



Sveriges lantbruksuniversitet
Swedish University of Agricultural Sciences

Institutionen för energi och teknik

Driftmodellering av saltvattenbatteri för kapning av effekttoppar – för en förskoleverksamhet i Uppsala

*Operational modeling of salt water battery for cutting power
peaks
- for a preschool facility in Uppsala*

Hilda Andersson-Gran Albin Björn Sonja Byström Winning
Judith Bösenecker Gunnel Ersdotter Madeleine Karlberg
David Norell Helmsjö



”Saltvattenbatteriet på Tiundaskolan, Fotograf: David Norell Helmsjö, 2019”

Kandidatuppsats i teknik

Civilingenjörsprogrammet i energisystem

**Examensarbete 2019:09
ISSN 1654-9392
Uppsala 2019**

Driftmodellering av saltvattenbatteri för knappning av effekttoppar – för en förskoleverksamhet i Uppsala

Operational modeling of salt water battery for cutting power peaks – for a preschool facility in Uppsala

*Hilda Andersson-Gran Albin Björn Sonja Byström Winning
Judith Bösenecker Gunnel Ersdotter Madeleine Karlberg
David Norell Helmsjö*

Handledare: Anders Larsolle, institutionen för energi och teknik, SLU
Examinator: David Ljungberg, institutionen för energi och teknik, SLU

Omfattning: 15 hp
Nivå, fördjupning och ämne: Grundnivå, G2E, teknik
Kurstitel: Självständigt arbete i energisystem
Kurskod: EX0759
Program/utbildning: Civilingenjörsprogrammet i energisystem 300 hp
Kursansvarig institution: Institutionen för energi och teknik

Utgivningsort: Uppsala
Utgivningsår: 2019
Omslagsbild: Saltvattenbatteriet på Tiundaskolan, fotograf: David Norell Helmsjö, 2019
Serietitel: Examensarbete (Institutionen för energi och teknik, SLU)
Delnummer i serien: 2019:09
ISSN: 1654-9392
Elektronisk publicering: <http://stud.epsilon.slu.se>

Nyckelord: effektbrist, programmering, energilager, elnät, PLC

Sveriges lantbruksuniversitet
Swedish University of Agricultural Sciences

Fakulteten för naturresurser och jordbruksvetenskap
Institutionen för energi och teknik

Abstract

There is a power deficit in Uppsala's power grid. Municipal companies have an obligation to contribute with solutions to the power deficit. Skolfastigheter AB have therefore installed an environmentally friendly salt water battery in one of their properties. The goal of this project is to create an algorithm for controlling the battery so that it cuts power peaks at a preschool in Uppsala. The algorithm is created based on economical, environmental, and political aspects. A model of the battery is constructed in which technical specifications for the real battery are used. The model is tested using historical power usage data from one of Skolfastigheter AB's preschool properties. The resulting model successfully cuts the facility's power peaks as intended. The model succeeds even when the input data are varied. The algorithm is also applied in reality and controls the battery via a programmable logic controller (PLC). The goal of cutting power peaks is also met with the PLC. Simulation of the battery cuts power peaks more optimally than when the algorithm is implemented in reality. To improve the model, data from more preschools as well as possibilities to perform more experiments are required. The usage of programmable power storage is today not economically profitable. Batteries do however contribute to reaching Uppsala municipality's environmental and climate goals. Batteries also contribute to a more robust energy system where fossil power reserves can be avoided.

Sammanfattning

I Uppsalas elnät råder effektbrist. Kommunala bolag har ett särskilt ansvar att bidra med lösningar till effektbristen. Uppdragsgivaren Skolfastigheter AB har därför installerat ett miljövänligt saltvattenbatteri i en av deras verksamhetslokaler. Syftet med projektet är att skapa en algoritm för styrning av detta batteri som reducerar effekttoppar hos en förskola i Uppsala. Algoritmen byggs utifrån ekonomiska, miljömässiga och politiska aspekter. En modell av batteriet skapas där tekniska specifikationer för det verkliga batteriet används. Modellen testas med data för historisk elförbrukning för en av bolagets förskoleverksamheter. Den resulterande modellen lyckas reducera verksamhetens effekttoppar som avsett. Modellen lyckas även då dessa data revideras och varieras. Algoritmen tillämpas även i verkligheten och styr batteriet via ett programmerbart styrsystem (PLC). Även med PLC uppnås syftet att reducera effekttoppar. Simulering av batteriet ger en mer optimal reduktion av effekttoppar än vid implementering i verkligheten. För ytterliggare förbättring av modellen krävs data från fler förskolor samt möjlighet att utföra fler experimentella försök. Användning av denna typ av programmerbara energilagrar är i dagsläget inte ekonomiskt lönsamt. Batterier bidrar dock till att uppnå Uppsala kommuns miljö- och klimatmål. Batterier bidrar dessutom till ett mer robust energisystem där fossila effektreserver kan undvikas.

Innehåll

1	Inledning	4
1.1	Bakgrund	4
1.2	Syfte	4
1.3	Metod	4
1.4	Förutsättningar	5
1.4.1	Batteri	5
1.4.2	Solceller	5
1.4.3	Tillgänglig lastdata	5
2	Utförande	6
2.1	Effektläget	6
2.2	Uppsala kommun	6
2.3	Ekonomi	7
2.4	Dataanalys	7
2.5	Jämförelse mellan saltvattenbatteri och litiumjonbatteri	9
2.6	Algoritmens utformning	9
2.7	Numeriskt modellbygge	9
2.8	Programmering av Tiundaskolans saltvattenbatteri	10
2.8.1	Jämförelse teoretiskt och verkligt batteri	11
3	Resultat	11
3.1	Ekonomi	11
3.2	Statistik	12
3.3	Jämförelse mellan saltvattenbatteri och litiumjonbatteri	12
3.4	Numerisk modell	13
3.4.1	Känslighetsanalys i modellen	14
3.5	Programmering av Tiundaskolans saltvattenbatteri	15
3.5.1	Testkörning av saltvattenbatteri	15
3.5.2	Jämförelse teoretiskt och verkligt batteri	16
4	Diskussion	16
4.1	Effektläget	16
4.2	Datamängd	17
4.3	Statistik	17
4.4	Ekonomi	17
4.5	Jämförelse med litiumjonbatteri	17
4.6	Matlabmodell och Känslighetsanalys	17
4.7	Programmering av Tiundaskolans saltvattenbatteri	18
4.7.1	Möjliga felkällor och svårigheter vid genomförandet	18
5	Slutsatser	18

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Det kommunala bolaget Skolfastigheter AB äger skol- och förskolefastigheter i Uppsala, därav 60 separata förskolor och ytterligare 15 förskolor planeras att byggas inom kommande år. Företaget utprövar och tillämpar många moderna energilösningar i sina fastigheter. I den nybyggda Tiundaskolan finns ett saltvattenbatteri installerat i källaren. Saltvattenbatterier är en ny typ av batterier på marknaden som består av mer miljövänliga komponenter än konventionella batterier. Saltvattenbatteriet är för skolan i fråga underdimensionerat och är inköpt i syfte att undersöka möjligheten att använda denna typ av energilagring i mindre verksamheter, såsom förskolor. Energilagret kan nyttjas för att minska förskolans belastning på elnätet, vilket behövs då effektbrist råder i Uppsala kommun. Saltvattenbatteriet är dock i dagsläget inte optimalt programmerat för ändamålet, varför projektets syfte är att skapa en algoritm för detta. Projektet är ett samarbete med STUNS Energi, som agerar länk mellan universitet och samhälle och samordnar projekt ur miljö- och energiperspektiv.

