

En fallstudie av kontrollerad elbilsladdning och dess påverkan på elnätet

LUNDS UNIVERSITET

Jansson, Sebastian

Examensarbete på Civilingenjörsnivå
Avdelningen för Energihushållning
Institutionen för Energivetenskaper
Lunds Tekniska Högskola | Lunds Universitet



Förord

Denna studie utfördes utav mig, Sebastian Jansson, våren 2018 och markerar slutet på min tid som civilingenjörstudent på programmet Ekosystemteknik/Environmental engineering vid Lunds Tekniska Högskola. Studien har utförts för Avdelningen för Energihushållning vid LTH och som en del i ett pågående projekt för E.ON Energidistribution i Malmö.

Ett stort tack till de många personer jag varit i kontakt med som på något sett assisterat mig med detta arbete. Jag vill även rikta ett särskilt tack till tre personer. Min handledare på LTH Kerstin Sernhed samt mina handledare på E.ON Ola Ivarsson och Peter Andersson. Ni är alla otroligt kunliga inom era respektive områden vilket varit till stor hjälp med allt från att agera bollplank och stöttepelare vilket hjälp mig ro arbetet i hamn.

Vidare vill jag ta tillfället i akt att tacka professorer och föreläsare från mina studieår. Sist men också allra viktigast, till mina medstudenter som både hjälpt mig och varit anledningen till att jag haft en underbar till på LTH. Tack för allt.

Malmö, Maj 2018



Sebastian Jansson

Sammanfattning

Syftet med denna studie var att i ett lokalt elnät undersöka hur laddningen av elbilar påverkar lastmönster i elnätet, både i nuläget och i framtida simulerade situationer. Samt undersöka vilken potential det finns att flytta laddningen över tid i testområdet i Hyllie, Malmö. Detta genom att simulera en del av elnätet i Hyllie och styra elbilsladdningen för att kapa effekttoppar. Därefter kartlägga konsekvenserna för komponenter i elnätet, överbelastningar, spänningsnivåer med mera. Idén till studien kommer från E.ON Energidistribution där arbetet utfördes handlett av Ola Ivarsson och Peter Andersson. Arbetet skrevs för Institutionen för Energivetenskaper vid Lunds Tekniska Högskola, handlett av Kerstin Sernhed.

Under de senaste fem åren har antalet elbilar i Sverige ökat kraftigt och enligt prognoser kommer antalet försätta stiga. År 2029 väntas antalet elbilar på Sveriges vägar överstiga en miljon. Ökningen innebär att elbilarnas laddning har en växande inverkan på elnätet. Något som knyter samman de två tidigare åtskilda branscherna, elsystemet och transportsektorn. Om elbilar blir en belastning för elnät eller en möjlighet att bidra till stabilitet återstår att se men E.ON vill skapa förutsättningar för det senare. Utifrån detta har ett projekt på E.ON Energidistribution vuxit fram där detta arbete är en del av inledningsfasen. Detta arbete hoppas hjälpa till med att staka ut vägen för en lyckad integrering av elbilen i samhället.

Detta arbete gjordes i två olika faser för att ge svar på frågeställningar som formulerats. Den första fasen var analys av historisk data som bestod av effektflödet i lokalnätet samt data från elbilsladdningen vilket innefattade anslutningstid, laddad energi med mera. Här undersöktes vilka möjligheter som finns att kontrollera laddningen. Den andra fasen var simuleringar av framtida scenarion för att bredda kunskapen hur kontrollerad elbilsladdning hänger samman med parametrar som effektkapning, överbelastningar och spänningsnivåer.

Resultatet från den historiska analysen visar att det finns potential att styra laddningen av två huvudsakliga anledningar. Den ena är att belastningen på nätstationen i Hyllie har ett tydligt varierande förbrukningsmönster där lasterna från elbilsladdningen adderas till existerande effekttoppar. Den andra anledningen är att elbilarna står anslutna betydligt längre tid än vad som krävs för att få full laddning. Omkring 70 % av den anslutna tiden är oanvänd, tid som laddningen kan flyttas inom då elnätet är under lägre belastning. Framtidssimuleringarna visar de mer tekniska aspekterna och möjlig vinning för elnätet om man styr laddningen för att undvika effekttoppar. Resultatet visar möjligheter för effektkapning upp till 15 % på Hyllie transformatorstation och att kapa belastning på kablarna med upp till 30 %, beroende på scenario.

Nyckelord: Kontrollerad elbilsladdning, effektreducering, fallstudie, Hyllie elområde

Abstract

The purpose of this study was to investigate how the charging of electric vehicles (EV) affected load patterns in a local electricity grid, for present time and in future simulated situations alike. Furthermore, to see if there were any potential of moving the EV charging over time in the testing area in Hyllie, Malmö. The method was to simulate a part of the Hyllie power grid and controlling the charging patterns to shave the power peaks to reveal the consequences for components in the grid, overloads, voltage levels etc. The idea for this study comes from E.ON Energidistribution where the study was preformed, supervised by Ola Ivarsson and Peter Andersson. It was also supervised by Kerstin Sernhed from the Department of Energy Sciences at Lund University.

In the last few years, the number of electric cars in Sweden has increased rapidly. According to prognoses, shall the quantity continue to increase in the nere future. In 2029 the number of electric cars on Sweden's roads are expected to exceed one million units. Such an increase means that charging of electric cars will have increasingly influence on power distribution thus connect the two previously separated industries, the power system and the transport sector. If electric cars become a burden for the power grid or an opportunity to contribute to stability remains to be seen but E.ON wants to create conditions for the latter. Based on such knowledge, E.ON Energidistribution created a project where this study was part of the initial phase. This work hopes to help set the way for a successful integration of the electric car.

This study was performed in two phases to answer the formulated questions. The first phase was an analysis of historical data that consisted of electricity use in the area as well as data from charging of electric car, which included time connected, the charged energy and more. Here I investigated the possibilities for controlling the charge. The second phase contained the simulations of future scenarios to broaden the knowledge of how controlled or smart electric car charging is related to parameters such as peak-shaving and voltage levels.

The result of the historical analysis showed two main reasons why controlled charging could reap benefits. One was that the load on the Hyllie network station had a distinctly fluctuating consumption pattern and load from EV charging were added to existing power peaks. The second reason was that the electric cars were connected a considerably longer period than required for full charge. Approximately 70 % of the connected time was unused which represents time that EV charging could be shifted within and instead added to off-peak periods. Simulations of future scenarios showed the more technical aspects and possible profit for the power grid if one controlled the charge to avoid power peaks. Depending on the scenario the result shows peak-shaving up to 15 % on Hyllie transformer station and to reduced load on cables by up to 30 %.

Keywords: Controlled EV charging, peak-shaving, case study, Hyllie power grid

Förteckning över förkortningar

P	Aktiv effekt, mäts i W
Q	Reaktiv effekt, mäts i VAr
S	Skenbar effekt, mäts i VA
VA	Voltampere
VAr	Voltampere reaktiv
SoC	State of Charge
BEV	Battery Electric Vehicle / Fullelektriskt fordon
HEV	Hybrid Electric Vehicle / Hybridfordon
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle / Laddhybrid
CPEV	Charging Point per Electric Vehicle / Laddplats per Elbil

Innehåll

1	Inledning	2
1.1	Syfte	7
1.2	Frågeställningar	7
1.3	Avgränsningar	8
2	Teoretisk bakgrund	10
2.1	Elsystemet	10
2.1.1	Grundläggande begrepp	11
2.1.2	Elnätets överföringskapacitet	12
2.2	Elfordon	14
2.2.1	Hybridfordon	14
2.2.2	Laddhybrid	14
2.2.3	Fullelektrisk fordon	15
2.2.4	Elbilsladdning	15
2.2.5	Laddbehov	17
2.2.6	Smart laddning	18
2.3	Marknadsutveckling för elbilen	19
2.3.1	Miljöfördelar	20
2.3.2	Batteriutveckling	21
2.4	Användarmönster för elbilar och laddning	23
2.4.1	Räckviddsångest	23
2.4.2	Kostnader	23
2.4.3	Acceptans och information	24
2.4.4	Effektreducering / laststyrning	25
3	Metod	28
3.1	Litteraturstudie	29
3.2	Datasamlade och analys av rådata	29
3.3	Uppbyggnad av modell	31
3.4	Verifiering av modell	31
3.5	Analys av nuläget	32
3.6	Framtida scenarier	32
4	Fallstudie utav Hyllies lokalnät	34
4.1	Kapacitet i Hyllies lokalnät	35
4.2	Analys av laddningsmönster för elbilar i Hyllie	37
4.2.1	Effektfördelning	40
4.3	Elnätets struktur	41

4.3.1	Komponenter	43
4.4	Förluster i lokalnätet	44
4.5	Laster på spänningsnivån 10 kV	44
4.6	Genomsnittsbelastning	45
4.7	Högsta belastning	46
5	Nätanalys - Framtidsscenarier	48
5.1	Överbelastning av nuvarande elnät	49
5.1.1	Scenario 1 - Utan kontrollerad laddning	49
5.1.2	Scenario 2 -Med kontrollerad laddning	50
5.2	Uppgraderade kablar, överbelastad nätstation	51
5.2.1	Scenario 3 - Utan kontrollerad laddning	52
5.2.2	Scenario 4 - Med kontrollerad laddning	53
5.3	Nuvarande elnät med ny last och solceller	54
5.3.1	Scenario 5 - Utan kontrollerad styrning	55
5.3.2	Scenario 6 - Med kontrollerad styrning	56
5.4	Följderna i ovanliggande elnät vid kontrollerad elbilsladdning i lokalnätet	57
6	Diskussion	58
6.1	Resultat från historisk data	59
6.2	Resultat från simuleringar av framtidsscenario	59
6.3	Acceptansnivå	60
7	Slutsatser	62
8	Framtida arbete	64
	Referenslista	66

1 Inledning

Detta kapitel ger en inledning till detta arbete. Först presenteras bakgrunden som lett fram till själva arbetet. Därefter följer syfte och problemformulering för arbetet samt presenteras avgränsningar som gjorts under arbetets gång.

Under slutet av 1900-talet tog miljö- och klimatfrågor klivet in i rampljuset och har sedan dess fått allt större fokus i samhället. Teorier om vad som ligger till grund för klimatförändringar har vuxit fram och gått från att vara spekulativt till att vara konsensus på bred front i forskarvärlden, klimatförändringar som registreras är till stor del orsakade av mänsklig aktivitet (Shi, 2003). Oavsett vart man står i frågan går det inte att undvika följderna av denna debatt, för i kölvattnet följer miljöpolitiska beslut, krav på effektiviseringar och klimatsmarta lösningar på löpande band som samhällets alla branscher påverkas av. Två branscher som berörs av detta i stor utsträckning är el- samt transportsektorn. Samhället står inför en ökad elektrifiering och transportsektor genom introduktionen av allt fler elbilar. Med förändringarna följer utmaningar men även möjligheter. Vilken roll och utformningar dessa två branscher kan tänkas ha i ett framtidsscenario är ännu till viss del ovisst men förändringen sker betydligt snabbare än vad som historiskt sett är vanligt (Larsson & Ståhl, 2011).

Teknikutveckling har många gånger en avgörande roll vid större kliv upp i utvecklingsstegen. Detta omfattar alla branscher och kan innebära allt från användning av nya material till implementering av nya koncept och metoder som möjliggör allt från att färdas snabbare till att leva längre. Att världen förändras och utvecklas över tid ses inte som något konstigt, utan något väntat. För de två ovanstående branscherna, el- och transportsektorn gäller dock det omvända. Dessa båda branscher har förändrats relativt lite sedan nittonhundratalets början (Stymne, 2002). Givetvis går det att argumentera vad som är ett stort steg i utveckling men låt oss titta på framstegen för de båda (Kaijser & Kander, 2013). Låt oss börja med en titt på elsystemet och varför det är utformat som det är.

Elsystemet har i stora drag sett snarlikt ut sen det ursprungligen implementerades även om det skalats upp. Naturligtvis har det skett förändringar som att spänningen i många ledningar blivit högre, vilket leder till en effektivare transport av elektricitet. Förändringar i konceptet har dock varit små och är i princip samma nu som för 100 år sedan. Nu som då produceras främst elektriciteten centralt i stora anläggningar, transporteras via elnätet till de platser där elektriciteten konsumeras. Bristen på stora förändringar under det senaste århundradet speglas i detta välciterade uttalande ”*Om Thomas Edison eller vår svenska motsvarighet Jonas Wenström kunnat se in i framtiden skulle de förmodligen nickat ganska igenkännande*” (Larsson & Ståhl, 2011).

Elnätsföretag såväl som dess kunder är beroende av ett starkt nät som kan leverera den el som önskas, vilket är ett av elnätets huvudsakliga syften. Med andra ord är det viktigt att elnätet är korrekt dimensionerat och klarar av att leverera den effekt som krävs för att möta nuvarande konsumtion samt integrera ny produktion (SVK, 2017a). För att minimera förlusterna vid transport och samtidigt upprätthålla säkerhet är elnätet i Sverige uppdelat i stamnät, regionnät och lokalnät som opererar på olika spänningsnivåer.

Elkvalitén har historiskt sett hållit en hög nivå vilket har gjort att incitament till förändring inte varit särskilt starkt. För ett väl fungerande elsystem är det väsentligt att den momentana produktionen och konsumtionen är likvärdiga, vilket innebär en effektbalans. Elsystemet var väl anpassat för detta den tid det implementerades med centraliserad produktion som gick att styra för att matcha den varierande konsumtionen så balansen uppehålls. Denna tid är dock förbi i och med att decentraliseringen av energiproduktion förändrar strukturen på elsystemet i sin helhet. Mycket av den nyligen implementerade distribuerade produktionen innefattar en stor del förnybar energi, den skiljer sig från den traditionella produktionen på så sätt att den är intermittent (Hultman, 2015). Följderna kring dessa förändringar kommer diskuteras vidare men först ges en bakgrund till rådande omställning.

Vid denna typ av större omställningar är det vanligt med flera bakomliggande faktorer, en som tidigare nämnts är ökat fokus på miljöfrågor. Ökande kunskap och fokus har resulterat i försök att minska människans klimatpåverkan och sträcker sig från individers privata ansträngningar till internationella uppsatta klimatavtal och mål såsom Parisavtalet (Regeringen, 2015). Trots liknande direktiv har Sverige valt att spänna bågen högre med nationellt uppsatta mål. Ett av dessa mål är 100 % förnybar elproduktion till 2040, vilket innebär att bland annat fasa ut kärnkraften som står för omkring 40 % av Sveriges nuvarande elproduktion (Regeringskansliet, 2016). Denna elproduktion måste ersättas med förnyelsebar produktion för att möta Sveriges uppsatta miljökrav och energibehov.

Ponera att detta lyckas vilket skulle innebära att 50 TWh/år ersätts med en intermittent energiproduktion där majoriteten kommer från som vind, sol- och vågkraft (Energimyndigheten, 2017). Dessa förändringar ställer nya krav på elnätet som är uppbyggt kring den gamla modellen med centraliserad produktion. Det traditionella tanke sättet där produktionen styrs för att möta konsumtionen blir ohållbar med så mycket intermittenta energikällor som inte nödvändigtvis producerar när energin behövs utan när vinden blåser och solen skiner (Sidén, Hylander, Winkler & Stenqvist, 2016). Med ökad intermittent produktion införs en stokastisk variabel till elsystemets produktionssida vilket kan bidra till osäkerhet i försörjningsprognoser (Ipakchi & Albuyeh, 2009). För att bibehålla ett leveranssäkert elsystem med dessa nya inslag på produktionssidan måste förändringar ske (Carrasco m. fl., 2006). Exempel på sådana lösningar presenteras nedan.

En möjlighet skulle vara genom så kallad laststyrning eller efterfrågeflexibilitet. Det innebär att elkonsumenterna till styrs viss del för att matcha produktionen. Tanken är att undvika att addera last till elnätet då det redan är under hög belastning och istället flytta lasten till off-peak (Albadi & El-Saadany, 2008). Exempel på detta kan vara att tvättmaskinen automatiskt startar på natten istället för tidigare på kvällen, just för på natten är belastningen på elnätet generellt lägre än på kvällen. Möjligheten att styra och sprida ut elkonsumenterna över tid bidrar till jämnare belastning på elnätet, något som har flera fördelar. En sådan fördel är att tekniken möjliggör införandet av mer intermitterant förnybar elproduktion, eftersom konsumtionen kan styras till då vinden blåser. Tanken är att var enskild laststyrning ska vara såpass liten att effekterna inte märks i exempelvis ett hushåll, men om denna teknik skulle appliceras på stor skala kunde detta innebära stora förändringar för energisektorn (Nylén, 2011).

Gränsen mellan elproducent och elkonsument suddas ut allt mer i och med introduktionen av prosumenter (Rathnayaka, Potdar, Hussain & Dillon, 2011). Ordet prosumenter kommer från en sammansättning av orden producent och konsument. Passande nog har prosumenter en anslutning som både konsumerar energi och i olika utsträckning producerar energi. Detta skulle kunna vara ett hushåll som har solpaneler installerat på taket. Elnätet ser detta som en anslutning som skiftar mellan att vara en last och produktionsanläggning. Ett ökande antal anslutningar till elnätet med småskalig produktion synliggör brister med det gamla elsystemet. För att bibehålla en pålitlig försörjning behöver elsystemet anpassas till de nya energiläget med distribuerad produktion och ett dynamiskt energiflöde (Pepermans, Driesen, Haeseldonckx, Belmans & D'haeseleer, 2005). Ur dessa växande utmaningar och behov har en stark tro på "smarta elnät" vuxit fram, vad detta begrepp innefattar och dess relevans presenteras senare i detta avsnitt.

För att återkoppla till uppsatta klimatmål har dessa givetvis stor inverkan på transportsektorn. Ett exempel på detta är målet om en fossiloberoende fordonsflotta år 2030, enligt energimyndighetens definition innebär detta egentligen "*80 procent reduktion av utsläppen av växthusgaser från vägtrafiken jämfört med 2010*" (Regeringen, 2013). Drygt 93 % av energin som används för transporter förbrukas av vägtransporter där fossila drivmedel representerar 80 %. Detta resulterar i att den årliga användning på 80 TWh, 23 % av Sveriges energianvändning, måste ersättas med ett fossilfritt alternativ (Selin, 2016). För att nå uppsatta mål är det uppenbart att det krävs stora förändringar. Många sätter sin tro till två grupper av energibärare. Den ena är biodrivmedel som ökade från 4,6 till 16,9 TWh perioden 2009 - 2016 (Energimyndigheten, 2016b). Den andra energibäraren är elektricitet och vad detta arbete riktar in sig mot.

Med tekniken för elbilar fortfarande i utvecklingsfasen har elektricitet under senare år vuxit sig allt troligare som ett storskaligt framtida drivmedel. (Larsson, 2010). Världsledande biltillverkare så väl som nystartade företag investerar mer i tekniken så antalet modeller ökar för både hybrid- som fulllektriska fordon (Technavio, 2017). Bakomliggande orsaker till det kraftigt ökande intresset för eldrift och varför tillverkare satsar miljarder i utvecklingen av elbilar kommer diskuteras senare i arbetet. I nuläget räcker vetenskapen att antalet elbilar i Sverige har ökat explosionsartat de senaste åren. Antalet ökade från 4000 till 45000 perioden 2014 - 2018, en ökning motsvarande 1125 % (Powercircle, 2018).

Med elbilen suddas den tidigare tydliga gränsen mellan elsystemet och transportsektion ut. De två branscherna går allt mer mot en integrerad framtid med gemensamma faktorer som bilbatterier, laststyrning och elektrifierade vägar. Hur sammansmältningen sköts kommer ha en avgörande roll för Sveriges framtida energiläge då båda områden omfattar en markant del av Sveriges energianvändning. Tillvägagångssättet och vilka följderna blir är ovisst men företag inom elsektorn hissar varningsflaggor vid införandet av en växande eldriven fordonsflotta. Konsensus är att eldriften i sig har stora fördelar som nämnts ovan men det för med sig problem för elnätet vid laddningen (Montin, Björck, Adsten & Haegermark, 2013). Många människor följer en liknande dagsrytm vilket troligen skulle leda till att deras laddningstillfällen skulle sammanfalla till viss del. Något som skulle resultera i ett högt effektbehov under begränsade perioder. Problemet uppstår då ytterligare last adderas till lokalnätet som på platser som redan ligger nära maximal lastfaktor, risken för överbelastning ökar med antalet elfordon. Följderna vid överbelastade nät kan exempelvis vara spänningsfall, lägre leveranssäkerhet och extra förslitning av komponenter. För att undvika sådana problem har det utvecklats metoder och styrsätt som ofta sammanfattas under begreppet ”smarta nät” (Daim, Wang, Cowan & Shott, 2016).

Det finns mycket som pekar på att framtidsscenario där en transportsektor är integrerad med elnätet skulle leda till ett flertal problem, bland annat med kapacitetsbrist i elnätet (Putrus, Swanapingkarl, Johnston, Bentley & Narayana, 2009). Det verkar paradoxalt att sträva mot detta framtida scenario som kan äventyra elförsörjning. Däremot skapar en sammansmältning möjligheter för omställning av de två branscherna, möjligheter att moderniseras och växa. ”Smarta elnät” är ett lovande tillvägagångssätt för att förena de två samt hantera ovanstående problem.

Begreppet smarta nät innebär ett elnät med integrerad informations-, kommunikations- och styrteknik. Mer data från fler punkter med högre upplösning på insamlad data möjliggör att bättre övervaka och koordinera all produktion med elnätets transmissionsförmåga samt slutanvändningen så att kapaciteten är tillräcklig. Detta kan skötas autonomt med hjälp av distribuerad databehandling för att skapa en effektiv elförsörjning med aspekter som ekonomi, tillförlitlighet och hållbarhet (SwedishSmartgrid, 2018). De integrerade kommunikationsmöjligheterna möjliggör att flödet av elektricitet fungerar effektivare ju mer information som existerar kring alla delar i systemet. Framtida system kan med hjälp av historisk data anpassa sig till individuella mönster, vilket gör att systemet blir effektivare över tid då det finns mer data att tillgå. Funktioner som smarta elnät möjliggör en lyckad sammansmältning för fordon och elektricitet genom styra den extra lasten bort från redan högbelastade tidsperioder (Daim m. fl., 2016).

Som nämnt tidigare elektrifieras samhället allt mer och elbilar blir allt vanligare, båda är något som ökar belastningen på Sveriges elnät. Andelen förnybar elproduktion ökar vilket innebär mer intermittent elproduktion. För att möta dessa förändringar möjliggör smart laststyrning en lösning. Detta är vad som ligger till grund för detta examensarbete.

Denna studie görs i samarbete med E.ON Energidistribution i Malmö. Studien är även en del av ett större pågående pilotprojekt på E.ON som hoppas skapa en modell som belyser utmaningar och möjligheter vid den extra last som elbilar tillförs från ett ökande antal elbilar. Denna studie är en fallstudie som baserats på ett parkeringshus i nybyggnadsområdet Hyllie, Malmö. Området valdes då de har moderna laddningsplatser och bra styrmöjligheter. Laststyrningen kommer bestå utav kontrollerad elbilsladdning. Med detta menas att i kommande simuleringar flyttas laddningen från tidpunkter då elnätet är under hög belastningen för att frigöra kapacitet i lokalnätet. Som elnätsbolag är det viktigt för E.ON att vara väl insatt i vad som påverkar elnätet så att distributionen av elektricitet fungerar som den ska. Elbilens påverkan på elnätet är än så länge liten men väntas växa explosionsartat de kommande åren. För att vara väl förberedda på att bemöta elbilens ökande inverkan har E.ON startat flera projekt där laststyrning ligger i fokus. Förhoppningen från E.ONs sida är att hitta sätt att nyttja smart styrning och skapa en lösning som både kunder och E.ON är nöjda med.

1.1 Syfte

Syftet med detta arbete är att genom en fallstudie undersöka vilka möjligheter det finns att styra elbilsladdningen och vilken påverkan styrningen skulle ha på elnätet. Detta för att utöka kunskapen kring bland annat hur styrningen av elbilsladdning kan användas för att kapa effekttoppar och hur spänningsnivåerna påverkas, detta då laster från elbilsladdning ökar.

1.2 Frågeställningar

Konstruktion och ändringar i elnätet kan ta lång tid så det är därför viktigt för E.ON att ligga steget före och vara förberedda med en handlingsplan för att hantera den ökade lasten från elbilar. För att skapa en bra bra handlingsplan behövs kunskap och utifrån detta växte följande examensarbete fram. Studien görs som sagt som en del av ett pågående projekt på E.ON vars huvudsakliga frågeställning är.

