

SoIEI 00-02

**Superkondensatorer som energilager i
solcellsanläggningar**

Elforsk rapport 03:11



SolEI 00-02

Superkondensatorer som energilager i solcellsanläggningar

Elforsk rapport 03:11

SoIEI 00-02

Superkondensatorer som energilager i solcellsanläggningar

Elforsk rapport 03:11

Sture Holmström & David Larsson
Fortum Teknik & Miljö AB



AI-företagen, energiföretag via Elforsk, Energimyndigheten,
Formas, Svenska Byggbranschens utvecklingsfond och White
Arkitekter finansierar SoIEI 00-02.

Sammanfattning

Bakgrund

I nisch tillämpningar med solceller är det tänkbart att använda superkondensatorer (kallas även ultrakondensator) som energilager istället för konventionella laddningsbara batterier. Prestanda förbättras successivt och kostnaden sjunker stadigt för superkondensatorer. Fördelar som lång livslängd, hundratusentals laddningscykler och tålighet mot djupurladdning är egenskaper som kan möjliggöra solcellsanläggningar med minimala underhålls krav.

Mål

Projektmålet var att fastställa driftegenskaper och att med en anläggning i praktisk drift visa att superkondensatorer fungerar som ett realistiskt alternativ till konventionella batterier. Speciellt fokuseras på den reglerelektronik som behövs för ett fungerande system. I en ekonomisk kalkyl jämförs kostnaderna för några anläggningstyper med superkondensatorer respektive konventionella batterier som energilager. Möjligheten att använda lysdioder som belysning visas också.

Resultat

En liten solcellsanläggning sattes upp vid Fortum Teknik & Miljös kontor på Tegelluddsvägen i Stockholm. Anläggningen består av en 9 W solcellspanel, två superkondensatorer, en spänningsregulator och en belysning bestående av tre vita lysdioder med effekten 1 W vardera. Belysningen aktiveras manuellt eller av en timer. Kondensatorerna kan lagra sammanlagt 5,3 Wh och spänningsregulatorn medger att man kan utnyttja 3 Wh av detta. Superkondensatorer av den använda typen tål spänningar upp till cirka 2,5 V. De kan seriekopplas för högre spänningar (vår anläggning har två i serie) men det medför vissa olägenheter som leder till att energiförluster uppstår. Förluster av storleksordningen 2 % per dygn har iakttagits.

Driftegenskaperna har studerats och önskvärda egenskaper för elektroniken har identifierats. För att kunna utnyttja så stor del som möjligt av den lagrade energin måste driv-elektroniken kunna arbeta ner till 1 V inspanning eller lägre. Vid arbetsområdet 1,0 – 2,5 V kan 84 % av den lagrade energin återvinnas. Den låga spänningen skall omvandlas till 12 V eller annan lämplig drivspänning med så hög verkningsgrad som möjligt. Verkningsgraden för en laddnings-/urladdningscykel har uppmätts till 97,5 %. För konventionella batterier är motsvarande siffra 70-75 %.

Superkondensatorer är fortfarande avsevärt dyrare per Wh än konventionella laddningsbara batterier. Den ekonomiska kalkylen visar dock att superkondensatorer kan motivera sin högre kostnad vid energilagerstorlekar upp till 80 – 90 Wh vid en avlägset belägen anläggning med höga kostnader för de batteribyten som krävs i en konventionell anläggning. Kostnaden för batteribyte i en näraliggande anläggning kan inte heller försummas och om energilagret är upp till 20-30 Wh är kondensatorer mest förmånligt. Eftersom priset för superkondensatorn fortsätter att sjunka ökar konkurrenskraften efter hand även vid större lagerstorlekar. Lagerstorlekar enligt ovan är tillräckliga för många mättekniska tillämpningar.

Innehållsförteckning

1	INLEDNING.....	1
1.1	BAKGRUND	1
1.2	MÅL	1
1.3	AVGRÄNSNINGAR.....	2
1.4	GENOMFÖRANDE.....	2
2	SYSTEMBESKRIVNING	4
2.1	SUPERKONDENSATORER	4
2.2	SOLCELLSMODUL	4
2.3	REGLERKRETS FÖR URLADDNING	5
2.4	LYSDIODER	5
2.5	MÄTUTRUSTNING	6
3	GENOMFÖRDA MÄTNINGAR	7
3.1	REDOVISNING AV OLIKA DRIFTFALL	7
3.2	SJÄLVURLADDNING	8
3.3	CYKELVERKNINGSGRAD	9
4	EKONOMISK KALKYL.....	10
4.1	FÖRUTSÄTTNINGAR.....	10
4.2	NYCKELTAL	10
4.3	BRYTPUNKTER	12
4.4	EXEMPELANLÄGGNINGAR	13
5	UTVECKLINGSMÖJLIGHETER.....	16
5.1	FÖRBÄTTRING AV KOMPONENTER	16
5.2	FÖRBÄTTRING AV SYSTEM	16
6	SLUTSATSER.....	17
7	REFERENSER.....	18

