

Mikroproduktion i lågspänningsnätet



Erik Tydinger
Albin Andersson

Division of Industrial Electrical Engineering and Automation
Faculty of Engineering, Lund University

Mikroproduktion i lågspänningsnätet



**LUNDS
UNIVERSITET**

Lunds Tekniska Högskola

**LTH Ingenjörshögskolan vid Campus Helsingborg
LTH ingenjörshögskolan vid Campus Helsingborg Avdelningen för Industriell Elektroteknik och
Automation**

Examensarbete:

Erik Tydinger
Albin Andersson

© Copyright Erik Tydinger, Albin Andersson

LTH Ingenjörshögskolan vid Campus Helsingborg
Lunds universitet
Box 882
251 08 Helsingborg

LTH School of Engineering
Lund University
Box 882
SE-251 08 Helsingborg
Sweden

Tryckt i Sverige
Lunds universitet
Lund 2019

Abstract

The goal of this report is to examine the impacts of integrating Photovoltaic systems in low voltage networks. Öresundskraft requested a report on what problems can arise in the future as more and more people start using PV systems. Scenarios where a certain percentage of an area will install PV systems have been simulated, as well as further analysis of the results from the simulations and calculations.

Two different low voltage networks were analyzed. The first area is a small rural grid with around 10 facilities, and the other a larger urban area with around 240 facilities.

Since these two areas are the typical areas of which installations of PV systems are expected to grow, they make a good ground for simulation.

The two areas were analyzed using data given from Öresundskraft containing data about the transformers, external grid and cable data. The data was utilized in calculations and in simulation software that were used to simulate currents and voltage rising, as well as more advanced simulations involving harmonics.

Results indicate that it will take a lot of produced power to disrupt the low voltage grid. The rural grid only faces problems with the transformers rated current while the urban grid exceed recommended voltage increases and harmonic voltage distortions when 50-75 % of the facilities use 10 kW PV systems. The calculations are based on the fact that the producing facilities do not consume anything of their produced power, which is a rare extreme case.

This indicates that even a vast low voltage network with many potential PV loads will handle an increased number of producers well, but precautions may need to be considered if the majority of facilities in low voltage grids where the producing potential is high do not consume their produced power. If the grid is to be dimensioned for these scenarios, the best way is to reduce cable impedance by reinforcing the grid with parallel distribution cables.

Keywords: Photovoltaic systems, low voltage grid, voltage variations, micro production, harmonics

Sammanfattning

Målet är att undersöka hur en ökad installation av solceller kommer att påverka lågspänningsnätet. Öresundskraft efterfrågade en rapport som undersöker framtida problem i deras nät när solcellssystem installeras i större omfattning. Scenarion där olika procentantal kunder i lågspänningsnätet installerar solceller har analyserats och simulerats.

Två olika lågspänningsnät har används, ett område på landet med ett tiotal fastigheter och ett villaområde med 240 fastigheter. Det är i den här typen av lågspänningsnät som prognosen för ökad installation av solceller är god och därför utger det en bra grund för simulering.

Data från Öresundskraft har använts för att beräkna, simulera och analysera de här två områdena. Transformatordata, kabeldata och mellanspänningsnätsdata. I de mer avancerade testfallen som övertonsberäkning så har all data använts och i de enklare testfallen där överspänningsberäkningar genomförts har endast kabeldata och transformatordata använts.

Det mindre lågspänningsnätet får endast problem med transformatorns märkström. Det större nätet börjar få problem med överspänningar och spänningsövertoner när 50-75 % av fastigheterna i nätet producerar. I testfallen genomförs beräkningar med antagandet att maximal effekt produceras och inte konsumeras av producenten, ett extremt testfall.

Näten klarar av en stor ökning av producenter men åtgärder kan vara nödvändiga i framtiden om majoriteten i lågspänningsnät med många potentiella producenter inte konsumerar en hög producerad effekt (10 kW per fastighet i beräkningarna). Om nätet ska dimensioneras för dessa extremfall så är det bästa sättet att parallellkoppla distributionskablarna för att minska kabelimpedansen i nätet.

Nyckelord: Solceller, lågspänningsnät, spänningsvariationer, mikroproduktion, övertoner

Förord

Det här examensarbetet har utförts på slutet av El & Automationsutbildning på Campus LTH och innefattar 22,5 HP.

Examensarbetet utfördes på Öresundskraft och in-house via Miljöbron.

Miljöbron agerar förmedlare av projekt ämnade för examensarbete på universitetsnivå, Öresundskraft är ett stort energibolag i Nordvästra Skåne med huvudkontor i södra Helsingborg.

Miljöbron agerade god förmedlare och såg till att vi kom i kontakt med Öresundskraft som var mycket hjälpsamma och vi lyckades boka flertalet möten för diskussion och frågor.

Tack till:

Madeleine Brask på Miljöbron

Lars Hansson och Johan Mikkelsen på Öresundskraft

Innehållsförteckning

1. Inledning	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Situationen idag	1
1.3 Syfte	2
1.4 Mål	2
1.5 Avgränsningar	2
1.6 Källkritik	3
2. Teori	4
2.1 Elnätets uppbyggnad	4
2.2 Solceller i lågspänningsnätet	5
2.3 Spänningsvariationer	6
2.3.1 In och urkoppling av kund.....	6
2.3.2 Långsamma spänningsvariationer.....	6
2.3.3 Flimmer.....	6
2.4 Övertoner	7
2.5 Osymmetri	9
2.6 Kabeldimensionering	10
2.6.1 Parallellkopplade kablar.....	11
2.7 Analys	12
3. Överspänning och genererade strömmar i nätet	13
3.1 Metod	13
3.1.1 Nätdata.....	13
3.1.2 Ritningar.....	13
3.1.3 Formler och beräkningar.....	14
3.2 Utförande	16
3.2.1 Ritningar.....	16
3.2.2 Val av effekt.....	17
3.2.3 Beräkning.....	18
3.2.4 Analys, tillvägagångssätt.....	18
3.3 Resultat	19
3.3.1 Överspänning.....	19
3.3.2 Strömmar i kablar och transformator.....	21
4. Övertoner	23
4.1 Metod	23
4.1.1 Val av simuleringsverktyg.....	23

Mikroproduktion i lågspänningsnätet	
4.1.2 Parametrar	23
4.1.3 Val av växelriktare	24
4.2 Utförande	25
4.2.1 Modelleriing av Bårslöv	25
4.2.2 Modelleriing av Flohem	26
4.2.3 Modelleriing av växelriktare	27
4.3 Resultat	28
5. Diskussion och slutsats	30
5.1 Resultatanalys	30
5.1.1 Överspänning	30
5.1.2 Transformator	30
5.1.3 Strömmar i kablar	31
5.1.4 Övertoner	31
5.1.5 Rangordning av problem	32
5.2 Åtgärder	33
5.2.1 Transformator	33
5.2.2 Kabeldimensionering	33
5.2.3 Överspänning	34
5.2.4 Övertoner	35
5.2.5 Slutsats	36
5.3 Vidareutveckling	38
6. Referenser	39
7. Terminologi	40
8. Appendix	41

1. Inledning

1.1 Bakgrund

Andelen privata mikroproducenter växer i Sverige. Total producerad energi var 13 procent högre år 2018 än år 2017 [6]. Idag står tusentals hushåll i kö för statligt stöd till solcellsanläggningar [7]. Mikroproduktion är möjligt inom både sol, vind och vatten. Den största andelen och den enda som undersöks i det här arbetet är mikroproducenter som använder sig av solcellsanläggningar. Billigare teknik, miljöfrågor och en framtid med en oviss energimarknad är troliga upphov till en ökning av solceller i villaområden. Eftersom egenproducerad energi via solceller spås öka i framtiden måste dess belastning på nätet och påverkan på elkvaliteten undersökas.

Producerad effekt kan konsumeras av producenten alternativt säljas till energibolaget. Kostnadmässigt är det inte möjligt för producenter att i stor omfattning lagra den producerade effekten. Fastigheter med solcellsanläggningar som inte konsumerar producerad effekt blir matande effektkällor i lågspänningsnätet. Sald effekt går från fastigheter till transformator och vidare till mellanspänningsnätet och ger upphov till förändringar i nätet.

Ett lågspänningsområde kan innefatta mer än 100 fastigheter och om alla börjar använda sig av solceller, och konsumerar lite av den producerade effekten kan stora förändringar i nätet ske. Det är ett teoretiskt extremfall, men såväl små belastningar som stora belastningar på lågspänningsnätet undersöks i den här rapporten.

Konsekvenserna av solceller i lågspänningsnätet är många, det finns flertalet aspekter att ta hänsyn till. Problem som kan uppstå i lågspänningsnätet presenteras, och de problem som haft hög relevans och varit möjliga att simulera i arbetets omfattning redovisas i slutet av rapporten.

1.2 Situationen idag

Öresundskrafts arbetsmetodik gentemot Solcellsanläggningar[Intervju med Öresundskraft]:

Förkortning: ÖK betyder Öresundskraft.

- Kund/installatör har kontakt med ÖK och meddelar att de vill sätta upp solceller.
- ÖK räknar för att se om nätet klarar av anläggningen. I vissa fall går beräkningarna lätt och i andra fall behövs noggrannare utredning.
- Eventuellt behövs elnätet förstärkas, vilket försenar idrifttagningen av anläggningen.
- Sedan görs installationsarbetet och tillslut (genom entreprenör) sätts elmätare ut som klarar av produktion (så att kund kan få betalt för sin el).

Problematiken idag är utredningar och eventuella efterföljande åtgärder. Magnituden av dessa åtgärder kommer att växa tillsammans med att mikroproduktion ökar. Idag krävs oftast inga stora åtgärder.

1.3 Syfte

Arbetet inriktar sig på att identifiera och rangordna problem som uppstår i lågspänningsnätet vid olika effektnivåer, från låg nivå till maximal nivå. Identifiera vad det är som behövs ändras/bytas ut först i nätet, var nätets flaskhals ligger. Iaktta alla konsekvenser som solceller i lågspänningsnätet har, identifiera de mest relevanta och simulera dessa.

1.4 Mål

Efter att ha sammanställt arbetet är målet att ha en prognos över de två lågspänningsområdenas framtid med ett ökat antal producenter.

Prognosen kommer att bli teoretisk, inrikta sig på beräkningar, simuleringar och undersöka när elkvalité brister samt när åtgärder behövs.

1.5 Avgränsningar

Det var inte möjligt att använda Öresundskrafts verktyg för simuleringar och test. En god modell över näten erhöles dock och kunde användas i tillgängliga simuleringsprogram utanför Öresundskraft.

Arbetet avser inte att försöka ställa någon slags prognos över hur många i ett område som kommer att installera solpaneler. Ingen undersökning på hur mycket överskottseffekt en producent i snitt matar ut i nätet eller försök att identifiera hur mycket producenter i ett befintligt nät maximalt kan mata ut i nätet och jämföra med den totala produktionen i nätet genomförs.

Målet är endast att se när problemen uppstår med kännedomen att antalet mikroproducenter garanterat kommer att öka i nätet i framtiden. Därmed avgränsas arbetet till att undersöka extremfall, ett antagande görs att maximal överskottseffekt matas ut i lågspänningsnätet från de simulerade solcellsanläggningarna. I samråd med Öresundskraft har bedömningen gjorts att det är möjligt att en hög överskottseffekt matas ut i nätet, exempelvis vid sommardagar när produktionen är hög och konsumtionen är låg.

Sammanfattat så begränsas arbetet till att undersöka de teoretiska extremfall som uppstår i nätet och att beräkna och simulera det som med tillgängliga verktyg var möjligt, spänningar, strömmar och störningar från växelriktare.

1.6 Källkritik

[1] Informationen till artikeln är hämtad från boken Cost-Effective Energy Efficient Building Retrofitting. ISBN: 978-0-08-101128-7

Boken innehåller essentiell kunskap för ingenjörer inom energi.

[2] ALP-handboken utgör grund för arbetet. Den innehåller all information om anslutning av mikroproduktion i lågspänningsnätet samt beskriver de dimensioneringsriktlinjer och krav som finns. Boken riktar sig till elnätsföretag. Materialet ges ut av Energiföretag Sverige, ett branschföretag som samlar nära 400 energibolag.

[3] Svenska kraftnäts riktlinjer används som hjälpmedel i arbetet för att komplettera ALP-handboken med de riktlinjer, formler och beräkningar som är relevanta till arbetets beräkningar. SVK är ett statligt affärsverk som förvaltar svenska statens stamnät.

