CHALMERS

Distribuerad genererings påverkan på dimensionering och planering av lågspänningsnätet i Halmstad

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet Elektroingenjör

Soran Tahir
Institutionen för Energi och Miljö
Avdelning Elteknik
CHALMERS TEKNISKA HÖGKOLA
Göteborg, Sverige 2016

Distribuerad genererings påverkan på dimensionering och planering av lågspänningsnätet i Halmstad

Institutionen för Energi och Miljö
Divisionen för Elkraftsteknik
CHALMERS TEKNISKA HÖGKOLA
Göteborg, Sverige 2016

Distribuerad genererings påverkan på dimensionering och planering av lågspänningsnätet i Halmstad
Soran Tahir

© Soran Tahir 2016

Technical Report
Institutionen för Energi och Miljö
Divisionen för Elkraftsteknik
Chalmers Tekniska Högskola
412 96 Göteborg Sverige
Telefon +46 (0)31–772 1000

Förord

Detta examensarbete har utförts på Halmstad Energi och Miljö Nät AB och behandlar vilken påverkan distribuerad generering har på dimensionering och planering av ett lågspänningsnät.

Jag vill rikta ett stort tack till all personal på Halmstad Energi och Miljö Nät AB (”HEM”) som behandlat mig välkomnande under examensarbetet. De personer på HEM som jag vill tacka extra mycket är elkraftsingenjör Erik Gustavsson för handledning, utbyte av kompetens och framförallt tiden han har lagt ner på att hjälpa och lära mig de nödvändiga funktionerna i dpPower för detta projekt. Ett stort tack riktas även till planeringsingenjörerna Ulf Ek och Claes Andersson som med sin kompetens hjälpt mig att utforma ett lågspänningsnät, samt Michael Adgård för insamling av nödvändig data .

På Chalmers tekniska högskola vill jag tacka min examinator Torbjörn Thiringer och min handledare Peiyuan Chen för hjälp med att slussa mig rätt.

Abstract

A study about how micro production from photovoltaic cells affects a low voltage network was conducted at Halmstad Energi och Miljö Nät AB, where a fictive residential area working as a test network was built up in the programme dpPower with help of theory collection and the knowledge of planning and power engineers at Halmstad Energi och Miljö Nät AB.
The fictive network was divided into two areas, each with its own secondary substation, one with 41 loads and the other with 171 loads in form of detached houses/ town houses, kindergarten / schools and blocks of flats. Studies on the fictive network were done when the loads had minimum power consumption and the power from the micro production of detached houses/ town houses varied in the ranges 8 kW, 20 kW, 32 kW, 43, 5 kW, whereas kindergarten/schools and blocks of flats had constant micro production.

The result showed, as the share of micro production and the power of micro production was increasing the number of loads with overvoltage in the recommended level (5 % of the nominal phase voltage) and critical level (10 % of the nominal phase voltage) where increasing.
The transformers' rated power are exceeded when micro production power in each detached house/ town house was 8,5 kW in the larger area and 20 kW at the smaller area, in the case when every load had micro production connected.In planned residential areas with a high potential of micro production, the numbers of loads connected to the substation should be considered compared to areas without micro production. The number of loads connected to the substation compartment should be considered in order to prevent over voltages at the cable cabinets and at loads.
The thesis is concluded with a recommendation on numbers of loads connected to the substation compartment at the different micro production levels.

Keywords: Micro production, cable cabinets, transformers rated power, overvoltages

Sammanfattning

Studier hur mikroproduktion av el påverkar ett lågspänningsnät gjordes på Halmstad Energi och Miljö Nät AB där ett fiktivt bostadsområde som fungerade som testnät byggdes upp i programvaran dpPower med hjälp av teoriinsamling och i samråd med planeringsingenjörer och elkraftsingenjörer från Halmstad Energi och Miljö Nät AB. Det fiktiva testnätet bestod av två områden med varsin nätstation, med 171 laster respektive 41 laster i form av villor/radhus, förskolor/skolor och flerbostadshus var kopplade till varsin nätstation. Studierna på det fiktiva nätet gjordes när lasterna hade minimal effektförbrukning och en mikroproduktionseffekt som varierades med värdena 8 kW, 20 kW, 32 kW och 43,5 kW. Övriga laster hade en konstant mikroproduktion på 43,5 kW.

Arbetet visade att i takt med att andelen mikroproducenter ökade och mikroproduktionseffekten i varje radhus/villa steg, ökade andelen laster med överspänningar över den tillåtna nivån på 10 % och över den rekommenderade överspänningsnivån på 5 %. Transformatorernas märkeffekt överskreds när mikroproduktionseffekten i radhus/villor är 8,5 kW i det större området och vid 20 kW i det mindre området, i fallet när samtliga laster hade mikroproduktion ansluten.
I planerade bostadsområden där det finns en stor potential av mikroproduktion bör man se över antalet laster kopplade till en nätstation när man dimensionerar och projekterar området jämfört med fall utan mikroproduktion .

Andelen laster i varje fack i en nätstation bör även ses över för att förhindra överspänningar i kabelskåp och hos laster. Arbetet avslutas med en rekommendation för antalet laster med mikroproduktion kopplade till varje kabelskåpsgrupp/fack i nätstation för de olika mikroproduktionseffekterna.

Nyckelord: Mikroproduktion, kabelskåp, transformator märkeffekt, överspänningar

Innehåll

1 Inledning 1
1.1 Bakgrund 1
1.2 Syfte och frågeställning 1
1.3 Avgränsningar 2
2 Teori 3
2.2 Sammanlagring 3
2.3 Velanders Formel 3
2.4 Utlösningstid för säkringar 4
2.4.1 Sekvenskomponenter 4
2.4.2 Enfasig kortslutningsström 6
2.5 Villkor för kablar 7
2.5.1 Belastningsström 7
2.5.2 Skydd mot överströmmar 7
2.5.3 Kabelbeteckningar 8
2.5.4 Kabelns elektriska egenskaper 8
2.6 Nätuppbyggnad 9
2.6.1 Nätstation 9
2.6.2 Kabelskåp 9
2.6.3 Nätstruktur 9
2.7 Spänningsändringar 11
2.7.2 Rekommendationer från Svensk Energi 11
2.7.3 Långsamma spänningsändringar 11
3 Metoder och dimensionering av testnät 12
3.1 Kontrollberäkningar 12
3.2 Beskrivning av det fiktiva området 14
3.3 Minimal energiförbrukning hos fastigheterna 14
3.4 Lågspänningsnät schema över området i dpPower 15
3.4.1 Område 1 15
3.4.2 Område 2 17
3.5 Från kabelskåp till kund 19
3.5.1 Säkringar i kabelskåpen 19

3.5.2 Kabeltyper ifrån kabelskåpen....20
4 Simulering och resultat....22
4.1 Överspänningar hos kunder....22
4.1.2 Område 2....22
4.1.3 Område 1....25
4.1.3 Kritiska lastområden....28
4.2 Påverkan i ett grannskap....30
4.2.1 Påverkan på en last i det mindre grannskapet....30
4.2.2 Påverkan på kabelskåpet i det mindre grannskapet....32
4.2.3 Påverkan på det stora grannskapet....33
4.2.4 Spänningspåverkan på kabelskåp i det stora grannskapet....34
4.3 Mikroproduktionens påverkan på transformatorn....34
4.3.1 Effektnivåer hos transformatorn....34
4.3.2 Effektnivåer hos Område 2....35
4.3.2 Effektnivåer hos Område 1....37
4.6 Överspänningar i ett kabelskåp....40
4.7 Påverkan på transformatorns lågspänningsskena....43
5 Slutsatser....47
5.1 Framtida arbeten....47
Källförteckningar....48
Bilagor....49
Bilaga 1 Tid-Ström-Diagram....49
Bilaga 2 Beräkningar på nätstationsfack i N7001....50
Bilaga 3 Beräkningar på nätstationsfack i N7002....52

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Ingen kan undgå den stora utvecklingen av solceller och det ökande nyttjandet av solenergi som vi idag ser i världen. Att producera elenergi genom solceller är ur ett miljömässigt perspektiv en utmärkt lösning.
Solceller ger en möjlighet för privatpersoner och andra konsumenter av elenergi att skapa egen elenergi, vilken kan förbrukas eller säljas vidare till nätägarna. Detta kallas distribuerad generering.
I takt med att distribuerad generering utgör en större del av elproduktionen i Sverige kommer detta att påverka elnätet både på lokal och på nationell nivå.
Dagens lokala nät är byggda utifrån principen att energin transporteras i en riktning. Alla anslutna kunder är endast konsumenter av energi. Distribuerad generering ändrar på denna princip och vissa kunder kommer istället att producera energi som transporteras uppåt i nätet.

Denna nya typ av konsumtions/produktionsmönster hos kunderna kan komma att leda till svårigheter hos elnätsägaren när det kommer till planering av elnätet, t.ex. vid dimensionering av kablage för att få ett väl fungerande elnät. Vid projektering och dimensionering av lågspänningsnätet i Halmstad har man som mål att se till att kunderna inte får en över/underspänning som motsvarar mer än 5 % procent av den nominella spänningen under normala förhållanden, samt att utlösningstiden för säkringarna hos kunderna är under 5 sekunder.

1.2 Syfte och frågeställning

Syftet med detta arbete är att bygga ett fiktivt lågspänningsnät i programvaran dpPower och undersöka om Halmstad Energi och Miljö Näts (forts. ”HEM”) nuvarande arbetssätt vid dimensionering och planering även går att anamma under förhållanden med stor andel distribuerad generering. Överspänningsnivåerna 5 och 10 % beskrivs i teoriavsnittet.

De frågor som ställs är:

- Hur stor andel mikroproducenter klarar elnätet av utan att kunderna får överspänningar som överstiger 5 % och 10 % av den nominella spänningen?
- Hur påverkas transformatorerna i elnätet av mikroproduktion? Kommer den skenbara effekten att överstiga transformatorns märkeffekt och hur stor är spänningsändringarna på transformatorns lågspänningsskena?
- Kan man åstadkomma någon förbättring hos de kunder som får högst överspänning genom att höja kabelarean i deras servisledningar?
- Hur påverkas kabelskåpen av mikroproduktion? Hur stor andel med mikroproduktion klarar kabelskåpen utan att överspänningen överstiger 3 % av nominell spänning? Hur många kunder på varje kabelskåp krävs det för att spänningen i kabelskåpskenan ska överstiga 3 %?

1.3 Avgränsningar

Arbetet omfattar endast påverkan på ett lokalt lågspänningsnät 0,4 kV.
I denna rapport kommer endast trefasigt anslutna solceller att studeras, vilket är ett krav från HEM vid anslutning av mikroproduktion.

De överspänningar som kommer att studeras är endast långsamma överspänningar.
Kabeltypernas belastningsförmåga kommer inte att tas hänsyn till när mikroproduktionseffekten ökar, utan de är dimensionerade i fall med maximal last utan mikroproduktion.
Simulering och beräkningar kommer endast ske vid minimal last och maximal mikroproduktion.

2 Teori

I detta kapitel tas den bakomliggande teorin som är nödvändig att känna till för att dimensionera ett lågspänningsnät och studera distribuerad genererings påverkan på lågspänningsnätet i form av överspänningar och

2.1 Mikroproduktion

Mikroproduktion innebär att kunder till ett elnätsbolag har möjlighet att producera egen el med hjälp av till exempel solenergi och vindkraft. Kravet för att distribuerad generering ska räknas som mikroproduktion är att produktionseffekten inte överstiger 43,5 kW och att mikroproduktionsanläggningen är ansluten till en säkring av högst 63A [1].

2.2 Sammanlagring

Sannolikheten att laster har en maxeffektförbrukning samtidigt är liten i ett elnät, och minskar i takt med allt fler laster. Detta medför att man vid dimensionering och vid maxeffekt inte behöver ta hänsyn till Kirchhoffs strömlag vid maxvärden, som säger att summan av alla inkommande flytande strömmar i en punkt/nod är summan av de utgående strömmarna [2].
Den maximala effekten i en inmatande kabel/ledning är lägre än summan av de maximala effekterna som flyter ut i de förgrenade kablarna/ledningarna [3].

2.3 Velanders Formel

Velanders formel är en metod som kan används för att approximativt uppskatta maxeffekten vid sammanlagring [4].
Metoden lämpar sig främst i de fall där energibehoven och konsumtionsmönstret energi hos kunderna är lika, som t ex för flerbostadshus som är uppvärmda av direktel och radhus/villor där en viss del sker genom uppvärmd el. I dessa typer av laster kan man förvänta sig maximal effektförbrukning sker samtidigt .
I stadsmiljöer där det kan finnas bibliotek, kontor och flerbostadshus skiljer sig energibehoven och konsumtionsmönstret åt då t ex bibliotek och ett flerbostadshus inte har maximal energiförbrukning samtidigt. Maximaleffekten som uppskattas med hjälp av Velander blir därför betydligt högre än den verkliga.
Velanders formel för likartade laster är:
Konstanterna k_1 och k_2 bestäms av hustyp och uppvärmningssätt. W är hushållets totala årsförbrukning av energi och mäts i kilowattimmar (kWh) [5],

$$P = k_1 \sum_1^i W_i + k_2 \sqrt{\sum_1^i W_i} \text{ , (i är antalet av en lasttyp)} \qquad (2.1)$$

I *Tabell 2.1* sammanställs två vanligt förekommande värden av konstanterna k_1 och k_2 för radhus, villor och flerbostadshus [5].

Tabell 2.1. *Velander konstanter för flerbostadshus och radhus/villor*

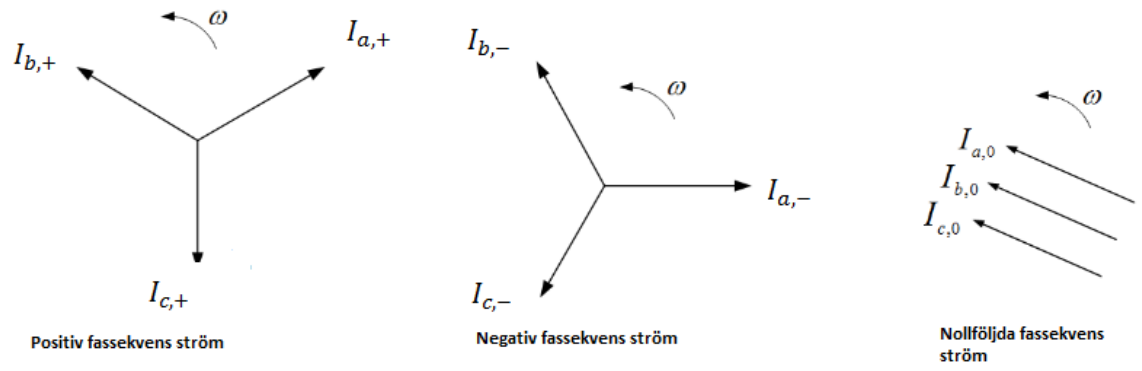
Hustyp	k_1	k_2
Flerbostadshus uppvärmda av el	0,00028	0,025
Radhus och villor uppvärmda till en viss del av el	0,00028	0,025

2.4 Utlösningstid för säkringar

Tiden det tar för en säkring att lösa ut bestäms genom att uppskatta den minsta möjliga kortslutningsström vilken uppkommer vid enfasig kortslutning mot jord. När kortslutningsströmmen har beräknats kan man utläsa utlösningstiden för en säkring i ett Tid-ström-diagram (se bilaga A).

2.4.1 Sekvenskomponenter

I ett symmetriskt system behöver man endast räkna på en fas för att få ut en fasström, då resultaten i de andra faserna är desamma förutom en fasförskjutning på 120 eller 240 grader.
Symmetriskt system innebär att summan av fasströmmarna är noll och att det därmed inte flyter någon ström genom återledaren.
I ett osymmetriskt system går enfasmetoden inte att använda då fasströmmarnas amplitud och/eller fasförskjutningen emellan de olika faserna kommer att skiljas åt. Faserna är därmed inte jämnt belastade. För att räkna ut de olika fasströmmarna skriver man istället om strömmarna med hjälp av positiv fassekvens ström, negativ fassekvens ström och noll fassekvens ström vilka återges i *Figur 2.1*. Sekvenskomponenterna är i sin tur symmetriska då strömmarna har samma amplitud och vinkel mellan faserna[5].



Figur 2.1. *Fassekvensströmmar. Positiv strömfassekvens till vänster, negativ fassekvens i mitten och nollföljd fassekvens till höger [6]*

Positiv sekvensström är den ström man får ut när man räknar på symmetriska belastningar och de tre faserna kan beskrivas på följande sätt,

$$I_{a,+}$$
$$I_{b,+} = I_{a,+}e^{-120^\circ} = a^2 I_{a,+} \tag{2.2}$$

$$I_{c,+} = I_{a,+}e^{-120^\circ} = aI_{a,+}$$

a^2 och a definieras som,

$$a = e^{120^\circ}$$
$$a^2 = e^{-120^\circ} \quad (2.3)$$

De negativa fassekvensströmmarna definieras på följande sätt,

$$I_{a,-}$$
$$I_{b,-} = aI_{a,-} \quad (2.4)$$
$$I_{c,-} = a^2 I_{a,-}$$

Nollföljds sekvensströmmar är det som uppkommer vid ett osymmetriskt fel och innebär att det flyter ström genom återledaren.

$$I_{a,0} = I_{b,0} = I_{c,0} \quad (2.5)$$

Varje fasström kan beskrivas på följande sätt,

$$I_a = I_{a+} + I_{a-} + I_{a0}$$
$$I_b = a^2 I_{a+} + aI_{a-} + I_{a0} \quad (2.6)$$
$$I_c = aI_{a+} + a^2 I_{a-} + I_{a0}$$

Detta samband kan skrivas om på en vektorform,

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a,0} \\ I_{a,+} \\ I_{a,-} \end{bmatrix} [A] \quad (2.7)$$

Genom att definiera vektorerna,

$$\boldsymbol{I_{abc}} = \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} [A] \quad (2.8)$$

$$\boldsymbol{I_{0+-}} = \begin{bmatrix} I_{a,0} \\ I_{a,+} \\ I_{a,-} \end{bmatrix} [A] \quad (2.9)$$

$$\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

$$\boldsymbol{A^{-1}} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

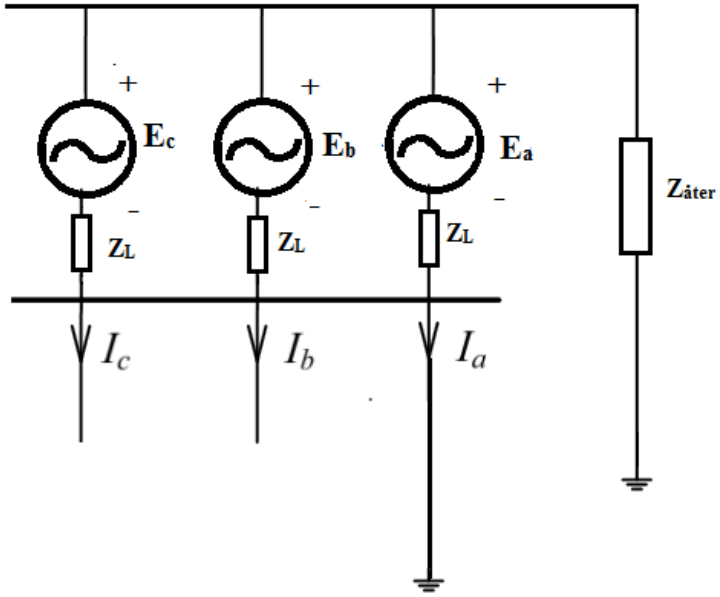
strömmarna kan skrivas om till följande uttryck,

$$\boldsymbol{I_{abc}} = \boldsymbol{A I_{0+-}} [A] \quad (2.12)$$

$$\boldsymbol{I_{0+-}} = \boldsymbol{A^{-1} I_{abc}} [A] \quad (2.13)$$

2.4.2 Enfasig kortslutningsström

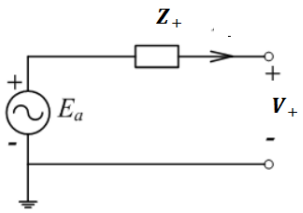
Ett enfasigt jordfel innebär att strömmarna inte kommer att vara symmetriskt belastade. I fasen där jordfelet uppkommer kommer det att flyta en ström medan de övriga faserna är strömlösa och därmed obelastade, se *Figur 2.2*



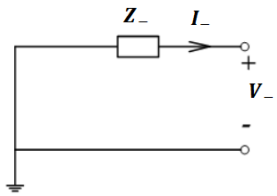
Figur 2.2. *Enfasigt jordfel utan felimpedans. Strömmen flyter endast i fas A .*

$Z_{åter}$= Impedans i återledaren
Z_l=Ledningens impedans

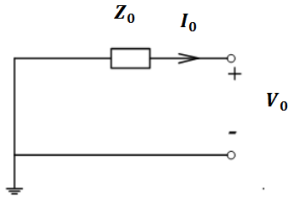
Sekvensnäten för de olika sekvenserna plusföljd, minusföljd och nollföljd visas i *Figurerna 2.3, 2.4 och 2,5*.



Figur 2.3. *Sekvensnät för plusföljd [6]*



Figur 2.4. *Sekvensnät för minusföljd [6]*

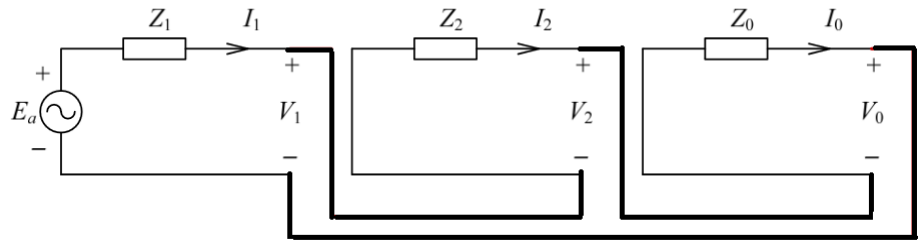


Figur 2.5. *Sekvensnät för nollföljd [6]*

Vid ett enfasigt jordfel är alla sekvensströmmarna i den fasen där felet sker lika stora vilket innebär att

$$I_{a0} = I_{a-} = I_{a+} = \frac{I_a}{3} \qquad (2.14)$$

Detta ger följande sekvensnät, se *Figur 2.6* nedan.