- *Vilka förutsättningar finns för att styra elbilsladdning samt hur påverkas elnätet av elbilsladdning i dagsläget respektive av en framtida växande elbilsflotta?*

Denna frågeställning är från ett elnätsbolags perspektiv och syftar på Hyllie området. Frågeställningen delas i detta arbete upp i underliggande frågeställningar.

- [1] *Vilken påverkan har elbilsladdning på Hyllies lokalnät i dagsläget?*
- [2] *Vilken lastprofil ger elbilsladdningen upphov till och finns det möjlighet att flytta laddningen över tid?*
- [3] *Vilken lastprofil har övrigt effektuttag på nätstationen och hur överlappar elbilsladdningens lastprofil med denna, finns här möjlighet till peak-shaving via kontrollerad elbilsladdning?*
- [4] *I vilken utsträckning kommer kontrollerad elbilsladdning kunna påverka lokalnätets effekttoppar och spänningsnivåer?*
- [5] *Vilka av elnätets komponenter riskerar först att överbelastas om effektuttagen ökar?*
- [6] *I vilken utsträckning fortplantas följderna av kontrollerad elbilsladdningen i lokalnätet till ovanliggande elnät?*

Dessa frågeställningar besvaras med två olika metoder. Det ena är med hjälp av en analys av historisk data från Hyllie och utfördes med hjälp av Microsoft Excel. Historiska data innefattade effektuttagen både i lokalnätet och ovanliggande distributionsnät samt data från laddningen av elbilarna. Med analyser av historisk data ska frågorna 1, 2 och 3 besvaras. Den andra metoden är via simuleringar av Hyllies lokalnät. Simuleringen utfördes med hjälp av programvaran Neplan 360 och innefattar hur elnätet belastas i de olika situationerna. Historisk data användes som grund för två simuleringar. Därefter utfördes ett flertal framtidssimuleringar för att se hur elnätet reagerar då belastningen ökar. Med informationen från simuleringarna kunde frågorna 4, 5 och 6 besvaras. Utöver dessa två tillvägagångssätt användes information från litteraturstudier och områdeskunniga på E.ON använts som en stöttepelare. Detta för att tolka data och konstruera verklighetstroga simuleringar.

1.3 Avgränsningar

I detta avsnitt presenteras de avgränsningar och approximationer som gjorts för att begränsa arbetet. Dessa avgränsningar gjordes baserat på litteraturstudie samt experthjälp från E.ON för att i hög mån spegla det verkliga elnätet och situationer. Nedan presenteras avgränsningarna efter kapitel i arbetet.

Kapitel 2, Teoretisk bakgrund

För att begränsa typer av elfordon har denna studie enbart inkluderat elbilar enligt Naturvårdsverkets definition “*ett motorfordon försett med ett drivsystem som innehåller minst en ickeperifer elektrisk maskin som energiomvandlare med ett elektriskt uppladdningsbart energilagringssystem som kan laddas externt.*” (Radloff, 2016) Detta innebär att enbart *plug-in hybrid electric vehicles (PHEVs)* och *battery electric vehicles (BEVs)* kommer gå under betäckningen elbil medan *hybrid electric vehicles (HEVs)* exkluderas, vilket är passande för detta arbete då HEVs inte påverkar elnätet.

Kapitel 3, Metod

Denna studie är en fallstudie som utförs i samarbete med E.ON Energidistribution på lokalnätetsnivå. Studien baseras på ett område i Hyllie, Malmö, med tillhörande mätdata och elnätsstruktur. Då detta är en fallstudie bör resultaten inte generaliseras då de inte behöver vara representativa för alla områden utan snarare fungera som en fingervisning för den potentiella vinningen med att styra elbilsladdning. För att se strukturen av elområdet se *figur 4.8*.

I arbetets simulering görs förenklingen att klumpa ihop alla laster från nätstationer på vardera sida av Hyllie nätstation till en last, tre föreliggande Hylliestationen och åtta efterliggande. Detta ger tillsynes tre ”nätstationer” då den i Hyllie inkluderats. Från den studerade tidsperioden april 2017 till april 2018 finns inte tillfredsställande förbrukningsdata från alla nätstationer efterliggande Hyllie nätstation. Därför approximeras lasten från dessa med skillnaden mellan den totala levererade energin från ovanliggande Hyllie fördelningsstation och energin från fyra först liggande nätstationerna (till efter Hyllie nätstation).

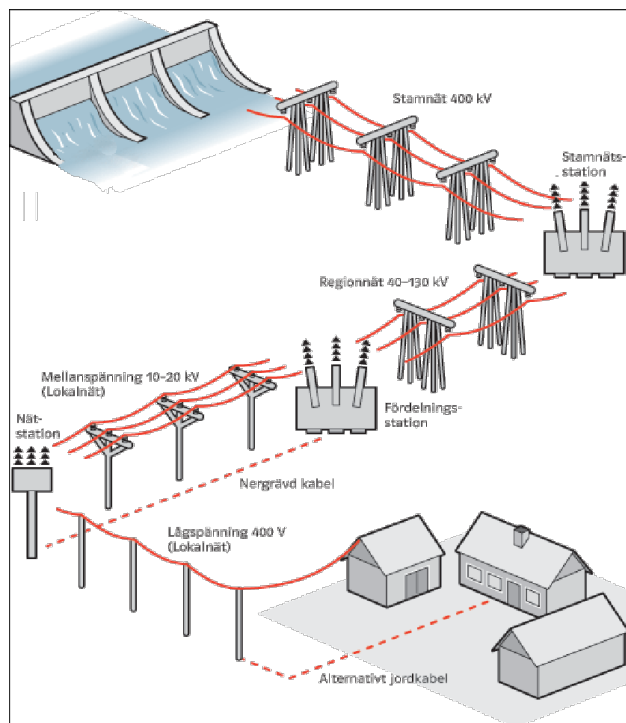
Då data från elbilsladdarna analyserades så användes förenklingen att all laddning i datasetet skett med 3,7 kW. Detta var inte långt ifrån hur det ser ut i verkligheten då alla laddare utom en är inställda att leverera 3,7 kW. Dessutom är det få bilmodeller som stod i parkeringshuset i Hyllie som kan ta emot högre effekt.

2 Teoretisk bakgrund

Detta kapitel tar upp bakomliggande kunskap till arbetet. Först berörs teori kring det svenska elnätet med grundläggande begrepp och effektöverföring. Därefter följer teori angående elfordon, laddningsalternativ och begreppet smart laddning. Därpå behandlas elbilens framtida potential som ligger till grund varför projektet görs. Avslutande belyses hur användarnas vanor påverkar detta arbete.

2.1 Elsystemet

Sveriges elsystem är uppbyggt av olika spänningsnivåer där *figur 2.1* visar principen för denna struktur. Traditionellt flödar effekten från stora produktionsanläggningar och hög spänningsnivå till konsumenterna på låg spänningsnivå. Beroende på läsarens förkunskaper kan det vara bra att läsa följande *avsnitt 2.1.1* som lyfter fram grundläggande begrepp kring elöverföring och effekt. Annars kan läsaren gå till *avsnitt 2.1.2*.



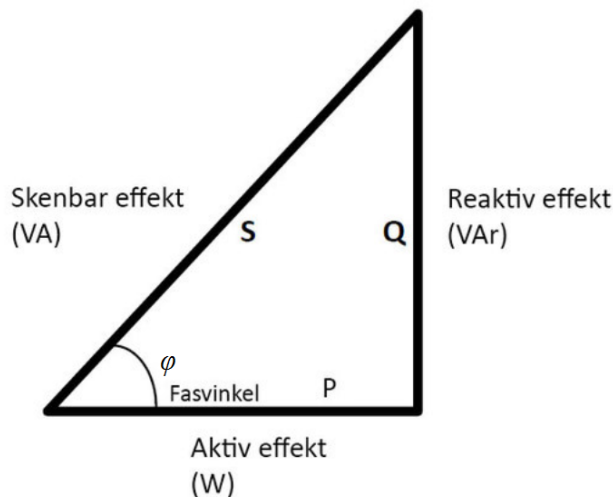
Figur 2.1: Principiell figur över strukturen på Sveriges elnät.
(E.ON, 2015)

2.1.1 Grundläggande begrepp

För att förstå förluster och andra fenomen som förekommer i elnätet behövs en viss insikt i grundläggande begrepp inom ellära. Till och börja med används växelström i delarna av elsystemet som är relevanta för denna studie (SVK, 2017c). Den sinusoidala egenskapen hos växelström ger upphov till olika beståndsdelar vilka beror på fasförskjutningen mellan spänningen och strömmen. Exempel på detta är begreppet effekt som kan användas slarvigt utan att specificera vilken typ av effekt det rör sig om. Det finns skenbar effekt vars beståndsdelar kallas aktiv effekt och reaktiv effekt. Dessa beror på fasförskjutningen och hur dessa förhåller sig till varandra visas i *ekvation 2.1* och *figur 2.2* (Weedy, Cory, Jenkins, Ekanayake & Strbac, 2012) (Van Cutsem & Vournas, 1998). För att ge en överskådlig bild om de olika effekt-typerna ges en kort sammanfattning nedan om dess egenskaper.

- *Aktiv effekt* används för att utföra traditionellt elektriskt arbete och oftast därför det mest intuitiva definitionen av effekt.
- *Reaktiv effekt* användas för systemtjänster likt spänningsreglering i elnätet och inte till att utföra traditionellt elektriskt arbete.
- *Skenbar effekt* är en kombination av de två ovanstående och är relevant för lastfaktor i komponenter samt då ett system överbelastas. Förslagsvis om det enda intresset är utföra mycket arbete och samtidigt undvika överbelasta elsystemet är det alltså önskvärt att minimera den reaktiva beståndsdelan.

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2.1)$$



Figur 2.2: Effektriangeln visar förhållandet mellan skenbar, aktiv och reaktiv effekt. (Intab, 2018)

En populär liknelse som kan underlätta förståelsen hur skenbar effekt innefattas av aktiv och reaktiv effekt är med hjälp av öl i ett glas. Reaktiv effekt representeras av lagret med skum som kan ha viss funktion men oftast vill man att det utgöra en liten del. Aktiv effekt däremot är ”det man vill åt” vilket motsvaras av själva ölen (Csanyi, 2012). Tillsammans fyller de upp glaset vilket i liknelsen motsvarar överföringskapaciteten i elnätet. Om öl och skum tillsammans svämmar över motsvarar detta en överbelastning i elnätet (PowerStudies, 2011).

2.1.2 Elnätets överföringskapacitet

Överföringskapaciteten i elnätet är alltså begränsad av dess komponenter såsom transformatorstationer och elkablar. För en viss spänningsnivå i elnätet varierar strömmen vilket resulterar i effekt som kan ses i *ekvation 2.2*. Då behovet av elektricitet varierar över tid varierar överföringen av skenbar och aktiv effekt över tid, skillnaden mellan de två är det reaktiva bidraget. I lågspänningsnätet är den reaktiva beståndsdelen generellt sett liten då det är nära slutanvändaren där effekten ska användas för att utföra arbete.

Då överföringssträckor är korta, som är fallet för detta arbete, görs ofta förenklingen att förändringar av den reaktiva effekten exkluderas (Expósito, Gomez-Expósito, Conejo & Canizares, 2016). Sammantaget gör det detta den reaktiva beståndsdelen försvinnande liten och den aktiva beståndsdelen är den drivande faktorn.

Hädanefter kommer ordet effekt användas synonymt med skenbar effekt. Beroende på förkunskap hos läsaren går det för enkelhetens skull dock bra att tänka på aktiva effekten som den enda beståndsdelen om detta är mer greppbart, detta då näst intill all effektöverföring utgörs av aktiv effekt. Med detta sagt kommer alla analysdelens komponenter såsom kablers impedans och lasters reaktiva del innefattas för att ge så verklighetstroga scenarion som möjligt.

Som visades i *figur 2.1* så är elnätet uppdelat i olika spänningsnivåer där den främsta anledningen till detta är att minska förluster. Samma mängd elenergi kan överföras med av rad kombinationer av spänningsnivå och strömstyrka (Hauser, Bakken & Bose, 2005). Vanligtvis transporteras elenergin långa sträckor från produktionsanläggning via högspänningsledningar för att transformera ned spänningen i omgångar i närhet av slutanvändarna. Därefter fördelas energin till användare en kortare sträcka då förluster är högre men spänningen låg nog att brukas och säkerhet upprätthållas (SVK, 2017b).

Förlusterna är alltså kopplade till spänningen i elnätet och varför högre spänning leder till minskade förluster kan förklaras med hjälp av nedanstående ekvationer, *2.2 - 2.4*. *Ekvation 2.4* visar att aktiva effektförluster som uppkommer i elnätet ökar kvadratisk med strömstyrkan. Däremot ökar förlusterna proportionellt med resistansen vilket beror på fysiska egenskaper liksom kabeldimensioner och material därför är relativt konstant* (Blomqvist, 2012). Detta är en anledning att undvika en hög ström för att få en effektiv elöverföring. För att överföra en fix effekt kan spänningen höjas och strömmen minskas enligt *ekvation 2.2*. Detta är fördelaktigt då det minskar förlusterna och är en anledning till strukturen på det Svenska elnätet med olika spänningsnivåer som varierar från 400kV till 0,4 kV (SVK, 2017d).

$$P = U * I \quad (2.2)$$

$$U = R * I \quad (2.3)$$

$$P_f = R * I^2 \quad (2.4)$$

*Värt att nämna är att det finns faktorer som påverkar resistansen så som temperatur. Även om dess påverkan är liten ökar motståndet med temperaturen och då även förlusterna (Blomqvist, 2012).

Enligt Energimyndigheten (Energimyndigheten, 2016a) delas elavbrott in i två kategorier, planerade och oplanerade där de senare är vad som syftas på i denna studie. Avbrotten kan ske på alla spänningsnivåer i elnätet men de vanligaste är på distribution - eller lokalnätsnivå. Vilka följer det blir vid ett avbrott beror på vart i elnätet det sker. Om avbrottet sker på lokalnätsnivå kan ett hushåll eller bostadskomplex bli strömlösa. Om felet blir på en transformatorstation blir alla användare som matas från denna strömlösa. Är det en kabel är konsekvenserna vanligen mindre då flera kablar /hushåll matas från en transformatorstation. Om avbrottet istället sker i transmission- eller distributionsnätet brukar strömmen kunna ledas om till en annan rutt för att nå konsumenterna (Energimarknadsinspektionen, 2017a). Detta är möjligt då dessa nät ofta är uppbyggda i slingor och kan levereras på minst två sätt. På så sätt kan delar av elnätet vara helt strömlöst utan att kunder märker av något.

Det finns flera anledningar till varför det blir strömavbrott men den enda anledningen som tagits hänsyn till i denna studie är avbrott på grund av att elnätet överbelastas. Vid överbelastningar används vanligen brytare och fränkskiljare som kopplar bort komponenterna, likt proppar i ett hushåll. Om möjligt så leds som sagt strömmen en alternativ väg och då kringgås felet. Vanligen konstrueras komponenterna för att tåla en lite högre strömstyrka än när den kopplas bort. Anledningen fränkopplingen är för att ha marginal så komponenter inte ska gå sönder direkt och dessutom slits komponenterna betydligt mer vid för höga belastningar. Genom att koppla bort komponenter blir livslängden längre och elnätsbolag slipper då kostnaderna som följer med ny utrustning.

För elnätsbolag kan det ibland bli en ekonomisk balansgång huruvida komponenter borde kopplas bort. Anledningen till detta är om ett nätbolag inte klarar av att leverera elektricitet och ett avbrott sker kan nätföretag, enligt bestämmelser inom ellagen, bli betalningsskyldiga mot de kunder som blivit utan el (Energimarknadsbyrån, 2015). Detta vill elnätsbolag givetvis undvika och då krävs en fungerande infrastruktur. För att minimera slitaget på elnätets komponenter och samtidigt leverera mycket inkomstbringande elektricitet vill elnätsbolagen ha en hög och jämn energiförbrukning (Termens, 2017). Något som skapar incitament för elnätsbolagen att sänka effekttopparna och istället fylla upp dalarna för att jämna ut de variationer som finns.

2.2 Elfordon

På marknaden finns det naturligtvis många olika alternativ för dem som vill gå ifrån förbränningsmotordrivna fordon till ett eldrivet fordon i någon utsträckning. Alternativen kan delas in i nedanstående grupperna hybridfordon, laddhybrider och fulllektriska fordon (Emobility, 2017).

2.2.1 Hybridfordon

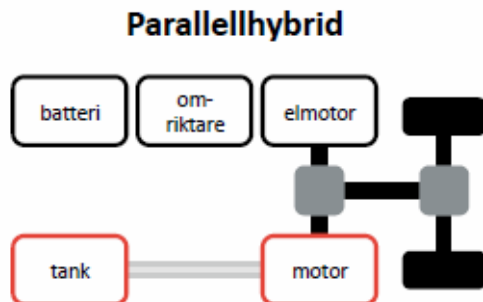
Hybridfordon / Hybrid Electric Vehicle / HEV liknar i stor utsträckning en traditionell bil med en förbränningsmotor som skapar majoriteten av framdrivningen (Musardo, Rizzoni, Guezennec & Staccia, 2005). Det finns dock ett litet batteri som via en eller flera elmotorer driver bilen vid låga hastigheter och vid högre hastigheter används som komplement till förbränningsmotorn (Severinsky, 1994). Batteriet kan ej laddas via elnätet utan använder en regenereringsfunktion som omvandlar energi som uppstår vid inbromsning till elenergi som kan ladda batteriet (Emobility, 2017). HEVs kan ses som första steget mot fulllektriska fordon.

2.2.2 Laddhybrid

En laddhybrid / Plug-in Hybrid Electric Vehicle / PHEV liknar en HEV med två viktiga skillnader. Den ena är att batteriet kan laddas via elnätet. Den andra är att fordonet kan framföras med enbart eldrift även vid högre hastigheter (Morrow, Karner & Francfort, 2008). PHEVs utnyttjar eldriften i större utsträckning då den har ett större batteri för att driva bilen och en mindre traditionell tank (Emadi, Lee & Rajashekara, 2008). Räckvidden vid enbart eldrift burkar vara tillräcklig för dagliga turer. PHEVs delas in i två grupper där skillnaden ligger i de tekniker som fortsätter driften då batteriet är urladdat (Emobility, 2017).

Parallellhybrid

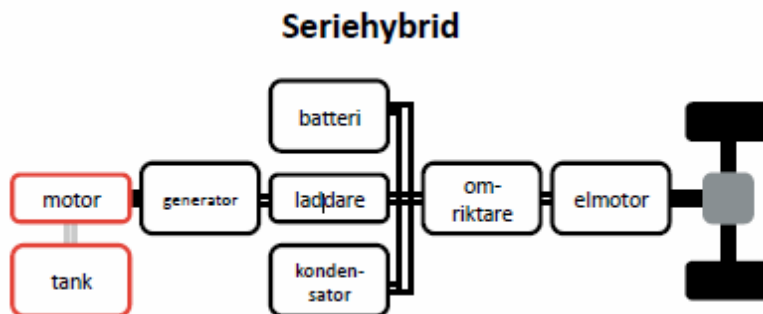
Parallellhybrider har två separata drivsystemen som båda är kopplade till drivaxeln och fungerar var för sig. Det primära drivsystemet är eldrift som via elmotorn driver bilen utan inblandning av förbränningsmotorn. Först när batteriet har laddats ur tar förbränningsmotorn över. Likt en traditionell bil används kraften från förbränningsmotorn för att driva fordonet direkt utan inblandning av elmotor och batteri. Konfigureringen visas i *figur 2.3*.



Figur 2.3: Förenklad principiell figur av konfigurering av en parallellhybrid.
(Larsson, 2010)

Seriehybrid

För seriehybrider är det enbart elmotorn som är i kontakt med drivaxeln och då driver fordonet. På så sätt kan en seriehybrid ses en typ av fullelektrisk bil med ett batteri och en intern produktionsanläggning för elektricitet, detta i form av en förbränningsmotor som via generatoren levererar elenergi till batteriet och/eller elmotorn vilket fortsätter driva fordonet. Konfigurationen visas i *figur 2.4*.



Figur 2.4: Förenklad principiell figur av konfiguration av en seriehybrid.
(Larsson, 2010)

2.2.3 Fullelektrisk fordon

Fullelektrisk fordon / Battery Electric Vehicle / BEV har ingen förbränningsmotor utan enbart använder elektricitet. BEVs laddas via elnätet och drivs av en eller flera elmotorer, batteriet är större jämfört med HEVs och PHEVs så kan färdas längre på enbart eldrift (Nemry, Leduc, Muñoz m. fl., 2009). Denna typ av fordon spås bli allt vanligare i takt med teknikutvecklingen som varit en begränsande faktor, främst batterier. Denna utvecklingen presenteras närmare i *avsnitt 2.3.2*, batteriutveckling. (Emobility, 2017)

2.2.4 Elbilsaddning

En förutsättning för tillväxt av elbilar är naturligtvis laddningsmöjligheter. I Sverige, februari 2017, var ration mellan antalet laddpunkter och elbilar (*CPEV-talet*) 0,1 vilket på senare år varit konstant. Med detta menas att det finns 10 elbilar på vägarna per publik laddpunkt (PowerCircle, 2018). Nyckeltalet CPEV innefattar alltså inte privata laddpunkter så som vid hemmet där majoriteten av laddning sker (Daim m. fl., 2016). 2018 möjliggjordes ett bidrag till införandet av en laddpunkt i hemmet för att underlätta för dem som vill ställa om till eldrift (Naturvårdsverket, 2018).

Elbilsaddning kan ske med olika laddningseffekter där effekten avgör hur snabbt energi överförs och i förlängningen hur lång tid uppladdningen tar. Högre effekt innebär en kortare laddningstid men kan medföra högre kostnader. Detta kan förslagsvis bero på ett högre pris vid etableringen av laddstationen då hårdvara likt anslutningssäkringarna måste uppgraderas för att klara av högre effektnivå. Denna laddning belastar även elnätet mer intensivt (Andersson, 2018). Vanligtvis delas laddningsalternativen i de tre nedanstående kategorierna där laddningstiderna som anges är från tomt till fulladdat batteri (Emobility, 2018b). Alla dessa beskriver effektlödet via en fysisk kontakt till bilen och även om det inte är en del av detta arbete forskas det allt mer på trådlös laddning då bilen exempelvis laddas då den bara står i garaget (Leary, 2014).

Normalladdning

Normalladdning är den vanligaste typen av laddning som innebär att fordon laddas med låg effekt under en längre tid, ofta vid hemmet eller arbetet (Wikström & Lewald, 2017). Laddningspunkterna kan vara privata eller publika platser och det tar omkring 6-8 timmar att ladda ett batteri tillhörande en ren elbil, tiden varierar givetvis bland annat beroende på exakt laddningseffekt och batteriets storlek. Alternativ för normalladdning visas i *figur 2.5*.

Anslutning	Effekt [kW]	Laddtid för elbil [h]	Laddtid för laddhybrid [h]
1-fas växelström (AC). 230V 10A.	2,3	6-8	3-4
1-fas växelström (AC). 230V 16A.	3,6	5-6	2-3

Figur 2.5: De vanligaste alternativen för normalladdning i Sverige.
(Emobility, 2018b)

Semi-snabbladdning

Semi-snabbladdning är mellanalternativet i laddningshastigt. Typisk varaktighet på laddningen är 1-3 timmar med alternativa effekter visas i *figur 2.6*. Denna laddningsalternativ är vanligast förekommande vid platser som shoppingcenter och restaurang med semi-långa parkeringstider. För att generalisera blir en allt större andel av laddarna publika då laddarens möjliga effektuttag ökar, högre effektuttag trissas upp priser för installationen av laddningspunkten.

Anslutning	Effekt [kW]	Laddtid för elbil [h]
3-fas växelström (AC). 400V 16A	11	2-3
3-fas växelström (AC). 400V 32A	22	1-2

Figur 2.6: De vanligaste alternativen för semi-snabbladdning i Sverige.
(Emobility, 2018b)

Snabbladdning

Detta är den variant av laddning som använder hög effekt samt kort laddningstid omkring 20-40 minuter med dess alternativ visas i *figur 2.7*. Snabbladdare sätts vanligtvis upp på platser med kortare stopp, likt bensinstationer och rastplatser (Wikström & Lewald, 2017). Effekten på laddarna varierar men i dagsläget är en levererad effekt på cirka 50 kW, dock blir det all vanligare med laddare med högre effekter likt Teslas Supercharger på 120 kW som ger en laddningstid på minuter (Blomhäll, 2014).

