simuleringarna sammanställs och analyseras.

### 3.3.1 Lågspänningsnät NS274

Område NS274 är en nybyggnation (år 2014) och utgör ett exempel på hur nya nät för mindre villaområden kan dimensioneras. Lågspänningsnätet matas med N1XE 90-240 mm<sup>2</sup> aluminiumledningar som bildar 3 utgående grupper på sammanlagt 33 anslutna kunder som är potentiella mikroproducenter. Trots att nätet bedöms som starkt kan det vara en påtaglig risk för en spänningsökning orsakat av ett stort effektlöde pga. av mikroproduktionen då takytorna är stora.

Nätets kärna är en 11 kV / 0,42 kV transformator med märkeffekt på 500 kVA. Lindningskopplaren står på läge 4 och matas med 10 598 V vilket motsvarar 238 V på lågspänningssidan vid hög last (240 V vid tomgång), den lägsta spänningen hamnar på 233 V i en anslutningspunkt på grupp 2.

8 kunder i det området är i dagsläget mikroproducenter.



Figur 3.3 Översiktsbild för lågspänningsnät NS274. Den blå linjen avgränsar området.

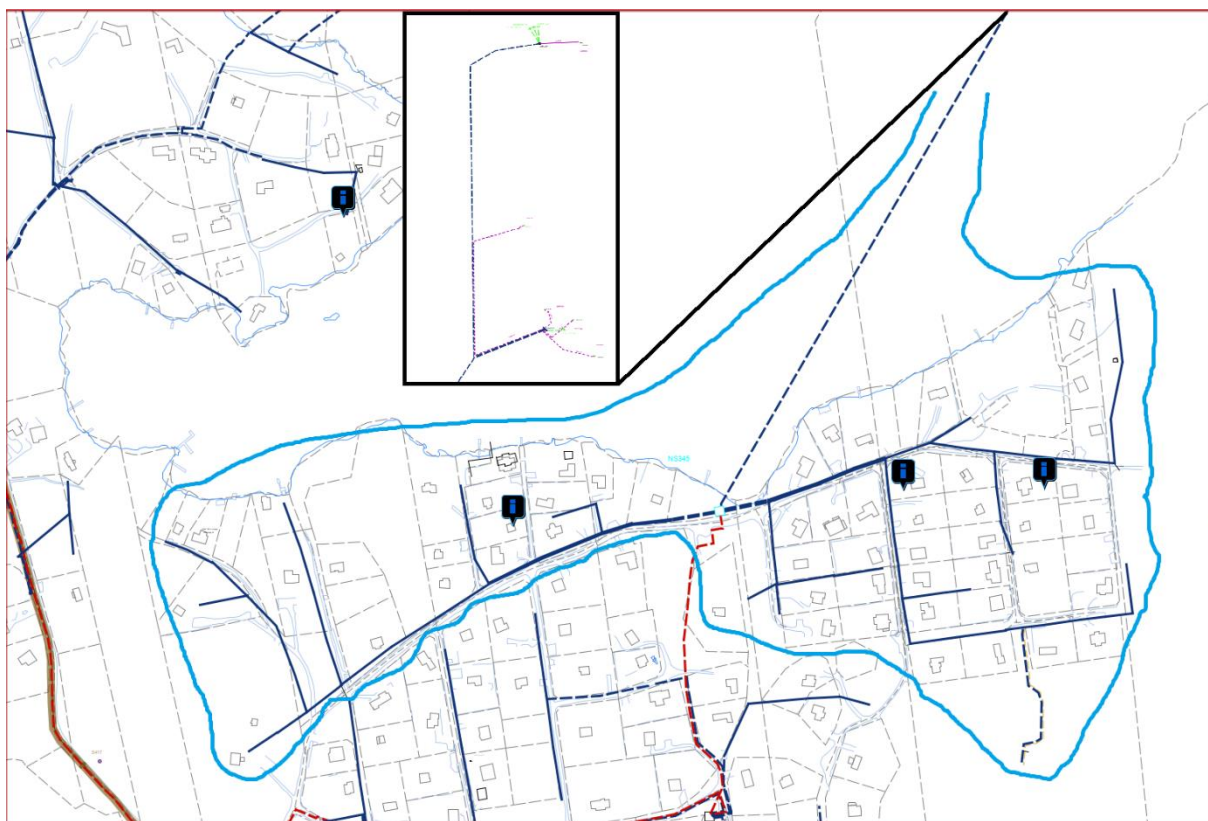
Detta område väljs även för tillämpning av gränsvärde modellen senare i kapitel 4.4 enligt kapitel 3.1 dock med lindningskopplare på läge 3 i syfte att erhålla beräkningar som visar mer omfattande värden<sup>3</sup>.

<sup>3</sup> Vid läge 4 skulle spänningen komma närmare den övre gränsen på 242,5 V vilket på grund av ett lägre mellanfall ger mindre detaljerade resultat i uträkningen.

### 3.3.2 Lågspänningsnät NS345

NS345 valdes för att representera ett relativt svagt nät som består nästan i helhet av långa ALUS 50mm<sup>2</sup> luftledningar med ledare av aluminium vilket ger höga impedansvärden. Från lågspänningsskenan matas 6 utgående grupper varav en grupp på 5 kunder matas med en N1XE 240mm<sup>2</sup> kopparledning som är ca 1,2 kilometer lång.

Effekten i detta område kommer från en 10kV / 0,4V transformator med märkeffekt på 300 kVA, där lindningskopplare står på märksteg 3. I nätet finns det 69 anslutningspunkter varav 66 är hushåll och 61 är potentiella mikroproducenter. Transformatorn matas med 10 391 V på högspänningssidan vilket vid hög last ger 234 V på lågspänningsskenan (240 V vid tomgång) och den lägsta spänningen ifrån en simulering hamnar på 205 V i en anslutningspunkt på grupp 6.



Figur 3.4 Översiktsbild för lågspänningsnät NS345. Den blåa linjen avgränsar området och den svarta fyrkanten är fortsättningen på den 1,2 km långa ledningen.

### 3.3.3 Lågspänningsnät NS239

Det tredje området som simuleras är ett starkt nät med mestadels korta sträckor mellan transformatorn och anslutningspunkterna. Effekten levereras från en 10 kV / 0,4kV transformator på 800 kVA och genom AKKJ 150mm<sup>2</sup>/41 aluminiumledare. Däremot saknar nätet utrymme för spänningssänkning i transformatorn då lindningskopplaren står på läge 1, med en matning

på 10 508 V är värdet på lågspänningssidan 228 V vid hög last (231 V vid tomgång) och den lägsta spänningen hamnar på 223 V i en anslutningspunkt på grupp 2. I nätet finns det 80 anslutningar varav 75 är hushåll som är potentiella mikroproducenter.

I dagsläget finns det här endast en kund som har installerat en solcellsanläggning.



Figur 3.5 Översiktsbild för lågspänningsnät NS239. Den blåa linjen avgränsar området.

## 4 VERKLIGHETSSCENARION

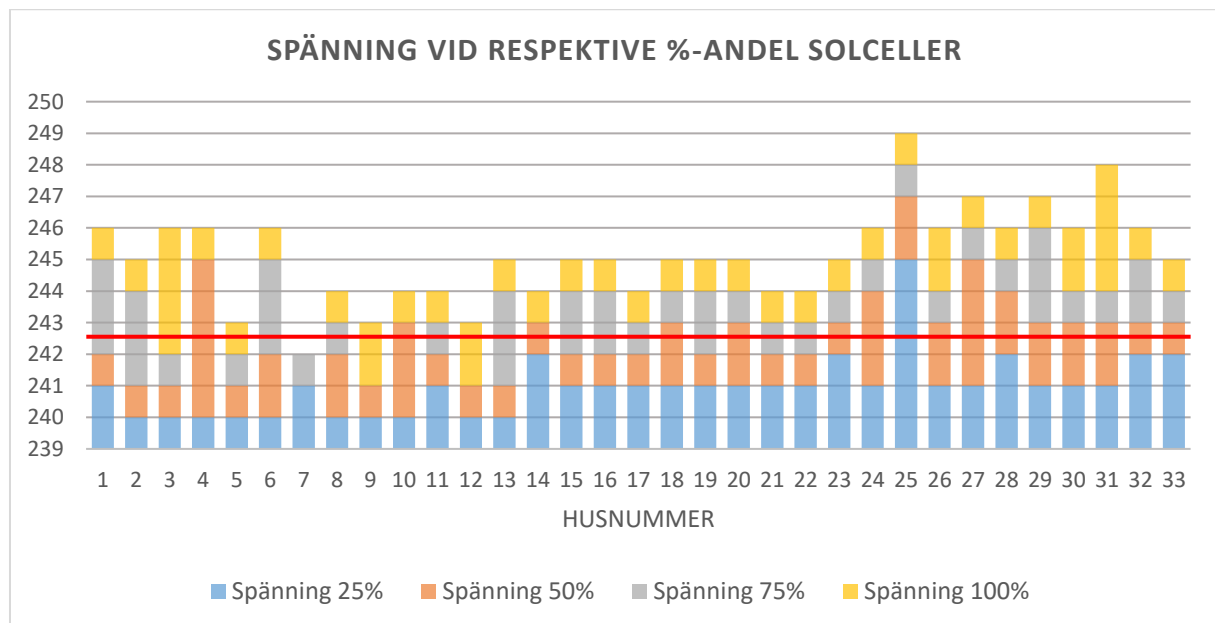
I detta kapitel presenteras de resultaten som kommer från simuleringar av verklighetsscenario för de tre lågspänningsnät beskrivna i kapitel 3.3

### 4.1 NS274

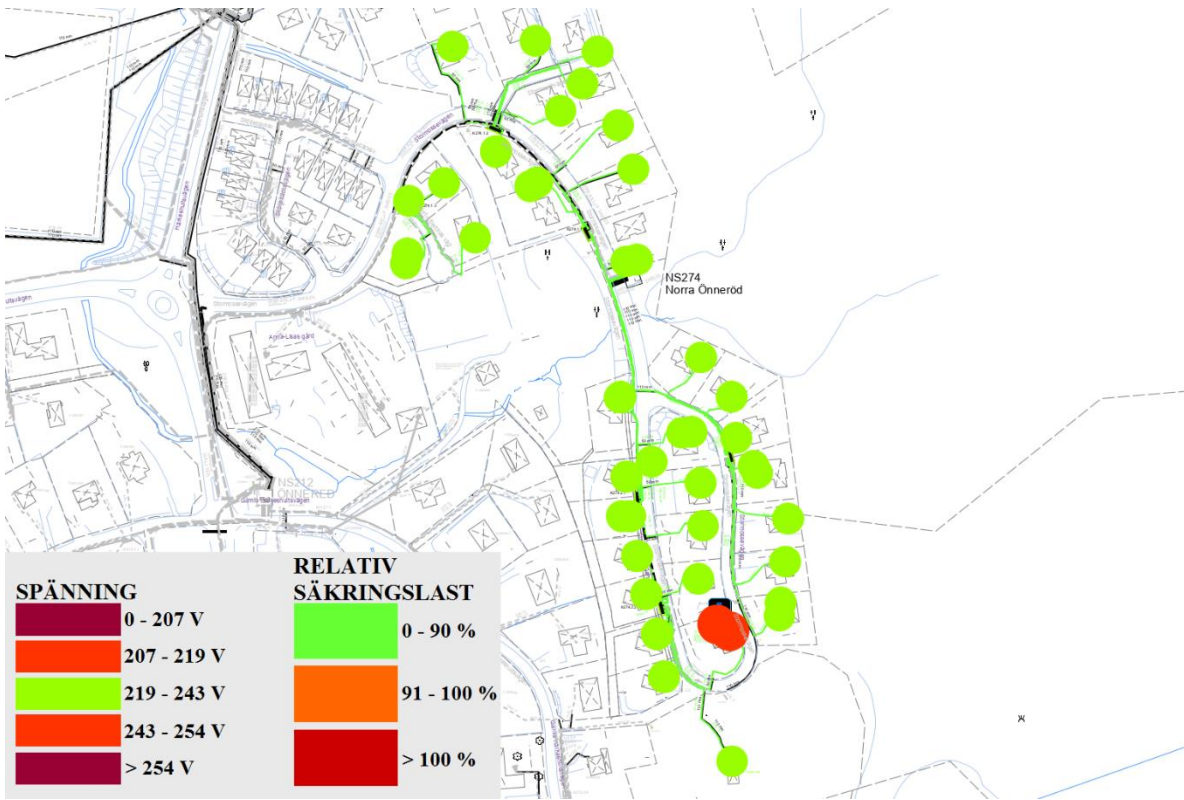
För lågspänningsnät NS274 överskrids den övre spänningsgränsen först när hälften av anslutna kunder installerar solcellsanläggningar. Det noteras dock att spänningen hos en av anslutningspunkterna hamnar utanför gränsen redan vid 25% av maximal produktion, den punkten är vid detta tillfälle då en producent och är med hänsyn till impedans den svagaste punkten i nätet.

Vid maximal produktion i alla punkter produceras en aktiv effekt på 314,6 kW varav 9 kW förbrukas och 6 kW blir till förluster. Överskottet på 299,6 kW motsvarar 60% av transformatorns märkeffekt. Den maximala spänningen beräknas till 249 V i en anslutningspunkt på grupp 2, matande ledning N1XE 95 mm<sup>2</sup> belastas med en ström på 102,7 A vilket motsvarar 39,5 % av dess märkström men är högre än den installerade säkringen på 100 A vilket innebär att risk finns för att skyddet löser ut för den linjen.

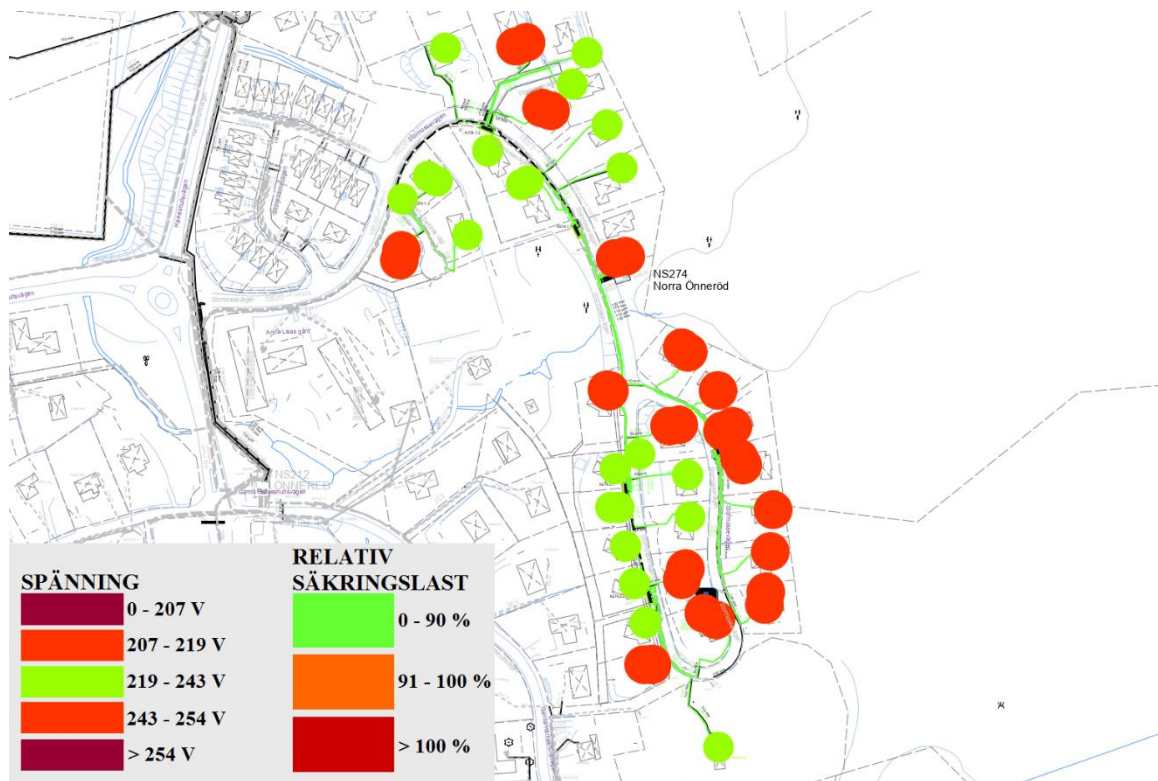
Detta nät bedöms vara ett starkt nät och det som är den största orsaken till för hög spänning är inställningen på lindningsomkopplaren som ger en tomgångsspänning på 240 V. Nedan följer ett diagram och bilder som beskriver hur spänningen påverkas vid en ökande procentandel produktion.