1 Inledning

Det finns en rad nisch tillämpningar där det kan vara ekonomiskt fördelaktigt att använda solceller i stället för att ordna med nätanslutning. Det kan röra sig om nödtelefoner i fjällområden eller belysning vid busshållplatser i glesbygd, med stora avstånd till elnätet, men det kan också vara fråga om små elförbrukare i stadsmiljö, där ledningsdragning även korta sträckor är kostsamt.

I sådana små solcellssystem lagras solenergin i laddningsbara batterier, vanligen blyackumulatorer. Dessa batterier har begränsad livslängd och måste bytas ut med några års intervall. För fullgod funktion kan det krävas tillsyn även mellan batteribytana. Detta gör att underhållskostnaderna för systemet blir höga, vilket försämrar solcellssystemets ekonomiska förutsättningar. En nackdel med konventionella batterier är också att de ofta innehåller miljöskadliga ämnen som bly och kadmium.

Superkondensatorn (vidare även benämnd SC) är ett alternativ till konventionella batterier. Den har lång livslängd och klarar hundratusentals laddningscykler. Superkondensatorn skadas inte heller vid djupurladdning. Detta innebär att i ett solcellssystem med superkondensatorer skulle energilagret hålla minst lika länge som övriga komponenter.

1.1 Bakgrund

Inom SolEl 00-02 har tidigare gjorts en översikt över tekniska prestanda för kommersiellt tillgängliga superkondensatorer [1]. Enligt denna översikt är priset för superkondensatorer c:a 150 kr/Wh, vilket är omkring 100 gånger priset för blyackumulatorer och 5-10 gånger priset för andra typer av laddningsbara batterier. Priset på superkondensatorn väntades sjunka c:a 20% inom 2 till 3 år.

Energitätheten i superkondensatorn är lägre än i konventionella batterier. I översikten angavs 4,3 Wh/kg, med en väntad ökning till 6 Wh/kg.

En fördel med superkondensatorn är att en större del av den tillförda energin vid laddning kan tillgodogöras vid urladdning än i fallet med batterier. I översikten angavs en laddningseffektivitet om 85-98% jämfört med 75% för blyackumulatorn.

1.2 Mål

Projektets mål är att

- fastställa driftegenskaper för SC samt visa att SC fungerar som ett realistiskt alternativ till konventionella laddningsbara batterier
- finna en lämplig reglerelektronik för laddning och urladdning av SC
- visa exempel på energisnål belysning med lysdioder

1.3 Avgränsningar

Redovisade resultat baseras på de mätningar som gjort inom projektet. Ekonomiska resultat baseras på redovisade antaganden och utgör realistiska exempel.

Ursprungligen hade projektet för avsikt att jämföra prestanda för superkondensatorer av olika fabrikat. På grund av reducerad budget har endast ett fåtal kondensatorer från en leverantör anskaffats.

1.4 Genomförande

Projektet har genomförts med en demonstrationsanläggning vid Fortum Teknik & Miljös lokaler i Stockholm. Anläggningen består av en solcellspanel som laddar två superkondensatorer. Den anslutna belastningen utgörs av tre ljusstarka lysdiodslampor. Dessa lyser upp en informationsskylt som beskriver projektet. Till detta kommer en reglerkrets för att ge konstant spänning vid urladdning, en timer för tidsstyrning av belysningen samt utrustning för att mäta och lagra spänningsnivåer och strömmar. Anläggningen beskrivs vidare i kapitel 2.

Energiinnehållet E i en laddad kondensator ges av följande uttryck

$$E = \frac{1}{2}CU^2$$

C = kapacitansen (Farad)

U = kondensatorspänningen (Volt)

För att kunna tillgodogöra sig så mycket som möjligt av energimängden i en kondensator krävs en reglerkrets som förmår lyfta en mycket låg spänning (från c:a 1 V) till lämplig drivspänning för lasten, t.ex. 12 V. Sådana reglerkretsar används i vissa tillämpningar. Dock har vi inte funnit några färdiga lösningar som kan fungera ned till 1 volt och samtidigt driva en last av cirka 5 W vid 12 V som vi önskade. Inom projektet kontaktades elektronikföretaget Dectron AB för att skräddarsy en lämplig koppling till anläggningen. Under detta relativt korta projekt hade tillverkaren på grund av resursbrist dock inte tid att ta fram en sådan krets, men bedömer det som fullt möjligt att genomföra med de prestanda vi önskade.

