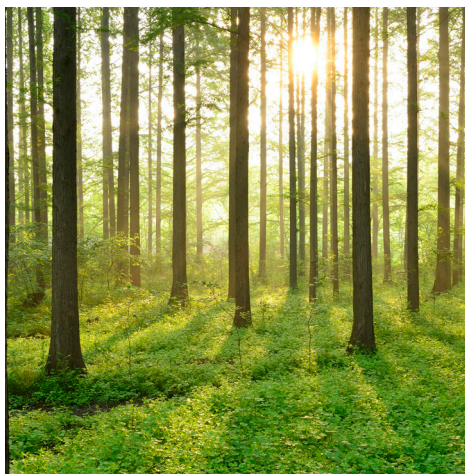


SNABBLADDNING AV ELBUSSAR I DISTRIBUTIONSNÄT

RAPPORT 2017:455



Snabbladdning av elbussar i distributionsnät

Alternativa åtgärder för minskad nätpåverkan

DAVID STEEN

ISBN 978-91-7673-455-1 | © ENERGIFORSK november 2017

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

Förord

Detta är ett postdoktoralt projekt som har bedrivits inom forskningsprogrammet Elektra. Elektras vision är att högskolan i samverkan med industrin ska formulera och lösa forskningsuppgifter som svarar mot industrins problemställningar och som samtidigt leder till utbildning av forskarstuderande samt seniorforskning vid

högskola och universitet. Elektra är ett samverkansprogram och finansieras gemensamt av Energimyndigheten och ett antal näringslivsaktörer.

Projektet bidrar med viktig ny kunskap om hur laddstationer för elbussar påverkar elnätet lokalt, och vad som kan göras för att minska denna påverkan. Elbussar kan minska klimatpåverkan, men också bidra till en bättre luftmiljö lokalt i våra städer. Ansvarig projektledare har varit David Steen, Chalmers.

I projektets referensgrupp har medverkat:

- Anders Grauers, Chalmers/Electromobility Center
- Lennart Spante, Vattenfall
- Per Norberg, Vattenfall
- Gunilla Le Dous, Göteborg Energi
- Niklas Carlsson, Göteborg Energi
- Fredrik Persson, Göteborg Energi
- Per Nordin, Volvo
- Anders Bülund, Trafikverket
- Torsten Wengsevik, Trafikverket
- Hector Zelaya, ABB
- Johan Fält, SAAB Aerospace
- Roger Bedell, Opbrid

Stockholm 2017-11-22

Här redovisas resultat och slutsatser från ett projekt inom ett forskningsprogram som drivs av Energiforsk. Det är rapportförfattaren/-författarna som ansvarar för innehållet och publiceringen innebär inte att Energiforsk har tagit ställning till innehållet.

Sammanfattning

Elbussar är på frammarsch och ses av många som ett attraktivt sätt att minska klimatpåverkan och lokala utsläpp från kollektivtrafiken. Elbussarna behöver dock laddas vilket kan leda till påfrestningar för det lokala elnätet, vilket kan behöva förstärkas för att klara den ökade belastningen som elbussar innebär. Syftet med projektet har varit att undersöka hur stor påverkan elbussar har på elnätet samt hur påverkan kan mildras genom alternativa implementeringsmetoder.

I projektet har en modell utvecklats för att uppskatta vilken påverkan en laddstation kan få på distributionsnätet. Modellen är implementerad i optimeringsprogrammet GAMS och bygger på en optimal lastflödesmodell. I modellen implementerades fyra alternativa metoder som skulle kunna minska påverkan på elnätet från laddstationerna. Dessa innefattar, möjligheten att styra den reaktiva effekten från snabbladdningsstationen, att ha ett lokalt energilager vid laddstationen, att styra ned övrig förbrukning i området vid laddning samt att styra laddningen i tiden. Utöver simuleringsmodellen har styralgoritmer för laststyrning och reaktiv effektkompensering utformats och verifierats i verkligheten och i laboratorium. Vidare har mätningar på befintliga snabbladdningsstationer utförts, för att analysera påverkan på elkvaliteten.

Resultaten från simuleringarna visar att för de undersökta områdena kan en eller flera laddstationer med dagens storlek anslutas utan att begränsningar i distributionsnätet överskrids. Genom att använda aktiva åtgärder kan den möjliga laddeffekten öka med upp emot 10 % för 10 kV nätet och upp emot 60 kW i 400 V nätet. För laddstationer med låg utnyttjandegrad t.ex. hållplatsladdare kan väsentligt högre effekttökningar nås om energilager med hög effektkapacitet används. Reaktiv effektkompensering visar störst nytta för områden med svaga elnät och där det finns problem med för låg spänningsnivå medan energilager och användarflexibilitet är attraktivt för områden där effekten begränsas av termisk överlast av transformatorer eller kablar.

De utformade styrmetoderna har testats och verifierats i verkligheten och i laboratorium. Resultaten visar att laststyrning kan vara möjligt för att undvika överlast i nätet men att styrningen kan behöva initieras innan bussen börjar ladda då det kan ta tid innan full effektreduktion uppnås. För reaktiv effektkompensering överensstämmer resultaten väl med simulerade resultat.

Kostnaderna för de undersökta teknikerna bör sättas i relation till möjlig besparing i form av undviken nätförstärkning, vilket varierar mellan olika platser. För reaktiv effektkompensering och styrning av laddning i tid uppskattas kostnaden för implementeringen vara relativt låg. För laststyrning krävs nya affärsmodeller och kostnaden för dessa är svåra att uppskatta. För lokala energilager uppskattas kostnaden för lagret vara hög men kan samtidigt även utnyttjas för andra tjänster i elnätet, exempelvis för lagring av solenergi.

Summary

Electric buses are gaining interest and can be an attractive means to reduce climate impact and local emission from the public transportation sector. Charging of electric buses from the electrical distribution system may cause overloading of components in the system and the reinforcement of the system may be required. This project investigates the impact of fast charging of electric buses on the electrical distribution system and how the impact could be reduced by applying alternative implementation strategies.

First, a model to determine the impact of electric bus charging has been developed within the project. The model is implemented in the optimization software (GAMS) and is based on an optimal power flow framework. Four mitigation strategies that could be used to reduce the impact on the distribution system are simulated using the model. The strategies include: i) Reactive power compensation from the fast charging station; ii) Local energy storage at the bus stop; iii) Demand response of other loads within the area; and iv) Controlled charging of the buses. Second, control algorithms for demand response and reactive power compensation have been developed and demonstrated in a real system as well as in a laboratory environment. Finally, the measurement on two real charge stations has been performed in order to analyze the chargers' impact on the power quality, including voltage variations and harmonics.

The results from the simulations show that for the investigated areas in the distribution system, one or several charge stations could be installed without violating any limitations in the system. By using the proposed mitigation strategies, it could be possible to increase the charge power by up to 10% for the 10 kV system and by approximately 60 kW for the 400 V grid. For charge stations with low utilization, e.g. bus stop chargers, significantly higher peak power could be reached if energy storages with high power capabilities are to be used. Reactive power compensation was found to be most beneficial for weak distribution systems where voltage issues exist already today. Demand response and energy storage were found attractive for areas where the charge power was preliminarily limited by thermal overloading of components, such as transformers or cables.

The designed mitigation strategies were tested and verified in real and laboratory environments. The results have shown that demand response could be used as a measure to avoid overloading of system components. However, the load reduction needs to be initiated prior to the charge event due to limits of the load reduction rate. For reactive power compensation, the results from the demonstration were found to be in line with simulations results and showed high potential to avoid voltage variations.

The cost for the developed strategies should be put in relation to the potential saving in terms of avoided grid reinforcement, which would vary greatly among different locations in the system. For reactive power compensation and charge control, the cost is projected to be low. To utilize demand response, new business

models are required and the cost (or decreased revenue) due to these are difficult to estimate. For local energy storages, the cost is projected to be high. On the other hand, the storage could also be used to provide other support services for the distribution system.

Innehåll

1	Introduktion	8
1.1	Mål	8
1.2	Rapportens Innehåll	9
1.3	Genomförande	9
1.4	Resultatspridning	9
2	Teori	11
2.1	Elbussladdning	11
2.1.1	Depåladdning	11
2.1.2	Ändstationsladdning	11
2.1.3	Laddning vid busshållplatserna eller laddning under färd	12
2.2	Elkvalitets krav	12
2.2.1	Hantering av övertoner från omriktare	13
2.3	Distributionsnätets uppbyggnad	14
2.3.1	Spänningsreglering	14
3	Metoder	16
3.1	Simuleringsmodell	16
3.2	Utformning av styralgorithmer	16
3.3	Mätningar	18
3.4	Demonstration	19
3.4.1	Användarflexibilitet för att minska nätpåverkan	19
3.4.2	Reaktiv effekststyrning	20
4	Resultat	21
4.1	Mätningar – Elkvalitetspåverkan	21
4.2	omriktar-design för minskade övertoner	24
4.3	Simuleringsresultat	26
4.4	Möjliga besparingar med de föreslagna teknikerna	29
4.5	Demonstration av användarflexibilitet	30
4.6	Demonstration av reaktiv effektkompensering	31
4.6.1	Förluster i omriktaren vid reaktiv effektkompensering	33
5	Diskussion	35
6	Slutsatser	37
7	Referenser	38

1 Introduktion

Flera länder och städer i världen går mer och mer mot att elektrifiera transportsektorn. Försäljningen av elbilar står för omkring 15 % av nybilsförsäljningen i Norge idag [1]. Flera länder, bland annat Nederländerna, Frankrike och Storbritannien diskuterar möjligheten att förbjuda försäljning av fossildrivna bilar i framtiden [2]– [4]. Relaterat till kollektivtrafiken finns det ett stort intresse att elektrifiera busstrafiken, då elbussar har potentialen att minska användningen av fossila bränslen, minska de lokala luftföroreningarna, samt minska bullernivån i städer. Idag pågår ett flertal demonstrationsprojekt av elbussar runt om i Sverige, bland annat i Göteborg där busslinjen 55 elektrifierats och utvärderas [5]. I Umeå har ett flertal tester med elbussar pågått sedan 2010 [6]. Även utomlands sker ett flertal projekt med elbussar [7], t.ex. i Storbritannien, Frankrike och Tyskland. För att underlätta övergången till elbussar har man i bland annat Tyskland beslutat om ett bidrag till elektriska bussar på 100 M€ [8]. Även Sverige har infört en elbusspremie för att främja övergången [9]. Detta har resulterat i att försäljningen av elbussar har börjat ta fart, bland annat rapporterar Nobina att de kommer elektrifiera busslinjer i både Malmö och Norrköping [10], [11].

Då elbussar laddas från elnätet kan en storskalig integration ge stor påverkan på elnätet. Tidigare studier har visat att kraven på elnätet påverkas av hur bussarna utformas och laddas [12]. Även laddarnas placering kan ha en stor påverkan på hur elnätet påverkas.

Det finns en rad tekniker som skulle kunna utnyttjas för att underlätta integreringen av laddinfrastrukturen för elbussar, t.ex. reaktiv effektkompensering, lokala energilager och laststyrning. I dagsläget finns det inga färdiga riktlinjer kring utbyggnaden av laddinfrastrukturen för elbussar eller hur ovan nämnda tekniker skulle kunna utnyttjas.

Syftet med det här projektet har varit att analysera hur det lokala elnätet kan komma att påverkas vid snabbladdning av elbussar samt hur påverkan kan mildras genom att använda olika tekniker.

1.1 MÅL

För att uppfylla projektets syfte har följande delmål satts upp för projektet:

- Utveckla en elnätsmodell för utvärdering av elnäts påverkan av snabbladdningsstationer.
- Utvärdera påverkan av snabbladdare på ett verkligt distributionsnät i Sverige samt hur påverkan skulle kunna mildras genom alternativa laddstrategier/metoder.
- Utveckla styralgoritmer för en eller flera av de föreslagna metoderna som kan användas för att minska elnätspåverkan.
- Testa och verifiera de/den utvecklade styralgoritmen i ett verkligt elnät, alternativt i laboratorium på Chalmers.

- Ta fram riktlinjer för placering och utformning av snabbladdare i distributionssystem.

1.2 RAPPORTENS INNEHÅLL

Rapporten är utformad med en kort bakgrund/teoridel om elbussar och dess nätpåverkan för att ge läsaren en insikt i ämnet. I kapitel tre beskrivs de utformade modellerna och metoderna som utvecklats i projektet. Kapitel fyra presenterar huvudresultaten från arbetet och i kapitel fem och sex återfinns diskussion och sammanfattning av projektet.