Anslutning	Effekt [kW]	Laddtid för elbil [min]
3-fas växelström (AC). 400V 63A	43	30-40
Likström (DC). 400V 125A	50	20-30

Figur 2.7: De vanligaste alternativen för snabbladdning i Sverige.
(Emobility, 2018b)

Laddkontakter

Till dessa alternativ med olika effektnivåer finns flera olika typer av laddningskontakter som används av olika biltillverkare. De fyra vanligaste kontakter som förekommer på elbilar visas i *figur 2.8*. Av dessa fyra alternativ är två EU-standard, typ2 för normalladdning och CCS för snabbladdning. Kontakt för semi-snabbladdning beror på strömmens karaktär, vid växelström används kontakt TYP2, för likström används CCS kontakten (Emobility, 2018a).



Figur 2.8: Illustration över de fyra vanligaste kontakterna på en elbil.
(Emobility, 2018a)

2.2.5 Laddbehov

Naturligtvis är inte batteriet helt urladdat varje gång elbilen ansluts. SoC är det mått som används för att beskriva hur stor del av batteriets totala kapacitet som finns tillgänglig enligt *ekvation 2.5* (Ng, Moo, Chen & Hsieh, 2009).

$$\text{SoC} = \frac{\text{Tillgänglig energi}}{\text{Batteristorlek}} \quad (2.5)$$

Enligt myndigheten Trafikanalys var den genomsnittliga körsträckan för en personbil i Sverige under 2016 3,4 mil/dag och energiförbrukningen för en elbil brukar approximeras till 2 kWh/mil (Trafikanalys, 2017). Snittanvändningen för en elbil blir då 6,8 kWh/dag vilket naturligtvis är vad som laddas upp oavsett hur stort batteri fordonet har. Om batteriet skulle laddas upp med hjälp av det vanligaste laddningsalternativet, vilket är normalladdning med 3,7 kW, skulle laddtiden vara kortare än två timmar enligt *ekvation 2.6*.

$$\text{Laddningstid} = \frac{\text{Laddbehov}}{\text{Laddeffekt}} \quad (2.6)$$

Med vetskapen att en bil står parkerad omkring 95 % av dygnet finns det potentiell tid vilket över laddningen, och då energibehovet, kan spridas (Radloff, 2016) (Montin m. fl., 2013). Denna mismatchning mellan parkerad tid och laddningstid belyser potentialen kring ett smartare utnyttjande av både elenergi och laddningsinfrastruktur (Pearre, Kempton, Guensler & Elango, 2011). Analysdelen i *kapitel 4* kommer laddtiderna med tillhörande energikonsumtion vara riktiga mätvärden från laddstationer stationerade i parkeringshuset i Hyllie.

2.2.6 Smart laddning

Även om någon typ av användargränssnitt ofta inkluderas innebär ”smart laddning” egentligen laddning som på något sätt är kontrollerad. Det finns olika strategier för att styra laddningen som kan anpassas efter behov och begränsningar. Detta kan innebära med vilken effekt laddningen sker eller när på dygnet. Det är vanligt att försöka undvika tidpunkter då elnätet redan är högt belastat eller produktionen är låg (Ota m. fl., 2012). Självklart finns det gränser både kopplat till abonnemang- och elnätet som måste uppehållas så som spänningsfall och överföringskapacitet (Putrus m. fl., 2009). Då flera elbilar ska laddas, exempelvis vid en företagsparkering, tillkommer fler möjligheter för styrning av klustret vilket mynnar ut i ett flertal olika strategier då tillgänglig kapacitet ska fördelas (Xiang, Kunz & St-Hilaire, 2014).

En strategi för hur en grupp av elbilar kan laddas kan vara ”*delad laddning*” där alla bilar som ansluts delar lika på anslutningens tillgängliga kapacitet (Xiang m. fl., 2014). Detta är helt likställt då tillgänglig kapacitet fördelas på anslutna fordon oavsett anslutningstid eller laddbehov. När en bil kopplas ur eller är färdigladdad fördelas den extra effekten mellan de aktiva anslutningarna (Lopes, Soares & Almeida, 2009).

”*Först till kvarn*” är en strategi där full effekt tilldelas fordonet som först ansluts, om det fortfarande finns tillgänglig kapacitet i laddstationen och fördelningsstation kan ytterligare bilar ansluta på samma villkor (Sortomme & El-Sharkawi, 2011). Om fler fordon önskar ladda än laddstationen kan tillgodose bildas ett kösystem beroende på anslutningstid. För att en ny laddning ska påbörjas måste en laddning avslutas (Daina, Sivakumar & Polak, 2017).

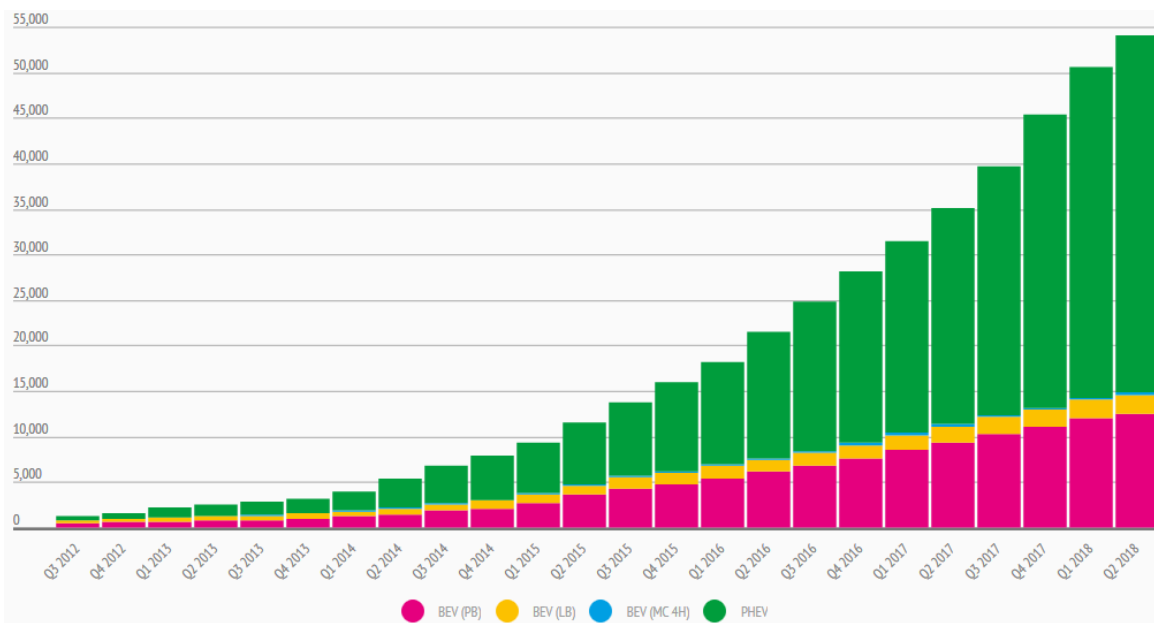
En annan strategi är ”*prissättning*” vilket fungerar som namnet insinuerar, den som betalar mest får högre effekt och prioritet jämfört med dem som betalar mindre (Termens, 2017).

2.3 Marknadsutveckling för elbilen

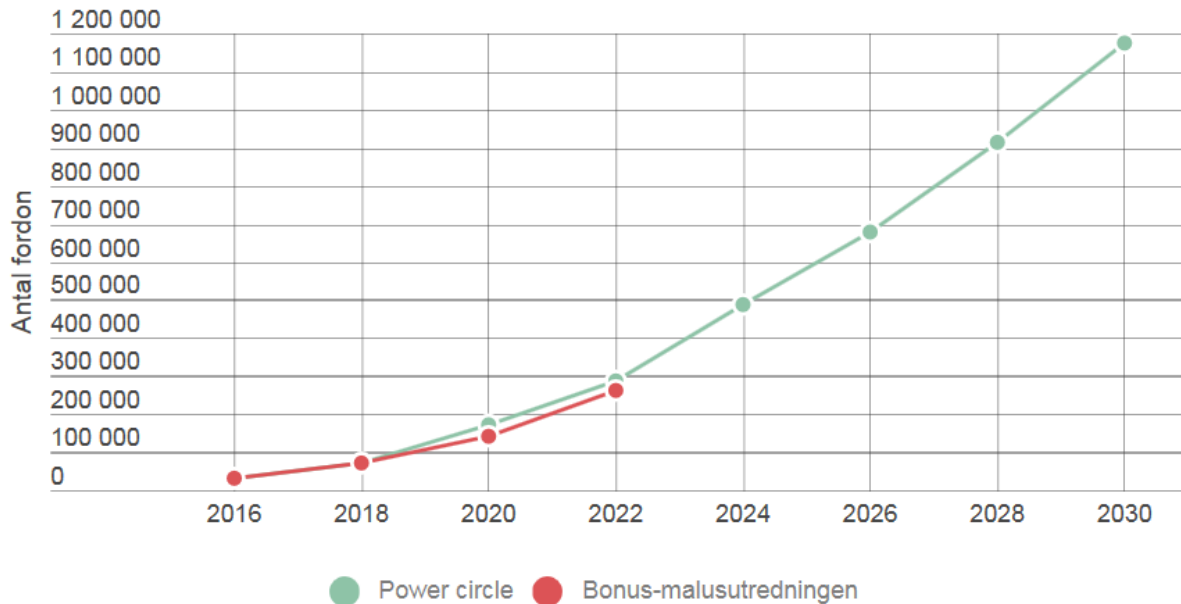
Hur snabbt marknadspenetrationen för elbilen sker finns det givetvis inget absolut svar på. Om man tittar på historisk data och flertalet framtidsprognoser är det mycket som tyder på en framtid där elbilen blir ett allt vanligare inslag de kommande decennierna (Bloomberg, 2017). Hur stort genomslaget blir och hur fort det går varierar mellan prognoserna och beror på flera olika parametrar men gemensamt för de flesta prognoser är att antalet elbilar kommer öka med flera 1000 procent över de kommande 20 åren (Randall, 2018) (BP, 2018). Om prognoser som dessa är korrekta kommer det bli allt viktigare att elbilens integrering med elnätet görs på ett bra sätt. Enligt (Andersson, 2018) på E.ON "omställningen till elbilar är inte en fråga om det ska ske utan när det sker". Andersson påpekar även att nu läggs grunden om detta kan bli ett framtida problem eller en möjlighet. *Figur 2.9* visar hur antalet elbilar i Sverige varierat historiskt sett där det syns en kraftig uppgång under de senaste fem åren. Framtidsprognoser visar att denna trenden verkar hålla i sig vilket kan ses i *figur 2.10*.

Följande beteckningar är relevanta för att tolka figur 2.9.

BEV = Battery Electric Vehicle, Elbil *PHEV* = Plug-in Hybrid Electric Vehicle, Laddhybrid
PB = Personbil *4H* = Fyrhjulning *MC* = Motorcykel *LB* = lätt lastbil



Figur 2.9: Antalet elfordon i Sverige 2012-2018.
(Powercircle, 2018)



Figur 2.10: Prognos över antalet elbilar i Sverige.
(Powercircle, 2017)

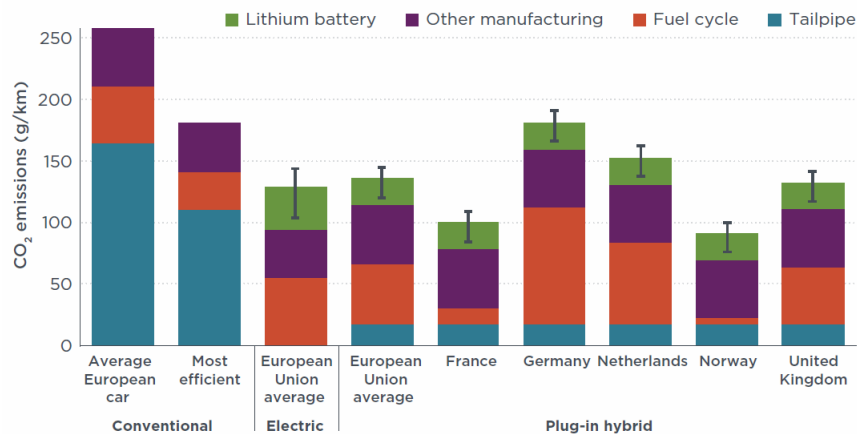
Viktiga faktorer som påverkar den fortsatta genomslagskraften hos elbilar presenteras nedan i avsnitten 2.3.1 och 2.3.2

2.3.1 Miljöfördelar

Varför människor i allt större utsträckning väljer eldrift före den traditionella förbränningsmotorn varierar naturligtvis. Ibland är det den nya tekniken som lockar eller att priset minskat kraftigt under senare år. Ett återkommande argument för att välja en elbil har varit att den anses miljövänlig jämfört med en bil med alternativt (Lin & Wu, 2018). I juli år 2018 kommer tidigare svenska systemet med miljöbilspremier förändras till ett bonus-malus system för att ytterligare gynna bilar med låga utsläppsnivåer och straffa de med höga nivåer (Transportstyrelsen, 2018) (Regeringskansliet, 2017).

Elbilens klimatpåverkan granskas med jämna mellanrum och hur ren driften är beror givetvis på hur den använda elektriciteten produceras. En ny studie visar att dock om elektriciteten är producerad i Polen vars elproduktion är den mest växthusgasintensiva i Europa verkar elbilens utsläpp lägre än genomsnittet för dieslbilar. Detta är baserat på livstidsperspektiv med fungerande originalbatteri under bilens livstid (Hall & Lutsey, 2018). Existerande data antyder att livstiden för batterierna kommer vara längre än livstiden för resten av elbilen.

Från samma studie av Hall & Lutsey kommer figur 2.11 som visar utsläppsnivåer, räknat i koldioxidekvivalenter per kilometer, för elbilar drivna av el från en handfull Europeiska länder. Figuren visar även vilken del i bilens livscykel som utsläppen sker. I jämförelsesyfte skulle en elbil som körs med svenskproducerad el släppa ut omkring 40 gram koldioxidekvivalenter per kilometer (Messaggio, 2017). Utsläppen skiljer naturligtvis mellan modeller men ger elbilar tillgång till tidigare nämnda premier och framtida förmåner med bonus-malus systemet (Transportstyrelsen, 2017).



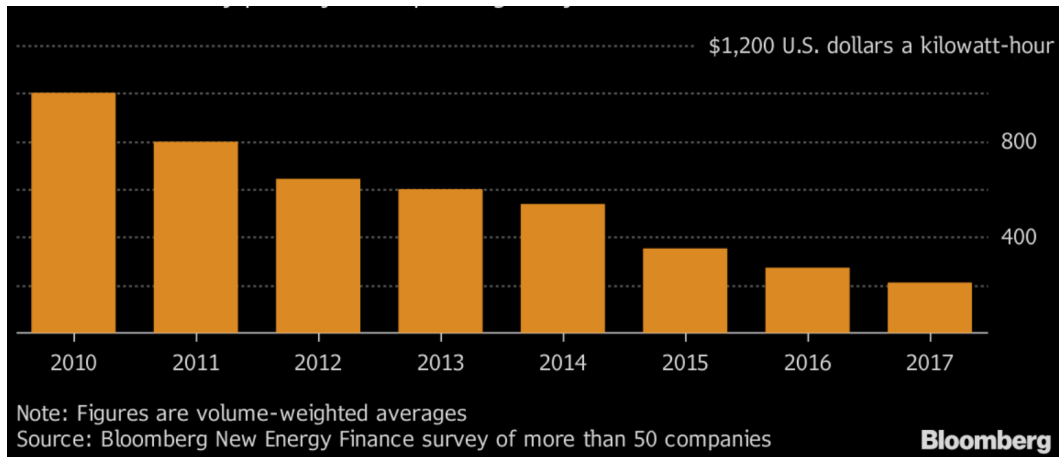
Figur 2.11: Elbilars CO₂-utsläpp kopplat till länders elmix och del av livscykeln. (Hall & Lutsey, 2018)

2.3.2 Batteriutveckling

Tidigare har elbilens användbarhet varit hämmad av problem kring batteriers energitäthet och följaktligen räckvidden. Med detta menas att batterier i praktiken inte kunnat lagra energi tillräckligt effektivt. För att ge elbilen någorlunda räckvidd behövs stora och tunga batterier, vikten av dessa ökar dock förbrukningen. Batteriers energidensitet har alltså gjort att elbilen inte på riktigt kunnat konkurrera med förbränningsmotorn men teknisk utveckling har ökat energitätheten hos batterierna och successivt reducerad denna problemfaktor. Räckvidden hos dagens elbilar är tillräcklig för näst intill alla pendelresor för både BEVs och majoriteten för PHEV med enbart användandet av eldrift (Maryniuk, 2017).

Tesla Roadster som presenterades 2017 är en fyrsitsig sportbil utlovats ha en räckvidd på 1000 kilometer med en batterikapacitet på 200 kWh. (Tesla, 2018). Detta säger en del om de framsteg som gjorts och fungerar som en fingervisning vad som är möjligt med dagens teknik.

En annan viktig drivkraft för elbilens uppsving är priset som blir allt lägre. Detta är starkt kopplat till nedgången av batteripriser som bär markant del av en elbils totala kostnad. (Delucchi & Lipman, 2001). Idag används vanligen litiumjonbatterier i elbilar vars prisutveckling de senaste åren kan ses i figur 2.12. En huvudsaklig orsak för detta är då tillverkningsprocessen skalas upp och tillverkningsmetoder förbättras sjunker priset. Detta kallas ibland "the experience curve" som är applicerbart för näst intill all teknologi (Henderson, 1974). Sammanfattat kan det förklaras med ju mer som byggs, desto effektivare görs det vilket sänker tillverkningspriset (Traywick & Kern, 2018). I vilken grad utvecklingen fortskrider varierar mellan olika tekniker och mognadsgrad (Weiss, Junginger, Patel & Blok, 2010). För litiumjonbatterier under senaste tio åren har energidensiteten ökat med omkring 5-8 % per år som troligen kommer fortgå tillsvidare (Hall & Lutsey, 2018). Detta innebär en fördubbling av batteriernas kapacitet att lagra energi var 9-14 år.



Figur 2.12: Prisutvecklingen hos litiumjonbatterier i \$/kWh, 2010-2017.
(Traywick & Kern, 2018)

Förutom litiumjonbatterier arbetas det även med andra varianter av batterier som har potential att accelerera takten för energilagring och större kliv framåt. "Solid-state"-batterier är en variant som är under utveckling och att skillnad från dagens litiumjonbatterier är dessa en solid konstruktion. Den solida elektrolytkonfiguration ökar hållbarheten/livstiden, kan öka energitätheten med 20-30 % samt fungerar över en ett större spann i temperatur (Chandler, 2015).

Enligt (Curry, 2017) kommer batterier med all sannolikhet fortsatt bli billigare att tillverka vilket påskyndar penetrationen av elbilen i samhället. År 2025 spås kostnaden vara omkring 100 USD/kWh jämfört med 250 USD/kWh år 2017. Mycket pekar även mot att batterier i framtiden kommer användas som kortvariga energilagrar (Messagie, 2017). Med detta skapas en marknad för begagnade batterier som tidigare suttit i elbilar men ändå har omkring 70 - 80 % kvar av original kapacitet. Dessa skulle kunna användas i hushåll där varken platsbegränsning och viktbegränsningar har lika stor inverkan då energitätheten i batterier, kWh/m³ eller kWh/kg, inte är lika viktigt. En sådan utveckling skulle leda till att miljöpåverkan från batteriet kan skrivas av under en längre tid samt ger möjligheter att lagra energi vilket öppnar upp för mer förnybart i elmixen (Hall & Lutsey, 2018).

2.4 Användarmönster för elbilar och laddning

Tidigare studier både internationellt och internt på E.ON Energidistribution ger snarlika resultat, att omkring 70-85 % av all laddning sker på ”långtidsparkeringar” som vid hemmet eller arbetet (Daim m. fl., 2016). Detta omfattar majoriteten av all laddning och är därför en viktig del för en lyckad samhällsintegrering av elbilen (Bühler, Franke & Krems, 2011).

Flera viktiga parametrar har identifierats som påverkar varför konsumenter drar sig för införskaffandet av elbilar varav två bär särskild tyngd (Neumann, Cocron, Franke & Krems, 2010). Den första parametrar är oron kring att batteriet inte är tillräckligt laddat för att klara nästa resa, den andra är till vilket priset en elbil kan införskaffas (Franke, Neumann, Bühler, Cocron & Krems, 2012). Låt oss börja med det första parametern.

2.4.1 Räckviddsångest

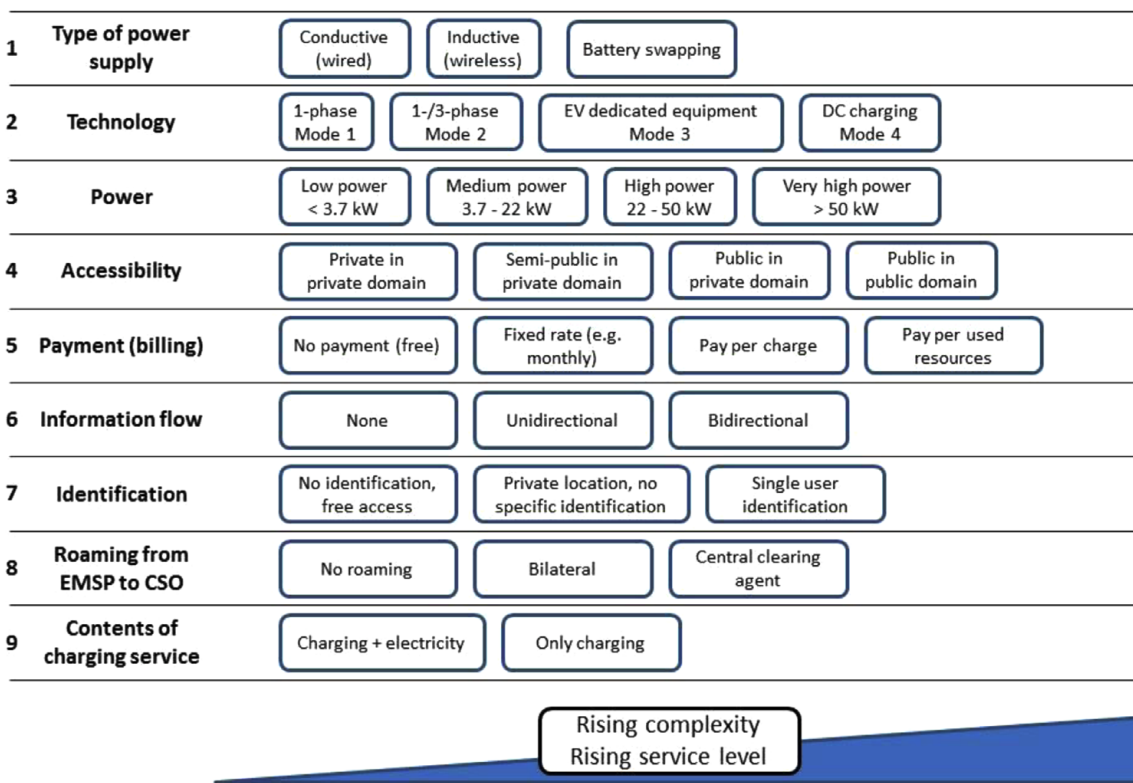
I dagsläget är människor generellt sett mer vana och bekväma att tänka på vilken räckvidd en bil har på halv tank jämfört med halvfullt batteri. Dessutom finns tryggheten att en bil med förbränningsmotor kan med god tillförlitlighet tankas på ett par minuter på en bensinmack. Faktorer som dessa ligger bakom fenomenet *range anxiety* eller *räckviddsångest* som innebär en rädsla att bli strandad då bilen inte når den tänka destinationen. Fenomenet gäller alla fordon men i praktiken är det näst intill enbart BEVs som skapar detta orosmoment, just för det är ett ovant sätt att tänka på elenergi kopplat till räckvidd (Neubauer & Wood, 2014). I viss utsträckning kan detta underlättas med hjälp av snabbbladdningsstationer både i hemmet och på publika platser som substitut för bensinmackar (Botsford & Szczepanek, 2009). Naturligtvis vore det praktiskt ur användarens perspektiv om elbilen kunde laddas på ett ögonblick på många platser för att minska risken att bli strandad. Tekniken för att ladda snabbt är inte problemet då denna utvecklas hela tiden och även om siffrorna inte är bekräftade visar beräkningar gjorda på given information att kommande *Tesla Semi* kommer laddas med över 1000 kW (Teslarati, 2017). Problemet med att installera snabbbladdare är att det är betydligt dyrare vilket återkopplar till den andra parametern som avgör införskaffandet av en elbil, kostnader.

