

Energimyndighetens titel på projektet – svenska Från solet till användare med minsta möjliga förlust – en fullskaledemonstration	
Energimyndighetens titel på projektet – engelska From photovoltaic generation to end-users with minimum losses – a full-scale demonstration	
Universitet/högskola/företag RISE, Research Institutes of Sweden	Avdelning/institution Avdelningen Energi och Resurser, enheten Människa-teknik och solenergi
Adress Box 857, 501 15 Borås	
Namn på projektledare Caroline Markusson	
Namn på ev övriga projektdeltagare Patrik Ollas	
Nyckelord: 5-7 st Solet, batterilager, likström, energibesparing, egenkonsumtion, demonstration	

Förord

Projektet har finansierats av Energimyndigheten och de deltagande företagen genom egenfinansierad tid. De deltagande företagen är – förutom RISE – följande:

- Chalmers Tekniska Högskola AB (enbart stödmottagare)
- NIBE AB
- Askö Appliances AB
- Systemair Sverige AB
- Ferroamp Elektronik AB
- Trä- och möbelföretagen
- Derome Hus AB
- Wallenstam AB
- Metrum Sweden AB
- Johanneberg Science Park AB
- Herrljunga Elektriska AB
- Västra Götalandsregionen

Innehållsförteckning

Sammanfattning	3
Summary	4
Inledning/Bakgrund	5
Genomförande	6
Resultat	8
Diskussion.....	10
Publiceringslista.....	11
Publicerade.....	11
Planerade/Inskickade	12
Referenser	13
Bilagor	14

Sammanfattning

Projektet har genom modelleringar visat på att förlusterna från en enskild byggnad kan minskas med 40% med likströmsförsörjning i kombination med solet och batterilager, jämfört med ett motsvarande växelströmssystem. Resultaten visar också att utnyttjandet av energin från solcellssystemet ökar med upp till 9,8% för ett likströmssystem. Mätningar och modelleringar av en värmepump med växelströms- och licksströmsförsörjning visar på att energibesparingar upp till 5,2% kan fås när värmepumpen förses direkt med likström och vid enbart värmegenerering. Motsvarande, baserat på uppmätt data i labb, fås för till- och frånluftsfläktarna i ett luftbehandlingsaggregat i villastorlek 6,4 % besparing.

Resultaten från modelleringen visar att systemets egenförbrukning av solet kan öka med 100% för det studerade fallet med en soleanläggning på 3,7 kW_p och med varierande storlek på batteriet, och att effekten av ytterligare storlekar på batteriet är begränsat efter 9 kWh.

En jämförelse har också gjorts mellan växel- och likströmsförsörjning i en villa för två olika klimat – Borås och Phoenix, USA där vinsterna med likströmsdistribution visade på energibesparingar upp till 8,8% och konkluderar också att påverkan från klimatet är begränsad.

Förutom den tekniska potentialen och de modellerade energibesparingarna så har projektet även identifierat hinder, barriärer och utmaningar som fortfarande kvarstår för att likströmsdistribution kan slå igenom på allvar. Här fyllde demonstrationen som gjordes i RISEs forskningsvilla sitt syfte i att identifiera utmaningarna med en faktisk installation, men väckte samtidigt en nyfikenhet i de som varit inblandade och varit på besök.

Summary

Through modelling, the project has shown that the losses from a residential building can be reduced by 40% with a direct current (DC) distribution system in combination with solar photovoltaic (PV) and battery storage, compared with an equivalent AC system. The results also show that the utilization of energy from the PV system increases by up to 9.8% for a DC system. Measurements and modelling of a heat pump with alternating current and direct current supply show energy savings of up to 5.2% when the heat pump is supplied directly with DC. The corresponding saving, based on laboratory measurements, for the supply and exhaust fans in a residential air handling unit amount to 6,4 %.

The results from the modelling show that the system's self-consumption (SC) of PV energy increase by 100% for the studied case with a solar system of 3.7 kWp and with varying sizes of the battery, and that the incremental increase of SC after 9 kWh is limited.

A comparison between AC and DC supply for a residential building in two different climates - Borås and Phoenix, USA, showed energy savings of up to 8.8% with DC distribution, and also concludes that the impact from the geographical location is limited.

In addition to the technical potential and the modelled energy savings, the project has also identified obstacles, barriers, and challenges that remain for DC distribution for further market penetration. Here, the demonstration that took place in RISE's research villa fulfilled its purpose in identifying the challenges with an actual installation, but at the same time aroused a curiosity in those who had been involved and visited.