1.3 GENOMFÖRANDE

Arbetet med att utveckla en modell och styralgorithmer för elbussladdning har i huvudsak utförts av forskaren David Steen vid avdelningen Elkraftteknik, Chalmers Tekniska Högskola. Även Tuan Le Anh och Ola Carlson har varit aktiva i projektets utförande, främst vid arbetet med artiklar och demonstrationerna av de utvecklade metoderna. Daniel Pehrman har arbetat med frågor rörande induktiv laddning och stöttat upp i labbet tillsammans med Kalid Yunus. Vidare har delar av projektet skett i samverkan med projektet "ultrakompakta snabbladdare" vilket utförts av Torbjörn Thiringer och Saeid Haghbin, Chalmers Tekniska Högskola. Ett gemensamt examensarbete har även handletts tillsammans med Göteborg Energi. För mätningar och demonstrationerna har arbetet skett med stöd av Göteborg Energi och Akademiska Hus.

Projektet har haft en extern referensgrupp tillsammans med projektet ultrakompakta snabbladdare. Under projektets gång har referensgruppen träffats tre gånger för att presentera projektets resultat och diskutera frågor rörande laddning av elfordon.

Deltagarna i referensgruppen har varit:

- Anders Grauers, Chalmers/Electromobility Center
- Lennart Spante, Vattenfall
- Per Norberg, Vattenfall
- Gunilla Le Dous, Göteborg Energi
- Niklas Carlsson, Göteborg Energi
- Fredrik Persson, Göteborg Energi
- Per Nordin, Volvo
- Anders Bülund, Trafikverket
- Torsten Wengsevik, Trafikverket
- Hector Zelaya, ABB
- Johan Fält, SAAB Aerospace
- Roger Bedell, Opbrid

1.4 RESULTATSPRIDNING

Resultaten från projektet har främst publicerats i vetenskapliga artiklar och presenterats på vetenskapliga konferenser. Nedan följer en lista över rapporter, artiklar och presentationer som genomförts under projektets gång.

Artiklar

- Steen, D. och Le, T. (2017) *Impacts of Fast Charging of Electric Buses on Electrical Distribution Systems*, 24th International Conference on Electricity Distribution (CIRED), June 12-15, 2017, Glasgow, UK
- Steen, D. och Le, T.: Fast charging of electric buses in distribution systems, IEEE PES PowerTech 2017, June 18-22, 2017, Manchester, UK
- Steen, D., Le, T. och Carlson, O.: Design and testing of a reactive power controller for an electric bus fast charger, To be submitted to 20th Power Systems Computation Conference (PSCC), 11th-15th June 2018, Dublin, Ireland

Examensarbete

- Hultin, A. och Wolgers, J.: Integration of fast charger stations, 2017, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden

Presentationer

- Steen, D.: Fast charging of electric vehicles, Poster presentation at Elkraft 2017, Göteborg, Sweden

2 Teori

Det här kapitlet avser att ge en kort introduktion till laddning av elbussar och vilka krav dessa ställer på elnätet. I första delen beskrivs olika metoder för hur elbussar kan laddas, i andra delen beskrivs elkvalité och vilka krav som ställs på elnätet. I sista delen ges en kort beskrivning av distributionsnätets uppbyggnad och spänningsreglering i distributionsnätet.

2.1 ELBUSSLADDNING

Till skillnad från en konventionell buss hämtar elbussen sin energi från elnätet och lagrar den i batterier på bussen. Infrastrukturen för laddningen påverkas till stor grad av hur bussarna utformas. En buss med stort batteri kräver inte laddning lika ofta och kan användas mer flexibelt jämfört med en buss med ett litet batteri. Om laddningen sker under en längre tid kan man även ladda med en lägre effekt vilket minskar påverkan.

Laddningen kan ske antingen induktivt via kontaktorer under eller ovanför bussen, eller trådlöst via induktion. Induktiv laddning testas bland annat i ett forskningsprojekt i Södertälje, där en elhybrid buss laddas induktivt vid en hållplats [13]. I Gävle pågår en demonstration av induktiv laddning av lastbilar vilket även skulle kunna användas av elbussar [14].

Generellt skiljer man på i huvudsak fyra olika alternativ för hur laddinfrastrukturen byggs upp [15], vilka presenteras nedan. Det är troligt att en kombination av olika system kommer att utvecklas och utnyttjas parallellt i framtiden.

2.1.1 Depåladdning

För bussar med stora batterier som kan täcka en stor del av dygnets körsträcka kan man ladda bussarna under natten i ett bussgarage. Denna typ av fordon kan användas mer flexibelt vilket är en fördel ur ett användarperspektiv och laddningen sker även främst under natten då övrig elförbrukning är låg. Dock krävs stora batterier vilket förutom höga kostnader även har ett större klimatavtryck. Då laddningen sker under en längre tid kan man ladda fordonen med en lägre laddström men vid en storskalig implementation kan det krävas att många fordon laddar samtidigt och på samma ställe vilket kan leda till en hög sammanlagd laddeffekt.

2.1.2 Ändstationsladdning

Genom att placera laddstationer i ändstationerna av en busslinje kan batteristorleken som krävs för bussarna minskas drastiskt. Dock förloras mycket av flexibiliteten då bussarna enbart kan användas på linjer där laddinfrastruktur är tillgänglig. Laddningen har även viss påverkan på bussens utnyttjande då den måste ha en paus vid ändstationerna för att ladda batterierna, dock påverkas inte resenärerna restid.

Ur ett elnätsperspektiv krävs generellt en högre laddeffekt vid ändhållplatsladdning än för depåladdning då trafikoperatören vill minimera tiden bussarna står stilla. I vissa fall kan även ändhållplatserna ligga avsesides och ha långt till närmsta nätstation vilket kan leda till högre anslutningskostnader.

2.1.3 Laddning vid busshållplatserna eller laddning under färd

Motsatsen till depåladdning är att ladda bussen under färd eller vid ett flertal busshållplatser längs med linjen. För dessa bussar krävs en liten mängd batterier på bussarna men en storskalig utbyggnad av laddinfrastrukturen för dessa bussar. Flexibiliteten kring hur bussarna kan utnyttjas minskar och bussarna kan främst utnyttjas på de linjerna med en välutbyggd laddinfrastruktur.

För hållplatsladdning är det troligt att det kommer att krävas relativt höga laddeffekter för att minska stopptiden vid busstationerna och därvid den totala restiden för resenärerna.

Laddning under färd minskar stopptiden som krävs men för att undvika att elektrifiera hela busslinjen kan laddeffekten behöva vara relativt hög även här.

Även om energilagringsbehovet är lågt för den här typen av konfiguration finns det en risk att batteristorleken istället bestäms av laddningseffekten då den möjliga laddeffekten begränsas av storleken på batteriet. Genom att bygga bussarna med något större batteri än vad som egentligen krävs fås en högre flexibilitet i systemet samtidigt som det ger möjlighet att ladda batteriet vid högre effekter.

2.2 ELKVALITETS KRAV

Begreppet elkvalitet är en beskrivning av eltillförsel fri från störningar. Det kan handla om dippar och transienter i spänningen, övertoner, d.v.s. hur mycket vågformen skiljer sig från en sinusvåg, obalans mellan faserna eller variationer i nätfrekvensen [16]. Elkvalitet har på senare år blivit mer och mer viktigt då andelen olinjära laster, t.ex. frekvensomriktare och switchade nätaggregat, ökar i samhället, vilket ger upphov till bland annat övertoner [17]. Övertoner kan bland annat leda till ökade förluster i transformatorer och elmaskiner.

Relaterat till elbussladdning så består en laddstation av en likriktare, vilken dels kan ge upphov till spänningsdippar då laddningen sker vid hög effekt samt övertoner. Beroende på hur likriktaren är konstruerad påverkas mängden övertoner som sprids på elnätet.

I Sverige regleras elkvaliteten i distributionsnät via EIFS 2016:2 [18] och standarden SS-EN 50160 [19]. Relaterat till övertoner regleras generellt spänningsövertonerna i kopplingspunkten varvid det är upp till distributionsnätsägaren att reglera hur övertonerna från respektive konsument skall regleras. Gränsvärden för strömövertoner från apparater finns reglerat i produktstandarden SS-EN 61000-3-2 och SS-EN 61000-3-12, det finns även riktlinjer framtagen av IEEE som rekommenderar att strömövertoner från en last begränsas baserat på hur stor lasten är i relation till kortslutningsströmmen i anslutningspunkten [20]. Vidare finns ytterligare rekommendationer i Svens Energis dokument "Anslutning av mindre produktionsanläggningar till elnätet – AMP". Tabell 1 och Tabell 2

presenterar riktlinjer för strömövertoner och regleringarna för spänningsövertoner baserat på [18] och [20].

Tabell 1 Maximala strömövertoner för olika laster och kortslutningsströmmar (I_{sc} som % av luftströmmen (I_L) enligt [20].

I_{sc}/I_L	$3 \leq n < 11$	$11 \leq n < 17$	$17 \leq n < 23$	$23 \leq n < 35$	$35 \leq n \leq 50$	TDD
< 20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
$20 < 50$	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
$50 < 100$	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12
$100 < 1000$	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20

Tabell 2 Maximala Spänningsövertoner enligt föreskriften EIFS 2013:1 [18].

Udda övertoner				Jämna övertoner	
Ej multiplar av 3		Multiplar av 3			
Övertoner (n)	Relativ övertonshalt (%)	Övertoner (n)	Relativ övertonshalt (%)	Övertoner (n)	Relativ övertonshalt (%)
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.5	6 ... 24	0.5
13	2.5	21	0.5		
17	2				
29	1.5				
23	1.5				
25	1.58				

Även spänningsvariationer och spänningsdippar i distributionsnät regleras av standarden SS-EN 50160 [19]. Generellt skall spänningen hållas inom spannet 90-110 % av nominell spänning.

2.2.1 Hantering av övertoner från omriktare

Beroende på hur omriktaren konstrueras skapas övertoner vid olika frekvenser. För en enkel typ av omriktare, t.ex. diodlikriktaren, skapas höga övertoner vid låga frekvenser nära grundtonsfrekvensen, d.v.s. 50 Hz i Europa. Genom att konstruera omriktaren med styrbara transistorer, så kallade switchade omriktare eller aktiva omriktare, kan en mer sinusformig ström dras från nätet vilket minskar de lågfrekventa övertonerna. Istället skapas övertoner vid högre frekvenser och speciellt vid switch-frekvensen samt multiplar av denna.

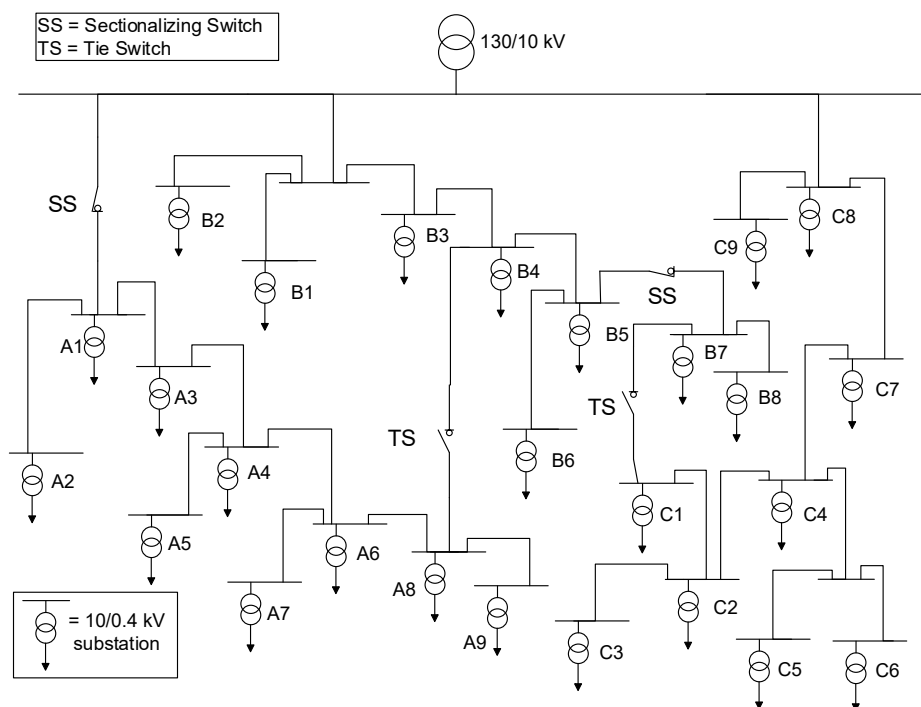
För att begränsa övertonerna från omriktaren kan även ett filter installeras för att filtrera bort frekvenser högre än grundtonsfrekvensen. Ett vanligt sätt att filtrera bort övertoner är genom att installera en induktans i serie med lasten. Den här lösningen har dock begränsningar i hur mycket övertonerna kan dämpas samt att brytfrekvensen bestäms direkt genom värdet på induktansen [21]. Genom att utnyttja filter av högre ordning, t.ex. ett LCL filter kan en högre dämpning uppnås med en lägre impedans vilket ger en lägre kostnad och storlek på filterlösning, vilket är viktigt för t.ex. högeffektsomriktare.