1.2 Syfte

Syftet med denna studie är att ta fram en algoritm för att styra ett saltvattenbatteri så att effekttoppar hos en förskoleverksamhet i Uppsala reduceras. Effekttoppar mäts i Watt [W] och definieras i arbetet som de momentana toppar som belastar elnätet när användningen av elektrisk effekt överstiger ett gränsvärde. Algoritmen ska kunna hantera förbrukningens dags- och säsongvariationer. Syftet med att använda saltvattenbatteriet som beskrivet är att minska effektuttaget från elnätet när belastningen är stor och på så vis bidra till att lösa stadens pågående effektbrist. Den algoritm som tas fram ska vidare kunna användas som referens för implementering i andra förskoleverksamheter i framtiden. Miljömässiga, ekonomiska och politiska aspekter analyseras för att skapa en algoritm som reducerar effekttoppar optimalt. Principen sätts även i en större kontext för att undersöka vad denna typ av smarta energilagring kan innebära för samhällets energisystem i stort.

1.3 Metod

Under projektarbetets gång har kontinuerliga möten med Skolfastigheter och STUNS ägt rum, varifrån material erhållits. Arbetet har också bestått av litteraturstudier om samhällsaspekter relaterade till energilagring och effekttoppar på elnätet.

Tiundaskolans saltvattenbatteri med tillhörande programvara används som utgångspunkt för att ta fram en generell algoritm för drift av saltvattenbatterier. Algoritmen ska anpassas efter en förskola och därför studeras det verkliga förbrukningsmönstret hos en av uppdragsgivarens förskolor; Jarlaparkens förskola. Verksamhetens förbrukning av elkraft tillhandahölls som timdata från Vattenfall AB. Vidare utfördes en modellering av styrningen av saltvattenbatteriet, där algoritmen implementerades i modellen. Utvärderingen av modellen utfördes genom simulering med historisk data. Algoritmen utvärderades dessutom med verkliga experiment; genom implementering i det faktiska saltvattenbatteriet på Tiundaskolan.

1.4 Förutsättningar

1.4.1 Batteri

Det saltvattenbatteri som projektet avser är av modell Aquion S (48V) från tillverkaren Greenrock. Batteri finns installerat på Tiundaskolan i Uppsala och styrs direkt via ett programmerbart styrsystem, även kallat Programmable Logic Controller (PLC) från Beckhoff. Vid programmering av PLC:n används programvaran TwinCat3 (Beckhoff Automation GmbH & co. KG, Tyskland). Tekniska specifikationer för batteriet erhålls av tillverkaren och presenteras i Tabell 1. Batteriets katod består av manganoxid, anod av koltitanfosfat och elektrolyt av en natriumsulfatlösning (saltvatten). Batteritypen är relativt ny och syftet med valet av komponenterna är att batteriet ska vara miljövänligt jämfört med de batterier som idag är etablerade på marknaden. Batteriet är underhållsfritt och ska enligt tillverkaren tåla fullständig urladdning utan att ta skada.

Tabell 1: Tekniska specifikationer för saltvattenbatteriet

Teknisk egenskap	Aquion S (48V)
Kapacitet	24 kWh
Verkningsgrad	90 %
Kapacitet efter 3000 laddcykler	70 %
Nominell effekt	6 kW

1.4.2 Solceller

Både Tiundaskolan och Jarlaparkens förskola är försedda med solcellsanläggningar på respektive tak. Den installerade effekten är 106 kW på Tiundaskolan och 61 kW på Jarlaparkens förskola. Båda anläggningar nyttjar i första hand den solkraft som produceras inom sina respektive fastigheter. Då mer elektrisk effekt produceras än konsumeras levereras effekten till elnätet och Skolfastigheter erhåller ca 75 öre/kWh.

1.4.3 Tillgänglig lastdata

Förbrukningen av elektrisk energi [kWh] per timme [h] för Tiundaskolan och Jarlaparkens förskola tillhandahålls av Vattenfall. Förbrukningsdatan för Jarlaparkens förskola omfattar tidsperioden 1 augusti 2017 till 31 mars 2019 och Tiundaskolan tidsperioden 1 augusti 2018 till 31 mars 2019. Jarlaparkens förskola har solceller på taket, vilka installerades i September 2018. Förbrukningsdatan ligger till grund för vidare analyser i projektarbetet. Algoritmen ska enligt önskemål i instruktionen försöka anpassas efter förbrukningens dags- och säsongsvariationer.

Jarlaparkens förskola och Tiundaskolan har haft sina respektive solcellsanläggningar installerade i mindre än ett år vardera, vilket begränsar mängden slutsatser som kan dras angående produktionen av elektrisk energi från solen under ett sammanhängande år (Karlberg 2019a).

2 Utförande

2.1 Effektläget

Svenska Kraftnät ansvarar för distributionen av elektrisk energi genom Sverige och har som ansvarsområden att säkerställa den momentana balansen i kraftsystemet och att det bibehåller rätt frekvens. Kraftproduktionen är ojämnt fördelad med avseende på befolkningstätheten i Sverige, vilket leder till ett ojämnt belastat elnät med tidsvarierande under- och överskott av elkraft. Övervakning och hantering av momentan överföringskapacitet av elektrisk effekt i stamnätet förenklas av att Sverige är indelat i fyra elområden som sköts av Svenska Kraftnät, benämnda SE1-SE4. Den tidsvarierande produktionen av elektrisk energi i landet påverkar flödena av elektrisk energi mellan områdena och bidrar till att skillnader i pris vid inköp och förbrukning av elektrisk energi uppkommer. Uppsala tillhör elområde SE3, som generellt har underskott av produktion av elektrisk energi. Elområdet SE3, tillsammans med SE4, är beroende av den kärnkraft som finns lokaliserad i båda områden (Karlberg 2019b).

Under riktigt kalla vinterdagar har förbrukningen av elektrisk energi en tendens att stiga i landet eftersom efterfrågan ökar, vilket kan resultera i så kallade topplasttimmar. Vid sådana tillfällen kan det vara svårt att få elkraften att räcka till och det kan uppstå problem för Svenska Kraftnät att distribuera. Därför finns det lagstadgat att Svenska Kraftnät måste upphandla en effektreserv som Sverige kan nyttja vid topplasttimmar. För den kommande vintern år 2019-2020 har upphandlingar genomförts med Sydkraft Thermal Power AB, där det oljeeldade kondenskraftverket Karlshamnsverket utgör 562 MW effektreserv (Karlberg 2019b).

En annan lösning vid effektbrist är att importera elektrisk effekt från grannländer. Sverige exporterar på samma vis effekt till andra länder med effektbrist. Energilager som kappar effekttoppar bidrar till att minska behovet av import och öka möjligheterna till export. Således kan en större andel av den konsumerade elektriska effekten i Sverige och omkringliggande länder produceras i Sverige, där elproduktionen generellt orsakar lägre utsläpp än grannländerna (Norell Helmsjö 2019b).

2.2 Uppsala kommun

Kommunala bolag i Uppsala, såsom Skolfastigheter, styrs i enlighet med *Miljö- och klimatprogram 2014-2023* samt *Energiprogram 2050*. I dessa ingår flera uppdrag med syfte att frigöra så mycket elektrisk effekt som möjligt. Alla kommunala bolag har i uppdrag att inom ramen för sin verksamhet se över hur de kan bidra till denna minskning av elektrisk effekt (Andersson-Gran 2019b).