[4] Vattenfalls solcellsguide beräknar maximal yta på hustak för installation av solcellspaneler. Beräkningar genomförs med hjälp av satellitbilder. Takyta, lutning och position är inkluderade i beräkningarna. Vattenfall är Sveriges största nätoperatör med över 800 000 kunder.

[5] Kraftkabelhandboken innehåller all information om kablar som används i elnätet. Materialet är utgivet av NKT som är ett marknadsledande globalt företag inom optik och kablar.

[6] Vattenfall. Se [4].

[7] SVT är ett skattefinansierat aktieföretag med 2309 anställda inom media, television och nyheter.

2. Teori

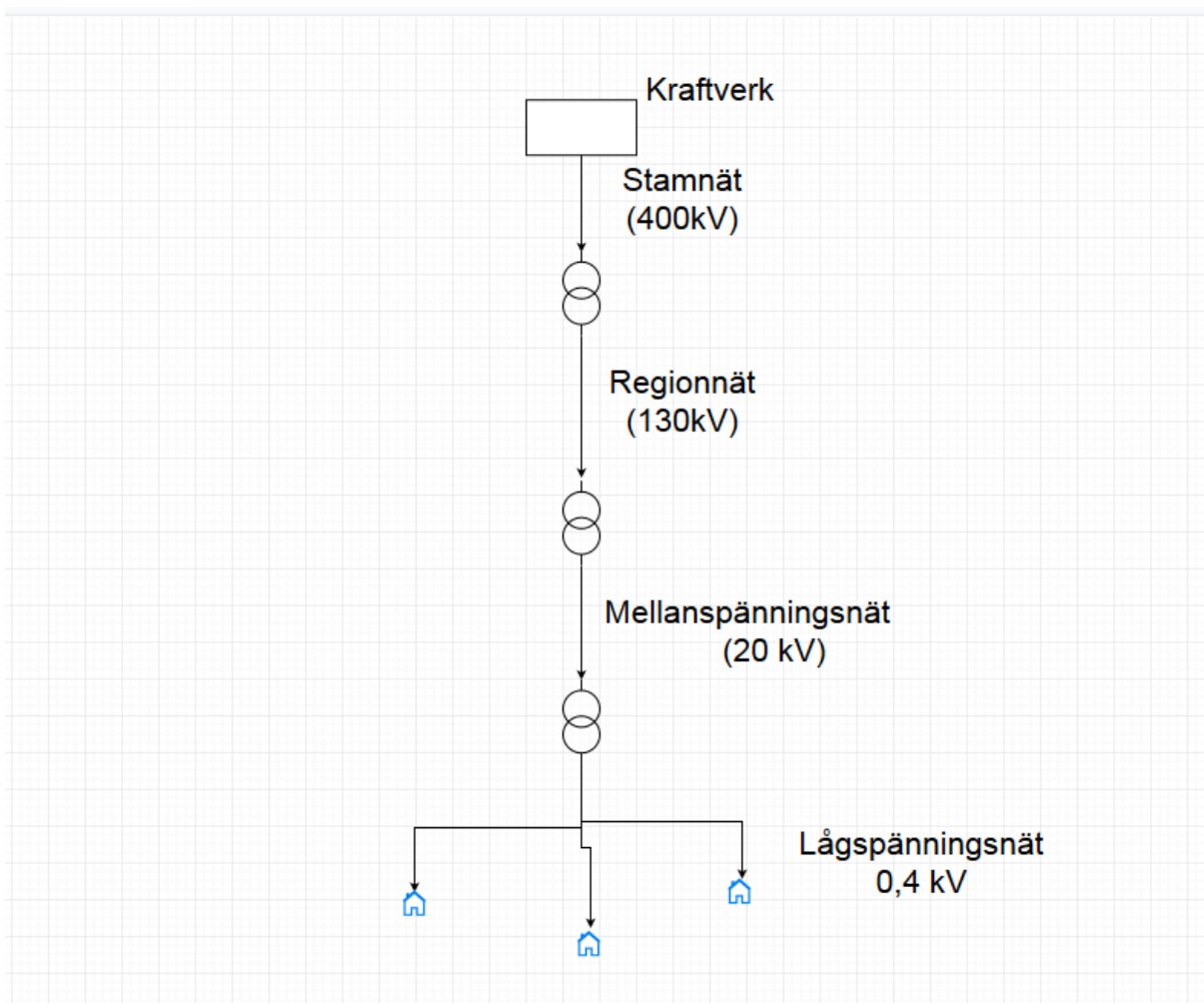
Kapitlet beskriver all nödvändig teori kring arbetet och de potentiella problem som kan uppstå i nätet. Kapitlet avslutas med motivering av valda problemundersökningar.

2.1 Elnätets uppbyggnad

Figur 2.1 beskriver elnätets uppbyggnad, från kraftverk till lågspänningsnät.

Spänningen transformeras ned i tre steg:

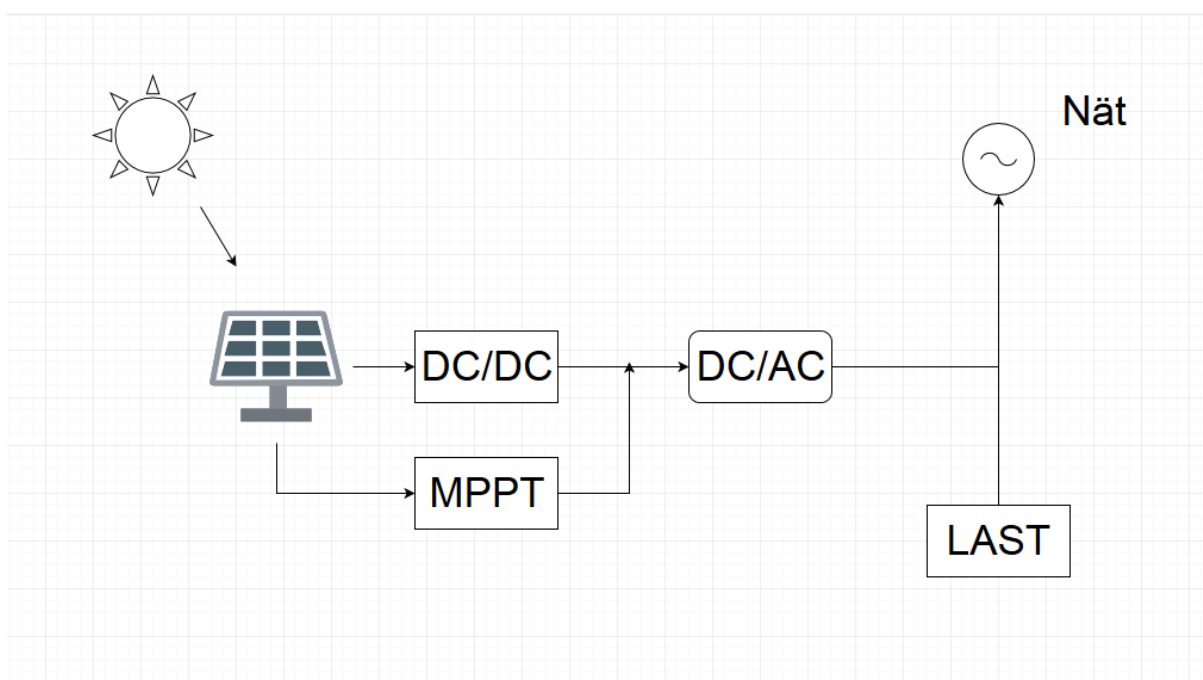
Stamnätet(400kV), Regionnätet(40-130kV), Mellanspänningsnätet(10-20kV),
Lågspänningsnätet(400V).



Figur 2.1. Elnätets uppbyggnad

2.2 Solceller i lågspänningsnätet

Solpaneler i lågspänningsnätet monteras på husets tak. Vid installation optimeras vinkeln på solcellerna baserat på takets form och läge för att maximera produktionen. Solceller genererar likström och aktiv elektrisk effekt via halvledare som exponeras för den fotoelektriska effekten[1]. Likströmmen som generas kan omvandlas till en högre eller lägre spänning med en DC/DC omvandlare. Likströmmen växelriktas med en DC/AC omvandlare och ansluts till lågspänningsnätet enligt figur 2.2. Det är möjligt att minska spänningsförluster med en MPPT regulator.



Figur 2.2. Exempel på ett system för solcellsanläggning.

Om fastigheten inte förbrukar den tillhörande solcellsanläggningens producerade energi, är det möjligt att sälja sitt överskott.

Resultatet av att inte förbruka sin produktion är att fastigheten kan illustreras som en matande AC-källa i nätet.

2.3 Spänningsvariationer

2.3.1 In och urkoppling av kund

När en mikroproducent ansluts till eller kopplas ur lågspänningsnätet kan spänningsvariationer ske. Rekommenderade nivåer är maximalt 5 % variation vid kund och 3 % variation i kabelskåp. Det inträffar sällan att solcellsanläggningar kopplas in eller ut när produktionsnivån är hög [2]. Tabell 2.1 beskriver maximalt rekommenderade spänningsvariationer vid in och urkoppling i respektive punkt.

Spänningsändring vid in- och urkoppling	
I anslutningspunkt mot kund	5%
I sammankopplingspunkt mot andra kunder	3%

Tabell 2.1. Maximala variationsnivåer vid in och urkoppling av kund.

2.3.2 Långsamma spänningsvariationer

Olinjära laster i form av solceller ger upphov till långsamma spänningsändringar i nätet.

Beroende på produktion och förbrukning varierar spänningen ute hos kunder och i kabelskåp på grund av lasterna i nätet.

Långsamma spänningsändringar avser spänningens effektivvärde uppmätt som medelvärde i 10-minutersskala. Vid beräkningar och nätdimensionering rekommenderas -10/+6 % variation. Det medför att variationsgränserna är 207–244 Volt på en fas i lågspänningsnätet.

Standarden SS-EN 50160 och föreskriften EIFS 2013:1 anger en maximal långsam spänningsvariation på +10 % /-10 %.[2]

2.3.3 Flimmer

Flimmer är kortvariga spänningsändringar, under 1-sekundsskalan. Flimmer kan orsakas av in och urkoppling av laster samt variation av inmatad och uttagen effekt. Flimmer kan manifesteras som intensiva blinkningar i en glödlampa särskilt om ljuskällan är belägen nära en last som genererar störningar.

När det gäller produktionsanläggningar så är det främst vindkraft som ger upphov till flimmer.[2]

2.4 Övertoner

Växelriktarna i solcellsanläggningar omvandlar likström till växelström. Vid omvandling är den genererade sinusvågen inte perfekt, den innehåller övertoner. Övertoner är periodiska med en frekvens som är en heltalsmultipel av grundtonen(50 Hz).

Produktionsanläggningarna genererar strömövertonerna som sedan även påverkar spänningen i nätet och dess övertonshalt.

Spänningens övertonshalt i ett lågspänningsnät med solceller påverkas av nätimpedansen, transformatorn och den av växelriktarna AC-konverterade strömmens totala harmoniska distorsion.