Vi har istället använt ett ”utvärderingskort” från tillverkaren Maxim. Det är en switch-regulator som lämnar 12 V/0,5 A, det vill säga upp till 6 W uteffekt. Inspänningsområdet är 3 – 12 V. Eftersom lägsta inspänning är 3 V måste minst två superkondensatorer seriekopplas för att få ett fungerande koncept. Detta kan ge utjämningsförluster i de överspänningsskydd som varje kondensator måste förses med. Med två seriekopplade kondensatorer kan varje kondensator användas i spänningsintervallet 1,5 – 2,3 V. Man kan då tillgodogöra sig 57% av energiinnehållet i en fulladdad kondensator. Jämför detta med 81% om reglerkretsen kunde arbeta ner till 1 volt per kondensator. Detta innebär en förbättring med 42 %.

Problemen med att få fram en lämplig reglerkrets har försenat mätningarna jämfört med tidplanen. Förseningar uppkom även till följd av oklarheter om arbetsupplägg och

förväntat resultat efter att projektets budget reducerats av programstyrelsen. Perioden för mätning har kortats av från planerade 8 månader till cirka 6 veckor. Detta anses dock tillräckligt för att få en bild av superkondensatorns funktion i ett solcellssystem.

2 Systembeskrivning

I detta avsnitt följer en genomgång av demonstrationsanläggningen, ingående komponenter och funktion.

2.1 Superkondensatorer

Fyra superkondensatorer från Epcos har använts i projektet. Varje superkondensator har kapacitansen 3600 F och en högsta tillåten spänning på 2,3 V. Detta ger ett maximalt energiinnehåll om 2,65 Wh per enhet. Måtten är 61x61x170 mm. I demonstrationsuppställningen användes två seriekopplade superkondensatorer. De övriga två kondensatorerna användes för kompletterande mätningar med strömaggregat.

Varje kondensator har ett överspänningsskydd som börjar leda ström vid spänningen 2,3 V.

De ingående superkondensatorerna var de största som fanns tillgängliga på marknaden vid projektets start. I dagsläget kan Epcos erbjuda enheter om 5000 F och 2,5 V och ett energiinnehåll motsvarande 4,34 Wh. (Se vidare kapitel 5.)



Figur 2.1 De två seriekopplade superkondensatorerna med kapacitansen 3600 Farad.

2.2 Solcellsmodul

Den solcellsmodul som använts har en toppeffekt på 9 W och var ursprungligen utrustad med en regulator för att ladda ett 12 V batteri. För att kunna arbeta mot den lägre kondensatorspänningen togs denna krets bort. Modulen har 9 celler och ger en högsta spänning om c:a 5 V vid öppen krets.

Denna spänning gjorde det möjligt att koppla modulen via en seriediod direkt till superkondensatorerna utan någon laddningsregulator. För bästa möjliga system bör antingen speciella solcellsmoduler tas fram som passar kondensatorns spänningsintervall eller så måste en laddningsregulator konstrueras som kan anpassa spänning och ström från standardpaneler till kondensatorn. (Se vidare kapitel 5.)



Figur 2.2 Solcellsmodul med effekten 9 watt.

2.3 Reglerkrets för urladdning

Den använda regulatorkopplingen är ett utvecklingskort för kretsen MAX1771 från Maxim. Den omvandlar inkommande spänning från superkondensatorerna till 12 V för att driva lasten som i detta fall är lysdioderna. Lägsta användbara inspänning är c:a 3 V. Detta medför att totalt c:a 3 Wh av maximalt 5,3 Wh lagrad energi i två seriekopplade superkondensatorer kan utnyttjas.



Figur 2.3 Utvecklingskort för regulatorn MAX1771. Mått 54 x 54 mm.

Verkningsgraden för regulatorn anges till bättre än 80%. Det finns en stor potential till förbättring av systemet om regulatorn kan fungera vid ännu lägre inspänning. (Se vidare kapitel 5.)

2.4 Lysdioder

Regulatorkretsen kan driva en last på högst 6 W vid spänningen 12 V. Vi har valt en belysnings-tillämpning som exempel.

Tre vita lysdioder av typen Luxeon Star från Lumiled visar på potentialen för lysdioder i belysningsstillämpningar. Dioderna har effekten 1 W vardera och har en inbyggd lins som ger en spotlighteffekt med en spridningsvinkel på cirka 12 grader. De kan drivas med högst 350 mA vid cirka 3,5 V.



Figur 2.4 Lysdiod av typen Luxeon Star med optik. Diameter 21,5 mm.