Figur 2.6. *Sekvensnät som illustrerar fas till jordfel [6]*

Sekvensnätet ger följande ekvationer,

$$I_0 = I_- = I_+ = \frac{E_a}{Z_- + Z_+ + Z_0} \quad (2.15)$$

$$I_a = \frac{3E_a}{Z_- + Z_+ + Z_0} \quad (2.16)$$

$$Z_- = Z_+ = Z_l \ [\Omega] \quad (2.17)$$

$$3Z_{åter} + Z_l = Z_0 \quad (2.18)$$

$$I_a = \frac{E_a}{Z_{åter} + Z_l} \ [A], \text{ kortslutningsström i en kabel [5]} \quad (2.19)$$

2.5 Villkor för kablar

När man dimensionerar kablar i ett elnät behöver man ta hänsyn till parametrar såsom hur stor belastningsströmmen kommer att vara, och vilken typ av säkring man ska välja för att skydda kabeln ifrån överlast och säkerställa utlösning vid jordfel.

2.5.1 Belastningsström

Belastningsströmmen i en trefasledarkabel kan beräknas med hjälp av,

$$P = \sqrt{3} I U cos\gamma \ [W] \quad (2.20)$$

$$I = \frac{P}{\sqrt{3}\ U cos\gamma} \ [\text{A}], \quad (2.21)$$

där $\boldsymbol{cos\gamma}$ är effektfaktorn och siffran som används i Halmstad elnät brukar ligga på ca 0,95,
$\boldsymbol{U}$ är angivet som huvudspänning och har värdet 400 V på lågspänningsnätet,
$\boldsymbol{P}$ är effekt i kabeln $[W]$ [7].

2.5.2 Skydd mot överströmmar

För att skydda kablar mot överlast enligt svensk elstandard måste följande villkor uppfyllas [8],

$$I_B \leq I_N \leq I_Z \quad (2.22)$$

$$I_2 \leq 1{,}45 I_Z \quad (2.23)$$

I_B= Den beräknade belastningsströmmen
I_N= Säkringens märkström
I_Z = Kabelns belastningsförmåga
I_2= Den ström som garanterar en säker funktion för säkringen

Sambandet i (2. 22) och (2.23) kan skrivas om till[8],

$$1{,}45 I_Z \geq I_N k \quad (2.24)$$

Värdet på *k* bestäms av säkringens märkström och kan hittas i *Tabell 433:1* i Elinstallationsreglerna SS 436 00, utg. 2 [8].

2.5.3 Kabelbeteckningar

En kabel är namngiven efter sitt utförande och sina egenskaper. I *Tabell 2.2* står det beskrivet vad de olika siffrorna och bokstäverna i kabelnamnet anger[9].

Tabell 2. 2. *Siffrorna och bokstävernas innebörd i ett kabelnamn*

Siffra	Bokstav	Bokstav	Bokstav	Bokstav	Bokstav	Siffra	Bokstav	Siffra	Siffra
Standard typen	Märkspänning	Isolerings-material	Metall-höljes-typen i de fall det finns metallhölje	Manteltyp och material	Ledartyp	Antalet ledare i kabeln	X i fall med skyddsledare N i fall utan skyddsledare	Ledararean	Area på skyddsledare när denna inte är samma som resterande ledare

Exempel är kabeltypen **N1XV-AS4G140**:
N anger att kabeln är av en annan standardtyp än CENELC (Europeisk standardorganisation), siffran **1** visar att märkspänningen hos kabeln är 1*kV*. **X** talar om att isoleringsmaterialet i kabeln är PEX och **V** att PVC är mantelmaterialet. **A** i AS anger att ledaren är av aluminium och **S** att ledaren är fåtrådig och sektorformad. **4G140** visar att det är en fyrledare med en skyddsledare av typen PEN och arean hos respektive ledare är 140 mm^2 [9].

2.5.4 Kabelns elektriska egenskaper

Kabelegenskaper såsom resistansen och induktansen är viktiga att känna till vid dimensionering av ett elnät, då valet av dem påverkar såväl bryttiden för en säkring och spänningsfallet i en kabel. Reaktansen i en lågspänningskabel antas vara induktiv då det kapacitiva bidraget är så pass litet att det kan försummas.

Vid beräkningar på lågspänningsnätet försummas kapacitansen emellan ledarna.
Resistansen i en kabel beräknas genom att man multiplicerar $\boldsymbol{r_l}$, resistiviteten, i kabeln med $\boldsymbol{l}$, kabellängden,

$$R = r_l l \tag{2.25}$$

Reaktansen i kabeln X_l fås ut genom (2.25) där x_l är induktansen i ledaren, *f* frekvensen vilken i Sverige är 50 Hz,

$$X = 2\pi f x_l l \tag{2.26}$$

$$X = 100\pi x_l l \tag{2.27}$$

Impedansen för en kabel kan skrivas om till följande,

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} \tag{2.28}$$

$$Z = \sqrt{(r_l l\ )^2 + (100\pi x_l l)^2} \tag{2.29}$$

2.6 Nätuppbyggnad

Detta avsnitt beskriver uppbyggnaden av ett lågspänningsnät och dessa anläggningar i form av en nätstation och kabelskåp samt tre vanligt förekommande matningsstrukturer i form av radiell matning, slingmatning och radiell matning med slingstruktur.

2.6.1 Nätstation

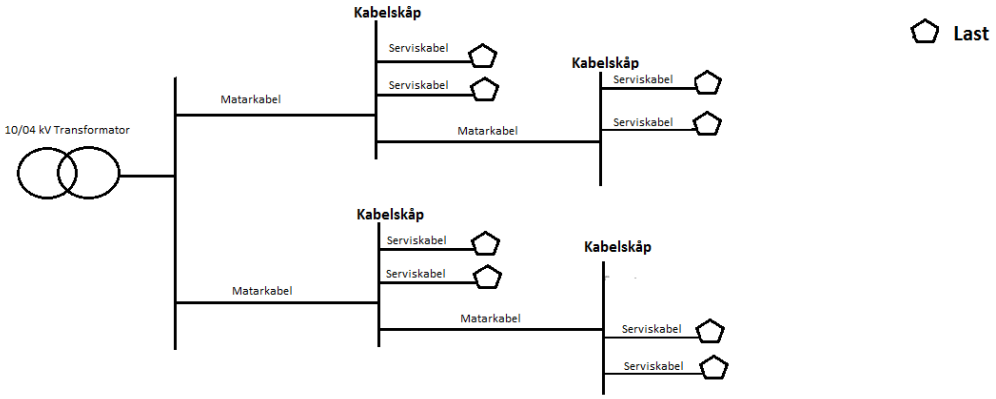
”Nätstation är en sammanfattad benämning på transformatorstationer för allmän distribution, där nedspänningen utgörs av lågspänning, 400V” skriver Hans Blomqvist i boken Elkraftsystem 1 [10]. Formen och uppbyggnaden av nätstationer i ett stadsnät kan skilja sig åt och det kan vara allt ifrån separata hus av plåt eller betong till att vara inbyggda i anläggningar som även används för andra ändamål. På landsbygden är det vanligt förekommande med nätstationer i stolpanläggningar på luftledningar[10][11].
Det som är gemensamt för nätstationer är den elektriska modellen där man finner ett högspänningsverk bestående av lastfrånskiljare, säkring och en transformator samt ett långspänningsställverk där man har en lastfrånskiljare på transformatorns lågspänningssida. Utmatningsenheterna är försedda med säkringar varifrån matarkablar går vidare till kabelskåp eller direkt till last.
Inom verksamheter där effektförbrukning är högre än för bostäder, t ex skolor och stormarknader, matas dem med direkt ifrån nätstationen utan några mellanliggande kabelskåp.
I många industrier är det vanligt att man har en egen nätstation alternativt eget mellanspänningsställverk, då den höga effektförbrukningen kräver det .

2.6.2 Kabelskåp

Kabelskåp är ett mindre fysiskt skåp där strömmen återigen förgrenar sig. De utgående kablarna från kabelskåpen är säkrad innan den slutligen går till kunder såsom olika fastighet eller går vidare till andra kabelskåp [10][11]. Kablarna mellan kabelskåpen och fastigheterna kallas för servisledningar . Tjockleken på servisledningar till radhus/villor är 10 mm^2 i Halmstad, medan till större elenergikonsumenter som flerbostadshus och skolor tillämpar man servisledningar om en tjocklek av 240 mm^2.
Kablarna mellan kabelskåpen är matarkablar med 240 mm^2.
Servisledningarna har koppar som ledarmaterial medan matarledningarna har aluminium i Halmstads Elnät.

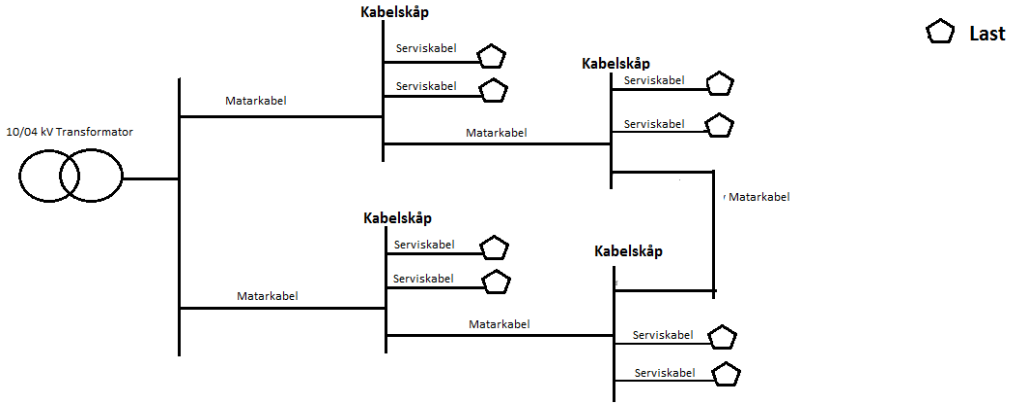
2.6.3 Nätstruktur

Lågspänningsnäten byggs i normala fall på tre olika sätt; radiellt, slingstruktur eller ett slingstrukturnät med radiell matning. I ett radiellt nät är varje kabelskåpsgrupp ansluten till ett fack och matas därmed från ett håll ifrån transformatorn[17], se *Figur 2.7*.



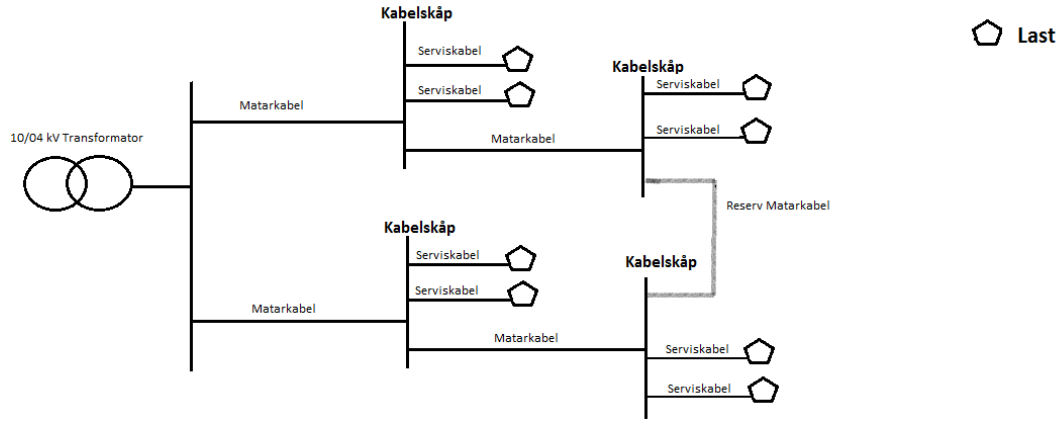
Figur 2.7. *Radiellt nät lågspänningsnät*

Slingnät innebär att två kabelskåpsgrupper är ihopkopplade vilket innebär att grupperna då matas från två olika håll från transformatorn[8], se *Figur 2.8*.



Figur 2.8. *Lågspänningsnät med slingstruktur*

I Halmstad byggs lågspänningsnätet med en slingstruktur fast med radiell matning vilket innebär att en reservmatarkabel är ansluten mellan de sista kabelskåpen i de två grupperna och tas i drift vid behov, se *Figur 2.9*.



Figur 2.9. *Slingnätstruktur med radiell matning.*

2.7 Spänningsändringar

Spänningsskillnaden mellan nodspänningarna U_1 och U_2 betecknas som ΔU, enheten på ΔU är vanligtvis procent (%). Den inmatade effekten och den inmatade reaktiva effekten betecknas som P och Q, se (2.31) samt *Figur 2.10* och kan approximativt beräknas som,

$$\Delta U = \frac{U_2 - U_1}{U_1}[\%] \tag{2.29}$$

denna formel kan skrivas som till [12],

$$\Delta U = \frac{RP + QX}{{U_n}^2} \tag{2.31}$$

Figur 2.10. *Spänningsskillnad mellan U_2 och U_1*

2.7.2 Rekommendationer från Svensk Energi

I Svensk Energis rapport ”Anslutning av mikroproduktion till konsumtionsanläggningar” [13] rekommenderas att spänningsskillnaden ΔU mellan kunder är mindre eller lika med 3 % vid inkoppling och hos anslutna kunder är den högst 5 %. Anslutning emellan kunder ses i detta fall som skenan i ett kabelskåp.

2.7.3 Långsamma spänningsändringar

Spänningsändringar mäts under en vecka med ett tio minuters intervall, dessa får inte överstiga eller understiga $\pm 10\%$ av referensspänningen för att el ska vara av god kvalitet [14].

3 Metoder och dimensionering av testnät

Avsnittet beskriver hur det fiktiva testnätet dimensionerades och byggdes upp, för att användas till studie och analys av mikroproduktions påverkan på lågspänningsnätet.
Nätstrukturen på lågspänningsnätet och valet av säkringar i nätstation och kabelskåp gjordes i samverkan med ingenjörer på HEM.

3.1 Kontrollberäkningar

Projektet startades med kontrollberäkning på spänningsändringar, impedans för en last och enfasig kortslutningsström. Därefter jämfördes dessa parametrar med värden i dpPower. Till kontrollberäkningen valdes en last i en fackgrupp i en nätstation bestående av två kabelskåp. Lasten låg i det yttersta kabelskåpet. Längden på matarkabeln till kabelskåpet var 124,7 m och matarkabeln mellan nätstationerna var 296,5 m. Servicekabeln mellan nätstationen och lasten var 93,4 m. Effekten från solproduktionen var 43,5 kW och lasten i hushållet var 0,4 kW.
I *Tabell 3.1* sammanställdes beräkningarna av ett hushålls impedans, överspänning vid mikroproduktion och enfasig kortslutning m.h.a. (3.1), (3.2) och (3.3) och jämfördes med dpPower värden.

Tabell 3.1. *Resistivitet och induktans data för kablar som används i nätutbyggnaden* **[15][16**]

Kabeltyp	Resistivitet $[\Omega/km]$	Induktans $[mH/km]$	Kapacitans $[uF/km]$
N1XV5g10	1,83	0,26	0,08
N1XVAS-4x240	0,125	0,23	0,14

Impedansen för kunden beräknas med hjälp av följande beräkningar där kapacitansen försummades,

$$Z_l = \sqrt{((r_{10}l_{10}) + (r_{240}l_{240}))^2 + ((100\pi(x_{10}l_{10}) + 100\pi(x_{240}l_{240}))^2}$$

$$=\sqrt{((1{,}83 \cdot 0{,}0934) + (0{,}125 \cdot 0{,}4212))^2 + ((100\pi \cdot 0{,}26 \cdot 10^{-3} \cdot 0{,}0934) + 100\pi \cdot 0{,}23 \cdot 10^{-3}0{,}4212))^2}$$

$$=0{,}22679067\ \Omega \quad (3.1)$$

Resistansen för kunden beräknas till följande,

$$R_l = r_{10}l_{10} + r_{240}l_{240} = 1{,}83 \cdot 0{,}0934 + 0{,}125 \cdot 0{,}4212 = 0{,}22322\ \Omega \quad (3.2)$$

I beräkningen av överspänningen antas den reaktiva effekten vara noll,

$$\Delta U = \frac{RP}{U_n{}^2}100 = \frac{0{,}222322(43500-400)}{400^2}100 = 5{,}99\% \quad (3.3)$$

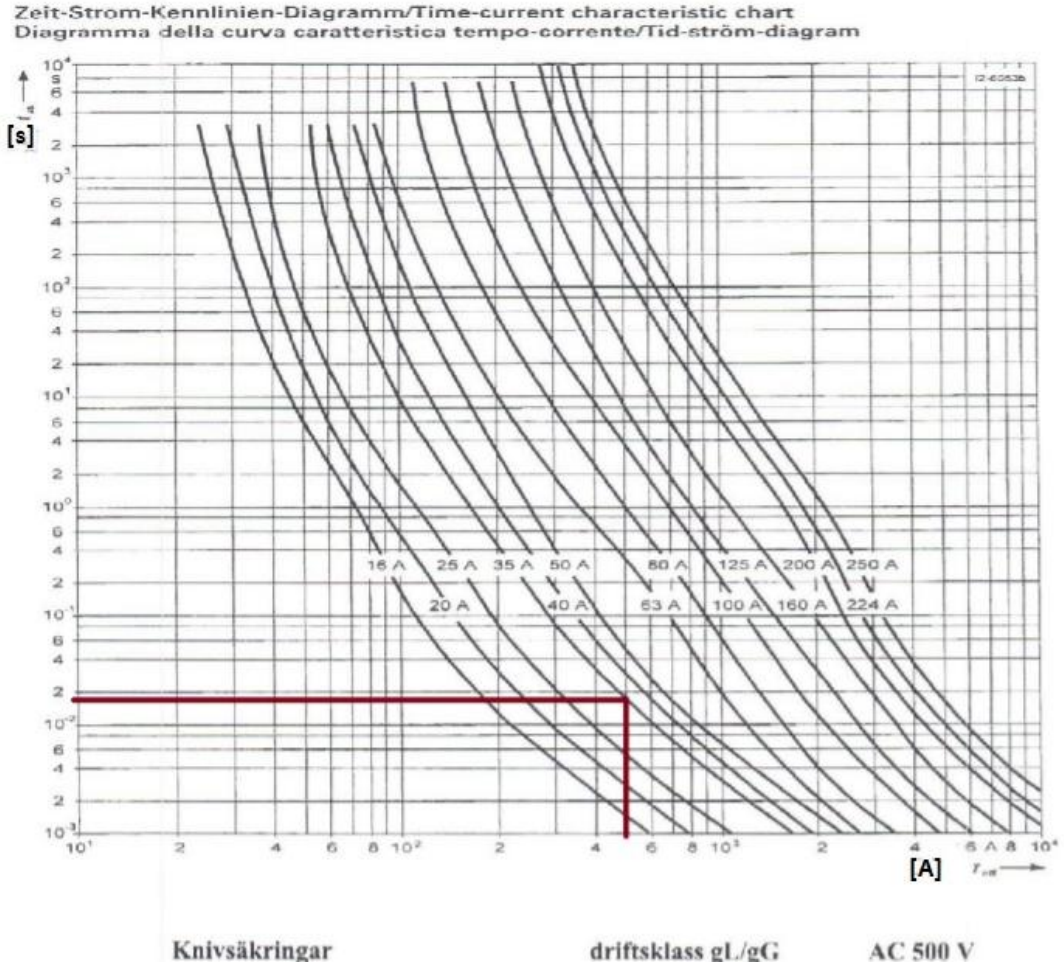
Impedansen för återledaren och för fasledaren var densamma i det byggda systemet vilket gjorde att (2.19) kan skrivas om som,

$$I_a = \frac{E_a}{Z_l + Z_{åter}} = \frac{E_a}{2Z_l} \quad (3.4)$$

Beräkningar gav resultatet

$$I_a = \frac{E_a}{2Z_l} = \frac{230}{2 \cdot 0{,}2267909} = 507{,}07A \quad (3.5)$$

Med hjälp av strömmen vid kortslutning mellan fas och återledare avlästes bryttiden för 35 A säkring i *Figur 3.1*. Utlösningstiden för säkringen visade sig vara 0,2 sekunder, enligt Tid-ström-diagram kurvan i *Figur 3.1*.



Figur 3.1. *Tid-ström-kurva för säkringar där man läsa av utlösningstiden för en säkring*

I nedanstående *Tabell 3.2* jämfördes de simulerade värdena från dpPower med värdena som beräknades för hand.

Tabell 3.2. *Beräknade värden och värden från dpPower*

Enhet	Värdet i dpPower	Beräknade värdet för hand	Skillnaden [%]
$\boldsymbol{Z}$	0,231119 Ω	0,226789067 Ω	1,9
$\boldsymbol{\Delta U}$	5,99 %	5,59 %	7,1
$\boldsymbol{I_{kort,fas\text{-}åter}}$	360 $\boldsymbol{A}$	507 $\boldsymbol{A}$	40,8

Värt att notera är att kortslutningsströmmen mellan fas och återledare är ca 41 %, vilket beror på att dpPower använder sig av fler parametrar såsom $\boldsymbol{c}$ spänningsfaktor, $\boldsymbol{q}$ resistansökningsfaktor [17]. Spänningsfaktorn $\boldsymbol{c}$ är en osäkerhetsfaktor för säkringar, värdet på $\boldsymbol{c}$ är mellan 0,7 till 0,8. Resistansökningsfaktorn $\boldsymbol{q}$ visar resistansökningen under kortslutningsförloppet gentemot resistansen under begynnelsetemperaturen $\boldsymbol{R_{20}}$.

$$I_k = \frac{cU}{qR_{20}} \quad (3.6)$$

Kortslutningsströmmen 360 A hade enligt Tid-ström-diagrammet i *Figur 3.1* ungefär gett bryttiden 0,6 sekunder medan det beräknade värdet 507 A ger 0,2 sekunder.
Dessa jämförelser visar att värden man får i dpPower är pålitliga när det kommer till överspänningar och impedans då felet är mindre än 10 %. Vid beräkning av kortslutningsströmmen mellan fas och återledare ska man använda sig av (3.5) istället för (3.4), vilket ger en lägre kortslutningsström och därmed en längre bryttid.