2.4.2 Kostnader

Är man villig att betala går det alltså att få en högre levererad effekt. Som nämnts i tidigare kapitel blir detta inte ett problem om det finns tillgängligkapacitet i nätet bara man betalar den extra kostnaden (Madina, Zamora & Zabala, 2016). Om det inte finns kapacitet kan antalet anslutningar inte öka utan att göra uppgraderingar av elnätet, detta kan vara från komponenter likt säkringar till större åtgärder på transformatorstationer och ledningar (Huppmann & Egerer, 2015) (Schroeder & Traber, 2012). Om behovet skulle uppstå är elnätsbolag tvungna, enligt givna föreskrifter, att uppgradera nätet då de har leveransskyldighet mot kunder (Notisum, 1997) (Kjellman, 2004). Detta kan bli dyra affärer för elnätsbolag vilket kunder kan komma ta del av att betala via elpriset, detta utöver de högre anslutningskostnaderna (Næss-Schmidt, Lisberg Jensen, von Utfall Danielsson, Gustafsson & Karlsson, 2017). Samtidigt som det är önskvärt för ett elbolag att ha många kunder medföljer vissa alltså vissa nackdelar, de måste också ta emot nya anslutningar då igen enligt ellagen de har anslutningskyldighet (Energimarknadsinspektionen, 2017b). Som nämndes tidigare i kontext med batterier blir elbilarna generellt sett billigare som minskar inverkan från denna ”orosparameter”.

2.4.3 Acceptans och information

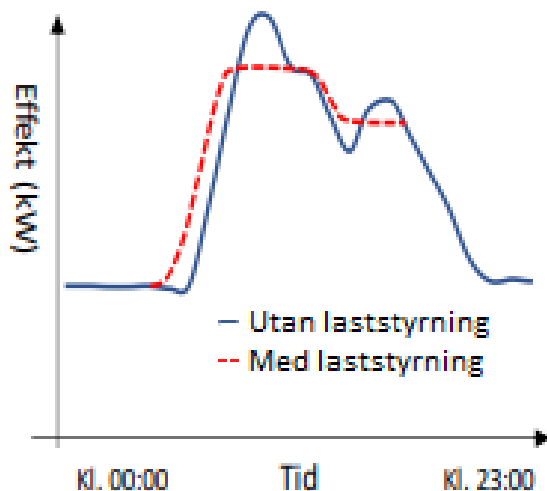
Insamlandet av mer data möjliggör bättre analyser och effektivare styrning som kan bidra till att konsumenter deltar mer aktivt på elmarknaden samt kan påverka sin egen elförsörjning. Detta hänger ihop med "smarta nät" som med hjälp av integrerad mätning skulle förslagsvis kunna presentera elbilens SoC i en smartphone-app (SwedishSmartgrid, 2018). Ett sätt där information kan presenteras tydligt och eventuellt ge möjligheten att styra laddningen. Detta återkopplar till räckviddsångest vilket tycks kunna lindras då konsumenten känner viss kontroll samt har översikt av laddningen, likt att tanka en bil på bensinstation. Som en av mina handledare uttrycker sig "Aspekten med kundanpassade lösningar är en viktig del för att nå acceptans hos kunder." (Andersson, 2018). Detta är önskvärt men betyder inte att det är problemfritt. För att nå en kundanpassad lösning med fler valmöjligheter är det vanligt att komplexiteten ökar, något som kan ses i *figur 2.13*. Risken är att personer överöses med information utan att detta hjälper dem att göra informerade val även om detta är vad de önskar. I andra änden av informationspektrumet kan det finnas en kund som vill att allt sköts automatiskt utan att få någon information. Komplexiteten ökar då lösningen ska funka för alla med flera valmöjligheter (Madina m. fl., 2016).



Figur 2.13: Visar principen med ökande komplexitet för ett antal områden som påverkas av elbilsaddning. (Madina m. fl., 2016)

2.4.4 Effektreducering / laststyrning

Med den pågående förändring inom elsystemet integreras allt fler styrbara komponenter liksom elbilen på konsumtionssidan och småskalig intermittent energiproduktion på produktionssidan. Laddning av elbilar har ett högt effektbehov över kort tid, problemen kan uppstå då många människor lever efter liknande dagsrytm vilket ökar risken att många ansluter samtidigt och lasterna adderas. Då elbilar blir vanligare kommer dessa additiva laster öka, tillfällena då lokalnätet inte klarar av att tillgodose detta behov skulle då också öka. Detta påvisar problemet med nuvarande eller ostyrda laddningstekniker. När elbilar ansluts påbörjas laddning på full effekt. Laddningen fortgår på detta vis tills då batteriet är färdigladdat, vilket kan vara långt tidigare än nästa gång bilen ska användas. Resultatet blir en onödigt hög effekttopp på grund av den elbilslasten adderas till överliggande elnätslast. I teorin kan koordinerad laddning undvika att addera last då lokalnätets belastningsfaktor är hög, genom att istället sprida lasten över tid då övrigt effektuttag är lägre. *Figur 2.14* visar principen av laststyrning representerat av den röda streckade linjen, den blå heldragna linjen representerar en lastprofil utan styrning (Termens, 2017). Genom att koordinera när laddningen sker och styra den bort från högbelastade tidsperioder skulle alltså effekttopparna minskas.



Laststyrning

Figur 2.14: Exempel på hur laststyrning kan påverka en lastprofil, här genom att sänka effekttoppen. (Termens, 2017)

Ytterligare vinning finns att göra om laddningen styrs till tidpunkter med överproduktion eller låg konsumtion jämfört med produktion, vilket är en allt vanligare syn i ett elsystem med växande andel intermittent elproduktion likt vindkraft (Svensk-Energi, 2015). Exempel på detta har setts i Danmark vars elproduktion under 2017 kom över 43 % från vindkraft. Med såpass stor andel av den totalt installerade effekten har vindkraftverken vid tillfällena producerat mer än vad som använts och vad som kunnat exporteras (Nyteknik, 2018). Detta resulterade i ett negativt elpris som innebär att elbolagen betalar kunder för att använda el, ett gyllene tillfälle att ladda elbilen (Energinet, 2010). Även om just negativa elpriser hör till ovanligheterna så visas principen där smart laddning bidra till användarnas ekonomiska vinning då intermittent produktion ökar. Förnybar energi innebär utmaningar då produktionstillfällen är okontrollerbara men har även diskuterats om dess förmåga att bidra till en stabil elleverans (Söder, 2014). Effektförbrukning har på senare tid fått allt större fokus vid sidan av energiförbrukningen, något som kräver mätdata med högre upplösningen men möjliggör nya energitjänster. (Cao m. fl., 2012).

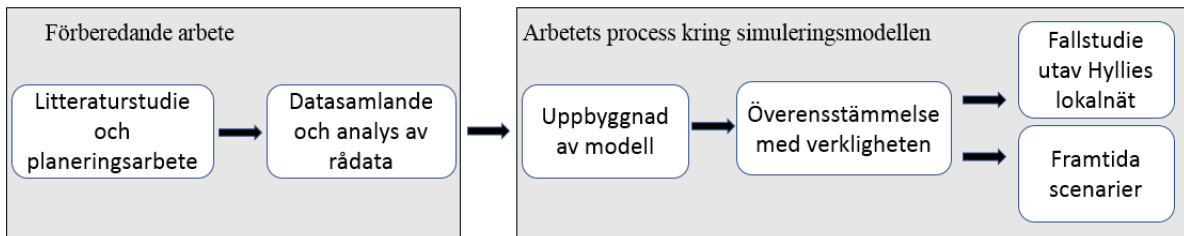
Med både fluktuerande elpris och belastning utgör elbilens penetration i samhället en möjlighet för elbolag såväl som privatpersoner. Vilken nytta som kan möjliggöras beror på kommande förberedelser inom bland annat el- och kommunikationssystemet vilka kan möjliggöra effektiv styrning (Yang, He & Fu, 2014). Styrningen av elbilsladdning är ett område där forskning och utveckling tros växa exponentiellt de kommande åren för att hitta effektivare strategier (Uyeki, 2015).

3 Metod

Här beskrivs arbetsprocessen vilken kan delas in i två delar. Första delen bestod av förarbete till simuleringarna med bland annat litteraturstudie och datasamlande som ligger till grund för simuleringarna. Den andra delen var arbetet med att bygga upp en simuleringsmodell och med hjälp av denna genomföra simuleringar samt tolka resultat.

Det inledande arbetet bestod av att sätta lämpliga systemgränser för arbetet baserat på information från litteraturstudie och samtal med handledarna på E.ON. Något som mynnade ut i att studien omfattar de laster som matas via Hyllie nätstation, dessutom innefattades laster från ovanliggande elnät, spänningsnivån 10 kV, för att kunna se hur ovanliggande elnät påverkades av kontrollerad elbilsaddning. Den övre avgränsningen i elnätet gjordes vid transformatorstationen på nivån 130 kV. Genom att lägga studien på rätt spänningsnivå i elnätet skapades förutsättningarna att besvara de frågeställningar som presenterades i arbetets inledning, se *avsnitt 1.2*.

Figur 3.1 visar en översikt av arbetsgången med arbetets två faser.



Figur 3.1: Översikt av arbetsgången för arbetet.

3.1 Litteraturstudie

Meningen med litteraturstudien var generellt sett att hitta relevanta tidigare studier för att dra lärdom av dessa till detta arbete. Detta för att dels skapa verklighetstrogna scenarion till simuleringsmodellen och samtidigt förstå faktorer som kunde påverka detta arbete, sammantaget hoppades litteraturstudien resultera i insikter som skulle underlätta att besvara frågeställningarna. Arbetet innefattar både tekniska aspekter samt ”mjukare” faktorer såsom mänskligt beteende. Lärdomar om dessa mjukare delar kommer från litteraturstudien. Däremot så påverkar dessa två sidor ofta varandra, vilket ibland gör dem svåra att särskilja.

För de tekniska aspekterna var målet generellt att hitta tekniska framsteg, trender och prognoser som kan visa hur tekniken för elbilar utvecklas. Med bättre teknik möjliggörs konstruktionen av elbilar som i större utsträckning fyller behovet för fler människor, teknikutvecklingen påverkar alltså antalet framtida elbilar vilket påverkar flera av frågeställningarna innehållande framtidsperspektivet. De mjukare faktorerna har också en stor inverkan på arbetet då en elbilsägare förslagsvis måste gå med på att elbilsladdningen kontrolleras, oavsett hur bra tekniken är. Denna kunskap hjälper till med att besvara den mjukare delen av flera frågeställningar, förslagsvis *vilka möjligheter finns att kontrollera elbilsladdningen?* Litteraturstudien baserades till stor del på vetenskapliga artiklar som hittats via Google Scholar, i så stor mån som möjligt valdes välciterade artiklar som ofta tyder på en hög kvalitet av studien. Bland de många sökningar som gjordes fanns ett antal återkommande sökord såsom *EV charging, peak-shaving, demand response, smart charging* eller dess svenska motsvarigheter. I första hand användes vetenskapliga artiklar, rapporter från myndigheter och personliga samtal med sakkunniga som informationskällor då informationens trovärdighet håller en hög nivå. I detta arbete berörs flera områden där det på senare tid skett mycket utveckling, likt elbilar och smarta mätare, därför valdes dessa artiklar även utifrån hur nyligen studien genomfördes. Då utveckling sker såpass snabbt som den gör var det inte alltid lätt att hitta önskad eller senaste informationen från de två ovanstående informationskällorna. Då användes exempelvis vissa företagshemsidor för att hämta information men detta rörde sig om mindre och specifika delar som exempelvis dagens högsta kommersiella laddningseffekt. För att upprätthålla en hög validitet i detta arbete användes två eller fler olika källor som gav samma information. Detta gjordes i så stor utsträckning som möjligt under hela studien.

3.2 Datasamlade och analys av rådata

Nästa steg i förarbetet innebar datasamlade till simuleringsmodellen som skulle representera den studerade delen utav Hyllies elnät, modellen sträcker sig från utmatningspunkterna på nivån 0,4 kV till Hyllie fördelningsstation på nivån 130 kV. Majoriteten av datasamlandet gjordes under denna fas av arbetet även om kompletterande datasamling fortgick under arbetes gång. Denna data innefattade historisk förbrukningsdata samt information om komponenter inom systemgränserna. För att samla in data för de olika komponenterna användes främst programmet Digpro Power (dpP) som är E.ONs nuvarande programvara som används för att hantera lågspänningsnätet. Från dpP samlades data om de ingående komponenternas egenskaper. För en typ av kabel saknades det data från dpP så för att komplettera denna data användes intern information på E.ON och ELEFs produktkatalog.

Hur mycket energi som fördelats och använts i de olika punkterna inom systemgränserna hämtades från följande punkter i elnätet.

- Från det fack i fördelningsstationen i Hyllie som matar de relevanta nätstationerna.
- Från de tre ovanliggande nätstationerna (innan Hyllie nätstation i kopplingschemat) som matas via tidigare nämnda fack.
- Enskild förbrukningsdata från de olika anslutningarna som matas via Hyllie nätstation, detta inkluderar elbilsladdningens totala förbrukning.
- Mer specifik data från enskilda laddningssektioner innehållande inkopplingstid, fränkopplings-tid, förbrukning med mera.

Förbrukningsdata sträcker sig över ett år, från april 2017 till april 2018. I dataseten finns ett undantag som rör data för elbilsladdningen. Anledningen är att elbilsladdningen anslöts först i oktober 2017 så innan dess fanns ingen data att hämta. Data från elbilsladdningen sträcker sig alltså från oktober 2017 till april 2018.

Med insamlad historisk rådata utfördes ett flertal analyser. För elanvändningsmönster från enskilda effektuttag vid Hylliestationen utfördes analyserna med målet att skapa insikt kring potentialen för kontrollerad laddning. Om det fanns tydliga fluktuationer i effektuttaget från Hyllie nätstation skulle smart laddning kunna förskjuta elbilsladdningen till off-peak. Det utfördes även analyser av det sammantagna effektuttaget från elbilarnas laddningspunkter. Denna data innefattade mer data med högre upplösning. Denna data användes för att se i vilken grad elbilsladdarna användes, när på dygnet laddningen skedde och med vilket effektuttag. Data från elbilsladdningen och data från den övriga elanvändningen i området kunde tillsammans spegla det totala effektuttaget på Hylliestationen. Om tillfällena med hög belastning överlappade visade detta på hur laddningen kan förskjutas för att minska den totala effekttoppen.

Av elbilarnas registrerade laddningstillfällen uteslöts vissa värden från dataseten och analysen. Värden uteslöts om de ansågs felaktiga eller ofullständiga baserat på nedanstående grunder. Sammantaget var det cirka fem procent av mätningarna som föll bort.

- Misslyckad registrering av laddtiden: Energi har överförts men den registrerade tiden för laddningen är 0 sekunder.
- Laddarnas maxeffekt överskrids: Anslutningstiden är för kort för att mottagit noterad energi. Det maximala effektuttaget sattes till 3,7 kW.
- Laddningstillfällen då ansluten tid varit avsevärt mindre än tiden för laddningssektionen.
- Ingen laddning: Det har registrerats att bilen kopplats in men inte mottagit någon energi.
- Tillfällen då inkopplad tid är kortare än fem minuter har uteslutits då dessa tros vara mätfel samt har liten inverkan på simuleringen.

3.3 Uppbyggnad av modell

I detta skede inleddes arbetets andra del vars första steg var att skapa en simuleringsmodell för att efterlikna existerande elnät. Med detta menas den del av elnätet som innefattas inom avgränsningarna. Simuleringsmodellen byggdes upp i E.ONs nya simuleringsprogram Neplan 360. Detta arbete utfördes med stöttning från en tekniker från företaget Neplan. Modellen byggdes upp med hjälp av den urvalskatalog som finns i Neplan 360 samt reell data om elnätets komponenter. Modellen speglade verkligheten väl trots att det gjordes approximationer i simuleringsmodellen, både för vissa komponenter i elsystemet och laster. För komponenterna var det en kabelsort i det verkliga elnätet som inte stämde överens med kablar E.ON brukar använda, därför existerade denna exakta kabeln inte någon intern katalog. Därför rådfrågades en teknisk expert och en konstruktör som båda rekommenderade att istället för den faktiska kabeln *AXKJ₄*240/146* borde kabeln *Insulated underground cable, four-conductor-Cu 240mm²* användas i simuleringarna, detta då egenskaperna bedömdes vara snarlika. Detta är en av kablarna som valdes och när dess egenskaper presenteras i *kapitel 4* kommer den refereras till som *Cu 240mm²*. Mer om komponenternas egenskaper presenteras i kommande *avsnitt 4.3.1*.

3.4 Verifiering av modell

Med en fungerande simuleringsmodell på plats skulle den kalibreras för att överensstämja med det verkliga elnätet. Detta så simuleringarna överensstämmer med uppmätta värden. För detta användes historisk lastdata som input, detta för att se om modellen gav samma resultat för effektlöden, spänningsnivåer, förluster och elektriska strömmar som registrerats utav E.ON. Hur väl överensstämmelsen bedömdes vara baserades på en analys av effektlöde och spänningsnivåer. För att få en bättre överensstämmelse mellan modellen och verkligheten justerades modellens komponenter. Justeringarna gjordes på de komponenter som av någon anledning inte var garanterat korrekt. En kvalitetsgranskning av simuleringsmodellens justeringar gjordes genom att rådfråga personal på E.ON elnät. Modellen förfinades och denna process upprepades tills då den sammantagna överensstämmelsen var 96 %. Denna nivå på överensstämmelse ansåg interna experter på E.ON vara tillräcklig hög för att simuleringarna skulle vara pålitliga.

3.5 Analys av nuläget

Med en fungerande modell simuleras två olika historiska fall för att representera hur situationen i elnätet sett ut april 2017 - april 2018. Det ena fallet var genomsnittsbelastning och det andra representerades av maximalbelastning, båda utgick ifrån historiskt uppmätta effektuttag. Detta gjordes dels för att ge en bild hur situationen sett ut historiskt och då kunna användas som underlag för att skapa verklighetstroga framtidssimuleringar. Situationen med maximal belastning användes dessutom som referensfall för simuleringarna av framtidsfallen. Detta genom att visa vilken procentuell ökning som gjorts effektuttagen. För elbilsladdningen var all laddning i dessa två fall av typen normalladdning 3,7 kW.

3.6 Framtida scenarier

Med hjälp utav extrapolering av historisk data, lärdomar från litteraturstudien och med handledarna på E.ON skapades flertalet olika framtidsscenarier som alla simulerades i den uppbyggda modellen. I dessa scenarion varierades effektuttagen på lågspänningssidan i simuleringssmodellen. Effektuttag på högspänningssidan av Hyllie nätstation hölls däremot på en hög konstant nivå, detta då simuleringarna skulle representera tidpunkter med hög elanvändning. Dessutom hade dessa effektuttagen liten påverkan på elnätets lågspänningssida.

Bland framtidssimuleringarna valdes det ut tre stycken situationer. Var och ett av dessa situationer gjordes med och utan kontrollerad elbilsladdning, totalt sex olika scenarion. Urvalet för att få fram dessa sex scenarier gjordes med stöttning från E.ON. De valdes ut då de representerar möjliga effektökningar för Hyllieområdet. Dessa sex scenarion representerade de tänkta effekttoppar som alla låg i gränslägena då olika komponenter överbelastas. Genom att göra scenariorna vid gränsen för överbelastningen och presentera dem parvis, med och utan kontrollerad elbilsladdning, hoppades resultatet bli tydligare. Detta gjordes för att påvisa den potentiella nyttan av att kapa effekttoppar med hjälp av kontrollerad elbilsladdning. Utöver informationen om laststyrningen fick E.ON även information om gränslägessituationerna. Alla scenariona var framtagna för att representera möjlig utveckling av Hyllieområdet där det låg i E.ONs intresse att se när komponenter överbelastades och hur styrd elbilsladdning påverkar elnätet.

I den första framtidssituationen ökades de existerande effektuttagen tills dess den första komponenten överbelastades. Detta var med elnätet i dess nuvarande skick och komponenten var en kabel, denna situation refereras till som *överbelastning av nuvarande elnät*. Som sagt innefattar situationen simuleringar av ett scenario med kontrollerad laddning och ett utan. De exakta storlekarna på effektuttagen och layouten av elnätet för detta och de andra situationerna presenteras i *kapitel 5, Nätanalys - Framtidsscenarioer*.

I den andra framtida situationen var E.ON intresserade av vad en relativt liten investering skulle få för följd. De korta kablarna som gick från nätstationen till effektuttagen uppgraderades och på så sätt flytta det första felet uppåt i elnätet. Dimensioneringen på kablarna ändrades för att klara av den dubbla belastningen jämfört med det existerade läget, detta var 1120 ampere på lågspännings-sidan 0,4 kV. Detta ledde till överbelastning av nätstationen i Hyllie och situationen refereras till som *överbelastad nätstation*. Även denna gång gjordes simuleringar på två situationer som är med respektive utan kontrollerad elbilsladdning.

Det tredje och avslutande paret av simuleringar återgick till det nuvarande elnätet, utan uppgraderade kablar, då E.ON vill undvika denna kostnad. Denna situation skiljer sig från den första situationen genom annorlunda effektuttag samt att till dessa scenarion inkluderades solcellsproduktion. Elproduktion från solceller inkluderas med utgångspunkt att Hyllieområdet planerar installationen av solcellsanläggningar vilket kommer påverka effektflödet i elnätet. I dessa scenarion har även uttagen från elbilarna ökat i antal samt några uttag med högre uteffekt.

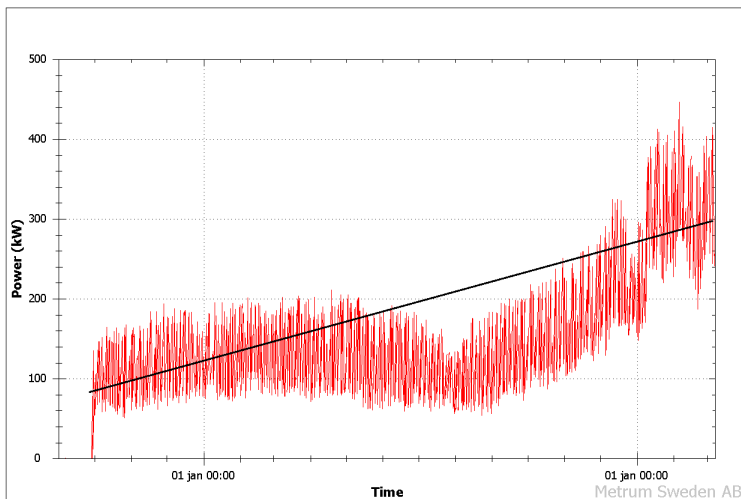
4 Fallstudie utav Hyllies lokalnät

Detta kapitel avser att ge en bild av situationen i Hyllie under den studerade tidsperioden. Kapitlet inleds med att visa belastningen för Hyllie nätstation. Sedan presenteras mönster och information som har framkommit genom att studera data från elbilsladdningen. Därefter presenteras utformningen av den del av elnätet som simulerats. Därefter två simuleringsfall som båda är baserade på historisk data.

I nuläget är den del av Hyllie som är aktuellt i detta projekt, ett område under utveckling med pågående och planerade byggprojekt. I dagsläget är försörjningssvårigheter i Hyllie inte troligt då elsystemet är dimensionerat att klara av ännu inte existerande laster. Huvudanledningen att Hyllieområdet valts för att utföra analyserna är att området har modern mätutrustning som producerar data med hög upplösning samt många parametrar. Detta skapar bra styrmöjligheter och en bra grund för vidare arbete vilket kommer diskuteras i *kapitel 8*. Hyllieområdet har dessutom ett uttalat mål att vara ett föredöme för hållbarhet och utveckling vilket kan tyckas passande för ett projekt som underlättar för implementeringen av elbilen (Malmö-stad, 2013).

4.1 Kapacitet i Hyllies lokalnät

Om man tittar på det område som Hyllie nätstation försörjer är det som sagt ett område i uppbyggnadsfasen, något som syns på effektuttaget. *Figur 4.1* visar hur effektuttaget har sett ut sedan fjärde kvartalet 2016. Figuren visar en tydligt ökande trend som beror på nyanslutningar.