Den sannolika huvudkällan till övertoner i lågspänningsnätet är anslutning av olinjära laster(mikroproducenter).[2]

Total harmonisk distorsion för spänning och ström beräknas enligt följande, där n är heltalsmultiplarnas ordning.[3]

$$THD_u = 100 \times \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{U_n}{U_1}\right)^2} \% \quad (2.1)$$

$$THD_i = 100 \times \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{I_n}{I_{ref}}\right)^2} \% \quad (2.2)$$

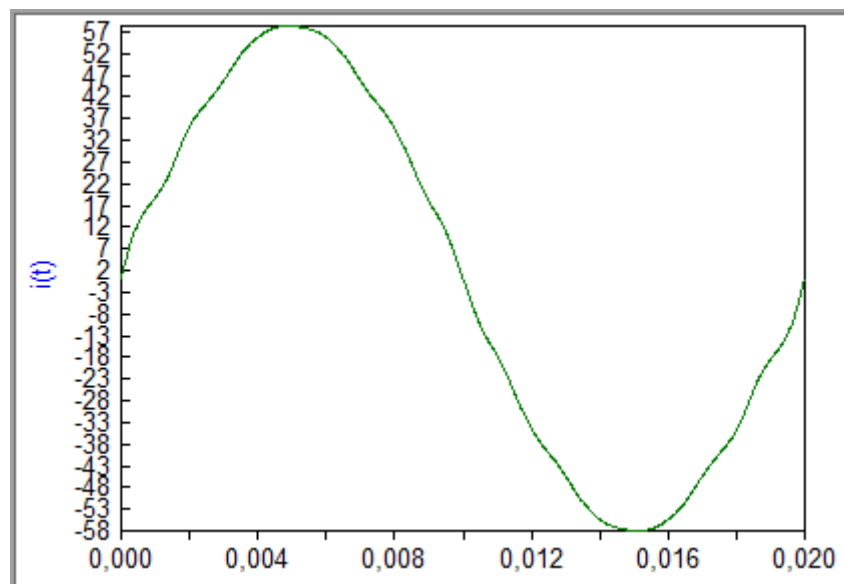
Nivåer för nätspänningens relativa övertonshalt enligt SS-EN 50160 och EIFS 2013:1: [2]

Udda Övertoner				Jämna Övertoner	
Ickemultipler av 3		Multipler av 3			
Ordning h	Relativ Spänning	Ordning h	Relativ Spänning	Ordning h	Relativ Spänning
5	6%	3	5%	2	2%
7	5%	9	1,5%	4	1%
11	3,5%	15	0,5%	6.....24	0,5%
13	3%	21	0,5%		
17	2%				
19	1,5%				
23	1,5%				
25	1,5%				

Tabell 2.2. Riktlinjer för spänningens övertonshalt.

Figur 2.3 visar strömmen $i(t)$ med amplituden 57 A och frekvensen 50 Hz. Det är en AC ström som är växelriktad och är genererad av en solcellsanläggning. Sinuskurvan är inte jämn eftersom den innehåller övertoner som uppstår på grund av DC/AC-omvandlingen.

Figur 2.3 beskrivning: Y-axel = Ström angivet i ampere. X-axel = Tid i sekunder.



Figur 2.3. AC-konverterad ström.

2.5 Osymmetri

Det är möjligt att ansluta produktionsanläggningar enfasigt och trefasigt i nätet. Ansluts produktionsanläggningar enfasigt och ej godtyckligt fördelat på de tre faserna så kan osymmetri nätet uppstå eftersom de osymmetriska fasströmmarna ger upphov till osymmetriska fasspänningar.

Osymmetri bestäms av förhållandet mellan plusföljespänning och minusföljespänning[3].

$$U_{+}/U_{-} \quad (2.3)$$

Vid symmetri är det endast plusföljespänningen som har ett värde, nollföljespänningen och minusföljespänningen är då 0. I ett osymmetriskt fall, när fasspänningarnas effektivvärde eller fasvinkel avviker från varandra så får nollföljespänningen och minusföljespänningen ett värde.

Osymmetrisk last kan leda till försluter och ökad uppvärmning av ledningar.

2.6 Kabeldimensionering

Kablarna i nätet måste klara av producenternas genererade strömmar.

Nedanstående tabell beskriver största tillåtna märkström för säkring som kortslutningsskydd för PEX-isolerad flerledarkabel[5].

Ledararea (mm ²)	Max säkring (A), enkel	Max säkring (A), parallell
10 Cu	125	-
16 Cu	160	250
50 Al	315	500
95 Al	500	800
150 Al	800	1000
240 Al	1000	1250

Tabell 2.3. Största tillåtna ström för säkring som kortslutningsskydd.

Största tillåtna märkström för säkring som utger överlastskydd visas i tabell 2.4[5].

Minsta strömvärde för ledaren(A)	Säkringens märkström(A)
110	110
138	125
177	160
221	200
276	250
348	315
441	400
552	500
695	630
883	800
1103	1000
1379	1250

Tabell 2.4. Största tillåtna ström för säkring som utger överlastskydd.

Strömvärdet påverkas av en rad faktorer som förläggingsdjup, marktemperatur, värmesistivitet och vid parallellkoppling, avståndet mellan kablarna. En korrektionsfaktor beräknas. Normalt säkras kabeln med en 50 % mindre säkring än maximalt tillåten.

2.6.1 Parallellkopplade kablar

För att uppnå lägre impedanser i distributionskablar är det möjligt att parallellkoppla dessa för att bygga ett starkare nät. Den nya impedansen Z vid parallellkoppling beräknas enligt 2.4 där N är antalet parallella impedanser(kablar).

$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_n} \quad (2.4)$$

Parallellkopplingar utförs oftast i distributionskablar i början av radialerna. Det är gynnsamt vid anslutnings av mikroproduktionsanläggningar eftersom dessa distributionskablar får högst ström från lasterna. Distributionskabeln från transformatorskenan får ström från samtliga laster i radialen.

Vid parallellkoppling uppstår strömdelning. Strömdelning beror på resistansen, är två kablar parallellkopplade går en större ström genom kabeln med lägre motstånd.

En ström I som går genom två kablar delas upp enligt (3.5) och (3.6)

$$I_1 = I \times \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (2.5)$$

$$I_2 = I \times \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (2.6)$$

2.7 Analys

Arbetets omfång innefattade ursprungligen undersökning av genererade strömmar och överspänning för att se hur dessa påverkar nätet. Övertonsanalys kom att utgöra ett extraarbete.

Det är tidsplanen som har begränsat vad som undersöks i arbetet samt vilka verktyg som fanns tillgängliga. Utöver beskrivna faktorer ovan presenteras en kort motivering till varför osymmetri och flimmer inte undersöks i rapporten.

Flimmer

Enligt ALP-handboken[2] förekommer flimmer typiskt i vindkraftsanläggningar. Det är ändå rekommenderat att iaktta nivåer oavsett produktionsslag men ses inte som ett typiskt problem som innefattar solceller i näten.

Osymmetri

Osymmetri i nätet kan uppstå vid enfasanslutna produktionsanläggningar.

Endast 8 solcellsanläggningar av totalt 393 stycken är enfasanslutna i Öresundskrafts nät. Enfasanslutna solcellsanläggningar förekommer säkerligen i andra elbolags nät men eftersom arbetets uppdragsgivare ansluter 3-fasigt så utgår rapporten från det och undersöker inte osymmetri.

3. Överspänning och genererade strömmar i nätet

I kapitlet beräknas mikroproducenternas påverkan på spänningen i respektive lågspänningsnät samt implikationen av de strömmar som genereras av solcellsanläggningarna. Beräkningarna utförs med 100 % produktion och 100 % överskott för att ta reda på de teoretiska extremfall som kan uppstå. Antalet producenter i lågspänningsnäten varierar.

Två olika lågspänningsnät beräknas, Bårslöv och Flohem.

3.1 Metod

Arbetsmetodiken fördelas enligt följande:

- Transformatordata och kabeldata erhålls från Öresundskraft
- Data analyseras och förs in i Excel
- Ritning av områdena konstrueras
- Lämpliga beräkningar och formler analyseras
- Spänningar hos kund och i kabelskåp beräknas med varierande effekt
- Genererade strömmar i nätet analyseras.
- Områdena kontrollräknas med simuleringsverktyget LTSpice.

I beräkningarna försummas reaktansen. En dynamisk simulering är därmed inte aktuell och beräkningarna genomförs istället med hjälp av handräkning och en enkel kontrollsimulering i LTSpice.

3.1.1 Nätdata

Tillgänglig data är transformatordata, ledningsklass, kabellängd och knutpunkter.

För långsamma spänningsvariationer används följande data:

Kablarnas längd och impedans per meter.

Transformatorns spänning på nedsidan (400V) och dess inre impedans.

Nätets konstruktion i form av knutpunkter

3.1.2 Ritningar

För att förenkla beräkningar och simulering genomförs ritningar av de båda områdena, se Figur 3.1 och Figur 3.2. Figurerna är ritade i Draw.io.

Knutpunkter namnges samt varje kabels resistans beräknas för att ge en överskådlig bild.

3.1.3 Formler och beräkningar

Solcellsanläggningar genererar aktivt effekt. För att beräkna strömmen som genereras i en fas vid 3-fas ansluten produktionsanläggning i lågspänningsnätet används formel 3.1.

$$I_{skv} = \frac{p}{U_h \times \sqrt{3}} \quad (3.1)$$

Den genererade strömmen ger sedan upphov till spänningsändringar. Effektkällorna i form av solcellerna ses som matande strömmar in i nätet och de ger upphov till spänningsökningar hos kunder och i kabelskåp.

$$\Delta U_f = I_f \times Z_f \quad (3.2)$$

I det här kapitlet försummas kablarnas reaktans enligt 3.3–3.6. för enklare beräkningar eftersom absolutbeloppet av impedansen är närmast identiskt resistansen i nästan alla kablar i näten förutom i de grövsta kablarna (240mm²). $\cos \varphi = 1$ och det räknas endast med resistans och aktiv effekt.

$$Z = R + jX \quad (3.3)$$

$$|Z| = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{R^2 + 0} = R \quad (3.4)$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{P^2 + 0} = P \quad (3.5)$$

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \text{ då } S = P \rightarrow \cos \varphi = 1 \quad (3.6)$$

Transformatorns märkström per fas (3.7).

$$I_{fas} = \frac{S}{\sqrt{3} \times U_h}$$

Spänningsökning:

Spänningsändringar beräknas genom att först godtyckligt fördela lasterna i nätet, lika stor andel i varje radial, 25, 50, 75 och 100 %. De genererade strömmarna i varje radial höjer spänningen vid transformatorn så när varje radial beräknas för sig används transformatorns ökade spänning. Beräkningarna sker på en fas. Alla strömmar från fastigheterna summeras i varje knutpunkt samt ström från fastigheter i andra knutpunkter som hänger på beräknad knutpunkt. Alla strömmar beräknas i hela nätet. Slutgiltigt beräknas kabelresistansen i knutpunkt och hos kritisk kund från transformatorn för att beräkna spänningsökningen. Kritisk kund är den fastighet som har högst kabelimpedans till kabelskåpet fastigheten är ansluten till.

Strömmar:

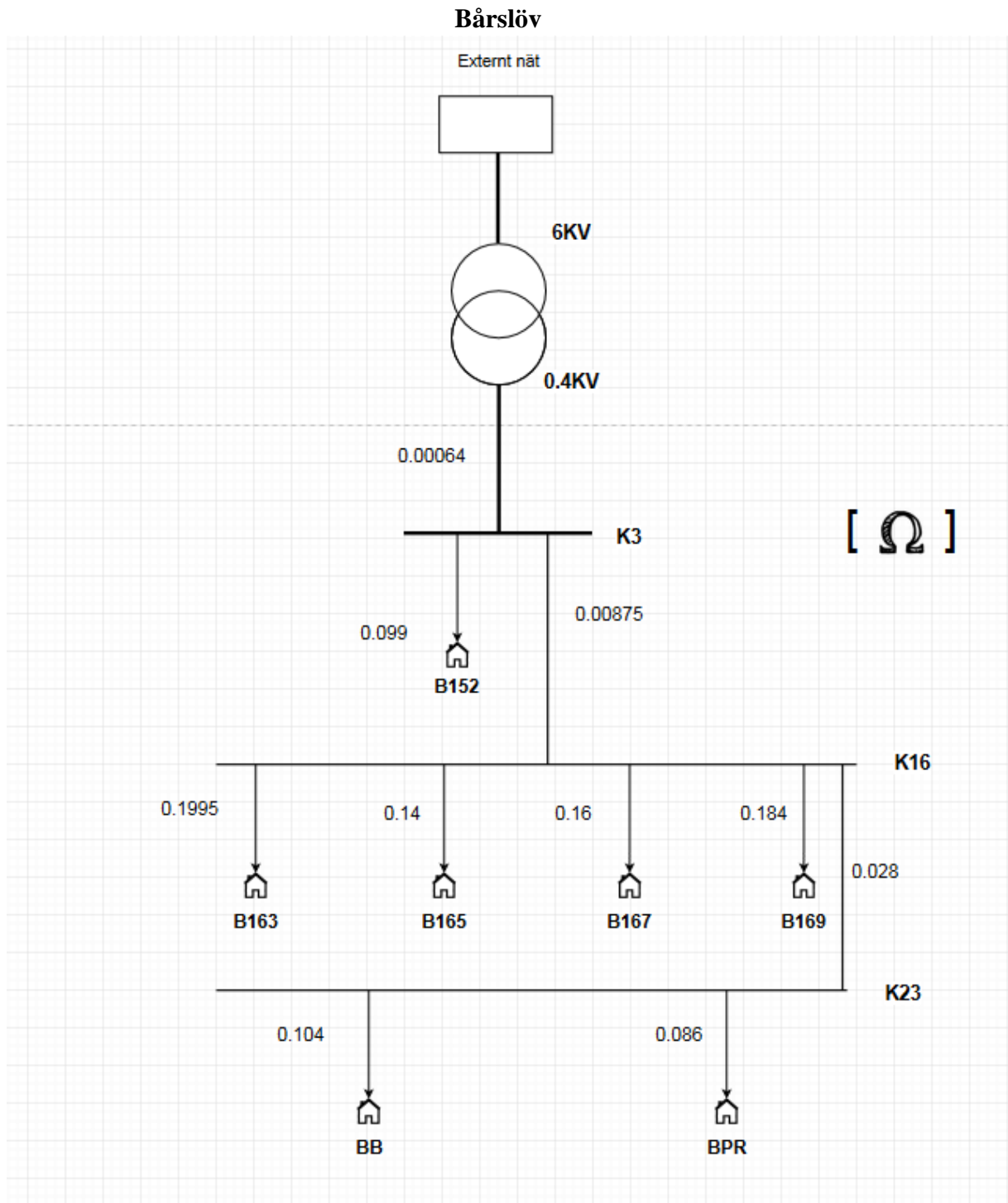
Strömmar från alla de laster som är anslutna till beräknad nod summeras.