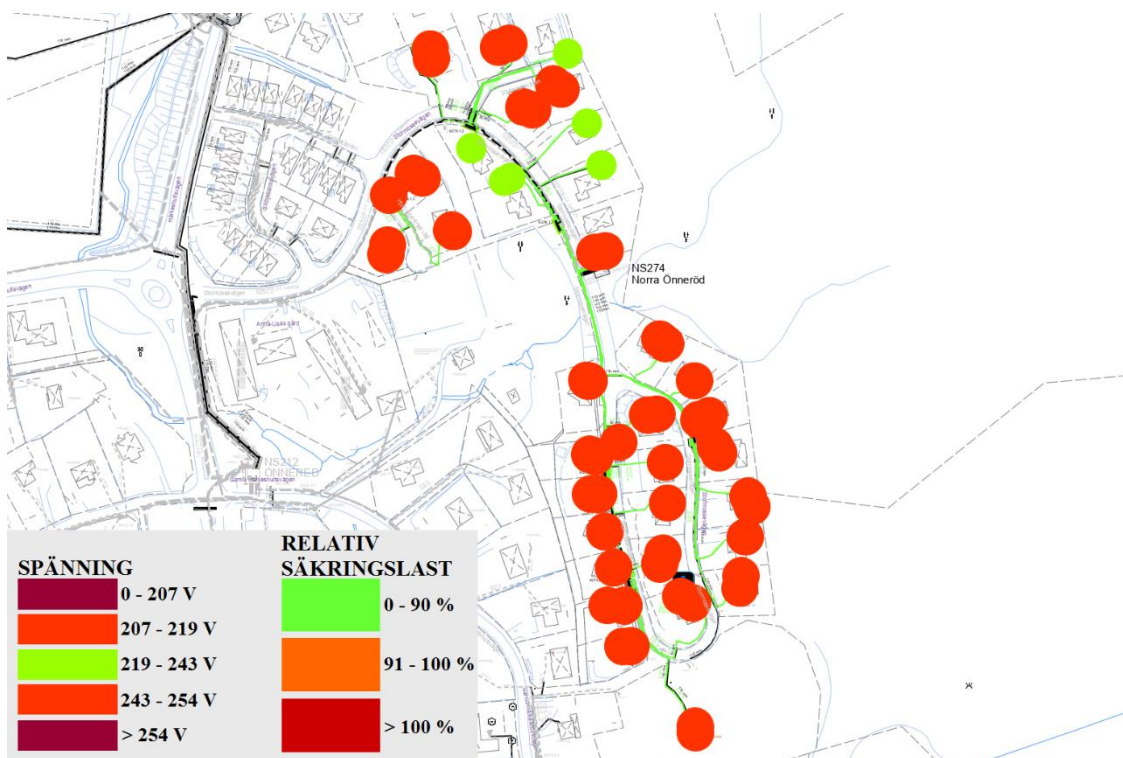
Figur 4.1 Spänningsnivåer för lågspänningsnät NS274 vid respektive %-andel installerade solcellsanläggningar. Det röda sträcket representerar den övre spänningsgränsen på 242,5 V enfás.



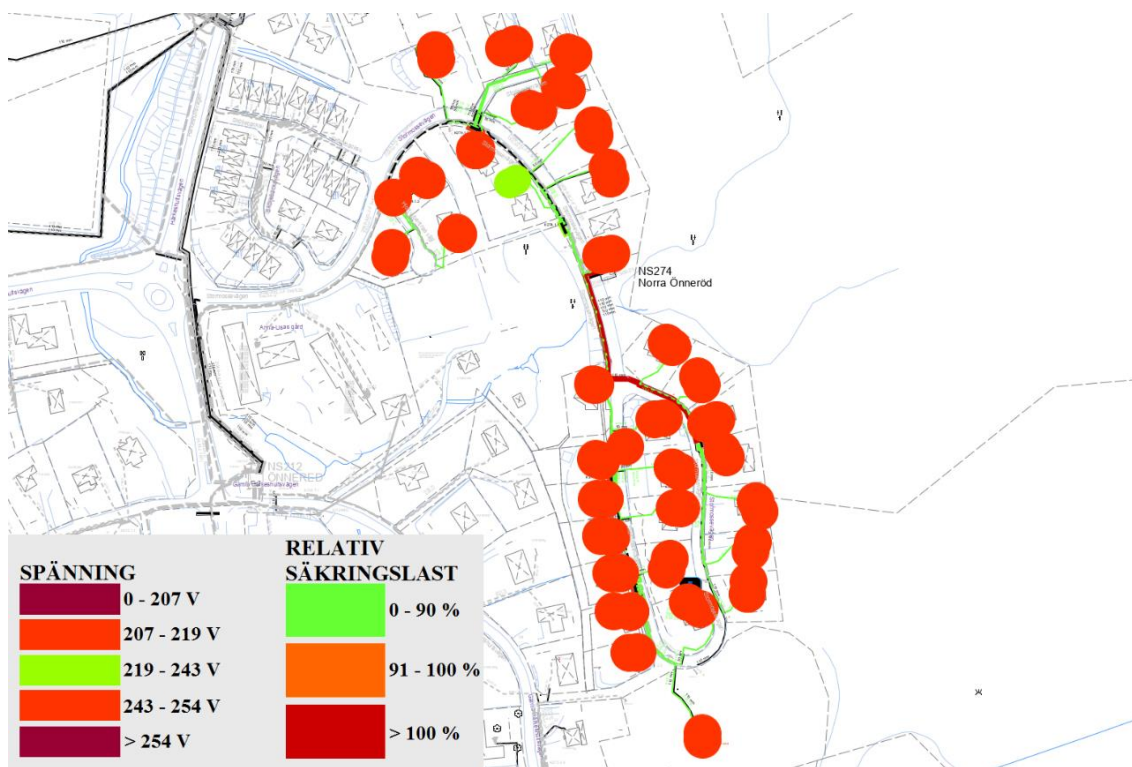
Figur 4.2 Spännings- och lastkarta för lågspänningsnät NS274 vid 25 % andel solcellsanläggningar. Runda figurer och linjer representerar spänningsnivå respektive säkringslast enligt legend.



Figur 4.3 Spännings- och lastkarta för lågspänningsnät NS274 vid 50 % andel solcellsanläggningar. Runda figurer och linjer representerar spänningsnivå respektive säkringslast enligt legend.



Figur 4.4 Spännings- och lastkarta för lågspänningsnät NS274 vid 75 % andel solcellsanläggningar. Runda figurer och linjer representerar spänningsnivå respektive säkringslast enligt legend.



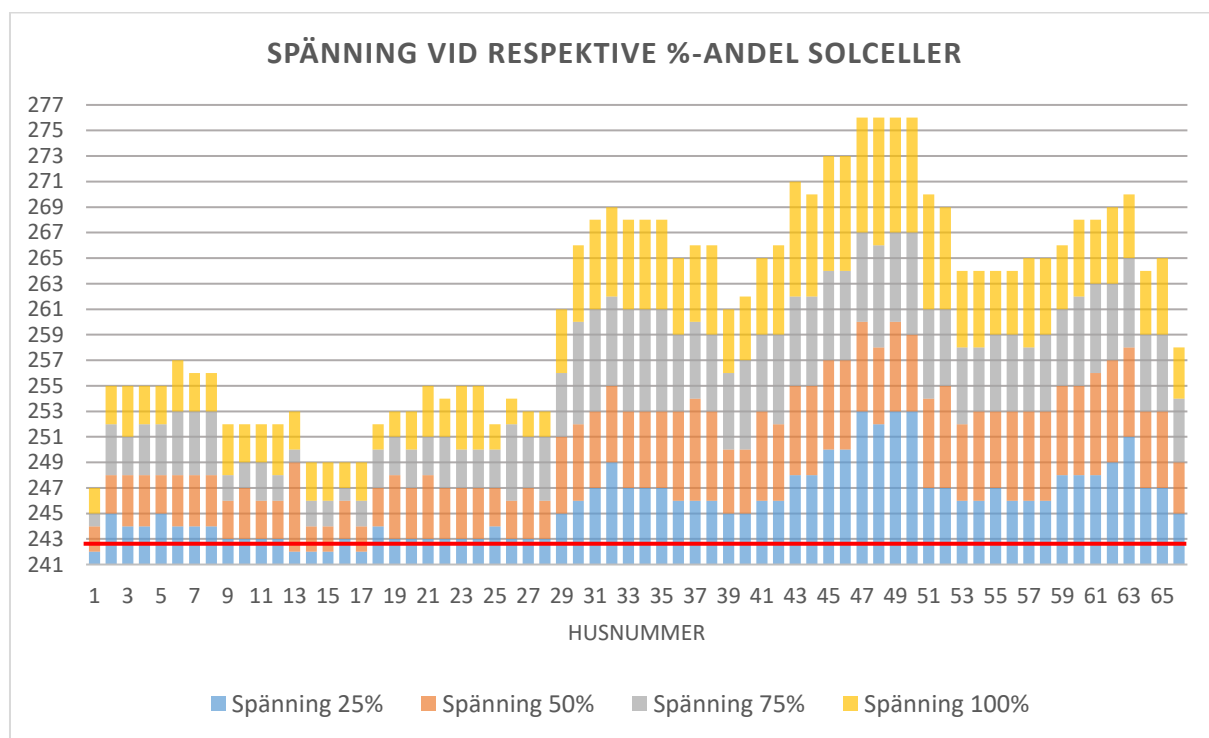
Figur 4.5 Spännings- och lastkarta för lågspänningsnät NS274 vid 100 % andel solcellsanläggningar. Runda figurer och linjer representerar spänningsnivå respektive säkringslast enligt legend.

## 4.2 NS345

Det svaga lågspänningsnätet NS345 påverkas av mikroproduktionen redan vid start. Vid maximal andel solceller når spänningen så höga värden som 276 V enligt simuleringen. I verkligheten skall däremot växelriktarna för flera anläggningar stänga av produktionen redan vid 50% andel då spänningsnivån överskrider växelriktarnas inställda gräns på 256,3 V.

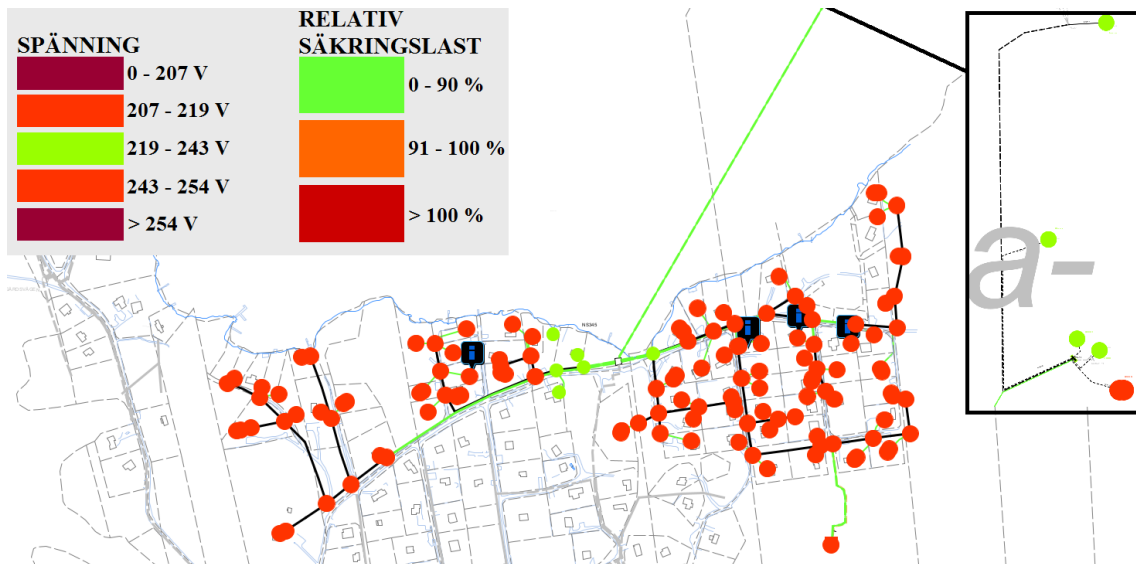
Vid maximal produktion från alla anläggningar skapas en aktiv effekt på 530,1 kW varav 18,9 kW förbrukas och 36,6 kW blir till förluster. Överskottet på 474,6 kW överskrider transformatorns märkeffekt med 58% och 5 utav 6 grupper belastas med en ström som överskrider gränsen för de installerade säkringarna med en marginal mellan 8,7 – 35,3 %.

De begränsade faktorerna för detta nät är storleken på transformatorn, ledararean och långa avstånd mellan transformatorn och anslutningspunkterna, den sista kan inte åtgärdas utan ytterligare stationer vilket inte kommer att undersökas.

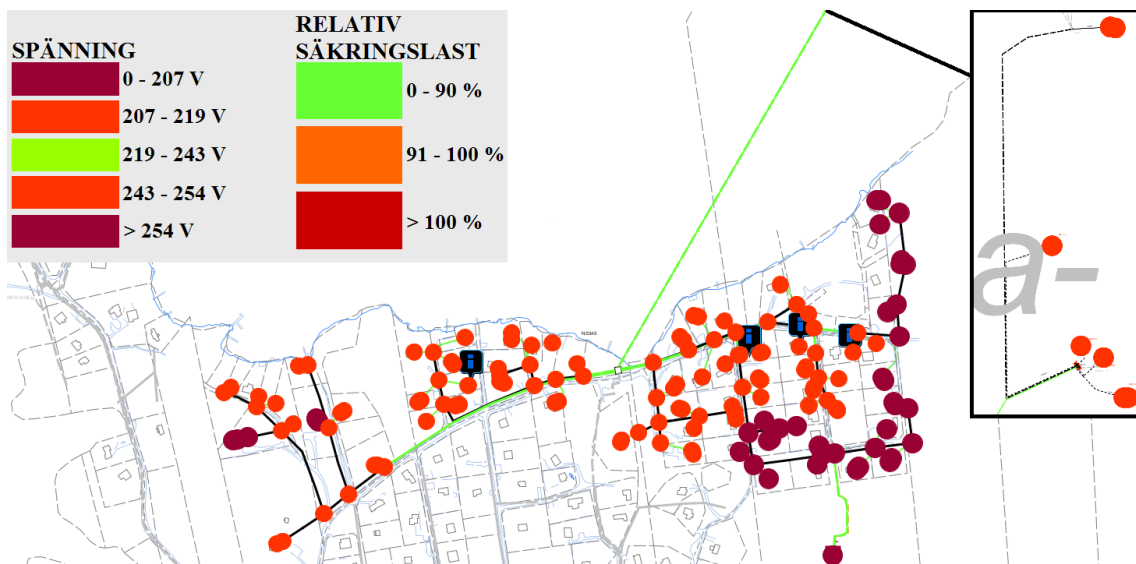


Figur 4.6 Spänningsnivåer för lågspänningsnät NS274 vid respektive %-andel installerade solcellsanläggningar. Det röda sträcket representerar den övre spänningsgränsen på 242,5 V enfäs.

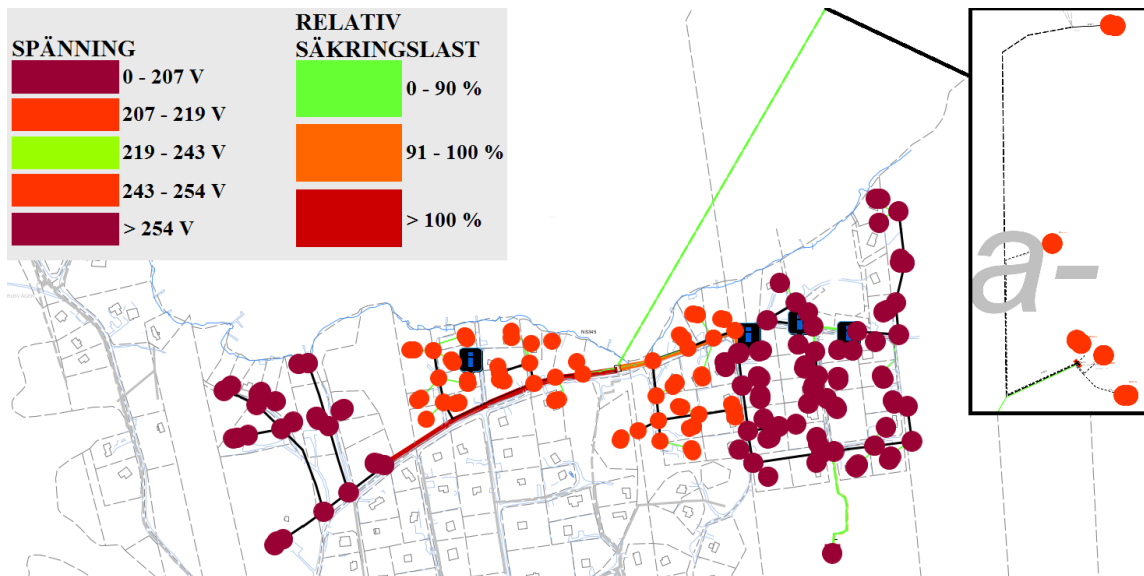




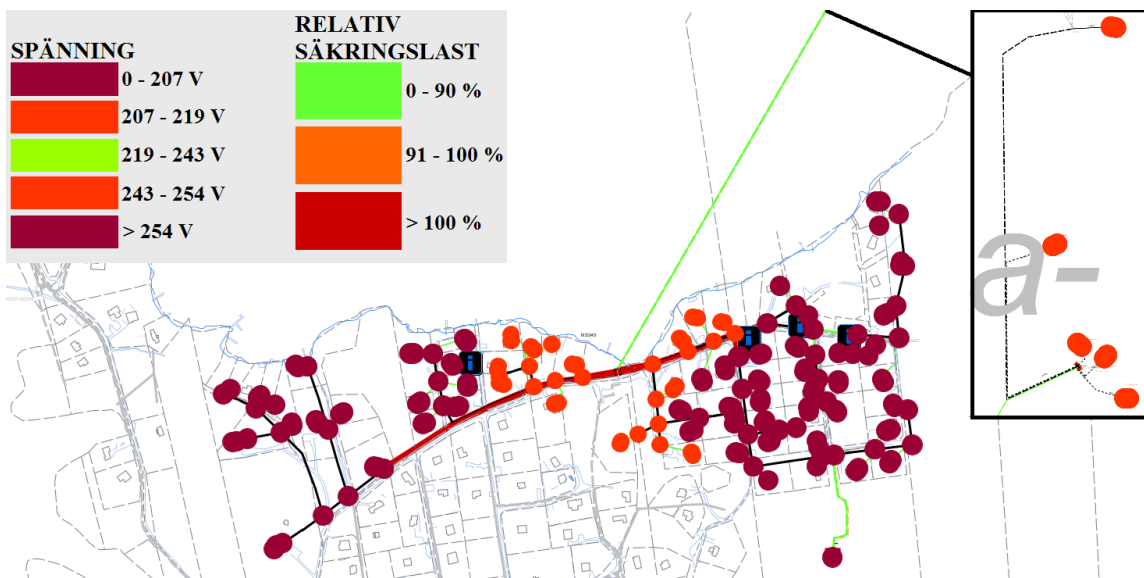
Figur 4.7 Spännings- och lastkarta för lågspänningsnät NS345 vid 25 % andel solcellsanläggningar. Runda figurer och linjer representerar spänningsnivå respektive säkringslast enligt legend.