Inom *Miljö- och klimatprogram 2014-2023* finns olika etappmål. De som kan tydas motiverande till användning av ett saltvattenbatteri är Etappmål 4, 5 och 7. Etappmål 4 fokuserar på nödvändigheten i energieffektivisering av fastigheter för att förnybar energi ska räcka till. Etappmål 5 handlar om hållbar upphandling för en giftfri miljö och har som mål att minska exponering och spridning av kemikalier. Förbättringen ska ske genom utfasning av miljö- och hälsofarliga ämnen via giftfritt byggande, samt ställda krav vid upphandling - med särskilt fokus på en giftfri förskola. Etappmål 7 syftar till att öka hållbart byggande och förvaltande, vilket innefattar val av giftfria material, samt främjandet av tekniker för effektivare energianvändning (Andersson-Gran 2019b).

Kapacitetsbegränsningar inom elsektorn begränsar idag Uppsala kommuns tillväxtmål. Inom *Energiprogram 2050* framgår att effektproblematiken inte löses av att endast övergå till ett

resurssnålt och förnybart energisystem. För en lösning av effektbristen krävs även åtgärder såsom efterfrågeflexibilitet och energilagring, vilket kommer vara en nödvändighet i framtidens energisystem. Genom ett mer flexibelt energisystem, där effektuttag kan regleras efter elnätets belastning, kan effekttoppar jämnas ut. Teknologi för automatisering av optimal effektstyrning, såsom smarta energilagrar, måste utvecklas och behovet ökar i takt med den ökande andelen intermittenta energikällor, samtidigt som Uppsalas tillväxt är stark (Andersson-Gran 2019b).

Energilagringmöjligheter kommer fortsätta utvecklas, då lagringen kan minska effektuttagen och därmed öka nätkapaciteten. Idag består de flexibla användarna endast av större industrier men i framtiden kan de även utgöras av mindre verksamheter och privatpersoner. Fram till dess, framgår det i *Energiprogram 2050*, har kommunala aktörer ett särskilt ansvar att implementera tekniska lösningar som främjar utvecklingen i enighet med energiprogrammet, t.ex. batterilösningar, trots att de kanske har en sämre kortsiktig finansiell lönsamhet (Andersson-Gran 2019b).

2.3 Ekonomi

Utöver fasta poster såsom inköp och installation, innebär användningen av det aktuella saltvattenbatteriet rörliga kostnader och besparingar. Vid beräkningar av dessa poster uppskattas Jarlaparkens förskola bedriva normal verksamhet under 250 dagar, vilket motsvarar antalet vardagar under ett kalenderår. Saltvattenbatteriets användning mäts i cykler. En cykel innebär att batteriet helt laddas upp och laddas ur. Saltvattenbatteriet antas användas en cykel per verksamhetsdag. Den tydligaste angivelsen av saltvattenbatteriets livslängd och slitage som tillverkaren anger är att 70 % av ursprunglig kapacitet kvarstår efter 3 000 cykler; därför analyseras en period som motsvarar just detta antal. Med antaget användningssätt; en cykel om dagen, 250 dagar per år, motsvarar det här tolv år. Då det inte genom tillverkaren tydligt framgår hur många cykler som utgör batteriets totala livslängd, antas det vara begränsat till 10 000 cykler, vilket motsvarar 40 år. Antagandet krävs vid framställning av en kalkyl motsvarande hela batteriets livslängd (Andersson-Gran 2019a).

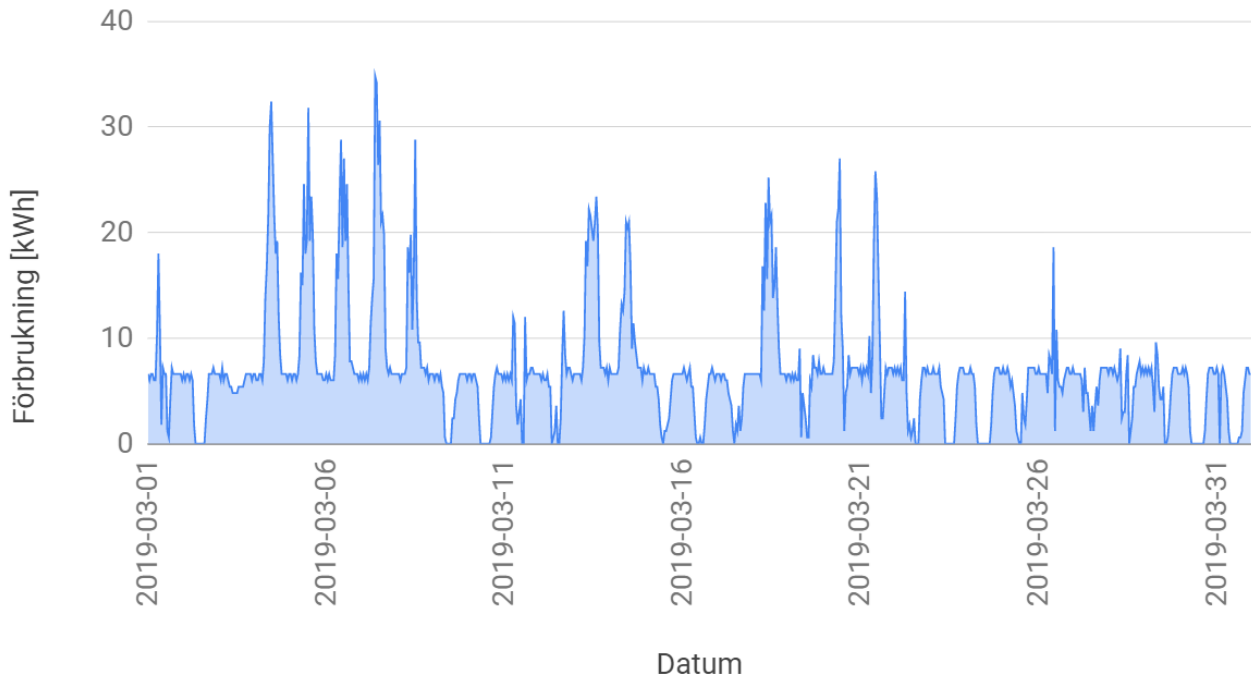
Det finns tre poster kopplade till batterianvändningen som påverkar de rörliga kostnaderna för energi och effekt; effekttariff, högbelastningsavgift samt förluster. Effekttariffen tas ut av elnätsägaren och baseras på den högsta uttagna effekten [kW] under en kalendermånad. Mellan november och mars råder en högbelastningsavgift från elleverantören under vardagar klockan 06-22. Det innebär att den elektriska effekten under dessa intervall är dyrare. Användning av saltvattenbatteriet innebär förluster, det har en verkningsgrad på 90 % (Andersson-Gran 2019a).