Exempelvis får transformatorskenan ström från alla laster i hela nätet. K115 får utöver lasterna tillhörande dess kabelskåp även ström från lasterna tillhörande kabelskåp som är anslutna till K115. Se Figur 3.2.

3.2 Utförande

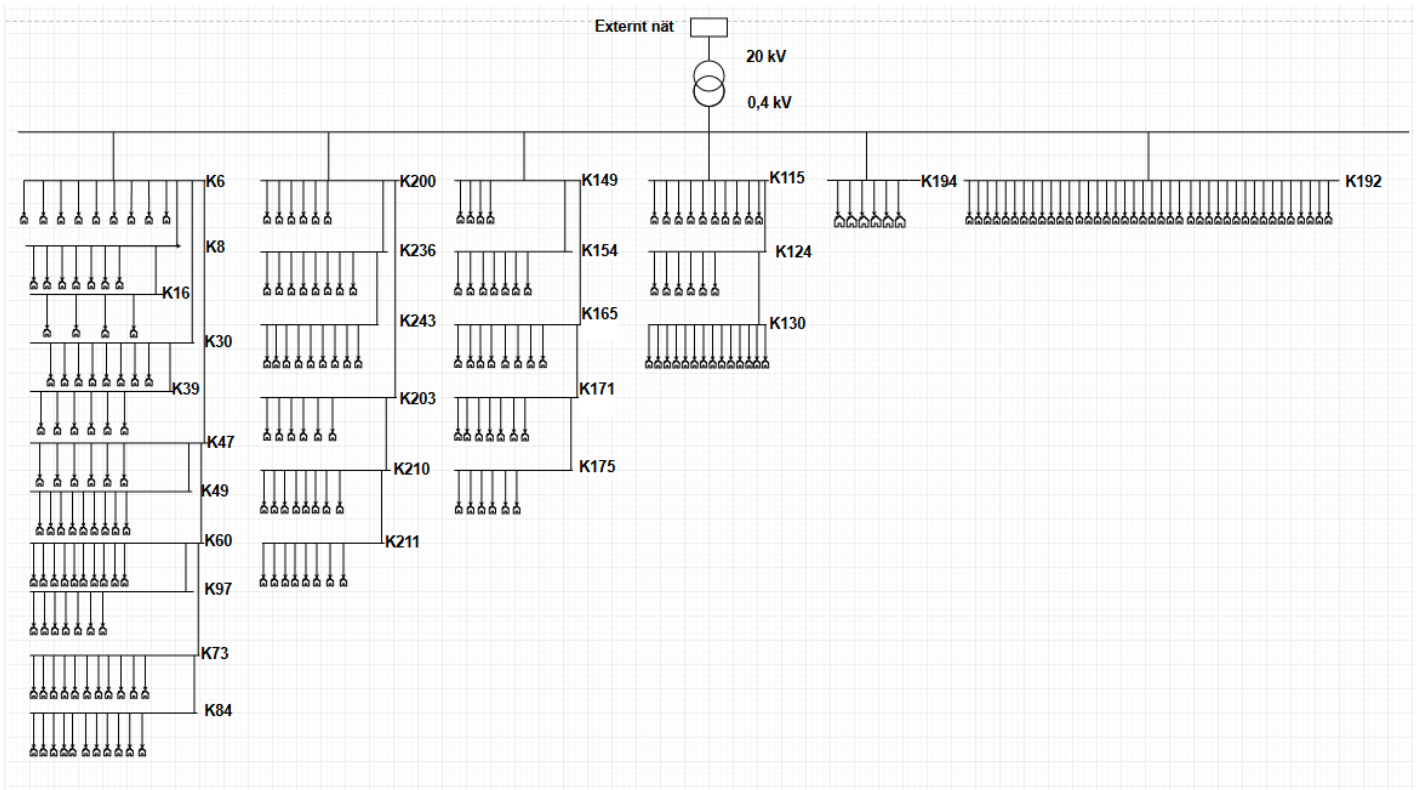
3.2.1 Ritningar

De två områdena Bårslöv och Flohem illustreras i nedanstående figurer[B]:



Figur 3.1. Ritning över Bårslövs lågspänningsnät.

Mikroproduktion i lågspänningsnätet Flohem



Figur 3.2. Ritning över Flohems lågspänningsnät.

3.2.2 Val av effekt

Med hjälp av Vattenfalls solcellsguide beräknades storlek på möjliga solcellsanläggningar i Flohem och Bårslöv[4]. Ett realistiskt snitt på maximal effekt i villaområdet Flohem är 10 kW per fastighet. 3 fastigheter i Bårslöv har möjlighet till installation av en större solcellsanläggning. Där bestäms effekten för de 3 fastigheterna till 37,5 kW. Lägenhetshus och större fastigheter i Flohem beräknas med solcellsguiden.

Simulerade solcellsanläggningar i Bårslöv och Flohem:

Flohem:

I de lägenhetshus och större fastigheter som i knutpunkt 194 bestäms effekten med hjälp av solcellsguiden. I övrigt gäller:

Samtliga fastigheter: 10 kW solcellsanläggning

Bårslöv:

B163, B165, B167, B169: 10 kW

B152, BB, BPR: 37.5 kW

3.2.3 Beräkning

I beräkningsfallet beror lasternas genererade strömmar av 3 faktorer.

Produktionen, överskottseffekten och antalet mikroproducenter.

I beräkningar och simulering antas 100 % produktion och 100 % överskottseffekt.

Antalet mikroproducenter i nätet varieras stegvis i intervallet 25, 50, 75, 100 %.

Efter genomförd beräkning förs resultaten in i tabeller. Först beräknas kritiska spänningar i nätet, de högsta uppmätta spänningarna är de intressanta hos kund och i kabelskåp. Efter det beräknas de högsta strömmarna i nätet och strömmen in i transformatorn i de olika fallen.

3.2.4 Analys, tillvägagångssätt

För att analysera hur spänningarna förhåller sig används de intervall som är beskrivna i 3.2.2.

Strömmar i kablar analyseras via kabeldata för att se att högsta tillåtna ström kabeln är avsedd för inte överskrider enligt 3.8.

Ström i transformator analyseras med dess märkström per fas.

3.3 Resultat

Alla strömmar och spänningar är beräknade på en fas. Alla produktionsanläggningar är 3-fasigt anslutna och alla faser antas teoretisk ha samma värden. Alla värden på strömmar och spänningar är toppvärden.

3.3.1 Överspänning

Tabell 3.1 och 3.2:

Belast: = Andelen fastigheter i nätet med 10 kW solcellsanläggning.

Prod: Totala antalet fastigheters snitteffekt

Kritisk K: = Kabelskåpets kritiska kund, fastigheten med högst impedans till transformator

Grön markering: Överspänning mindre än 5 % i kabelskåp och mindre än 6 % i fastighet.

Gul markering: 5–10% överspänning i kabelskåp, 6–10% överspänning i fastighet.

Röd markering: Överspänning > 10 % i kabelskåp och fastighet.

Bårslöv

Prod.	10kW	7.5kW	5kW	2.5kW
Belast.	100 %	75 %	50 %	25 %
Nod(V)				
Trafo.	232,9	232,4	231,9	231,4
K3	233,0	232,5	232,0	231,4
K16	234,1	233,3	232,6	231,7
K23	236,0	234,7	233,6	232,2
Kund(V)				
B152	238,3	236,5	234,7	232,7
B163	236,9	235,4	234,0	232,4
B165	236,1	234,8	233,6	232,2
B167	236,4	235,0	233,7	232,3
B169	236,7	235,3	233,9	232,4
BB	241,5	238,8	236,4	233,6
BPR	237,2	235,6	234,2	232,5

Tabell 3.1. Fasspänning i Bårslövs lågspänningsnät.

Mikroproduktion i lågspänningsnätet

Flohem

Prod.	10kW	7.5kW	5kW	2.5kW	10kW	7.5kW	5kW	2.5kW
Belast.	100 %	75 %	50 %	25 %	100 %	75 %	50 %	25 %
					Kritisk K.	Kritisk K.	Kritisk K.	Kritisk K.
Nod(V)								
Trafo.	234,3	233,5	232,6	231,8				
Knut 6	249,4	244,8	240,2	235,6	251,5	246,4	241,3	236,2
Knut 8	255,3	249,5	243,4	237,3	256,5	250,5	244,1	237,6
Knut16	258,5	252,0	245,0	238,2	259,4	250,2	245,5	238,5
Knut30	257,3	250,9	244,3	236,9	258,8	252,0	245,1	237,3
Knut39	261,1	253,7	246,4	238,0	262,4	254,7	247,1	238,4
Knut194	238,9	236,9	234,9	233,0	240,3	237,9	235,6	233,4
Knut47	251,6	246,5	241,3	236,2	253,5	247,9	242,3	236,7
Knut49	255,4	249,3	243,2	237,2	257,3	250,7	244,2	237,7
Knut60	258,4	251,7	244,9	238,0	261,2	253,9	246,4	230,8
Knut97	260,3	253,1	245,8	238,5	261,6	254,1	246,5	238,8
Knut73	261,3	253,9	246,4	238,7	263,3	255,4	247,4	239,2
Knut84	263,6	255,7	247,6	239,4	265,2	255,1	248,4	239,8
Knut192	250,5	245,6	240,8	235,9				
Knut149	248,2	243,9	239,6	235,4	250,2	245,5	240,7	235,9
Knut154	254,8	249,0	243,0	237,1	256,7	250,4	244,0	237,6
Knut165	249,9	245,3	240,2	235,8	251,9	246,8	241,2	236,3
Knut171	255,8	249,8	243,5	237,4	257,1	250,8	244,2	237,8
Knut175	259,7	252,8	245,6	238,4	261,0	253,8	246,3	238,7
Knut115	255,1	249,2	243,1	237,1	256,8	250,5	244,0	237,6
Knut124	259,3	252,4	245,3	238,3	261,3	253,9	246,4	238,8
Knut130	265,2	257,0	248,4	239,9	266,7	258,2	249,2	240,3
Knut200	249,3	244,7	240,2	235,6	251,9	246,7	241,5	236,3
Knut203	252,4	247,1	241,7	236,4	254,0	248,3	242,5	236,8
Knut210	254,8	248,9	243,0	237,1	256,4	250,1	243,8	237,5
Knut211	255,8	249,7	243,5	237,3	257,8	251,3	244,6	237,8
Knut236	252,5	247,2	241,8	236,4	254,7	248,9	242,9	237,0
Knut243	254,1	248,4	242,7	236,9	256,6	250,3	244,0	237,6

Tabell 3.2. Fasspänning i Flohems lågspänningsnät.

3.3.2 Strömmar i kablar och transformator

Röd markering på kablar innebär att största möjliga säkring för överlastskydd är överskriden, och röd markering på transformator innebär att strömmen in i transformatorn överskrider dess märkström. Samtliga beräkningar är på en fas.