Figur 4.8 Spännings- och lastkarta för lågspänningsnät NS345 vid 50 % andel solcellsanläggningar. Runda figurer och linjer representerar spänningsnivå respektive säkringslast enligt legend.



Figur 4.9 Spännings- och lastkarta för lågspänningsnät NS345 vid 75 % andel solcellsanläggningar. Runda figurer och linjer representerar spänningsnivå respektive säkringslast enligt legend.



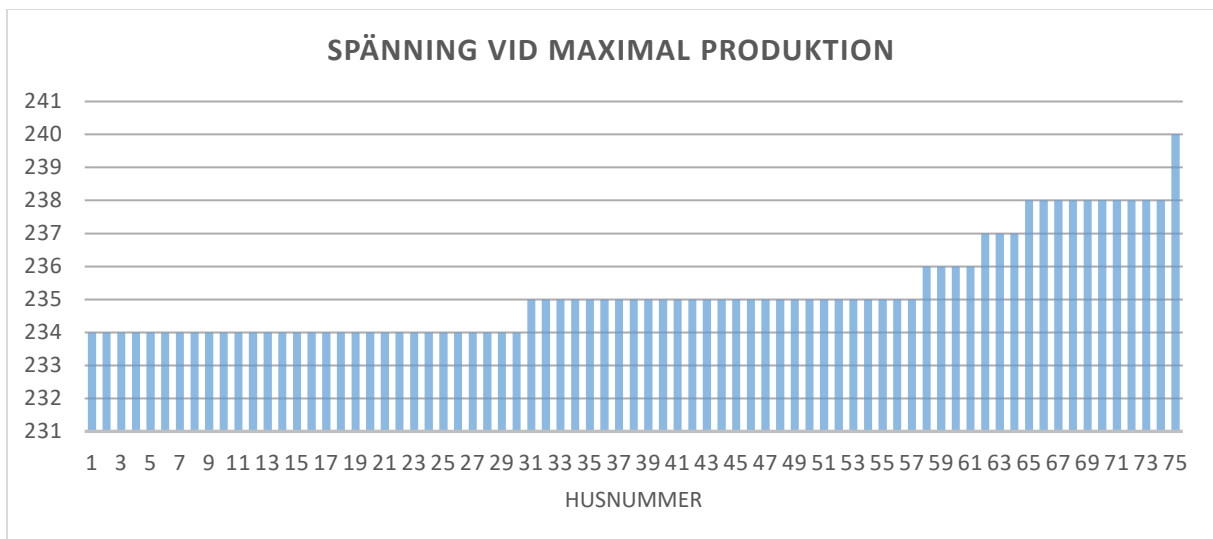
Figur 4.10 Spännings- och lastkarta för lågspänningsnät NS345 vid 100 % andel solcellsanläggningar. Runda figurer och linjer representerar spänningsnivå respektive säkringslast enligt legend.

### 4.3 NS239

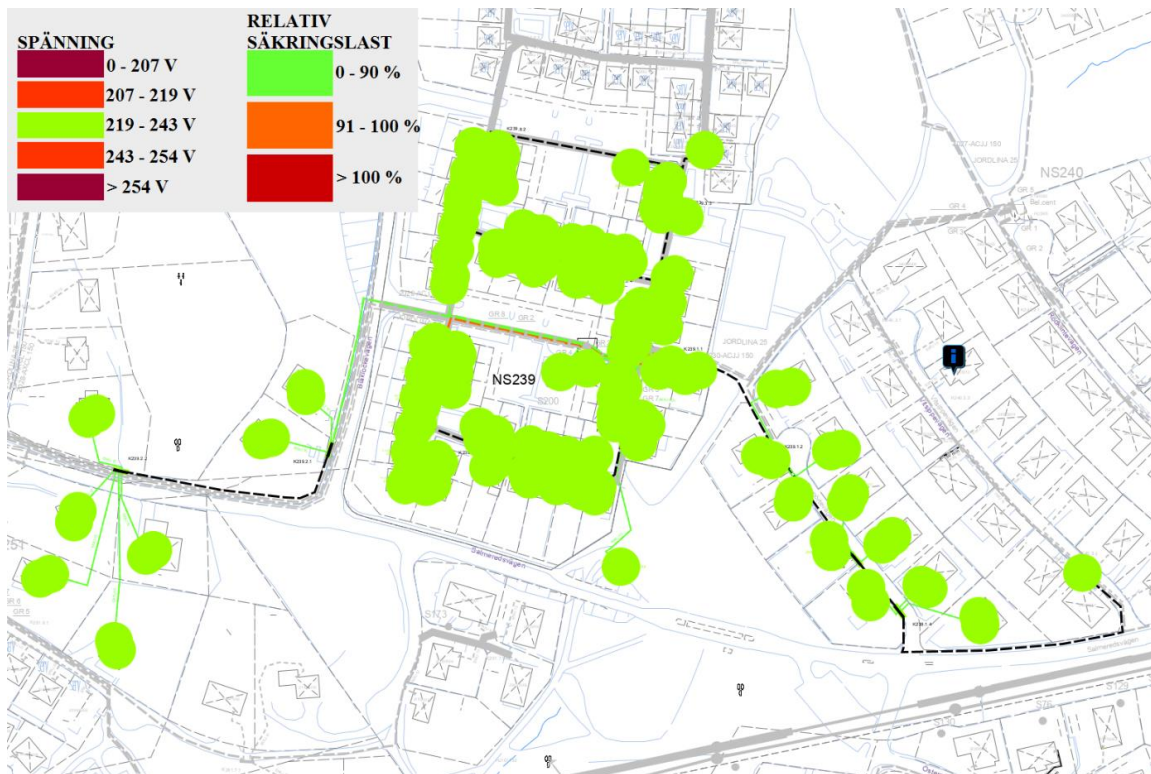
Lågspänningsnätet NS239 klarar av den maximala effekten som kan produceras i alla anläggningar baserad på hushållens takytor. Som beskrivits tidigare i kapitel 3.3.3 är avstånden mellan transformatorn och anslutningspunkterna korta vilket även resulterar i lågt spänningsfall.

Mängden aktiv effekt som produceras är 621,8 kW varav 22,5 kW förbrukas och 9 kW blir till förluster. Överskottet på 599,3 kW motsvarar 75 % av transformatorns märkeffekt. Ingen av de matande ledningar belastas med en ström som överskrider gränsen för den installerade säkringen.

Detta nät kräver ingen åtgärd i syfte att förbättra kapaciteten för andelen solcellsanläggningar och har dessutom en säkerhetsmarginal som möjliggör nya kundanslutningar.



Figur 4.11 Spänningsnivåer för lågspänningsnät NS239 vid maximal produktion.



Figur 4.12 Spännings- och lastkarta för lågspänningsnät NS239 vid 100 % andel solcellsanläggningar. Runda figurer och linjer representerar spänningsnivå respektive säkringslast enligt legend.

#### 4.4 Analys av simuleringar

Simuleringarna för de valda områden bedöms ha gett de resultaten som förväntades vid urval. Syftet var att identifiera nät som:

- Kan komma att kräva en viss anpassning, lågspänningsnät NS274.
- Kräver flera åtgärder för att öka kapaciteten, lågspänningsnät NS345.
- Är byggt för att hantera utvecklingen av fossilfri lokal produktion, lågspänningsnät NS239.

Simuleringar av dessa områden med vidtagna åtgärder beskrivs senare i kapitel 6.

## 5 GRÄNSVÄRDEMODELLEN

Detta kapitel beskriver hur den tillämpade teorin används för att skapa ett underlag i syfte att på förhand, innan eventuella åtgärder, kunna bestämma den maximalt tillåtna mikroproduktionen för specifika områden där varje anslutningspunkt har en anläggning installerad.

### 5.1 Område för beräkning

Det område som simuleras som grund till gränsvärdemodellen har skapats manuellt. I det området har längden för ledare mellan respektive anslutningspunkt och dess sammankopplingspunkt anpassats så att resistansvärden är lika för alla punkter i sin subgrupp, detta har valts för att underlätta beräkningen och eftersom sammankopplingspunkter placeras oftast i centrum av samtliga anslutningspunkter blir detta en rimlig approximation.

#### Stationsdata:

10,7 kV / 0,4 kV transformator, märkeffekt  $S_n = 500$  kVA

Lindningskopplarläge: 3

Utgående grupper:

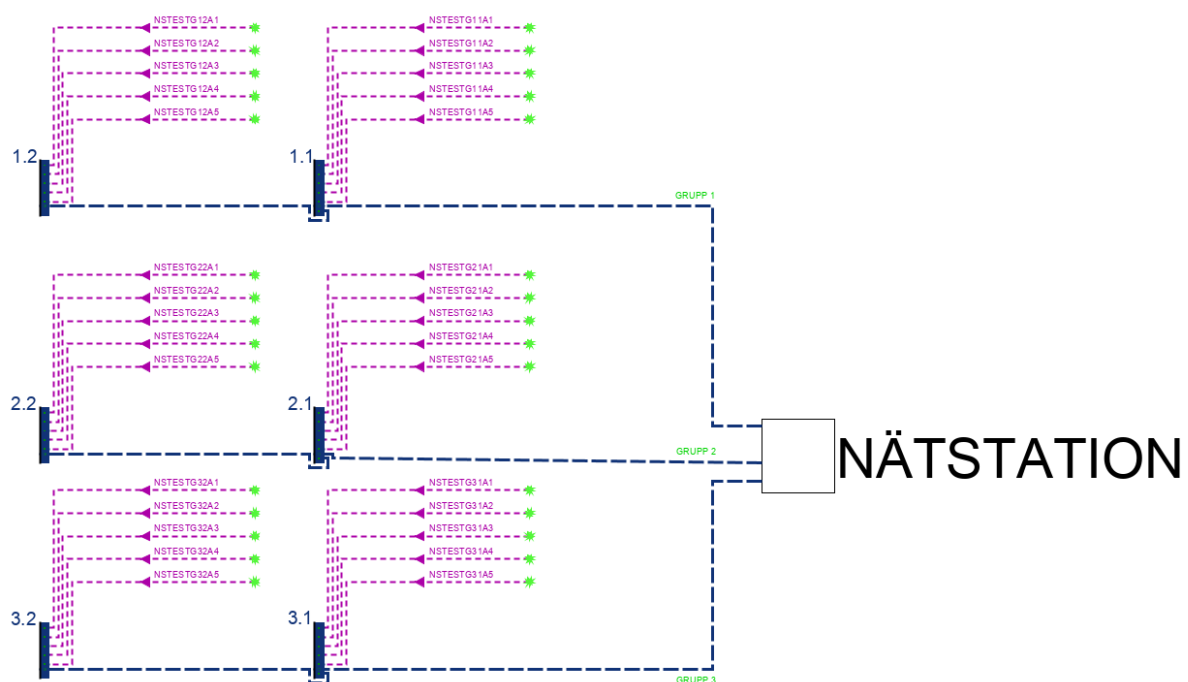
Grupp 1 - N1XE 150 mm<sup>2</sup>, 2 sammankopplingspunkter, 10 anslutna kunder (5+5)

Grupp 2 - N1XE 150 mm<sup>2</sup>, 2 sammankopplingspunkter, 10 anslutna kunder (5+5)

Grupp 3 - N1XE 150 mm<sup>2</sup>, 2 sammankopplingspunkter, 10 anslutna kunder (5+5)

Servisledning till anslutningspunkterna: N1XE 10 mm<sup>2</sup>

De totala resistansvärden anges i Bilaga 4 – dessa värden är resistansen hela sträckan mellan transformator och anslutningspunkt.



Figur 5.1 Kopplingschema för lågspänningsnät NÄTSTATION

## 5.2 Gränsvärdeberäkning för en grupp

För att kunna bestämma den effekten som får produceras från varje anläggning i en grupp måste gruppens sammanlagda kortslutningsresistans vara känd. För att erhålla det värdet används ekvivalent schema.

Den ekvivalenta resistansen för subgrupp 1.1  $R_{k1.1}$  beräknas enligt:

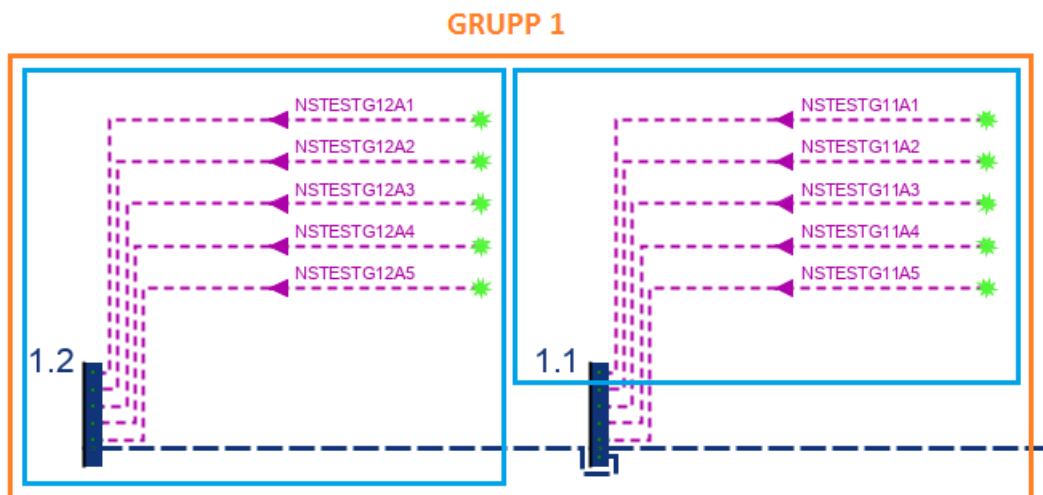
$$\frac{1}{R_{k1.1}} = \frac{1}{0,0457} * 5 = 109,41 \Leftrightarrow R_{k1.1} = 0,00914 \Omega$$

Då längden mellan anslutningspunkterna och dess kabelskåp är samma är den ekvivalenta resistansen för subgrupp 1.2  $R_{k1.2}$  summan av resistansen för subgrupp 1 kopplade parallellt med den matande ledningen mellan kabelskåp 1.1 och 1.2 med resistansvärde på 0,0074Ω:

$$R_{k1.2} = R_{k1.1} // 0,0074 = 0,01654 \Omega$$

Därefter utförs beräkningen av parallellkopplingen mellan subgrupperna 1.1 och 1.2 och resultatet summeras med kortslutningsresistansen från den matande ledningen mellan transformator och första kabelskåp vilket ger den totala ekvivalenta resistansen för gruppen  $R_{ktot}$  :

$$R_{ktot} = R_{k1.1} // R_{k1.2} + 0,0175 = \frac{0,00914 * 0,01654}{0,00914 + 0,01654} + 0,0175 = 0,0233869 \Omega$$

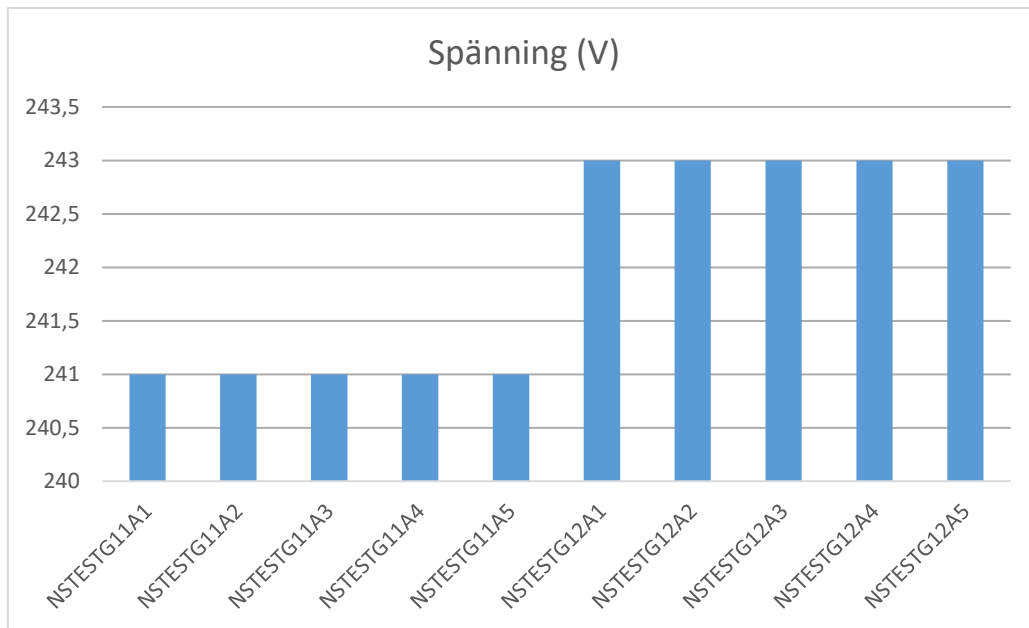


Figur 5.2 Summan av parallellkoppling av subgrupperna 1.1 och 1.2 (blå fyrkanter) och kortslutningsresistansen för den matande ledningen fram till kabelskåp 1.1 ger en ekvivalent last för grupp 1 (orange fyrkant).