Då spänningsnivån från reglerkretsen är något högre än vad tre seriekopplade lysdioder kräver behövs en resistor i lysdiodkretsen. Strömmen begränsas till 280 mA och totaleffekten blir då 3,4 watt.

De tre lysdioderna användes för att belysa en informationstavla i A2-format som beskriver projektet. Avståndet till tavlan är cirka 2 m och belysningsstyrkan i centrum är 150 lux.

Lysdioderna tänds med en timer för att uttaget ur kondensatorerna skall ske på ett kontrollerat sätt. Drift med olika belysningstider har provats. Under senare delen av projektet har även en strömbrytare anslutits så att lysdioderna kan tändas manuellt av nyfikna medarbetare och besökande.



Figur 2.5 Tre diodspotlights som lyser upp informationsaffischen.

2.5 Mätutrustning

Spänningsnivåer och strömmar mäts och registreras av en Campbell datalogger. Därefter överförs data till en PC. För kompletterande mätningar används strömaggregat och digitala multimetrar.

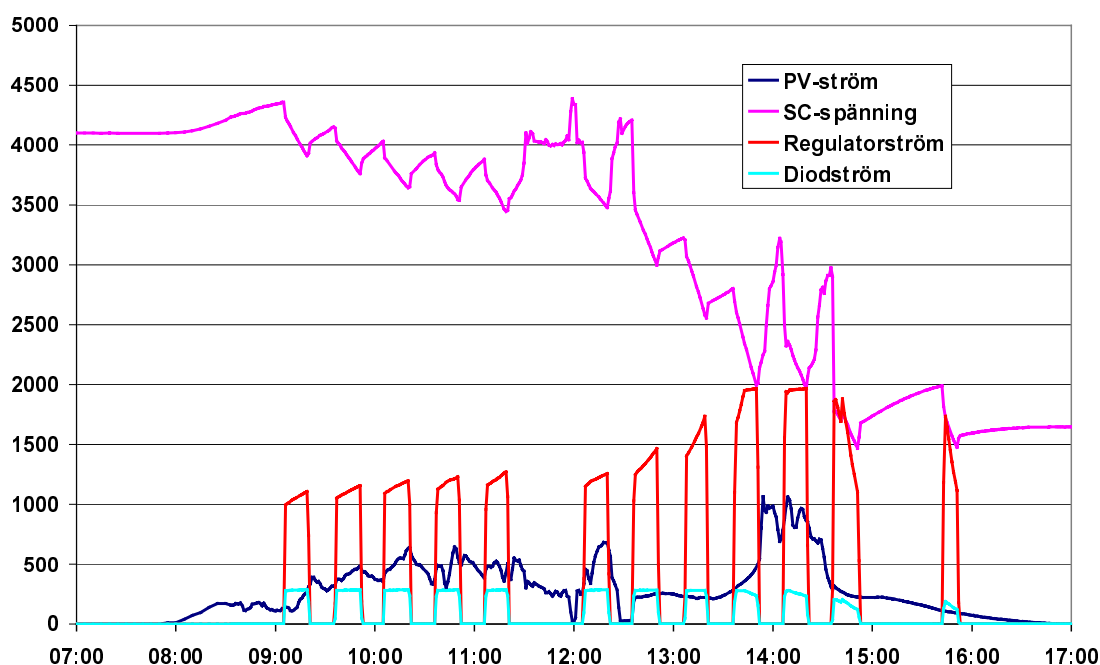
I de flesta mätserierna skedde mätning var tionde sekund och registrering av medelvärden gjordes med en eller två minuters intervall. Se vidare kapitel 3.

3 Genomförda mätningar

3.1 Redovisning av olika driftfall

Figur 3.1 nedan visar anläggningens beteende under en dag med många belysningsperioder aktiverade. Graderingen på y-axeln avser spänningar och strömmar i millivolt respektive milliampere.

Vid dagens början är kondensatorspänningen drygt 4100 mV. Klockan 8.00 börjar solpanelen ge laddström och SC-spänningen stiger. Kl 9.15 tänds lampan en första 15-minutersperiod. Ingångsströmmen till reglerkretsen blir drygt 1000 mA och diodströmmen knappt 300 mA. Sedan tänds lampan ytterligare ett antal 15-minutersperioder och kondensatorspänningen minskar successivt.