Vid mikroproduktion förväntas spänningen hos lasterna att öka vilket enligt (3.6) leder kortslutningsströmmen ökar jämfört med fall utan mikroproduktion, detta leder i sin tur att bryttiden för säkringen endast minskar .

3.2 Beskrivning av det fiktiva området

Ett fiktivt område i Halmstad byggdes upp i dpPower med 212 laster i form av 192 Radhus/Villor, 18 Flerbostadshus och två förskolor/skolor. Placeringen av lasterna baserades på ett planritningsförslag och avstånden emellan lasterna valdes utefter hur andra nät är dimensionerade. Avstånden emellan olika radhus i ett område valdes till 6,85 m, 40 m mellan flerbostadshus och avstånden mellan villor till 22 m, baserat på andra lågspänningsnät i Halmstad. I verkligheten hade dessa avstånd motsvarat avstånden mellan två bostäders mätarsäkringar.
Marken i detta fall anses ha bra termiska egenskaper och därmed en termisk resistivitet på 1 Watt per Kalvin meter, 1 W/mK[18]. Markens goda termiska egenskaper leder till att kablarnas belastningsförmåga ökar 1,5 gånger [8].

3.3 Minimal energiförbrukning hos fastigheterna

Årsenergiförbrukningen och minimumförbrukningen i bostäderna och förskolorna/skolorna i det fiktiva området bestämdes med hjälp av data från Albinsro som är ett bostadsområde byggt mellan åren 2013-2015 .
Den minimala energiförbrukningen och den maximala effektproduktionen från solceller väntas kunna ske under varma höst- och våreftermiddagar då uppvärmningen i hus är låg och folk befinner sig på sina dagliga sysslor såsom skola, dagis och arbete, och då märktemperaturen i en solcell är 25 ^{o}C [19].
Minimal effektförbrukningen för villor/radhus valdes till 0,4 kW och för flerbostadshus 5,6 kW efter studier av timeffektförbrukningen för villor, radhus och flerbostadshus i Albinsro.
Förskolor/skolor förväntas ha ungefär samma förbrukning året om, då ventilation och belysning även är igång under sommartid när verksamheten inte är igång, vilket innebär att de inte har en direkt minimal energiförbrukning utan att energiförbrukningen är ungefär lika året om.

3.4 Lågspänningsnät schema över området i dpPower

Två nätstationer, N7001 och N7002, placerades i det fiktiva bostadsområdet. Fastigheterna som var anslutna till nätstation N7001 kallades Område 1 medan de övriga som var anslutna till N7002 kallades för Område 2.
Figurerna 3.2 och 3.3 visar hur områdena såg ut och var anslutna i dpPower.

Figur 3.2. *Bild över Område 1 i dpPower[20]*

Figur 3.3. *Bild över Område 2 i dpPower[20]*

3.4.1 Område 1

En nätstation till Område 1 innehållande fyra brytare, en transformator och nio stycken kopplingsfack byggdes upp i dpPower. Storleken på matarsäkringarna i facken valdes till 250 A på alla förutom Grupp 5 och Grupp 6 som valdes till 315 A för att åstadkomma selektivitet i nätet, då säkringarna emellan nätstationerna var 150 A i området, se *Figur 3.4*. Selektivitet innebär att säkringen närmast felet ska utlösas och att så få kunder som möjligt blir spänningslösa med selektivitet.
Grupp 5 försörjde ett kabelskåp där belastningsströmmen beräknades till drygt 240 A och därför var den tvungen att säkras med 315A, Grupp 6 är reservmatning till samma kabelskåp och säkrades därför med samma nivå.
En transformator med märkeffekt 800 kVA valdes i samråd med planeringsingenjörerna på HEM. Den sammanlagda maxeffekten i Område 1 beräknades till 402 kW och transformatorn var därmed belastad till 50 % vid maximal last. Vid val av transformator är det i praktiken bra att tänka långsiktigt och ha tomma reservfack som möjliggör anslutning av fler laster, vilket kan behövas under en utbyggnad av området.

Matarkabeln ut till nätet var aluminiumkabeln av typ N1XV 4x240 vilken enligt Elinstallationsreglerna har en belastningsförmåga på 290 A, när den är direkt förlagd i mark. Marken i detta fall anses ha goda termiska egenskaper och det medför att kabeln har en omräkningsfaktor på 1,5 [8] detta medför att det korrigerade belastningsförmåga är omräkningsfaktorn multiplicerat med den vanliga omräkningsfaktorn.

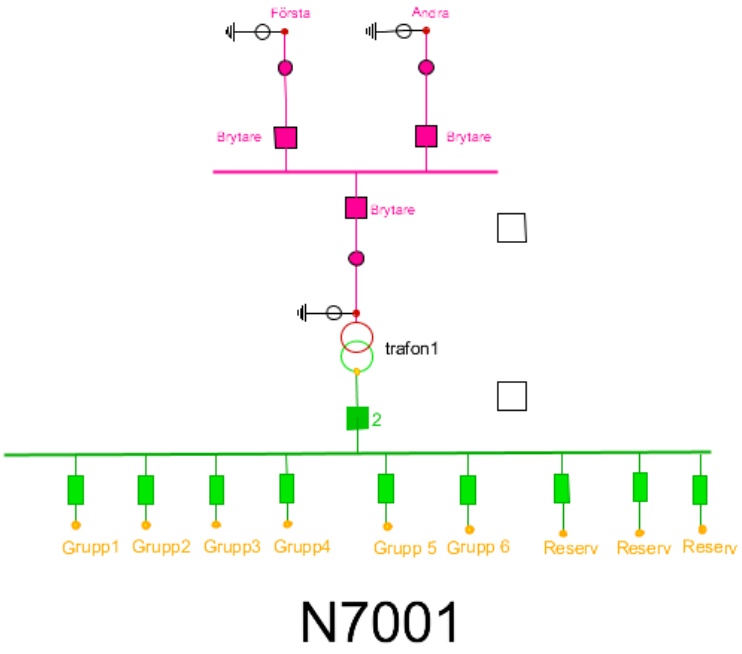
$$I_{zkorr} = kI_z = \begin{Bmatrix} I_z = 290\text{A} \\ \text{k} = 1{,}5 \end{Bmatrix} = 435\text{A} \tag{3.7}$$

Säkringens minimum värde för en matarkabel beräkna fram till genom (2,24)

$$1{,}45I_Z \geq I_N k \tag{3.8}$$

$$\left\{\begin{matrix} I_{zkorr} = 435\ \text{A} \\ \text{k} = 1{,}6 \end{matrix}\right\} \text{ ger } I_N \leq 394 \tag{3.9}$$

Den högsta säkringsstorleken för N1XV 4x240 är 315 A utan att kabeln blir överbelastad, då nästa säkringsstorlek är 400 A[8].



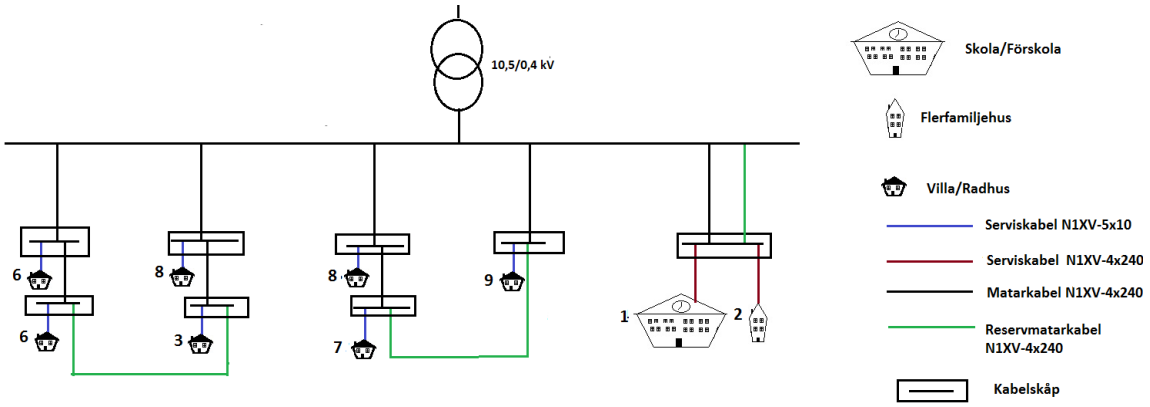
Figur 3.4. *Nätstation i Område 1[20]*

I *Tabell 3.3* sammanställs antalet kabelskåp, lasttyper, maximal belastningsström, maximal effekt, säkringstyp, matarkabeltyp och matarkabellängden, för varje fack.

Tabell 3.3. Fackdata och belastningar i område 1

Grupp/ Fack	**Antal Kabelskåp**	**Antal villor/rad-hus**	**Antal flerbostadshus**	**Antal Förskolor**	**Maximal Belastnings-ström (A)**	**Maxeffekt (*kW*)**	**Storlek på nät-station-säkring (*A*)**	**Matarkabel längd (*m*)**
1	2	12	0	0	65,28	42,96	250	93,2
2	2	11	0	0	60,38	39,74	250	152,1
3	2	15	0	0	79,85	52,55	250	151,4
4	1	8	0	0	45,51	29,99	250	349
5	1	0	2	1	237	237,23	250	352,8
6 (reservmatning)	1	0	2	1	237	237,23	250	352,8

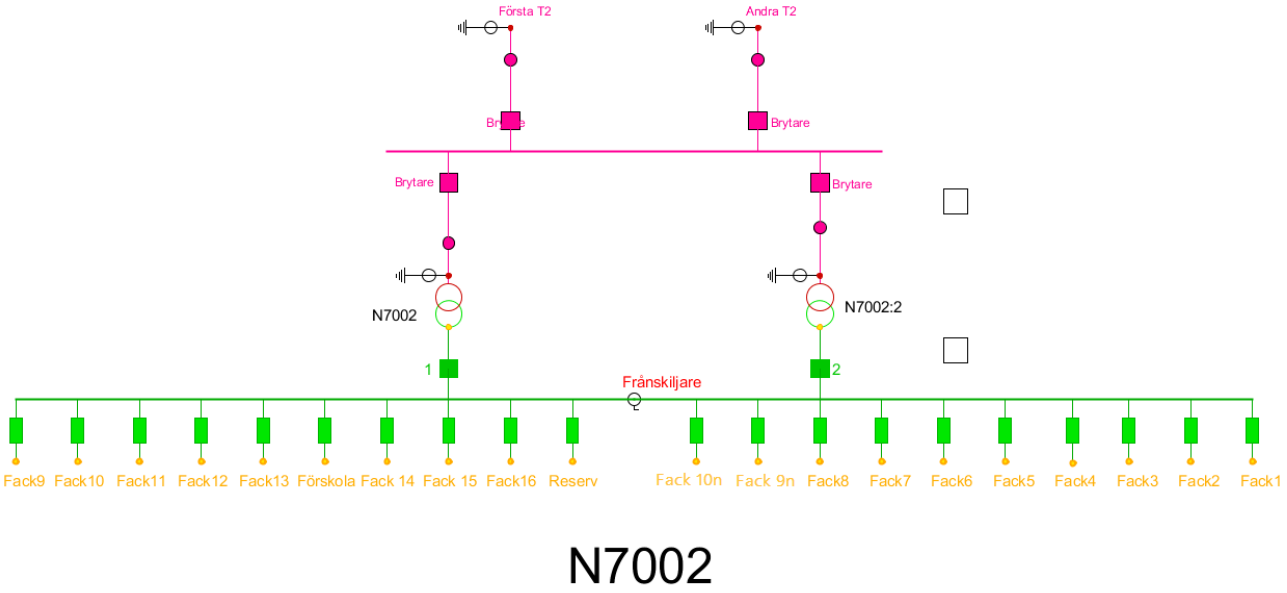
I *Figur 3.5* visas hur de 49 olika lasterna är fördelade över i område 1 och de olika kabeltyperna i området.



Figur 3.5. *Linjeschema över Område 1*

3.4.2 Område 2

Till Område 2 valdes en nätstation N7002 med dubbla transformatorer där de försörjde varsin del av området. Transformatorerna i nätstationen hade 800 kVA märkeffekt och en relativ kortslutningsimpedans på 10 %, och relativ kortslutningsresistans 5 % . Vid maximal belastnings var den vänstra transformatorn belastad med ungefär 60 % och den högra med ungefär 62 %. Detta möjliggör att fler laster kan kopplas in på transformatorerna. Nätstationen illustreras i *Figur 3.6*.
I *Tabell 3.4* sammanställs antalet kabelskåp, lasttyper, maximal belastningsström, maximal effekt, säkringstyp, matarkabeltyp och matarkabellängden, för varje fack.

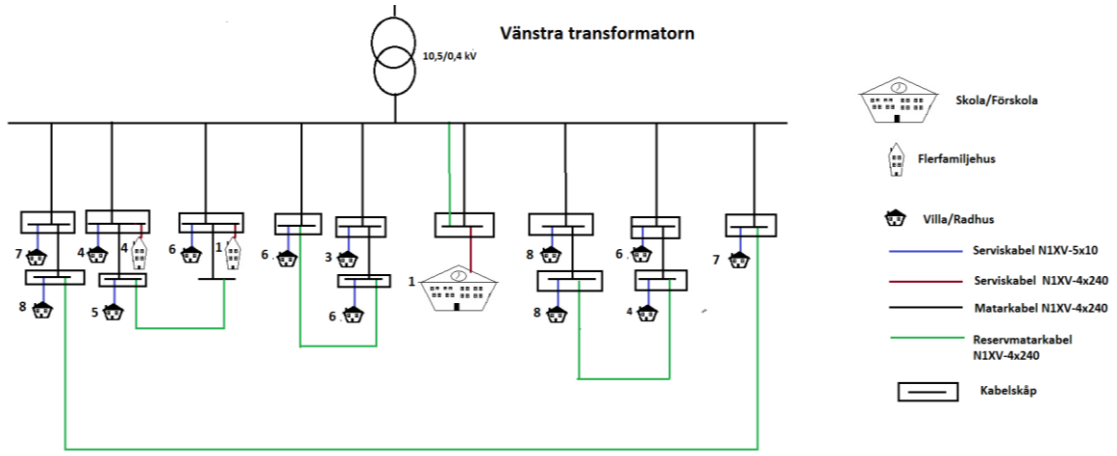


Figur 3.6. *Nätstation i Område 2 [20]*

Tabell 3.4. *Fackdata och belastningar i Område*

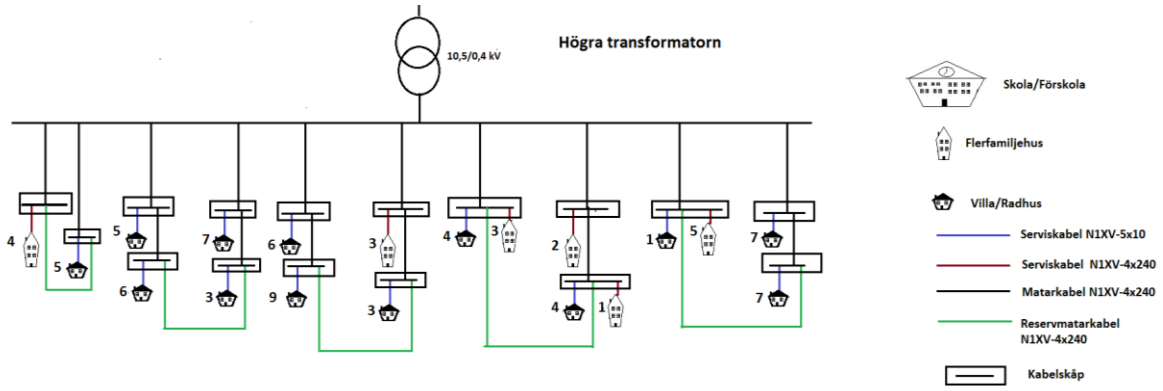
Fack	Antal Kabelskåp	Antal villor/radhus	Antal flerbostads-hus	Antal Förskolor	Maximal Belastningsstr-öm (*A*)	Maxeffekt (*kW*)	Storlek på nät-station-säkring (*A*)	Matar-kabel-längd (*m*)
1	2	14	0	0	75,01	49,37	250	71,5
2	2	1	5	0	118,63	78,08	300	143,6
3	2	4	3	0	90,78	59,76	300	253,2
4	2	4	3	0	67,35	44,33	250	124,9
5	2	3	3	0	85,98	56,59	300	77,9
6	2	15	0	0	79,85	52,55	300	189,5
7	2	10	0	0	55,46	36,65	250	236,2
8	2	11	0	0	60,32	39,74	250	260,6
9n	1	5	0	0	20,24	19,90	250	132,3
10n	1	0	4	0	92,82	61,09	300	358,4
9	2	15	0	0	79,85	52,55	300	245,6
10	2	9	4	0	135,50	89,18	250	178,5
11	2	6	1	0	57,55	37,88	250	219,8
12	1	6	0	0	35,39	23,29	250	213,3
13	2	9	0	0	55,40	33,24	300	277,2
För-skola	1	0	0	1	210	124	250	186,0
14	2	16	0	0	84,67	55,73	250	331,0
15	2	10	0	0	55,46	36,50	250	296,5
16	2	7	0	0	40,47	26,64	250	220,2

Figurerna 3.7 och 3.8 är linjescheman över de näten som varje transformator i Område 2 försörjer. I linjeschemat visas hur de olika facken är belastade samt kablarna som används i lågspänningsnätet. Den vänstra transformatorn är belastad med 84 fastigheter, fördelade på en förskola/skola, 5 flerbostadshus och 78 radhus/villor. Detta illustreras i *Figur 3.7*.



Figur 3.7. *Linjeschema över vänstra transformatorn i nätstationen N7002*

Den högra transformatorn var belastad med 87 laster i form av 17 flerbostadshus och 71 radhus/villor. *Figur 3.8* visar linjeschemat över den högra transformatorn.



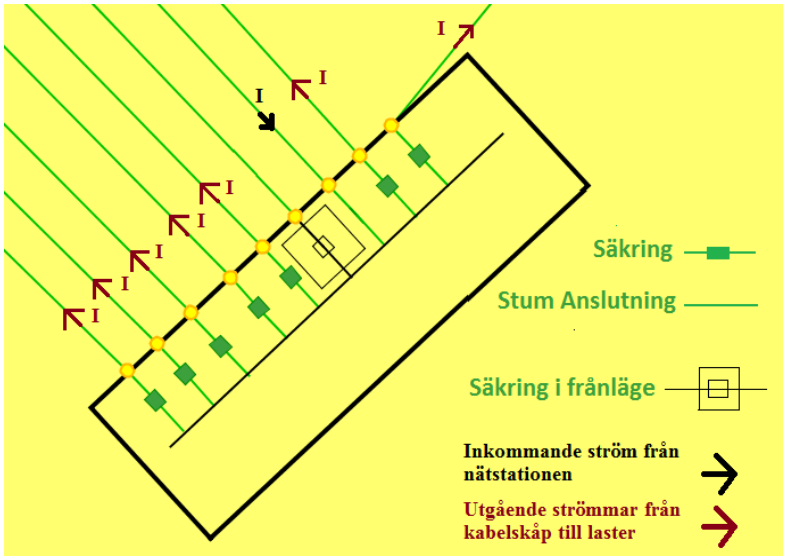
Figur 3.8. *Linjeschema över högra transformatorn i nätstationen N7002*

3.5 Från kabelskåp till kund

Avsnittet går igenom den slutgiltiga matningen från kabelskåp till kund. Här beskrivs de kablar som används i den slutgiltiga matningen och hur kablarna är säkrade i kabelskåpet samt storleken på säkringarna.

3.5.1 Säkringar i kabelskåpen

Den inkommande matarkabeln till varje kabelskåp var stumt ansluten vilket innebär att den var osäkrad i kabelskåpet. Detta ses ej som nödvändigt då den stumt anslutna matarkabeln redan är säkrad i transformatorfacket med ett värde mellan 200 A och 315 A. I de kabelskåp som har en reservmatarkabel finns det en säkring som är i frånläge, vilket innebär att de inte flyter någon ström emellan kabelskåpen . I *Figur 3.9* illustreras ett kabelskåp och till säkringarna i kabelskåpen är olika hushåll anslutna.
Säkringarna i kabelskåpen som var anslutna till flerbostadshus hade storleken 125 A, villor/radhus var säkrade med 35A och skola/förskola med 150 A. Kontrollsimuleringar gjordes i dpPower där det säkerställdes att bryttiden för alla kunder var mindre än 5 sekunder, med de valda säkringsstorlekarna för flerbostadshus, villor/radhus och skola/förskola.



Figur 3.9. *Kabelskåp där ingående och utgående strömmarna från kabelskåpet illustreras.[20]*

3.5.2 Kabeltyper ifrån kabelskåpen

Aluminiumkabeln N1XV 4x240 valdes som matarkabel till kabelskåpen ifrån nätstationer, matarkabel mellan kabelskåp och som serviskabel från kabelskåp till flerbostadshus och skolor/förskolor. Serviskablar ifrån kabelskåp till villor/radhus var kopparkabel förlagd direkt i marken av typen N1XV 5g10, denna kabel har belastningsförmågan 65A [8] och med omräkningsfaktorn 97,5 A . Detta medför att man enligt (3.8) kan belasta kabeln med 80 A utan att överbelasta kabeln.

$$\begin{Bmatrix} I_{zkorr} = 435\ \text{A} \\ \text{k} = 1{,}9 \end{Bmatrix} \text{ ger } \{\text{I}_\text{n} \leq 97{,}5\text{A}\} \tag{3.8}$$

Högsta möjliga säkringsstorlek är 80 A.