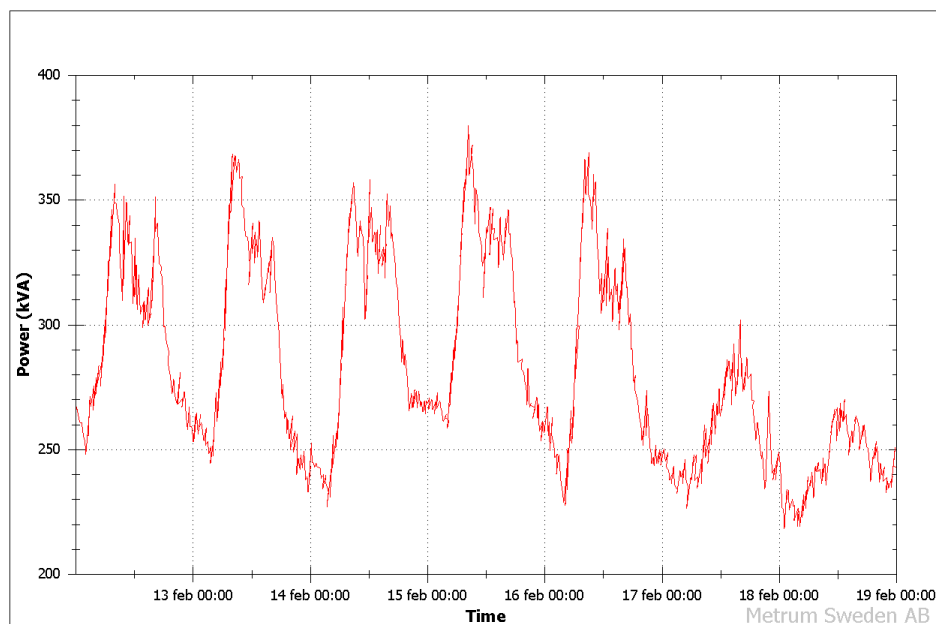


Figur 4.1: Levererad effekt med dess trendlinje från nätstationen i Hyllie, från driftstart till nutid. 2016 - April 2018.

Notis: Då arbetets målsättning är att hitta nyttan av kontrollerad elbilsladdning har mätdata som brukats kopplat till elnätet varit från den tid då elbilsladdarna installerades vilket är oktober 2017.

Om man zoomar in på en specifik vecka visar *figur 4.2* hur effektfördelningen sett ut. Vid första anblick syns ett tydligt mönster där skillnaden mellan natt och dag är påtaglig, samt att levererad effekt under helg är lägre än vardag. Om man studerar toppen som representerar tisdag, den andra toppen, syns en kraftig effektökning på morgonen för att nå topp effekt runt niotiden. Effekttoppar är något som önskas minskas för att uppnå bättre nyttjande av infrastrukturen, dessa toppar syns tydligt i *figur 4.2*. Detta varierande effektuttaget från nätstationen med tydliga skillnader mellan toppar och dalar är en grundförutsättning för att ge incitament för elnätsbolag till laststyrningen över huvud taget. Genom att styra elbilsladdningen bort från tider med högt uteffekt kan toppar kapas vid redan existerande laddning, eventuellt undvika att ny last adderas på topparna.

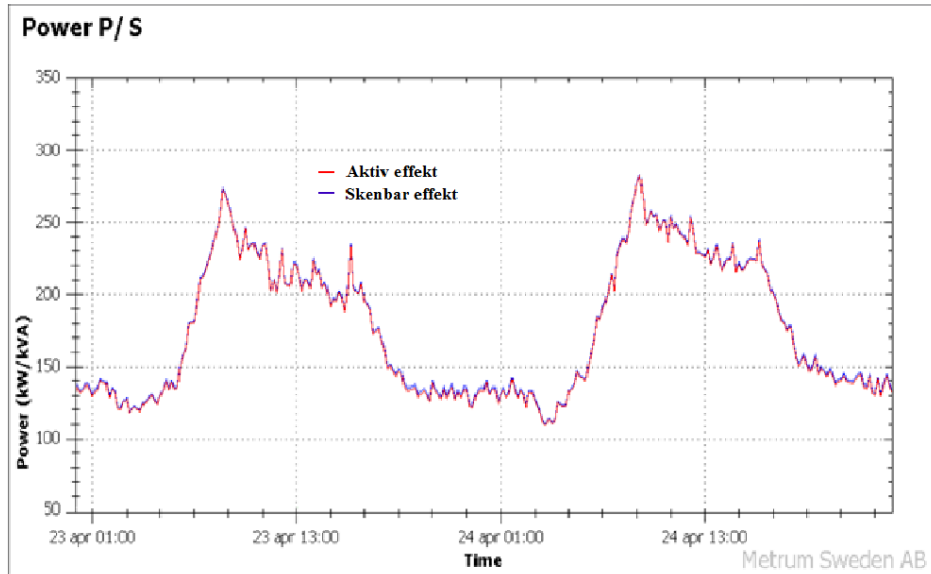
Två historiska fall kommer presenteras senare i *avsnitt 4.6* som genomsnittsbelastning och i *avsnitt 4.7* som högsta belastning vid en effekttopp. Nedanstående figur kan vara bra att bära med sig för att underlätta förståelsen med det två historiska fallen och även för framtidsscenariona i *kapitel 5*.



Figur 4.2: Levererad skenbar effekt för nätstationen i Hyllie en vecka i februari 2018, måndag-söndag.

Med vetskapen att Hyllieområdet är en uppbyggnadsfas är det föga förvånande att belastningsfaktorn på Hyllie nätstation är låg. Nätstationen har en överföringskapacitet på 800 kVA och jämfört med de uppmätta uttagen på under 400 kVA finns kapacitet för ökat effektuttag och nya anslutningar. I lokalnät så har kablar traditionellt sett överdimensionerats då den extra kostnaden varit relativt låg. Behovet beräknas genom att addera det högsta potentiella effektuttaget från alla anslutningar. Detta för att kunna bemöta behovet vid en sådan situation då alla samtidigt skulle använda anslutningens maximala uteffekt. Något som i praktiken nästan aldrig inträffar. För att relatera till detta projekt skulle en laddningscentral med 10 laddplatser á 3,6 kW dimensioneras till minst 36 kW. Med implementering av ”smart laddning” kan detta dimensioneras mer effektivt. Då smart laddning använts tidigare har effekttoppar reducerats med omkring 30% och kapacitetsutnyttjandet är 3-10 gånger högre än tidigare så investeringar som görs används effektivare. Genom att fler kunder kan dela på kapaciteten och kostnader för infrastrukturen kan detta resultera i lägre kostnader för var och en.

Genom att analysera effektflödena genom Hyllie nätstation framgick det även att aktiv effekt var sänär den enda beståndsdel av total skenbar effekt. Som visades i teoridelens *ekvation 2.4* så beror förlusterna på effektens aktiva beståndsdel. Dessutom fungerar detta som underlag till nätanalysen av framtidsscenarioerna då de visar fördelning mellan den skenbara effektens beståndsdelar. Effektfördelningen förlusterna är båda faktorer som påverkar slutresultatet. *Figur 4.3* representerar hur fördelningen mellan aktiv och skenbar effekt generellt ser ut i Hyllie nätstation.

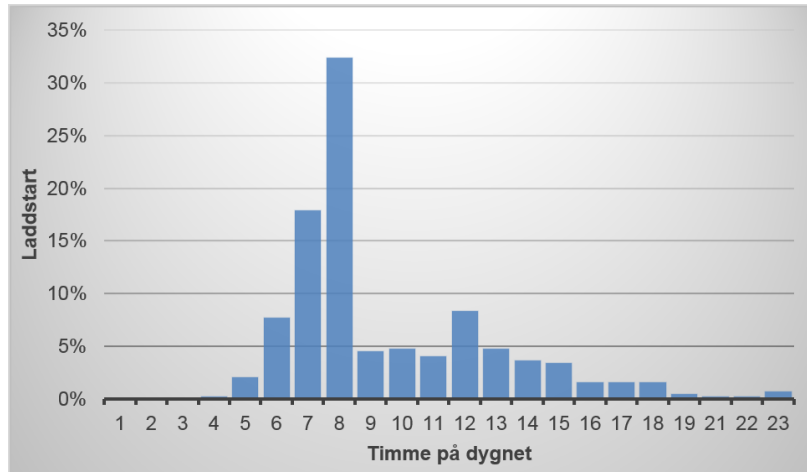


Figur 4.3: Visar aktiv och skenbar effekt uppmätt i Hyllie nätstation en dag i april 2018.

4.2 Analys av laddningsmönster för elbilar i Hyllie

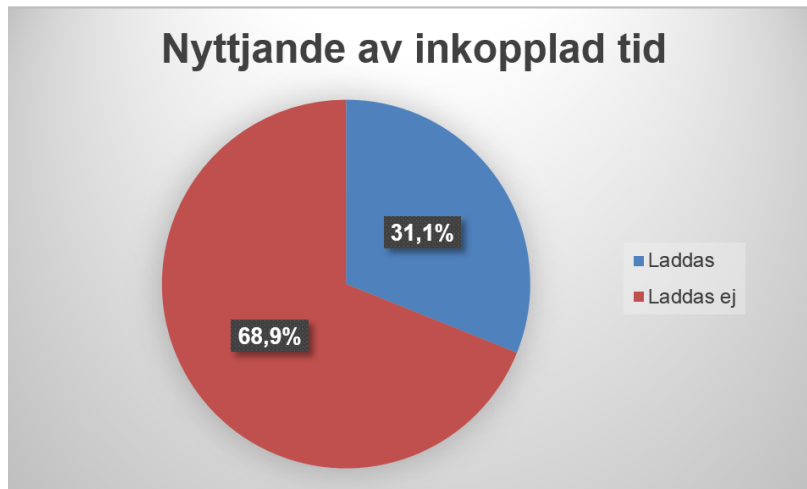
För att påvisa den potentiella nyttan med kontrollerad elbilsladdning är det viktigt för E.ON att känna till det lastmönster som människors laddningsvanor och utnyttjande av elnätet ger upphov till. Data från laddstationerna i parkeringshuset i Hyllie analyserades där vissa trender och laddningsmönster upptäcktes. *Figurerna 4.4 - 4.7* är alla baserade på data från laddpunkterna i parkeringshuset.

Om man tittar på anslutningstiden för elbilarna i *figur 4.4* visar denna fördelningen för när på dygnet elbilarna ansluter för laddning i Hyllieparkeringshus. Majoriteten av inkopplingarna görs runt åttatiden på morgonen vilket är typiskt för kontorsparkering och stämmer bra överens med byggnader som i nuläget finns i området. Denna typ av "synkroniserad" anslutning bidrar till en hög samlad toppeffekt orsakad av elbilsladdningen, något som man vill undvika för att ha en kostnadseffektiv anslutning.



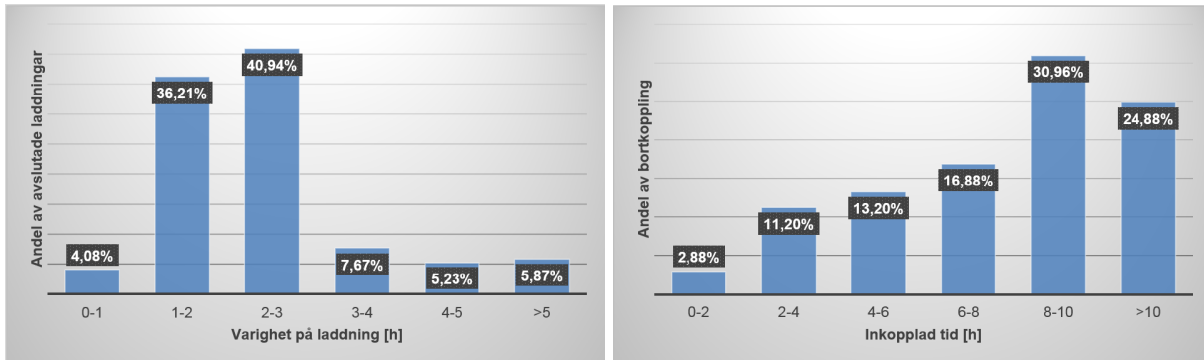
Figur 4.4: Tiden på dygnet som elbilarna ansluts till laddarna.

När kontakten anslutits visar *figur 4.5* det faktiska nyttjandet av laddboxen. Av den anslutna tiden är det drygt 30 % som nyttjas för laddning med resterande inkopplad tid används inte laddningsuttaget, detta beror på att batteriet är fulladdat.



Figur 4.5: Visar hur stor del av den anslutna tiden som används för laddning.

Genom att studera själva laddsektionerna djupare framkommer ytterligare information som visas i *figur 4.6*. En genomsnittlig laddning varar i cirka 2 timmar enligt *4.6a* men tiden som bilen står ansluten till laddboxen är ofta mellan 7-10 timmar enligt *4.6b*. Skillnaden mellan den tid som en elbil står inkopplad och den tid som faktiskt används för laddning av batteriet visar att det finns potential att skjuta laddningen i tid.

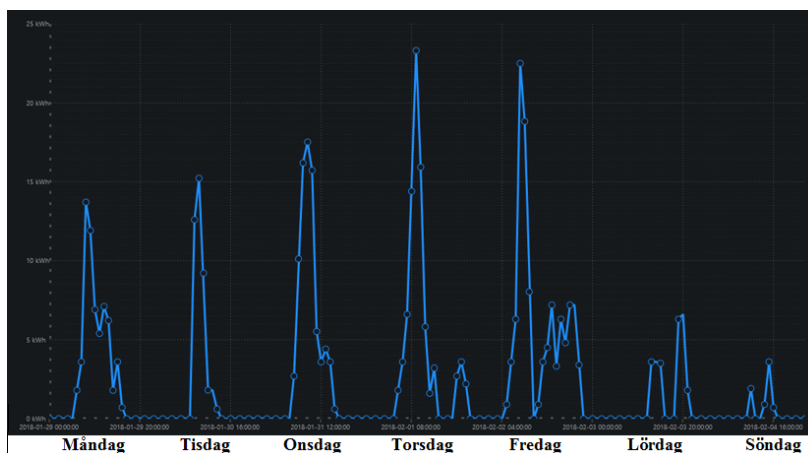


(a) Tiden från elbilar anslutit till laddare till dess laddningen avslutats. (b) Tiden elbilar står anslutna till laddkontakter.

Figur 4.6: Visar skillnaden och då potentialen för laddningspridning.

4.2.1 Effektfördelning

De regelbundna laddningsmönstren med dess ojämna fördelning över dygnet har naturligtvis konsekvenser för effektuttaget kopplat till elbilsladdningen. Baserat på informationen från *figur 4.4* där det framkommer att bilar vanligen ansluts klockan 07-08 och *figur 4.6a* som visar en genomsnittlig laddning varar i cirka två timmar, är höga toppar att vänta på morgonen. Detta bekräftas av det uppmätta effektuttaget som visas i *figur 4.7* och är den additiva last som tillkommit på nätstationen på grund av elbilsladdningen. Med tanke på att parkeringshuset i dagsläget främst innefattar kontorsparkering är detta väntat. Det syns ett tydligt beteendemönster hos elbilsägarna när de ansluter vilket resulterar i det samlade effektuttaget från elbilsladdarna. Sett ur elnätsbolagets perspektiv överlappar tyvärr denna last med redan existerande effekttoppar på nätstationen. Återigen hittas potentiell vinning av styrningen då i princip alla bilar laddar samtidigt och vid redan högbelastade tidpunkter. Om man även väger in framtidsprognoser där mycket som pekar åt att elbilar kommer fortsätta öka i antal kommer även de samlade effektuttaget att öka.

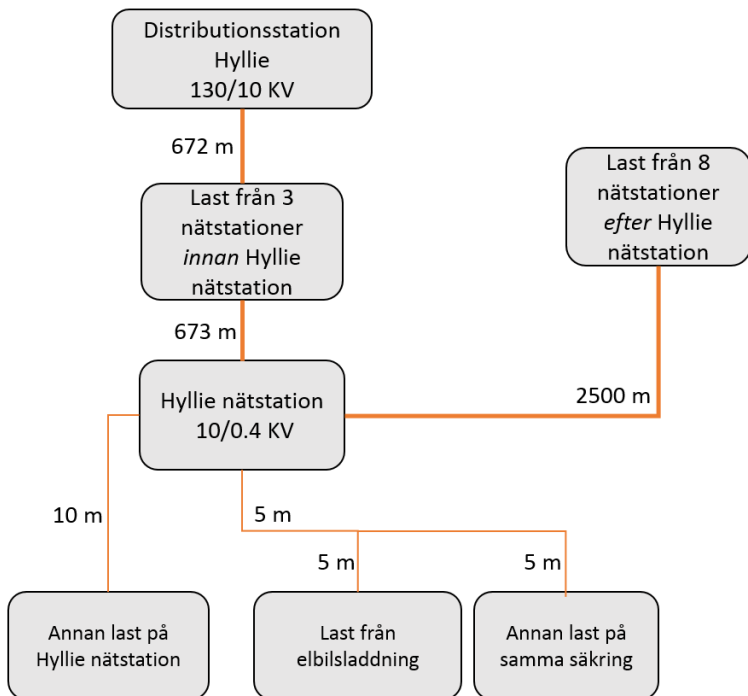


Figur 4.7: E-smarts vy över elbilsladdningen i Hyllie parkeringshus 13e-19e Februari 2018.

Utöver laddata analyserades även effektlöden för Hylliestationen från perioden oktober 2017 till mars 2018. Från denna data valdes två fall ut för att ge en bild av historiskt effektlöde, ett med historisk genomsnittsbelastning *avsnitt 4.6* och ett med historisk maximalbelastning *avsnitt 4.7*. Innan detta presenteras först den modell som användes för att spegla verkligheten i utförda simuleringar.

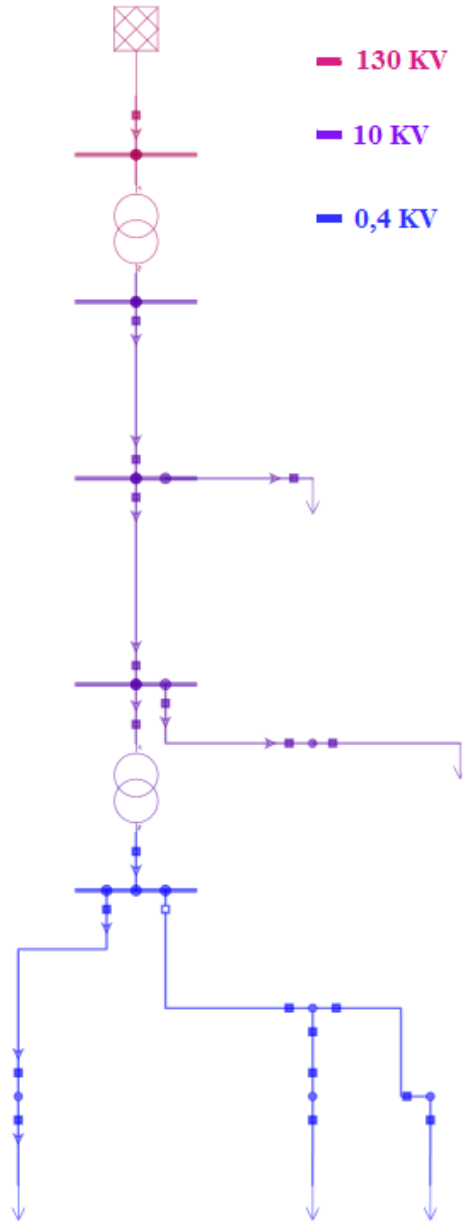
4.3 Elnätets struktur

Elnätets struktur för den relevanta delen av Hyllies elområde visas i *figur 4.8*. Figuren är en förenklad principiell modell med syftet att ge en överskådlig bild utav elområdet. I figuren framgår det även att vissa förenklingar gjorts såsom sammanslagningen av laster från nätstationer på vardera sida av Hylliestation vilket nämnts tidigare i *kapitel 3, Metod*.

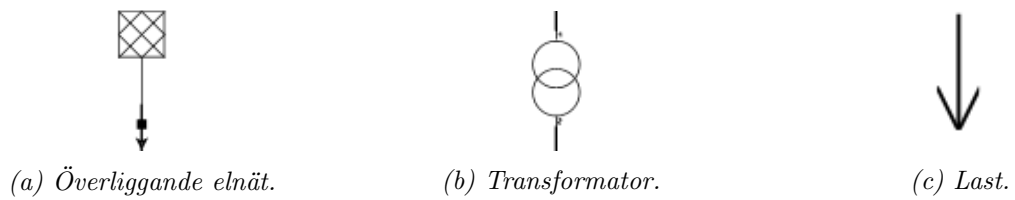


Figur 4.8: Översiktlig modell över analyserat elområde.

Samma del av elnätet byggdes upp i simuleringsverktyget Neplan 360 som sedan användes för att utföra själva analysen. *Figur 4.9* visar layouten och med dess förtydligande komponenterna i *figur 4.10*. Denna modell motsvarar alltså det som visas i *figur 4.8*.



Figur 4.9: Simuleringsmodellen som använts för elsystemet.



Figur 4.10: Förklarade figur av komponenter som använts i simuleringsmodellen.

4.3.1 Komponenter

Vilken överföringskapacitet en del av elnätet har begränsas av den komponent med lägst överföringsförmåga (Ren, Dobson & Carreras, 2008). Detta påminner väldigt mycket om uttrycket "en kedja är aldrig starkare än sin svagaste länk" vilket betonar relevansen av alla komponenter i elnätet och en anledning till varför elnätsbolag är intresserade av när olika komponenter överbelastas. För kommande simuleringar innefattas nedanstående komponenter med tillhörande data vilket kommer från programmet E.ONs interna program dpP, Neplan 360s inbyggda katalog över komponenter och även ELEFs produktkatalog (ELEF, 2000). Tillsammans med stöttning från Neplan och E.ON har modellen byggts upp för representera verkligheten på ett önskvärt sätt.

De två nedanstående *tabellerna 4.1* och *4.2* visar de komponenter som använts i simuleringsprogrammet Neplan 360 för att bygga upp simuleringsmodellerna.

Tabell 4.1: Kablarnas grundläggande egenskaper som använts som input i Neplan 360.

Kablar	Resistans (Ω/km)	Reaktans (Ω/km)	Kapacitans ($\mu\text{ F}/\text{km}$)
Cu 240mm ²	0,078	0,067	0
AXLJ-RE 3*240/35	0,125	0.26	0,32
XLPE_3x240_11_KV	0,162	0,0985	0,41

Tabell 4.2: Transformatorstationerna grundläggande egenskaper som använts som input i Neplan 360.

Transformator	Kapacitet [KVA]	Högspänning [kV]	Lågspänning [kV]	Förlust[%]
R-NR-SG-4-1	40000	130	10	1
N8/3	800	10	0,4	2

4.4 Förluster i lokalnätet

I lokalnätet studerades de förluster som uppstått då elen fördelats. Förlusterna från mätdata beräknades som skillnaden mellan effektöverföringen till en viss anslutning på Hyllie mätstation och uteffekten på motsvarande uttag. Förlusterna var små om ens märkbara. Liknande resultat påträffades i simuleringarna med förluster som understiger en 0,01 procent av den totalt överförda energin. Då förlusternas påverkan på slutresultatet var såpass litet kommer förlusterna inte presenteras i kommande simuleringar.

4.5 Laster på spänningsnivån 10 kV

Laster simulerade på nivån 10 kV har liten påverkan på det undersökta lågspänningsområdet jämfört med ändringar av lasten på lågspänningssidan. Något som gäller för båda historiska fall, *figur 4.6* och *4.7* med genomsnittsbelastning respektive högsta belastning, så väl som kommande framtids-scenarion är hur laster från ovanliggande nät påverkar spänningsnivåerna. I samtliga simuleringar framgick det att laster på nivån 10 kV påverkade spänningen på Hyllie nätstation samt dess lågspänning på följande sätt. Om lasten låg innan Hyllie nätstation ändrades spänningen med cirka 0,1 kV per MVA för alla delar av det analyserade området. Om lasten istället förändrades på de efterliggande nätstationerna ändrades spänningsnivån runt 0,15 kV per MVA.