Bårslöv

Prod.	10kW	7.5kW	5kW	2.5kW
Belast.	100 %	75 %	50 %	25 %
Nod(A)				
Trafo.	180,4	135,3	90,2	45,1
K3	178,9	134,5	89,8	45,0
K16	125,2	94,1	62,9	31,5
K23	67,6	50,9	34,0	17,1
Kund(A)				
B152	53,6	40,3	26,9	13,5
B163	14,2	10,7	7,2	3,6
B165	14,2	10,7	7,2	3,6
B167	14,2	10,7	7,2	3,6
B169	14,2	10,7	7,2	3,6
BB	52,9	39,9	26,8	13,5
BPR	14,1	10,7	7,1	3,6

Tabell 3.3. Strömmar i Bårslövs lågspänningsnät.

Mikroproduktion i lågspänningsnätet

Flohem

Prod.	10kW	7.5kW	5kW	2.5kW
Belast.	100 %	75 %	50 %	25 %
Nod(A)				
Trafo.	3738	2804	1869	935
Knut 6	1310,0	985,8	661,1	330,8
Knut 8	147,0	114,9	77,6	39,3
Knut16	65,2	50,8	35,0	17,8
Knut30	187,1	143,0	97,1	49,7
Knut39	77,7	59,8	40,9	21,1
Knut194	284,5	214,1	143,3	71,9
Knut47	721,7	551,4	374,6	236,1
Knut49	119,2	91,3	62,2	31,8
Knut60	516,7	395,6	269,3	137,6
Knut97	90,3	69,5	47,6	24,5
Knut73	283,8	218,5	149,8	76,8
Knut84	140,3	108,3	74,4	38,4
Knut192	569,7	428,6	286,7	143,8
Knut149	455,7	342,9	229,4	115,1
Knut154	94,0	71,8	48,7	24,8
Knut165	282,0	215,2	90,1	74,4
Knut171	173,4	132,5	90,1	46,0
Knut175	78,2	60,0	40,9	21,1
Knut115	483,7	364,0	243,6	122,2
Knut124	261,3	200,6	137,1	70,3
Knut130	180,0	138,7	95,1	49,0
Knut200	640,9	482,2	322,6	161,8
Knut203	294,2	224,7	152,7	77,8
Knut210	211,3	161,9	110,3	56,4
Knut211	104,5	80,4	54,8	28,1
Knut236	227,3	173,7	118,0	60,1
Knut243	118,8	91,0	62,1	31,7

Tabell 3.4. Strömmar i Flohems lågspänningsnät.

4. Övertoner

I det här kapitlet simuleras effekten av övertoner i Bårslövs lågspänningsnät. Simuleringen avgränsas till växelriktarnas genererade strömövertoner. Enligt Kapitel 5.1 kan transformatorn ha övertonskarakterisk i lågspänningsnätet. Data på de av transformatorn genererade övertonerna är ej tillgängligt. I tidsplanen valdes det mindre området, Bårslöv som simuleringsobjekt. Eftersom inga problem uppstod i Bårslöv med full effekt beslutades det att undersöka en radial i Flohem.

Spänningens övertonshalt ökar med antalet solcellsanläggningar och nätimpedansen. Radialen i Flohem med startknut K6 har 92 potentiella producenter och en högre nätimpedans till transformatorn längst ut i nätet än vad Bårslöv har. Därmed utsågs den radialen till simuleringsobjekt för att se om övertoner kan utgöra ett potentiellt problem i lågspänningsnätet. Simuleringens mål är att identifiera störningar i spänning i knutpunkterna och i fastigheter.

Föreskrifter gällande elkvalité rekommenderar att THD(u)% inte överstiger 8 % [2].

4.1 Metod

Arbetsmetodik:

- Identifiera lämpliga simuleringsverktyg
- Studera nödvändiga parametrar för en fullgod simulering
- Kontakta tillverkare av växelriktare för full övertonstabell över lämplig växelriktare
- Modellera Bårslövs lågspänningsnät i programmet
- Analysera resultat

4.1.1 Val av simuleringsverktyg

2 tillgängliga simuleringsverktyg erhöles. Matlab/Simulink och NEPLAN. Efter analys valdes NEPLAN som lämpligt simuleringsverktyg. NEPLAN är användarvänligt och välanpassat för att modellera distributionsnät och valdes på grund av de villkoren. Samtliga tillgängliga parametrar var möjliga att inkludera i simuleringen.

4.1.2 Parametrar

Följande parametrar erhöles och används i simuleringen:

Matande mellanspänningsnät[A]:

φ = fasvinkel.

Kortslutningseffekt (Sk3): **Bårslöv:** 99,9 MVA, **Flohem:** 207,65 MVA

Kortslutningsström (Ik3): **Bårslöv** 9,46kA [-86,30 φ], **Flohem:** 5,55kA [-86,80 φ]

Ik3MAX: **Bårslöv:** 25kA [-82.97 φ], **Flohem:** 25kA [-83.22 φ]

Ik3MIN: **Bårslöv** 9,4kA [-81.51 φ], **Flohem:** 9,54kA [-81.60 φ]

Transformatordata:

Märkeffekt: **Bårslöv:** 50kVA, **Flohem:** 800kVA

Märkspänning uppsida: **Bårslöv:** 6kV, **Flohem:** 20kV

Märkspänning nedsida: **Bårslöv/Flohem:** 0,4 kV

Kortslutningsresistans: **Bårslöv:** 1,774 % **Flohem:** 0,816 %

Anslutningsimpedans: **Bårslöv:** 3.45 % **Flohem:** 4,54 %

Kopplingsgrupp: **Bårslöv/Flohem:** DYN11

Nollföljeimpedans: Icke tillgänglig

Tomgångsförluster: **Bårslöv:** 228 W **Flohem:** 807 W

Kabeldata:

Impedans (ohm/km).

Nollföljeimpedans: Icke tillgänglig

Kabelskåp

Nominell spänning: 400 V i lågspänningsnätet.

Neplan räknar ut verklig spänning.

4.1.3 Val av växelriktare

Växelriktare 1:

Data på en modern 3-fasig växelriktare eftersöktes och flertalet tillverkare kontaktades. Från en tillverkare erhöles en full tabell över en av deras växelriktares typiskt genererade strömövertoner upp till 50:e heltalsmultipeln. Totala störningar är $THD(i)\% < 3$.

Växelriktaren var något överdimensionerad för de 10 kW anläggningar som används i simuleringen, en underdimensionering på 10-20 % är att föredra.

Växelriktare 2:

Ytterligare data med övertoner upp till 40:e heltalsmultipeln erhöles från en mer lämpligt dimensionerad växelriktare (8 kW). Växelriktaren är tillgänglig i Sverige, ansluts på 3 faser och har mindre störningar än ovanstående växelriktare. $THD(i)\% = 1,62$.

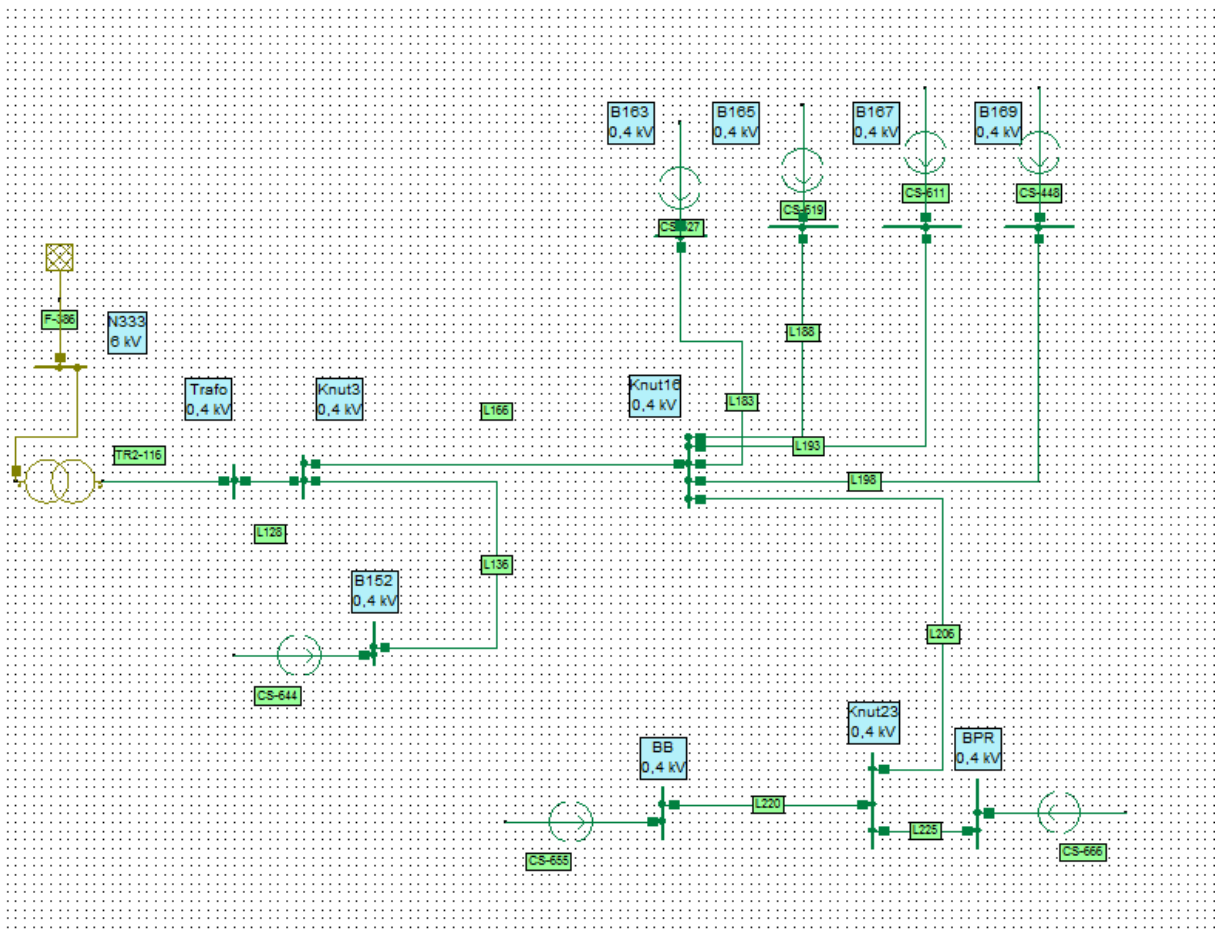
Växelriktare 2 är därmed den växelriktare som resultaten kommer att baseras på. Växelriktare 2 agerar jämförelseobjekt i Bårslövssimuleringen för att undersöka växelriktarnas påverkan på störningarna.

4.2 Utförande

4.2.1 Modellering av Bårslöv

Bårslövs nät modelleras i Neplan med all tillgänglig data. Tillgänglig data var tillräcklig för att genomföra simulering. Neplan räknar själv ut parametrar baserat på inmatad transformatordata och det matande nätets data.

Figur 4.1 är Bårslövs spänningsnät modellerat i NEPLAN. Modellen är baserad på figur 3.1.



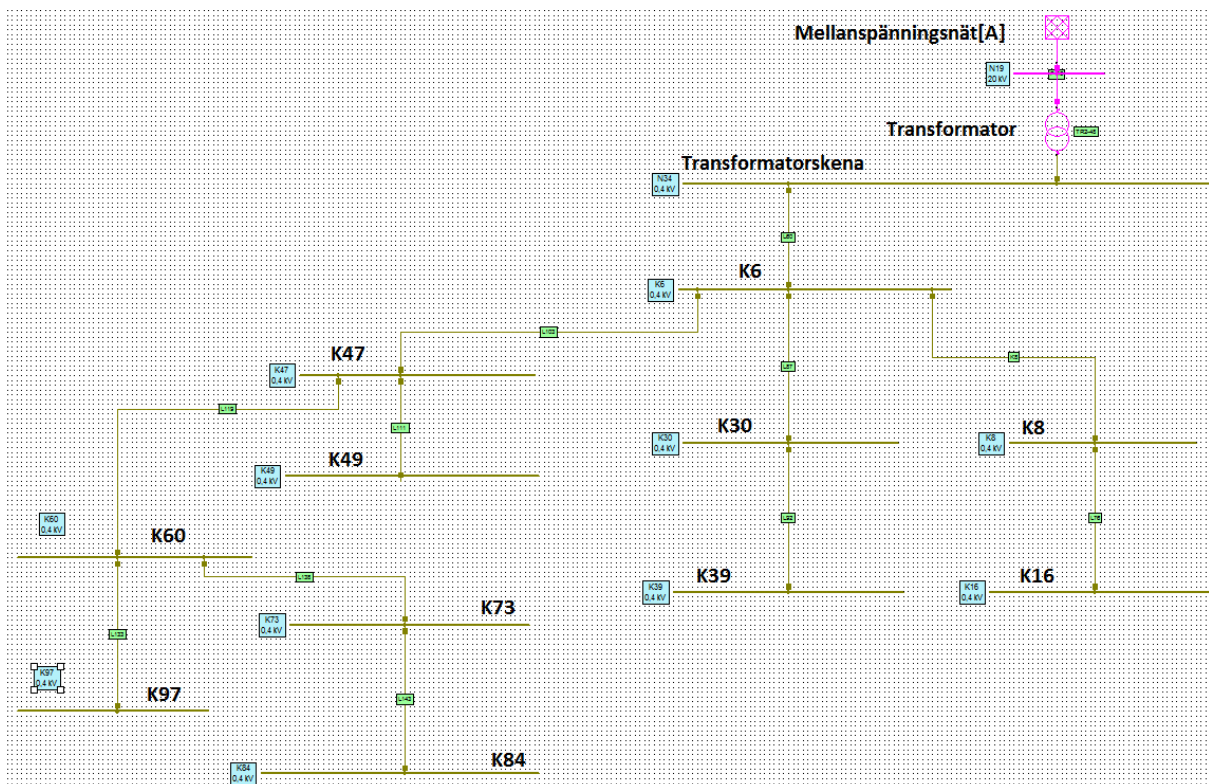
Figur 4.1. Bårslöv modellerat i Neplan.