Inledning/Bakgrund

Marknaden för solex har haft en exponentiell tillväxt de senaste åren med en tillväxt på 270% under perioden 2013–2018 [1]. En liknande trend finns också för stationära elektriska batterilager, där drivkraften ligger i sjunkande priser, ökad efterfrågan på egenförsörjning och resiliens [2].

Energin från solcellsmodulerna genereras som likström (DC) och kan sedan lagras med hjälp av likström i batterierna. Detta, tillsammans med de faktum att dagens hushållsapparater till stor del drivs med hjälp av likström, gör det intressant att studera hur en byggnad med likströmsförsörjning kan reducera – och i vissa fall helt eliminera – omvandlingsförlusterna.

Syftet med projektet har därför varit att undersöka hur byggnadens förluster kan minimeras och hur solexen bättre kan utnyttjas med hjälp av likströmsdistribution. För att göra detta har bland annat de elektriska omvandlarna och batteriet studeras mer i detalj för att karaktärisera dess prestanda. Dessa resultat har sedan implementerats i en modell för att kvantifiera energibesparingarna med likströmsdrift för ett småhus.

En fullskaledemonstration har även upprättats i RISE's (fd. SP) Forskningsvilla i Borås, där ett DC-system installerats, tillsammans med solcellsmoduler, batterilager och – av de deltagande företagen – specialframtagna installationsprodukter som drivs direkt med DC.

Genomförande

Projektet har varit uppdelat i sex arbetspaket:

A. Förstudie

Arbetet inom DC-distribution i byggnader är relativt nytt, så i första steget studerades tidigare resultat från forskning och demonstrationer. Förutom DC-distributionen i sig undersöktes också hur dagens produkter kan anpassas för direkt DC-drift samt hur ett internt DC-system i en byggnad ska utformas med avseende på exempelvis spänningsnivå(er), storlek på PV- och batterilager (utifrån byggnadens energibehov) och styralgoritmer för batterilagret.

B. Förberedelse inför demonstration

Inom detta arbetspaket fördes diskussioner med Ferroamp, som var ansvariga för installation och leverans av DC-systemet, och de installationsföretag som levererade produkter för direkt DC-drift. NIBE, Systemair och Wilo fick i uppgift att genomföra eventuella modifiering av deras produkter för DC-drift samt mäta upp den prestandaökning som fås genom att likriktarsteget i produkten plockas bort.

C. Installation av DC-systemet i RISE's Forskningsvillan

RISE, Ferroamp, NIBE och Systemair ansvarade tillsammans för installationen av DC-systemet i Forskningsvillan samt driftsättningen av systemet.

D. Demonstration

Driftsättningen av det kompletta DC-systemet med intern likströmsförsörjning, batterilager, sol-generering och DC-anpassade installationsprodukter skedde i april 2018. Under de första månaderna skedde en del justeringar, främst för DC-systemet, innan full funktionalitet uppnåddes.

E. Utvärdering

Utvärderingen har skett i olika två faser:

- i. Mätningar på individuella komponenter/produkter

Innan leverans för demonstration genomfördes egna mätningar av NIBE (värmepump) och Systemair (FTX-aggregat) i deras respektive labb. Detta i syfte att kvantifiera de effektiviseringsvinsterna som uppnås vid DC-drift. Resultaten från NIBE's mätningar är bland annat publicerat i artikel D.

Som underlag för modelleringarna genomfördes även mätningar på de kraftelektroniska komponenterna via fyra studentarbeten på Chalmers. Där mättes bland annat verkningsgraderna för de båda separata omvandlingsstegen – AC/DC och DC/DC. I ett examensarbete på Chalmers undersöktes även DC/DC-omvandlaren mer detalj [3].

På Chalmers genomfördes även detaljerade mätningar på en battericell för att karaktärisera dess prestanda mer noggrant, detta resultat redovisas i [4] och ligger till grund för artikel I.

ii. Modellering av vinsterna med DC-drift i byggnaden

Med hjälp av resultaten från mätningarna på de individuella komponenterna har en MATLAB-modell tagits fram som kvantifierar förlusterna i en AC- och DC-driven byggnad med batterilager och PV-moduler. Resultaten från detta har bland annat publicerats i Patrik Ollas' licentiatavhandling och i [5].

Med hjälp av modellen har också effekten av batteriet och dess styrning studerats utifrån egen- och självförsörjning samt effektoppar, resultaten finns publicerade i [6].