Den erhållna ekvivalenta kortslutningsresistansen används för beräkning av den totala effekten som får produceras i grupp 1:

$$P_{\max, \text{grupp 1}} = \frac{\Delta U * U_n}{R_k} = \frac{(420 - 400) * 400}{0,0233869} = 342 \text{ kW}$$

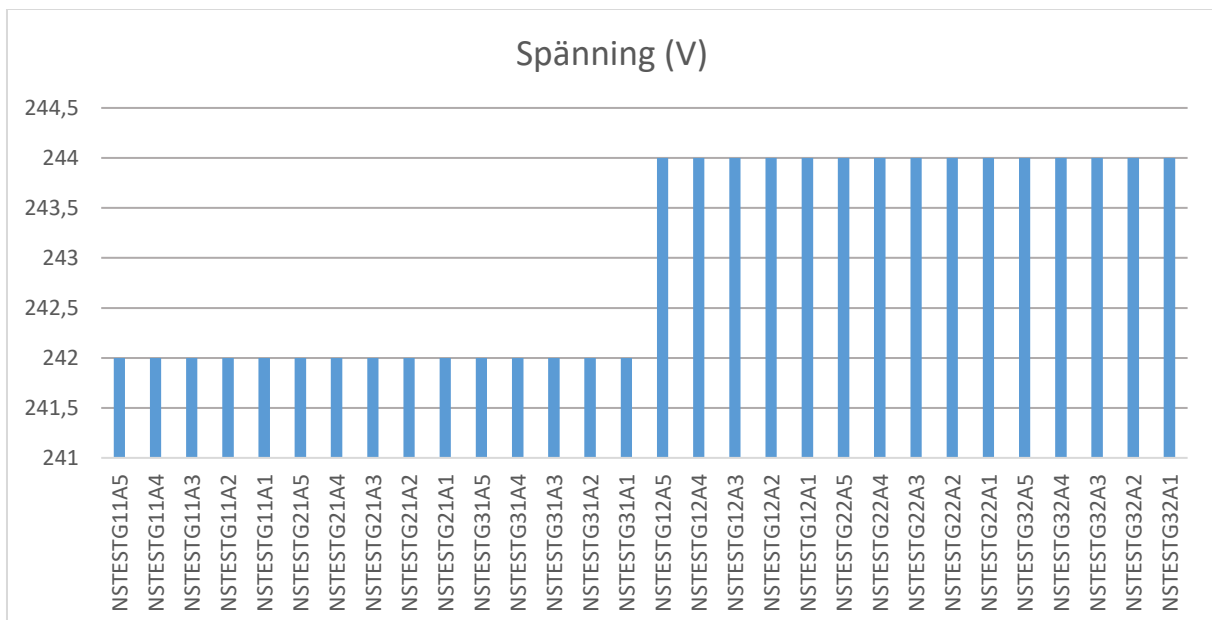
Vilket med 10 st anslutningar i gruppen innebär 34,2 kW effekt per anläggning.



Figur 5.3 Spänningsnivåer för varje anslutningspunkt i grupp 1

### 5.3 Gränsvärdeberäkning för hela nätet

Samma beräkningssätt som för grupp 1 repeteras för de övriga grupperna i lågspänningsnätet. Eftersom alla grupper består av likadana ledningar och längder är den maximalt tillåtna producerade effekten samma för varje grupp.



Figur 5.4 Spänningsnivåer för varje anläggning med simulering utförd på hela nätet.

Den totala effekten i nätet är 1026 kW varav 981,3 kW är den aktiva effekten och 44,7 kW är förluster. Det som kan noteras vid simulering av hela nätet är den allmänna spänningsök-

ningen i förhållande till individuella simuleringar för respektive grupp. Grunden till detta bedöms vara att effekten som matas mot transformatorn överskrider dess märkeffekt med 96% samt kan bero på hur parametrar som ställs in för simuleringarna.

## 5.4 Analys och tillämpning av modellen

Utöver den allmänna spänningsökningen kan det noteras från figurerna 5.3 och 5.4 att spänningen vid den jämnt fördelade lasten varierar och är högre för de anslutningarna som befinner sig längre ut på nätets grupper. I det simulerade fallet är kortslutningsresistansernas värden relativt låga med låg variation mellan varandra vilket tyder på att den jämna fördelningen enligt gränsvärdemodellen är lämplig för ett starkt lågspänningsnät vars kortslutningsimpedans för den svagaste och starkaste anslutningspunkten skiljer sig endast lite. Då de verkliga lågspänningsnäten har en varierande styrka behöver gränsvärdemodellen anpassas så att den maximalt tillåtna produktionen för en grupp fördelas på så sätt att den spänningsvariationen som uppstår inte resulterar i ett värde som överskrider den rekommenderade spänningssgränsen på 242,5 V (420 V huvudspänning).

Gränsvärdemodellen tillämpas för lågspänningsnät NS274 beskriven i kapitel 3.3.1.

### Stationsdata:

11 kV / 0,42 kV transformator, märkeffekt  $S_n = 500$  kVA

Lindningskopplarläge: +3

Matning: 10598V - motsvarar 404,65 V på lågspänningsskenan

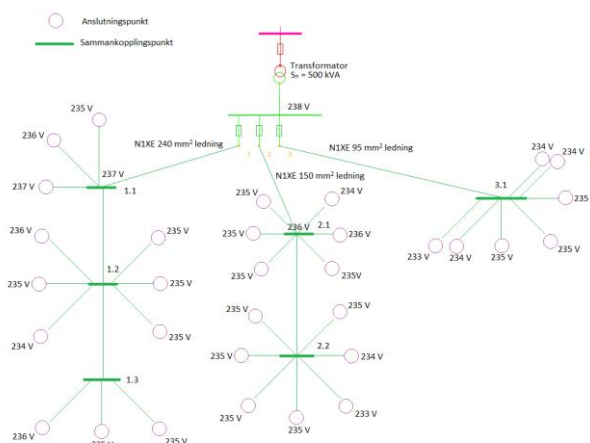
Utgående grupper:

Grupp 1 – N1XE 240 mm<sup>2</sup>, 3 sammankopplingspunkter, 13 anslutna kunder (4+6+3)

Grupp 2 – N1XE 150 mm<sup>2</sup>, 2 sammankopplingspunkter, 13 anslutna kunder (6+7)

Grupp 3 – N1XE 95 mm<sup>2</sup>, 1 sammankopplingspunkt, 7 anslutna kunder

Servisledning till anslutningspunkterna: N1XE 10 mm<sup>2</sup>



Figur 5.5 Spänningsfall för samtliga anslutningspunkter i lågspänningsnät NS274. Simulering vid hög last och ingen produktion.



Uträkningen i kapitel 5.2 ger den totalt tillåtna effekten, denna kan fördelas jämnt om alla anslutningspunkters respektive resistanser är nära det beräknade medelvärdet. Vid variation är det istället mer lämpligt att fördela medeleffekten för anslutningspunkten beroende på dess resistansstyrka i förhållande till medelvärdet. Nedanstående tabell visar hur den maximalt tillåtna effekten fördelas hos anslutningspunkter i grupp 1:

Tabell 5.1 Effektfördelning baserad på anslutningspunkternas resistansstyrka i förhållande till medelvärdet. Fullständig information anges i Bilaga 5

Objekttyp	Grupp	Knutpunkt	R <sub>k fas</sub> (Ω)	1/R <sub>k närmaste punkt</sub> (Ω)	R <sub>k subgrupp</sub>	1/R <sub>k trafo till punkt</sub> (1/Ω)	Snitt 1/R <sub>k trafo till punkt</sub> (Ω)	R <sub>k grupp</sub> (Ω)	Effekt (kW) snitt	Effekt (kW) per punkt baserad på impedansförhållande		
<b>Skena i kabelskåp</b>	<b>1</b>	<b>K274.1.1</b>	<b>0,0093</b>									
Anslutningspunkt	1	274001005	0,1293	8,333333333	0,02315812	7,733952049	9,398310175		23,9 per kund 311,2 totalt	19,7		
Anslutningspunkt	1	274001008	0,162	6,548788474		6,172839506				15,7		
Anslutningspunkt	1	274001013	0,0733	15,625		13,6425648				34,8		
Anslutningspunkt	1	274001003	0,0882	12,67427123		11,33786848				28,9		
<b>Skena i kabelskåp</b>	<b>1</b>	<b>K274.1.2</b>	<b>0,0191</b>	<b>0,0098</b>								
Anslutningspunkt	1	274001009	0,1557	7,320644217	0,01402952	6,422607579		9,398310175		Alla grupper 1.1/(1.2//1.3) 0,019957251	23,9 per kund 311,2 totalt	16,4
Anslutningspunkt	1	271001001	0,1282	9,165902841		7,800312012						19,9
Anslutningspunkt	1	269001001	0,161	7,04721635		6,211180124						15,8
Anslutningspunkt	1	274001006	0,1074	11,32502831		9,310986965				23,7		
Anslutningspunkt	1	274001001	0,0531	29,41176471		18,83239171				48,0		
Anslutningspunkt	1	269001006	0,1618	7,007708479		6,180469716	15,7					
<b>Skena i kabelskåp</b>	<b>1</b>	<b>K274.1.3</b>	<b>0,0297</b>	<b>0,0106</b>								
Anslutningspunkt	1	636001020	0,1193	11,16071429	0,03413291	8,382229673	9,398310175		Grupp 2 & 3 1.2//1.3 0,019742779	23,9 per kund 311,2 totalt		21,4
Anslutningspunkt	1	274001002	0,1597	7,692307692		6,261740764						16,0
Anslutningspunkt	1	274001004	0,072	23,64066194		13,88888889						35,4

Förklaring till Tabell 5.1:

- Kolumn "R<sub>k, fas</sub>" är anslutningspunktens kortslutningsresistans;
- Kolumn "1 / R<sub>k, närmaste punkt</sub>" är punktens invers av kortslutningsresistans till närmaste nästa punkt, alltså är det värdet till exempel för knutpunkten 274001005 med kabelskåp K274.1.1 som närmaste punkt, invers används för lättare uträkning enligt formel 3.6:

$$\frac{1}{R_{k, \text{närmaste punkt}}} = \frac{1}{0,1293 - 0,0093} = 8,33 \dots \Omega^{-1}$$

- Summan av alla "1 / R<sub>k, närmaste punkt</sub>" för respektive punkt ansluten till ett kabelskåp används sedan för att bestämma den subgruppens kortslutningsresistans;
- På samma sätt som för subgrupperna bestäms hela gruppens kortslutningsresistans, kolumn "R<sub>k, grupp</sub>";
- Med gruppens kortslutningsresistans kan den maximalt tillåtna effekten bestämmas enligt:

$$P_{\max, \text{grupp 1}} = \frac{\Delta U * U_n}{R_k} = \frac{(420 - 404,65) * 404,65}{0,019957251} = \mathbf{311,2 \text{ kW}}$$

Den totala effekten fördelad på antalet anslutna kunder, i detta fall 13 st, motsvarar 23,9 kW per kund vid jämn fördelning, kolumn "Effekt (W) Snitt";

- För att bestämma den maximalt tillåtna produktionen för respektive kund jämförs deras kortslutningsresistans till transformator, kolumn "1 / R<sub>k</sub> trafo till kund", med snittet för kortslutningsresistans för hela gruppen, nästa kolumn.
- För exempelvis anslutningspunkt 274001009 är dess egen resistansstyrka:

$$\frac{1}{R_{k,274001009}} = \frac{1}{0,1557} = 6,422607579 \Omega^{-1}$$

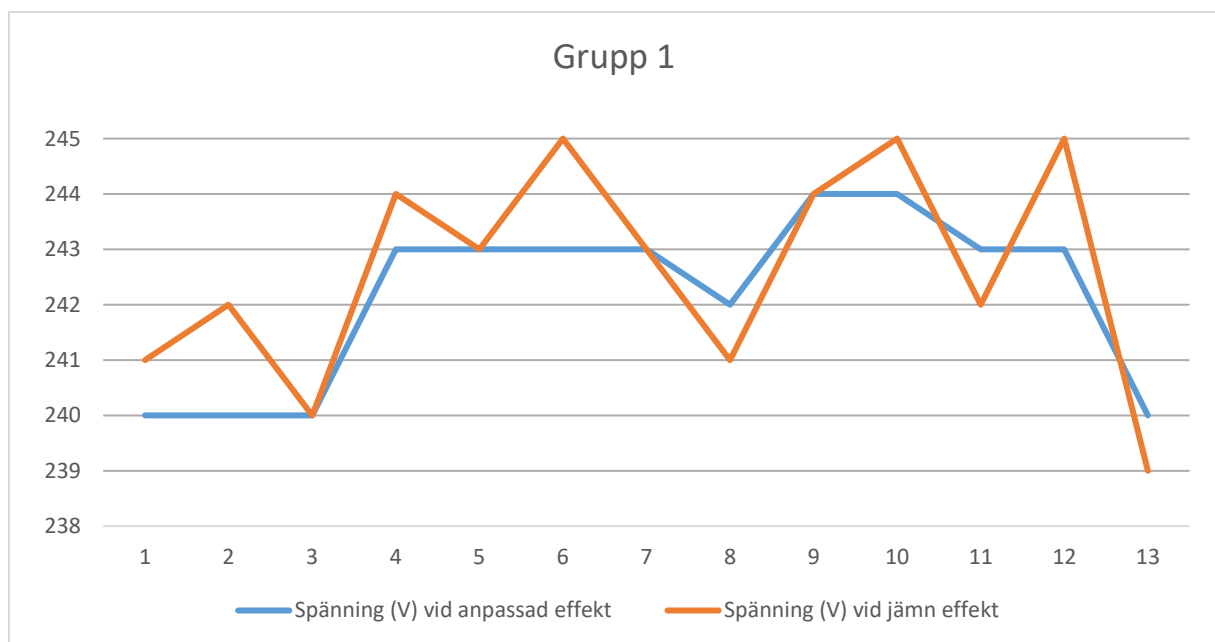
Vilket i förhållande till snittet för alla anslutningspunkter i gruppen på 9,398310175 Ω<sup>-1</sup> motsvarar:

$$\frac{R_{k,274001009}}{R_{k, \text{medelvärde}}} * 100 \% = \frac{6,422607579}{9,398310175} * 100 \% = 68,3 \%$$

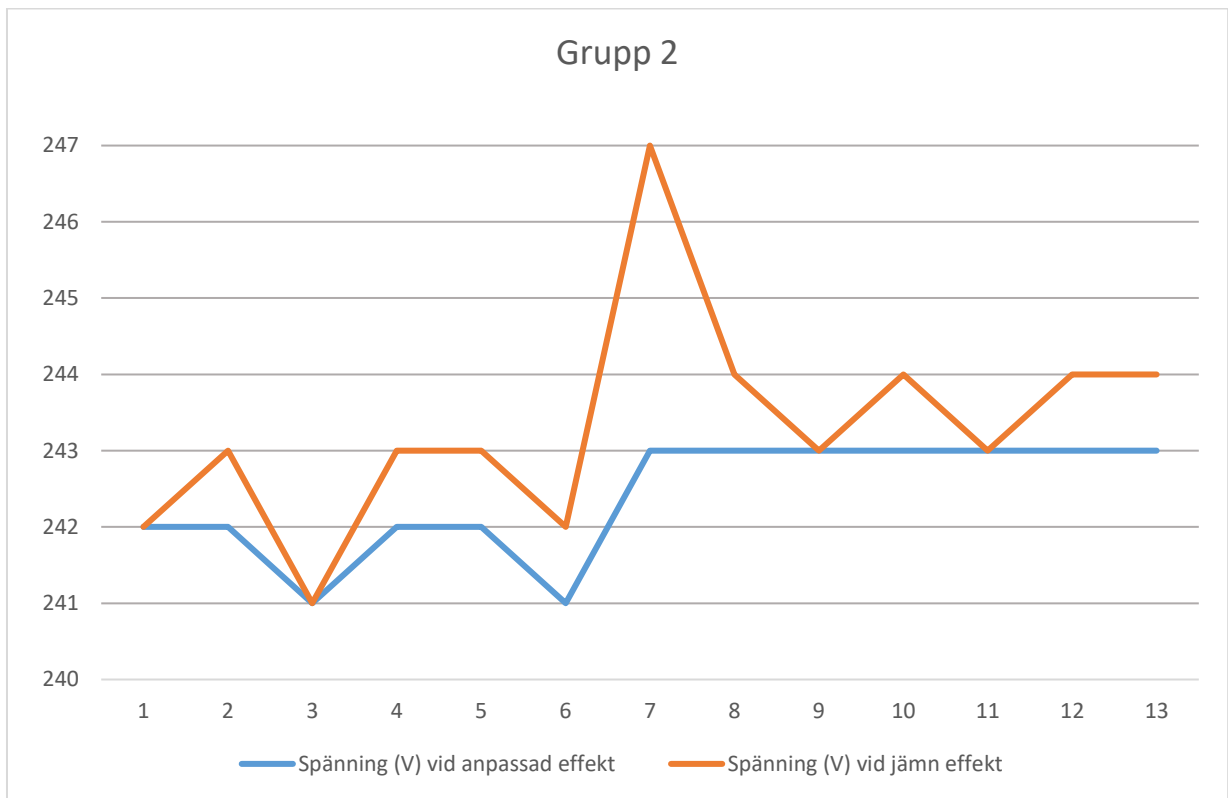
Och medför en gräns för installerad effekt på:

$$\text{Effekt}_{\text{snitt}} (\text{kW}) * 68,3 \% = 23,941 \text{ kW} * 68,3 \% = \mathbf{16,4 \text{ kW}}$$

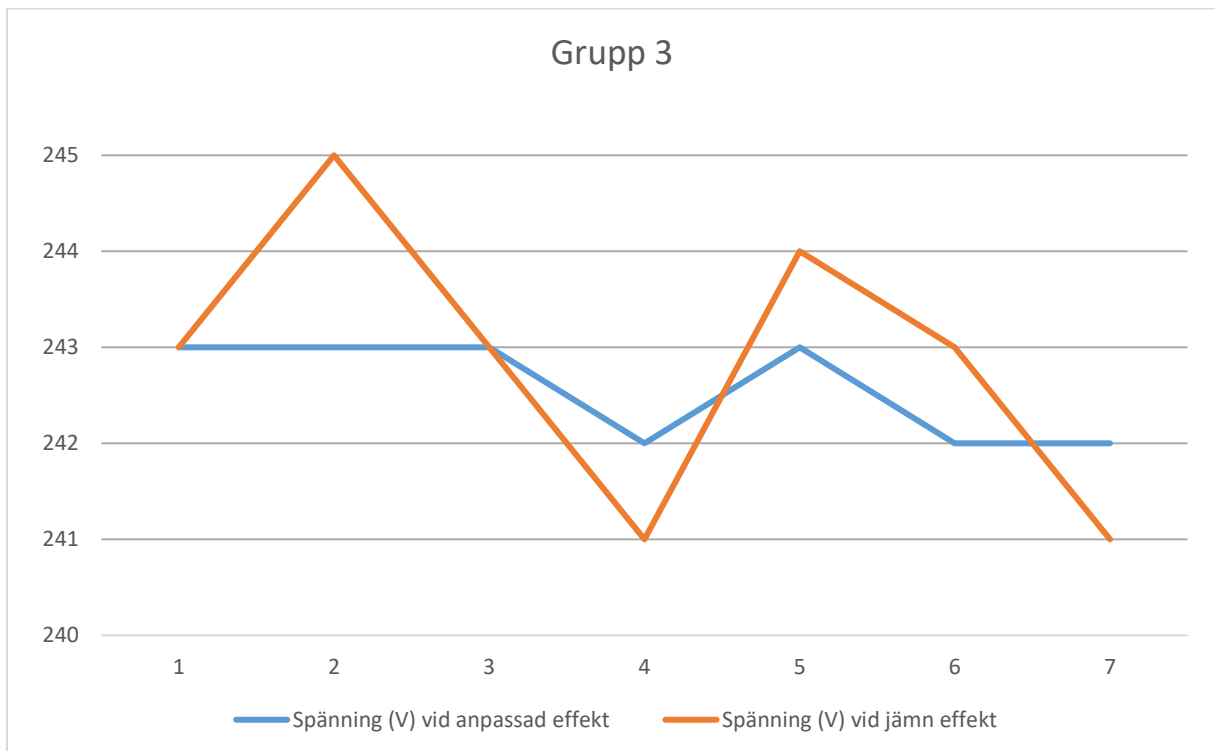
Med denna metod erhålls värden för varje anslutningspunkt som vid maximal produktion inte kommer orsaka en lika signifikant spänningsökning som skulle uppstå om den sammanlagda effekten fördelades jämt för alla anläggningar. Detta innebär att spänningen inte fluktuerar lika mycket för de svaga punkterna i nätet och värden varierar mindre i förhållande till den övre gränsen på 242,5 V.