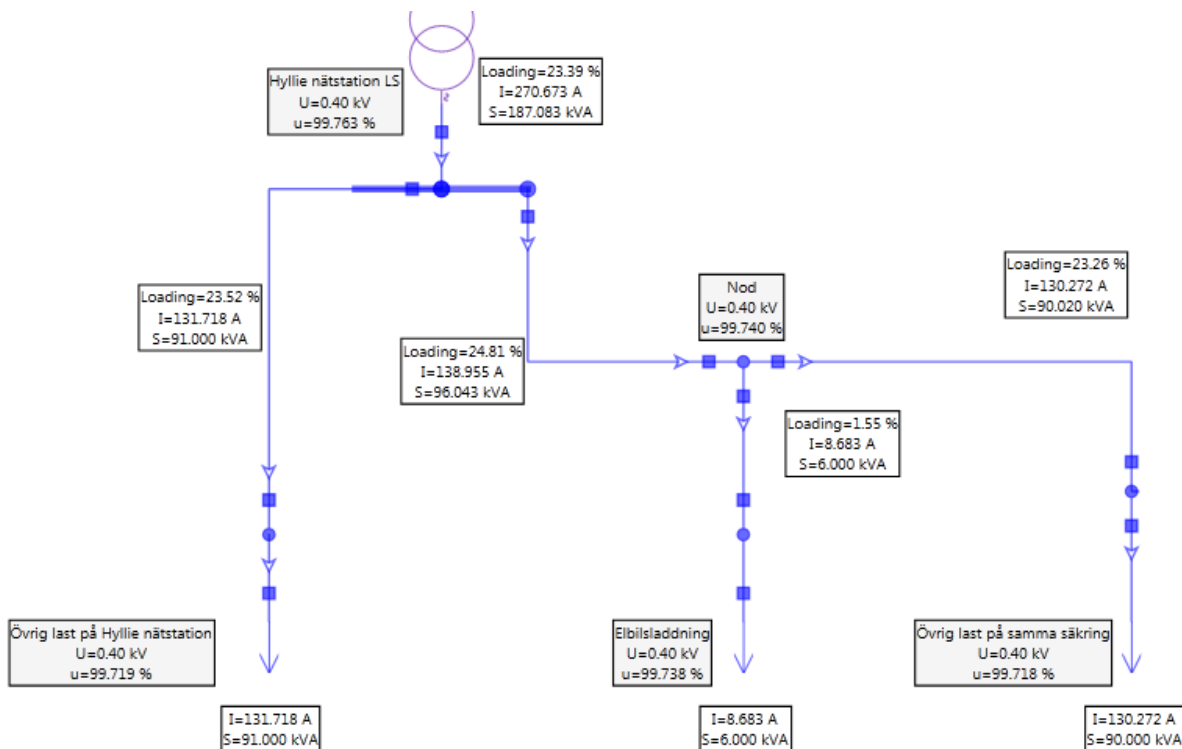
Med vetskapen av detta har denna ovanliggande last hållits konstant för att minska antalet variabler i simuleringarna. För de två uttagen på högspänningssidan belastades de tre föreliggande nätstationerna med 1,6 MVA och de 8 efterliggande med 2,6 MVA, ett totalt uteffekt på 4,5 MVA vilket är bland den högsta tiondels procenten av uppmätta värden under det 2017. Detta höga värde valdes för även om påverkan från laster på ovanliggande nät var liten så påverkar den nedanförliggande elnät. Det är vid dessa högbelastningssituationer, effektoppar, problem först uppstår vilket är av intresse för detta arbete och E.ON.

4.6 Genomsnittsbelastning

För fallet med genomsnittsbelastning på nätstationen skapades utifrån både median- och medelvärden med effektuttag från Hylliestationen på 186,5 respektive 188,3 kVA, dessa värden kommer från analys av historisk förbrukningsdata. Då dessa skiljer sig drygt en procent användes 187 kVA för att representera det fall som hädanefter kommer refereras till som den genomsnittliga. Detta visar hur den genomsnittliga belastningssituationen ser ut för Hyllie lokalnät, då även hur stort del av belastningen som kommer från elbilsaddningen. Belastning på elnätet för genomsnittsfallet visas i figur 4.11.

Detta är situationen med genomsnittlig levererad effekt uppmätt i Hylliestationen som fördelats till de olika anslutningarna.

- Övrig last på nätstation: 91 kVA.
- Elbilslast: 6 kVA.
- Övrig last på samma säkring: 90 kVA.



Figur 4.11: Värden kopplat till genomsnittsbelastning för det studerade området oktober 2017 - april 2018.

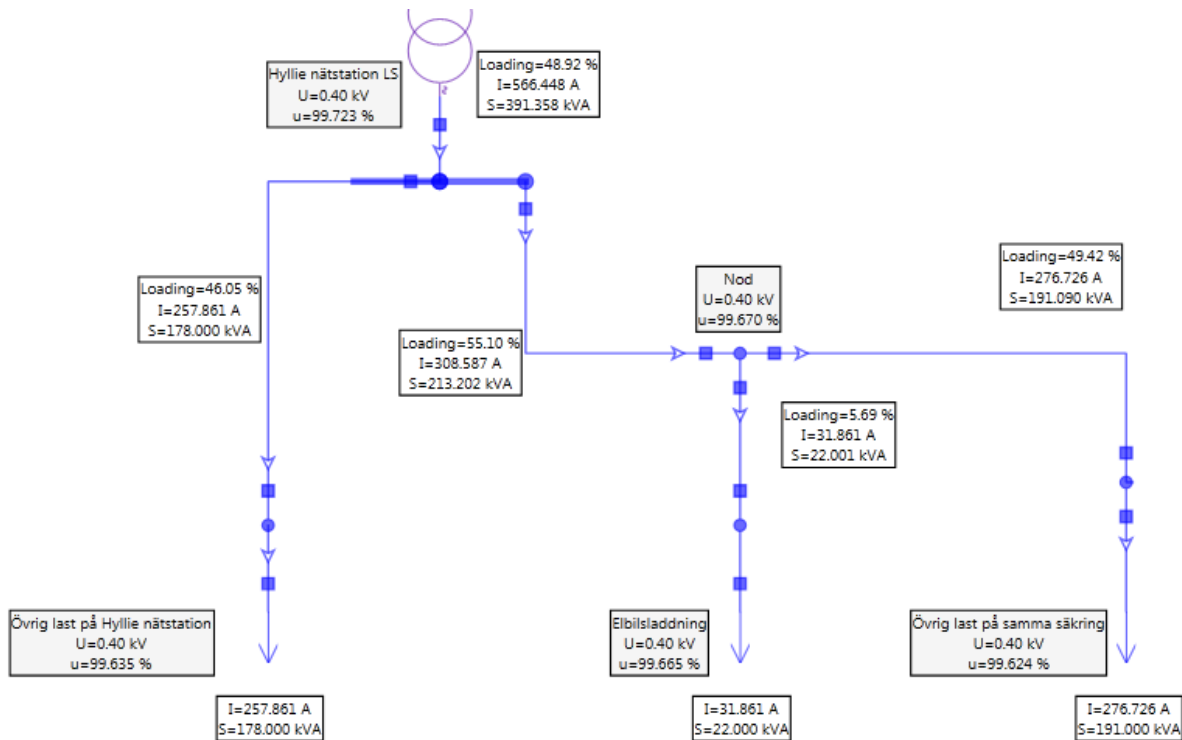
Procentuellt sett är flera komponenter ungefär lika hårt belastade, tre kablar och transformatorstationen har alla en belastningsnivå omkring 24 % av dess maximala. För att vara dimensionerat optimalt vore elsystemets alla komponenter belastade lika hårt. Det är kabeln som förser elbilsaddningen som sticker ut med dess låga belastning på 1,5 % av maximala. Detta resulterar i att för genomsnittssituationen står elbilsaddningen för 6 kW eller drygt 3 % av den totala belastningen på Hyllie nätstation. Analysen ger information att i genomsnittssituationen så har elbilsaddningen en relativt liten påverkan på belastningen i Hyllies lokalnät.

4.7 Högsta belastning

Detta avsnitt beskriver situationen med högst uppmätta värden under den studerade tidsperioden, vilket ska representera ett typ av värsta scenario ur E.ONs perspektiv. Då Hyllies lokalnät är en ny installation i ett uppbyggnadsområde finns än inte risken för överbelastning. Dessa problem skulle uppstå först när effektanvändningen ökat på grund av större eller fler anslutningar. Scenariot representerar dock sådana höga effekttoppar vilket är vad elnätet måste dimensioneras för att hantera. Scenariot visar även vilken påverkan elbilsladdningen har på Hyllies lokalnät vid en högbelastnings-situation.

Detta är situationen med det totalt högsta uppmätta levererad effekt från Hylliestationen fördelat på de olika anslutningarna.

- Övrig last på nätstation: 178 kVA.
- Elbilslast: 22 kVA.
- Övrig last på samma säkring: 191 kVA.



Figur 4.12: Värden kopplat till max-belastning för det studerade området oktober 2017 - april 2018.

De sammanlagda effektuttaget via Hyllie nätstation är 391 kVA vilket belastar transformatorn till 49 %. Kablarna är i detta fall belastade mellan 46 och 55 % med undantaget för den som matar elbilsladdningen på knappt 5,7 %. I detta högbelastningsscenario står elbilsladdningen för 22 kW eller 5,6 % av belastningen på Hyllie nätstation. I nuläget skulle kontrollerad elbilssladdning alltså kunna kapa över 5 % från de mest högbelastade tillfällena. Skillnaden mellan genomsnitts- och högsta belastnings sätter till viss del siffror på fluktuationerna som visades i figur 4.2, en skillnad på 25 procentas belastning i transformatorstationen.

5 Nätanalys - Framtidsscenarier

Detta kapitel innehåller en analys av hur framtida lastsituationer kan komma påverka lokalnätet i Hyllie. De gäller problem med överbelastningar av diverse komponenter vid olika kombinationer av nytillkomna laster och ett avslutande fall innehållande produktion från solceller.

Framtidsscenarierna är tänkta att spegla tillfällena med högbelastning för att se när E.ON måste vidta åtgärder för att undvika leveranssvårigheter samt se hur situationerna påverkas av kontrollerad elbilsladdning. Samtliga av de kommande tre fallen, med och utan styrd elbilsladdning så totalt sex scenarior, ger insikt i hur Hyllies lokalnät reagerar då elbilslasten styrs ned. I figurerna visas parametrarna ström, effektuttag, spänningsnivåer och belastningsgrad för lokalnätets komponenter. Med denna information från simuleringarna besvaras frågeställningarna 4 och 5. *Hur kontrollerad elbilsladdning kan påverka lokalnätets effekttoppar och spänningsnivåer?* respektive *vilka av elnätets komponenter riskerar att överbelastas?* För vardera par av simuleringar har lokalnätet ändrats för att skapa ett nytt men liknande scenario. För alla scenarion gäller samma frågeställningar men med varierande förutsättningar.

För att besvara frågeställning 6 användes även då resultat från kommande simuleringar. Medans övriga frågeställningar är begränsade till lokalnätets nivå berör denna frågeställning *hur följderna från nedstyrning av elbilsladdningen fortplantas till ovanliggande elnät*. Därför presenteras de resultat som är relevanta för denna frågeställning i slutet av kapitlet.

Alla spekulativa scenarier kommer relateras till tidigare presenterade fall 4.7 som visar den historiskt högsta belastningen. Om ett specifikt uteffekt ökar från 100 kVA till 200 kVA ger detta en ökning med 100 % på det uttaget.

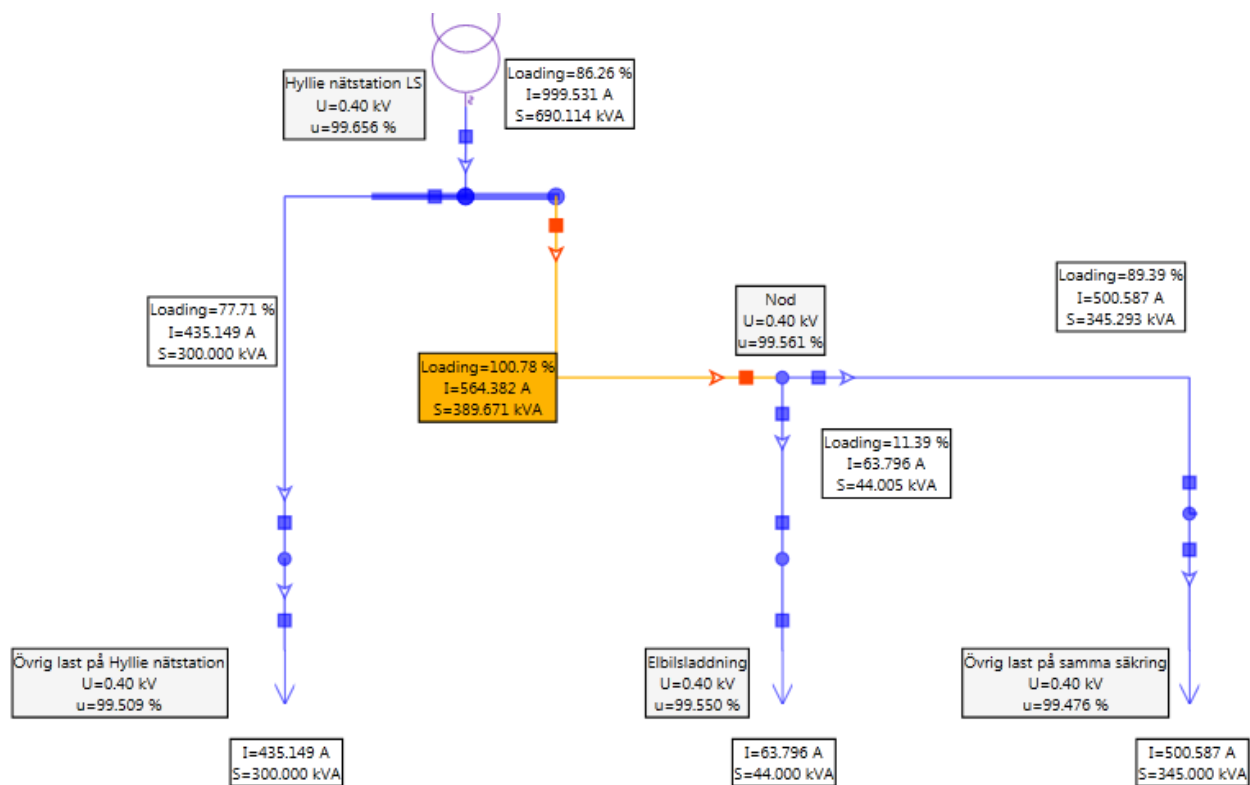
5.1 Överbelastning av nuvarande elnät

I efterföljande två scenarion antas antalet elbilar ha ökat vilket gör att alla 12 existerande laddare i parkeringshuset används på 3,7 kW per laddare vilket resulterar i drygt 44 kW uttag från elbilsladdningen. Utöver detta så har kringliggande laster skalats upp för att undersöka hur mycket som kan anslutas innan lokalnätet överbelastas. Detta scenario togs fram i samarbete med E.ON då det ligger i deras intresse att lokalisera eventuella svaga länkar i kedjan som är lokalnätet med nuvarande komponenter. Här påvisas även den potentiella nyttan i att använda kontrollerad elbilsladdning för effektkapning.

5.1.1 Scenario 1 - Utan kontrollerad laddning

Detta är konstruerade effektuttag vid de olika anslutningarna i figur 5.1.

- Övrig last på nätstation: 300 kVA, ökning med 69%.
- Elbilsuttag: 44 kVA, ökning med 100 %.
- Övrig last på samma säkring: 345 kVA, ökning med 81 %.



Figur 5.1: Elnätet med uppskalad belastning tills första komponenten överbelastas.

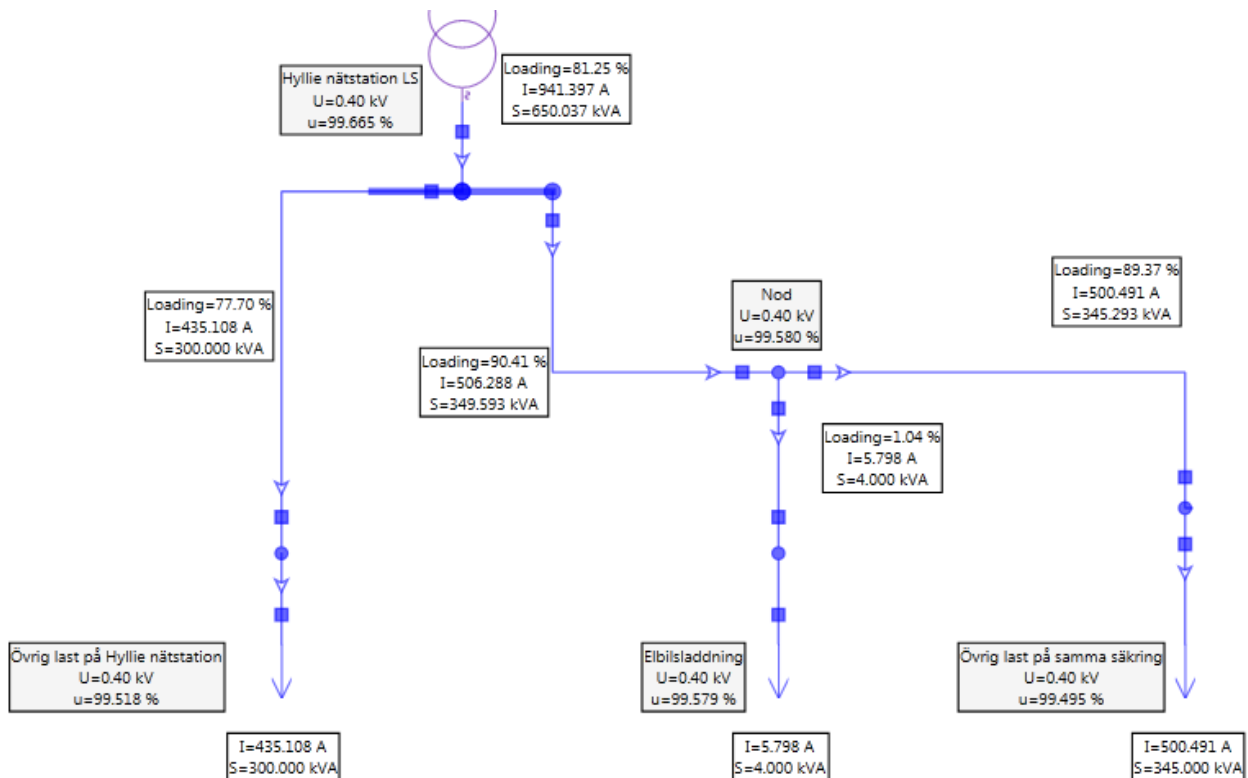
Som visas i figur 5.1 är det en kabel som i detta scenario överbelastas först. Denna kabel når nästan en belastningsgrad på 101 %. Det är dock inte den enda komponent som är under hög belastning. En av de två efterliggande kablarna belastas till nästan 90 % och transformatorstationen till 86 %.

5.1.2 Scenario 2 -Med kontrollerad laddning

Detta scenario är exakt detsamma som ovanstående scenario 1 med undantaget att den totala elbilsladdningen styrs ned till 3,7 kW vilket motsvarar en normalladdning.

Detta är konstruerade effektuttag vid de olika anslutningarna i figur 5.2.

- Övrig last på nätstation: 300 kVA, ökning med 69 %.
- Elbilsuttag: 3,7 kVA, effekten har styrts ned till normalladdning av en elbil.
- Övrig last på samma säkring: 345 kVA, ökning med 81 %.



Figur 5.2: Elnätet med uppskalad belastning samt kontrollerad elbilsladdning vilket gör att överbelastning av kabeln kan undvikas.

Skillnaden mellan figurerna 5.1 och 5.2 märks på två komponenter. Den ena är den tidigare överbelastade kabeln inte längre överbelastas utan belastningen ligger nu 90 % av dess maximala överföringskapacitet. Nedstyrningen av elbilsladdningen har alltså frigjort 10 % i kabeln. Detta märks även i transformatorn vars belastningsgrad sjunker från 86 % till 81 %.

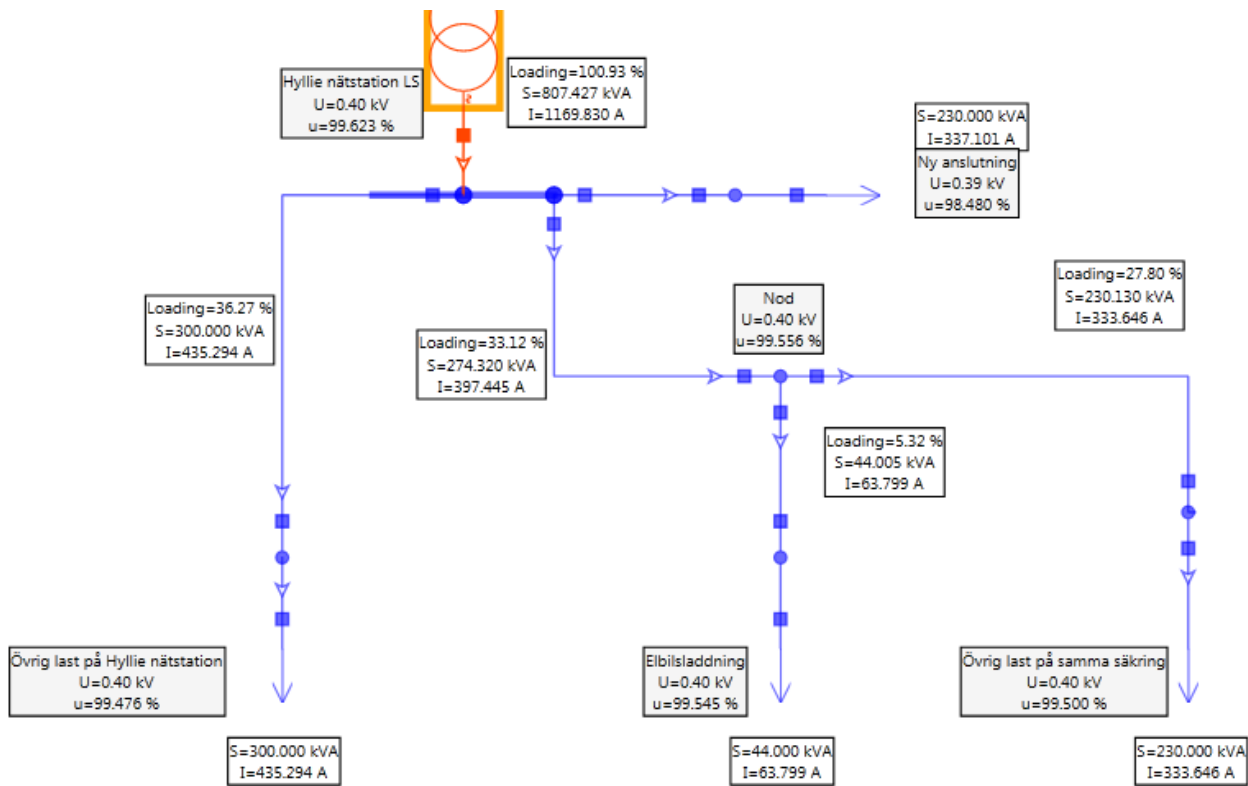
5.2 Uppgraderade kablar, överbelastad nätstation

I kommande två scenarion antas kablarna ha uppgraderats för att klara av dubbelt så hög belastning, vilket motsvarar en ström på 1120 ampere på existerande spänningsnivå 0,4 kV. Detta gör att det första problemet med överbelastning uppkommer vid en högre belastning och ett steg längre upp i elnätet, i transformatorn. Utöver denna ändring så har lasten på samma säkring som elbilsladdningen ändrats, den är nu 20 % högre än referensfallet 4.7. Det har även tillkommit last i form av en ny anslutning till transformatorstationen. Återigen undersöks ett fall då elnätet överbelastas, nu transformatorstationen som är en komponent som skulle vara dyrare att ersätta än kablarna. Detta för att se vilken extra kapacitet som skulle frigöras i lokalnätet vid en "lägre" investering.

5.2.1 Scenario 3 - Utan kontrollerad laddning

Detta är konstruerade effektuttag vid de olika anslutningarna i figur 5.3.

- Övrig last på nätstation: 300 kVA, ökning med 69 %.
- Elbilsuttag: 44 kVA, ökning med 100 %.
- Övrig last på samma säkring: 230 kVA, ökning med 20 %.
- Ny anslutning: 230 kVA.



Figur 5.3: Elnätet med uppskalad, uppgraderade kablar och adderad belastning. Sammantaget leder till detta till att transformatorn överbelastas.