2.4 Dataanalys

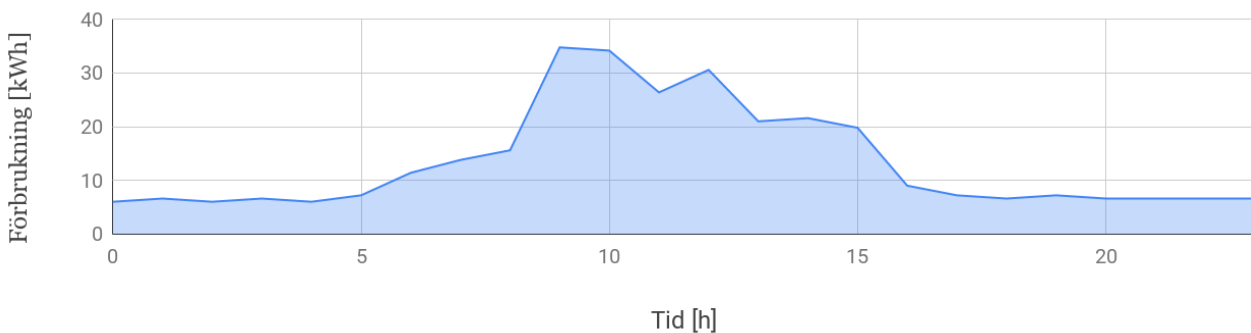
En illustration av förbrukningsmönstret av elektrisk energi [kWh] per timme [h], elektrisk effekt [kW], hos Jarlaparkens förskola visas i Figur 1 månaden mars 2019. Där kan avläsas att Jarlaparkens förskola uppvisar en ökad förbrukning under vardagar mellan klockan 07 och 19, med ett flertal förbrukningstoppar per dag. Effekttopparna ligger enligt Figur 1 som oftast kring 20-30 kWh/h. Under kvällar, nätter och helger bibehålls en basförbrukning kring 6 kW (Karlberg 2019a).

I Figur 2 visas förbrukningen av elektrisk effekt tydligare över ett dygn, 7 mars 2019. Här kan basförbrukningen urskiljas under tidig morgon innan verksamheten öppnar. Under förmiddagen stiger förbrukningen succesivt fram till runt klockan 9.00, då månadens högsta topp på 35 kW inträffar. Därefter varierar förbrukningen, men sjunker sammantaget för att åter nå nivån för

basförbrukning till kvällen. Förbrukningsdatan inkluderar eventuell producerad elektrisk energi från solen, vilket bidrar till ett lägre effektuttag och förbrukning hos Vattenfall.



Figur 1: Förbrukning av elektrisk energi [kWh] per timme [h] Jarlaparkens förskola mars 2019



Figur 2: Förbrukning av elektrisk energi [kWh] per timme [h] Jarlaparkens förskola 7 mars 2019

Vid en statistisk analys av data över effekttopparna på Jarlaparken tas 95 % dubbelsidiga konfidensintervall fram för två egenskaper hos topparna: höjd - maximal effekt och bredd - hur länge toppen varar. Datan antas vid beräkningarna vara normalfördelad (Björn och Norell Helmsjö 2019). Även tidpunkten för den högsta toppen under dagen studerades. När statistisk analys av Jarlaparkens effekttoppar utförs antas företeelsen *effekttopp* innebära att medeleffekten under en timme överstiger 20 kWh. Antagandet baseras på analys av data från Jarlaparkens

förskola mellan augusti 2017 och augusti 2018, vilket motsvarar tiden från förskolans öppnande till strax före installation av solceller. (Björn och Norell Helmsjö 2019). För Jarlaparkens förskola studeras även lastkurvans variationer mellan årstiderna (Karlberg 2019a).

2.5 Jämförelse mellan saltvattenbatteri och litiumjonbatteri

Saltvattenbatteriet jämförs med litiumbatteriet Tesla Powerwall 2 som är avsett för stationära tillämpningar. Det möjliggör en bedömning av dess egenskaper. Litiumjonbatterier är vanliga i bland annat datorer, mobiltelefoner och elbilar. Jämförelsen behandlar tekniska, miljömässiga och etiska aspekter (Norell Helmsjö 2019a).

2.6 Algoritmens utformning

Syftet med modellen är att minska effekttoppar, där den största toppen varje månad är den viktigaste. Algoritmen som styr saltvattenbatteriet ska vara byggd så att batteriet är aktivt när den uttagna effekten från elnätet når ett visst värde, som i det följande kommer att kallas för gränsvärde. Dessutom ska saltvattenbatteriet laddas vid behov när detta gränsvärde inte överstigs. Det är även önskvärt att ladda saltvattenbatteriet under nattetid, då efterfrågan och eventuellt priset på elektrisk effekt är lägre. Därutöver vore möjligheten till viss uppladdning under dagen fördelaktigt så att så många effekttoppar som möjligt kan minskas. Med dessa förutsättningar kan en algoritm formuleras som sedan kan översättas till datorkod som styr saltvattenbatteriet (Bösenecker 2019b).

Grundidén till programmet är att skicka informationen om hur mycket effekt som dras från elnätet till saltvattenbatteriet och låter det vid en viss storlek på effekten kompensera med lagrad energi. Genom att läsa av effekten kontinuerligt kan saltvattenbatteriet även laddas dagtid de timmar då förbrukningen ligger under gränsvärdet.

Gränsvärdet vid vilket saltvattenbatteriet startar måste defineras i algoritmen. Då saltvattenbatteriet har en begränsad kapacitet både när det gäller effekt och lagring kan det endast leverera en viss effekt under en viss tid. Därför ska gränsvärdet inte vara för lågt, eftersom saltvattenbatteriets laddning då kan förbrukas innan dagens högsta effekttopp ägt rum. Gränsvärdet bör dock inte heller sättas för högt eftersom saltvattenbatteriet då används mer sällan och därmed inte bidrar lika mycket till att avlasta elnätet. Förutom det bör det finnas en funktion som tar hänsyn till eventuella överskott av elektrisk energi, som produceras från solcellerna, och som ser till att saltvattenbatteriet laddas när solcellerna producerar mer effekt än verksamheten förbrukar. Modellen ska dessutom ta hänsyn till att laddningen av saltvattenbatteriet innebär ett effekttuttag i sig, så denna bör ske på en nivå som håller uttaget under gränsvärdet. Algoritmen implementeras på två olika sätt; i en numerisk modell och på det verkliga saltvattenbatteriet (Bösenecker 2019b).

2.7 Numeriskt modellbygge

Vi har valt att studera två olika styrningsalternativ av saltvattenbatteriet. Den ena varianten är schemabaserad; den mäter vad klockan är. Den andra typen av styrning mäter hur mycket effekt som dras från elnätet. Det är den andra typen av styrning som implementeras eftersom den bättre hanterar variationerna från dag till dag, vilka kan ses i Tabell 1. Modellen arbetar genom att läsa in vilken effekt som förbrukas och jämför denna med ett fördefinierat gränsvärde. Gränsvärdet kallas *aktiveringseffekt* då det implementeras i kod. Namnet syftar på den uppmätta näteffekt vid vilken det simulerade batteriet aktiveras. En instruktion som anger vilken effekt

det simulerade batteriet ska arbeta vid skapas utifrån aktiveringseffekten och effekten från nätet. Instruktionen bestäms utifrån fyra fall, vilka lyder:

- Fall 1: Effekten från elnätet är större än aktiveringseffekten med mer än batteriets högsta effekt. Instruktionen blir att ladda ur på full effekt.
- Fall 2: Effekten från elnätet är större än aktiveringseffekten och mindre än batteriets högsta effekt. Instruktionen blir att ladda ur på skillnaden mellan de två.
- Fall 3: Effekten från elnätet är mindre än aktiveringseffekten med mer än batteriets högsta effekt. Instruktionen blir att ladda på full effekt.
- Fall 4: Effekten från elnätet är mindre än aktiveringseffekten och skillnaden mellan de två är mindre än batteriets högsta effekt. Instruktionen blir att ladda på skillnaden mellan de två.