Mikroproduktionsanläggningarna var alla trefasigt anslutna och direktkopplade till fastighetens anslutning. I *Figur 3.9* illustreras hur en koppling av mikroproduktionsanläggning till ett radhus/villa kan se ut i dpPower.

Figur 3.9. *Mikroproduktionsanläggning kopplad till ett Radhus/Villa [20]*

4 Simulering och resultat

Här sammanställs de beräkningar som utförts med hjälp av dpPower och som ligger till grund för resultatet av projektet. Område 2:s nätstation N7002 var uppdelad på två transformatorer med 800 kVA men resultaten av simuleringarna visade sig likna varandra och därför togs endast beräkningar på den vänstra transformatorn med, då den visade sig ha fler villor/radhus och dessa anläggningars mikroproduktion skulle varieras. Alla simuleringar gjordes med fallen då lasterna hade minimal effektförbrukning undantaget förskola/skola som hade sin normala förbrukning.

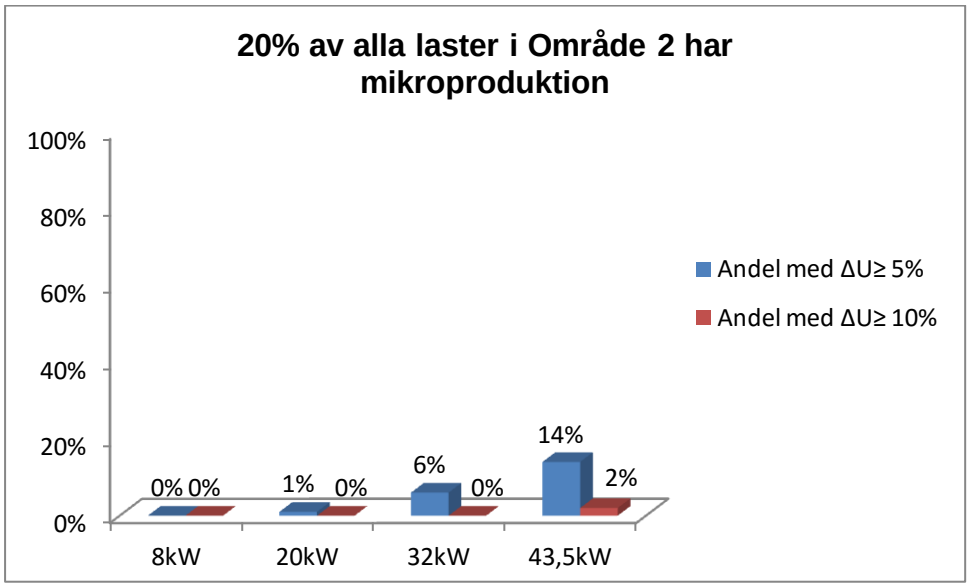
4.1 Överspänningar hos kunder

Simuleringen för att undersöka antalet hushåll/laster med överspänningar på 5 % och 10 % av nominella spänningen utfördes separat på Område 1 och 2. Spänningsvariationerna ΔU representerar i dessa fall överspänningsnivån i procent. Spänningsmatningen i dessa simuleringar skedde på transformatorns nedsida, d.v.s. på lågspänningsnätet, med 400 V huvudspänning. Rekommenderad nivå på överspänningar hos kunder är under 5 % medan kritisk nivå på överspänningar är 10 % och över.

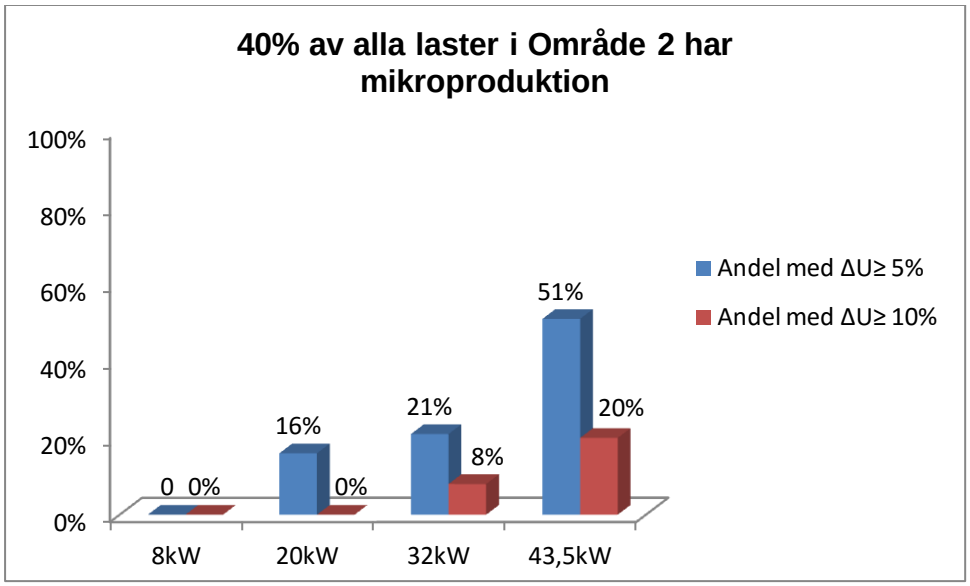
I graferna nedanför presenteras spänningsvariationerna ΔU för fem olika scenarion där 100, 80, 60, 40 och 20 % av lasterna har mikroproduktion. I varje scenario är mikroproduktionseffekten för varje mikroproducent/solcell på fyra olika nivåer; 8, 20, 30 och 43,5 kW.
För flerbostadshus och förskolor/skolor är mikroproduktionseffekten konstant 43,5 kW, vilket innebär att de alltid är mikroproducenter i de olika scenarierna.

4.1.2 Område 2

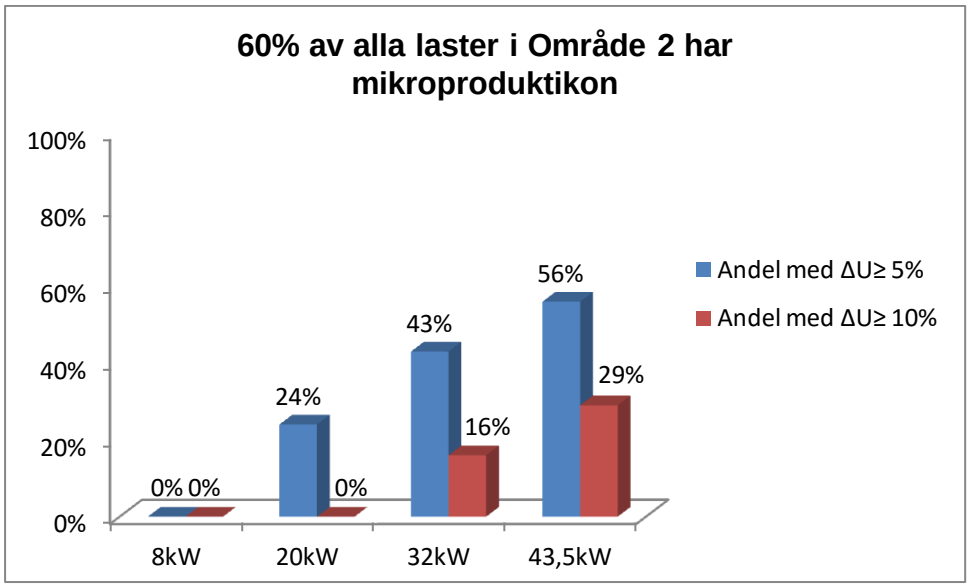
I *Figurerna 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 och 4.5* sammanställs resultaten för de olika scenarierna i Område 2. Stolpdiagrammen visar andelen laster/fastigheter med kritisk överspänningsnivå respektive andelen som ligger över rekommenderad nivå.



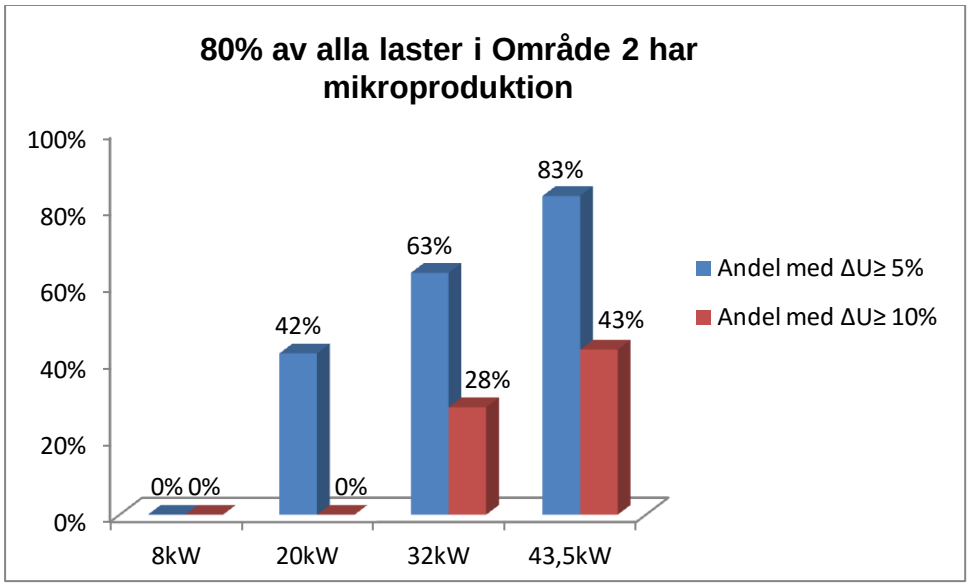
Figur 4.1. *Andel med överspänningar vid 20 % anslutning av mikroproduktion*



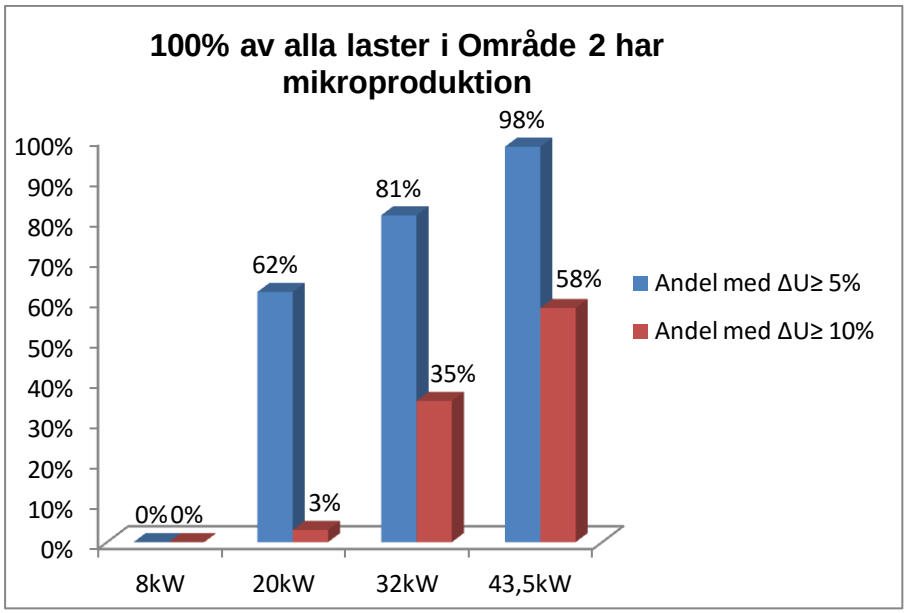
Figur 4.2. *Andel med överspänningar vid 40 % anslutning av mikroproduktion*



Figur 4.3. *Andel med överspänningar vid 60 % anslutning av mikroproduktion*



Figur 4.4. *Andel med överspänningar vid 80 % anslutning av mikroproduktion*



Figur 4.5. *Andel med överspänningar vid 100 % anslutning av mikroproduktion*

I Område 2 var andelen som har kritiska överspänningar $\Delta U \geq 10$ % hög, i de fall då 60 % eller mer av lasterna hade mikroproduktion på 32 kW eller högre. Hög andel anses i detta fall vara när mer än 10 % av lasterna har $\Delta U \geq 10$ % . När mikroproduktionen låg på 43,5 kW nådde man kritiska nivåer i alla scenarion förutom 20 %.
Värden över den rekommenderade spänningsnivån $\Delta U \geq 5$ % överträds i de fall där mikroproduktionen är högre eller lika med 20 kW och i alla scenarion förutom då 20 % är mikroproducenter.
Värt att notera är att när 100 % av lasterna har mikroproduktion och effekten hos mikroproducenterna är 43,5 kW så har i princip alla laster överspänningar över den rekommenderade nivån. I *Tabell 4.1* sammanställs andelen laster med kritisk överspänning och i *Tabell 4.2* andelen laster med överspänningar över den rekommenderade nivån för Område 2.

***Tabell 4.1**. Andel laster med överspänningar kritiska överspänningar i Område 2.*

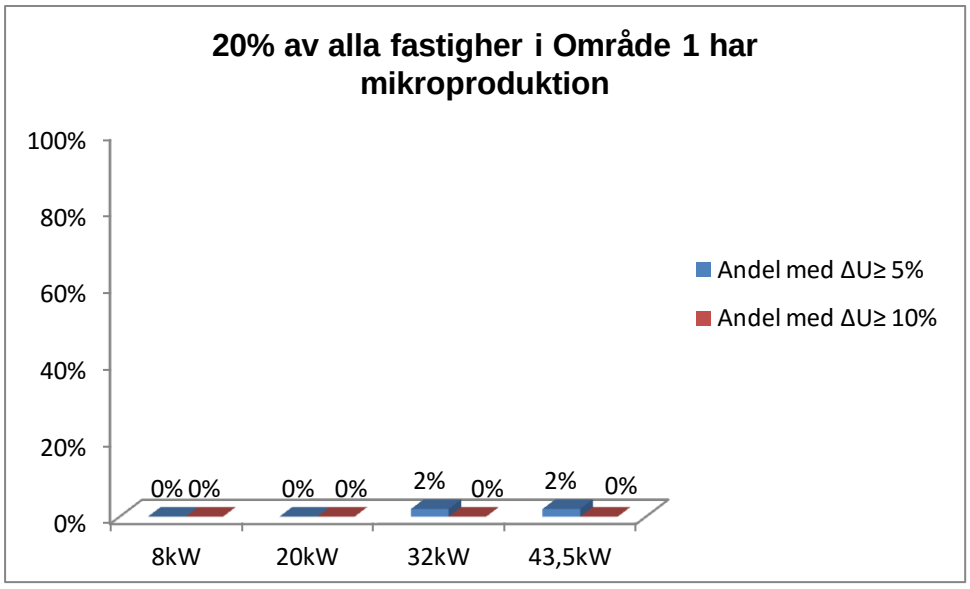
100 % integration	0 %	3 %	35 %	58 %
80 %	0 %	0 %	28 %	43 %
60 %	0 %	0 %	16 %	29 %
40 %	0 %	0 %	8 %	20 %
20 %	0 %	0 %	0 %	2 %
	8 kW	20 kW	32 kW	43,5 kW

***Tabell 4.2.** Andel med överspänningar över den rekommenderade nivån i Område 2.*

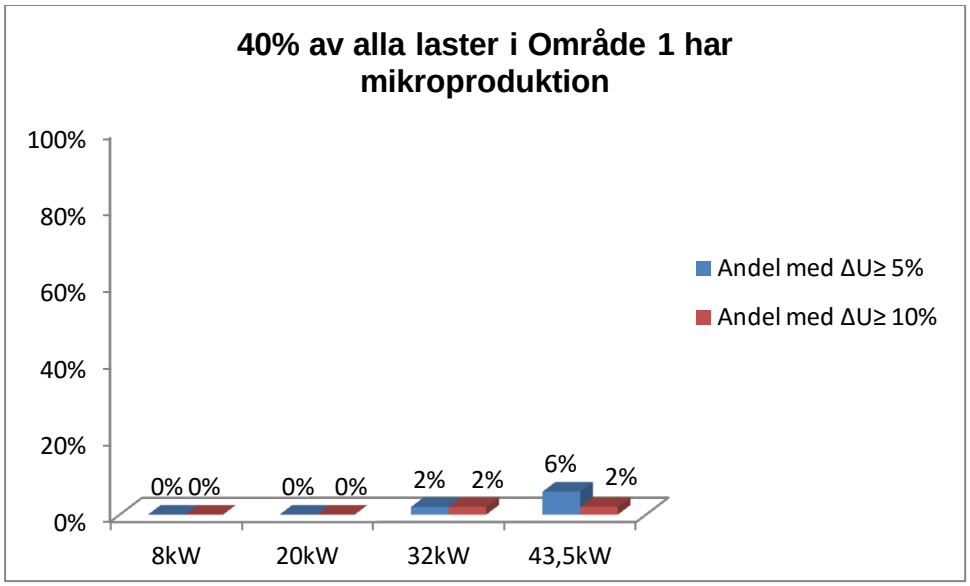
100 % integration	0 %	62 %	81 %	98 %
80 %	0 %	42 %	64 %	83 %
60 %	0 %	24 %	43 %	56 %
40 %	0 %	16 %	21 %	51 %
20 %	0 %	1 %	6 %	14 %
	8 kW	20 kW	32 kW	43,5 kW

4.1.3 Område 1

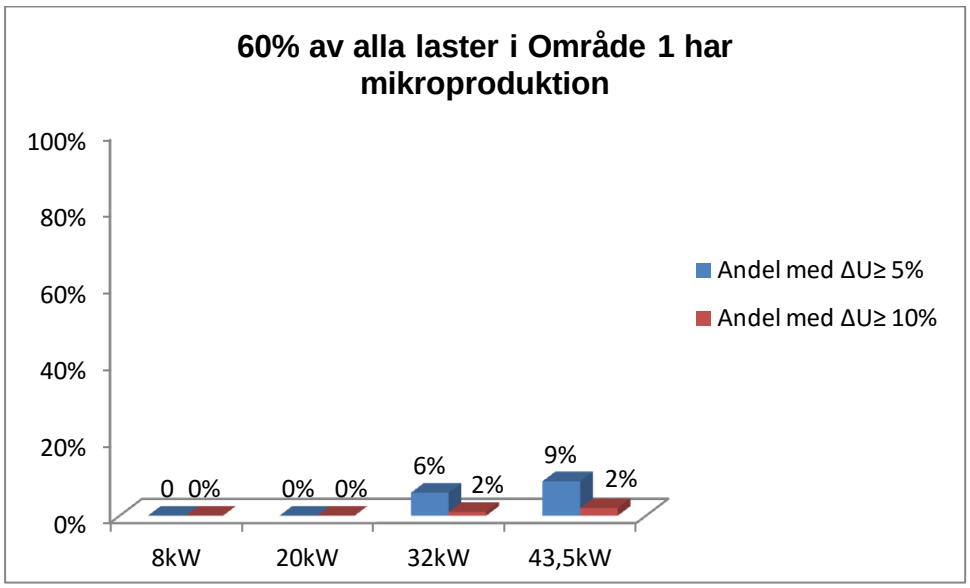
I *Figurerna 4.6, 4.7, 4.8, 4,9 och 4.10* sammanställs resultaten för de olika scenarierna i Område 1. Stolpdiagrammen visar andelen laster/fastigheter med kritisk överspänningsnivå respektive andelen som ligger över rekommenderad nivå.



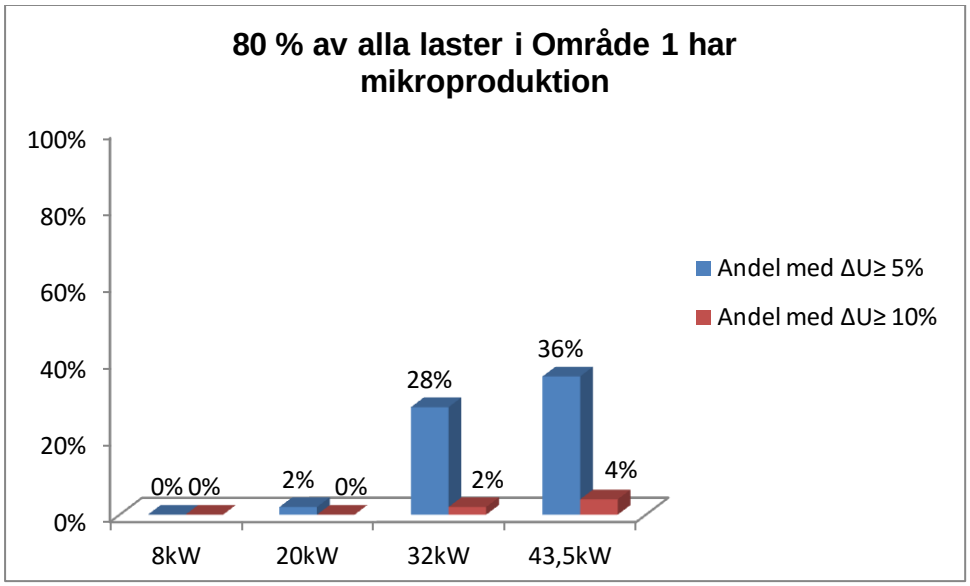
***Figur 4.6.** Andel med överspänningar vid 20 % anslutning av mikroproduktion i Område 1*



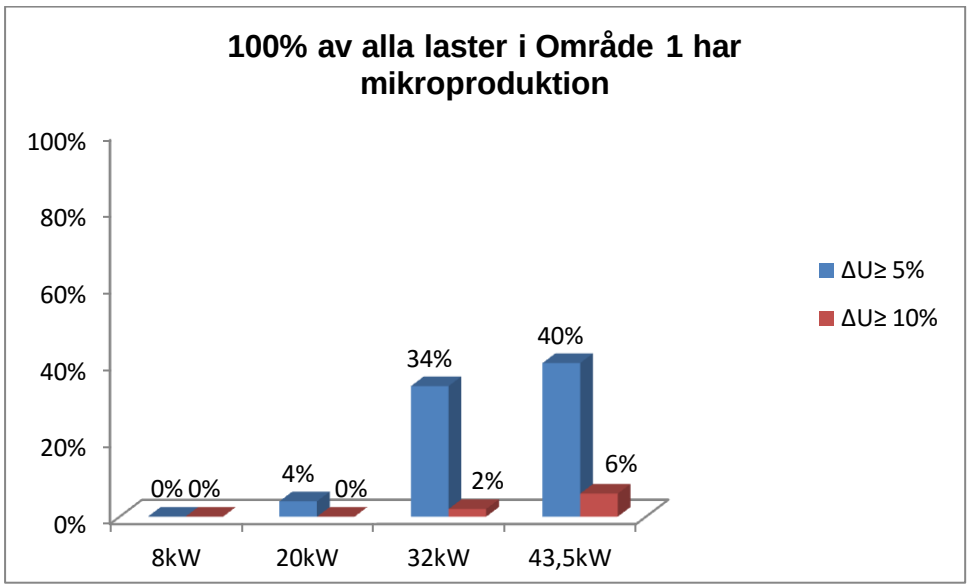
Figur 4. 7. *Andel med överspänningar vid 40 % anslutning av mikroproduktion i Område 1*



Figur 4. 8. *Andel med överspänningar vid 60 % anslutning av mikroproduktion i Område 1*



Figur 4. 9. *Andel med överspänningar vid 80 % anslutning av mikroproduktion i Område 1*



Figur 4. 10*. Andel med överspänningar vid 100 % anslutning av mikroproduktion i Område 1*

I Område 1 konstaterades att de kritiska spänningshöjningarna är få oavsett andel mikroproducenter och effekt.
Värt att notera är att när 80 % av alla lasterna hade mikroproduktion på 32 kW respektive 43,5 kW så hade 28 % och 32 % av lasterna $\Delta U \geq 5\%$. När alla lasterna hade mikroproduktion så hade 34 % och 40 % $\Delta U \geq 5\%$ då effekten var 32 kW respektive 43,5 kW.
I *Tabell 4.3* sammanställs andelen laster med kritisk överspänning och i *Tabell 4.4* andelen laster med överspänningar över den rekommenderade nivån för Område 1.