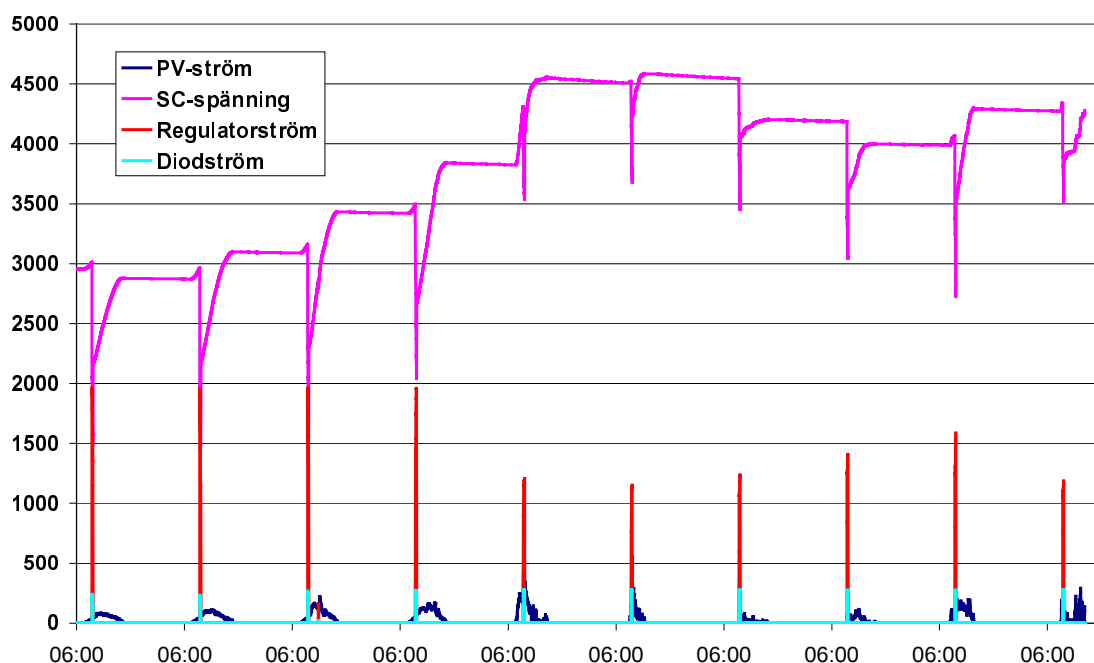
Figur 3.1 Spännings- och strömförlopp under en dag med många belysningcykler och med varierande solinstrålning. Graderingen på y-axeln avser spänningar och strömmar i millivolt respektive milliampere.

Man kan se att regulatorn fungerar även när spänningen sjunker under 3 V. Under den 15-min-period som börjar 13:40 blir spänningen så låg (cirka 2,3 V) att regulatorn inte orkar ge full spänning och därmed ström till dioderna. Klockan 15:10 skulle dioderna ha tänds igen men nu är spänningen för låg för att regulatorn skall starta. Klockan 15:40 har spänningen kommit upp till cirka 2000 mV och då startar regulatorn men diodströmmen blir begränsad och regulatorn stoppar efter några minuter (mindre än 15 minuter).

Vi har under denna dag haft 8 stycken 15-min-perioder med full diodström och fyra perioder med delvis begränsad ström. Totala energiuttaget till lampkretsen beräknas till

9,3 Wh. Kondensatorns energiinnehåll vid dagens början respektive slut var 4,2 Wh och 0,7 Wh.

I figur 3.2 visas driften under 9 dagar med få soltimmar och med en 15-min-period aktiverad varje dag. Några dagar i slutet av denna period var riktigt disiga och mörka och dagsljuset räckte inte till för att hålla jämna steg med förbrukningen. Sett över alla nio dagar däremot är trenden positiv.



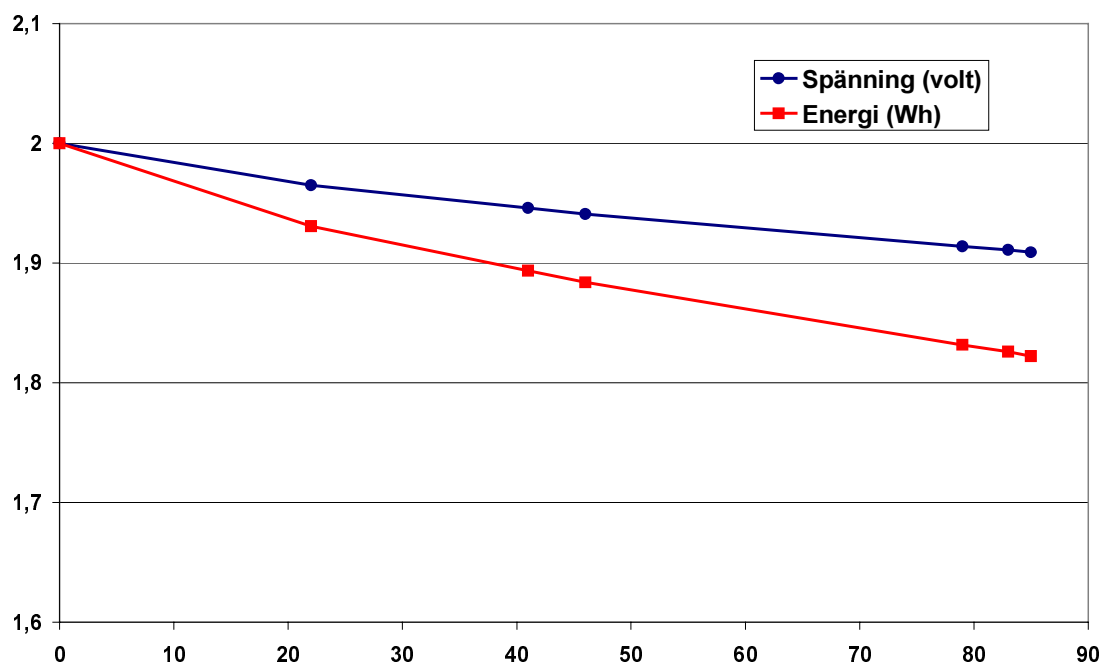
Figur 3.2 Spännings- och strömförlopp under en längre period med en 15-min belysningsperiod varje dag.