Om omriktaren är designad med två eller flera omriktare parallellt (t.ex. för att öka effekten från omriktare) och deras respektive styrsignal är fasförskjutna, så tar övertonerna vid switchfrekvensen från vardera omriktarsteg ut varandra [22]. Tekniken kallas för *interleaved operation* och kan vara ett effektivt sätt att minska kraven på filtren.

Ett annat sätt att minska övertoner är att använda sig utav något som kallas för *dithering*. Vid dithering har man inte switchfrekvensen vid en fix frekvens utan switchfrekvensen sveps över och under en central switchfrekvens. På detta sätt sprids övertonerna ut och minskar således i amplitud.

2.3 DISTRIBUTIONSNÄTETS UPPBYGGNAD

Projektet har i huvudsak utgått från distributionsnätet i Göteborg men simuleringar har även utförts på ett europeiska typnät, CIGRE Benchmark Systems [23], vilket är utformat för att representera en stor mängd av distributionsnäten i Europa.



Figur 1 Enlinjeschema av ett 10 kV nät i Göteborg.

Figur 1 presenterar ett enlinjeschema för ett av 10 kV näten som simulerats i projektet. 10 kV nätet är uppbyggt som ett maskat elnät men matas radiellt via omkoppling av brytare i nätet. 400 V nätet är designat som ett radiellt nät.

2.3.1 Spänningsreglering

Spänningsregleringen i distributionsnäten sker bland annat via lindningsomkopplare i transformatorstationerna eller via serie eller shunt

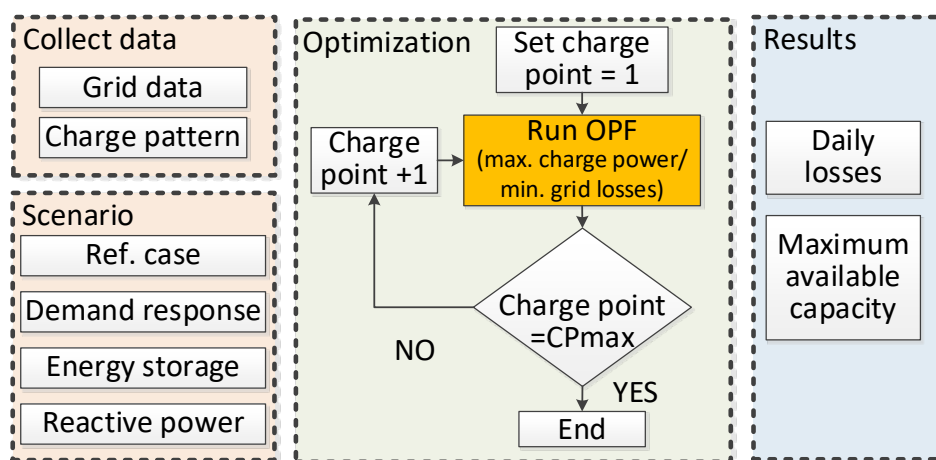
kondensatorer [24]. För 130/10kV transformatorerna är lindningsomkopplarna vanligtvis automatiska och slår om vid för låg/hög spänning. Vid lågspänningstransformatorerna finns oftast manuella lindningsomkopplare vilka främst används för att ändra spänningsomsättningen mellan t.ex. sommar och vinter.

Ett kondensatorbatteri kan användas för att reglera spänningen i distributionsnätet genom att kompensera för den reaktiva effekt konsumtionen lokalt. Genom att kompensera för den reaktiva effekten minskar vanligtvis även förlusterna i distributionsnätet samtidigt som spänningsstabiliteten i nätet ökar [24].

3 Metoder

3.1 SIMULERINGSMODELL

Modellen som byggts upp i projektet baseras på en effektflödesmodell som beräknar strömflödet och spänningsnivån i nätet under dygnet. Syftet med modellen är främst att påvisa påverkan av laddstationerna i olika delar av elnätet men även för att analysera hur påverkan skulle kunna minska genom de föreslagna teknikerna som nämnts i avsnitt 1.



Figur 2 Flödesschema för simuleringsmodellen.

Figur 2 visar ett överskådligt flödesschema av simuleringsmodellen. Modellen är implementerad i programmet GAMS (General Algebraic Modelling Systems [25]) och använder CONOPT som lösningsalgoritm. Modellen kan dels användas för att beräkna vilken laddeffekt som kan installeras vid de olika noderna i distributionsnätet eller för att beräkna påverkan av en specifik laddeffekt genom att minimera förlusterna i elnätet.

Utöver att simulera påverkan på elnätet kan modellen, som tidigare nämnts, användas för att undersöka hur olika metoder så som laststyrning, lokala energilagring och reaktiv effektkompensering påverkar förluster och den möjliga laddkapaciteten som kan installeras. En mer detaljerad beskrivning av modellen finns i Appendix A.

3.2 UTFORMNING AV STYRALGORITMER

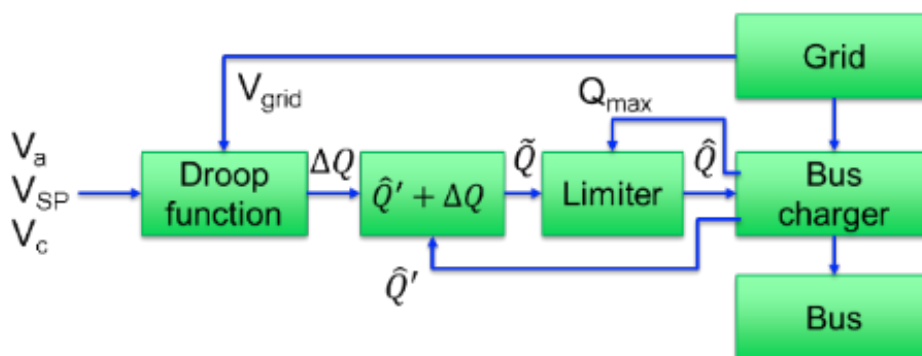
För att implementera möjligheten att styra den reaktiva effekten från laddstationen har en styralgoritm tagits fram. Syftet med algoritmen är att hålla spänningen så nära ett börvärde som möjligt genom att konsumera eller producera reaktiv effekt. Figur 3 presenterar styralgorithmens principer.

Som kan ses så ökar den reaktiva effekten från laddstationen om spänningen faller utanför det fördefinierade börvärdet. Ju större spänningsändring ju mer

kompenseras den reaktiva effekten från laddstationen. Matematiskt kan metoden uttryckas som

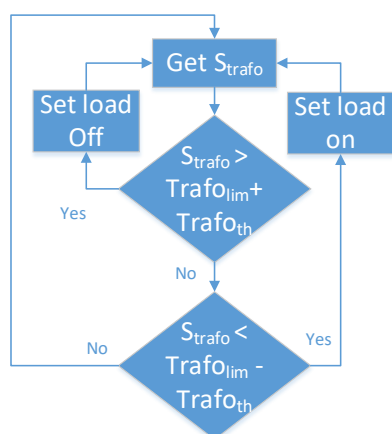
$$\Delta Q = k * (V_{set} - V_{act})$$

där ΔQ är ändringen i reaktiv effekt från laddstationen, V_{set} är börvärdet för spänningen och V_{act} är den uppmätta spänningen och k är en faktor som bestämmer hur kraftigt kompenseringen skall ske. Liknande metoder har tidigare implementerats för omriktare för solceller [26].



Figur 3 Principerna för reaktiv effekt styrning av laddstationen.

Till skillnad från reaktiv effekstyrning så kräver alternativet med laststyrning en mer avancerad kommunikation mellan lasterna och laddstationen eller överliggande nätstationen. Själva styrningen kan variera beroende på vilka laster som styrs. För värmelaster i hus kan t.ex. en prognos i förväg underlätta för att optimalt styra värmetillförseln under dygnet. För att endast undvika överlast kan enklare metoder användas, t.ex. där en styrsignal skickas till respektive last när elnätet riskerar att överlastas. Styrsignalen som skickas ut till lasterna kan antingen vara en av/på signal eller en förändring av börvärdet för lastens kontrollsystem, för värmelaster kan man t.ex. manipulera signalen från givaren för utetemperaturen, vilket bland annat demonstrerats för ett fjärrvärmesystem i [27]. Figur 4 presenterar principerna för en enkel typ av styrning för fallet då elbussladdningen

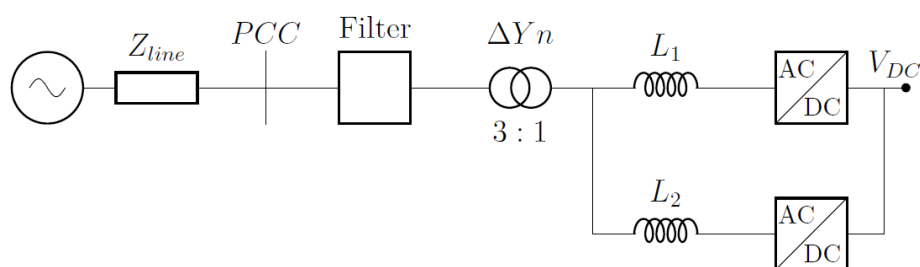


Figur 4 Princip för laststyrning för att undvika överlast av en transformator.

kan orsaka överlast av en transformator i elnätet. I exemplet jämförs effekten över transformatorn med ett intervall runt transformatorns märkeffekt. Överstiger effekten intervallet skickas en styrsignal ut till laster om att stänga av, faller effekten under intervallet skickas en signal om att slå på lasten igen. För laster som bara styrs av och på kan styrningen ske för en eller ett par laster åt gången för att undvika överkompensering medan för dynamiska laster kan istället effektnivån som styrs ned varieras för flera laster. För t.ex. värmelaster kan det lokala styrsystemet behöva kompensera för den reducerade effekten i efterhand för att undvika en nedkylning av byggnaden.

3.3 MÄTNINGAR

I Göteborg pågår sedan 2015 projektet "ElectriCity", där en elektrifierad busslinje testas och utvärderas i reguljär trafik. Busslinjen, linje 55, kör mellan Chalmers campus vid Johanneberg och Lindholmen. Linjer körs av både rena elbussar och hybridbussar vilka båda laddar vid linjens ändhållplatser. Laddstationen är levererad av Siemens och har en installerad kapacitet av 300 kW. Då batteriet i hybridbussen är något mindre än för de rena elbussarna laddas dessa vid en lägre effekt.



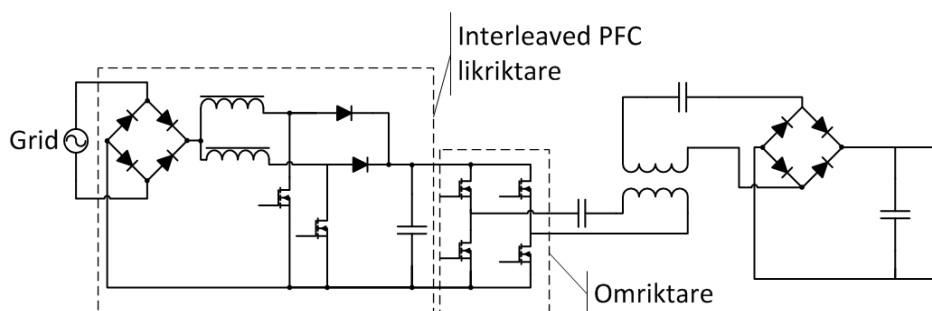
Figur 5 Utformning av Siemens laddstation för linje 55 (bild från A. Hultin och J. Wolgers).

Figur 5 presenterar en skiss av hur laddstationen är utformad. Omriktaren använder sig av aktiv likriktning av två parallella likriktare. Switchfrekvensen ligger på 3 kHz och varje likriktare har en induktans i serie. Vidare finns en transformator som dels gör omriktaren galvaniskt skild från elnätet men som även fungerar som en del filterlösningen för omriktaren. Det finns även en kondensator ansluten till omriktarens ingång som troligtvis är anslutna mellan transformatorn och induktansen vilket i så fall skulle skapa ett LCL filter.

För att uppskatta laddstationens påverkan på elnätet har mätningar utförts vid dessa laddstationer och dess elnätpåverkan har analyserats. Då omriktarens switchfrekvens är hög krävs hög upplösning på mätningarna för att fånga omriktarens övertoner. En mer utförlig beskrivning av mätuppkopplingen finns i [28].