***Tabell 4.3**. Andel med kritiska överspänningar.*

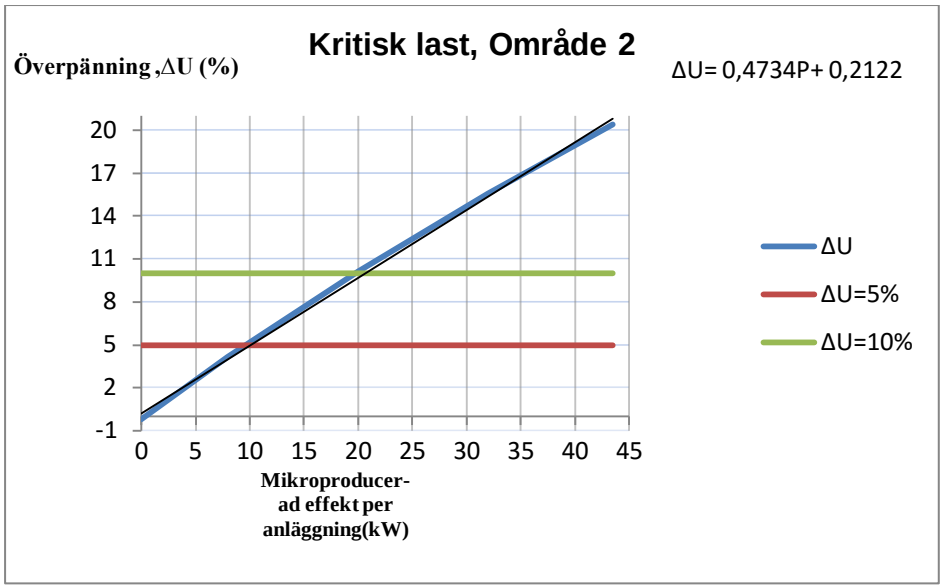
100 % integration	0 %	0 %	2 %	6 %
80 %	0 %	0 %	2 %	4 %
60 %	0 %	0 %	2 %	4 %
40 %	0 %	0 %	2 %	2 %
20 %	0 %	0 %	0 %	0 %
	8 kW	20 kW	32 kW	43,5 kW

Tabell 4.4. Andelen med överspänningar över den rekommenderade nivån

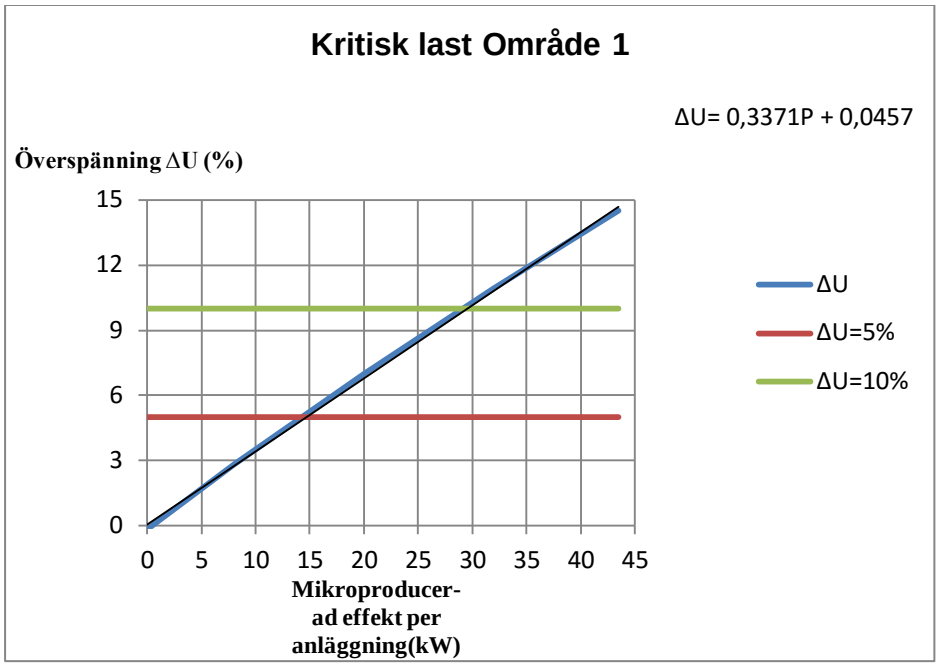
100 % integration	0 %	4 %	34 %	40 %
80 %	0 %	2 %	28 %	36 %
60 %	0 %	0 %	6 %	9 %
40 %	0 %	0 %	2 %	6 %
20 %	0 %	0 %	2 %	2 %
	8 kW	20 kW	32 kW	43,5 kW

4.1.3 Kritiska lastområden

De kritiska fastigheterna hittas i områden där impedansen är som högst vilket inträffar då avstånden till nätstationen är långa. Impedansen påverkas främst av avståndet mellan kabelskåp och last. Den kritiska nivån påverkas också när det är många laster på en kabelskåpsgrupp. I *Figurerna 4.11 och 4.12* presenteras spänningsändringen för de mest kritiska lasterna i Område 1 och Område 2 i scenariot 100 % mikroproduktion med varierad effekt.



Figur 4.11.*Kritisk last i område 2*



Figur 4.12.*Kritisk last i område 1*

I dessa grafer kan man notera att överspänningen i princip är proportionerliga mot effekten. I Område 2 nås nivån Δ*U*=5% ungefär då mikroproduktionseffekten är 10 kW, medan i Område 1 nås den nivån när effekten för varje solcellsanläggning är ca 14,7 kW.
Den kritiska nivån när Δ*U*=10% nås när effekten för varje anläggning är 20,67 kW i Område 1 och 29,52 kW i Område 2.
I *Tabell 4.5* nedanför visar hur överspänningen ΔU minskar i samband med att arean ökas i serviskabeln till lasten. Simuleringen skedde i scenariot när alla laster hade mikroproduktion på en nivå av 43,5 kW hos den mest kritiska lasten i Område 2. Den kritiska lasten är ansluten till en kabelskåpsgrupp med 16 stycken villor.

Tabell 4.5. *Spänningsändring vid konstants 43.5 kW konstant effekt och ändring av kabelarea*

Kabeltyp	ΔU(%)
N1XV-5x10	20,40
N1XV-4x50	16,90
N1XV-4x95	15,93
N1XV-4x150	15,58

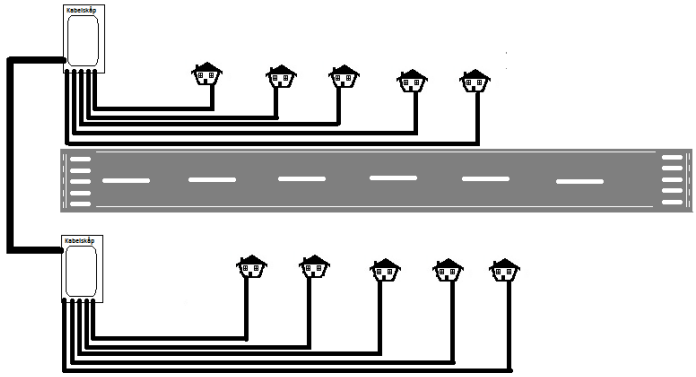
Det konstaterades att genom att ha 15 gånger så stor kabelarea än vad man har i normala fall så minskade överspänningar med 4,82 %. Trots den stora minskningen så låg överspänningen på 15,6 % vilket betraktas som en hög nivå över den kritiska nivån på 10 % överspänning.

4.2 Påverkan i ett grannskap

På en gata bestående av totalt 26 hus fördelade på två kabelskåpsgrupper, med 10 på den ena gruppen och 16 på den andra, studerades hur en last påverkas när andra laster, d.v.s. grannarna, ansluter sig till mikroproduktion en i taget. Det innebär att ett av husen inte kommer ha mikroproduktion och används som referens för att studera hur andra påverkar dess spänningar för att till slut även ansluta denna till mikroproduktion.
Dessa simuleringar skedde med mikroproduktionseffekt som varierades med 8, 20, 32 och 43,5 kW.

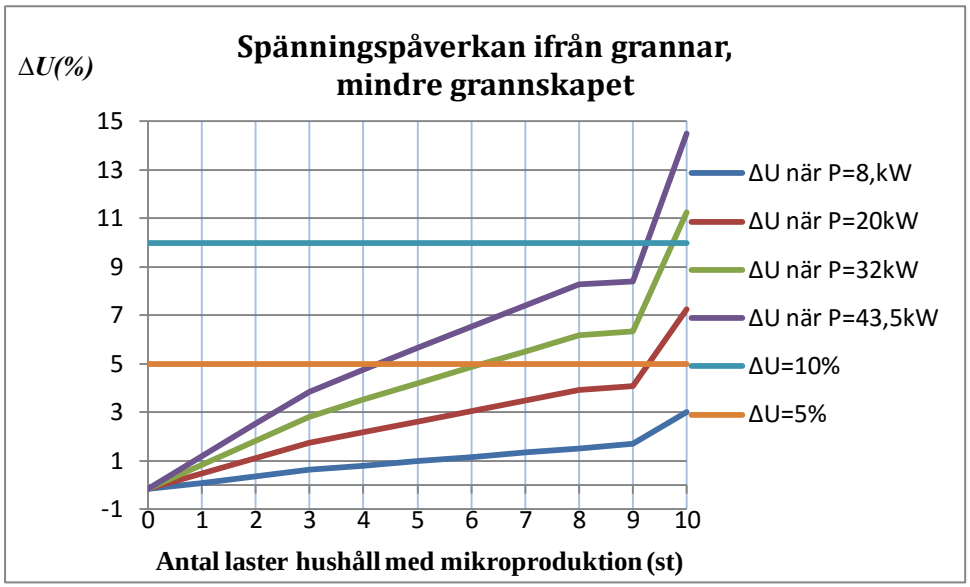
4.2.1 Påverkan på en last i det mindre grannskapet

Den mindre delen av grannskapet bestod av två stycken kabelskåp med fem vardera hus anslutna, se *Figur 4.13*.
11 simuleringar gjordes med mikroproduktionsnivåer 8, 20, 32 och 43,5 kW. I den första simuleringen hade inget hus mikroproduktion, i det andra hade ett hus mikroproduktion osv.
Utefter det studerades hur stor överspänning ett hus i grannskapet fick genom antalet kunder i grannskapet med mikroproduktion ökade. Kunden längst ner till vänster användes som referens och den första grannen närmast till höger anslöt mikroproduktion först för att följas av sin granne till höger osv., fram tills att alla grannar i kabelskåpet hade mikroproduktion. Därefter anslöt kunden längst till vänster i det övre kabelskåpet mikroproduktion till sitt hus för att följas av grannen till höger osv.



Figur 4.13. *Schema över grannskap*

I grafen nedanför sammanställs resultatet i grannskapet när grannarna ansluter sig till mikroproduktion, där ett hushåll togs som referens.



Figur 4.14. *Spänningspåverkan från grannar, mindre grannskapet*

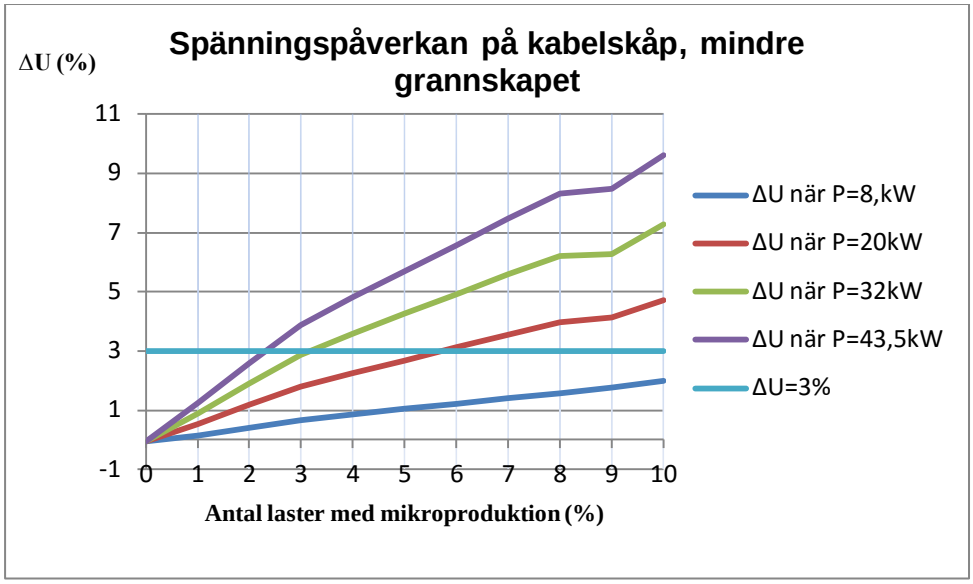
Kurvan knäcks och stiger kraftig när alla 10 stycken hushåll i kvarteret har mikroproduktion. Detta beror på att referenshuset till sist även ansluter mikroproduktion till sitt hus och vid det tillfället stiger överspänningen som mest.
När mikroproduktionseffekten var 8 och 20 kW hos grannarna överskred spänningen i referenshuset aldrig den rekommenderade överspänningsnivån. När sedan alla hushållen inklusive referenshuset (10 st.) hade mikroproduktion överskreds den rekommenderade nivån, då effekten var 20 kW. Vid mikroproduktionseffekten 32 kW överskreds den rekommenderade nivån i referenshuset efter att 7 stycken grannar hade mikroproduktion, medan när effekten var 43,5 kW överskreds den redan efter att 5 grannar anslutit mikroproduktion. Dessa nivåer av mikroproduktion visade sig ge kritiska spänningshöjningar när den siste i kvarteret anslöt sig till mikroproduktion.

Tabell 4.6. *Antal hushåll med mikroproduktion innan den rekommenderade och den kritiska nivån överskrids*

Mikroproduktionseffekt per anläggning	Antalet laster då ΔU>5%	Antalet laster då ΔU>10%
8kW	–	–
20kW	10	–
32kW	7	10
43,5kW	5	10

4.2.2 Påverkan på kabelskåpet i det mindre grannskapet

I samma simulation studerades hur spänningen på skenan i ett kabelskåp påverkades i takt med att hushållen i grannskapet anslöt sig till mikroproduktion. Resultatet presenteras i en graf i *Figuren 4.15*



Figur 4.15. *Spänningspåverkan på kabelskåp, mindre grannskapet*

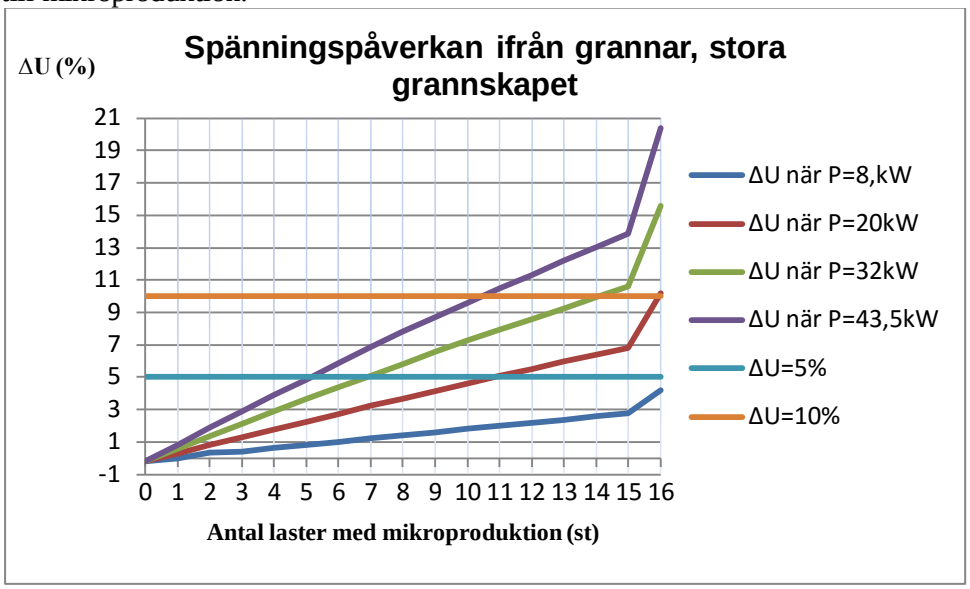
Man kan konstatera att när hela grannskapet har ansluten mikroproduktion på 8kW så överstiger aldrig spänningen i transformatorskenan 3 % av den nominella spänningen. I *Tabellen 4.7* sammanställs hur många kunder med mikroproduktion det krävs för att spänningen i kabelskåpsskenan ska överstiga 3 % av den nominella spänningen.

Tabell 4.7. *Antal hushåll med mikroproduktion innan spänningen i kabelskåpet överstiger rekommenderad nivå i det mindre grannskapet*

Mikroproduktionseffekt per anläggning	Antalet laster då ΔU>3%
8kW	–
20kW	6
32kW	4
43,5kW	3

4.2.3 Påverkan på det stora grannskapet

I det stora grannskapet gjordes 17 simuleringar på samma sätt och i samma ordning som på lilla grannskapet.
I *Figur 4.16* presenteras hur spänningsnivåerna för referenshuset påverkas när grannarna anslutit sig till mikroproduktion.



Figur 4.16. *Spänningspåverkan ifrån grannar på kabelskåp, stora grannskapet*

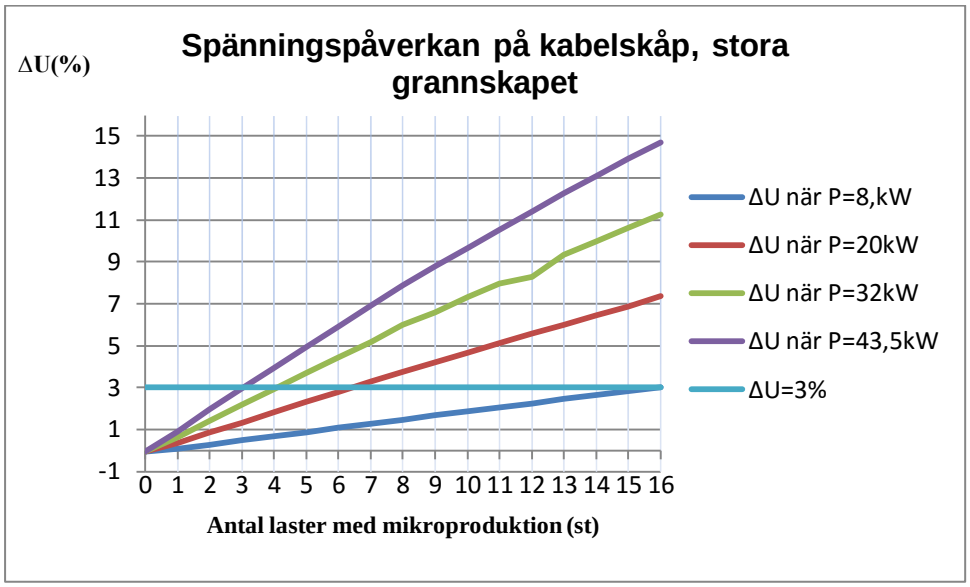
Även här knäcks kurvan och blir brantare när referenshuset ansluter mikroproduktion (16 stycken laster med mikroproduktion).
I det större området hade många av hushållen en större impedans vilket innebar att spänningshöjningarna blev något högre för varje hushåll som anslöt sig. När mikroproduktionen låg på 8 kW var spänningshöjningarna inom en rimlig nivå då de aldrig överträdde den rekommenderade nivån. När mikroproduktionen sedan höjdes till 20 kW så överträddes den rekommenderade nivån efter att 11 grannar anslutit sig och den nådde slutligen den kritiska spänningsnivån när hela området anslutit sig.
Den kritiska överspänningsnivån överskreds vid 15 anslutna hushåll när mikroproduktionen var 32 kW och vid 43,5 kW överskreds den redan efter 10 anslutna.
Den rekommenderade överspänningsnivån överskreds när 5 hushåll anslöt sig med mikroproduktionseffekten 43,5 kW och efter att 7 hushåll anslöt sig för effekten 32 kW.