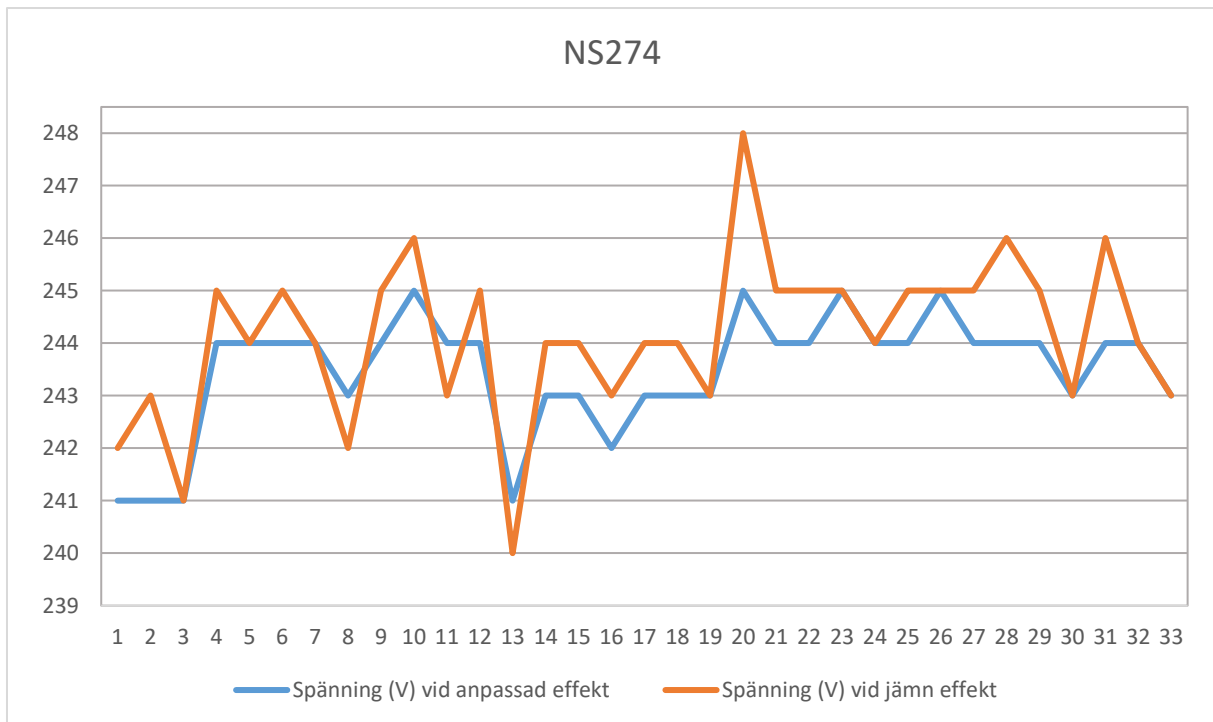
Figur 5.6 Spänning (V) för respektive anslutningspunkt i grupp 1 vid effekt anpassad efter resistansstyrkan (blå) och vid jämnt fördelad effekt (orange)



Figur 5.7 Spänning (V) för respektive anslutningspunkt i grupp 2 vid effekt anpassad efter resistansstyrkan (blå) och vid jämnt fördelad effekt (orange)



Figur 5.8 Spänning (V) för respektive anslutningspunkt i grupp 3 vid effekt anpassad efter resistansstyrkan (blå) och vid jämnt fördelad effekt (orange)



Figur 5.9 Spänning (V) för respektive anslutningspunkt i lågspänningsnät NS274 vid effekt anpassad efter resistansstyrkan (blå) och vid jämnt fördelad effekt (orange)

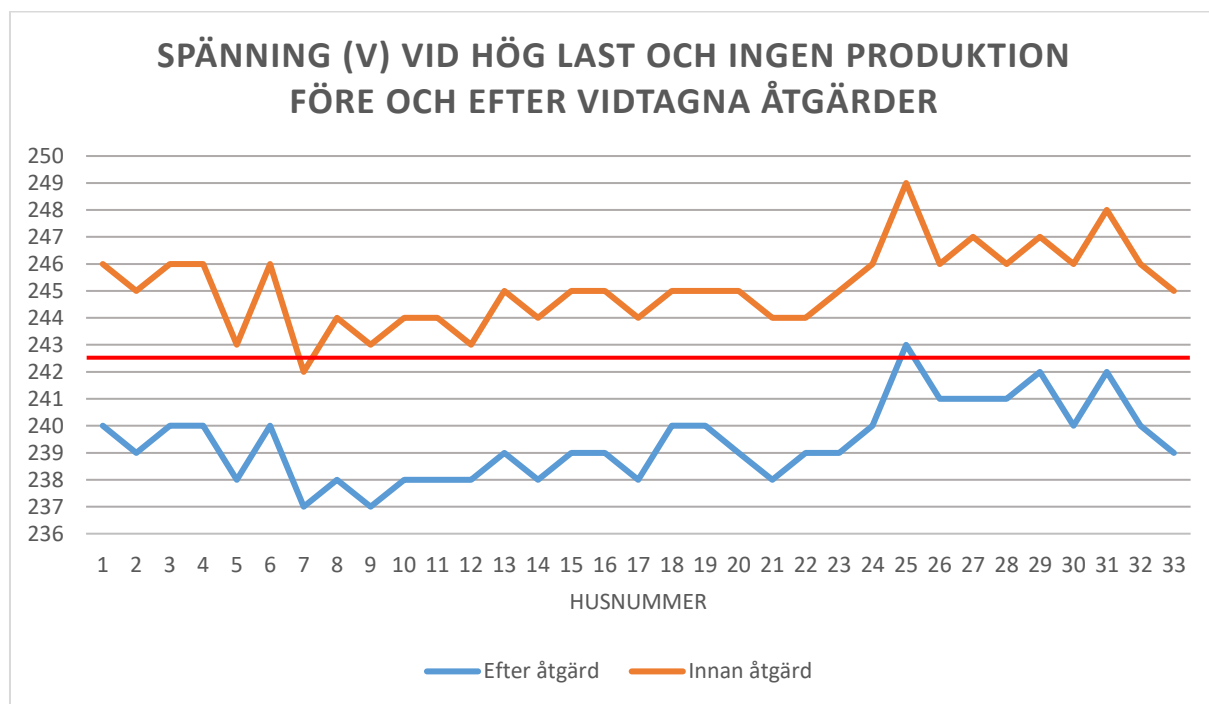
## 6 ÅTGÄRDSSIMULERING

Metoder för spänningsreglering beskrivna i kapitel 2.9 kommer i detta kapitel att anpassas utefter åtgärdsbehov för respektive lågspänningsnät. Resultaten presenteras i jämförelse med värden före de vidtagna åtgärderna.

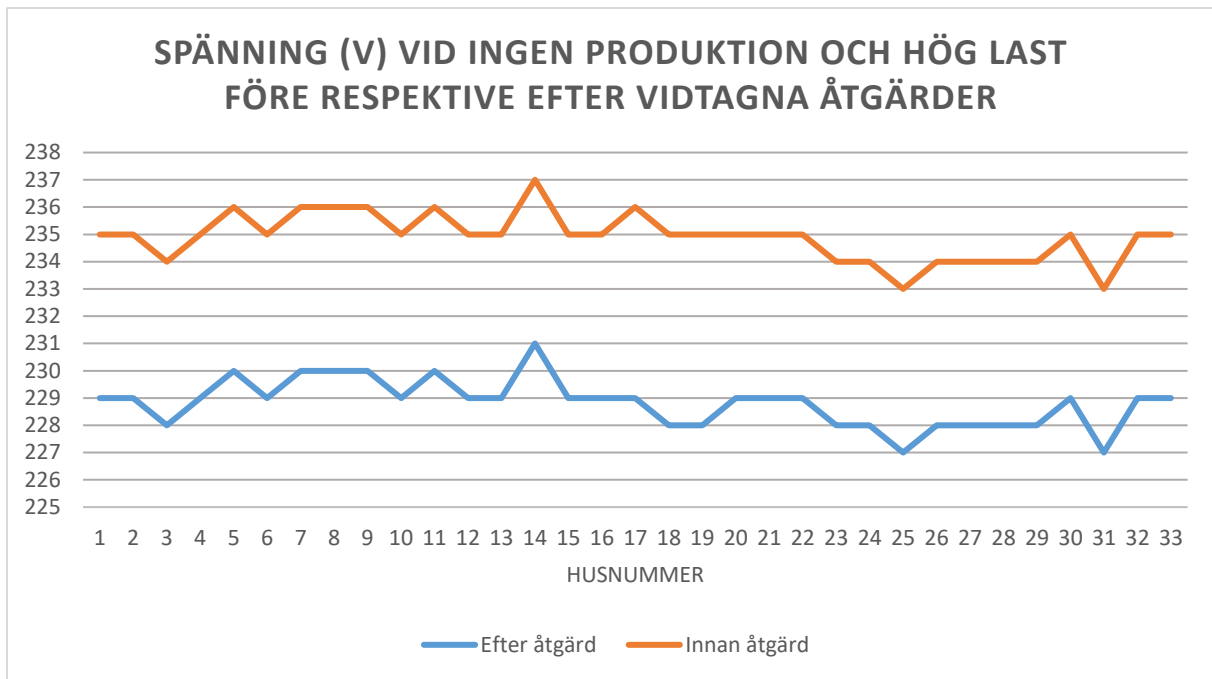
### 6.1 NS274

Vid 100 % andel installerade solcellsanläggningar och maximal produktion med effekter enligt takyta noteras, utöver spänningsnivåer utanför gränsen, att den matande ledningen på grupp 3 överbelastas i förhållande till den installerade säkringen. De åtgärder som bedöms nödvändiga för detta nät är säkringsbyte för grupp 3, då det kan noteras i kapitel 4.1 att den befintliga är för liten, samt justering av lindningskopplaren, eftersom den lägsta spänningen vid hög last är 233 V och 238 V på lågspänningssskenan finns det marginal för detta.

Lindningskopplarsteg ändras därför från 4 till 3 alltså till märksteg med omsättning 11 / 0,4 kV. Säkringsstorleken på grupp 3 ökas från 100 A till 125 A och vid simulering uppfylls fortfarande kravet för utlösningstid samt att spänningsnivån vid hög last och ingen produktion befinner sig inom den acceptabla gränsen, alltså över 219,5 V. Figur 6.1 och 6.2 visar spänning före och efter vidtagna åtgärder vid maximal produktion och ingen last respektive ingen produktion och hög last.



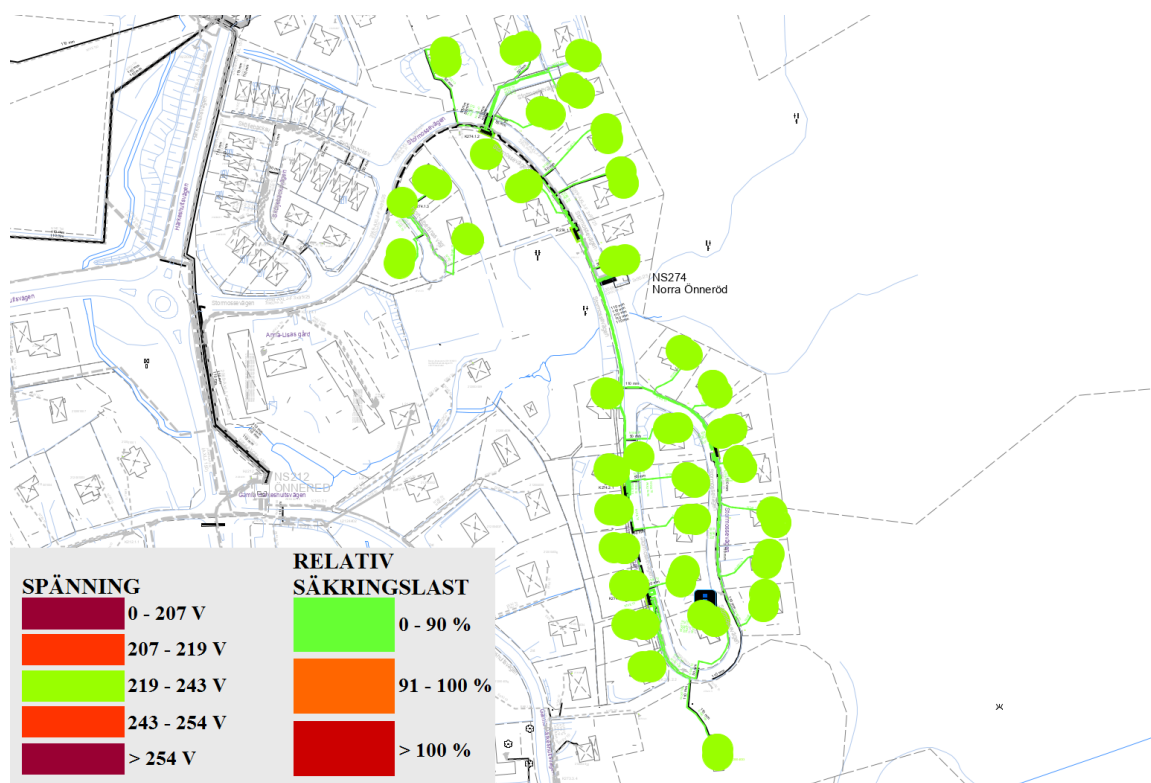
Figur 6.1 Spänningsnivåer för anslutningspunkter i lågspänningsnät NS274 vid maximal produktion och låg last före (orange) och efter (blå) vidtagna åtgärder.



Figur 6.2 Spänningsnivåer för anslutningspunkter i lågspänningsnät NS274 vid ingen produktion och hög last före (orange) och efter (blå) vidtagna åtgärder.

Arbetet för kapacitetsförbättring omfattar avbrott, avbrottsavisering, reglering av lindningskopplarläget och säkringsbyte på grupp 3 och har en kostnad på 3637 kr<sup>4</sup>. Efter vidtagna åtgärder noteras det att spänningen på en anslutningspunkt i grupp 2, hushåll 25 i figur 6.1, når gränsen. Med eventuellt ledningsbyte mellan kabelskåpet och punkten kan marginalen förbättras då spänningen vid maximal produktion och ingen last sjunker till 242 V. Förstärkningen innebär byte från en N1XE 10mm<sup>2</sup> aluminiumledare till N1XE 50mm<sup>2</sup> med en längd på 70 meter, kostnaden för detta arbete är 35 312 kr<sup>2</sup>.

<sup>4</sup> Priserna räknas ut i enlighet med kostnadskalkyl från Energiföretagens EBR P2 kostnadskalkyl [40]



Figur 6.3 Spännings- och lastkarta för lågspänningsnät NS274 vid 100 % andel solcellsanläggningar efter vidtagna åtgärder.

## 6.2 NS345

I detta lågspänningsnät finns det i princip ingen kapacitet för eventuell mikroproduktion i form av solcellsanläggningar. Området har från början varit enbart sommarstugor och dimensionerades utifrån låg förbrukning, särskilt under vinterperioden.

### 6.2.1 Vidtagna åtgärder

De åtgärder som bedöms vara av största vikt är nätförstärkning i form av total ombyggnation samt transformatorbyte då den simulerade effekten överskrider den befintliga transformatorns märkeffekt. Utöver förstärkningen simuleras maximal produktion med de spänningsregleringsmetoder som beskrivits i kapitel 2.9.1 och 2.9.3.

Analys av de två spänningsregleringsmetoderna sker för samma nätförstärkning som utförts på förhand. Nätförstärkningen omfattar byte från de befintliga ALUS 50 luftledningar till matande kablar N1XE 240 mm<sup>2</sup> samt större säkringar. Antalet grupper är samma dock har de anslutningspunkterna i grupp 3, 5 och 6 planerats om så att spänningsvariationer mellan grupperna ligger närmare i förhållande till varandra. Dessutom har grupperna dimensionerats och kopplats på så sätt att vid ett eventuellt inträffat fel på en grupp kan dess respektive anslutningspunkter matas från de andra grupperna.