Huruvida det är möjligt att följa instruktionen bestäms genom att den instruerade effekten jämförs med batteriets laddningsstatus. Till exempel ska effekt ska inte tillföras batteriet då det är fulladdat även om instruktionen är sådan. Sex olika fall bestämmer den faktiska effekt batteriet kommer arbeta vid utifrån instruktionen och laddningsstatusen.

- Fall 1: Instruktionen är att ladda när batteriet är fulladdat. Den faktiska effekten sätts till noll.
- Fall 2: Instruktionen är att ladda och batteriet har tillräckligt med lagringsutrymme för att kunna ladda med den instruerade effekten.
- Fall 3: Instruktionen är att ladda och batteriet är inte fulladdat, men kommer bli fullt innan nästa instruktion ges. Batteriet sätts att ladda så det är fullt när nästa instruktion ges.
- Fall 4: Instruktionen är att ladda ur när batteriet är tomt. Effekten sätts till noll.
- Fall 5: Instruktionen är att ladda ur och batteriet har nog med laddning för att ladda ur med instruerad effekt.
- Fall 6: Instruktionen är att ladda ur och batteriet är inte helt urladdat, men kommer bli tomt innan nästa instruktion ges. Batteriet sätts att ladda ur så det är tomt när nästa instruktion ges.

2.8 Programmering av Tiundaskolans saltvattenbatteri

Saltvattenbatteriet på Tiundaskolan är uppkopplat mot en PLC och ett kommunikationscenter från företaget Victron Energy. Batteriet är också uppkopplat mot internet så att batteriets användning, både historisk och i realtid, går att avläsa via Victron Energys portal.

Batteriet styrs med hjälp av ett börvärde. Ett negativt börvärde innebär att batteriet ger effekt och ett positivt börvärde innebär att batteriet laddas. När börvärdet är satt till noll är batteriet inaktivt. Koden använder last från Jarlaparkens förskola. Lasten utgörs av timvärden i kW som ligger lagrade i en vektor i koden. Programmet läser av tid på dygnet och hämtar sedan motsvarande timvärde. Batteriets aktiveringsenergi är framtagen med hjälp av tidigare

simulationer av batteriets körning. Om skolans last överskrider aktiveringsenergin ger batteriet uteffekt för att kunna minska skolans omedelbara effektbehov. Underskrids aktiveringsenergin laddar batteriet. Lastdatan tas från ett dygn i slutet av september 2018 då Jarlaparken installerat solceller. Solljusets effekt är medräknad i lastdatans timvärden (Byström Winning och Ersdotter 2019).

2.8.1 Jämförelse teoretiskt och verkligt batteri

Batteriets reaktionstid utvärderas genom att manuellt ändra inställt börvärde för effekten och notera tiden innan batteriets verkliga effekt överensstämmer med börvärdet. Då batteriets utgivna effekt fluktuerar anses den överensstämman när effekten ligger inom ett visst intervall från börvärdet. Data insamlas för intervallen 100 W och 300 W (Byström Winning 2019a). Genom att låta batteriet ladda ur från laddningsgrad 30 % med börvärde 6000 W undersöks även batteriets beteende vid låga laddningsgrader. Börvärdet ställs in manuellt då batteriet vid körning efter programmerad kod och fiktiv lastdata inte laddas ur till tillräckligt låg laddningsgrad. Samma experiment utförs vid uppladdning från laddningsgrad 50 %. Batteriet går efter koden istället för manuellt och det inställda börvärdet överskrider alltid 6000 W (Byström Winning 2019b).

3 Resultat

3.1 Ekonomi

Saltvattenbatteriets inköpspris är 192 000 kr exkl. moms och installationskostnad 20 000 kr exkl. moms. Saltvattenbatteriet kan sänka månadens högsta effektuttag med maximalt 6 kW och därmed bidra till en sänkt effekttariff. Genom att ladda saltvattenbatteriet under nätterna då elpriset är lägre, men förbruka den elektriska effekten under högbelastningstiden som råder under dagen, kan mellanskillnaden sparas. På grund av de förluster som fås tillkommer en ökad kostnad för den elektricitet som laddas på batteriet men går till spillo (Andersson-Gran 2019a). Resultatet av dessa rörliga poster för tolv respektive 40 års användning presenteras exkl. moms i Tabell 2.

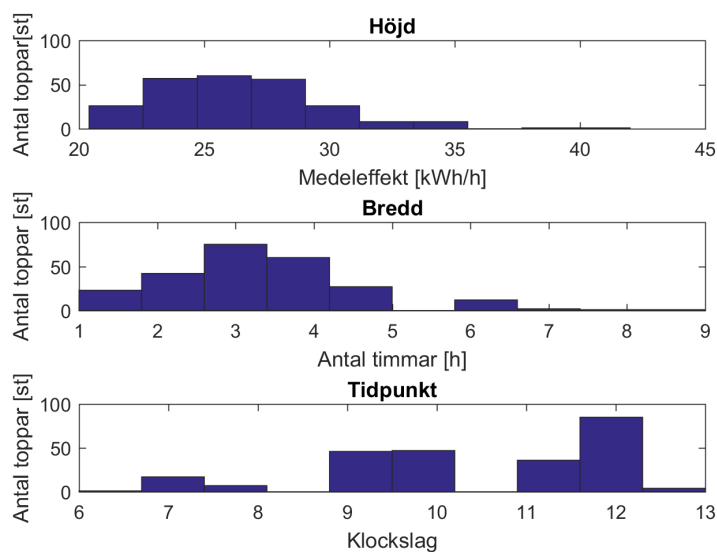
Tabell 2: Ekonomisk balans där besparingar visas som positiva och kostnader negativa.

Ekonomisk post	12 års användning	40 års användning
Inköpspris	-192 000 kr	-192 000 kr
Installeringskostnad	-20 000 kr	-20 000 kr
Effekttariff	36 288 kr	120 960 kr
Högbelastningsavgift	9 468 kr	18 540 kr
Förluster	-5 028 kr	-9 854 kr
Balans	-171 272 kr	-82 354 kr

Sammanlagt under de tolv första åren kan 40 728 kr exkl. moms besparas genom optimal drift av batteriet. Besparingen står i proportion till investeringskostnaden på 112 000 kr, vilket innebär att det inte ger ekonomisk lönsamhet. Om saltvattenbatteriet kan användas i 40 år så skulle totalt 129 646 kr exkl. moms kunna besparas, vilket inte heller ger ekonomisk lönsamhet (Andersson-Gran 2019a).

3.2 Statistik

Figur 3 visar närmre analys av de effekttoppar på Jarlaparkens förskola som överskrider 20 kWh/h Under perioden augusti 2017 till augusti 2018. Höjd och bredd för topparna, samt vid vilket klockslag den högsta toppen på ett dygn inträffar visas i Figur 3. Resultaten av de 95 % dubbelsidiga konfidensintervall som beräknats för höjd och bredd visas i Tabell 3. Vid analys av tidpunkten för dagens högsta förbrukning observerades att mindre än 2 % inträffade efter klockan 12:00 och 10 % inträffade före klockan 09:00 (Björn och Norell Helmsjö 2019). Variationerna mellan årstiderna är små jämfört med de dagliga variationerna och inget samband mellan årstid och effektuttag konstateras (Karlberg 2019c).