4.2.2 Modellering av Flohem

Radial R1 (Startknut K6, slutknut K84) i Flohems lågspänningsnät modelleras.

Radialen utsågs till simuleringsobjekt eftersom den har flest fastigheter och därmed potential till högsta antal producenter i nätet samt de kunder längst ut i nätet har den högsta reaktansen i kabellängd till transformator. Antalet laster kombinerat med högst reaktans i nätet gör Radial R1 Flohem ett ansevärt objekt för att studera växelriktarnas påverkan på spänningen. Test genomförs med att 75 % av fastigheterna, godtyckligt fördelat enligt fastigheter per knutpunkt producerar med 10 kW.

Figur 4.2 är radialen med startknut K6 i Flohem modellerad i NEPLAN. Modellen är baserad på figur 3.2.



Figur 4.2. Flohem modellerat i Neplan.

4.2.3 Modellering av växelriktare

Växelriktarna modelleras som AC laster med störningar från dess växelriktare.

Slutprodukten av överskottsenergin från solcellsanläggningarna är en AC ström som matas in i nätet. Strömmen har störningar som beror på växelriktarens genererade övertoner.

Data från lämpligt dimensionerad erhållen växelriktare inkluderar upp till heltalsmultipel 40 (2000 Hz). I rapporten presenteras följande tabell upp till 21:a heltalsmultipeln.

Växelriktare 2:

Frekvens (Hz)	Heltalsmultipel	I(A)	I(%)
50	1	11,887	-
100	2	0,039	1,08
150	3	0,084	2,30
200	4	0,022	0,43
250	5	0,104	1,14
300	6	0,013	0,30
350	7	0,054	0,77
400	8	0,011	0,23
450	9	0,069	0,40
500	10	0,008	0,18
550	11	0,043	0,33
600	12	0,007	0,15
650	13	0,057	0,21
700	14	0,006	0,13
750	15	0,036	0,15
800	16	0,005	0,12
850	17	0,042	0,13
900	18	0,005	0,10
950	19	0,019	0,12
1000	20	0,005	0,09
1050	21	0,021	0,11

Tabell 4.1. Övertontabell för en 8 kW 3-fasig växelriktare.

AC lasterna i nätet representeras som källa för strömövertoner och data från tabell 4.1 matas in i nätets alla matande strömkällor. Strömmens toppvärde är beräknat vid maximal produktion och maximal överskottsenergi. Strömmen genereras från 10 kW solcellsanläggningar i hela nätet i det här fallet. Lågspänningsnätet är nu modellerat med maximal genererad överskottsström med strömstörningar från erhållen växelriktare. Modellen är nu redo för simulering.

4.3 Resultat

Se närtitning (Figur 3.1) för nodernas placering i nätet.

Bårslöv växelriktare 1.

Produktion: 100 % av fastigheterna, 10 kW.

Nod	THD(u)%
Transformator nedsida	5,02
K3	5,04
K16	5,38
K23	5,76
B152	5,39
B163	6,17
B165	5,94
B167	6,00
B169	6,10
BB	6,17
BPR	6,13

Tabell 4.2. Bårslövs THD(u). Modellerat med växelriktare 1 som har THD(i) <3%.

Den totala distorsionen är högre ju längre ut i nätet noden befinner sig. Kabelimpedansen är högst i noden BB och det är också där distorsionen är som högst. Ett samband mellan nätimpedans och THD(u) manifesterar sig.

Den totala harmoniska distorsionen håller sig inom de dimensioneringsriktlinjer som finns, THD(u) % < 8.

Bårslöv växelriktare 2

Produktion: 100 % av fastigheterna, 10 kW.

Nod	THD(u)%
Transformator nedsida	4,15
K3	4,17
K16	4,45
K23	4,76
B152	4,46
B163	5,10
B165	4,91
B167	4,96
B169	5,04
BB	5,06
BPR	5,10

Tabell 4.3. Bårslövs THD(u). Modellerat med växelriktare 2 som har THD(i)=1,62%.

Med växelriktare 2 som har mindre störningar minskar THD(u)% som väntat i noderna och förhåller sig väl inom dimensioneringsriktlinjerna.

Flohem simuleras med växelriktare 2 med målet att undersöka om det kan uppstå problem i nätet med lämpligt dimensionerad växelriktare med en låg övertonshalt.

Flohem

Produktion: 75 % av fastigheterna, 10 kW.

Nod	THD(u)%
K73	8,71
Kritisk kund K73	8,92
K97	8,50
Kritisk kund K97	8,70
K84	9,27
Kritisk kund K84	9,48

Tabell 4.4. Spänningens övertonshalt i Flohem vid användning av växelriktare 2.

När 75 % av nätet producerar så börjar Flohem gå över rekommenderad 8 % gräns längst ut i radialen. Noderna längst ut i nätet med högst reaktans till transformatorn och dess kritiska kunder redovisas.

K84 har lika många laster som K97, ligger längst ut i nätet och har högst impedans till transformatorn.

Med växelriktare 2 är störningarna 1-2 procentenheter högre, det understryker vikten av val av växelriktare.

5. Diskussion och slutsats

5.1 Resultatanalys

Resultaten av de beräkningar och simuleringar i kapitel 4 och 5 analyseras.

5.1.1 Överspänning

Bårslöv får inga problem med överspänningar. Nätet förhåller sig även väl inom ALPs dimensioneringsriktlinjer på maximalt 6 % överspänning.

Samma gäller för Flohem när 25 % av fastigheterna producerar. Det innebär att 65 av de 239 fastigheterna i nätet installerat solcellspaneler.

När 50 % av nätet producerar klarar Flohem fortfarande 10 % gränsen men inte dimensioneringsgränsen på 6 %. Det är 120 fastigheter. Problemen börjar uppstå när 75 % installerar, då börjar spänningen vid fastigheter långt ut i nätet gå över 10 %. Kritiskt antal producerande fastigheter infinner sig då mellan 120-180 stycken.

Vid 100 % produktion ligger nästan samtliga kabelskåp över rekommenderad 5 % gräns, och nästan samtliga fastigheter över maximal 10 % gräns.

Flohem klarar fortfarande av många fastigheter innan det blir problem. Men uppenbarligen löper större lågspänningsnät högre risker att få problem. Trots flera parallellkopplade fördelningskablar och ett starkare nät än Bårslöv blir ändå antalet producenter ett problem.

Sannolikheten att alla dessa fastigheter inte konsumerar sin producerade effekt är inte undersökt. Extremfallet är somrar, semesterdagar, hög produktion och många tomma hus. Arbetet innefattar inte en undersökning på hur mycket överskott som matas ut i nätet. Sammanfattat är det teoretiskt möjligt att det vid hög produktion kan bli problem med överspänningar i stora lågspänningsnät som har en hög andel producenter.

5.1.2 Transformator

Både i Bårslöv och i Flohem kan transformatorns märkström överskridas när 25-50 % av nätet producerar. Matas ett stort överskott ut i nätet så får transformatorn problem med överspänning tidigare än vad kabelskåp och fastigheter får. Ett realistiskt scenario kan vara att samtliga fastigheter i Bårslöv installerar de solcellsanläggningar som specificeras i 3.2.2. Ett icke orimligt scenario kan vara att produktionen är hög och 50 % överskottsenergi matas ut i nätet en sommardag. Då är strömmen per fas in i transformatorn 92 A. Märkströmmen är 72 A. Då krävs en transformator med minst 63,7 kVA märkeffekt jämfört med nuvarande 50 kVA. Byte av transformator till en större i båda näten vid en hög andel producenter är ett möjligt framtidsscenario.

5.1.3 Strömmar i kablar

Bårslövs distribution och anslutningskablar klarar sig alla vid maximal producerad effekt och maximal överskottseffekt.

De kablar som får problem i Flohem är främst distributionskablar från transformatorskenan. Dessa kablar får ström ifrån alla laster i hela radialen. Eftersom Flohem har så många laster blir dessa strömmar mycket höga och trots parallellkopplade distributionskablar från transformatorskenan blir strömmarna ändå för höga. Notera att kablar dessutom säkras 50 % under maximal säkring och att det är maximal säkring som undersöks i tabell 4.4. Säkras man kablar 50 % under maximal överlastsäkring kan ännu fler kablar behöva bytas ut.

Precis som i 5.1.1 så får Flohem problem på grund av många laster i nätet, trots att nätet är starkt byggt med parallellkopplade distributionskablar.

5.1.4 Övertoner

Bårslöv får inga problem någonstans i nätet med spänningsövertoner med korrekt dimensionerad växelriktare med en låg typisk övertonshalt. Notera att simuleringen endast använde sig av växelriktarna som störningselement. Andra komponenter i lågspänningsnätet kan ha en inverkan på spänningsövertoner även om det är en förmodad liten sådan [2].

Bårslöv låg väl under dimensioneringsriktlinjerna även för den överdimensionerade växelriktaren.

Flohem kan få problem vid ett högt antal producenter. Den mesta kritiska radialen undersöktes och den innefattar 92 laster. Simuleringen bestod av 69 laster med den korrekt dimensionerade växelriktaren. Högsta värde var $THD(u) = 9,48 \%$ hos kritisk kund tillhörande kabelskåp längst ut i nätet med högst reaktans till transformatorn. Det är ett värde strax över de 8 % som är rekommenderat. Det är möjligt att få problem med övertoner i stora lågspänningsnät. Det är starkt beroende på antalet producenter, nätimpedans och val av växelriktare.

I simuleringsfallet samverkar strömstörningarna vid alla frekvenser eftersom endast en typ användes i simuleringen med identiska värden. I verkligheten kan övertoner ta ut varandra.

Det är högst sannolikt att problemen inte blir lika stora i verkligheten.

5.1.5 Rangordning av problem

Att rangordna problem efter när de uppstår är användbart när åtgärder ska diskuteras, eftersom man kan lösa flera problem när åtgärder appliceras på ett problem. Problemen rangordnas från 1 till 4, där problem 1 är det som uppstår först.

Bårslöv:

Endast problem med transformatorns märkström.

Flohem:

1. Transformator
2. Strömmar i kablar
3. Överspänning
4. Övertoner

Problem med transformator är egentligen skilt från de övriga, eftersom byte av transformator till en större inte påverkar strömmen i kablarna, överspänningen eller spänningsövertoner. Att byta ut kablar i nätet för att åtgärda överlastade kablar påverkar överspänningen och övertonshalten, men inte transformatorn.

Alltså är det överspänning, övertoner och strömmar i kablar som interagerar med varandra.

5.2 Åtgärder

Sannolikheten att producenterna producerar maximalt och matar ut all genererad effekt i näten är inte undersökt men likväl måste åtgärder diskuteras för att kunna dimensionera näten för att klara av undersökta extremfall om andelen producenter når upp till de nivåer där problem börjar uppstå.