Ett alternativ till konduktiv laddning är att ladda induktivt, så kallad trådlös laddning. Även de induktiva laddstationerna har en omriktare för att omrikta växelspanningen till likström. Det är dock möjligt att dess påverkan på elnätet skiljer sig från en konduktiv laddstation. Som en del av projektet har även

mätningar på en induktiv laddstation genomförts. Till skillnad från laddstationen vid Lindholmen är den induktiva laddstationen konstruerad för låga effekter, ca 3 kW. Figur 6 presenterar utformningen av den induktiva laddstationen. I den konstruerade likriktaren används dithering och interleaving, vilket beskrevs i avsnitt 2.2.1, där den centrala switchfrekvensen är 75 kHz med sidband på ± 5 kHz. Överföringsfrekvensen från omriktaren för den induktiva laddningen sker vid 85 kHz.



Figur 6 Utformning av 3 kW induktiv laddare med aktiv likriktare och omriktare.

3.4 DEMONSTRATION

I projektet har två tester av de föreslagna teknikerna utförts. I första demonstrationen undersöktes möjligheten att styra ned elförbrukningen i byggnaden ansluten till samma transformator som en av laddstationerna när elbussen laddades. I den andra demonstrationen undersöktes möjligheten att styra den reaktiva effekten från bussladdaren för att hjälpa till med spänningshållningen på elnätet. Då möjligheten att använda de existerande laddstationerna för reaktiv effektkompensering ej var tillgänglig så utfördes testerna i labbmiljö på Chalmers med hjälp av en 55 kVA omriktare och en uppkoppling som motsvarar en nedskalning av ett distributionsnät.

3.4.1 Användarflexibilitet för att minska nätpåverkan

I simuleringsmodellen modelleras värmelaster i byggnader som styrbara laster. Området där laddstationerna är placerade är anslutna till fjärrvärmenätet i Göteborg och styrning av värmen påverkar inte elsystemet i detta område. Istället styrdes ventilationseffekten i byggnaderna ner när bussarna laddades.

Det finns 5 större ventilationsanläggningar i byggnaden med mellan 10 - 20 kW installerad effekt. Utöver dessa finns en rad mindre ventilationsaggregat och pumpar som skulle kunna styras. Den totala styrbara lasten uppskattas till omkring 100 kW för byggnaden, men då alla laster inte går på full effekt är den applicerbara lasten lägre.

Byggnadens ventilationssystem styrs via ett centralt styrsystem, Uniview. Då det inte fanns möjlighet att implementera extern styrning i det existerande styrsystemet under projektets gång demonstrerades styrningen genom att, via styrsystemet, manuellt styra ner ventilationseffekten.

3.4.2 Reaktiv effektstyrning

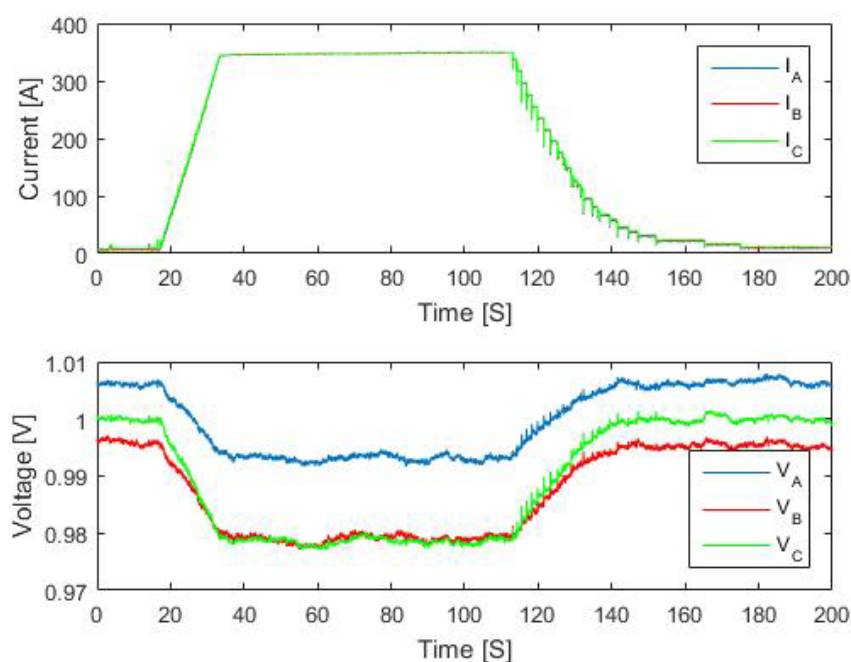
En demonstration av möjligheten att använda laddstationen för spänningshållning i elnätet har även utförts inom projektet. Vid demonstrationen har en extern omriktare på 55 kVA använts då möjligheten att ändra styrningen av de befintliga snabbladdarna var begränsad. På grund av den begränsande effekten från omriktaren och det starka elnätet genomfördes demonstrationen på en nerskalad version av ett svagt distributionsnät i ett elkraftslaboratorium på Chalmers.

4 Resultat

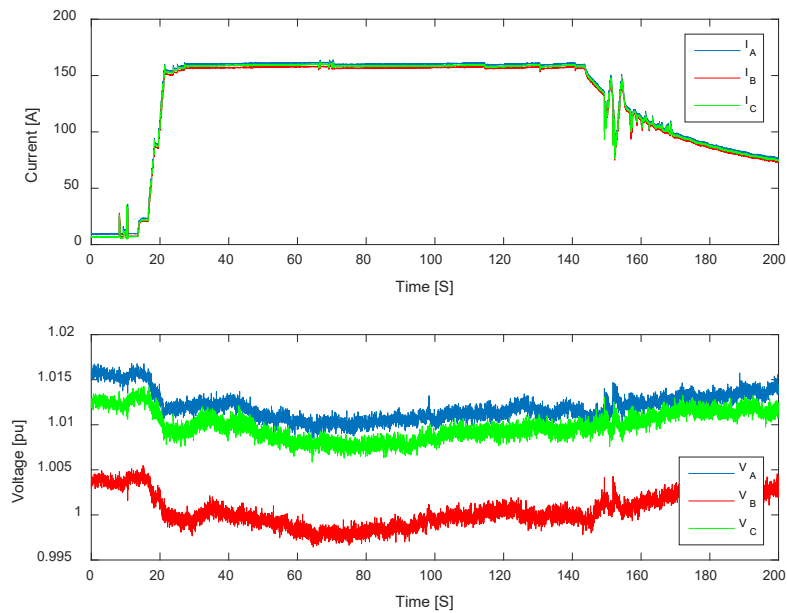
Detta kapitel ger en kortfattad sammanfattning av de viktigaste resultaten från projektet.

4.1 MÄTNINGAR – ELKVALITETSPÅVERKAN

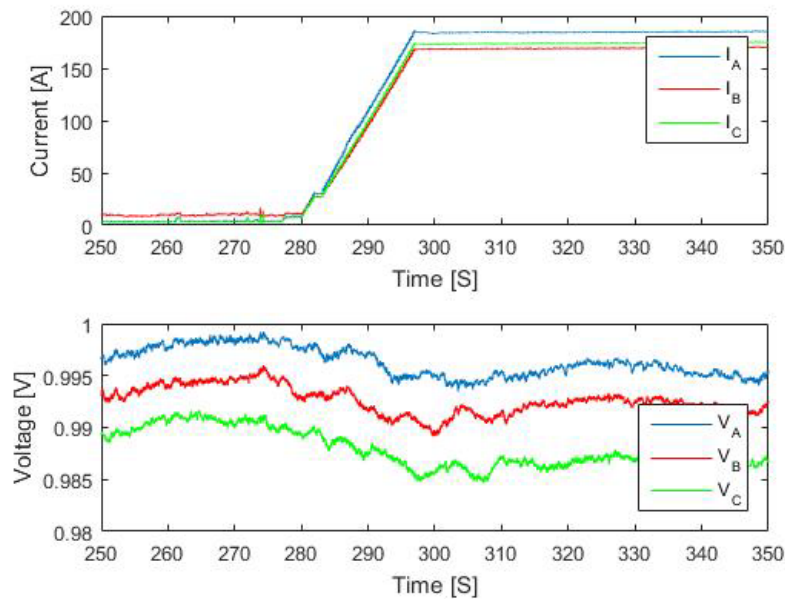
Utifrån mätningarna från bussarna på linje 55, vilka beskrevs i avsnitt 3.3, har elkvalitetsproblem så som spännings-fluktuationer och övertoner analyserats. Analysen visar på att i de områden där laddstationerna är installerade hålls både spänningsvariationer och övertoner inom angivna gränser. Störst påverkan orsakades då elbussen laddades med en effekt av ca 240 kW. Hybridbussarna laddades vid en lägre effekt, mellan 70-140 kW bland annat på grund av att de har ett mindre batteri än de rena elbussarna. Figur 7–Figur 9 visar ström och rms spänning för ett laddförlopp på Lindholmen och Johanneberg för en elbuss och en hybridbuss. Som kan ses så orsakar elbussladdningen ett större spänningsfall jämfört med laddning av en hybridbuss då effekten är högre för hybridbussladdningen. Spänningsfallet för hybridbussen är likartat för de båda platserna. Som kan ses i figurerna ökas strömmen succesivt under en 10 sekunders period varvid spänningsfallet inte blir så skarp.



Figur 7 Ström och spänning vid snabbladdning av en elbuss på Lindholmen.



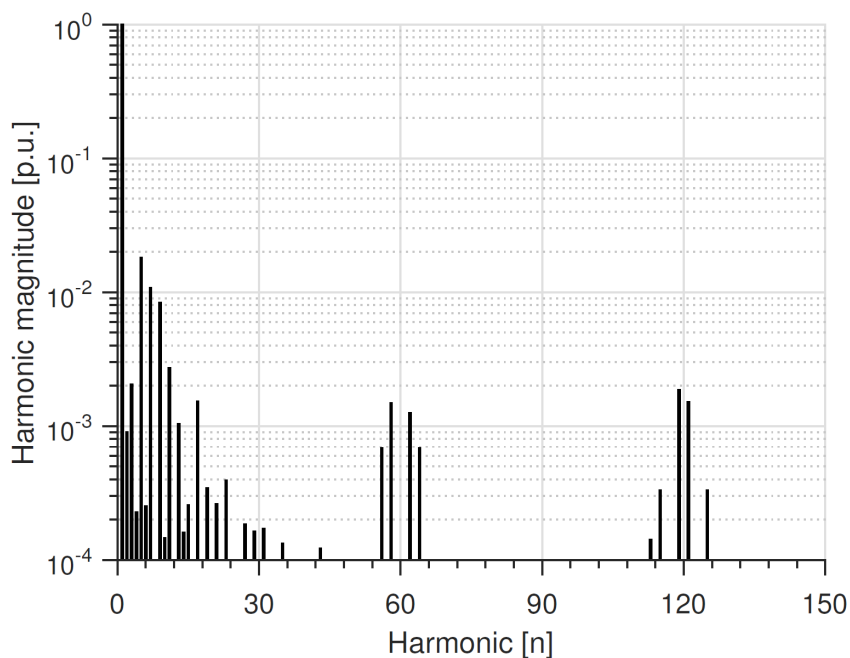
Figur 8 Ström och spänning vid snabbladdning av en hybridbuss på Lindholmen.



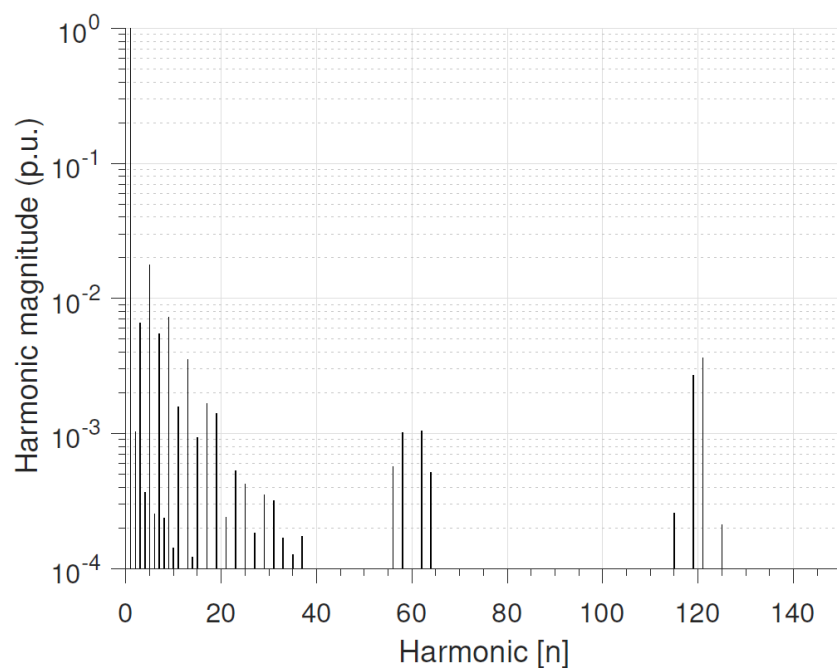
Figur 9 Ström och spänning vid snabbladdning av en hybridbuss på Johanneberg.