Figur 3: Topparnas höjd, bredd samt tidpunkt för högsta förbrukning under perioden augusti 2017 till augusti 2018

Tabell 3: Konfidensintervall

Egenskap	Undre gräns	Övre gräns
Höjd	25,98 kWh	26,84 kWh
Bredd	3h 9 min	3h 31min

3.3 Jämförelse mellan saltvattenbatteri och litiumjonbatteri

De tekniska specifikationerna för Tesla Powerwall och saltvattenbatteriet visas i Tabell 4 (Norell Helmsjö 2019a).

Den nominella effekten är något högre för saltvattenbatteriet. Den tekniska aspekt där batterityperna skiljer sig mest åt är vikten i förhållande till lagringskapacitet och effekt. Saltvattenbatteriet har avsevärt högre vikt (Norell Helmsjö 2019a).

Tesla Powerwall 2 kostar 6137 kr per kWh lagringskapacitet och saltvattenbatteriet kostar 8000 kr per kWh. Således är saltvattenbatteriet 30 % dyrare i inköp jämfört med Tesla Powerwall

Tabell 4: Batteriernas tekniska specifikationer

Teknisk egenskap	Tesla Powerwall 2	Aquion S (48V)
Kapacitet	13,5 kWh	24
Verkningsgrad	90 %	90 %
Nominell effekt	5 kW	6 kW
Vikt	125 kg	1520
Energidensitet	108 Wh/kg	15,8 Wh/kg
Effekttäthet	40 W/kg	3,9 W/Kg

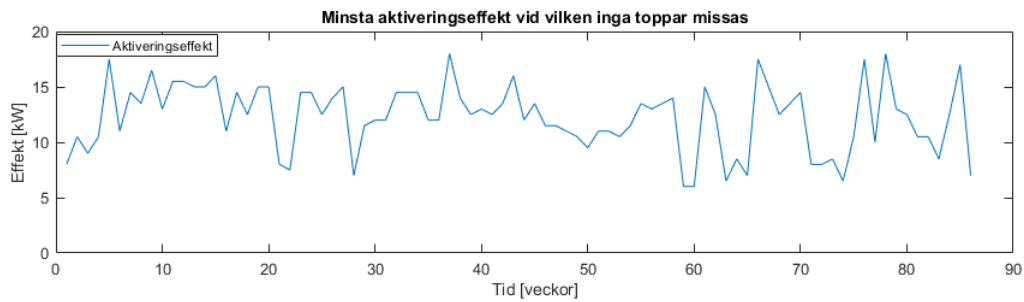
2 (Norell Helmsjö 2019a).

Batteriernas materialskillnader avspeglas i deras miljöpåverkan. Det litium som används i Tesla Powerwall 2 och andra litiumjonbatterier bryts ofta under saltöknar i Sydamerika. Brytningen kräver stora mängder vatten vilket har orsakat problem då vissa områden med litiumfyndigheter redan har vattenbrist. Det finns även en etisk aspekt med valet av material då litiumjonbatterier innehåller kobolt. Denna metall är kritiserad då den till stor del bryts i det konfliktdrabbade Kongo med svåra arbetsförhållanden och där barnarbete är vanligt förekommande (Norell Helmsjö 2019a).

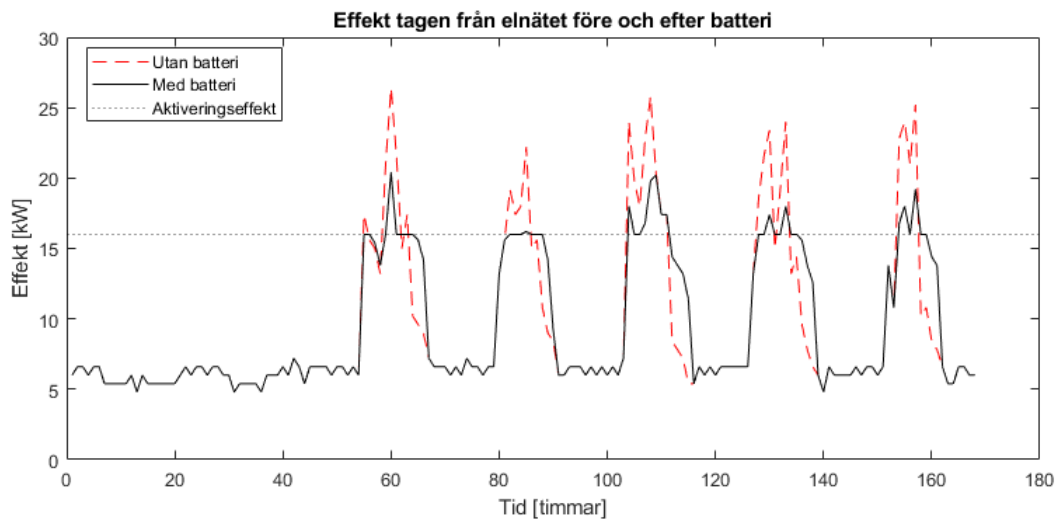
Saltvattenbatteriet innehåller inte dessa kontroversiella metaller. Batteriet har fått Cradle to Cradles Bronscertifiering, vilken bland annat tar hänsyn till materialets påverkan på hälsa, huruvida materialet är återvunnet och kan återvinnas, hur stor del av den använda energin i tillverkningen som kommer från förnybara källor, produktens påverkan på tillgång av rent vatten samt den sociala rättvisan (Norell Helmsjö 2019a).

3.4 Numerisk modell

Den minsta aktiveringseffekten som kan användas för Jarlaparken är 18 kW. Med 18 kW som aktiveringseffekt laddar saltvattenbatteriet aldrig ur innan en effekttopp har passerat. Aktiveringseffekten på 18 kW syns i Figur 4 som ett globalt maximum (Björn 2019). Med aktiveringseffekten 18 kW sänks effekttopparnas storlek med i snitt 5,07 kW. Jämförelse mellan sänkning av effekttoppar för åren 2017 och 2018 ger ingen nämnvärd skillnad (Bösenecker 2019a). I Figur 5 syns hur effekttopparna reduceras av det simulerade saltvattenbatteriet. Effekttopparna tenderar även att dras ut något på bredden eftersom batteriet börjar laddas då effekttuttaget understiger aktiveringseffekten. Laddning av saltvattenbatteriet innebär i sig en viss extra effekt som dras från elnätet, varför effekttuttaget blir något större direkt efter toppen än det var utan saltvattenbatteriet.



Figur 4: Variation av simulerade saltvattenbatteriets aktiveringseffekt över tid på Jarlaparkens förskola



Figur 5: Simulering av saltvattenbatteri på Jarlaparken under en vecka i September 2018

3.4.1 Känslighetsanalys i modellen

En känslighetsanalys med avseende på hur mycket effekttoppar kan sänkas gjordes. Basfallet var noll missade toppar och en sänkning med i snitt 5,07 kW. Resultatet av känslighetsanalysen visas i tabell 5

Tabell 5: Känslighetsanalys

Parameter	Förändring [%]	Missade toppar	Sänkning av toppar [kW]	%
Last [kW]	-4	0	5,00	-1,3
	+4	6	5,12	+0,9
Kapacitet [kWh]	-5	2	5,01	-1,1
	+5	0	5,13	+1,2
Effekt [kW]	-5	0	4,91	-3,1
	+5	1	5,23	+3,2

Därutöver görs även en scenarioanalys där två mindre saltvattenbatterityper från Greenrocks sortiment jämförs med saltvattenbatteriet från Skolfastigheter. I jämförelsen mellan saltvattenbatteriernas prestation och det befintliga saltvattenbatteriets prestation används i båda fall den optimala aktiveringseffekten enligt samma kriterier som beskrivna i 3.4. För saltvattenbatteriet med 20 kWh blir denna återigen 18 kW. Däremot blir den för batteriet med 16 kWh 19 kW med en missad topp, då aktiveringseffekten för noll missade toppar med bara 2,92 kW visar ett betydligt lägre resultat när det gäller sänkningen av topparna. Resultatet visas i Tabell 6 (Bösenecker 2019a).