5.2.1 Transformator

Genereras strömmar större än transformatorns märkström per fas så krävs det att transformatorn dimensioneras till en större. Ifall en sådan operation genomförs så betyder det att minst 25 % av fastigheterna i lågspänningsnätet har blivit mikroproducenter, det tyder på en god prognos och transformatorn bör dimensioneras för att även klara av framtida laster.

Dimensionering av transformator påverkar inte de andra problemen som kan uppstå i nätet och vice versa. På grund av flertalet faktorer, exempelvis transformatorns magnetiseringsström så är transformatorstorlek på över 1000 kVA icke att föredra. Istället kan lågspänningsnätet delas upp i 2 nya nät för att minska belastningen på transformatorn.

5.2.2 Kabeldimensionering

Exempel:

I Flohem när 100 % av fastigheterna producerar så får de parallellkopplade distributionskablarna som förbinder transformatorskena och knutpunkt 6 problem. Strömmen genom kablarna är då 1310 A enligt tabell 3.4.

Strömmen genom kablarna blir efter strömdelning 740A och 570A.

Korrektionsfaktorn blir i det här fallet 0.85 på strömmens nominella strömvärde vid förläggning i mark med 3 faser belastade. Det gör att maximal säkring är 315 A.

För att behålla samma kabeltyp, N1XV - 4x240mm² Alu krävs 5 stycken parallellkopplade kablar för att klara den strömmen. Antas jämn strömdelning så är strömmen i varje kabel 262 A. Med 0,5 meters mellanrum erhålls korrektionsfaktor 0.85 och minsta strömvärde är då 354 A och 315 A säkring kan användas och det fungerar eftersom strömmen genom en fas per kabel är 262 A.

Parallellkopplingar och/eller grövre kablar som klarar en högre ström löser problemen med överbelastade kablar. Ett alternativ är att bygga om nätet med fler radialer och kabelskåp så att belastningen på distributionskablarna blir mindre.

5.2.3 Överspänning

Både Bårslöv och Flohem är försedda med 5 stegs omsättningskopplare med 2.5 % stegstorlek. Det innebär att om man vill justera lindningarna för att uppnå en lägre spänning på nedsidan så måste det göras manuellt och kan inte utföras under drift. Produktionen beror på dygnets tidpunkt, konsumtionen och överskottseffekten. Det är inte säkert att solcellsanläggningarna är godtyckligt fördelade mellan radialerna.

Om vi antar att spänningen hos en kund går över 10 % är det möjligt att sänka spänningen på transformatorns nedsida -2.5 % till 390V för att reglera den överspänning som uppstår hos kunden.

Problemet är att enligt ovannämnda faktorer måste det göras manuellt, ur drift och dessutom kommer spänningen att variera med fastigheternas produktion. Därmed är användning av omsättningskopplare inte ett hållbart alternativ till att motverka överspänningar.

Det som behövs är en lindningskopplare som automatiskt justerar spänningen på nedsidan beroende på belastning. Om en hög spänningsnivå uppnås ute i nätet registrerar transformatorn det och sänker spänningen på nedsidan automatiskt.

Lindningskopplare förekommer främst i större transformatorer i större nät. En lindningskopplare är dyr och kräver underhåll. Vid en kraftig ökning av producenter i nätet är det inte realistiskt att förse flertalet lågspänningsnät med en sådan.

Att bygga ett starkare nät i form av lägre kabelimpedans, dela upp nätet i fler lågspänningsnät eller bygga om nätet med fler kabelskåp är bättre alternativ.

Problem med för höga strömmar i kablar uppstår innan problemen med spänningar uppstår.

Det är därför nödvändigt att konstruera ett starkare nät exempelvis i form av fler parallellkopplade distributionskablar. Impedansen blir lägre och överspänningen blir lägre.

5.2.4 Övertoner

Eftersom problemen med övertoner uppstår senare än överlastade kablar så är det sannolikt att problemen med övertoner redan är lösta innan de uppstår. Det är konstaterat att det krävs ett starkare nät i form av grövre kablar och/eller fler parallellkopplingar för att kunna hantera de stora strömmar som lasterna generar. Den minskade impedansen som erhålls vid ett ökat antal parallellkopplingar sänker spänningens övertonshalt.

I Flohem vid 75 % belastning erhöles ett värde på övertonshalten i knutpunkt 84. Dess kritiska kund har en störning på $\text{THD}(u)\% = 9,48$.

Ett test utfördes som inkluderade att konstruera fler parallellkopplingar till knutpunkt 84.

Följande kablar parallellkopplades med en likvärdig kabeltyp med likvärdig längd:

1. Transformator till knut 6, ytterligare en parallellkoppling, totalt 3 kablar.
2. Knut47 till Knut60, en parallellkoppling, totalt 2 kablar.
3. Knut 60 till Knut73, en parallellkoppling totalt 2 kablar.
4. Knut73 till Knut84, en parallellkoppling totalt 2 kablar.

Efter ovanstående åtgärder genomfördes simuleringen igen. $\text{THD}(u)\%$ hos den kritiska kunden i K84 är nu under 8 %, $\text{THD}(u)\% = 6,79$. Jämför Tabell 5.1 med Tabell 4.4.

Nod	$\text{THD}(u)\%$
K84	6,46
Kritisk kund K84	6,79

Tabell 5.1. Spänningens övertonshalt i Flohem med ombyggt nät.

Parallellkopplingar är alltså ett effektivt sätt att minska impedansen och därmed spänningens övertonshalt och eftersom kablarna får problem före med överlast före spänningens övertonshalt överstiger 8 % så är det potentiella problemet med övertoner antagligen redan löst innan det uppstår. Impedans är dock inte den enda faktorn utan ett stort antal laster långt ut i ett nät kan fortfarande ge problem trots låg impedans till transformatorn. Val av växelriktare är också en viktig variabel.

5.2.5 Slutsats

Det är nu konstaterat att lägre impedanser i nätet löser problem med för höga strömmar i kablar, överspänningar och övertoner. Ett test på Flohems nät utförs för att se hur en ökad andel parallellkopplade kablar påverkar överspänningen. I delkapitel 5.2.4 är det redan undersökt för övertoner.

Antal = antalet parallellkopplingar mellan nod och dess föregående nod. Likvärdig kabeltyp och längd. För ritning över Flohem se Figur 3.2.

Nod	Antal	100% 10kW(V)	Kritisk K. (V)	I(A)
Knut 6	5	238,9	241,1	1310
Knut 8	2	242,4	243,7	460,4
Knut16	2	243,4	244,4	206,3
Knut30	2	240,5	242,1	195,3
Knut39	2	240,9	242,3	83,2
Knut194	1	238,9	240,3	284,5
Knut47	3	240,4	242,4	753,5
Knut49	2	242,3	244,3	124,8
Knut60	2	243,9	246,9	540,8
Knut97	2	244,3	245,6	95,7
Knut73	2	245,4	247,5	300,7
Knut84	2	246,1	247,8	149,4
Knut192	2	242,5	-----	569,7
Knut149	2	241,4	243,5	455,7
Knut154	2	242,1	244,1	96,7
Knut165	2	242,3	244,3	290
Knut171	2	243,5	244,9	178,8
Knut175	2	243,9	245,3	82,1
Knut115	2	244,7	246,5	483,7
Knut124	2	246,9	249,0	272,4
Knut130	2	248,8	250,4	189
Knut200	3	239,4	242,1	640,9
Knut203	2	241,0	242,7	306,3
Knut210	2	242,3	244,9	221,3
Knut211	2	242,8	244,9	110,1
Knut236	2	241,1	243,4	236,7
Knut243	2	241,9	244,5	124,9

Tabell 5.2 Spänningen i Flohem vid maximalt antal producenter och ombyggt nät.

Etisk aspekt: Samhällsnytta:

Privatpersoner med solcellsanläggningar bidrar positivt till ett samhälle som strävar efter fossilfri produktion. En fastighet med solceller drar mindre effekt som kan komma från exempelvis ett kolkraftverk och försörjer sig själv delvis beroende på anläggningens storlek. Konsumeras inte den producerade effekten så säljs den istället och då kommer en annan fastighet som möjligtvis inte har solceller att dra den producerade effekten. Den miljövänliga energin som fastigheten producerar kommer därmed alltid till användning.

Avslutande diskussion:

Resultatet visar att ingen spänning i kabelskåp eller fastighet går över 10 % samt att alla kabelförbindelser klarar de genererade strömmarna vid maximalt antal producenter och maximal överskottseffekt. Det krävs att över 25 stycken nya kablar grävs ner och parallellkopplas med befintliga, det medför kostnader men är ingen omöjlig uppgift. Återigen är det ett absolut extremfall att samtliga fastigheter installerar 10 kW solcellsanläggningar, producerar maximal effekt och matar ut allt överskott i nätet.

I ett lågspänningsnät med ett stort antal fastigheter som i Flohem är det möjligt att lösa 3 potentiella problem genom att bygga ett starkare nät. Utöver det krävs det också att Transformator byts ut till en större som klarar en högre märkström per fas.

En aspekt är att fastigheter med solceller realistiskt inte kommer att fördelas jämnt i nätet. En explosion av mikroproducenter kan ske i en radial. Ett återkommande exempel i rapporten är radialen i Flohem med startknut K6. I den radialen finns 92 potentiella laster som kan orsaka en hög ström i distributionskablarna. Ett scenario är att solceller blir populärt just i det området. En fastighetsägare ser att grannarna har solceller och det blir en snöbollseffekt. Det är inte endast andelen producenter i hela lågspänningsnätet som är viktig att iaktta, snarare så är det andelen producenter i ett område/radial när det gäller problemen med överspänningar, övertoner och överström i distributionskablar.

En prognos för hur solceller växer i Sverige och i specifika områden är inte gjord i arbetet, men skulle en sådan prognos ställas så är det av vikt att det undersöks var i nätet mikroproducenter beräknas växa. Ett scenario är att 50 % av fastigheterna i ett lågspänningsnät beräknas vara mikroproducenter vid en viss tidpunkt och att den andelen ökat på grund av att ett villaområde har 80 % producenter. Då uppstår problem tidigare än beräknat vid en ojämn fördelning av producenterna.

Slutsatsen är att kostnaderna för att förstärka nätet är ett potentiellt problem beroende på vem som får stå för finansieringen och att solceller i lågspänningsnätet har en god framtid då det krävs en enorm ökning av producenter för att större problem potentiellt ska uppstå som gör att nätet måste förstärkas och byggas om.

5.3 Vidareutveckling

För att utveckla arbetet och ställa en bättre prognos är det många aspekter som kan läggas till.

Den mest intressanta aspekten är hur mycket överskottseffekt producenter i ett lågspänningsnät matar ut i nätet. Mätningar över en lång period under sommaren för att undersöka hur pass stora strömmarna är i kablarna och jämföra det med hur mycket potentiell effekt producenterna i nätet kan producera. Då kan man få en överblick på hur mycket överskottseffekt som produceras i verkligheten. Mätningar på befintliga nät kan genomföras och sedan simuleras, med kraftigare simuleringsmjukvara. Då känner man till realistisk överskottseffekt och hur rimliga beräkningarna är.

När det här genomförts kan det analyseras om det kommer att krävas några åtgärder i framtiden. Om så är fallet så kan åtgärdernas ekonomiska aspekter utvärderas och sedan jämföras med de ekonomiska fördelar solceller har för producenten på lång sikt.

Det är osannolikt att kostnaderna för de potentiella nödvändiga åtgärder som solceller i lågspänningsnätet orsakar utväger vinsterna för samhället, miljön och producenterna genererade av mikroproduktion.

En ekonomisk utvärdering är ändå intressant, ett scenario kan vara att energibolagen som äger näten kan få ekonomisk statlig stöttning att stärka nätet för att klara av fler mikroproducenter.

Sammanfattat kan arbetet utvecklas med kraftigare simuleringsverktyg, mätningar på befintliga nät, och med säkerhetsställd data kan ekonomiska aspekter utvärderas och en mer säker prognos på när problem uppstår på riktiga kan fastställas.

6. Referenser

[1] <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/photovoltaics>

Senaste accesstid: 2019-08-20.

[2] ALP-handbok 2018. Titel: Anslutning av elproduktion till lågspänningsnätet -ALP.

Utgivare: Energiföretagen.

[3] <https://www.svk.se/siteassets/aktorsportalen/tekniska-riktlinjer/tr06/tr06-01-b.pdf>

Senaste accesstid: 2019-07-22.

[4] <https://solcellsguiden.vattenfall.se/>

Senaste accesstid: 2019-06-05.