Tabell 4.8. *Antal hushåll med mikroproduktion innan den rekommenderade och den kritiska nivån överskrids i stora grannskapet*

Mikroproduktionseffekt per anläggning	Antalet laster då ΔU>5%	Antalet laster då ΔU>10%
8kW	–	–
20kW	10	–
32kW	7	15
43,5kW	5	10

4.2.4 Spänningspåverkan på kabelskåp i det stora grannskapet

I *Figur 4.17* sammanställdes resultatet i hur spänningen på kabelskenan i ett kabelskåp påverkades i det stora grannskapet.



Figur 4.17. *Spänningspåverkan på kabelskåp, stora grannskapet*

I *Tabell 4.9* sammanställs när mikroproduktionen på kabelskåpskenan överstiger 3 % av den nominella spänningen.

Tabell 4.9.*Antal hushåll med mikroproduktion innan spänningen i kabelskåpet överstiger rekommenderade nivå i stora grannskapet*

Mikroproduktionseffekt per anläggning	Antalet laster då ΔU>3%
8kW	16
20kW	7
32kW	5
43,5kW	4

4.3 Mikroproduktionens påverkan på transformatorn

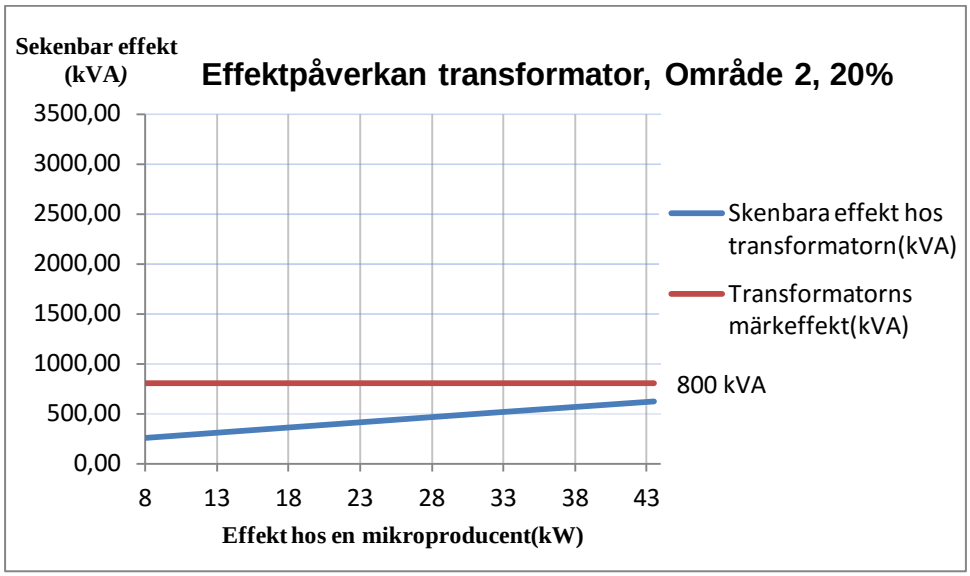
Två stycken simuleringar gjorde för att se hur transformatorn påverkades av mikroproduktion. I den första simuleringen studerades effektnivåerna som transformatorn utsattes för vid mikroproduktion, i dessa fall flödar strömmen och effekt tillbaka till transformatorn.
I det andra fallet studerades spänningsnivån på transformatorns nedsida, det vill säga hur spänningen på transformatorskenan påverkas av mikroproduktion.

4.3.1 Effektnivåer hos transformatorn

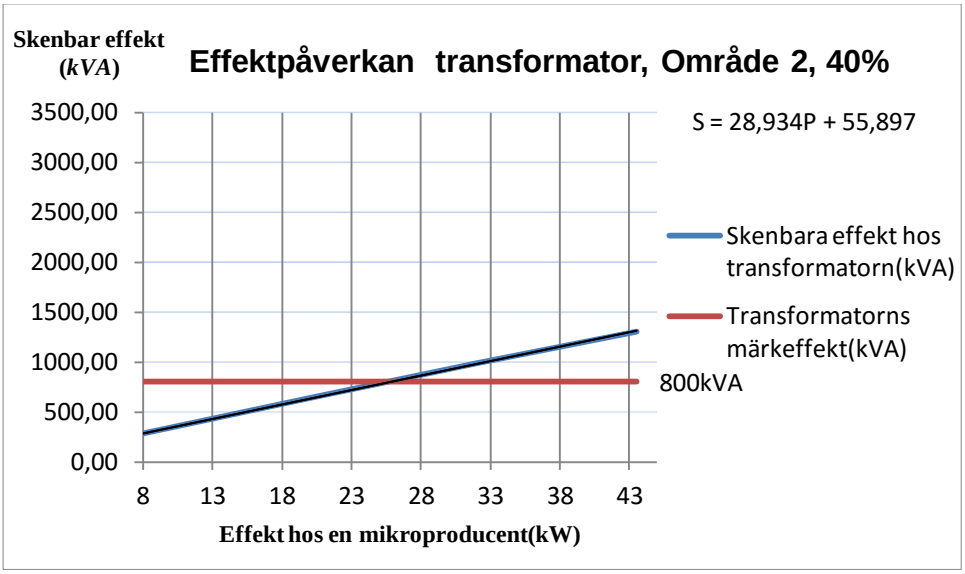
Den skenbara effekten var 800 kVA hos de tre transformatorerna. Simuleringar gjordes för att se när den nivån överskreds, genom att dela upp simuleringarna i fem olika scenarion där andelen mikroproducenter var 100, 80, 60, 40 och 20 % av alla laster totalt. I varje scenario varierades mikroproduktionen per anläggning med effektnivåerna 8, 12, 20 och 43,5kW.
Även i dessa simuleringar hade flerbostadshus och förskolor/skolor en konstant mikroproduktionseffekt på 43,5 kW och var mikroproducenter i alla de olika scenarierna.
Den aktiva effekten är så pass mycket högre än den reaktiva effekten från den mikroproducerade solcellsenergin och därför antas den skenbara effekten vara lika med den aktiva effekten.

4.3.2 Effektnivåer hos Område 2

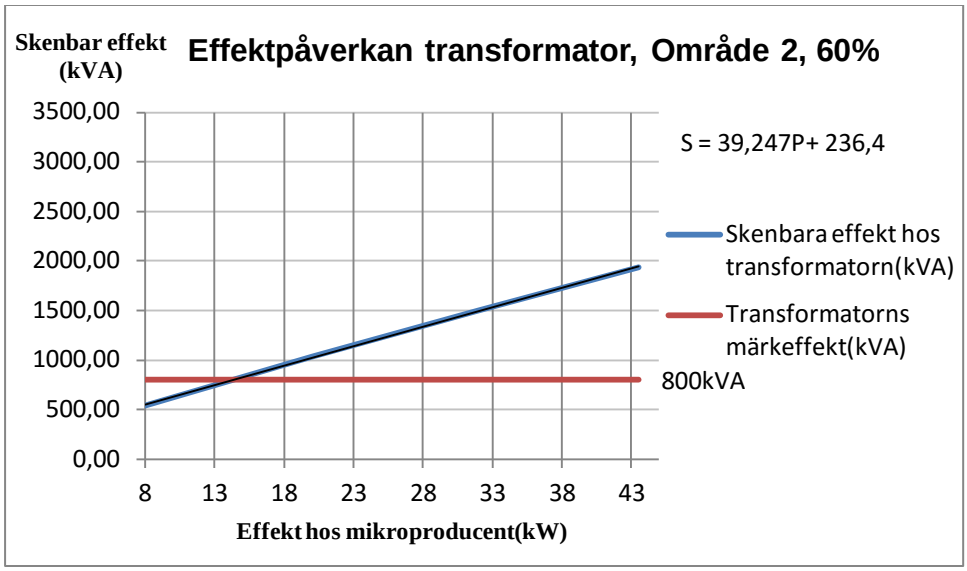
Resultatet av de olika scenarierna och hur transformatorn i Område 2 påverkas av mikroproduktionseffekterna sammanställs i grafer nedanför. Den skenbara effekten visar sig vara proportionerlig gentemot effekten och en trendlinje dras med ekvationen för den skenbara effekten i varje graf.



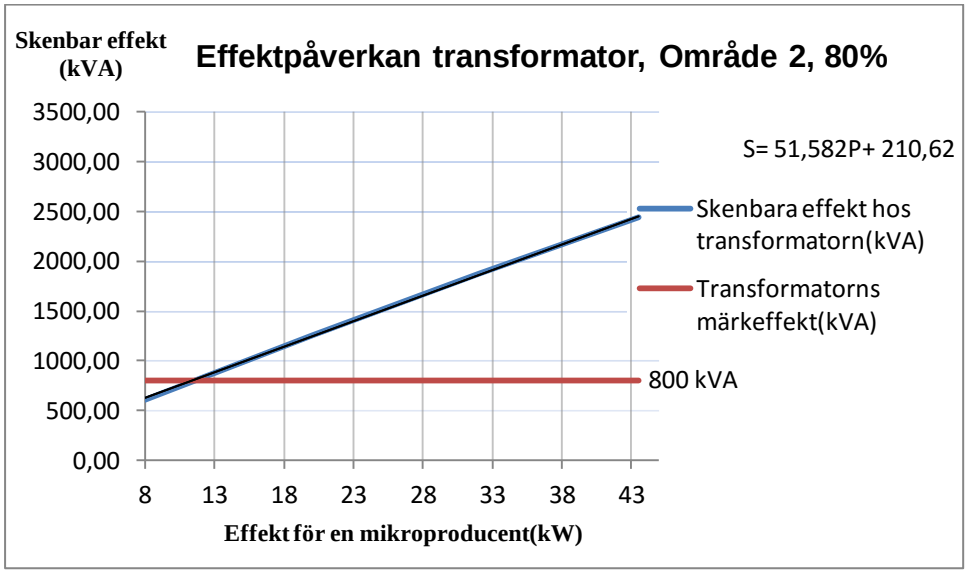
Figur 4.18. *Effekten hos transformatorn vid 20 % mikroproduktion, Område 2*



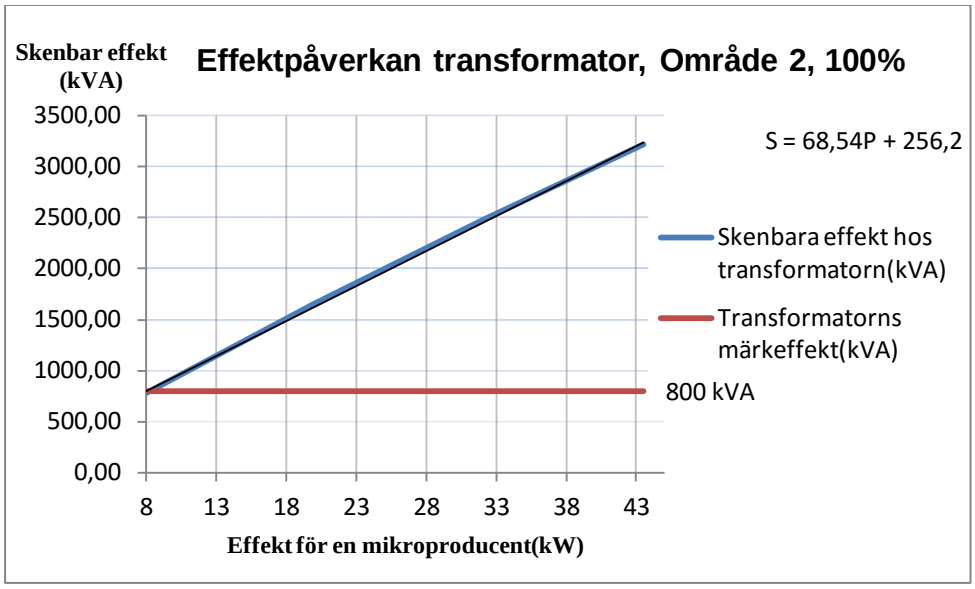
Figur 4.19. *Effekten hos transformatorn vid 40 % mikroproduktion, Område 2*



Figur 4.20. *Effekten hos transformatorn vid 60 % mikroproduktion, Område 2*



Figur 4.21. *Effekten hos transformatorn vid 80 % mikroproduktion, Område 2*



Figur 4.22. *Effekten hos transformatorn vid 100 % mikroproduktion, Område 2*

I *Tabell 4.10* sammanställs vilken nivå av mikroproduktionseffekt hos lasterna som krävs för att effekten hos transformatorn ska överstiga transformatorns märkeffekt i de olika scenarierna. I scenariot när 20 % procent av alla laster har mikroproduktion överträds aldrig märkeffekten hos transformatorn .

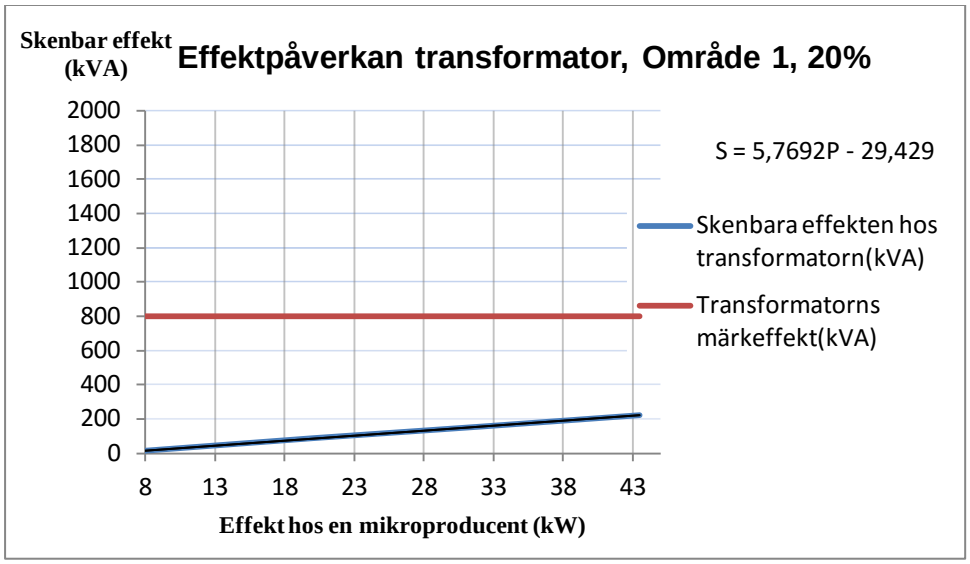
Tabell 4.10 .*Effektpåverkan på transformator i Område 2*

Andel med laster med mikroproduktion (%)	**Effekt från mikroproducenter då transformatorns märkeffekt överskrids (*kW*)**	**Ekvationen för den skenbara effekten som transformatorn utsätts för vid mikroproduktion (*kVA*)**
100	8,5	$S = 68{,}54P_{mikro} + 256{,}2$
80	11,5	$S = 51{,}582\ P_{mikro} + 210{,}62$
60	14,2	$S = 39{,}247\ P_{mikro} + 236{,}4$
40	25,5	$S = 28{,}934\ P_{mikro} + 55{,}897$
20	–	$S = 10{,}237\ P_{mikro} + 173{,}55$

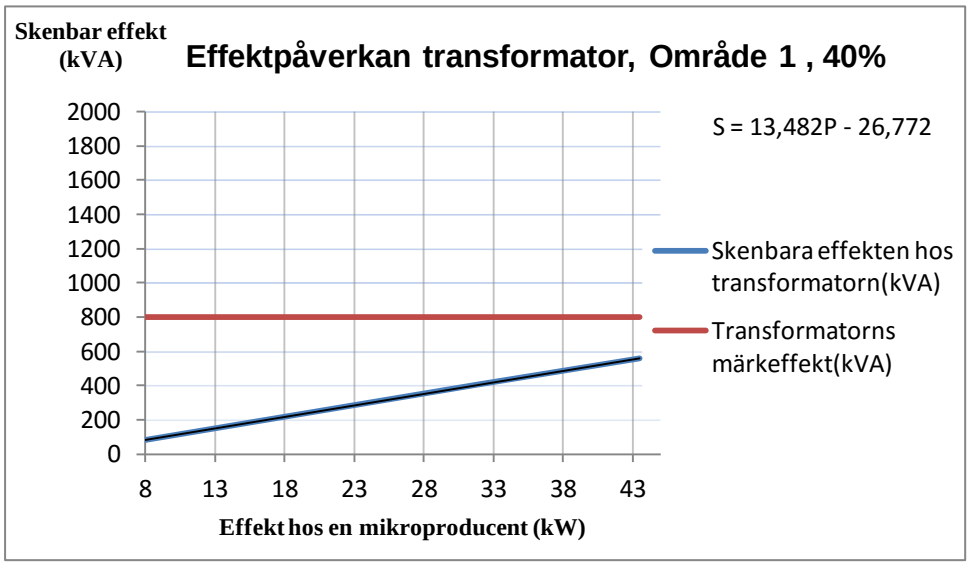
Ekvationerna för den skenbara effekten som transformatorn utsätts för i de olika mikroproduktionsscenarierna kan endast användas på Område 2, i sammanhang där det råder minimal effektförbrukning hos laster och en mikroproduktionseffekt som är större än 0 kW.

4.3.2 Effektnivåer hos Område 1

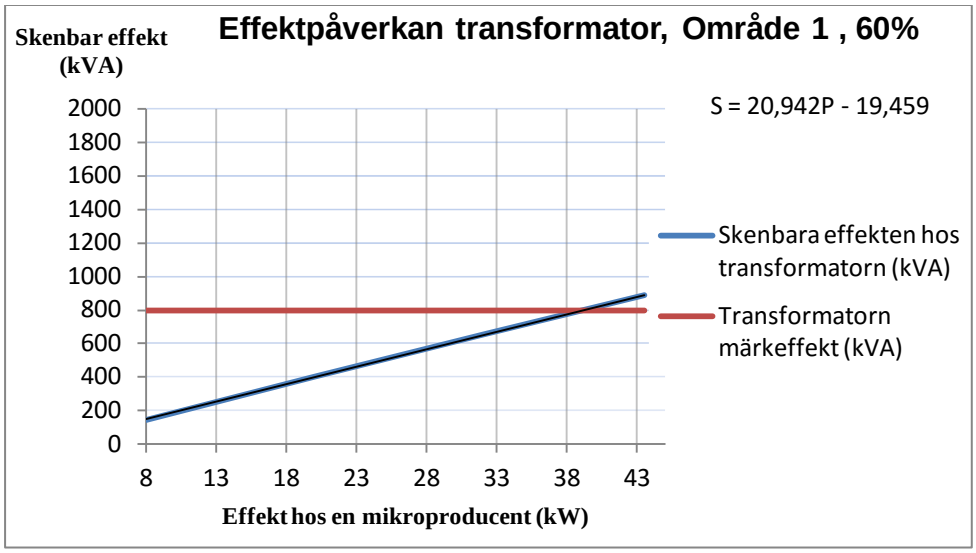
Resultatet av de olika scenarierna hur transformatorn i nätstationen på Område 1 påverkas av mikroproduktionseffekterna sammanställs i grafer nedanför. Den skenbara effekten visar sig vara proportionerlig gentemot effekten och en trendlinje dras med ekvationen för den skenbara effekten i varje graf.



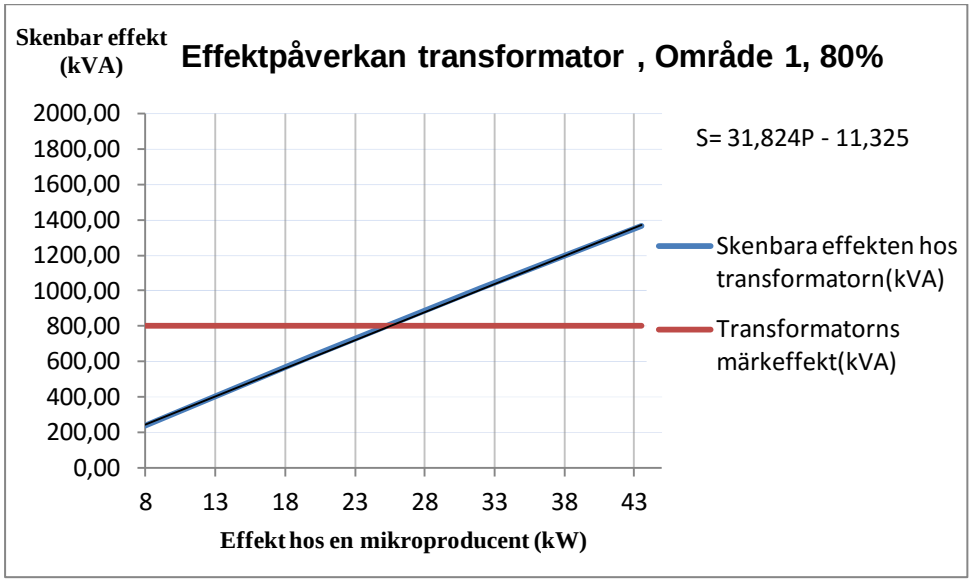
Figur 4.24. *Effekten hos transformatorn vid 20 % mikroproduktion, Område 1*



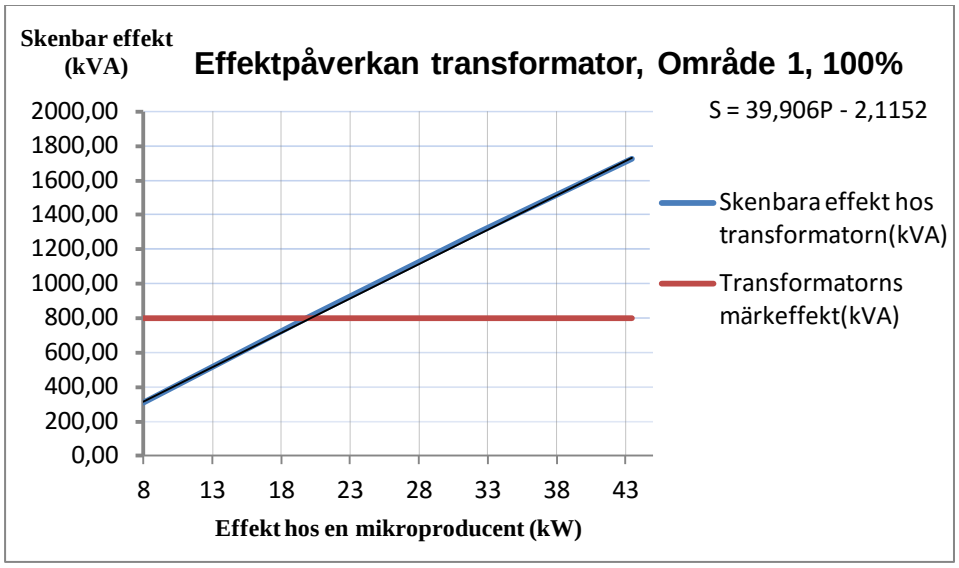
Figur 4.25. *Effekten hos transformatorn vid 40 % mikroproduktion, Område 1*



Figur 4.26. *Effekten hos transformatorn vid 60 % mikroproduktion, Område 1*



Figur 4.27. *Effekten hos transformatorn vid 80 % mikroproduktion, Område 1*



Figur 4.28. *Effekten hos transformatorn vid 100 % mikroproduktion, Område 1*

I *Tabell 4.11* sammanställs vilken nivå av mikroproduktionseffekt hos lasterna som krävs för att effekten hos transformatorn ska överstiga transformatorns märkeffekt i de olika scenarierna. I scenariorna när 20 % och 40 % procent av alla laster har mikroproduktion överträds aldrig märkeffekten hos transformatorn .