Figur 10-Figur 11 presenterar frekvensspektret av spänningen då ingen buss laddas respektive under ett laddförlopp av en elbuss vid Lindholmen. Som kan ses finns övertoner även då ingen buss laddas. Anledningen till detta kan vara flera, en möjlig anledning kan vara att omriktaren fortsatt är inkopplad till nätet för att hålla spänningsnivån uppe på likströmssidan av laddstationen eller att det finns andra närliggande laster som switchar med samma frekvens som omriktaren. För att säkerställa orsaken till dessa övertoner krävs fler mätningar. Jämfört med

Svensk standard (SS-EN 50160) ligger alla övertoner dock inom angivna gränser. Vid laddning ökar övertonerna något för höga övertoner t.ex. 120:e övertonen, dock är skillnaden mot fallet utan någon bussladdning liten och alla övertoner ligger inom angivna gränser. Figur 12 presenterar spänningsövertonerna under ett laddningsförlopp. Som kan ses återfinns spänningsövertoner vid switchfrekvensen (3 kHz, $n=60$) samt multiplar av den.

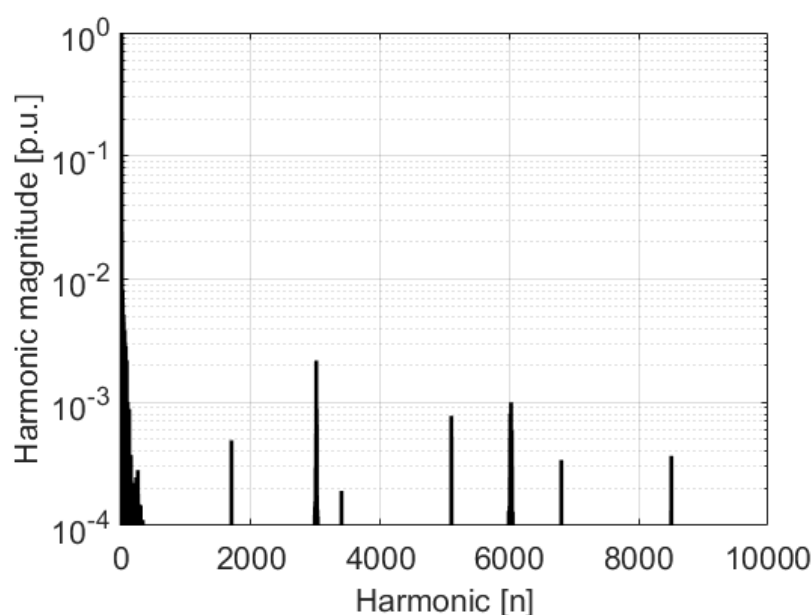


Figur 10 Spänningsövertoner vid Lindholmens laddstation då ingen buss laddas.



Figur 11 Spänningsövertoner vid laddning av en elbuss vid laddstationen på Lindholmen.

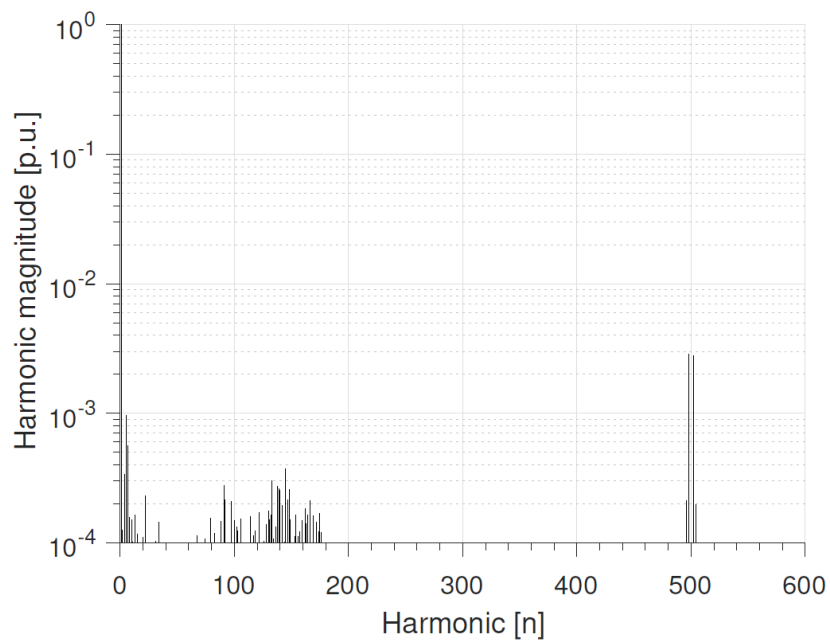
Figur 12 presenterar strömövertonerna från den induktiva laddstationen. Mätningarna på den induktiva laddstationen visar att strömövertonerna ligger inom de angivna riktlinjer som presenterats i Tabell 1 även för nät med låg kortslutningseffekt. Som kan ses i Figur 12 återfås övertoner dels vid multiplar av likriktarens dubbla switchfrekvens (150 kHz, $n=3000$) samt multiplar av omriktarens switchfrekvens (85 kHz, $n=1700$). På grund av den högre switchfrekvensen fås övertoner i betydligt högre frekvenser jämfört med laddstationen på Lindholmen.



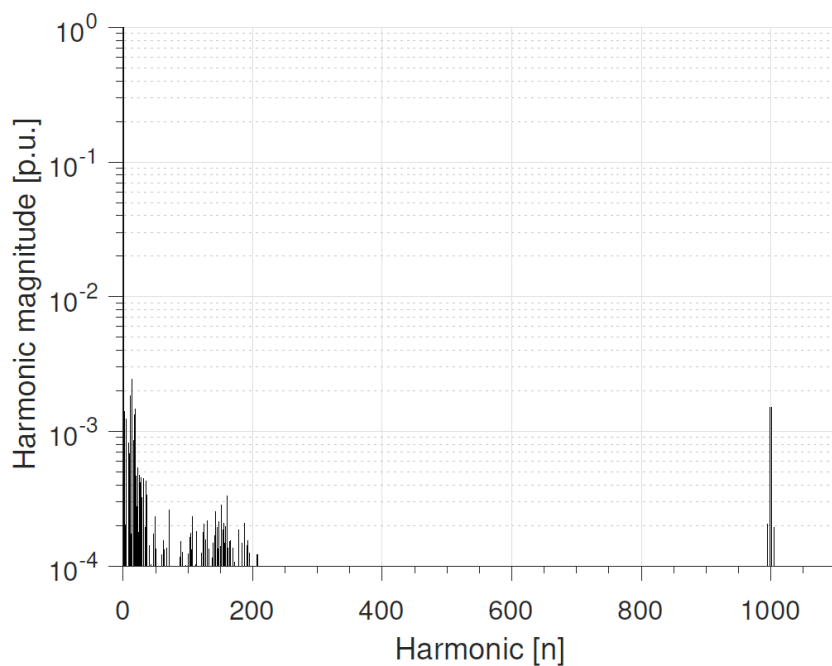
Figur 12 Strömövertoner vid 3 kW induktiv laddning med interleaved operation och dithering.

4.2 OMRIKTAR-DESIGN FÖR MINSKADE ÖVERTONER

Som visats i Figur 11 hålls övertonerna från laddstationen inom de angivna gränserna. Den utformning som använts bygger på att använda en transformator som en del av filterlösningen vilket bland annat är utrymmeskrävande samt orsakar förluster. Under projektet gång har ett examensarbete utförts där alternativa filterlösningar har undersökts. En simuleringsmodell utvecklades i matlab/simulink där den implementerade filterlösningen jämfördes med andra typer av filterlösningar, såsom "interleaved operation" av omriktaren i laddstationen. Figur 13-Figur 14 presenterar övertonsinnehållet från en simulerad 50 kW omriktare utan respektive med interleaved operation. Som kan ses är övertonerna av lägre ordning något lägre för den implementerade lösningen medan övertonen vid switchfrekvensen elimineras för omriktaren med interleaved operation.



Figur 13 Strömövertoner från 50 kW omriktare utan interleaved operation (25 kHz switchfrekvens) (bild från A. Hultin & J. Wolgers).

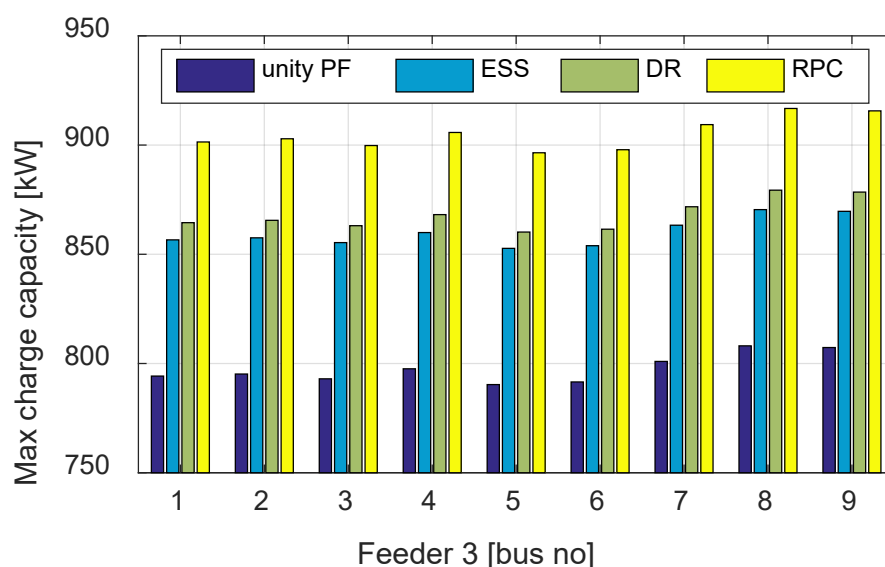


Figur 14 Strömövertoner från 50 kW omriktare med interleaved operation (25 kHz switchfrekvens) (bild från A. Hultin & J. Wolgers).

4.3 SIMULERINGSRESULTAT

Nedan presenteras resultat från simuleringsmodellen på ett relativt svagt elnät i utkanten av Göteborg för att undersöka dels hur hög laddkapacitet som kan anslutas till området samt hur de alternativa metoderna skulle kunna utnyttjas för att öka den möjliga laddeffekten.

Figur 15 presenterar den maximala laddeffekten som kan dras från olika 400 V nätstationer utan att överbelasta kablar eller överskrida tillåtna spänningsvariationer i elnätet. Elbussladdningen baseras på ändstoppsladdning och samma körmonster som busslinje 55 har simulerats.

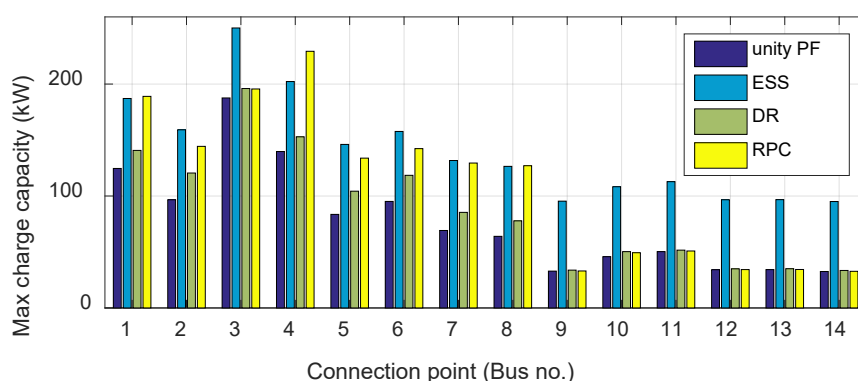


Figur 15 Maximal laddkapacitet för olika nätstationer i ett bostadsområde (Slinga C i Figur 3) i utkanten av Göteborg för fallet utan aktiva strategier och med aktiva strategier (unity PF står för referensfallet utan aktiva åtgärder, ESS står för lokalt energilager, DR står för laststyrning och RPC för reaktiv effektkompensering).