[5] Kraftkabelhandboken. Titel: KraftkabelHandbok. Utgivare: NKT Cables AB.

[6] <https://www.vattenfall.se/fokus/hus-hem/var-tredje-svensk-overvager-solceller/>

Senaste accesstid 2019-09-01.

[7] <https://www.svt.se/nyheter/inrikes/arslanga-koer-for-bidrag-till-solceller-pengarna-riskerar-ta-slut>

Senaste accesstid: 2019-09-01.

7. Terminologi

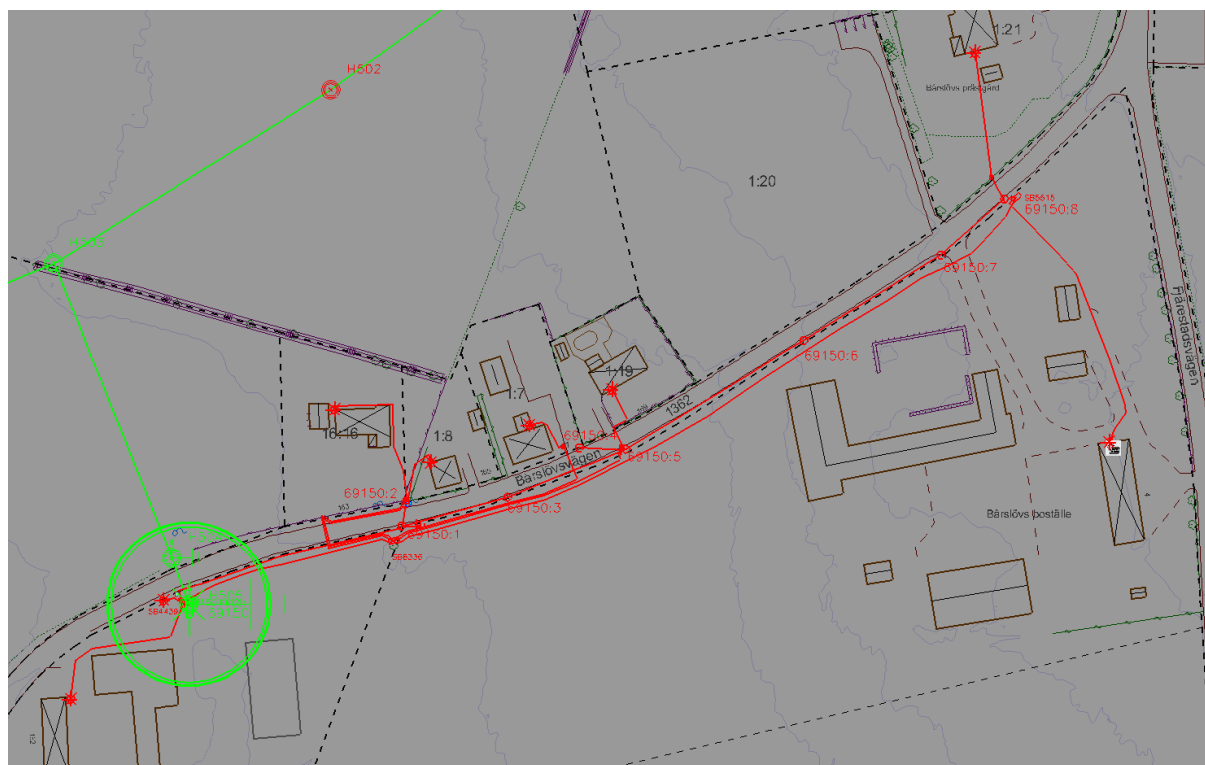
Elkvalité: Låg elkvalité innefattar exempelvis störningar, spänningsvariationer och avbrott i ett nät. Arbetet beskriver problemen i Kapitel 2. Brister i elkvalité kan leda till skador på anläggningar och avbrott. De brister i elkvalitén som beräknas och simuleras i arbetet är långvariga spänningsvariationer, spänningens övertonshalt och komponenternas förmåga att hantera genererade strömmar.

Radial: En radial i ett lågspänningsnät kan ses som ett subnät. Från transformatorskenan går där distributionskablar till kabelskåp. Antalet kablar direkt från transformatorn till kabelskåp är lika med antalet radialer i lågspänningsnätet. Exempelvis så har Flohem 6 kabelskåp kopplade direkt till transformatorskenan och därmed 6 radialer. Se figur 3.2.

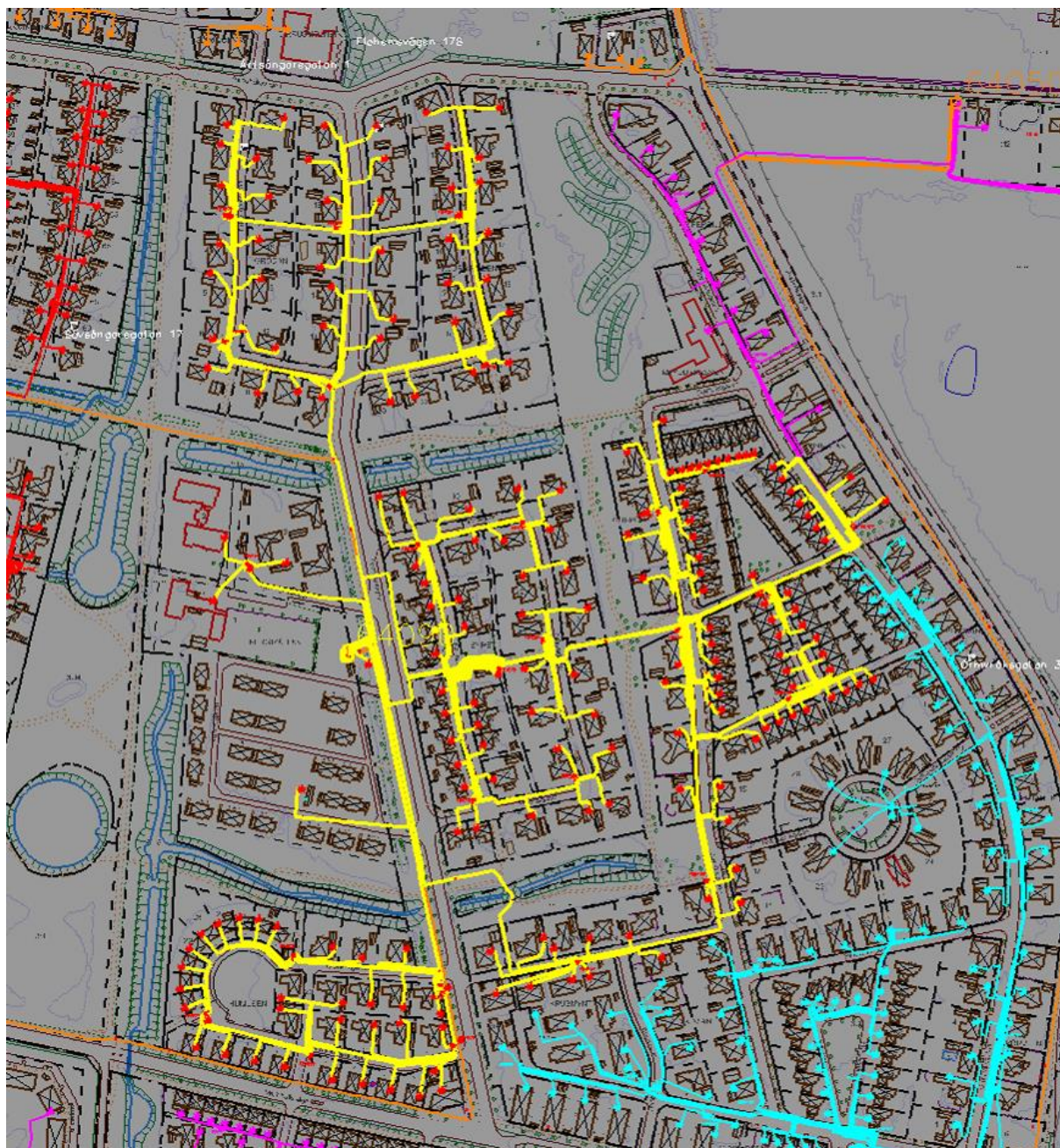
Mikroproducenternas genererade strömmar ökar spänningen vid transformatorn och påverkar varandra endast via den samverkande ökade transformatorspänningen.

B Nätritningar

Bårslöv



Flohem (sida 44-48)



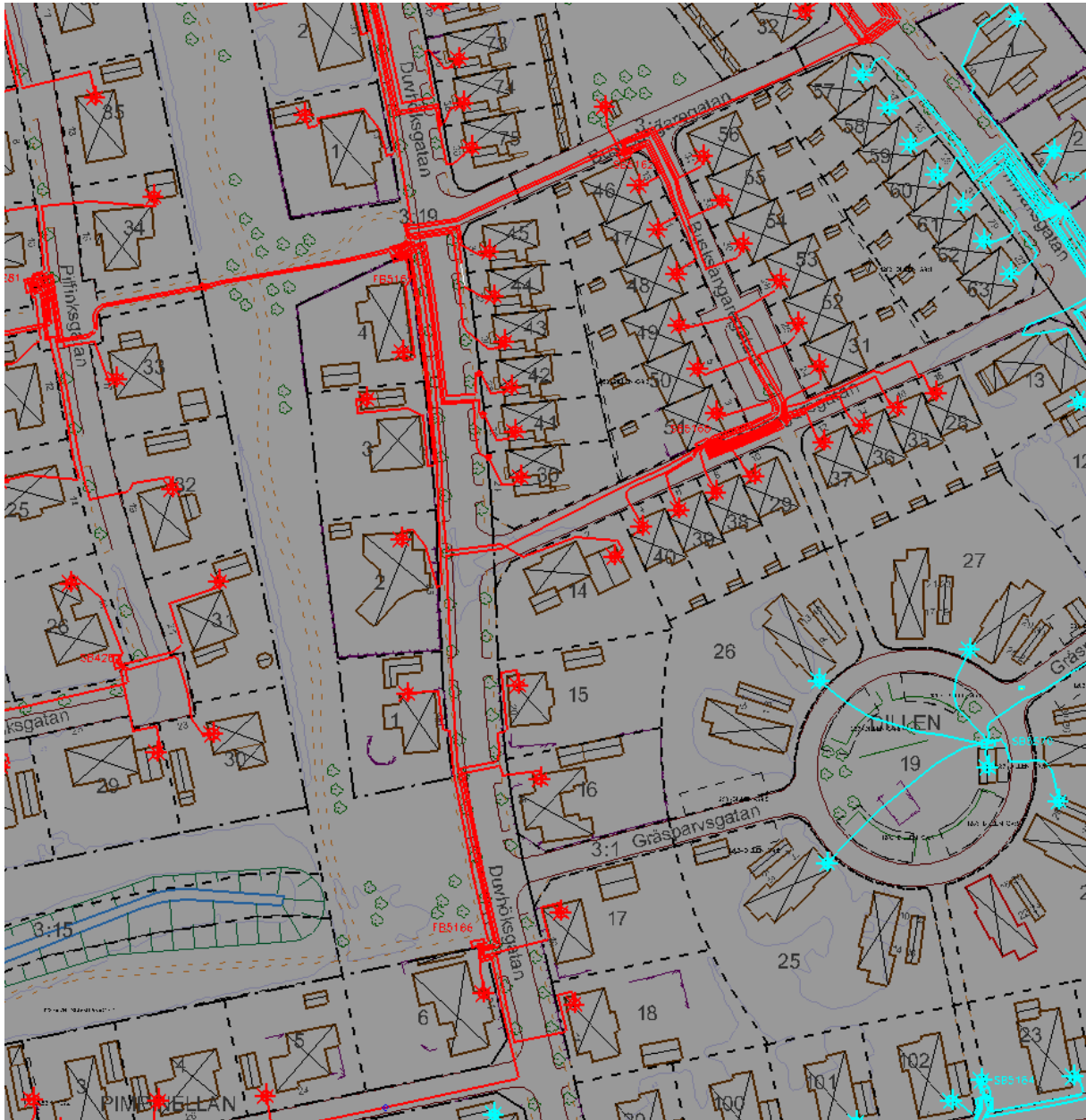
Mikroproduktion i lågspänningsnätet



Mikroproduktion i lågspänningsnätet



Mikroproduktion i lågspänningsnätet



Mikroproduktion i lågspänningsnätet