F. Informations- och resultatpridning

Projektet har presenterats i följande kanaler och sammanhang:

- **Mässor**
 - Solforum (9/10 2019)
- **Konferenser**
 - WCPEC-7 ("World Conference on Photovoltaic Energy Conversion") – juni 2018
 - 37th EU PVSEC – september 2020
 - BuildSim Nordic 2020 Conference – oktober 2020
- **Sociala Medier**
 - Twitter - @solartestbed
- **Podcast**
 - Solcellspodden avsnitt 25
- **Tidning**
 - Elinstallatören (maj 2019)
- **Radio**
 - [Sveriges Radio](#) (31/12 2018)
- **Seminarier**
 - SOL/DC-seminarium 2017 anordnat av RISE och Chalmers (22/9)
 - SOL/DC-seminarium 2018 anordnat av RISE och Chalmers (13/9)
 - Besmå-dagen 2018 (3/10)
 - Trähusdagarna 2020 (12/3)
- **Webbtexter**
 - [Swedish Smartgrid.se](#)
 - [Pressmeddelande, RISE](#) (23/10 2017)
 - [solartestbed.se](#) (projekthemsida)

Under projektiden har demonstrationen av likströmssystemet även visats på plats i Forskningsvillan vid uppskattningsvis ett 20-tal tillfällen, där besöker från akademien (forskare och studenter), media samt industrin närvarat.

Resultat

Från mätningarna av energibesparingarna för DC-drift av individuella produkter varierar vinsterna i statisk drift mellan 1,4—5,2% beroende vilket driftfall som körs. En modellering av vinsterna för bergvärmepumpen vid dynamisk drift över ett år, för två olika klimat i Sverige, visar att vinsterna med DC-drift ligger mellan 2,5—3,4%. Besparingen för drift till fläktarna i luftbehandlingsaggregatet blir 6,4 % för aggregatet i DC-drift jämfört med aggregatet i AC-drift.

Batteriets inverkan på systemets egenkonsumtion av solex och maximal effektimport från nätet har modellerats och resultaten visar att egenkonsumtionen kan öka med 100%, för en konstant storlek på solexanläggningen, men att inverkan på egenkonsumtionen avtar efter en viss storlek. För RISE Forskningsvilla och en PV-storlek på 3,7 kWp så fås en optimal batteristorlek runt 7,5 kWh, ytterligare ökning av batteristorlek ger sedan ett marginellt tillskott till egenkonsumtionen. Vid modellering av andra styrstrategier för batteriet visar resultaten att det är möjligt att minska det maximala effektintaget från nätet, från 2,95 (utan batteri) till 2,43 kW för batteristorlekar >10 kWh.

Vid modellering av ett nära-noll energihus så visar resultaten att energibesparingspotentialen är beroende på om systemet har solex och ett batterilager, utan dessa så ökar energianvändningen för ett DC-system, mycket beroende på förlusterna som sker vid nätomvandlaren mellan AC-nätet och det interna DC-nätet. Om byggnaden har solex och möjlighet till intern lagring av DC-energi i ett batteri så ligger energibesparingarna mellan 1,9—5,6%, beroende på utformningen av solex- och batterisystemet. En jämförelse har också gjorts för valet av spänningsnivå för DC-topologin där två undernivåer för DC-spänningen modellerats – 48 och 20 VDC. Här är slutsatserna att dessa två lösningar bidrar till en marginell ökning i ledningsförlusterna, på grund av den lägre spänningen, men att alternativet med en lägre spänningsnivå kan vara intressant ur ett säkerhetsperspektiv.

En studie har också gjorts av klimatets inverkan på energibesparingen med DC-drift där en nära-noll energibygnad har modellerats i Borås och Phoenix, USA med varierande solutbyte och last, och sedan jämförts med motsvarande byggnad i AC-drift. Resultaten därifrån visar att systemförlusterna med DC-drift minskar med 19—46% och att utnyttjandet av den genererade solexen är mellan 3,9—7,4% bättre för DC-systemet samt att den geografiska placeringen har en viss betydelse för vinsterna med DC-drift.

Resultaten från modelleringarna har publicerats i artiklarna [6, 7, 5] och i Patrik Ollas' licentiatavhandling [4].

Från projektet har även tre ytterligare forskningsprojekt tillkommit, baserat på resultaten och frågeställningen i detta. Ett som tittar närmare på batteriets roll i byggnaden "Prognostisering för styrning av lokalt batterilager"¹ där ytterligare nättjänster från batteriet undersöks för att uppnå bättre ekonomi och en

¹ Energimyndigheten Dnr. 2018-011596. Mer information om projektet finns här – <https://solarrestbed.se/prognostisering-for-styrning-av-lokalt-batterilager/>

demonstration genomförs i RISE Forskningsvilla av batteristyrningen med hjälp av prognostiserat solelutbyte och lastprediktering. Det andra projektet² undersöker hur byggnaden – och dess tekniska lösningar – kan bidra till ökad flexibilitet i el-nätet, bland annat genom lagring av värme och el samt hur inkludering av elbilsaddning (som en DC-resurs) kan bidra till att stötta byggnaden och nätet. I ett tredje projekt är fokus på att öka verkningsgraden för DC/DC-omvandlare installerade i byggnader³, då bland annat resultatet från denna studie har visat att det finns en stor potential till förbättring.