Som kan ses kan en relativ hög laddeffekt dras från elnätet utan att orsaka någon överbelastning. Genom att använda aktiva strategier kan laddeffekten ökas med över 10 % för det simulerade fallet. Den begränsande faktorn i området var strömbegränsningar i kablarna. Den möjliga ökningen beror på hur bussarna används, storlek på laddstation/energilager eller antal kunder som är aktiva för laststyrning. I exemplet ovan antas att bussens laddning begränsas till 90 % av den installerade kapaciteten och resterande effekt kan nyttjas för reaktiv effektkompensering. För strategin med energilager har ett energilager med storleken 12,5 kWh simulerats med en maximal ladd/urladdnings-effekt av 62,5 kW (motsvarande 5 C). För laststyrning antas att 10 % av kunderna är aktiva och att de är utspridda jämt mellan nätstationerna.

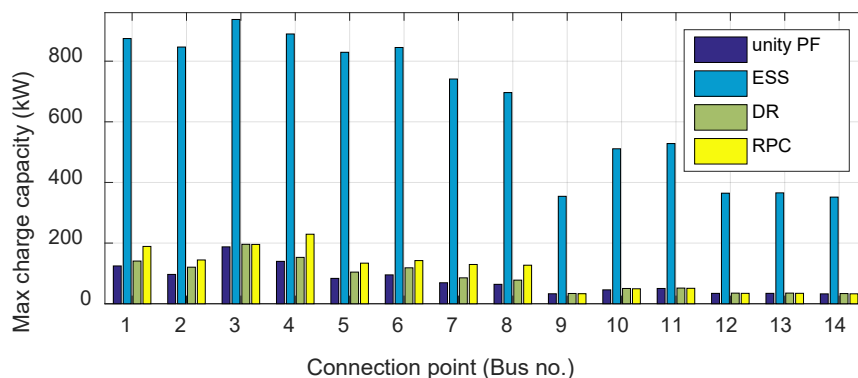
För 400 V nätet begränsas laddeffekten av kapaciteten på den befintliga transformatorstationen, på ledningar, samt på grund av spänningsfall i elnätet. Figur 16 presenterar den maximala laddeffekten som kan installeras för olika delar i lågspänningsnätet. Som kan ses, ökar den möjliga laddeffekten med upp till tre gånger gentemot fallet utan aktiva strategier. För kopplingar nära den matande

transformatorn, t.ex. punkt 1-8 begränsas den maximala laddeffekten främst av spänningsfallet i elnätet och både reaktiv effekt och lokalt energilager ger stora nyttor. För platser längre bort från nätstationen begränsas effekten av överföringsbegränsningar i kablar varvid enbart energilager ger en ökad nytta. För samtliga fall erhålls en liten nytta av användarflexibilitet. Den största anledningen till den låga påverkan är att enbart 10 % av konsumenterna antagits vara aktiva. Vid högre andelar aktiva kunder ökar den möjliga nyttan av att nyttja användarflexibilitet. Vid 50 % aktiva kunder ges en nytta motsvarande den för energilagret.



Figur 16: Maximal laddkapacitet för olika inkopplingspunkter i ett befintligt 400V nät för fallen med och utan aktiva strategier för fallet med ändhållplatsladdning (unity PF står för referensfallet utan aktiva åtgärder, ESS står för lokalt energilager, DR står för laststyrning och RPC för reaktiv effektkompensering).

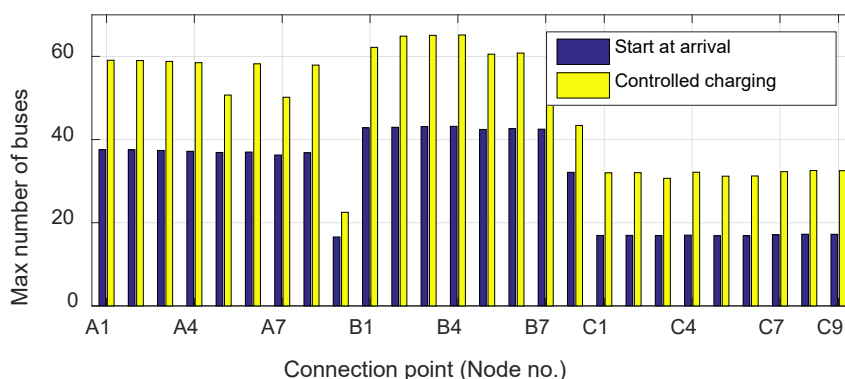
För system där bussarna laddas vid varje hållplats ökas fördelarna med ett lokalt energilager drastiskt då själva laddtiden i relation till tiden mellan bussarna minskar. Figur 17 presenterar simuleringarna för samma 400 V nät som ovan men där hållplatsladdning under en minut antagits. Alternativet sätter stora krav på att energilagret klarar höga urladdningseffekter och många cykler. I exemplet har ingen begränsning i ladd/urladdningseffekt antagits, vilket kräver energilagringssalternativ så som superkondensatorer eller svänghjul. För alternativen med reaktiv effektkompensering samt användarflexibilitet är resultaten likvärdiga med resultaten för ändhållplatsladdning.



Figur 17 Maximal laddkapacitet för olika inkopplingspunkter i ett befintligt 400V nät för fallen med och utan aktiva strategier för fallet med hållplatsladdning (unity PF står för referensfallet utan aktiva åtgärder, ESS står för lokalt energilagring, DR står för laststyrning och RPC för reaktiv effektkompensering).

Alternativet att styra själva laddningen är ett möjligt alternativ som skulle kunna implementeras för bussar som normalt ändhållplatsladdas om bussens batteri eller stopptiden är tillräckligt stor för att minska laddeffekten och fortfarande erhålla tillräckligt med energi för att nå nästa laddstation. Möjligheten för detta är dock svår att uppskatta generellt då parametrarna kan skilja sig stort mellan olika fall. För depåladdning finns generellt en tillräckligt lång laddtid för att ladda upp bussarna vid en lägre laddeffekt eller att styra laddningen i tid. Utifrån data från elbussarna på linje 55, tidtabeller för andra bussar, samt andra studier t.ex. [29], simulerades hur stor mängd elbussar olika anslutningspunkter skulle kunna hantera med respektive utan styrning av laddeffekten.

Figur 18 presenterar hur många elbussar som skulle kunna försörjas från olika anslutningspunkter i ett 10 kV nät i utkanten av Göteborg. De exakta antalet bussar skiljer sig stort beroende på körsträcka, laddeffekt och elnätets belastning. I fallet ovan har en genomsnittlig energianvändning av 500 kWh/buss/dag och en laddeffekt av 50 kW simulerats. Vid kortare körsträckor ges kortare laddtid och därav en större flexibilitet i att styra laddningen. Den viktigaste slutsatsen som kan dras av simuleringen är att det finns stora möjligheter att försörja en större mängd elbussar via befintlig infrastruktur genom att styra laddningen.



Figur 18 Antal bussar som kan laddas vid respektive nod för fallen med respektive utan styrning av laddningen, blå staplar representerar laddning direkt vid ankomst och gula representerar fallet då laddningen kan styras.

4.4 MÖJLIGA BESPARINGAR MED DE FÖRESLAGNA TEKNIKERNA

De möjliga besparingar som kan göras med de undersökta teknikerna ligger främst i att kunna utnyttja befintlig infrastruktur och undvika kostnader för förstärkningar av distributionsnätet. Med de idag tillgängliga effektnivåerna på laddstationer behövs inga större investeringar i de undersökta områdena för att ansluta en eller flera laddstation till 10 kV nätet. Om effektnivåerna ökar eller om det byggs flera laddstationer inom samma område kan de dock uppstå behov av att förstärka elnätet lokalt.

Resultaten från simuleringarna visar att vid laddning av elbussar i relativt svaga nät kan den installerade effekten begränsas av spänningsfallet i elnätet. Genom att styra den reaktiva effekten från laddstationen kan spänningen hållas inom acceptabla värden utan att behöva vidta andra åtgärder som t.ex. kondensator batterier, lindningsomkopplare eller grövre kablar.

Simuleringar har även genomförts för att undersöka hur förlusterna i elnätet kan minimeras om de undersökta teknikerna används för att minimera förlusterna i elnätet. Resultaten visar på att förlusterna kan minska med upp till 2 % i de simulerade områdena om laddstationen används för reaktiv effektkompensering. Den faktiska besparingen beror bland annat på lastens karakteristik, i simuleringarna antogs lasten effekt vara konstant oberoende av nätets spänning samt en effektfaktor på 0.95.

Hårdvarumässigt kan de flesta moderna laddstationer användas för reaktiv effektkompensering och kostnaden för att utnyttja dem för reaktiv effektkompensering ligger främst i kostnader för mjukvaru-utveckling. Vidare kan det krävas att omriktaren överdimensioneras för att möjliggöra reaktiv effekt även vid laddning. Om tillräcklig kapacitet finns i bussens batteri finns även möjligheten att minska laddeffekten något under laddningen och därigenom kunna tillföra reaktiv effekt även utan att överdimensionera laddstationen. Genom att minska den aktiva effekten med 10 % från laddstationen kan en reaktiv effekt på upp emot 40 % av den installerade effekten matas ut.

Om elnätsägaren äger laddstationen har de stor frihet att använda laddstationen för reaktiv effektkompensering men om trafikoperatören eller någon tredje part äger laddstationen behövs avtal och ersättning betalas ut för att utnyttja laddstationens reaktiva effekt. Ett alternativ är att ge rabatt på nätanslutningen i utbyte mot att kunna styra den reaktiva effekten. Andra besparingar som kan göras med hjälp av reaktiv effektkompensering är att minska det reaktiva effektuttaget från överliggande nät, samt minskade förluster i distributionsnätet.

Alternativet med lokala energilagrar vid laddstationen, möjliggör en ökad installerad effekt i distributionsnät. Framför allt om energilagret ger möjlighet att installera laddstationen i lågspänningsnätet kan det vara ekonomiska att investera i ett lokalt energilager, då kostnader för investeringar i t.ex. nya transformatorer kan undvikas. Kostnaden för energilager varierar mellan olika typer av energilagrar samt mellan effekt och energi. För applikationen som energilager vid snabbbladdningsstationen krävs höga effekter vilket driver upp kostnaderna för t.ex. batterier. Samtidigt krävs många cykler vilket skulle påverka batteriets livslängd. Ett alternativ till batterier skulle kunna vara superkondensatorer vilka

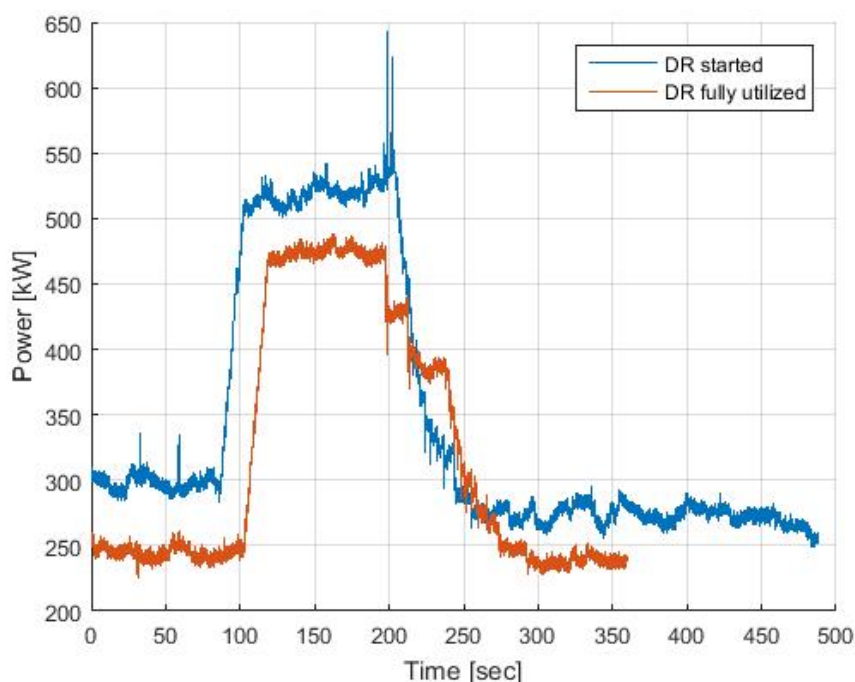
dels har högre effektkapacitet samt klarar av fler cykler. Speciellt för hållplatsladdning skulle dessa vara intressanta då energibehovet är mindre och effektbehovet högre.

För användarflexibilitet krävs en ny typ av kontrakt mellan elnätsägaren och kunderna i området som möjliggör att elnätsägaren styr ner vissa laster då elnätet är högt belastat. Ett alternativ är att ge kunden ett lägre pris för elabonnemanget. Denna kostnad blir då en återkommande kostnad för elnätsägaren vilket under en längre tid skulle kunna överstiga kostnaden för att förstärka nätet.