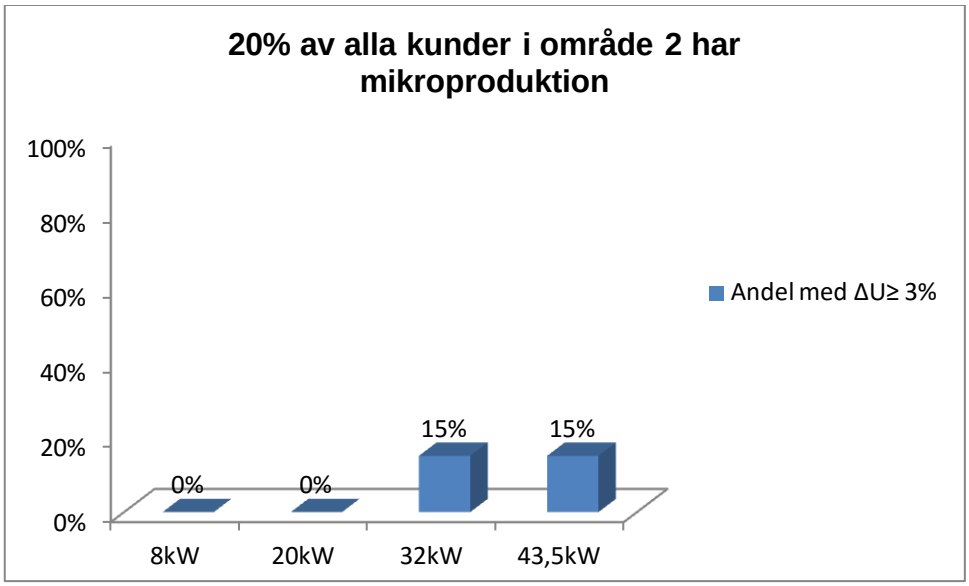
Tabell 4.11. *Effektpåverkan på transformator i Område 1*

Andel laster med mikroproduktion (%)	**Effekt för mikroproducenter då transformatorns märkeffekt överskrids (*kW*)**	**Ekvationen för den skenbara effekten som transformatorn utsätts för vid mikroproduktion (*kVA*)**
100	20	S = 39,906 P_{mikro} - 2,1152
80	25,5	S= 31,824 P_{mikro} - 11,325
60	39,2	S = 20,942 P_{mikro} - 19,459
40	–	S = 13,482 P_{mikro} - 26,772
20	–	S = 5,7692 P_{mikro} - 29,429

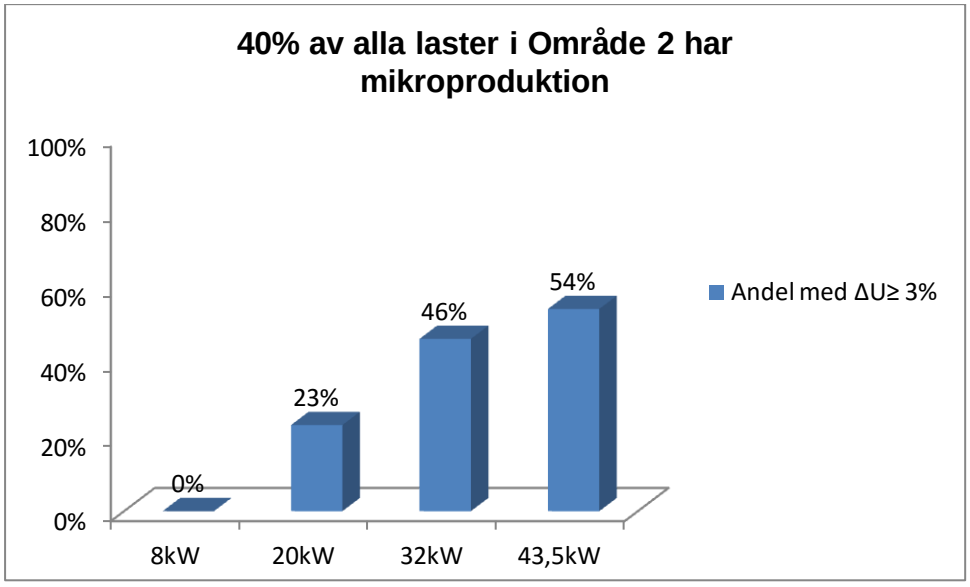
Ekvationerna för den skenbara effekten som transformator utsätts för de olika mikroproduktionsscenariona kan endast användas på område 1. I sammanhäng där det råder minimal effektförbrukning hos laster och en mikroproduktionseffekt som är större än 0 kW.

4.6 Överspänningar i ett kabelskåp

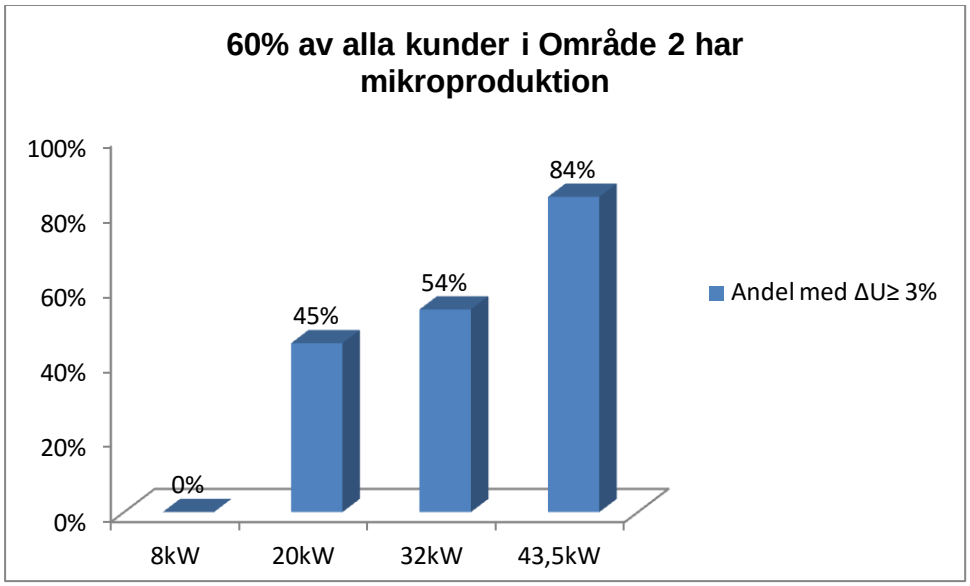
Endast den vänstra transformatorn i Område 2 analyserades vid studier av överspänningar i kabelskåp, då den innehöll fler kabelskåp och därmed blev resultaten mer kritiska hos den.
Studier för att se hur många kabelskåp av de totalt 14 anslutna till den vänstra transformatorn i Område 2 som fick överspänningar över 3 % gjordes i de olika scenariorna där 100, 80, 60, 40 och 20 % av lasterna hade mikroproduktion. Även i dessa mätningar hade flerbostadshus och förskola/skola en konstant spänning på 43,5 kW och togs aldrig bort utan var alltid en del av scenariot. Radhusen/villornas mikroproduktionseffekt varierades i de olika fallen i intervallen 8, 20, 32 och 43,5 kW.
I *Figurerna 4.29, 4.30, 4.31, 4.32 och 4.33* visas hur många av kabelskåp som har överspänning över 3 % vid de olika scenarierna där effekten varieras med nivåerna 8, 20, 32, 43,5 kW.



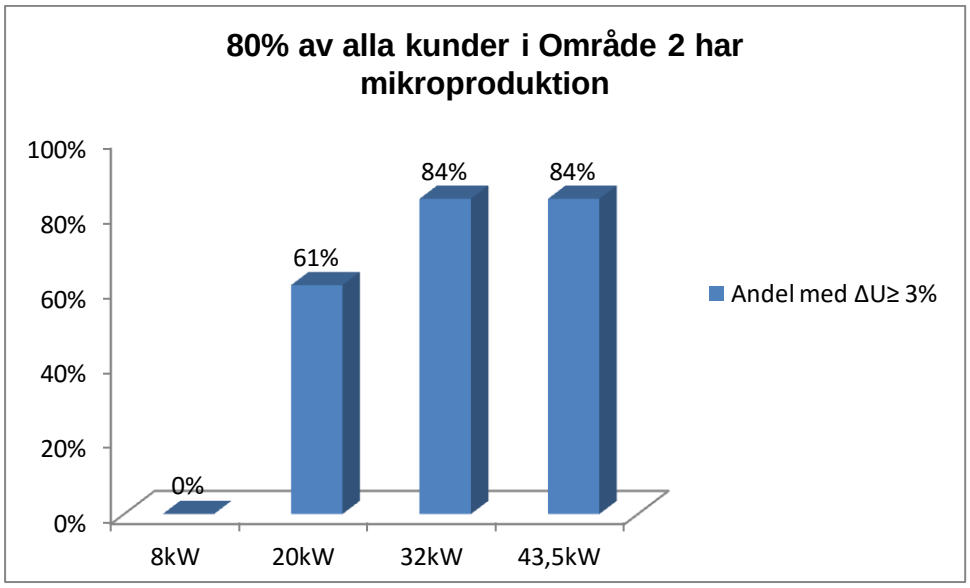
Figur 4.29. *Andel Kabelskåp med överspänningar vid 20 % anslutning av mikroproduktion i Område 2*



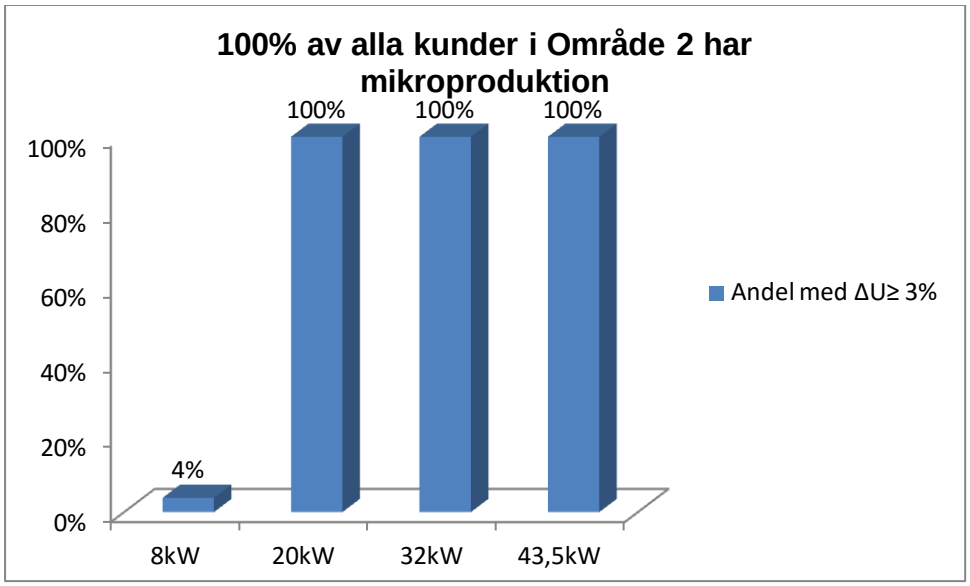
Figur 4.30. *Andel kabelskåp med överspänningar vid 40 % anslutning av mikroproduktion i Område 2*



Figur 4.31. *Andel Kabelskåp med överspänningar vid 20 % anslutning av mikroproduktion i Område 2*



Figur 4.32. *Andel Kabelskåp med överspänningar vid 20 % anslutning av mikroproduktion i Område 2*



Figur 4. 33. *Andel Kabelskåp med överspänningar vid 100 % anslutning av mikroproduktion i Område 2*

Man kan konstatera att när mikroproduktionen för radhus/villor är 8kW så överstiger aldrig spänningen på någon av kabelskåpens skena 3 % oavsett scenario.
Medan när mikroproduktionen är över 20 kW för radhus/villa så är andelen kabelskåp med överspänningen mer än 50 % i såväl scenariorna 100 % mikroproduktionsanslutning som 80 % mikroproduktionssanslutning . När mikroproduktionen är på nivåerna 32 och 43,5 kW så har en hög andel av kabelskåpen överspänningar över den rekommenderade nivån oavsett scenario.
I *Tabell 4.12* är andelen med överspänningar över den rekommenderade nivån 3 % sammanställd. Rödmarkerade celler innebär att de är en kritisk andel kabelskåp som har överspänningar över 3 %.

Tabell 4.12. *Andel kabelskåp med överspänningar över den rekommenderade nivån*

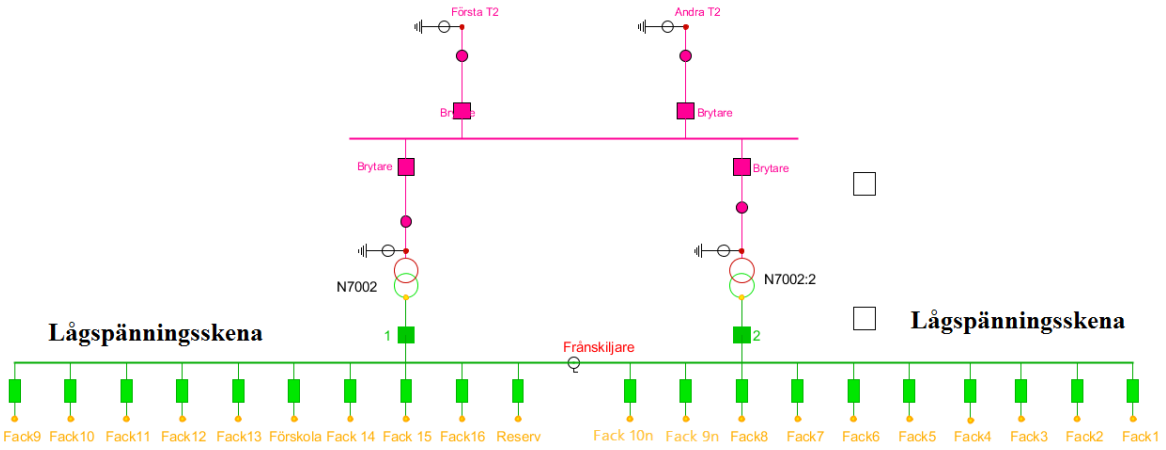
100 % integration	4 %	100 %	100 %	100 %
80 %	0 %	61 %	84 %	84 %
60 %	0 %	45 %	45 %	84 %
40 %	0 %	23 %	46 %	54 %
20 %	0 %	0 %	15 %	15 %
	8 kW	20 kW	32 kW	43,5 kW

4.7 Påverkan på transformatorns lågspänningsskena

Vid studier av lågspänningsskenorna i visade det sig att den vänstra lågspänningsskena i nätstationen N7002:s var den som utsattes för högst spänningshöjningar och är därför den enda som tas med i rapporten, se *Figur 4.34* .
Spänningen matades från mellanspänningsnätet 10,5 kV tillsammans med de olika scenarierna av antalet laster och de olika nivåerna av mikroproduktion.
Resultaten samlades in och presenteras i *Tabellerna 4.13, 4.14, 4.15 och 4.16*. I scenariot då alla laster har mikroproduktion på en nivå av 43,5 kW var spänningen på skenan lägre än när mikroproduktionen per anläggning var 30 kW, vilket är ologiskt och tyder på något fel i simuleringen. Detta resultat kan därför inte tolkas.

Utan mikroproduktion var fasspänningen på transformatorns lågspänningsskena 229 V, därefter räknades spänningen ut genom att man tog det nya värdet minus 229 V och delade resultatet med 229 V, se (4.1).

$$\Delta U_{sken} = \frac{U_{sken} - 229V}{229V} \% \qquad (4.1)$$



Figur 4.34 .*Transformatorns lågspänningsskena*

Tabell 4.13. *Överspänningsnivån på nätstationens lågspänningsskena när mikroproduktionen är 8kW för radhus/villor.*

Mikroproduktions effekt 8kW	
Andel laster med mikroproduktion(%)	**Överspännings ΔU(%)**
100	1,3
80	1,3
60	0,8
40	0,8
20	0,8
0	0

Tabell 4.14. *Överspänningsnivån på nätstationens lågspänningsskena när mikroproduktionen är 20kW för radhus/villor.*

Mikroproduktions effekt 20kW	
Andel laster med mikroproduktion(%)	**Överspännings ΔU(%)**
100	1,7
80	1,7
60	1,7
40	1,7
20	0,8
0	0

Tabell 4.15. *Överspänningsnivån på nätstationens lågspänningsskena när mikroproduktionen är 32kW för radhus/villor.*

Mikroproduktions effekt 32 kW	
Andel laster med mikroproduktion(%)	**Överspännings ΔU(%)**
100	2,2
80	2,2
60	1,7
40	1,3
20	0,8
0	0

Tabell 4.16 . *Överspänningsnivån på nätstationens lågspänningsskena när mikroproduktionen är 43,5kW för radhus/villor.*

Mikroproduktions effekt 43,5 kW	
Andel laster med mikroproduktion(%)	**Överspännings ΔU(%)**
100	1,7
80	2,2
60	1,7
40	1,7
20	0,8
0	0

I en transformator kan transformatorns spänningsförhållande varieras genom att man ändrar varvtalen. Varje kopplingssteg i en lindningskoppling är 2,5 % av den nominella spänningen.
Ur tabellerna ovanför kan man konstatera att spänningen på transformatorns lågspänningsskena aldrig överstiger 2,5 % och därmed finns det ingen anledning att ändra läge på lidningskopplaren. I *Tabell 4.17* sammanställs överspänningsnivåerna på transformatorns lågspänningsskena.

Tabell 4.17. *Överspänningsnivåerna i transformatorns lågspänningsskena*.

100 % integration	1,3 %	1,7 %	2,2 %	1,7 %
80 %	1,3 %	1,7 %	2,2 %	2,2 %
60 %	0,8 %	1,7 %	1,7 %	1,7 %
40 %	0,8 %	1,7 %	1,3 %	1,7 %
20 %	0,8 %	0,8 %	0,8 %	0,8 %
0 %	0 %	0 %	0 %	0 %

Mikroproduktion påverkar inte spänningen på lågspänningsskenan nämnvärt då nätet är starkt där tack vare den låga impedansen.

5 Slutsatser

Vid 8 kW mikroproduktion från villor och radhus som är ett aktuellt och troligt värde för mikroproduktion idag ser vi inga stora effekter av överspänningar hos kunderna eller i nätstationen. Transformatorns skenbara märkeffekt överstigs inte heller vid denna nivå i Område 1, men i Område 2 visade det sig att denna nivå överstigs redan efter att mikroproduktionen är 8,5 kW för radhus/villor och hela området har mikroproduktion.
Då mikroproduktionseffekten stiger och andelen mikroproducenter ökar kommer spänningen hos kunder och i kabelskåp att påverkas allt mer. Man måste därför ha med det i beräkningarna i framtiden när man dimensionerar nät då det mesta pekar på att andelen hushåll med mikroproduktion och märkeffekten hos solceller ökar. Att höja kabelarean hos en kritisk kund då mikroproduktionen var på maximal nivå visade sig minska överspänningen, men inte tillräckligt då överspänningen fortfarande överskred den tillåtna nivån på 10 %. Detta visar att överspänningen i ett hushåll till stor del även påverkas av grannarnas mikroproduktion som i simuleringen var 43,5 kW och där grannarnas serviskablar hade tjockleken 10 mm^2.Att byta läge på lidningskopplaren är inte aktuellt heller då överspänningen på transformatorns lågspänningssken aldrig visade sig överstiga 2,5 %. Det tyder på att lågspänningsnätet är som starkast nära transformatorn och påverkas därför inte allt för mycket av mikroproduktion oavsett mikroproduktionseffekt.

Mikroproduktionen visade sig påverka lasterna och transformatorn mindre i Område 1 som är betydligt mindre än Område 2. Det är därför gynnsamt att i områden där det är stor andel mikroproduktion överväga att bygga två eller fler nätstationer för att minska konsekvenserna av mikroproduktion i form av överspänningar hos kund och kabelskåp, samt att förhindra att transformatorns märkeffekt överstigs under dagar med minimal last och maximal effektförbrukning.