Då den maximala produktionen för detta område ger en aktiv effekt på totalt 530,1 kW ersätts den gamla transformatorn med en 11 / 0,42 kV transformator med märkeffekt på 800 kVA.

### Stationsdata efter transformatorbyte:

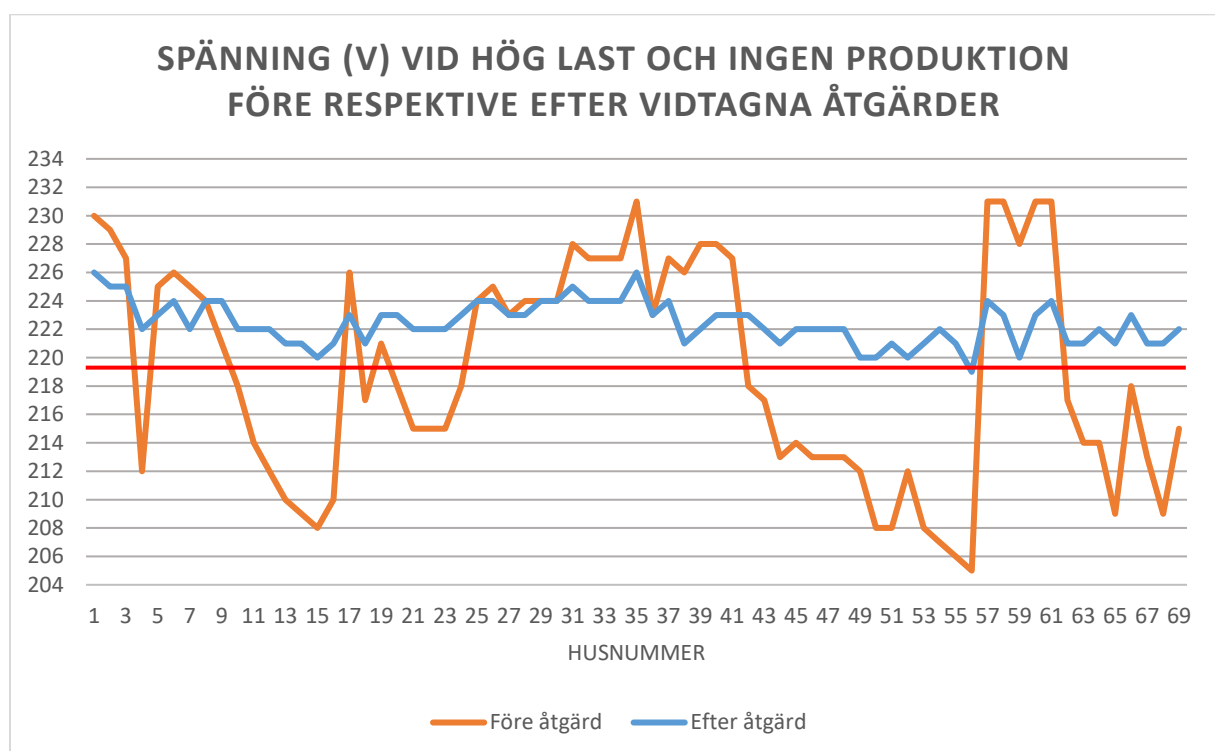
11 kV / 0,42 kV transformator, märkeffekt  $S_n = 800$  kVA

Lindningskopplarläge: +3

Matning: 10391V - motsvarar 396,75 V på lågspänningsskenan, 229 V fasspänning

Matande ledningar: N1XE 240 mm<sup>2</sup>

Nedan följer jämförelse av spänningsnivåer vid hög last och ingen produktion samt låg last och maximal produktion före och efter vidtagna åtgärder.

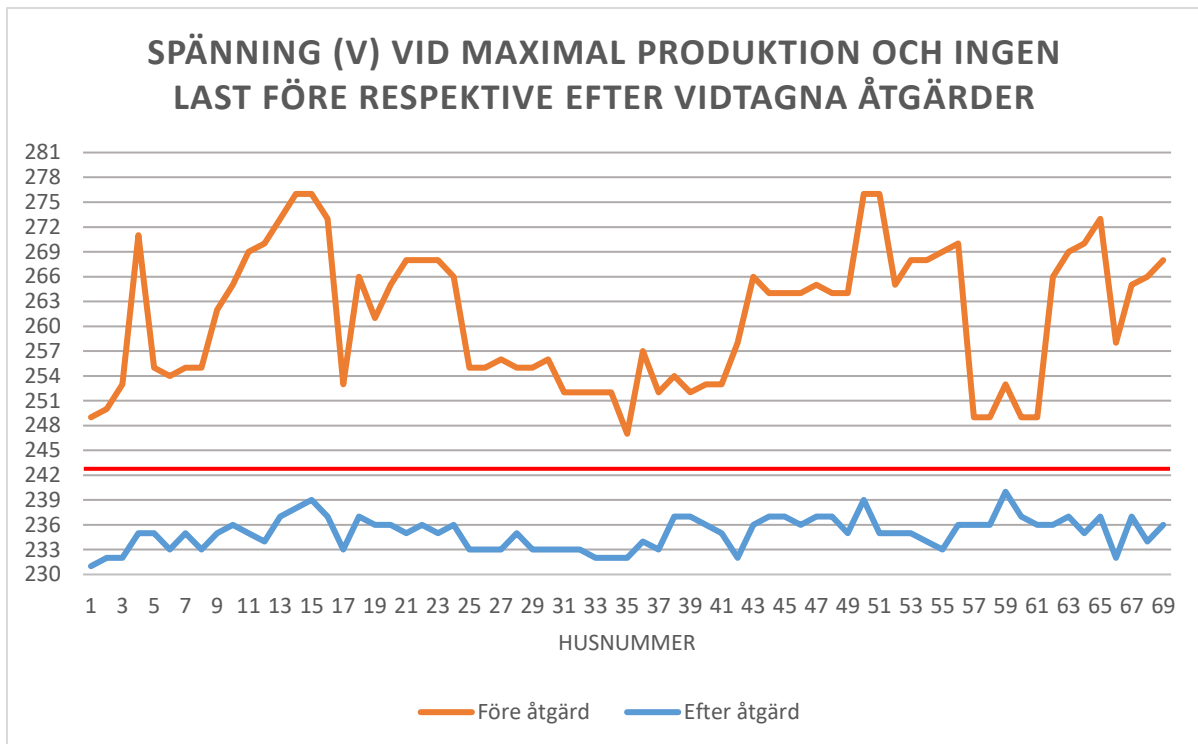


Figur 6.4 Spänningsnivåer för anslutningspunkter i lågspänningsnät NS345 vid ingen produktion och hög last före (orange) och efter (blå) vidtagna åtgärder.

Efter nätförstärkning och transformatorbyte varierar spänningen vid hög last mellan 219 – 226 V med 227 V på lågspänningsskenan. Därmed med den nya transformatorn uppfylls rekommendationen för den lägre spänningssgränsen på 219,5 V för alla anslutningspunkter utom en.

För maximal produktion och ingen last kommer spänningsnivåerna efter vidtagna åtgärder att uppfylla rekommendationen för en övre gräns på 242,5 V enligt figur 6.5.





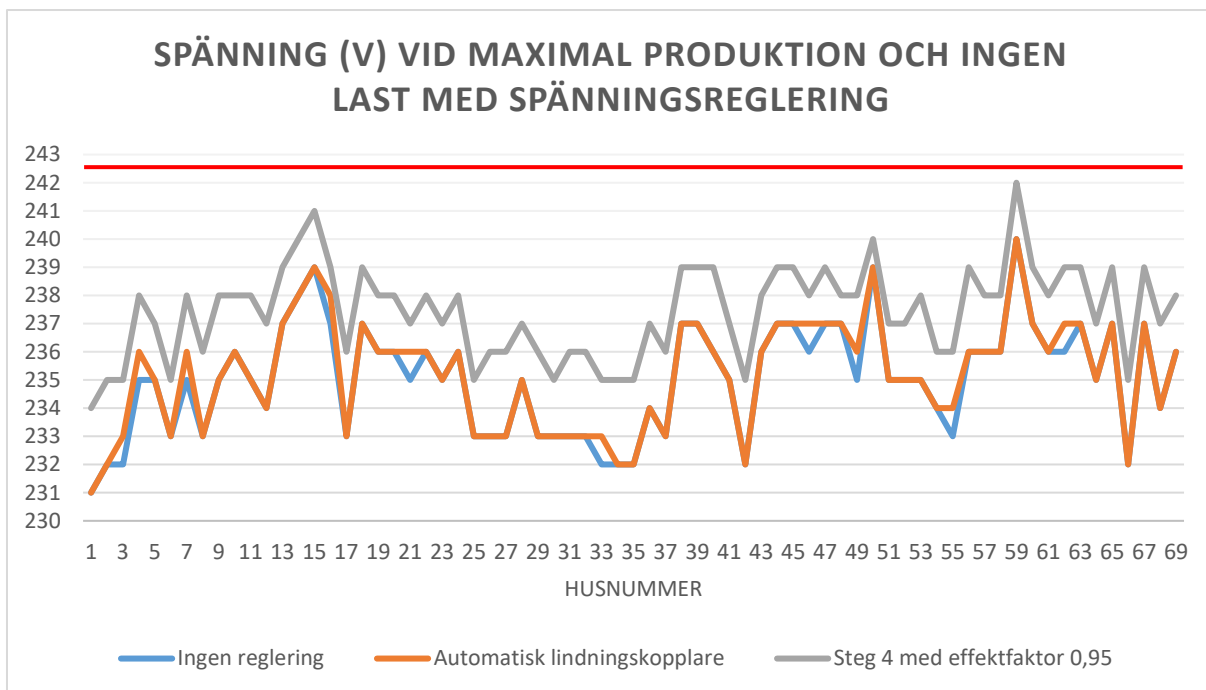
Figur 6.5 Spänningsnivåer för anslutningspunkter i lågspänningsnät NS345 vid maximal produktion och låg last före (orange) och efter (blå) vidtagna åtgärder.

Figur 6.4 och 6.5 visar att med nätförstärkning och ny transformator för område NS345 kommer spänningsnivåerna för de två scenarion att uppfylla rekommendationerna nästintill fullständigt. Med hänsyn till den enstaka avvikelser hos en punkt vid hög last undersöks de två spänningsregleringsmetoderna, detta även i syfte att öka marginalen för acceptansgränsen.

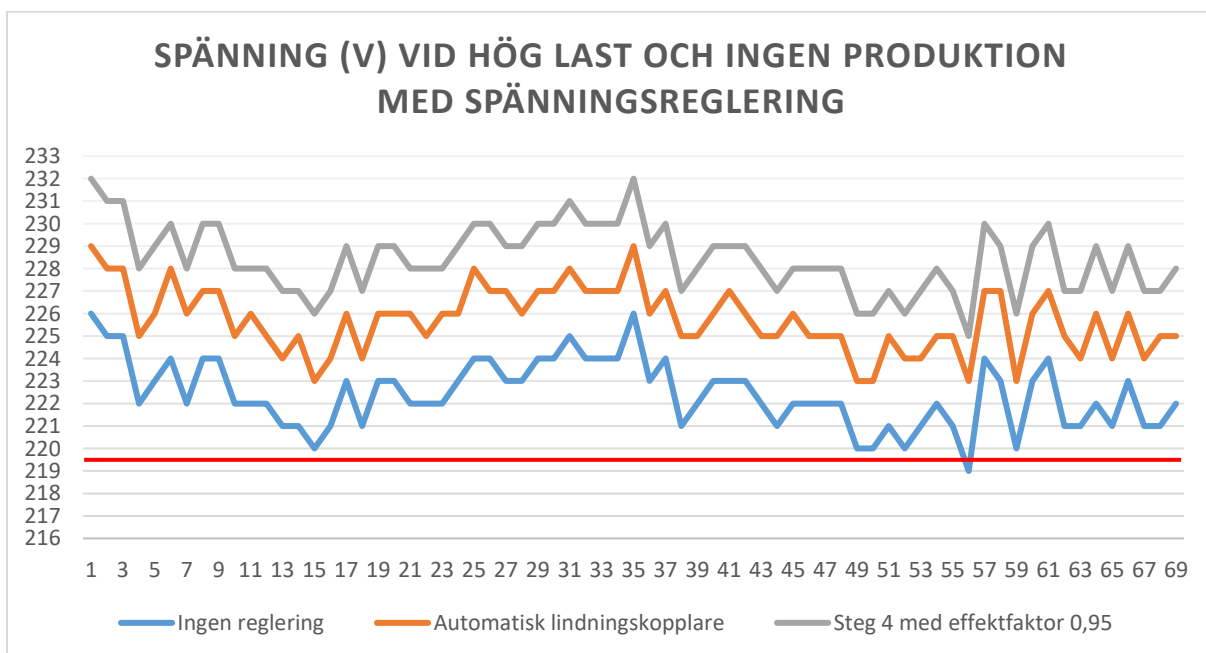
## 6.2.2 Spänningsreglering för NS345

För att simulera reglering med reaktiv effektkompensering ändras effektfaktorn för solcellsanläggningar till 0,95 istället för 1. Detta kommer leda till att kraftelektroniken i anläggningarna kommer att producera eller konsumera reaktiv effekt i nätet. Omsättningen ändras till steg 4 för att öka nivån på lågspänningsskenan därmed öka spänningsnivåerna för alla anslutningspunkter.

Grunden för automatisk lindningskopplare som simuleras är ECOTAP VPD som tillverkas av Maschinenfabrik Reinhausen [41] och är lämplig för användning i distributionstransformatorer. Lindningskopplaren monteras på transformatorns primärsida och levereras med fjärrstyrning som monteras i stationens brytarpanel. Det finns även möjlighet för extern styrning från exempelvis nät-distributörens driftrum. Kostnaden för denna lindningskopplare är cirka 100 000 kr [42].

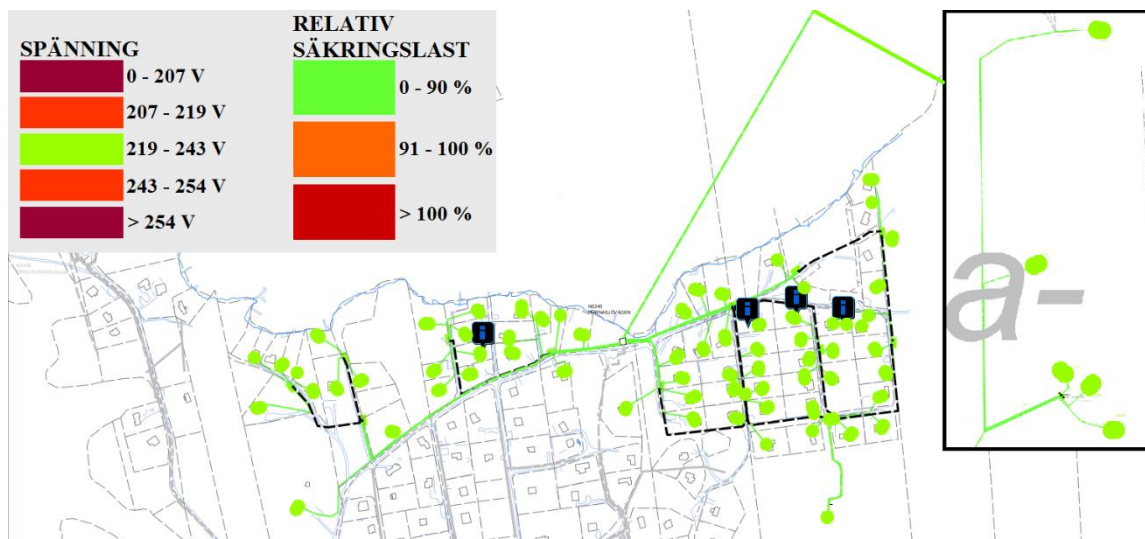


Figur 6.6 Spänningsnivåer för anslutningspunkter i lågspänningsnät NS345 vid maximal produktion och låg last. Ingen reglering (blå), automatisk lindningskopplare (orange), omsättningssteg 4 och effektfaktor 0,95 (grå).



Figur 6.7 Spänningsnivåer för anslutningspunkter i lågspänningsnät NS345 vid hög last och ingen produktion. Ingen reglering (blå), automatisk lindningskopplare (orange), omsättningssteg 4 och effektfaktor 0,95 (grå).

Enligt simuleringar uppfyller båda metoderna rekommendationen för spänningsvariation på  $230,94 \pm 5\%$ . Vid reglering med reaktiv effektkompensering ökar den reaktiva effekten i nätet från 15,88 kVAr till 190,7 kVAr vilket ackumuleras till ett överskott av märkeffekt på 530 kVA. Detta innebär även en ökning av de årliga förlustkostnaderna med 21 000 kronor.



*Figur 6.8 Spännings- och lastkarta för lågspänningsnät NS345 vid 100 % andel solcellsanläggningar. Runda figurer och linjer representerar spänningsnivå respektive säkringslast enligt legend.*

Enligt den upprättade kostnadskalkylen kommer kostnaden för ombyggnation inklusive ny transformator för område NS345 att bli cirka 1,4 miljoner kronor. Automatisk lindningskopp-lare är inte inräknad i denna kalkyl.