4.5 DEMONSTRATION AV ANVÄNDARFLEXIBILITET

Demonstrationen av användarflexibilitet visar på möjligheten att minska övrig elförbrukning i området då elbussen börjar ladda, för att undvika effekttoppar på elnätet. Då möjlighet att koppla in en extern styrsignal till det befintliga styrsystemet i byggnaden som var ansluten till samma nätstation som laddstationen ej var möjligt valdes att påvisa funktionaliteten genom att en driftstekniker manuellt styrde ner ventilation och pumplaster i byggnaden då en buss börjar ladda.

Figur 19 visar belastningen på transformatorn för två efterföljande bussar, nedstyrningen av laster påbörjas då den första bussen ansluts varvid den fortsätter efter att bussen laddats klart. Den andra laddcykeln sker med alla laster nedstyrda. Som kan ses styrdes nästan 50 kW ned totalt under perioden. Dock tog nedstyrningen relativt lång tid, ca 5 minuter, då styrningen skedde manuellt. I ett automatiserat system där nedstyrning sker automatiskt när bussen laddar skulle det vara möjligt att genomföra nedstyrningen snabbare men för att undvika överlast vore det fördelaktigt om en styrsignal från laddstationen kunde användas för att påbörja laststyrningen innan bussen påbörjat sin laddning.



Figur 19 Effekt genom transformatorn då användarflexibilitet används (blå visar första bussen och röd visar andra bussen).

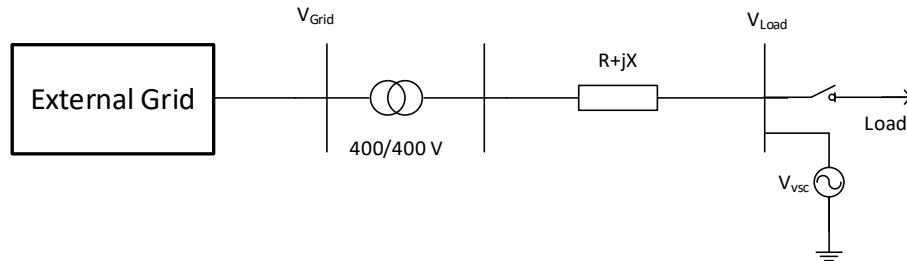
En viktig aspekt vid användning av laststyrning är hur inomhusklimatet påverkas av nedstyrningen av laster. För värmelaster beräknades inomhus temperaturen i byggnader men för ventilationsanläggningar har påverkan på inomhusklimatet inte modellerats. Vid styrning av ventilation är det viktigt att en tillräckligt hög luftomsättning erhålls. I vissa fall kan det vara nödvändigt att öka ventilationen efter en nedstyrning samt att inte nedstyrningen sker alltför frekvent under en tidsperiod. Under demonstrationen uppmärksammades dock inte någon negativ inverkan av nedstyrningen.

4.6 DEMONSTRATION AV REAKTIV EFFEKTKOMPENSERING

Ur en rent kapacitetsmässig synvinkel begränsades den maximala kapaciteten oftast inte av variationer i spänningsnivån för de simulerade områdena, även om de skulle kunna vara en begränsande faktor för vissa 400 V nät. Det finns dock andra fördelar att vinna genom att utnyttja snabbaddaren för reaktiv effektkompensering, t.ex. för att erhålla en jämnare spänningsnivå på distributionsnätet, minska energiförlusterna och minska kostnader för reaktiv effekt från överliggande nät.

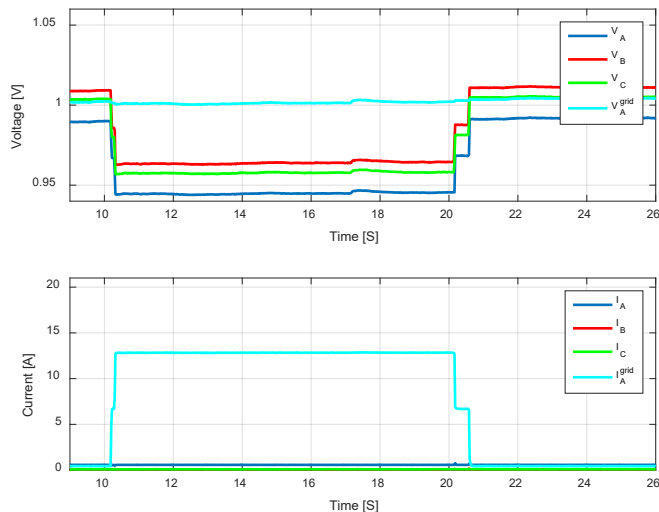
Då det ej var möjligt att implementera den framtagna styralgoritmen i de befintliga laddstationerna så demonstrerades tekniken i ett elkraftslaboratorium vid Chalmers tekniska högskola. En nedskalning (1:30 kVA) av ett svagt distributionsnät byggdes upp och en 55 kVA omriktare programmerades med den utvecklade algoritmen för att erhålla en stabil spänning. Då den reaktiva effekten från omriktaren var begränsad valdes att inte installera omriktaren vid

laddstationerna då dess påverkan skulle bli alltför liten för att ge någon märkbar effekt. Figur 20 visar en förenklad bild av uppkopplingen.

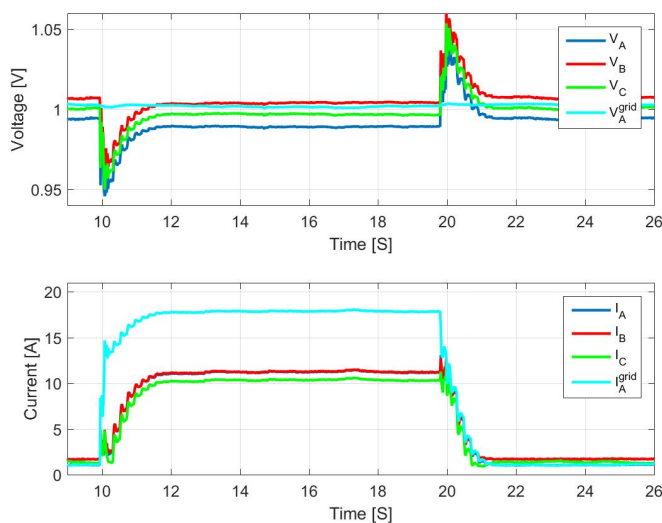


Figur 20 Förenklat schema av uppkopplingen.

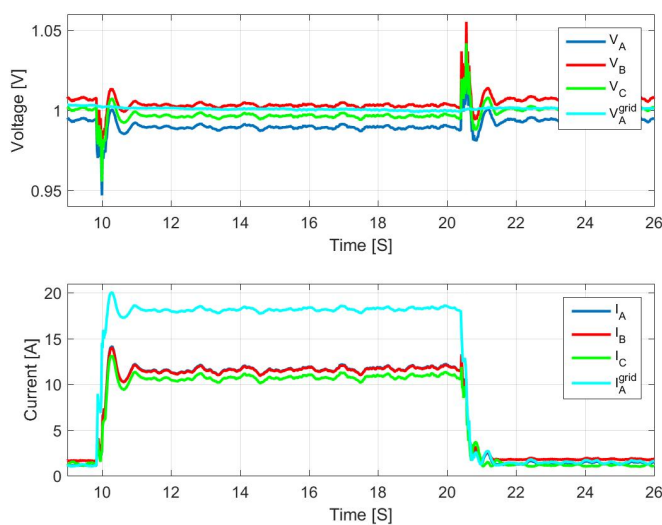
Figur 21-Figur 22 visar spännings- och ström-nivån vid omriktaren och kopplingen till elnätet för fallen med och utan reaktiv effektkompensering. Som kan ses ökar lasten i ett steg vilket medför att spänningen hinner sjunka innan omriktaren kompenserar med reaktiv effekt men efter den initiala dippen matar omriktaren ut reaktiv effekt för att stabilisera spänningen. Genom att justera svarstiden från omriktaren kan en snabbare återhämtning av spänningsfallet erhållas vilket kan ses i Figur 23. Det finns dock risk att en allt för snabb svarstid resulterar i en överkompensation från omriktaren vilket kan leda till oscilleringar i spänningsnivån.



Figur 21 Spännings- och strömnivåer vid omriktaren och kopplingspunkten mot elnätet för fallet utan reaktiv effektkompensering.



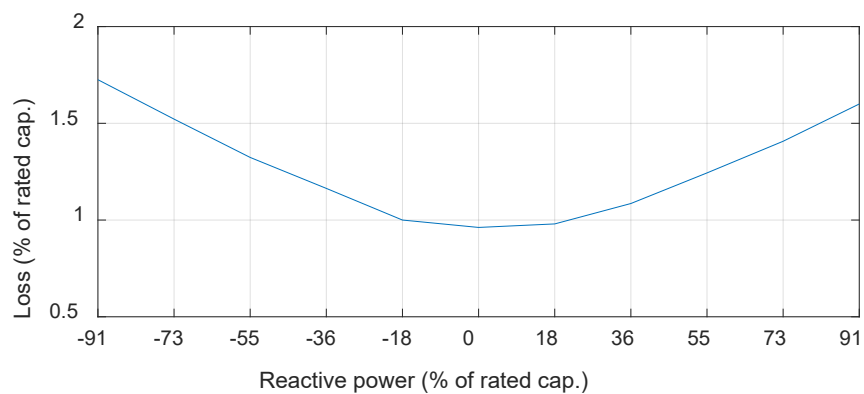
Figur 22 Spännings- och strömnivåer vid omriktaren och kopplingspunkten mot elnätet för fallet med reaktiv effektkompensering, svarstid 0.2 sekunder.



Figur 23 Spännings- och strömnivåer vid omriktaren och kopplingspunkten mot elnätet för fallet med reaktiv effektkompensering, svarstid 20 ms.

4.6.1 Förluster i omriktaren vid reaktiv effektkompensering

Då omriktaren används för reaktiv effektkompensation ökar förlusterna i omriktaren. En mätning av de aktiva effektförlusterna då omriktaren användes för att mata ut/konsumera reaktiva effekt genomfördes på omriktaren som användes i demonstrationen. Resultaten från mätningarna presenteras i Figur 24. Som kan ses kan omriktarens förluster uppgå till omkring 1.5 % av märkeffekten.



Figur 24 Förluster i omriktaren då omriktaren producerar/konsumerar reaktiv effekt.

5 Diskussion

Elfordon i kollektivtrafiken har funnits länge med bland annat tåg, spårvagn och trådbussar. Speciellt för tåg och spårvagnstrafik har ett nytt elförsörjningssystem byggts upp och till viss mån har det varit möjligt att placera matningsstationer vid platser med låg påverkan på elnätet. För elbussar finns det en överhängande risk att laddinfrastrukturen för dessa inte är lika fri i sin placering.

Alla städer har olika förutsättningar vilket leder till att det är svårt att dra några generella slutsatser kring vilken påverkan en storskalig implementering av elbussar skulle få på elnätet. Baserat på vilken typ av laddinfrastruktur som efterfrågas ställs olika krav på elnätet. Depåladdning kräver anslutning till 10 kV nätet alternativt en direktanslutning till högspänningstransformatorstationen om ett stort antal bussar skall laddas. En laddstationer för änd/hållplatsladdning kan, med dagens effektnivåer, anslutas utan större problem till befintligt 10 kV nät i de simulerade områdena. Dock kan det vid en storskalig implementering med fler laddstationer inom samma område bli problem med kapaciteten.

Möjligheten att utnyttja befintliga 400 V nätet är små för effekter över ca 100 kW då kapaciteten i både transformatorer och ledningar är begränsande. Här finns det å andra sidan en stor potential att använda energilager för att möjliggöra anslutning till befintligt elnät. Speciellt för hållplatsladdning finns stora möjligheter att ansluta laddaren till 400 V nätet om energilager används. Då priserna på energilager är höga kan det i många fall vara mer ekonomiskt att investera i en större transformator alternativt en separat transformator för elbussen. En aspekt som inte undersökts i någon större utsträckning i projektet är möjligheten att utnyttja t.ex. energilagret för andra utmaningar, så som integrering av solceller, vilket skulle kunna leda till att investeringar i energilager blir mer attraktiva.

För reaktiv effektkompensering har värdet av att tillföra reaktiv effekt undersökts utifrån syftet att undvika spänningsfall samt för att minska elförlusterna på nätet. Det är dock viktigt att laddstationen är designad så att förlusterna i omriktaren blir låga vid reaktiv effektkompensering då dessa annars riskerar att överstiga förlustreduktionen på nätet. En aspekt som inte undersökts är värdet av att minska den reaktiva effekten från överliggande nät.