Dessa projekt kommer att bidra till Patrik Ollas' fortsatta doktorandstudier vid Chalmers med beräknad disputation 2022—2023.

² Energimyndigheten Dnr. 2020-009315. Mer information om projektet finns här – <https://solartestbed.se/flexibilitet-och-energieffektivisering-i-byggnader-med-solel-och-fordonsladdning/>

³ Energimyndigheten Dnr. 2019-020882

Diskussion

Resultaten från systemmodelleringarna och mätningarna på enskilda produkter har visat på de energimässiga besparingar som kan göras vid direkt likströmsförsörjning i jämförelse med växelströms dito. Trots den lovande besparingspotentialen så bör likströmslösningar fortfarande ses som en nischlösning idag och mer arbete kring verifiering och demonstration krävs för att få till en ökad spridning. I [4] nämns bland annat några identifierade barriärer och utmaningar som kvarstår för likströmssystem som bör studeras vidare, utöver de rent tekniska delarna.

Förutom de utmaningar som kommer från praktisk tillämpning och standardisering kopplat till likströmsförsörjning i byggnaden så är bedömning – utifrån resultaten i de studerade fallen i denna studie – att det rent ekonomiskt fortfarande återstår tid innan man kan se en ökad spridning. Resultaten från modelleringen av Forskningsvillan för AC- och DC-drift visar att energibehovet kan minskas med omkring 150 kWh/år för ett DC-system med solceller och batteri installerat, vilket enkelt översatt innebär 300 kr/år i besparing⁴. Så, för att få ekonomi i en sådan investering får mervärdeskostnaden för investeringen i ett DC-system inte överskrida 300 kr/år, utslaget över byggnadens livslängd. Dock sker en ständig utveckling inom detta område och på senare år har flertalet installationer tillkommit vilket driver på marknaden och intresset för denna typ av lösning. Andra studier från litteraturen har också visat på högre besparingspotential, framförallt kopplat till andra typer av byggnader där korrelationen mellan solceller och last är bättre, vilket också driver upp lönsamheten.

Marknaden för likströmsförsörjning i byggnader är också i lite av ett ”moment-22” – där installationerna idag är få på grund av bristen på anpassade produkter och drivkraften för att anpassa produkterna saknas eftersom efterfrågan är låg. Därför var ett av syftena med detta projekt att demonstrera en fullskaledemonstration och öka intresset hos industrin.

⁴ Räknat på att all denna besparing sker från en minskad andel köpt energi från nätet för ett konstant pris på 2 kr/kWh.

Publikationslista

Publicerade

- A. *Energy Savings Using a Direct Current Distribution Network in a PV and Battery Equipped Residential Building* [4]

Patrik Ollas' licentiatavhandling⁵ som behandlar de fem artiklar som summeras nedan, ger en överblick över marknaden för solex och batterier samt beskriver möjligheter, hinder och barriärer för DC-distribution i byggnader.

- B. *Increased PV Utilisation from DC Distribution: Quantification of Geographical Location Impact* [5]

Vinsterna med DC-drift i byggnaden modelleras för två olika klimat – Borås och Phoenix, USA – för att undersöka hur de skiljer sig från varandra, givet två olika användningsprofiler.

- C. *Impact of battery sizing on self-consumption, self-sufficiency and peak power demand for a low energy single-family house with pv production in sweden* [6]

Här modelleras effekterna som ett batterilager har på en nära-noll energibyggning med avseende på egenanvändning och effektkapning. Modellering är gjord med hjälp av uppmätt data för energianvändningen och PV-genereringen. Olika styrningsalgoritmer studeras också för att demonstrera dess inverkan på systemet.

- D. *Quasi-Dynamic Modelling of DC Operated Ground-Source Heat Pump* [7]

Med hjälp av de uppmätta vinsterna med DC-drift från tillverkardata på värmepumpens prestanda vid de standardiserade testpunkterna har effekten på årsbasis modellerats. Detta för att se hur mycket DC-driften påverkar SCOP (*Seasonal Coefficient of Performance*), där SCOP-beräkningarna dels gjorts med hjälp av en IDA-modellering av programmet IDA ICE, dels med hjälp av bin-metoden från standarden EN14825:2018.