Notera att när kondensatorspänningen är som högst, dagarna 5 och 6, sker en långsam spänningsminskning under natten. Förklaringen är att överspänningsskyddet på den ena eller bägge kondensatorerna börjar arbeta vid cirka 2,3 V. Vid seriekopplade kondensatorer måste varje kondensator ha ett eget överspänningsskydd. Läckströmmen kan variera mellan olika exemplar och följden blir att kondensatorn med lägst läckström får en successivt högre spänning relativt den andra kondensatorn. Överspänningsskyddet kan därmed träda in även om summaspänningen är mindre än 4,6 V. En närmare betraktelse visar att energiförlusten vid dessa två dagar är cirka 0,1 % per timme. Mätuppkopplingen medgav inte att vi kunde registrera spänningen för varje enskild kondensator.

3.2 Självurladdning

En av superkondensatorerna laddades upp till 2,000 V och spänningen avlästes sedan under cirka 3 månader. Självurladdningen var mycket låg. Efter 85 dagar hade spänningen sjunkit mindre än 5 % och kondensatorn hade fortfarande kvar 91 % av det

ursprungliga energiinnehållet. Figur 3.3 visar förloppet. Resultatet är mycket bättre än väntat. Omräknat till en konstant läckström motsvarar spänningsminskningen 0,1 V under 85 dygn strömmen 0,05 mA. Enligt tillverkarens uppgifter är läckströmmen högst 8 mA. Spänningsminskningen 0,1 V skulle då uppnås efter cirka 12 timmar. Vår mätning gäller endast ett exemplar så resultatet kan tolkas som att självurladdningen kan vara mycket låg.



Figur 3.3 Självurladdning för en enstaka 3600 F superkondensator under 3 månader.

3.3 Cykelverkningsgrad

För att bedöma verkningsgraden för en laddnings- och urladdningscykel har vi laddat en kondensator från 1,000 till 2,000 V med strömmen 2 A och mätt tiden för denna laddning. Sedan har tiden för urladdning tillbaka till 1,000 V med samma konstanta ström mätts. Förhållandet mellan dessa tider blir ett mått på det vi kallar laddningseffektivitet eller cykelverkningsgrad. Fyra fulla cykler genomfördes på två olika kondensatorexemplar. Medelvärde för dessa fyra cykler blev 97,5 %. Laddningseffektivitet för Pb-, NiCd- och NiMh-ackumulatorer ligger i området 70-75 %.

4 Ekonomisk kalkyl

4.1 Förutsättningar

Prisjämförelsen mellan superkondensatorer och konventionella laddningsbara batterier har gjorts under följande förutsättningar. Samtliga prisuppgifter är exklusive moms.

- Priset för superkondensatorer baseras på prisuppgift från Epcos för den största enhet de tillverkar idag (5000 F, 2,5 V). Denna kostar ca 770 kr (80-90 Euro) per enhet vid köp av större serier (några tusental).
- Reglerkretsen för urladdning av superkondensatorerna antas fungera ner till 1,0 V. Reglerutrustning för laddning och urladdning av superkondensatorerna antas vid serietillverkning kosta lika mycket som en batteriregulator för ett konventionellt system (ca 500 kr).
- Två batterityper används vid jämförelsen, bly och NiMH. Priset för dessa antas vara 2 kr/Wh respektive 10 kr/Wh utifrån den tidigare rapporten [1].
- Laddningseffektiviteten antas vara 75% för blybatterier, 70% för NiMH-batterier [1] och 97% för superkondensatorer (se kapitel 3).
- Solceller antas kosta 70 kr/W_t (för relativt små panelstorlekar).