Ett sätt att motverka att transformatorns märkeffekt överskrids och att transformatorn föråldras är att kundernas solcellsanläggningar stängs av när de når en kritisk effekt, som i Område 2 hade varit 8,5 kW vid full integration av mikroproduktion.
Nätbolaget i sin tur ersätter kunden med lastförbrukningen och den effekten som den hade skickat tillbaka till nätet.

Varje fack i nätstationen bör inte heller innehålla fler laster än följande värden enligt *Tabell 5.1* för de specifika mikroproduktionseffekterna 8, 20, 32, 43,5 kW, för att en kund inte ska påverkas av grannarnas mikroproduktion och kabelskåpens överspänningar ska överstiga den rekommenderade överspänningsnivån.

Tabell 5.1. *Rekommenderade antal laster på varje nätstationsfack*

Mikroproduktionseffekt (kW)	Högsta rekommenderade antal laster
8	15
20	6
32	4
43,5	3

5.1 Framtida arbeten

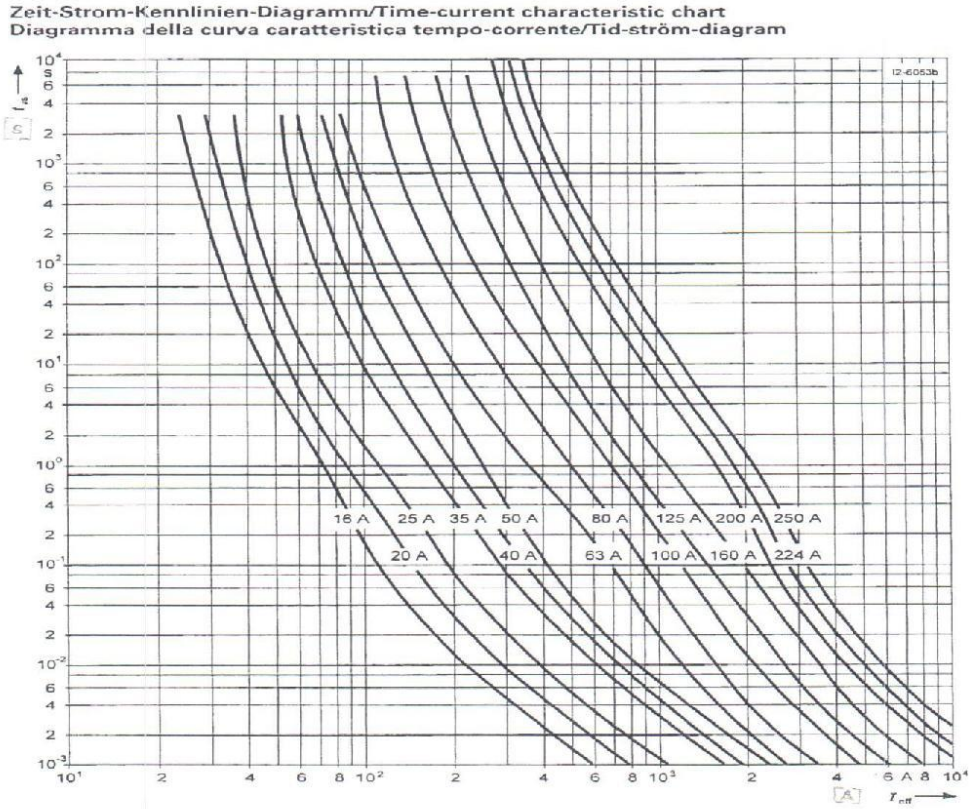
Ett framtida arbete kan vara att använda det fiktiva testnätet och försöka fördela lasterna på fler nätstationer, samt öka kabelarean då mikroproduktionseffekten ökar. En högre mikroproduktionseffekt kommer att kräva grövre kablar med högre belastningsförmåga vilket man i verkligheten måste beakta. Ett annat förslag är att studera vilken påverkan enfasigt anslutna mikroproducenter i de olika nivåerna hade haft i det fiktiva nätet och när kablarna i dessa fall blir överbelastade.

Källförteckningar

[1]”Producera din egen el.”, hem, [Online]. Tillgänglig:
https://www.hem.se/sv/elnat/producera-din-egen-el
[Hämtad: 10 mars 2016].
[2] Lars Bergström & Lars Nordlund, Ellära Krets- och fältteori, upplaga 1. Stockholm Liber AB 2009.
[3] ”Sammanlagring”, Energilexion [Online]. Tillgänglig
http://energilexikon.svenskenergi.se/wiki/Sammanlagring [Hämtad: 14 april 2016].
[4] Svenska Elverksföreningen 1991, Belastningsberäkningar med typkurvor sida 66 & 173. Stockholm Nordstedts Tryckeri AB 1991.
[5] H. Saadat, Power System Analysis, Third Edition PSA Publishing 2010.
[6] P.Chen, Session 4 : Power Flow Analysis
[7] Institutionen för Energi och Miljö, Elteknik, Chalmers tekniska högskola, Göteborg 2002.
[8] Svensk Elstandard, Elinstallationsreglerna ss 121,257, 268: SEK Handbok 444. Sweden: SEK Svensk Elstandard, 2010.
[9] ”Kabelhandboken Eldistribution Installation, Nexans[Online]. Tillänglig
http://www.nexans.com/Sweden/files/Kabelboken140630.pdf
[Hämtad: 20 april 2016].
[10] Hans Blomqvist, Elkraftsystem, Första upplagan Berlings, Arlöv 1997.
[11] Vattenfall distribution, El till din fastighet, Hur en elanslutning går till och vad du ska tänka på [Online], Tillänglig
http://www.vattenfalleldistribution.se/sv/file/El_till_din_fastighet_20130221.pdf_31957165.pdf
[Hämtad: 5 februari 2016]
[12] Oskar Engblom & Mari Ueda, Representativa testnät för svenska eldistributionsnät, Elforsk rapport 08:24. Juni 2008
[13] Svenska Energi, Anslutning av mindre produktionsanläggningar till elnätet-AMP, utgåva 4. Svensk Energi 2011.
[14] Göran Morén Chefsjurist, Energimarknadsinspektionens författningssamling [Online]. Tillänglig
https://www.ei.se/Documents/Publikationer/foreskrifter/El/EIFS_2013_1.pdf
[Hämtad 30 april 2016].
[15] Nexans Bring Energy to life, SE-N1XV-U 1 kV 5G10 [Online]
Tillänglig http://www.nexans.se/eservice/Sweden-sv_SE/navigateproduct_537222388/15013698.html#characteristics
[Hämtad 30 april 2016].
[16] Nexans Bring Energy to life, SE-N1XV-AS 1 kV 4G240 [Online] Tillänglig
http://www.nexans.se/eservice/Sweden-sv_SE/navigateproduct_537222398/15014298.html#characteristics [Hämtad 30 april 2016].
[17] SEK, Svenska Elektriska Kommissionen, SS 424 14 05 Utg. 2: Svensk Elstandard 1993.
[18] Svenska Kraftnät, Vägledning för Verksamhet Vid markförlagd kabel i stamnätet [Online]
Tillänglig.http://www.svk.se/siteassets/stamnatet/elsakerhet/dokument/vagledning-for-verksamhet-vid-stamnatets-markkabel-140903.pdf
[Hämtad 3 Juni 2016].
[19] Solens Energi, Solceller [Online]
Tillänglig.http://solensenergi.se/solensenergi/teknik/solpaneler/
[Hämtad 14 april 2016].
[20] Bild hämtad från Halmstad Energi och Miljö Nät AB dpPower licens

Bilagor

Bilaga 1 Tid-Ström-Diagram



Bilaga 2 Beräkningar på nätstationsfack i N7001

$$P_{Grupp1} = k_1 W_1 + k_2 \sqrt{W_1} = \begin{Bmatrix} W_1 = 7 \cdot 10187 kWh \\ \\ k_1 = 0.000280 \\ k_2 = 0.0250 \end{Bmatrix} = 26{,}64 kW$$

$$I_{b1} = \frac{P_{Grupp1}}{\sqrt{3} U_h \cdot \cos\gamma} = \begin{Bmatrix} P_1 = 26{,}64 kW \\ U_h = 400 \\ \cos\gamma = 0.95 \end{Bmatrix} = 40{,}47 A$$

$$P_{Grupp2} = k_1 W_2 + k_2 \sqrt{W_2} = \begin{Bmatrix} W_2 = 12 \cdot 10187 kWh \\ \\ k_1 = 0.000280 \\ k_2 = 0.0250 \end{Bmatrix} = 42.96 kW$$

$$I_{b2} = \frac{P_{Grupp2}}{\sqrt{3} U_h \cdot \cos\gamma} = \begin{Bmatrix} P_{grupp2} = 42{,}96 kW \\ U_h = 400 \\ \cos\gamma = 0.95 \end{Bmatrix} = 65{,}28 A$$

$$P_{Grupp4} = k_1 W_4 + k_2 \sqrt{W_4} = \begin{Bmatrix} W_4 = 12 \cdot 10187 kWh \\ \\ k_1 = 0.000280 \\ k_2 = 0.0250 \end{Bmatrix} = 42.96 kW$$

$$I_{b4} = \frac{P_{Grupp4}}{\sqrt{3} U_h \cdot \cos\gamma} = \begin{Bmatrix} P_{Grupp4} = 42.96 kW \\ U_h = 400 \\ \cos\gamma = 0.95 \end{Bmatrix} = 65.28 A$$

$$P_{Grupp5} = k_1 W_5 + k_2 \sqrt{W_5} = \begin{Bmatrix} W_5 = 8 \cdot 10187 kWh \\ \\ k_1 = 0.000280 \\ k_2 = 0.0250 \end{Bmatrix} = 29.995 kW$$

$$I_{b5} = \frac{P_{Grupp5}}{\sqrt{3} U_h \cdot \cos\gamma} = \begin{Bmatrix} P_{Grupp5} = 29.95 kW \\ U_h = 400 \\ \cos\gamma = 0.95 \end{Bmatrix} = 45.51 A$$

$$P_{Förskola} = 124kW$$

$$I_{Förskola} = \frac{P_{förskola}}{\sqrt{3}U_h \cdot \cos\gamma} = \begin{Bmatrix} P_{förskola} = 124kW \\ U_h = 400 \\ \cos\gamma = 0.95 \end{Bmatrix} = 210A$$

$$P_{flerbostad} = k_1 W_5 + k_2\sqrt{W_5} = \begin{Bmatrix} W_5 = 1 \cdot 45070kWh \\ k_1 = 0.000280 \\ k_2 = 0.0250 \end{Bmatrix} = 17.92kW$$

$$I_{bfler} = \frac{P_{flerbostad}}{\sqrt{3}U_h \cdot \cos\gamma} = 27.23A$$

$$P_{grupp8} = P_{Förskola} + P_{flerbostad} = 151.23kW$$

$$I_{Grupp8} = I_{Förskola} + I_{bfler} = 237.23$$

Bilaga 3 **Beräkningar på nätstationsfack i N7002**

$$P_{Fack1} = k_1 W_{fack1} + k_2 \sqrt{W_{fack1}} = \begin{Bmatrix} W_{fack1} = 14 \cdot 10187 kWh \\ k_1 = 0.000280 \\ k_2 = 0.0250 \end{Bmatrix} = 49.37 kW$$

$$I_{Fack1} = \frac{P_{Fack1}}{\sqrt{3} U_h \cdot \cos\gamma} = \begin{Bmatrix} P_1 = 17.93 kW \\ U_h = 400 \\ \cos\gamma = 0.95 \end{Bmatrix} = 75.01 A$$

$$P_{Fack2} = k_1 P_1 + k_2 \sqrt{P_1} = \begin{Bmatrix} W_{fack2} = 5 \cdot 10187 kWh + 1 \cdot 45070 kWh \\ k_1 = 0.000280 \\ k_2 = 0.0250 \end{Bmatrix} = 34.62 kW$$

$$I_{Fack2} = \frac{P_{S1}}{\sqrt{3} U_h \cdot \cos\gamma} = \begin{Bmatrix} P_1 = 34.62 kW \\ U_h = 400 \\ \cos\gamma = 0.95 \end{Bmatrix} = 52.61 A$$

$$P_{Fack3} = k_1 W_{fack3} + k_2 \sqrt{W_{fack3}} = \begin{Bmatrix} W_{fack3} = 4 \cdot 10187 kWh + 3 \cdot 45070 kWh \\ k_1 = 0.000280 \\ k_2 = 0.0250 \end{Bmatrix} = 59.755 kW$$

$$I_{Fack3} = \frac{P_{Fack3}}{\sqrt{3} U_h \cdot \cos\gamma} = \begin{Bmatrix} P_{Fack3} = 59.755 kW \\ U_h = 400 \\ \cos\gamma = 0.95 \end{Bmatrix} = 90.78 A$$

$$P_{Fack4} = k_1 P_1 + k_2 \sqrt{P_1} = \begin{Bmatrix} W_{fack4} = 4 \cdot 10187 kWh + 3 \cdot 45070 kWh \\ k_1 = 0.000280 \\ k_2 = 0.0250 \end{Bmatrix} = 59.755 kW$$

$$I_{Fack4} = \frac{P_{Fack4}}{\sqrt{3} U_h \cdot \cos\gamma} = \begin{Bmatrix} P_{Fack4} = 59{,}75 kW \\ U_h = 400 \\ \cos\gamma = 0.95 \end{Bmatrix} = 90.78 A$$

$$P_{Fack5}=k_1W_{Fack5}+k_2\sqrt{W_{Fack5}}=\begin{Bmatrix}W_{Fack5}=3\cdot10187kWh+3\cdot45070kWh\\k_1=0.000280\\k_2=0.0250\end{Bmatrix}=56.59kW$$

$$I_{Fack5}=\frac{P_{Fack5}}{\sqrt{3}U_h\cdot\cos\gamma}=\begin{Bmatrix}P_{Fack5}=56.59kW\\U_h=400\\\cos\gamma=0.95\end{Bmatrix}=85.98A$$

$$P_{Fack6}=k_1W_{Fack6}+k_2\sqrt{W_{Fack6}}=\begin{Bmatrix}W_{Fack6}=15\cdot10187kWh\\k_1=0.000280\\k_2=0.0250\end{Bmatrix}=52.55kW$$

$$I_{Fack6}=\frac{P_{Fack6}}{\sqrt{3}U_h\cdot\cos\gamma}=\begin{Bmatrix}P_{Fack6}=52.55kW\\U_h=400\\\cos\gamma=0.95\end{Bmatrix}=79.85A$$

$$P_{Fack7}=k_1W_{Fack7}+k_2\sqrt{W_{Fack7}}=\begin{Bmatrix}W_{Fack7}=10\cdot10187kWh\\k_1=0.000280\\k_2=0.0250\end{Bmatrix}=36.50kW$$

$$I_{Fack7}=\frac{P_{Fack7}}{\sqrt{3}U_h\cdot\cos\gamma}=\begin{Bmatrix}P_1=36.50kW\\U_h=400\\\cos\gamma=0.95\end{Bmatrix}=55.46A$$

$$P_{Fack8}=k_1W_{Fack8}+k_2\sqrt{W_{Fack8}}=\begin{Bmatrix}W_{Fack8}=11\cdot10187kWh\\k_1=0.000280\\k_2=0.0250\end{Bmatrix}=39.74kW$$

$$I_{Fack8}=\frac{P_{Fack8}}{\sqrt{3}U_h\cdot\cos\gamma}=\begin{Bmatrix}P_{Fack8}=39.74kW\\U_h=400\\\cos\gamma=0.95\end{Bmatrix}=60.38A$$

$$P_{Fack9n}=k_1W_{Fack9n}+k_2\sqrt{W_{Fack9n}}=\begin{Bmatrix}W_{Fack8}=5\cdot10187kWh\\k_1=0.000280\\k_2=0.0250\end{Bmatrix}=19.90kW$$

$$I_{Fack8}=\frac{P_{Fack9n}}{\sqrt{3}U_h\cdot\cos\gamma}=\begin{Bmatrix}P_{Fack8}=19.90kW\\U_h=400\\\cos\gamma=0.95\end{Bmatrix}=30.24A$$

$$P_{Fack10n} = k_1 W_{Fack10n} + k_2 \sqrt{W_{Fack10n}} = \begin{Bmatrix} W_{Fack8} = 4 \cdot 45070 kWh \\ k_1 = 0.000280 \\ k_2 = 0.0250 \end{Bmatrix} = 61.09 kW$$

$$I_{Fack10n} = \frac{P_{Fack10n}}{\sqrt{3} U_h \cdot \cos\gamma} = \begin{Bmatrix} P_{Fack8} = 61.09 kW \\ U_h = 400 \\ \cos\gamma = 0.95 \end{Bmatrix} = 92.82 A$$

Högra transformatorn

$$P_{Fack9} = k_1 W_{Fack9} + k_2 \sqrt{W_{Fack9}} = \begin{Bmatrix} W_{Fack9} = 15 \cdot 10187 kWh \\ k_1 = 0.000280 \\ k_2 = 0.0250 \end{Bmatrix} = 52.55 kW$$

$$I_{Fack9} = \frac{P_{Fack9}}{\sqrt{3} U_h \cdot \cos\gamma} = \begin{Bmatrix} P_{Fack9} = 79.85 kW \\ U_h = 400 \\ \cos\gamma = 0.95 \end{Bmatrix} = 79.85 A$$

$$P_{Fack10} = k_1 W_{Fack10} + k_2 \sqrt{W_{Fack10}} = \begin{Bmatrix} W_{Fack10} = 9 \cdot 10187 kWh + 4 \cdot 45070 kWh \\ k_1 = 0.000280 \\ k_2 = 0.0250 \end{Bmatrix} = 89.18 kW$$

$$I_{Fack10} = \frac{P_{Fack10}}{\sqrt{3} U_h \cdot \cos\gamma} = \begin{Bmatrix} P_1 = 89.18 kW \\ U_h = 400 \\ \cos\gamma = 0.95 \end{Bmatrix} = 135.50 A$$

$$P_{Fack11} = k_1 P_1 + k_2 \sqrt{P_1} = \begin{Bmatrix} P_{hus} = 6 \cdot 10187 kWh + 1 \cdot 45070 kWh \\ k_1 = 0.000280 \\ k_2 = 0.0250 \end{Bmatrix} = 37.88 kW$$

$$I_{Fack11} = \frac{P_{S1}}{\sqrt{3} U_h \cdot \cos\gamma} = \begin{Bmatrix} P_1 = 37.88 kW \\ U_h = 400 \\ \cos\gamma = 0.95 \end{Bmatrix} = 57.55 A$$

$$P_{Fack12} = k_1 W_{fack12} + k_2 \sqrt{W_{fack12}} = \begin{Bmatrix} W_{fack12} = 6 \cdot 10187 kWh \\ k_1 = 0.000280 \\ k_2 = 0.0250 \end{Bmatrix} = 23.29 kW$$

$$I_{Fack12} = \frac{P_{Fack12}}{\sqrt{3} U_h \cdot \cos\gamma} = \begin{Bmatrix} P_1 = 23.29 kW \\ U_h = 400 \\ \cos\gamma = 0.95 \end{Bmatrix} = 35.39 A$$

$$P_{Fack13} = k_1 W_{Fack13} + k_2 \sqrt{W_{Fack13}} = \begin{Bmatrix} P_{hus} = 9 \cdot 10187 kWH \\ \\ k_1 = 0.000280 \\ k_2 = 0.0250 \end{Bmatrix} = 33.24 kW$$

$$I_{Fack13} = \frac{P_{Fack13}}{\sqrt{3} U_h \cdot \cos\gamma} = \begin{Bmatrix} P_{Fack13} = 33.24 kW \\ U_h = 400 \\ \cos\gamma = 0.95 \end{Bmatrix} = 50.50 A$$

$$P_{skola+för} = 124 kA$$

$$I_{Skola} = \frac{P_{S1}}{\sqrt{3} U_h \cdot \cos\gamma} = \begin{Bmatrix} P_1 = 124 kW \\ U_h = 400 \\ \cos\gamma = 0.98 \end{Bmatrix} = 182.63 A$$

$$P_{Fack14} = k_1 W_{Fack14} + k_2 \sqrt{W_{Fack14}} = \begin{Bmatrix} W_{Fack14} = 16 \cdot 10187 kWh \\ \\ k_1 = 0.000280 \\ k_2 = 0.0250 \end{Bmatrix} = 55.73 kW$$

$$I_{Fack14} = \frac{P_{Fack14}}{\sqrt{3} U_h \cdot \cos\gamma} = \begin{Bmatrix} P_1 = 55.73 kW \\ U_h = 400 \\ \cos\gamma = 0.95 \end{Bmatrix} = 84{,}67 A$$

$$P_{Fack15} = k_1 W_{Fack15} + k_2 \sqrt{W_{Fack15}} = \begin{Bmatrix} W_{Fack15} = 10 \cdot 10187 kWh \\ k_1 = 0.000280 \\ k_2 = 0.0250 \end{Bmatrix} = 36.50 kW$$

$$I_{Fack15} = \frac{P_{Fack15}}{\sqrt{3} U_h \cdot \cos\gamma} = \begin{Bmatrix} P_{Fack15} = 55{,}46 kW \\ U_h = 400 \\ \cos\gamma = 0.95 \end{Bmatrix} = 55{,}46 A$$

$$P_{Fack16} = k_1 W_{Fack16} + k_2 \sqrt{W_{Fack16}} = \begin{Bmatrix} W_{Fack16} = 7 \cdot 10187 kWH \\ \\ k_1 = 0.000280 \\ k_2 = 0.0250 \end{Bmatrix} = 26.64 kW$$

$$I_{Fack16} = \frac{P_{Fack16}}{\sqrt{3} U_h \cdot \cos\gamma} = \begin{Bmatrix} P_{Fack16} = 40.47 kW \\ U_h = 400 \\ \cos\gamma = 0.95 \end{Bmatrix} = 40.47 A$$