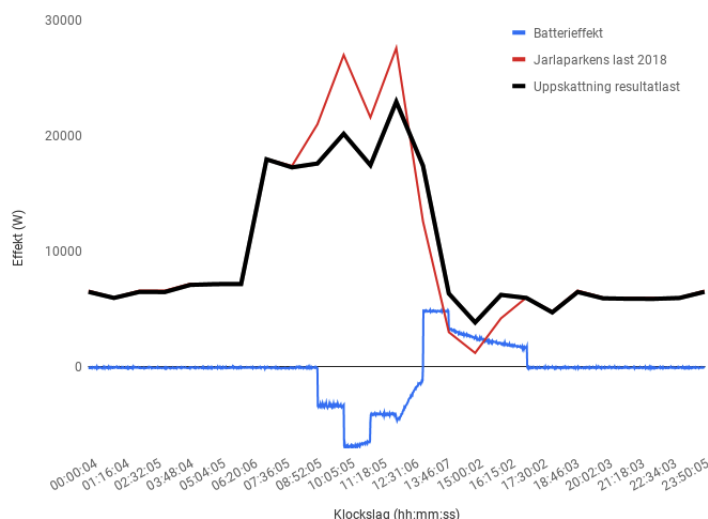
Tabell 6: Scenarioanalys

Batterityp	Missade toppar	Sänkning av toppar [kW]	%
20 kWh, 3,9 kW	0	3,58 kW	-29,4
16 kWh, 3,9 kW	1	3,44 kW	-32,1

3.5 Programmering av Tiundaskolans saltvattenbatteri

3.5.1 Testkörning av saltvattenbatteri

Resultatet från batteriets körning presenteras i Figur 6. Lastdatan som använts är från Jarlaparkens förskola den 26 september 2018. I figuren ses att förskolans effekttopp sänks från ca 27 kW till ca 23 kW då batteriet ger effekt. Produktionen av soleffekt uppskattas med hjälp av att jämföra 2018 års lastdata med den som finns från samma datum år 2017 då solceller ännu inte var installerade. Solcellernas ungefärliga toppeffekt sammanfaller med batteriets laddningscykel under eftermiddagen. Figur 6 visar alltså att batteriet följer sin programkod (Byström Winning och Ersdotter 2019).



Figur 6: Körning av saltvattenbatteri mot lastdata från Jarlaparkens förskola den 26 september 2018

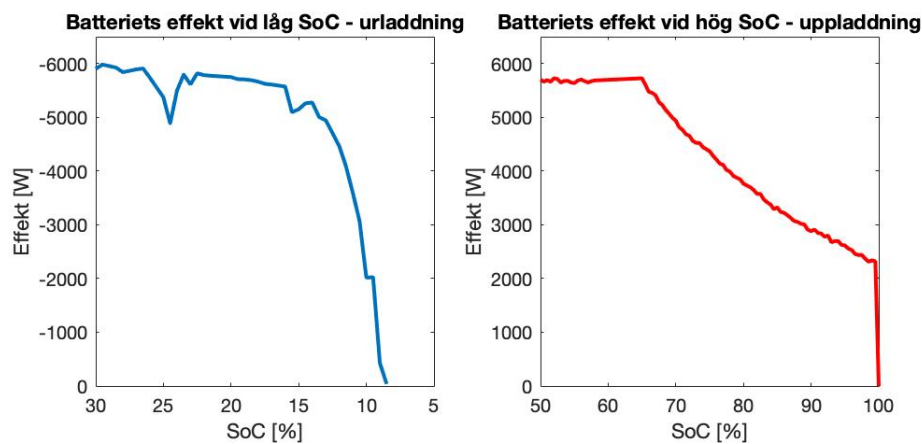
3.5.2 Jämförelse teoretiskt och verkligt batteri

Resultat från test av batteriets reaktionstid visas i Tabell 7 (Byström Winning 2019a). Resultatet indikerar att batteriet kan ställa om sig efter ny inställd effekt inom 25 sekunder med ett acceptabelt fel på 300 W. Batteriets effekt kommer inte alltid inom ett acceptabelt fel på 100 W. Reaktionstiden är generellt längre vid större förändringar i inställd effekt, men varierar även för samma effektändring.

Tabell 7: Batteriets reaktionstid för att nå inställd effekt med 100 W och 300 W precision

Ändring [W]	Tid för ändring (inom 100 W) [s]	Tid för ändring (inom 300 W) [s]
-6 000	28	20
-3 000	-	21
1 000	22	8
1 000	13	9
2 000	19	14
6 000	25	22
12 000	24	24

Resultat av hur batteriets effekt påverkades av låg och hög laddningsgrad, State of Charge (SoC), visas i Figur 7 (Byström Winning 2019b). Batteriets högsta effekt vid urladdning avtar kraftigt under 15 % och når 0 W vid 8,5 %. Vid uppladdning syns ett långsammare avtagande efter 65 %.



Figur 7: Batteriets effekt beroende på SoC

4 Diskussion

4.1 Effektläget

Att kärnkraften avvecklas i Sverige och fasas bort från de södra elområdena SE3 och SE4 missgynnar det redan belastade elnätet. Uppsalas underskott av elektrisk effekt kommer därmed sannolikt fortsätta. I kombination med kalla vinterdagar kan det här leda till topplasttimmar

med effektbrist. När effektreserven således aktiveras förses Sverige med fossil elektrisk effekt från det oljeeldade kondenskraftverket.

En mer utbredd användning av batterier som energilager kan komma att minska behovet av fossil reservkraft eller import av elektrisk effekt från fossila källor vid topplasttimmar. Därmed kan miljöpåverkan på grund av konsumtionen av elektrisk energi minskas. Energilager kan också möjliggöra en större export av elektrisk effekt till andra länder när elpriserna där är höga. Det kan komma att få miljömässigt positiva konsekvenser då deras eventuellt fossila elproduktion inte behöver ökas.

4.2 Datamängd

Projektarbetet utgår från data för två fastigheter. För en mer komplett bild av hur skolors förbrukningsmönster ser ut är data från fler förskolor att föredra. Mer data från olika håll är även fördelaktigt eftersom modellen då kan testas mot fler fastigheter.

4.3 Statistik

Den statistiska dataanalysen försvåras av att det endast finns data sedan augusti 2017. Dessutom installerades solceller i september 2018. Med den begränsade mängden data är det svårt att dra slutsatser över säsongsvariationerna. Den tillgängliga datan visar inte på något samband mellan årstider och effektuttag.

4.4 Ekonomi

En sannolik förändring i framtiden är att elnätsägaren Vattenfall inför speciella avtal även för mindre kunder. Idag används de endast för betydligt större kunder av energiförbrukningsstorlek i MW-ordningen. Denna typ av avtal innebär att när kapacitetsbrist råder på elnätet kan kunderna koppla av sig från elnätet och försörja sig exempelvis genom egen energilagring i form av batterier. Dessa avtal skulle medföra en speciell prissättning eller ekonomisk ersättning för dessa kunder.