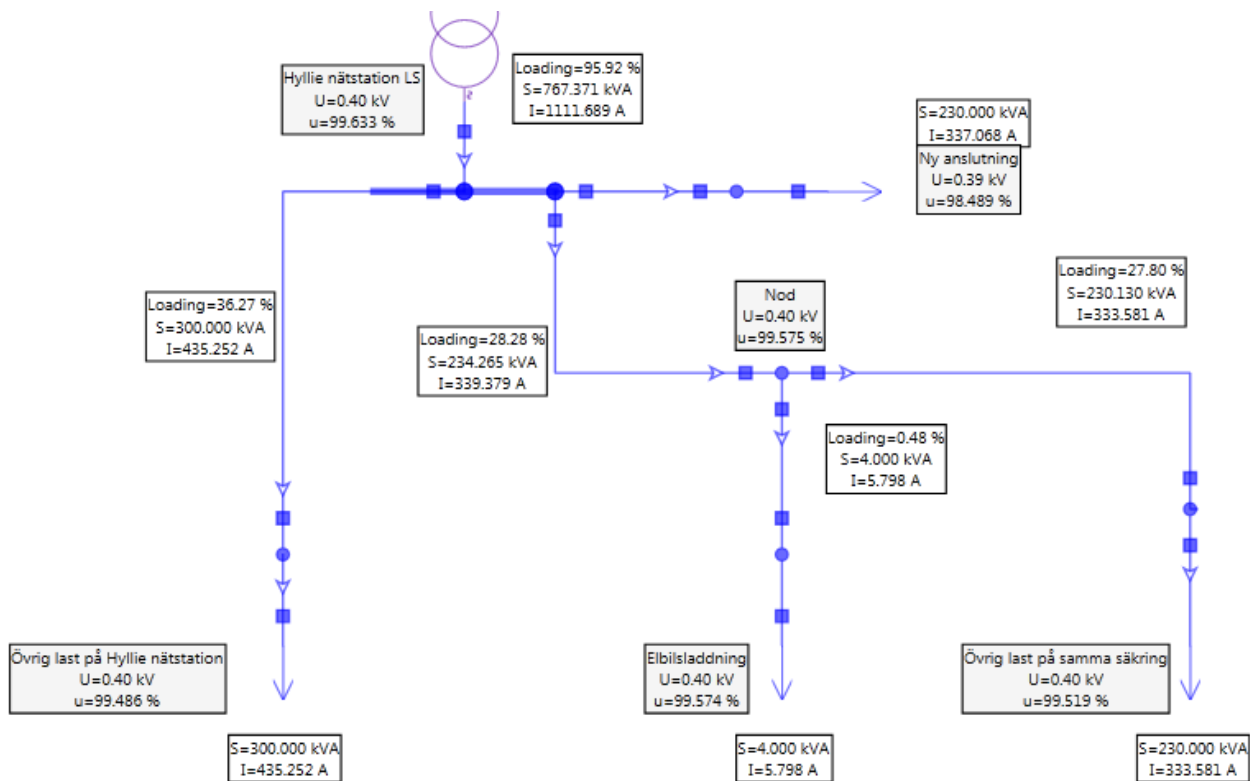
I detta scenario är det inte någon kabel som överbelastas först utan transformatorn som når 101 % belastningsnivå. Med uppgraderade kablarna är dessa inte längre i farozonen för överbelastning då den tyngst belastade når 36 %.

5.2.2 Scenario 4 - Med kontrollerad laddning

Detta scenario är detsamma som ovanstående scenario 3 med undantaget att elbilsaddningen nu styrs ned till 3,7 kW, motsvarande en elbil med normalladdning.

Detta är konstruerade effektuttag vid de olika anslutningarna visas i figur 5.4.

- Övrig last på nätstation: 300 kVA ökning med 69 %.
- Elbilsuttag: 3,7 kVA, effekten har styrts ned till normalladdning av en elbil.
- Övrig last på samma säkring: 230 kVA, ökning med 20 %.
- Ny anslutning: 230 kVA.



Figur 5.4: Elnätet med uppskalad belastning och uppgraderade kablar. Kontrollerad elbilsaddning gör att överbelastning av transformatorstationen i detta fall kan undvikas.

Kontrollerad elbilsaddning frigör även i detta fall 5 % i transformatorstationen som nu belastas till 96 % istället för tidigare överbelastning. Liknande frigörande av kapaciteten blir det i de kablar som matar elbilsaddarna, även här frigörs kapacitet i storleksordningen 5 procent.

5.3 Nuvarande elnät med ny last och solceller

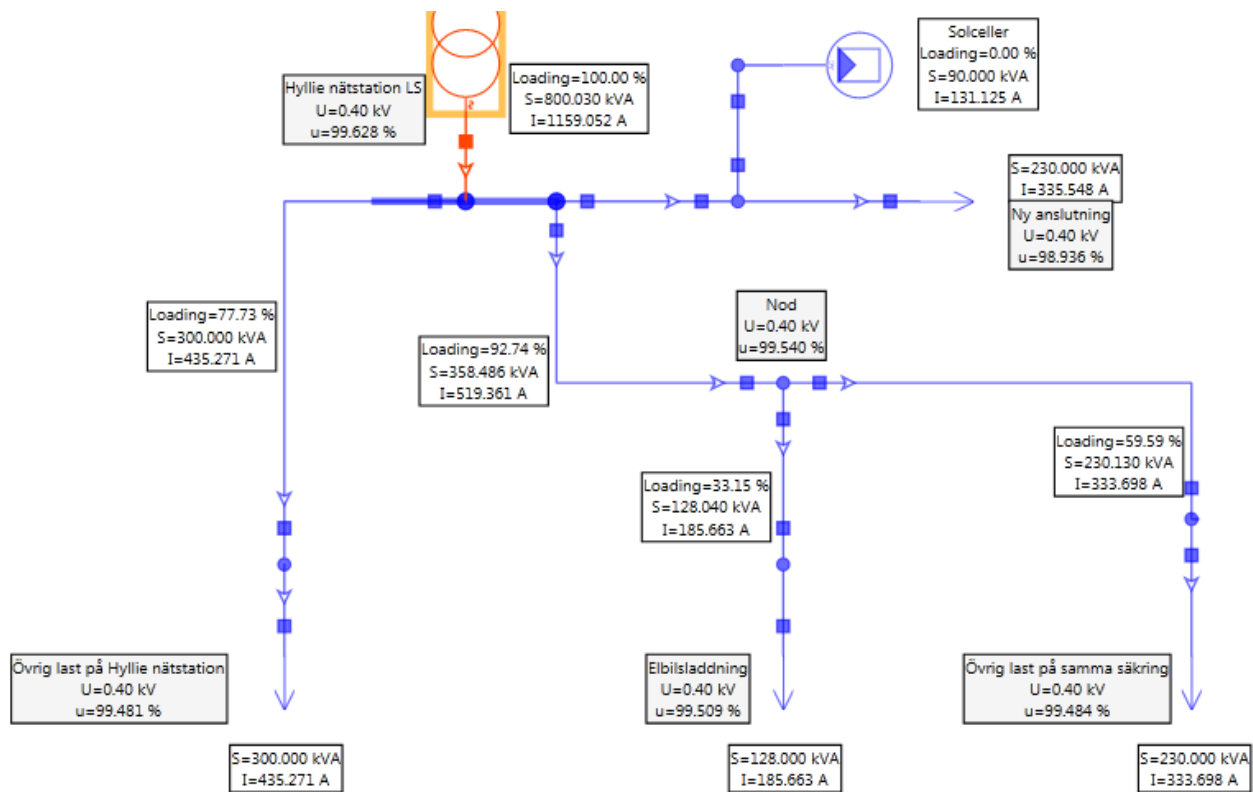
I de avslutande två scenariona är de ursprungliga kablarna tillbaka då E.ON vill om möjligt undvika kostnader som följer med en eventuell uppgradering. Till detta finns den nya lasten på transformatorstationen och nu även en solcellsanläggning på denna nya säkring. Antalet laddplatser med normalladdning har dubblerats till 24 stycken samt tre nytillkomna platser utrustade för semi-snabbladdning, sammanslaget ger detta en potentiell elbilslast på totalt 128 kW.

Detta scenario har åter igen tagits fram tillsammans med E.ON för att se vilka komponenter som är i riskzonen för att överbelastas. Dessutom undersöks nyttan i ett scenario med betydligt mer kontrollerbar effekt ifrån elbilsladdningen.

5.3.1 Scenario 5 - Utan kontrollerad styrning

Detta är konstruerade effektuttag vid de olika anslutningarna visas i figur 5.5.

- Övrig last på nätstation: 300 kVA, ökning med 69 %.
- Elbilsuttag: 128 kVA, ökning med 482 %.
- Övrig last på samma säkring: 230 kVA, ökning med 20 %.
- Ny anslutning: 230 kVA.
- Solceller: 90 kVA produktion.



Figur 5.5: Elnätet med uppskalad belastning från elbilar och annan last samt elproduktion från solceller. I detta scenario kontrolleras inte elbilsladdning vilket sammantaget leder till att transformatorn överbelastas.

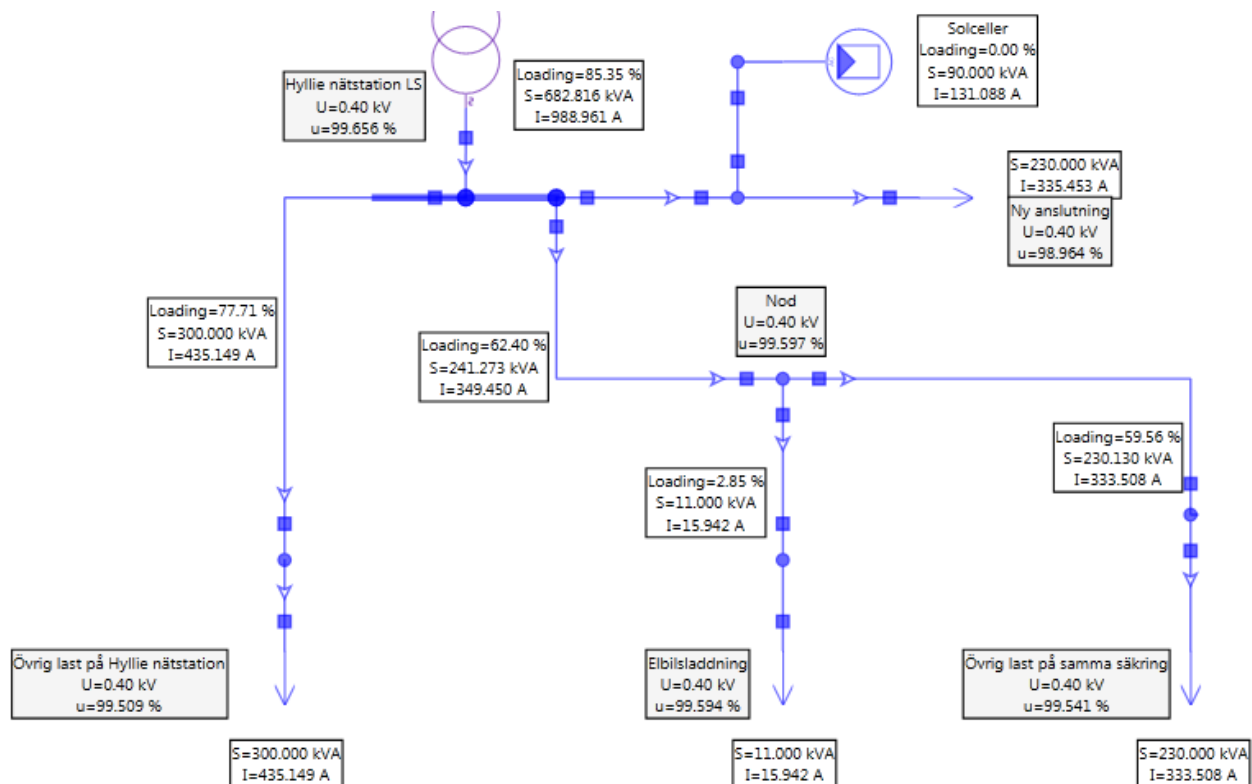
Som figur 5.5 visar så överbelastas transformatorstationen vars belastning är drygt 100 %. Även kabeln som matar elbilsladdningen och den övriga lasten på samma säkring är hårt belastade på 93 %. Trots ett totalt effektuttag på nästan 890 kW plus förluster så blir transformatorn med dess kapacitet på 800 kW precis överbelastad. Detta beror på produktionen från solcellerna som minskar belastningen som med 90 kW.

5.3.2 Scenario 6 - Med kontrollerad styrning

Detta scenario detsamma som ovanstående scenario 5 med undantaget att elbilsladdningen nu styrs ned till 11 kW.

Detta är konstruerade effektuttag vid de olika anslutningarna visas i figur 5.6.

- Övrig last på nätstation: 300 kVA, ökning med 69 %.
- Elbilsuttag: 11 kVA, effekten har styrts ned till semi-snabbladdning av en elbil.
- Övrig last på samma säkring: 230 kVA ökning med 20 %.
- Ny anslutning: 230 kVA.
- Solceller: 90 kVA produktion.



Figur 5.6: Lokalnätet med uppskalad belastning från elbilar och annan last samt elproduktion från solceller. Kontrollerad elbilsladdning leder till att transformatorn inte överbelastas i detta scenario.

Då den högre sammanlagda lasten från elbilsladdningen styr ned frigörs mer utrymme i detta scenario jämfört med tidigare scenariön 5.1 och 5.2, nu frigörs 15 % kapacitet i transformatorn och 30 % i kablarna där till laddningspunkterna. Då elbilslasten utgör en större andel av den totala effektanvändningen finns det nu mer effekt som kan styras ner vilket resulterar i mer kapacitet frigörs i lokalnätet. Som i alla scenarion då styrningen används så överbelastas inte någon komponent i lokalnätet, samtidigt möjliggörs en jämnare effektkurva för överföringen via Hyllie transformatorstation.

5.4 Följderna i ovanliggande elnät vid kontrollerad elbilsladdning i lokalnätet

Styrningen av elbilsladdningen i lokalnätet har en viss påverkan på ovanliggande elnät, på 10 kV sidan av Hyllie nätstation. Att hitta hur stor denna påverkan är ligger i E.ONs intresse där den mest intressanta parametern är spänningsnivån. I simuleringarna styrdes elbilsladdningen ner med 40 kW som minst och 117 kW som mest. Detta motsvarar en spänningsförändring på 0,06 % respektive 0,17 % av den existerande spänningsnivån på 10 kV.

En annan parameter som användes för att se hur det ovanliggande nätet påverkades då elbilsladdningen styrdes ned var den kapacitet som frigjordes. I de två första situationerna frigjordes 40 kW med kontrollerad elbilsladdning. Vilket motsvarar att det frigjordes 0,3 procent av den totala överföringskapaciteten på de ovanliggande elnätet till och med Hyllie nätstation. I den sista situationen styrdes 117 kW ned på vilket resulterade i att 1,2 procent av överföringskapacitet frigjordes. Det är inte mycket men styrningen av elbilsladdningen påverkar det ovanliggande elnätet. I nuläget är alltså styrningen påverkan på ovanliggande elnät liten men då elbilars samlade effektuttag ökar detta bli intressant för elnätsägare.

6 Diskussion

Detta kapitel inleds med en diskussion om hur de val som gjordes för simuleringsmodellen påverkar resultaten. Därefter följer diskussionsdelen kopplat till analysen av historisk data följt av resultaten från de olika framtidsscenarierna i kapitel 5. Slutligen följer en diskussion om de icketekniska aspekterna av elbilsladdningen. I kapitlet vävs det även in svårigheter, möjligheter och lärdomar under arbetets gång.

Det största hindret under arbetets gång var att få en väl fungerande simuleringsmodell för att ge svar på de ingående frågeställningarna. Det första steget med modellen var att lägga själva analysen på rätt nivå i elnätet så att nyttan av kontrollerad elbilsladdning skulle kunna redovisas. Då studien lades för högt upp i elnätet, på 10 kV sidan av Hyllie nätstation, ”drunknade” den effektkapning som elbilarna kunde erbjuda i det kringliggande effektvariationerna från andra nätstationer vilket gjorde osynliggjorde nyttan. Av denna anledning så presenterades resultaten från lågspänningssidan, upp till samt inkluderade Hyllie nätstation.

Däremot så påverkas simuleringarna och då resultaten av lasterna från nätstationer på 10 kV sidan av Hyllie nätstation. Detta är varför dessa laster inkluderats i simuleringsmodellen. Som presenterades i avslutande *avsnitt 4.5* så sattes dessa ovanliggande laster till ett historiskt högt värde på 4,5 MVA. Detta för att utgå från ett högbelastningsscenario. I samma avsnitt så presenterades även att spänningen i Hylliestationen varierar med 0,1-0,15 kV / MVA ändring på högspänningssidan. Detta resulterar i ett spänningsfall under 1 procent för ett historiskt högt ackumulerat effektuttag på 4,5 MW. Denna spänningsvariation ligger inom E.ONs gräns, på 10 procent, för vad som är acceptabel variation.

För att lyfta fram de mest väsentliga resultaten från simuleringarna uteslöts vissa resultat från dessa figurer samt medföljande text. Ett sådant exempel är de förluster som uppkommer. Förlusterna i det analyserade området är extremt låga främst då kabelavstånden är korta. Då förlusterna är såpass små har dessa inte fått något större utrymme i resultatdelen. Förlusterna understiger 0,01 % av den överförda energin. Även om förlusterna inte presenteras i figurerna från simuleringarna så är de ändå inkluderade i simuleringarna. Detta då de har en liten påverkan på slutresultatet.

Då detta är ett första steg i det större projekt som E.ON genomför på Hyllieområdet valdes simuleringarna att utföras på en statisk nivå. Detta fångar inte tidsvariabeln men i det tidiga skede som E.ON projektet befinner sig i ansågs denna metod kunna bidra med användbara insikter. Tidpunkterna valdes för att representera högbelastningsscenario för att ge svar på den inledande frågeställningen med dess delfrågor. Nackdelen blir som sagt att tidsvariabeln missas som skulle vara intressant att se i simuleringarna och som bland annat skulle ha kunnat visa kortvariga spänningsvariationer som uppkommer då elbilarnas laddning kopplas till och från. Med detta uppkom en idé om att använda rampmodeller där effekten ökar eller sänks gradvis på förslagsvis 30 sekunder istället för i ett steg.

6.1 Resultat från historisk data

Med hjälp av insamlad data från både Hyllie nätstation och om elbilsladdningen fastslogs flera olika trender och med analys av denna data påvisas den möjliga vinningen som finns med att kontrollera elbilsladdningen.

En sådan trend var att stor del av alla anslutningar till laddarna gjordes mellan sju och åtta på morgonen. Detta är en trend som troligen kommer hålla i sig då folk kommer fortsätta ansluta sina elbilar direkt när de kommer till jobbet av ren vana eller för enkelhetens skull. För att komma åt sådana effekttoppar från elbilsladdningen som visades i *figur 4.7* måste det därför vara styrsystemet som slår till och från laddningen automatiskt. Något som har varit en förutsättning i detta arbete.

Det har även påvisats möjligheterna att skjuta på laddningen då bilarna i snitt laddas drygt 30 % av den tid de står inkopplade. *Figur 4.6* visar den genomsnittliga tiden en elbil står ansluten och genomsnittlig tid för själva laddningen. Här visas svart på vitt potentialen att skjuta på elbilsladdningen då den genomsnittliga laddningssektionen är kortare än två timmar medan anslutningstiden ofta är längre än sju timmar. Detta sågs som en positiv överraskning för E.ONs fortsatta arbete då inte förväntade sig fullt så mycket potential.

Något som nämnts tidigare i arbetet är att vid analysen av historisk data uteslöts vissa mätvärden. Detta gäller data från både elbilsladdningen och förbrukningen från övriga laster i lokalnätet. Detta då viss data ansågs vara felaktig eller då mätresultatet ansågs ofullständigt. Även om inte denna ”felaktiga” data analyserades vidare verkade denna följa liknande mönster som den data som analyserades. Detta baserades på en ytlig visuell inspektion men tros därför inte påverkat resultaten på något häpnadsväckande vis.

6.2 Resultat från simuleringar av framtidsscenario

Samtliga fall i simuleringsmodellen använder antagandet med en fullständig acceptans av styrning från elbilsägarna. Denna höga acceptansnivå valdes främst för att påvisa den potential som uppkommer vid kontrollerad elbilsladdning. Mindre fokus lades på rimligheten i detta antagande. Däremot användes inte all styrning då en laddningssektion på 3,7 kW laddning lämnades i de två första scenariorna och 11 kW laddning i det sista. Detta för att simulera en bil som krävde laddning vid denna tidpunkt, något som elnätsbolagen inte kan neka trots kontrollerad laddning. I nuläget är detta inte en situation som kan uppstå i Hyllie då det kräver avläsning av *SoC (state of charge)* för att veta vilket behov batteriet har av laddning samt styrning som inte är på plats, detta är dock framtidsscenario och därför valdes detta att inkluderas. Mer om möjligheterna kring SoC och styrning kommer i avslutande *kapitel 8*.

Samtliga framtidsscenario skapades utifrån att ligga på gränsen för överbelastnings av komponenter i elnätet. Det fanns två huvudsakliga anledningar till detta. Den ena var för E.ONs räkning då de önskade se när elnätet felar. Det andra var ur ett presentationssyfte då nyttan tydligare framgår när en komponent går från överbelastad till en hög men okej belastningsnivå.

I de två första scenariorna, 5.1 och 5.2, är styrningen lika stor på 40 kVA vilket motsvarar samma påverkan på transformatorstationen där 5 % av effekttoppen kapas. Detta kan verka som lite men med styrning av fler elbilar ökar potentiell påverkan som visas i *scenario 5.3*. Då är det 27 uttag som kontrolleras som tillsammans styr ned effekttoppen med 117 kVA vilket motsvarar nästan 15 % av kapaciteten i transformatorstationen, här visar den kontrollerade laddningen en påtaglig nytta. Detta arbete har inte innefattat någon ekonomisk analys men som en källa på E.ON uttryck sig *"kostnaden för att styra elbilsaddningen är småpotatis jämfört med vad det kan kosta att byta ut kablarna, för att inte tala om transformatorstation"*.

6.3 Acceptansnivå

Ovanstående diskussion har varit kopplat till de tekniska aspekterna som den teknisk potentialen och vinningen för elnätet. Utöver de tekniska aspekterna finns en annan viktig aspekt vilket är elbilsägarens vilja/tillåtelse att laddningen överhuvud taget kontrolleras. Om inte elbilsägarna godkänner kontrollerad laddning förblir elbilsaddningen en belastning för elnätet, denna vilja sammanfattas som acceptansnivå. Simuleringarna har använts för att analysera tekniska aspekter medan de icke tekniska faktorerna för acceptansnivån mest berörts i teoridelen.

En grundförutsättning för att nå en hög acceptansnivå är tanken att styrningen inte ska märkas utav elbilsägaren. Det är rimligt att tro att elbilsägare huvudsakligen är intresserade av att batteriet ska vara tillräckligt laddat för att ta sig till nästa destination, med andra ord om de kan lita på den automatiska laddningen. Mer data om allt från resvanor till elproduktion ger bättre förutsättningar för att skapa väl fungerande laddning och i förlängningen skapa förutsättningar för att fler ska välja elbilar.

Att undvika effekttopparna med smartare laddning kan ge fler fördelar än att nätkapaciteten inte behöver byggas ut i samma utsträckning. Att köpa elektricitet off-peak kan sänka direkta elkostnader samt kostnaden för abonnerad kapacitet. Det finns även miljömässiga aspekter för hur elen produceras. Elproduktionen för att täcka effekttoppar har i Sverige generellt sett större miljöpåverkan än basproduktionen, något som gör att miljöfördelarna med en elbil förbättras då laddningen inte adderar till topparna. Kontrollerad elbilsaddning kan även anpassas till efter tillgången, vilket möjliggör införandet av mer förnybar energiproduktion.

7 Slutsatser

Detta kapitel redovisas de slutsatser som dragits under arbetets gång vilket besvarar de ingående problemformuleringarna.

Som tidigare presenterats är detta ett första steg i en fortgående studie av området i Hyllie för att undersöka en rad frågor kopplade till styrningen av elbilsaddning. Vilken påverkan kontrollerad elbilsaddning har på den studerade delen av elnätet beror på flera faktorer likt de kringliggande lasterna och framförallt storleken på styrningen. Med detta sagt så har flera slutsatser dragits i detta arbete.

Vid okontrollerad laddning vilket används i dagsläget har det visats att det tillfälliga effektuttaget från laddningen överlappar med det redan högsta effektuttaget på dygnet. Detta förvärrar situationen i elnätet genom att bygga på redan existerande toppar vilket bidrar till större skillnader mellan toppar och dalar i effektkurvan från Hyllie nätstation. Detta överlapp kan skapa problem med elkvalitet i framtida situationer då belastningen på komponenterna ökar. Något som kan bero både på nya anslutningar och fler elbilar som behöver laddning. Denna typ av utan kontrollerad laddning är vad som representeras i *kapitel 5* av framtidsscenario 1, 3 och 5.

Något som poängterats i studien är vikten av att elbilsaddningen sker vid rätt tidpunkt. Detta för att elbilsaddningen inte ska bli en belastning på elnätet. Dataanalyserna visar potential att både tidsförskjuta laddningen eller använda laddningsalternativ som kontrollerar effektuttaget för elbilsaddningen.

Analysen av historisk data visade att i genomsnitt står elbilarna anslutna till laddstationerna i Hyllie 8-10 timmar per dag. Av den anslutna tid pågår en genomsnittsladdning i 2-3 timmar. Detta resulterar i att under den tid elbilarna står anslutna ligger utnyttjandegraden av laddarna i storleksordning 30 procent, alltså betydligt längre tid än vad batteriet behöver vara för att bli fulladdade. Att utnyttjandegraden är så pass visar att det finns goda möjligheter för att styra elbilsaddningen.