Idag finns det inte någon klar struktur kring vem som äger och förvaltar laddutrustningen för elbussarna. I elbussprojektet "ElectriCity" i Göteborg har Göteborg Energi gått in som ägare av laddutrustningen och varit delaktig från projektets början vilket har gjort att de har haft en stor möjlighet att påverka utformning och inkoppling av laddutrustning.

Utifrån projektets resultat kan följande råd på vad som kan vara viktigt för elnätsägaren att beakta vid integrering av laddinfrastruktur för elbussar i befintligt elnät.

Riktlinjer vid installation av snabbladdarutrustning för elbussar

För elnätsägaren är det viktigt att komma in i processen i ett tidigt skede för att möjliggöra krav på laddutrustning och eventuellt alternativa placeringar/inkopplingar av laddstationen. Följande frågor är viktiga att få svar på:

Vilken typ av bussar skall införskaffas?

Är det depåladdning, ändhållplatsladdning eller laddning vid busshållplatserna. Kraven och möjligheterna att minska effekttoppar varierar mellan de olika bussystemen.

Var skall laddstationen placeras?

Möjligheten att installera laddstationer med hög effekt varierar mellan olika områden i nätet. Aspekter som, avstånd till närmsta kabelskåp och nätstation påverkar vilken besparing som kan göras av att utnyttja alternativa metoder så som energilager och reaktiv effektkompensering. Speciellt för reaktiv effektkompensering är nätstyrkan vid anslutningspunkten viktig då det påverkar spänningsfallet från laddstationen.

Vilken laddeffekt skall installeras?

Storleken på laddstationen är faktorn som har störst påverkan på installationsprocessen. En mindre laddstation, upp till 30-50 kW kan i många fall installeras i befintligt 400 V nät utan problem. Vid högre effekter, upp emot 200 kW, och speciellt vid hållplatsladdning, kan framförallt lokala energilager vara attraktivt för att möjliggöra att laddstationen kan installeras i 400 V nätet.

Hur tätt kommer bussarna/hur lång laddtid?

För att ha nytta av t.ex. ett energilager vid laddstationen är det viktigt att det finns möjlighet att ladda upp batteriet mellan att bussarna kommer. Generellt kan sägas att den möjliga effektreduktion som kan göras är lika med laddtiden genom tiden mellan bussarna.

Finns planer på ytterligare laddstationer i området?

De åtgärder som görs idag kan påverka möjligheten att installera laddstationer i framtiden. Finns det planer på att elektrifiera fler busslinjer är det viktigt att ha med dessa aspekter redan nu.

Finns det problem med elkvaliteten idag?

Elbussladdaren kommer att ge upphov till bland annat högfrekventa störningar (övertoner) och spänningsvariationer i nätet. Har området problem med spänningshållning idag kan det vara attraktivt att utnyttja laddaren för spänningshållning i nätet. För att minska problem med övertoner är det viktigt att ställa krav på övertonsinnehållet från laddstationen. Finns planer på flera laddstationer i området kan det vara viktigt att ställa striktare krav på övertonsinnehåll för att behålla en god elkvalitet.

6 Slutsatser

I projektet har en modell utvecklats för att utvärdera elbussars påverkan på elnätet samt hur påverkan kan mildras genom aktiva åtgärder så som lokala energilager, användarflexibilitet eller reaktiv effektkompensering.

Mätningar på befintliga laddstationer visar att elkvaliteten påverkas av laddstationerna men i de undersökta områdena ligger elkvaliteten inom normerna. Mätningar på en induktiv laddstation visar på strömövertonerna från både likriktar- och omriktarledet, dock var dessa av betydligt högre frekvens för den undersökta induktiva laddstationen, främst tack vare högre switchfrekvens.

Resultaten från simuleringarna visar att för de undersökta områdena kan en eller flera laddstationer med dagens storlek anslutas utan att begränsningar i distributionsnätet överskrids. Genom att använda aktiva åtgärder kan den möjliga laddeffekten öka med upp emot 10 % för 10 kV nätet och upp emot 60 kW i 400 V nätet. För laddstationer med låg utnyttjandegrad t.ex. hållplatsladdare kan väsentligt högre effekttökningar nås om energilager med hög effektkapacitet används. Reaktiv effektkompensering visar störst nytta för områden med svaga elnät och där det finns problem med för låg spänningsnivå medan energilager och användarflexibilitet är attraktivt för områden där effekten begränsas av termisk överlast av transformatorer eller kablar.

De utformade styrmetoderna har testats och verifierats i verkligheten och i laboratorium. Resultaten visar att laststyrning kan vara möjligt för att undvika överlast i nätet men att styrningen kan behöva initieras innan bussen börjar ladda då det kan ta tid innan full effektreduktion uppnås. För reaktiv effektkompensering överensstämmer resultaten väl med simulerade resultat.

Kostnaderna för de undersökta teknikerna bör sättas i relation till möjlig besparing i form av undviken nätförstärkning, vilket varierar mellan olika platser. För reaktiv effektkompensering uppskattas kostnaden för implementeringen vara relativt låg, för laststyrning krävs nya affärsmodeller och kostnaden för dessa är svåra att uppskatta. För lokala energilager uppskattas kostnaden för lagret vara hög men visar samtidigt störst möjlighet att möjliggöra att laddstationer för hållplatsladdning kan anslutas till befintligt 400 V nät.

7 Referenser

- [1] "Bilsalget i juli," *Opplysningsrådet for Veitrafikken AS*. [Online]. Available: <http://www.ofvas.no/bilsalget-i-juli/category739.html>. [Accessed: 15-Aug-2017].
- [2] "Climate Plan," *Gouvernement.fr*. [Online]. Available: <http://www.gouvernement.fr/en/climate-plan>. [Accessed: 15-Aug-2017].
- [3] C. A. Programme, "Dutch ministers propose ban on gas, diesel cars by 2025." [Online]. Available: http://climateactionprogramme.org/news/dutch_ministers_propose_ban_on_gas_diesel_cars_by_2025. [Accessed: 15-Aug-2017].
- [4] C. A. Programme, "UK to ban new diesel and petrol vehicles from 2040." [Online]. Available: <http://climateactionprogramme.org/news/uk-to-ban-new-diesel-and-petrol-vehicles-from-2040>. [Accessed: 15-Aug-2017].
- [5] "ElectriCity," *ElectriCity*. [Online]. Available: <http://www.goteborgelectricity.se/>. [Accessed: 15-Jan-2017].
- [6] "Umeå kommun storsatsar på elbussar - Umeå," 13-Feb-2014. [Online]. Available: <http://www.umea.se/arkiv/pressmeddelanden/pressmeddelanden/umeakommunstorsatsarpaelbussar.5.1a5fea8a1437b3e6e52134fb.html>. [Accessed: 15-Aug-2017].
- [7] "Cities – ZeEUS – Zero Emission Urban Bus System." [Online]. Available: <http://zeeus.eu/demonstrations-activities/demonstrations>. [Accessed: 15-Aug-2017].
- [8] "Factbox: Germany, carmakers agree steps to cut diesel pollution," *Reuters*, 10-Aug-2017.
- [9] R. och Regeringskansliet, "Nu blir det möjligt att söka premie för elbussar," *Regeringskansliet*, 30-Jun-2016. [Online]. Available: <http://www.regeringen.se/pressmeddelanden/2016/06/nu-blir-det-mojligt-att-soka-premie-for-elbussar/>. [Accessed: 15-Aug-2017].
- [10] "SL och Nobina utvecklar trafiken i Norrtälje och satsar på elbussar." [Online]. Available: <http://www.nobina.com/sv/sverige/nyheter/sl-och-nobina-utvecklar-trafiken-i-norrtalje-och-satsar-pa-elbussar/>. [Accessed: 15-Aug-2017].
- [11] Presskontakt, dygnet runt Presskontakt, and 08-410 653 10, "Skånetrafiken förlänger avtal med Nobina och satsar på elbussar," *Mynewsdesk*. [Online]. Available: <http://www.mynewsdesk.com/se/nobina/pressreleases/skaanetrafiken-foerlaenger-avtal-med-nobina-och-satsar-paa-elbussar-2020661>. [Accessed: 15-Aug-2017].
- [12] M. Mohamed, H. Farag, N. El-Taweel, and M. Ferguson, "Simulation of electric buses on a full transit network: Operational feasibility and grid impact analysis," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 142, pp. 163–175, Jan. 2017.
- [13] "Scania testar trådlös snabbladdning i stadstrafik," *Scania Sverige*. [Online]. Available: <https://www.scania.com/se/sv/home/experience-scania/news-and-events/News/archive/2016/12/scania-testar-tradloes-snabbladdning-i-stadstrafik.html>. [Accessed: 20-Aug-2017].
- [14] "Världens första elväg invigd," *Scania FINLAND*. [Online]. Available: <https://www.scania.com/fi/sv/home/experience-scania/news-and-events/News/vaerldens-foersta-elvaeg-invigd.html>. [Accessed: 20-Aug-2017].

- [15] O. Olsson, A. Grauers, and S. Pettersson, "Method to analyze cost effectiveness of different electric bus systems," presented at the EVS29 Symposium, Montréal, Québec, Canada, 2016.
- [16] S.-E. Berglund and J. Åkerlund, "EMC, elkvallitet och elmiljö- guide för elanvändare och allmänt sakkunniga inom elområdet."
- [17] F. Carlsson and A. Badano, "Elektroniska Laster -Omvärldsanalys," *Elforsk* 08:51.
- [18] G. Morén, *Energimarknadsinspektionens föreskrifter och allmänna råd om krav som ska vara uppfyllda för att överföringen av el ska vara av god kvalitet*, vol. EIFS. .
- [19] "SEK Svensk Elstandard - Standarder SS-EN 50160, utg 4:2011." .
- [20] "IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems," *IEEE Std 519-2014 Revis. IEEE Std 519-1992*, pp. 1–29, Jun. 2014.
- [21] S. Seo, Y. Cho, and K. B. Lee, "LCL-filter design for grid-connected three-phase inverter using space vector PWM," in *2016 IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia)*, 2016, pp. 389–394.
- [22] C. Chang and M. A. Knights, "Interleaving technique in distributed power conversion systems," *IEEE Trans. Circuits Syst. Fundam. Theory Appl.*, vol. 42, no. 5, pp. 245–251, May 1995.
- [23] K. Strunz, *Benchmark Systems for Network Integration of Renewable and Distributed Energy Resources*. .
- [24] A. A. Sallam and O. P. Malik, "Voltage Variations," in *Electric Distribution Systems*, Wiley-IEEE Press, 2011, pp. 319–359.
- [25] R. E. Rosenthal, *GAMS — A User's Guide*. Washington, DC, USA: GAMS Development Corporation.
- [26] P. Jahangiri and D. C. Aliprantis, "Distributed Volt/VAr Control by PV Inverters," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 3, pp. 3429–3439, Aug. 2013.
- [27] J. Kensby, A. Trüschel, and J.-O. Dalenbäck, "Utilizing Buildings As Short-Term Thermal Energy Storage," presented at the The 14th International Symposium on District Heating and Cooling, Stockholm, Sweden, 2014, vol. 2014, pp. 211–220.
- [28] A. Hultin and J. Wolgers, "Integration of fast charger stations: A technical investigation on grid connected high power converters and its filter solutions with focus on harmonic emissions and size reduction by utilising interleaved operation," Göteborg, Master thesis.
- [29] E. Karlsson, *Charging infrastructure forelectric city buses: An analysis of grid impact and costs*. 2016.

SNABBLADDNING AV ELBUSSAR I DISTRIBUTIONSNÄT

Elbussar ses av många som ett attraktivt sätt att minska de lokala utsläppen från kollektivtrafiken och klimatpåverkan. Men bussarna behöver laddas vilket kan leda till påfrestningar för det lokala elnätet som kan behöva förstärkas för att klara den ökade belastningen.

Här presenteras en modell för att uppskatta hur snabbladdning av elbussar påverkar distributionsnätet och hur olika strategier och tekniker skulle kunna användas för att minska påverkan.

Resultaten från simuleringar på ett verkligt distributionsnät visar att med dagens effektnivåer för snabbladdare kan en eller flera laddare implementeras i 10 kV nät utan förstärkningar av nätet. Med de utformade strategierna skulle den möjliga laddeffekten öka med omkring 10 procent i 10 kV nätet. En reaktiv effektkompensering ger störst nytta för laddstationer installerade i svaga elnät medan lokala energilager vid laddstationen skulle kunna göra det möjligt att koppla in laddutrustningen till ett befintligt 400 V nät.

Ett nytt steg i energiforskningen

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



Energiforsk