4.5 Jämförelse med litiumjonbatteri

Saltvattenbatteriet har vissa fördelar jämfört med litiumjonbatterier när det kommer till miljömässiga och etiska aspekter kopplade till materialvalet på grund av brytningen av litium och kobolt. Det som talar emot saltvattenbatteriet är dels det något högre priset men även den avsevärt högre vikten som kan orsaka problem vid mobila tillämpningar.

4.6 Matlabmodell och Känslighetsanalys

Enligt den framtagna modellen verkar det befintliga saltvattenbatteriet lämpa sig bra för att kapa effekttoppar på verksamheter med liknande effektförbrukning som Jarlaparkens förskola. Vid val av lämplig aktiveringseffekt, i detta fall 18 kW, finns en god chans att kunna fånga upp månadens största topp och därmed sänka elräkningen från Vattenfall. Saltvattenbatterier med lägre lagringskapaciteter visar sig fungera sämre då de simuleras mot Jarlaparkens förbrukningsdata. Om alla 75 befintliga och planerade förskolor från Skolfastigheter utrustas med ett saltvattenbatteri, som det på Tiundaskolan, kan Uppsalas elnät avlastas med upp till 483 kW. Känslighetsanalysen visar att modellen står emot ändringar i förbrukningsdata och

kan alltså även användas för större eller mindre skolor. Saltvattenbatteriets maximala effekt på 6 kW kan dock vara otillräcklig för större fastigheter. Om saltvattenbatteriet är underdimensionerat som i fallet på Tiundaskolan blir kapningen av verksamhetens effekttoppar mycket liten. Modellen har inte byggts på ett sätt som ser till att saltvattenbatteriet laddas nattetid eftersom det inte fanns tid till den implementeringen. I framtiden kan denna modell användas som utgångspunkt till att arbeta in målet om laddning nattetid, beskrivet i kapitel 2.6. I denna utveckling av modellen kan även de experimentella förbrukningsdata från körningar av det verkliga saltvattenbatteriet arbetas in för att på så vis skapa en noggrannare simulering.

4.7 Programmering av Tiundaskolans saltvattenbatteri

Med hjälp av en förbestämd aktiveringseffekt kan batteriet kapa effekttoppar samt ladda när förskolans effektförbrukning är låg eller solcellernas effektproduktion hög. På grund av bristande tillgång till saltvattenbatteriets PLC har endast ett försök att köra batteriet gjorts. Fler försök hade behövts för att utröna huruvida programkoden är tillförlitlig. I nuläget kan det konstateras att programkoden fungerar som den ska men det är inte möjligt att säga om den påverkas av förändringar i datum och tid samt förändringar hos lastdatan.

Det finns variationer i skolans last, solens instrålning och hur mycket skolan används. Det är dock svårt att dra några slutsatser kring hur aktiveringseffekten som styr batteriet bör ändras på grund av dessa.

Vid mätning av saltvattenbatteriets effekt vid låga SoC ställdes batteriets önskade effekt in manuellt. Vid senare observering av effekten vid samma SoC då batteriet körs efter kod stämde inte dessa data, vilket kan tyda på att batteriet beter sig annorlunda vid manuell körning jämfört med programmerad körning. Dock var effekten även vid denna observation tydligt lägre än önskat.

4.7.1 Möjliga felkällor och svårigheter vid genomförandet

Batteriet som står på Tiundaskolan ska kunna avläsa och reagera på Tiundaskolans effekttuttag i realtid. Under arbetets gång har denna funktion inte fungerat. Istället har batteriet provkörts efter en fiktiv last. Lasten har data med timprecision och kan därför inte visa hur väl batteriet följer sekundvariationer. Batteriets programmering är dessutom inte anpassad efter verksamheten där det nu är installerat.

Möjligheter att ändra koden som batteriet följer har varit begränsad, då ingen VPN-inloggning tillhandahållits. Arbetet med programmering av batteriet har endast kunnat utföras genom STUNS eller på plats vid batteriet.

Produktionsdata för solcellerna på Jarlaparkens förskola saknas vilket innebär att solcellsproduktionen har uppskattats genom att jämföra lastdata mellan år 2017 och 2018. Det är inte möjligt att definitivt avgöra om batteriet laddar när solljuset producerar som mest effekt men det är troligt att så är fallet (Byström Winning och Ersdotter 2019).

5 Slutsatser

- Effekttuttaget har en tydlig variation på dygnsbasis kopplat till verksamhet och till solens instrålning. Däremot ses ingen nämnvärd variation mellan årstiderna.

- Modellen som baserats på Tiundaskolans saltvattenbatteri visar att effekttoppar kan kapas med i snitt 5,07 kW då den körs mot Jarlaparkens förskolas data.
- Modellen är ideal och skiljer sig från det verkliga batteriet, i synnerhet vid låga laddningsnivåer där det verkliga batteriet inte klarar av att leverera önskad uteffekt.
- Inköp av ett saltvattenbatteri för kapning av effekttoppar är i dagsläget inte ekonomiskt lönsamt p.g.a. den höga investeringskostnaden. Användning av batteriet enligt modellen sänker dock de rörliga elkostnaderna.
- Modellens och det verkliga batteriets algoritm bidrar till att avlasta elnätet och ligger därför i linje med Uppsala kommuns miljömål. Implementering av algoritmen i större skala skulle kunna bidra till att lösa stadens pågående effektbrist.
- Saltvattenbatteriet och litiumjonbatteriet har vid stationära tillämpningar, liknande den på Tiundaskolan, snarlika tekniska egenskaper. Saltvattensbatteriet är 30 % dyrare men komponenterna orsakar mindre negativ påverkan på miljön och bidrar inte till brytning av kobolt.

Referenser

- Andersson-Gran, Hilda (2019a). *Ekonomirapport*. ES-2019-01/G-04-01.
— (2019b). *Kommunal styrning*. ES-2019-01/G-07-01.
- Bösenecker, Judith (2019a). *Körningar i Matlab*. ES-2019-01/G-11-01.
— (2019b). *Modell*. ES-2019-01/G-08-01.
- Björn, Albin (2019). *Implementering av batterimodell*. ES-2019-01/G-08-02.
- Björn, Albin och David Norell Helmsjö (2019). *Statistik*. ES-2019-01/G-13-01.
- Byström Winning, Sonja (2019a). *Batteriets reaktionstid*. ES-2019-01/L-03-01.
— (2019b). *Effekt - SoC*. ES-2019-01/L-04-01.
- Byström Winning, Sonja och Gunnel Ersdotter (2019). *Programmering av PLC*. ES-2019-01/G-13-01.
- Karlberg, Madeleine (2019a). *Analys av elförbrukning*. ES-2019-01/G-09-01.
— (2019b). *Effektbalans och effektreserv*. ES-2019-01/G-06-01.
— (2019c). *Elförbrukning Jarlaparkens förskola*. ES-2019-01/L-02-02.
- Norell Helmsjö, David (2019a). *Jämförelse av batterier*. ES-2019-01/G-12-01.
— (2019b). *Laststyrningens effekter*. ES-2019-01/G-06-02.

SLU
Institutionen för energi och teknik
Box 7032
750 07 UPPSALA
Tel. 018-67 10 00
pdf.fil: www.slu.se/energiogteknik

SLU
Department of Energy and Technology
P. O. Box 7032
SE-750 07 UPPSALA
SWEDEN
Phone +46 18 671000