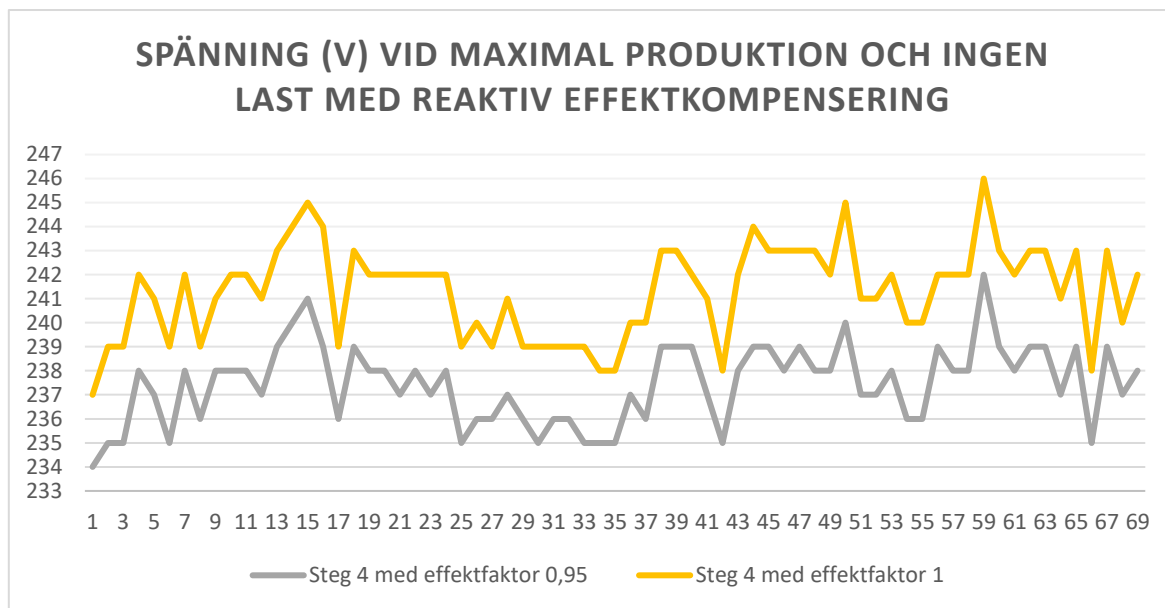
## 7 SLUTSATS

### 7.1 Analys av resultat

De studerade områden som omfattas av arbetet ger exempel på 3 sorter nätstyrkor som påverkas olika vid en ökande andel solcellsanläggningar. Som framgår i kapitel 4 finns det idag lågspänningsområden hos Härryda Energi som har dimensionerats på så sätt att de klarar av den potentiella mängden mikroproduktion som kan uppkomma. Samtidigt finns det nät vars nuvarande egenskaper kommer att kräva antingen mindre anpassning eller fundamentala förändringar.

Mikroproduktionen påverkar distributionsnät med samma princip, dock med omvända konsekvenser, som den som används vid dimensionering av nät i syfte att klara av höga laster. Detta innebär att det kanske är lämpligt att vid dimensionering av kommande nät, utöver det konventionella tillvägagångssättet, även ta hänsyn till eventuell mikroproduktion. För alla tre områden är den totala installerade effekten större än den som beräknas förbrukas vid hög last. Information om vilka taktyper är projekterade för hus i nybyggnationsområden skulle vara en viktig resurs vid användning av en beräkningsmodell, som den beskriven i kapitel 5. Alternativet till detta kan vara att bedöma den maximala produktionen lika stor som anslutningspunktens installerade säkring tillåter. Som framgår av bilaga 1, 2 och 3 är den effekten som baseras på takyta mindre än den som skulle tillåtas med hänsyn till säkringen för majoriteten av kunder. Vid scenario där den totala effekten från mikroproduktion beräknas överskrida den som antas förbrukas vid hög last innebär att ett nät som dimensionerats för hög acceptansgräns kommer att uppfylla de spänningsnivåer som rekommenderas även vid hög last.

Den nätförstärkningen som simulerats för område NS345 har visat sig vara i stort sett tillräcklig vilket låter en skugga över potentialen som var tänkt att presentera för de övriga teknikerna för spänningsreglering. I kapitel 6, figur 6.6 visas att den automatiska lindningskopplaren inte har haft någon särskild påverkan på spänningsnivåerna, detta då spänningsnivån på transformatorns lågspänningssida vid maximal produktion i det fallet faktiskt hamnar på samma nivå som lindningskopplaren var inställd att reglera till. Figuren nedan visar effekten av spänningsreglering med reaktiv effektkompensering för NS345.



*Figur 7.1 Inverkan av reaktiv effektkompensering*

Med en justering av effektfaktor från 1 till 0,95 sjunker spänningsnivåerna hos anslutningspunkterna med 3 – 5 V. Reaktiv effektkompensering är ett enkelt sätt att reglera spänningen, den medför inga ytterligare kostnader då det enbart är inställningen på växelriktaren som måste ändras. Dock gäller detta vid förutsättningen att alla växelriktare är överdimensionerade i förhållande till mängden installerad effekt. Medan själva regleringen är kostnadsfri uppstår det däremot kostsamma förluster då den reaktiva effekten inte kan nyttjas.

Det finns alltså en gräns för hur lämplig reaktiv effektkompensering är. I kapitel 6.6.2 är den simulerade årliga ökningen i förlustkostnader 20 000 kr. Den automatiska lindningskopplaren ECOTAP VPD anges av tillverkaren klara upp till 500 000 justeringar vilket vid till exempel 50 justeringar om dagen, ett väldigt högt antal, innebär en livslängd på 27 år och med en engångskostnad på cirka 100 000 kronor bedöms vara en bättre lösning. Att jämföra de två metoderna beror först på specifika omständigheter, till exempel hur stor spänningsvariationen är och hur många timmar om året den reaktiva effektkompenseringen faktiskt behövs.

## 7.2 Rekommendationer till fortsatt arbete

- Undersöka hur ett lågspänningsnät med hög andel mikroproduktion påverkar ett annat närliggande nät med exempelvis bostäder istället för hus.
- Ta reda på vad som kommer hända i 10 kV – nätet när andelen solcellsanläggningar ökar för alla lågspänningsnät på samma linje.
- Simulera för större lastvariationer exempelvis områden med hög mikroproduktion och samtidigt behov av laddning för elbilar – Då det blir svårare att hålla spänningsvariationen inom rekommenderade gränser krävs att fler regleringsmetoder används samtidigt? Kan integrationen av batteribankar bli en långsiktig lösning?
- Vid simulering av hela stationer noteras en allmän spänningsökning för alla anslutningspunkter, vilket inte hunnits undersökas. Som fortsättning skulle det vara lämpligt att undersöka olika simuleringsinställningar högre upp i distributionsträdet.

## REFERENSER

- [1] Härryda Energi, Mer om Företaget.  
<https://harrydaenergi.se/om-oss/mer-om-foretaget/> (Acc 2020-01-08)
- [2] Härryda Energi:s egen statistik
- [3] Ulf Jansson, Johan Andersson: Analys av solcellsanläggningars påverkan på elnätet. Karlstads universitet. Fakulteten för hälsa, teknik och naturvetenskap. Karlstad 2015.  
<http://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A860693&dswid=-3035> (Acc 2020-01-10)
- [4] Ellag (1997:857), 4 kap. Nättariffer, 10 § Särskilt om nättariffer för mindre produktionsanläggningar, Infrastrukturdepartementet RSED E, 1997.  
[https://www.riksdagen.se/sv/dokument-lagar/dokument/svensk-forfattningssamling/ellag-1997857\\_sfs-1997-857](https://www.riksdagen.se/sv/dokument-lagar/dokument/svensk-forfattningssamling/ellag-1997857_sfs-1997-857) (Acc 2020-01-08)
- [5] Inkomstskattelag (1999:1229), 67 kap. Skattereduktion, Mikroproduktion av förnybar el, 27 § Vilka som kan få skattereduktion, Finansdepartementet S1, 1999.  
[https://www.riksdagen.se/sv/dokument-lagar/dokument/svensk-forfattningssamling/inkomstskattelag-19991229\\_sfs-1999-1229](https://www.riksdagen.se/sv/dokument-lagar/dokument/svensk-forfattningssamling/inkomstskattelag-19991229_sfs-1999-1229) (Acc 2020-01-08)
- [6] Tillsynen mot Gotlands Elnät AB är avslutad. Jerker Sidén, Energimarknadsinspektionen 2017.  
<https://www.energimarknadsinspektionen.se/sv/nyhetsrum/nyheter/nyhetsarkiv/nyheter-2017/tillsynen-mot-gotlands-elnat-ab-ar-avslutad/> (Acc 2020-01-08)
- [7] Rättigheter och skyldigheter enligt ellagen, Energimyndigheten 2018  
<https://www.energimyndigheten.se/fornybart/solelportalen/vilka-rattigheter-och-skyldigheter-har-jag-vid-installation/dina-rattigheter-och-skyldigheter-enligt-ellagen/> (Acc 2020-01-08)
- [8] Energimyndigheten: ER 2016:22, Effekter i elsystemet från en ökad andel solel. 2016.  
[https://www.energimyndigheten.se/globalassets/fornybart/solenergi/solen-i-samhället/effekter-i-elsystemet-fran-en-okad-andel-solel.pdf?fbclid=IwAR2La\\_9Xab3tHTcodGd4s2rLJgjm96TZJEU4ZsJ1z-QD0mJrHHUR-K1\\_jE](https://www.energimyndigheten.se/globalassets/fornybart/solenergi/solen-i-samhället/effekter-i-elsystemet-fran-en-okad-andel-solel.pdf?fbclid=IwAR2La_9Xab3tHTcodGd4s2rLJgjm96TZJEU4ZsJ1z-QD0mJrHHUR-K1_jE) (Acc 2020-01-08)
- [9] Solar cell, Mitchell, Kim W., Tatro, Marjorie L., Access Science 2019  
<https://www-accessscience-com.proxy.lib.chalmers.se/content/solar-cell/633000> (Acc 2020-01-09)
- [10] Svensk Elstandard: SEK Handbok 457, Solceller, Råd och regler för elinstallationen. Utgåva 1, 2019. Sida 7 – 10.
- [11] Solstrålning i Sverige. SMHI, Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut, 2015  
<https://www.smhi.se/kunskapsbanken/meteorologi/solstralning-i-sverige-1.89984> (Acc 2020-01-09)
- [12] Olika typer av solceller. Energimyndigheten 2018  
<https://www.energimyndigheten.se/fornybart/solelportalen/lar-dig-mer-om-solceller/olika-typer-av-solceller/> (Acc 2020-01-09)

- [13] Hur mycket el producerar en solpanel? Dalakraft  
<https://www.dalakraft.se/faq/hur-mycket-el-producerar-en-solpanel> (Acc 2020-01-09)
- [14] Best Solar Panels 2020, Jason Svarc. Clean Energy Reviews 2020  
<https://www.cleanenergyreviews.info/blog/best-solar-panels-review> (Acc 2020-01-09)
- [15] Solceller växelriktare. Energimyndigheten 2015  
<https://www.energimyndigheten.se/tester/tester-a-o/solceller-vaxelriktare/> (Acc 2020-01-09)
- [16] Energiföretagen: 31537 ALP Handbok, Anslutning av elproduktion till lågspänningsnätet – ALP. Upplaga 3, 2018. Sida 16.
- [17] Svensk Elstandard: SS EN 50438 EN, Fordringar på mindre generatoranläggningar för anslutning i paralleldrif med det allmänna elnätet. Utgåva 2, 2014. Sida 44 – 46.
- [18] Energimyndigheten: ER 2018:22, Nätanslutna solcellsanläggningar 2017. Upplaga 40 ex, 2018.  
<https://energimyndigheten.a-w2m.se/Home.mvc?resourceId=104646> (Acc 2020-01-10)
- [19] Statistikdatabas, SCB. Energimyndigheten.  
[https://pxexternal.energimyndigheten.se/pxweb/sv/N%C3%A4tanslutna%20solcellsanl%C3%A4ggningar/-/EN0123\\_1.px/?rxid=5e71cfb4-134c-4f1d-8fc5-15e530dd975c](https://pxexternal.energimyndigheten.se/pxweb/sv/N%C3%A4tanslutna%20solcellsanl%C3%A4ggningar/-/EN0123_1.px/?rxid=5e71cfb4-134c-4f1d-8fc5-15e530dd975c)
- [20] Ericsson Cables AB: Kraftkabelhandbok, sida 26. Falun.
- [21] Elkrafthandboken Elkraftsystem 2. Upplaga 3, Liber AB. Stockholm 1997. Sida 191
- [22] Peter Axelberg: Elektricitetslära, Alingsås 2019
- [23] Markus Eriksson. Specificering av produktionstransformatorer. Rekommenderade avsteg från IEC 60076 för att vid upphandling beskriva en robust enhet. Uppsala Universitet, Teknisk- naturvetenskaplig fakultet. Uppsala 2013.  
<http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:633426/FULLTEXT02>
- [24] EIFS 2013:1, Energimarknadsinspektionens författningssamling. 7 kap. Spänningskvalitet, 2 § Långsamma spänningsändringar. Energimarknadsinspektionen 2013.  
[https://www.ei.se/Documents/Publikationer/foreskrifter/EI/EIFS\\_2013\\_1.pdf](https://www.ei.se/Documents/Publikationer/foreskrifter/EI/EIFS_2013_1.pdf) (Acc 2020-01-10)
- [25] Energiföretagen: 31537 ALP Handbok, Anslutning av elproduktion till lågspänningsnätet – ALP. Upplaga 3, 2018. Sida 28.
- [26] Egen bild
- [27] Elkrafthandboken Elkraftsystem 2. Upplaga 3, Liber AB. Stockholm 1997. Sida 177
- [28] Statistikdatabas, SCB. Energimyndigheten.  
[http://www.statistikdatabasen.scb.se/pxweb/sv/ssd/START\\_EN\\_EN0108/ElanvM/chart/chartViewColumn/?rxid=edeaf905-4327-4c9d-9d1b-ccb61f18f8f](http://www.statistikdatabasen.scb.se/pxweb/sv/ssd/START_EN_EN0108/ElanvM/chart/chartViewColumn/?rxid=edeaf905-4327-4c9d-9d1b-ccb61f18f8f) (Acc 2020-02-03)
- [29] Intern statistik Härryda Energi
- [30] Ericsson Cables AB: Kraftkabelhandbok, sida 20. Falun.

- [31] Ericsson Cables AB: Kraftkabelhandbok, sida 59. Falun.
- [32] Elkrafthandboken Elkraftsystem 2. Upplaga 3, Liber AB. Stockholm 1997. Sida 171
- [33] Svensk Standard: SS 424 14 05 Ledningsnät för max 1000V – Dimensionering med hänsyn till utlösningvillkoret – Direkt jordade nät och icke direkt jordade nät skyddade av säkringar. Utgåva 2, 1993. Sida 10
- [34] T14-08:2017, Do it Locally: Local Voltage Support by distributed Generation. IEA-PVPS, International Energy Agency. Tyskland 2017.  
<http://www.iea-pvps.org/index.php?id=424> (Acc 2020-01-13)
- [35] Elkrafthandboken Elkraftsystem 1. Upplaga 8, Liber AB. Stockholm 1997. Sida 283-284, 443
- [36] Demirok, González, Frederiksen, Sera, Rodriguez, Teodorescu: Local reactive power control methods for overvoltage prevention of distributed solar inverters in low-voltage grids. IEEE Journal of Photovoltaics. 2011 sida 174-182.
- [37] Elteknik. Chalmers tekniska högskola, Institutionen för Energi och miljö. Göteborg 2012. Sida 39-42.
- [38] Elkrafthandboken Elkraftsystem 2. Upplaga 3, Liber AB. Stockholm 1997. Sida 183
- [39] Energiföretagen: 31537 ALP Handbok, Anslutning av elproduktion till lågspänningsnätet – ALP. Upplaga 3, 2018. Sida 46-47
- [40] Energiföretagen, EBR: El Byggnads Rationalisering. <https://www.energiforetagen.se/ebr> (Acc 2020-02-03)
- [41] [https://www.reinhausen.com/en/desktopdefault.aspx/tabid-1947/2820\\_read-7909/](https://www.reinhausen.com/en/desktopdefault.aspx/tabid-1947/2820_read-7909/)
- [42] Muntlig referens: Håkan Svanberg, kontaktperson på Reinhausen Nordic AB (RSE)



## BILAGA 1 NS274 EFFEKT ENLIGT TAKYTA OCH MARGINAL I FÖRHÅLLANDE TILL SÄKRING

Anläggnings-ID	Säk-ring	Effekt enligt takyta (kW)	Max effekt enligt säkring	Marginal (kW) i förhållande till säkring	Marginal (%) i förhållande till säkring
NS274G11S1	20	6,7	13,9	7,2	51,7%
NS274G11S2	20	8,3	13,9	5,6	40,1%
NS274G11S3	20	8,3	13,9	5,6	40,1%
<b>NS274G11S4</b>	<b>20</b>	<b>21,3</b>	<b>13,9</b>	<b>-7,4</b>	<b>-53,7%</b>
NS274G12S1	20	9,8	13,9	4,1	29,3%
<b>NS274G12S2</b>	<b>25</b>	<b>22</b>	<b>17,3</b>	<b>-4,7</b>	<b>-27,0%</b>
NS274G12S3	20	13,3	13,9	0,6	4,0%
NS274G12S4	20	8,8	13,9	5,1	36,5%
NS274G12S5	20	10,2	13,9	3,7	26,4%
NS274G12S6	20	8,3	13,9	5,6	40,1%
NS274G13S1	20	6,7	13,9	7,2	51,7%
NS274G13S2	20	11,7	13,9	2,2	15,6%
NS274G13S3	20	13,3	13,9	0,6	4,0%
NS274G21S1	20	5	13,9	8,9	63,9%
NS274G21S2	20	5	13,9	8,9	63,9%
NS274G21S3	20	5	13,9	8,9	63,9%
NS274G21S4	20	7,2	13,9	6,7	48,1%
NS274G21S5	20	4,3	13,9	9,6	69,0%
NS274G21S6	20	4,3	13,9	9,6	69,0%
NS274G22S1	20	5	13,9	8,9	63,9%
NS274G22S2	20	5	13,9	8,9	63,9%
NS274G22S3	20	5	13,9	8,9	63,9%
NS274G22S4	20	5	13,9	8,9	63,9%
NS274G22S5	25	12,5	17,3	4,8	27,8%
NS274G22S6	25	14,7	17,3	2,6	15,2%
NS274G22S7	16	10,2	11,1	0,9	8,0%
NS274G31S1	25	10	17,3	7,3	42,3%
NS274G31S2	20	9	13,9	4,9	35,1%
NS274G31S3	20	11,7	13,9	2,2	15,6%
NS274G31S4	25	14,3	17,3	3,0	17,5%
<b>NS274G31S5</b>	<b>20</b>	<b>14,2</b>	<b>13,9</b>	<b>-0,3</b>	<b>-2,5%</b>
NS274G31S6	20	10,8	13,9	3,1	22,1%
NS274G31S7	20	7,7	13,9	6,2	44,4%