Inskickade och accepterade

- E. *Increased PV Utilisation from DC Distribution: Quantification of Geographical Location Impact*

Samma artikel som "B" ovan har även valts ut och accepterats⁶ för publicering i tidskriften "Wiley Progress in Photovoltaic: Research and Applications".

⁵ Finns för nedladdning här - <https://research.chalmers.se/publication/515531>.

⁶ Artikeln accepterades 2021-01-04 med mindre revidering. Reviderad version inskickad 2021-01-18.

Planerade

I. Static vs. Dynamic Battery Efficiency: Impact on Photovoltaic and Battery System Performance

Resultaten från mätningarna över batteriets prestanda presenteras och effekten av den mer detaljerade modellen ställs i relation till andra typiskt förekommande antaganden om batteriets verkningsgrad, med avseende på systemprestanda.

Planeras att skickas till IEEE Journal of Photovoltaics i februari 2021.

II. Energy Loss Savings from Direct Current Distribution in a Residential Building with Solar Photovoltaic and Battery Storage

Vinsterna med DC-drift, jämfört med ett ekvivalent AC-system, modelleras för Forskningsvillan i Borås. Här undersöks potentialen för fyra olika DC-topologier samt vilken effekt ett batteri har på byggnadens prestanda.

Planeras att skickas till IEEE Transactions on Sustainable Energy i februari 2021.

Examensarbeten

Inom projektet har Patrik Ollas också handlett tre examensarbeten vid Chalmers tekniska högskola samt ett arbete från Högskola i Gävle:

- ***Feasible DC voltage levels in households*** [8]

Arbetet har gått ut på att undersöka hur valet av spänningsnivå för det interna likströmsnätet påverkar förlusterna i byggnaden. Här modellerades tre olika konfigurationer för likströmssystemet med avseende på spänningsnivå(er) och jämfördes mot ett referenssystem med växelströmsdistribution.

- ***Local DC Nanogrid Up-Scaling to Block Level Interaction*** [9]

Här modellerades effekten av att sammankoppla fem olika byggnader i en energigemenskap via ett gemensamt likströmssystem för att se vilka energivinster man kan få av detta.

- ***Efficiency Study of Isolated DC-DC Converters – Through Simulation and Measurements*** [3]

I detta arbete modellerades och mättes det på en DC/DC-omvandlare med syfte att föreslå ändringar för att öka dess verkningsgrad. Tre omvandlare undersöktes närmare – ”flyback”, ”forward” och ”LLC”.

- ***Batterilager 2020*** [10]

Här simulerades effekten av att inkludera ett batterilager i kombination med solceller, där två kunder i olika nät undersöktes – landsbygds- och stadsnät.

Inom arbetet gjordes även en intervjustudie med två olika nätbolag om deras syn på batterier som ett sätt att minska belastningen i nätet.

Referenser

- [1] International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme, "Trends in Photovoltaic Applications 2019," International Energy Agency, 2019.
- [2] IRENA, "Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030," International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2017.
- [3] R. Karlsson och S. V. Huse, "Efficiency Study of Isolated DC-DC Converters - Through Simulation and Measurements," Chalmers University of Technology, Göteborg, 2019.
- [4] P. Ollas, "Energy Savings Using a Direct-Current Distribution Network in a PV & Battery Equipped Residential Building," Chalmers University of Technology, Gothenburg, 2020.
- [5] P. Ollas, T. Thiringer, H. Chen och C. Markusson, "Increased PV Utilisation from DC Distribution: Quantification of Geographical Location Impact," i *37th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, 2020.
- [6] P. Ollas, J. Persson, C. Markusson och U. Alfadel, "Impact of battery sizing on self-consumption, self-sufficiency and peak power demand for a low energy single-family house with pv production in sweden," i *2018 IEEE 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC) (A Joint Conference of 45th IEEE PVSC, 28th PVSEC & 34th EU PVSEC)*, Waikoloa, Hawaii, 2018.
- [7] P. Ollas, C. Markusson, J. Eriksson, H. Chen, M. Lindahl och T. Thiringer, "Quasi-Dynamic Modelling of DC Operated Ground-Source Heat Pump," i *BuildSIM-Nordic 2020*, 2020.
- [8] S. C. M. Moreno, "Feasible DC voltage levels in households," Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg, 2018.
- [9] N. A. Saseendran och B. Kabasa, "Local DC Nanogrid Up-Scaling to Block Level Interaction," Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg, 2018.
- [10] L. Löfgren, "Batterilager 2020," Gävle, 2020.

Bilagor

A. Administrativ bilaga