I de olika framtidsscenario erna har kontrollerad elbilsaddning visat att beroende på situationen kan effekttopparna på nätstationen minska 5-15 %, motsvarande siffra på kablarna är 5 - 30 %. Ju större det initiala bidraget från elbilarna är desto viktigare blir styrningen för antingen hjälpa eller stjälpna elnätet. Simuleringarna visade även att elbilsaddningen i lokalnätet påverkade ovanliggande elnät marginellt, detta gäller för både förluster eller spänningsnivåer.

8 Framtida arbete

Detta kapitel tar upp förslag på framtida studier inom området för detta arbete samt delar av de fortsatta planerna för E.ONs projekt.

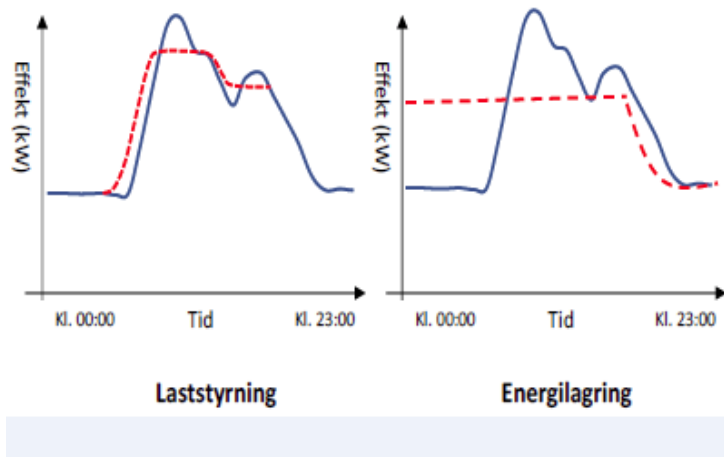
Under detta arbete har det framkommit ett flertal funderingar och insikter som vore intressant för vidare studier. Något som kan bygga på kunskapen kring elbilsladdning. Ett sådant steg som ligger nära till hands är att utveckla en simuleringsmodell för att fånga den dynamiska aspekten från styrningen. Något som skulle ge en helhet till hur styrningen påverkar elnätet istället för enbart titta på de värsta situationerna.

Att det finns möjligheter att flytta och kontrollera laddningen av elbilar har fastslagits i detta arbete. Det har även påvisats vilken potentiell nytta som kontrollerad elbilsladdning kan erbjuda, främst för effektkapning. Däremot har elbilsägarens vilja att tillåta styrd laddning inte varit en faktor i detta arbete som utgått från en fullständig acceptans. Vilka incitament skulle få elbilsägare att gå med på styrning är en sådan fråga som måste tacklas innan det blir verklighet. Det finns även olika typer av styrningsalternativ vilket nämndes i *avsnitt 2.2.6* om smart laddning och det hade varit intressant att undersöka om något alternativ accepteras i högre grad än något annat.

Ett potentiellt område för vidare studier är avläsning av SoC. Med informationen om laddningsgraden hos batteriet vid anslutningstillfället skulle dilemmat mellan att styra laddning och vetskapen att batteriet är tillräckligt laddat för att klara nästa resa försvinna. Något som skulle kunna öka tillförlitligheten och potentiellt minska effekten av exempelvis räckviddsångest. Om och när avläsning av SoC skulle tillåtas skulle detta kunna möjliggöra stora framsteg för elbilsbranschen.

Det medför även möjligheter för prioriteringssystem då anslutna bilar med SoC under exempelvis 30 % skulle laddas direkt till 50 % för att sedan återgå till ordinarie laddningsrutiner med styrning bort från effekttoppar.

SoC skulle även vara grundläggande för att nå lyckad integrering med Vehicle to building (V2B) eller Vehicle to Grid (V2G). En teknik som i teorin kan jämna ut effektkurvor betydligt mer än enbart förskjutning av elbilsladdningen då detta ger möjligheten att leverera elenergi till nätet för att minska effekttopparna ytterligare som visas i *figur 8.1*. Det hade varit intressant att titta på vinningen med denna teknik kopplat till elnätet för spänning- och frekvenskontroll men även dess effekter som eventuellt kan främja implementeringen av distribuerad mikroproduktion då det i princip skulle fungera som ett distribuerat energilager.



Figur 8.1: Illustrationen visar hur laststyrning energilagring skulle kunna påverka effektanvändningen över ett dygn.

(Termens, 2017)

Vidare vore det intressant att titta på att ge elbilsägarna en del av kontrollen över laddningen. Detta skulle kunna göras via ett användarvänligt gränssnitt i exempelvis en app som ägaren kontrollerar laddningen från. Likt ett återkommande alarm att vakna kan rutinmässiga avres-tider läggas in då batteriet är fulladdat. Appen skulle kunna kompletteras med olika möjligheter som snabbbladdning om man oväntat måste iväg.

Referenslista

- Albadi, M. H. & El-Saadany, E. F. (2008). A summary of demand response in electricity markets. *Electric power systems research*, 78(11), 1989–1996.
- Andersson, P. (2018). Personlig intervju, E.ON.
- Blomhäll, T. (2014). *Tesla motors superchargers*. Hämtad 2018-03-30, från <http://teslaclubsweden.se/tesla-motors-superchargers/>
- Blomqvist, H. (2012). *Elkraftshandboken: Elkraftsystem 2*. Stockholm, Liber AB.
- Bloomberg. (2017). *Electric vehicle outlook 2017*. Bloomberg New Energy Finance.
- Botsford, C. & Szczepanek, A. (2009). Fast charging vs. slow charging: Pros and cons for the new age of electric vehicles. I *International battery hybrid fuel cell electric vehicle symposium*.
- BP. (2018). *Bp energy outlook 2018 edition*. BP energy economics.
- Bühler, F., Franke, T. & Krems, J. F. (2011). *Usage patterns of electric vehicles as a reliable indicator for acceptance? findings from a german field study* (forskningsrapport).
- Cao, Y., Tang, S., Li, C., Zhang, P., Tan, Y., Zhang, Z. & Li, J. (2012). An optimized ev charging model considering tou price and soc curve. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 3(1), 388–393.
- Carrasco, J. M., Franquelo, L. G., Bialasiewicz, J. T., Galván, E., PortilloGuisado, R. C., Prats, M. M., ... Moreno-Alfonso, N. (2006). Power-electronic systems for the grid integration of renewable energy sources: A survey. *IEEE Transactions on industrial electronics*, 53(4), 1002–1016.
- Chandler, D. L. (2015). *Going solid-state could make batteries safer and longer-lasting*. Hämtad 2018-02-19, från <http://news.mit.edu/2015/solid-state-rechargeable-batteries-safer-longer-lasting-0817>
- Csanyi, E. (2012). *What's common for beer mug and power factor?* Hämtad 2018-05-19, från <http://electrical-engineering-portal.com/beer-mug-and-power-factor>
- Curry, C. (2017). *Lithium-ion battery costs and market*. Bloomberg New energy Finance.
- Daim, T. U., Wang, X., Cowan, K. & Shott, T. (2016). Technology roadmap for smart electric vehicle-to-grid (v2g) of residential chargers. *Journal of Innovation and Entrepreneurship*, 5(1), 15.
- Daina, N., Sivakumar, A. & Polak, J. W. (2017). *Electric vehicle charging choices: Modelling and implications for smart charging services*. Elsevier Ltd.
- Delucchi, M. A. & Lipman, T. E. (2001). An analysis of the retail and lifecycle cost of battery-powered electric vehicles. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 6(6), 371–404.
- ELEF. (2000). *Elef*. Författare.
- Emadi, A., Lee, Y. J. & Rajashekara, K. (2008). Power electronics and motor drives in electric, hybrid electric, and plug-in hybrid electric vehicles. *IEEE Transactions on industrial electronics*, 55(6), 2237–2245.
- Emobility. (2017). *Elbilen på 5 minuter*. Hämtad 2018-01-31, från <http://emobility.se/startside/elfordon/elbilen-pa-5-minuter>

- Emobility. (2018a). *Om olika kontakter*. Hämtad 2018-02-20, från <http://emobility.se/startside/laddstationsguiden/forberedelser/om-olika-kontakter/>
- Emobility. (2018b). *Snabbladdning?* Hämtad 2018-02-20, från <http://emobility.se/startside/laddstationsguiden/forberedelser/1-2-snabbladdning-eller-normalladdning/>
- Energimarknadsbyrån. (2015). *Elavbrott och ersättning*. Hämtad 2018-03-27, från <http://www.energimarknadsbyran.se/Documents/Faktablad%20EL/Elavbrott%20och%20ersattning.pdf?epslanguage=sv>
- Energimarknadsinspektionen. (2017a). *Leveranssäkerhet i sveriges elnät 2016-statistik och analys av elavbrott*. Hämtad 2018-05-27, från https://www.ei.se/Documents/Publikationer/rapporter_och_pm/Rapporter%202017/Ei_R2017_11.pdf
- Energimarknadsinspektionen. (2017b). *Tillsyn avseende anslutnings- och överföringsskyldighet*. Hämtad 2018-03-28, från https://www.ei.se/Documents/Nyheter/Nyheter%202017/2017-102734_beslut.pdf
- Energimyndigheten. (2016a). *Elavbrott*. Hämtad 2018-05-27, från <http://www.energimyndigheten.se/trygg-energiforsorjning/el/elavbrott/>
- Energimyndigheten. (2016b). *Energiläget*. Hämtad 2018-02-02, från <http://www.energimyndigheten.se/statistik/transport>
- Energimyndigheten. (2017). *Scenarier över sveriges energisystem 2016*. Författare.
- Energinet. (2010). *Vindmøller: Negative elpriser skal fremme vedvarende energi*. Hämtad 2018-04-02, från <https://energinet.dk/Om-nyheder/Nyheder/2017/04/25/Vindmoller-Negative-elpriser-skal-fremme-vedvarende-energi>
- E.ON. (2015). Intern bild.
- Expósito, A. G., Gomez-Exposito, A., Conejo, A. J. & Canizares, C. (2016). *Electric energy systems: analysis and operation*. CRC press.
- Franke, T., Neumann, I., Bühler, F., Cocron, P. & Krems, J. F. (2012). Experiencing range in an electric vehicle: Understanding psychological barriers. *Applied Psychology*, 61(3), 368–391.
- Hall, D. & Lutsey, N. (2018). *Effects of battery manufacturing on electric vehicle life-cycle greenhouse gas emissions*. ICCT.
- Hauser, C. H., Bakken, D. E. & Bose, A. (2005). A failure to communicate: next generation communication requirements, technologies, and architecture for the electric power grid. *IEEE Power and Energy Magazine*, 3(2), 47–55.
- Henderson, B. (1974). *The experience curve reviewed*. Wiley Online Library.
- Hultman, M. (2015). *Den inställda omställningen: svensk energi-och miljöpolitik i möjligheternas tid 1980-1991*. Gidlund.
- Huppmann, D. & Egerer, J. (2015). National-strategic investment in european power transmission capacity. *European Journal of Operational Research*, 247(1), 191–203.
- Intab. (2018). <https://intab.se/effektfaktor>.
- Ipakchi, A. & Albuyeh, F. (2009). Grid of the future. *IEEE power and energy magazine*, 7(2), 52–62.
- Kaijser, A. & Kander, A. (2013). *Framtida energiomställningar i historiskt perspektiv*. Hämtad 2018-02-29, från <http://swedishepa.se/Documents/publikationer6400/978-91-620-6550-8.pdf>
- Kjellman, S. (2004). *El-och naturgasmarknaderna-energimarknader i utveckling*. Stockholm: Statens Offentliga Utredningar.
- Larsson, Ö. (2010). *Ladda för nya marknader: elbilens konsekvenser för elnät, elproduktionen och servicestrukturer*. VINNOVA.
- Larsson, Ö. & Ståhl, B. (2011). *Smart ledning: drivkrafter och förutsättningar för utveckling av avancerade elnät*. VINNOVA.

- Leary, K. W. (2014, maj 6). *Method and system for charging electric vehicles*. Google Patents. (US Patent 8,718,856)
- Lin, B. & Wu, W. (2018). Why people want to buy electric vehicle: An empirical study in first-tier cities of china. *Energy Policy*, 112, 233–241.
- Lopes, J. P., Soares, F. J. & Almeida, P. R. (2009). Identifying management procedures to deal with connection of electric vehicles in the grid. I *Powertech, 2009 ieee bucharest* (s. 1–8).
- Madina, C., Zamora, I. & Zabala, E. (2016). Methodology for assessing electric vehicle charging infrastructure business models. *Energy Policy*, 89, 284–293.
- Malmö-stad. (2013). *Sealed lead-acid battery technical manual*. Hämtad 2018-04-012, från <https://malmo.se/Stadsplanering--trafik/Stadsplanering--visioner/Utbyggnadsomraden/Hyllie/Klimatsmarta-Hyllie.html>
- Maryniuk, R. (2017). *Development of a modular urban electric vehicle* (opublicerad examensuppsats). University of Waterloo.
- Messagie, M. (2017). *Life cycle analysis of the climate impact of electric vehicles*. Transport & Environment.
- Montin, S., Björck, A., Adsten, M. & Haegermark, H. (2013). *Översiktlig bedömning av teknikutveckling och tillämpning inom nyckelområden som ställer nya krav på att elnäten utvecklas-elfordon, vindkraft, solceller och energilagring*. NEPP.
- Morrow, K., Karner, D. & Francfort, J. (2008). Plug-in hybrid electric vehicle charging infrastructure review. *US Department of Energy-Vehicle Technologies Program*, 34.
- Musardo, C., Rizzoni, G., Guezennec, Y. & Staccia, B. (2005). A-ecms: An adaptive algorithm for hybrid electric vehicle energy management. *European Journal of Control*, 11(4-5), 509–524.
- Naturvårdsverket. (2018). *Bidrag till privatpersoner för att installera laddstation*. Hämtad 2018-03-20, från <http://www.naturvardsverket.se/Stod-i-miljoarbetet/Bidrag/laddstation-elfordon/>
- Nemry, F., Leduc, G., Muñoz, A. m. fl. (2009). *Plug-in hybrid and battery-electric vehicles: State of the research and development and comparative analysis of energy and cost efficiency* (forskningsrapport). Joint Research Centre (Seville site).
- Neubauer, J. & Wood, E. (2014). The impact of range anxiety and home, workplace, and public charging infrastructure on simulated battery electric vehicle lifetime utility. *Journal of power sources*, 257, 12–20.
- Neumann, I., Cocron, P., Franke, T. & Krems, J. F. (2010). Electric vehicles as a solution for green driving in the future? a field study examining the user acceptance of electric vehicles. I *Proceedings of the european conference on human interface design for intelligent transport systems, berlin, germany* (s. 445–453).
- Ng, K. S., Moo, C.-S., Chen, Y.-P. & Hsieh, Y.-C. (2009). Enhanced coulomb counting method for estimating state-of-charge and state-of-health of lithium-ion batteries. *Applied energy*, 86(9), 1506–1511.
- Notisum. (1997). *Ellag (1997:857)*. Hämtad 2018-03-30, från <http://www.notisum.se/rnp/sls/lag/19970857.htm#K8P5S1>
- Nylén, P.-O. (2011). *Möjligheter och hinder för laststyrning : Fokus på privatkunder med eluppvärmning*. Hämtad 2018-03-29, från https://energiforskmedia.blob.core.windows.net/media/21370/11_70_mojligheter-och-hinder-for-laststyrning.pdf
- Nyteknik. (2018). *Danmark slog världsrekord i vindkraft*. Hämtad 2018-04-02, från <https://www.nyteknik.se/energi/danmark-slog-varldsrekord-i-vindkraft-6892839>
- Næss-Schmidt, S., Lisberg Jensen, M., von Utfall Danielsson, C., Gustafsson, C. & Karlsson, T. (2017). *Incitament för smarta elnät* (forskningsrapport).

- Ota, Y., Taniguchi, H., Nakajima, T., Liyanage, K. M., Baba, J. & Yokoyama, A. (2012). Autonomous distributed v2g (vehicle-to-grid) satisfying scheduled charging. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 3(1), 559–564.
- Pearre, N. S., Kempton, W., Guensler, R. L. & Elango, V. V. (2011). Electric vehicles: How much range is required for a day’s driving? *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 19(6), 1171–1184.
- Pepermans, G., Driesen, J., Haeseldonckx, D., Belmans, R. & D’haeseleer, W. (2005). Distributed generation: definition, benefits and issues. *Energy policy*, 33(6), 787–798.
- Powercircle. (2017). *Så rätt har prognosmakarna haft om elbilar – hittills*. Hämtad 2018-02-19, från <https://www.nyteknik.se/fordon/sa-ratt-har-prognosmakarna-haft-om-elbilar-hittills-6874422>
- PowerCircle. (2018). *Drivkrafter bakom utvecklingen av stamnätet*. Hämtad 2018-03-20, från <http://powercircle.org/nyhet/laddbar-bil-var-popularast-miljobil-februari/>
- Powercircle. (2018). *Laddbara bilar i sverige 2012-2018*. Hämtad 2018-02-19, från <https://www.elbilsstatistik.se/elbilsstatistik>
- PowerStudies. (2011). *Power factor— the basics*. Power Studies Inc.
- Putrus, G., Suwanapingkarl, P., Johnston, D., Bentley, E. & Narayana, M. (2009). Impact of electric vehicles on power distribution networks. I *Vehicle power and propulsion conference, 2009. vppc’09. ieee* (s. 827–831).
- Radloff, K. (2016). *Information om stödet till laddinfrastruktur inom klimatklivet*. Naturvårdsverket.
- Randall, T. (2018). *Here’s how electric cars will cause the next oil crisis*. Hämtad 2018-03-14, från <https://www.bloomberg.com/features/2016-ev-oil-crisis/>
- Rathnayaka, A. D., Potdar, V. M., Hussain, O. & Dillon, T. (2011). Identifying prosumer’s energy sharing behaviours for forming optimal prosumer-communities. I *Cloud and service computing (csc), 2011 international conference on* (s. 199–206).
- Regeringen. (2013). *Fossilfrihet på väg - del 1*. Hämtad 2018-05-04, från <http://www.regeringen.se/49bbab/contentassets/7bb237f0adf546daa36aaf044922f473/fossilfrihet-pa-vag-sou-201384-del-12>
- Regeringen. (2015). *Parisavtalet*. Hämtad 2018-01-02, från <http://www.regeringen.se/regeringens-politik/parisavtalet/>
- Regeringskansliet. (2016). *Ramöverenskommelse mellan socialdemokraterna, moderaterna, miljöpartiet de gröna, centerpartiet och kristdemokraterna*. Författare.
- Regeringskansliet. (2017). *Bonus-malus och bränslebytet*. Hämtad 2018-03-20, från <http://www.regeringen.se/artiklar/2017/09/bonus-malus-och-branslebytet/>
- Ren, H., Dobson, I. & Carreras, B. A. (2008). Long-term effect of the n-1 criterion on cascading line outages in an evolving power transmission grid. *IEEE transactions on power systems*, 23(3), 1217–1225.
- Schroeder, A. & Traber, T. (2012). The economics of fast charging infrastructure for electric vehicles. *Energy Policy*, 43, 136–144.
- Selin, M. (2016). *Transportsektorns energianvändning 2016*. Energimyndigheten.
- Severinsky, A. J. (1994, september 6). *Hybrid electric vehicle*. Google Patents. (US Patent 5,343,970)
- Shi, A. (2003). The impact of population pressure on global carbon dioxide emissions, 1975–1996: evidence from pooled cross-country data. *Ecological Economics*, 44(1), 29–42.
- Sidén, G., Hylander, J., Winkler, C. & Stenqvist, C. (2016). *100 procent förnybar elenergi år 2020–2025–2030? Högskolan i Halmstad*.
- Söder, L. (2014). *På väg mot en elförsörjningbaserad på enbart förnybar el i sverige: En studie om behov av reglerkraft och överföringskapacitet. version 4.0*. KTH Royal Institute of Technology.

- Sortomme, E. & El-Sharkawi, M. A. (2011). Optimal charging strategies for unidirectional vehicle-to-grid. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2(1), 131–138.
- Stymne, P. (2002). *Stamnätet under ett sekel: berättelsen om hur det svenska stamnätet byggdes upp : en bok till svenska kraftnäts tioårsjubileum 2002*. Svenska kraftnät. Hämtad från <https://books.google.se/books?id=ROHkMQAACAAJ>
- Svensk-Energi. (2015). Potential att utveckla vattenkraften från energi till energi och effekt. *Svensk Energi: Stockholm, Sweden*.
- SVK. (2017a). *Drivkrafter bakom utvecklingen av stamnätet*. Hämtad 2018-03-19, från <https://www.svk.se/natutveckling/drivkrafter/>
- SVK. (2017b). *Ett starkt stamnät för en trygg elförsörjning*. Hämtad 2018-03-19, från <https://www.svk.se/natutveckling/utbyggnadsprocessen/teknik/#Starkt.Nat.Trygg.forsor>
- SVK. (2017c). *Ett svenskt stamnät med växelström*. Hämtad 2018-03-19, från https://www.svk.se/natutveckling/utbyggnadsprocessen/teknik/?_t_id=1B2M2Y8AsgTpgAmY7PhCf%3d%3d&_t_q=%c3%b6verf%c3%b6ringsf%c3%b6rluster&_t_tags=language%3asv%2csiteid%3a40c776fe-7e5c-4838-841c-63d91e5a03c9&_t_ip=192.121.1.150&_t_hit.id=SVK_WebUI_Models_Pages_ArticlePage/_b7107f8c-7c45-4d10-a0a1-f7f8aa646408_sv&_t_hit.pos=5#Starkt.Nat.Trygg.forsor
- SVK. (2017d). *Systemutvecklingsplan 2018–2027*. Svenska Kraftnät.
- SwedishSmartgrid. (2018). *Elsystemet förnyas*. Hämtad 2018-02-08, från <http://swedishsmartgrid.se/varfor-smarta-elnet/elsystemet-fornyas/>
- Technavio. (2017). *Top 5 influential electric vehicle manufacturers in 2017*. Hämtad 2018-03-22, från <https://www.technavio.com/blog/top-electric-vehicle-manufacturers>
- Termens, J. (2017). *Effekthantering i lokaler:påverkan på eleffekttoppar genom elbilstaddstationer och energilager*. Belok.
- Tesla. (2018). *Tesla roadster*. Hämtad 2018-02-15, från https://www.tesla.com/sv_SE/roadster
- Teslarati. (2017). *Close-up look at the tesla semi “megacharger” charging port*. Hämtad 2018-03-27, från <https://www.teslarati.com/tesla-semi-megacharger-charging-port-close-up-look/>
- Trafikanalys. (2017). *Körsträckor 2016*. Författare.
- Transportstyrelsen. (2017). *Har transportstyrelsen en lista över vilka bilar som uppfyller kraven?* Hämtad 2018-03-20, från <https://www.transportstyrelsen.se/sv/vagtrafik/Miljo/Klimat/Miljobilar1/supermiljobilspremie1/Har-Transportstyrelsen-en-lista-over-vilka-bilar-som-uppfyller-kraven/>
- Transportstyrelsen. (2018). *Frågor och svar om supermiljöbilspremie*. Hämtad 2018-03-20, från <https://transportstyrelsen.se/sv/vagtrafik/Miljo/Klimat/Miljobilar1/supermiljobilspremie1/#14003>
- Traywick, C. & Kern, R. (2018). *Batteries set to compete against generators in power markets*. Hämtad 2018-02-16, från <https://www.bloomberg.com/news/articles/2018-02-15/batteries-can-now-compete-against-generators-in-power-markets>
- Uyeki, R. (2015, april 7). *Electric vehicle charging strategy*. Google Patents. (US Patent 9,000,722)
- Van Cutsem, T. & Vournas, C. (1998). *Voltage stability of electric power systems* (vol. 441). Springer Science & Business Media.
- Weedy, B. M., Cory, B. J., Jenkins, N., Ekanayake, J. B. & Strbac, G. (2012). *Electric power systems*. John Wiley & Sons.
- Weiss, M., Junginger, M., Patel, M. K. & Blok, K. (2010). A review of experience curve analyses for energy demand technologies. *Technological forecasting and social change*, 77(3), 411–428.
- Wikström, M. & Lewald, A. (2017). Klimatvärdering av icke-publika och publika laddstationer inom klimatklivet.

- Xiang, W., Kunz, T. & St-Hilaire, M. (2014). Controlling electric vehicle charging in the smart grid. I *Internet of things (wf-iot), 2014 ieee world forum on* (s. 341–346).
- Yang, J., He, L. & Fu, S. (2014). An improved pso-based charging strategy of electric vehicles in electrical distribution grid. *Applied Energy*, 128, 82–92.