4.2 Nyckeltal

4.2.1 Investeringskostnad

Ett intressant nyckeltal för investeringskostnaden är kostnad per ”nyttig” Wh, det vill säga den del av energilagret som kan användas vid urladdning. När det gäller batterier kan hela den nominella energimängden laddas ur, medan det i fallet med superkondensatorn beror på vid hur låg spänning reglerkretsen kan fungera. Med en högsta tillåten spänning på 2,5 V och lägsta möjliga spänning på 1,0 V kan 84% av energiinnehållet nyttiggöras.

En annan intressant aspekt är laddningseffektiviteten för energilagret, det vill säga hur mycket av tillförd energi som kan återvinnas vid urladdning. Detta avgör hur stor solcellsmodulen måste vara för att tillföra energilagret en viss ”nyttig” energimängd under en given tidsperiod med en viss solinstrålning.

Eftersom den självurladdning vi uppmätt är mycket liten och betydligt bättre än uppgivna data har vi bortsett från denna under de relativt korta autonomitider vi betraktar. Detta gäller också de konventionella anläggningar vi jämfört med.

Vi har här antagit en systemdesign där solcellerna fyller energilagret om toppeffekten uppnås under 5 timmar. Som framgår av tabell 4.1 innebär detta att investeringskostnaden per ”nyttig” Wh för ett system i detta utförande med superkondensatorer därmed är c:a 11 gånger kostnaden för ett blybatterisystem och 7 gånger kostnaden för ett NiMH-system.

Tabell 4.1 Specifika kostnader för energilager och solceller

	Pb	NiMH	Superkond.
Energilager			
Pris per nom. kapacitet (kr/Wh)	2	10	176
Andel tillgänglig energi	100%	100%	84%
Pris per "nyttig" energi (kr/Wh)	2	10	210
Solceller			
Pris per nom. effekt (kr/W _t)	70	70	70
Laddningseffektivitet	75%	70%	97%
Solcellseffekt per energienhet (W _t /Wh)	0,27	0,29	0,21
Pris per "nyttig" energi (kr/Wh)	18,9	20,00	14,40
Totalt			
Pris per "nyttig" energi (kr/Wh)	20,90	30,00	224,40

4.2.2 Underhållskostnad

Underhållskostnaden för ett system med superkondensatorer ansätts till 0 kr för 20 år.

Om man använder batterier antas att dessa måste bytas ut vart femte till tionde år, det vill säga 1-3 gånger under 20 år. Hur mycket det kostar att byta batterier beror på hur svårt det är att komma åt systemet. Här antas kostnaden ligga mellan 1 000 kr och 10 000 kr per tillfälle, vilket innefattar förberedelser, resa och utförande av arbetet.

Nuvärdesfaktorn vid ett batteribyte efter 10 år är 0,56 med en antagen kalkylränta om 6%. Vid tre batteribytten, vart femte år, är motsvarande faktor 1,72. Det innebär att totala byteskostnaderna antas ligga mellan 560 kr och 5600 kr för ett batteribyte och mellan 1720 och 17200 kr för tre batteribytten.

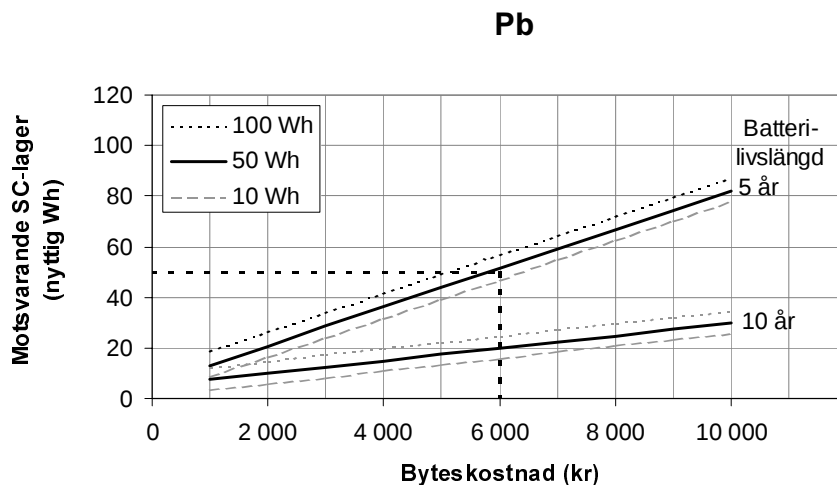
Förutom byteskostnaden tillkommer kostnaden för nya batterier. Underhållskostnaderna sammanfattas i tabell 4.2.