## BILAGA 2 NS345 EFFEKT ENLIGT TAKYTA OCH MARGINAL I FÖRHÅLLANDE TILL SÄKRING

Anläggnings-ID	Säk-ring	Effekt enligt takyta (kW)	Max effekt enligt säkring	Marginal (kW) i förhållande till säkring	Marginal (%) i förhållande till säkring
NS345G1S1	16	3,8	11,1	7,3	65,7%
NS345G1S2	16	3	11,1	8,1	72,9%
NS345G1S3	16	4,5	11,1	6,6	59,4%
NS345G1S4	20	8,8	13,9	5,1	36,5%
NS345G1S5	16	3,2	11,1	7,9	71,1%
NS345G1S6	16	3	11,1	8,1	72,9%
NS345G1S7	16	13,5	11,1	<b>-2,4</b>	<b>-21,8%</b>
NS345G1S8	16	9,2	11,1	1,9	17,0%
NS345G1S9	16	7,8	11,1	3,3	29,7%
NS345G1S10	20	5,8	13,9	8,1	58,2%
NS345G1S11	20	5,7	13,9	8,2	58,9%
NS345G1S12	16	6,7	11,1	4,4	39,6%
NS345G1S13	16	11,2	11,1	<b>-0,1</b>	<b>-1,0%</b>
NS345G2S1	16	7,2	11,1	3,9	35,1%
NS345G2S2	20	6,8	13,9	7,1	50,9%
NS345G2S3	16	9,7	11,1	1,4	12,5%
NS345G2S4	16	4,2	11,1	6,9	62,1%
NS345G2S5	16	9,3	11,1	1,8	16,1%
NS345G3S1	20	15,5	13,9	<b>-1,6</b>	<b>-11,8%</b>
NS345G3S2	16	12,8	11,1	<b>-1,7</b>	<b>-15,4%</b>
NS345G3S3	20	9,5	13,9	4,4	31,5%
NS345G3S4	20	11,8	13,9	2,1	14,9%
NS345G3S5	16	15	11,1	<b>-3,9</b>	<b>-35,3%</b>
NS345G3S6	20	11,5	13,9	2,4	17,0%
NS345G3S7	20	11,7	13,9	2,2	15,6%
NS345G3S8	16	5	11,1	6,1	54,9%
NS345G3S9	20	7,2	13,9	6,7	48,1%
NS345G3S10	20	8,5	13,9	5,4	38,7%
NS345G3S11	20	6,7	13,9	7,2	51,7%
NS345G4S2	25	7,8	17,3	9,5	55,0%
NS345G4S4	16	8,7	11,1	2,4	21,5%
NS345G4S5	20	12,8	13,9	1,1	7,6%
NS345G4S6	16	8,5	11,1	2,6	23,3%
NS345G4S7	25	10,5	17,3	6,8	39,4%
NS345G4S8	16	5,5	11,1	5,6	50,4%
NS345G4S9	20	10	13,9	3,9	27,8%
NS345G4S10	20	7	13,9	6,9	49,5%
NS345G5S1	20	11,5	13,9	2,4	17,0%
NS345G5S2	20	12,2	13,9	1,7	12,0%

NS345G5S3	20	7,2	13,9	6,7	48,1%
NS345G5S4	20	12,3	13,9	1,6	11,3%
NS345G5S5	20	11,7	13,9	2,2	15,6%
NS345G5S6	25	10,8	17,3	6,5	37,7%
NS345G5S7	20	12	13,9	1,9	13,4%
NS345G5S9	16	8,7	11,1	2,4	21,5%
NS345G5S11	16	14	11,1	<b>-2,9</b>	<b>-26,3%</b>
NS345G5S12	20	11,2	13,9	2,7	19,2%
NS345G5S13	20	9,8	13,9	4,1	29,3%
NS345G5S14	16	5,8	11,1	5,3	47,7%
NS345G6S3	25	15,7	17,3	1,6	9,4%
NS345G6S5	25	10,2	17,3	7,1	41,1%
NS345G6S6	16	10	11,1	1,1	9,8%
NS345G6S7	16	6,7	11,1	4,4	39,6%
NS345G6S8	16	4,5	11,1	6,6	59,4%
NS345G6S9	20	7,2	13,9	6,7	48,1%
NS345G6S10	25	8,3	17,3	9,0	52,1%
NS345G6S11	20	5,7	13,9	8,2	58,9%
NS345G6S12	16	6,2	11,1	4,9	44,1%
NS345G6S13	16	8,2	11,1	2,9	26,0%
NS345G6S14	16	6,8	11,1	4,3	38,7%
NS345G6S15	25	4	17,3	13,3	76,9%

## BILAGA 3 NS239 EFFEKT ENLIGT TAKYTA OCH MARGINAL I FÖRHÅLLANDE TILL SÄKRING

Anläggnings-ID	Säk-ring	Effekt enligt takyta (kW)	Max effekt enligt säkring	Marginal (kW) i förhållande till säkring	Marginal (%) i förhållande till säkring
NS239G1S1	20	6,5	13,9	7,4	53,1%
NS239G1S2	20	6,5	13,9	7,4	53,1%
NS239G1S3	20	6,5	13,9	7,4	53,1%
NS239G1S4	16	13,2	11,1	<b>-2,1</b>	<b>-19,0%</b>
NS239G1S5	20	13,2	13,9	0,7	4,8%
NS239G1S6	20	13,7	13,9	0,2	1,2%
NS239G1S7	25	14,8	17,3	2,5	14,6%
NS239G1S8	25	10,8	17,3	6,5	37,7%
NS239G1S9	20	14	13,9	<b>-0,1</b>	<b>-1,0%</b>
NS239G1S10	25	12,8	17,3	4,5	26,1%
NS239G1S11	25	15	17,3	2,3	13,4%
NS239G1S12	20	9,5	13,9	4,4	31,5%
NS239G2S1	16	9,5	11,1	1,6	14,3%
NS239G2S2	20	10,8	13,9	3,1	22,1%
NS239G2S3	20	10,3	13,9	3,6	25,7%
NS239G2S4	20	9,5	13,9	4,4	31,5%
NS239G2S5	20	14	13,9	<b>-0,1</b>	<b>-1,0%</b>
NS239G2S6	16	14	11,1	<b>-2,9</b>	<b>-26,3%</b>
NS239G2S7	16	7,5	11,1	3,6	32,4%
NS239G3S1	16	7,5	11,1	3,6	32,4%
NS239G3S2	20	7,5	13,9	6,4	45,9%
NS239G3S3	16	7,5	11,1	3,6	32,4%
NS239G3S4	20	6,8	13,9	7,1	50,9%
NS239G3S5	25	6,8	17,3	10,5	60,8%
NS239G3S6	20	9,8	13,9	4,1	29,3%
NS239G3S7	20	9,8	13,9	4,1	29,3%
NS239G3S8	20	9,8	13,9	4,1	29,3%
NS239G3S9	20	7,3	13,9	6,6	47,3%
NS239G3S10	20	7,3	13,9	6,6	47,3%
NS239G3S11	16	7,3	11,1	3,8	34,2%
NS239G3S12	20	7,3	13,9	6,6	47,3%
NS239G3S14	20	7,3	13,9	6,6	47,3%
NS239G3S15	20	7,3	13,9	6,6	47,3%
NS239G3S16	20	7,3	13,9	6,6	47,3%
NS239G4S1	25	7,3	17,3	10,0	57,9%
NS239G4S2	20	7,3	13,9	6,6	47,3%
NS239G4S3	16	7,3	11,1	3,8	34,2%
NS239G4S4	25	5,5	17,3	11,8	68,3%
NS239G4S5	20	5,5	13,9	8,4	60,3%

NS239G4S6	20	8,8	13,9	5,1	36,5%
NS239G4S7	25	8,8	17,3	8,5	49,2%
NS239G4S8	20	8,8	13,9	5,1	36,5%
NS239G4S9	20	8,8	13,9	5,1	36,5%
NS239G4S10	20	8,8	13,9	5,1	36,5%
NS239G4S11	20	8,8	13,9	5,1	36,5%
NS239G4S12	20	9,5	13,9	4,4	31,5%
NS239G4S13	20	8,7	13,9	5,2	37,2%
NS239G4S14	20	6,5	13,9	7,4	53,1%
NS239G5S1	25	7	17,3	10,3	59,6%
NS239G5S2	16	7	11,1	4,1	36,9%
NS239G5S3	20	7	13,9	6,9	49,5%
NS239G5S4	20	5,3	13,9	8,6	61,8%
NS239G5S5	20	5,3	13,9	8,6	61,8%
NS239G5S6	16	5,3	11,1	5,8	52,2%
NS239G5S7	25	5,3	17,3	12,0	69,4%
NS239G5S8	20	8,8	13,9	5,1	36,5%
NS239G5S9	20	9,2	13,9	4,7	33,6%
NS239G5S10	20	6,2	13,9	7,7	55,3%
NS239G5S11	20	6,2	13,9	7,7	55,3%
NS239G5S12	25	6,2	17,3	11,1	64,2%
NS239G5S13	20	6,2	13,9	7,7	55,3%
NS239G8S1	20	5	13,9	8,9	63,9%
NS239G8S2	20	5	13,9	8,9	63,9%
NS239G8S3	20	5	13,9	8,9	63,9%
NS239G8S4	20	5,3	13,9	8,6	61,8%
NS239G8S5	20	5,3	13,9	8,6	61,8%
NS239G8S6	20	6,2	13,9	7,7	55,3%
NS239G8S7	20	6,2	13,9	7,7	55,3%
NS239G8S8	16	6,2	11,1	4,9	44,1%
NS239G8S9	20	8,8	13,9	5,1	36,5%
NS239G8S10	20	8,8	13,9	5,1	36,5%
NS239G8S11	20	8,8	13,9	5,1	36,5%
NS239G8S12	25	8,8	17,3	8,5	49,2%
NS239G8S13	20	8,8	13,9	5,1	36,5%
NS239G8S14	20	8,8	13,9	5,1	36,5%

## BILAGA 4 IMPEDANSVÄRDEN

Objekttyp	Grupp	Knutpunkt	Rk fas ( $\Omega$ )
Skena i kabelskåp	1	1.1	0,0175
Skena i kabelskåp	1	1.2	0,0249
Anslutningspunkt	1	NSTESTG12A5	0,0707
Anslutningspunkt	1	NSTESTG12A4	0,0707
Anslutningspunkt	1	NSTESTG12A3	0,0707
Anslutningspunkt	1	NSTESTG12A2	0,0707
Anslutningspunkt	1	NSTESTG12A1	0,0707
Anslutningspunkt	1	NSTESTG11A5	0,0632
Anslutningspunkt	1	NSTESTG11A4	0,0632
Anslutningspunkt	1	NSTESTG11A3	0,0632
Anslutningspunkt	1	NSTESTG11A2	0,0632
Anslutningspunkt	1	NSTESTG11A1	0,0632
Skena i kabelskåp	2	2.1	0,0175
Skena i kabelskåp	2	2.2	0,0249
Anslutningspunkt	2	NSTESTG22A5	0,0707
Anslutningspunkt	2	NSTESTG22A4	0,0707
Anslutningspunkt	2	NSTESTG22A3	0,0707
Anslutningspunkt	2	NSTESTG22A2	0,0707
Anslutningspunkt	2	NSTESTG22A1	0,0707
Anslutningspunkt	2	NSTESTG21A5	0,0632
Anslutningspunkt	2	NSTESTG21A4	0,0632
Anslutningspunkt	2	NSTESTG21A3	0,0632
Anslutningspunkt	2	NSTESTG21A2	0,0632
Anslutningspunkt	2	NSTESTG21A1	0,0632
Skena i kabelskåp	3	3.1	0,0175
Skena i kabelskåp	3	3.2	0,0249
Anslutningspunkt	3	NSTESTG32A5	0,0707
Anslutningspunkt	3	NSTESTG32A4	0,0707
Anslutningspunkt	3	NSTESTG32A3	0,0707
Anslutningspunkt	3	NSTESTG32A2	0,0707
Anslutningspunkt	3	NSTESTG32A1	0,0707
Anslutningspunkt	3	NSTESTG31A5	0,0632
Anslutningspunkt	3	NSTESTG31A4	0,0632
Anslutningspunkt	3	NSTESTG31A3	0,0632
Anslutningspunkt	3	NSTESTG31A2	0,0632
Anslutningspunkt	3	NSTESTG31A1	0,0632

## BILAGA 5 EFFEKT BASERAD PÅ EKVIVALENT LAST

Objekttyp	Grupp	Knutpunkt	Rk fas (Ω)	1/Rk närmaste punkt (Ω)	Rk subgrupp	1/Rk trafo till punkt (1/Ω)	Snitt 1/Rk trafo till punkt (Ω)	Rk grupp (Ω)	Effekt (W) snitt	Effekt (kW) per punkt baserad på impedansförhållande
<b>Skena i kabelskåp</b>	<b>1</b>	<b>K274.1.1</b>	<b>0,0093</b>							
Anslutningspunkt	1	274001005	0,1293	8,333333333	<b>0,02315812</b>	7,733952049				19,7
Anslutningspunkt	1	274001008	0,162	6,548788474		6,172839506				15,7
Anslutningspunkt	1	274001013	0,0733	15,625		13,6425648				34,8
Anslutningspunkt	1	274001003	0,0882	12,67427123		11,33786848				28,9
<b>Skena i kabelskåp</b>	<b>1</b>	<b>K274.1.2</b>	<b>0,0191</b>	<b>0,0098</b>						
Anslutningspunkt	1	274001009	0,1557	7,320644217	<b>0,01402952</b>	6,422607579		<b>1.1/(1.2//1.3)</b>		16,4
Anslutningspunkt	1	271001001	0,1282	9,165902841		7,800312012	<b>9,398310175</b>	<b>0,019957251</b>	<b>23941</b>	19,9
Anslutningspunkt	1	269001001	0,161	7,04721635		6,211180124				15,8
Anslutningspunkt	1	274001006	0,1074	11,32502831		9,310986965			<b>311,2 kW</b>	23,7
Anslutningspunkt	1	274001001	0,0531	29,41176471		18,83239171			<b>totalt</b>	48,0
Anslutningspunkt	1	269001006	0,1618	7,007708479		6,180469716				15,7
<b>Skena i kabelskåp</b>	<b>1</b>	<b>K274.1.3</b>	<b>0,0297</b>	<b>0,0106</b>						
Anslutningspunkt	1	636001020	0,1193	11,16071429	<b>0,03413291</b>	8,382229673		1.2//1.3		21,4
Anslutningspunkt	1	274001002	0,1597	7,692307692		6,261740764		0,019742779		16,0
Anslutningspunkt	1	274001004	0,072	23,64066194		13,88888889				35,4
<b>Skena i kabelskåp</b>	<b>2</b>	<b>K274.2.1</b>	<b>0,0312</b>							
Anslutningspunkt	2	274001007	0,1121	12,36093943	<b>0,01061659</b>	8,920606601				12,7
Anslutningspunkt	2	274002009	0,1318	9,940357853		7,587253414				10,8
Anslutningspunkt	2	274002004	0,0588	36,23188406		17,00680272				24,3

Anslutningspunkt	2	274002010	0,1378	9,380863039		7,256894049				10,4
Anslutningspunkt	2	274002007	0,1445	8,826125331		6,920415225				9,9
Anslutningspunkt	2	274002008	0,0885	17,45200698		11,29943503	<b>9,332845562</b>			16,1
<b>Skena i kabelskåp</b>	<b>2</b>	<b>K274.2.2</b>	<b>0,0459</b>	<b>0,0147</b>					<b>13334</b>	
Anslutningspunkt	2	274002012	0,2636	4,593477262		3,793626707				5,4
Anslutningspunkt	2	274002005	0,1213	13,26259947		8,244023083		<b>2.1//2.2</b>	<b>173,3 kW</b>	11,8
Anslutningspunkt	2	274002003	0,0824	27,39726027		12,13592233		<b>0,035833047</b>	<b>totalt</b>	17,3
Anslutningspunkt	2	274002011	0,1245	12,72264631		8,032128514				11,5
Anslutningspunkt	2	274002002	0,0726	37,45318352		13,77410468				19,7
Anslutningspunkt	2	274002006	0,1179	13,88888889		8,481764207				12,1
Anslutningspunkt	2	212004033	0,127	12,33045623	<b>0,0082204</b>	7,874015748				11,2
<b>Skena i kabelskåp</b>	<b>3</b>	<b>K274.3.1</b>	<b>0,0489</b>							
Anslutningspunkt	3	274003004	0,1572	9,233610342		6,361323155				12,3
Anslutningspunkt	3	274003007	0,2349	5,376344086		4,257130694				8,2
Anslutningspunkt	3	274003005	0,1554	9,389671362		6,435006435				12,5
Anslutningspunkt	3	274003008	0,0818	30,39513678		12,22493888	<b>7,996191599</b>	<b>0,057269181</b>	<b>15494</b>	23,7
Anslutningspunkt	3	274003002	0,1986	6,68002672		5,035246727				9,8
Anslutningspunkt	3	274003001	0,1345	11,68224299		7,434944238			<b>108,4 kW</b>	14,4
Anslutningspunkt	3	274003006	0,0703	46,72897196	<b>0,00836918</b>	14,22475107			<b>totalt</b>	27,6



INSTITUTIONEN FÖR ELEKTROTEKNIK

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sverige 2020

[www.chalmers.se](http://www.chalmers.se)



**CHALMERS**