Tabell 4.2 Underhållskostnader för system med batterilager

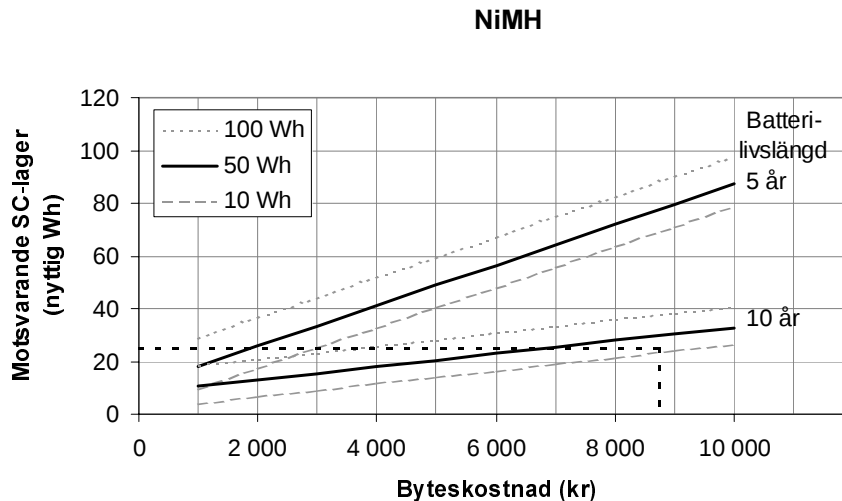
	Pb	NiMH
Ett batteribyte under 20 år		
Byteskostnad (kr)	560-5600	560-5600
Extra batterikostnad (kr/Wh)	1,10	5,60
Tre batteribytten under 20 år		
Byteskostnad (kr)	1720-17200	1720-17200
Extra batterikostnad (kr/Wh)	3,40	17,20

4.3 Brytpunkter

Låt oss jämföra två system med samma lagringskapacitet, det ena med laddningsbara batterier och det andra med superkondensatorer. Beroende på hur ofta batterierna måste bytas ut och hur kostsamt detta är erhålls brytpunkter avseende systemets storlek, där kostnaderna för de två systemen är lika.



Figur 4.1 Blybatterilager och SC-lager med samma kostnad för 20 års drift, beroende på kostnad för byte av batteri



Figur 4.2 NiMH-batterilager och SC-lager med samma kostnad för 20 års drift, beroende på kostnad för byte av batteri

Ur figur 4.1 kan t.ex. utläsas att det är billigare att använda SC än blybatterier för en anläggning med 50 Wh energilager om batterilivslängden är 5 år och kostnaden för ett batteribyte är större än 6000 kr.

Ur figur 4.2 kan på motsvarande sätt utläsas att i en anläggning med 25 Wh är SC billigare än NiMH-batterier med batterilivslängden 10 år om byteskostnaden är högre än c:a 8800 kr.

Med de mest gynnsamma förutsättningarna kan superkondensatorer konkurrera med batterier vid energilager på upp till 80-90 Wh.

4.4 Exempelanläggningar

Låt oss nu betrakta en liten solcellsanläggning under några olika betingelser. Systemet består av en solcellsmodul och ett energilager i form av antingen blybatterier eller superkondensatorer. Det ska kunna driva en last med en energiförbrukning på 2 Wh per dygn. Beroende på hur kritisk anläggningens funktion är krävs en autonomi på 5 eller 15 dygn, vilket ger en "nyttig" lagerstorlek på 10 eller 30 Wh. Solcellerna ska kunna fylla energilagret på 5 timmar vid fullt solsken. Detta leder till små modulstorlekar som förmodligen inte finns i dagens standardsortiment. Vi använder ändå detta betraktelsesätt då tillämpningen kanske kan tillverkas i ett stort antal och motivera en skräddarsydd solcellsmodul med precis rätt storlek.

Exempel på tillämpningar med dessa krav skulle kunna vara en mätstation av något slag, som sänder lagrade värden via SMS en gång per dygn, eller en energisnål belysning som styrs av en rörelsedetektor.

Vi vill nu göra en ekonomisk jämförelse mellan systemen med batterier respektive superkondensatorer. Jämförelsen görs för nuvärdet av kostnaden under 20 års drift, med en kalkylränta på 6%.

4.4.1 Investeringskostnad

I tabell 4.3 anges systemets investeringskostnader i de olika fallen. Kostnader för ihopsättning och uppförande av systemet är inte beaktade, men antas lika oavsett typ av energilager.

Tabell 4.3 Investeringskostnader

	5 dygns autonomi		15 dygns autonomi	
	Pb	Superkond.	Pb	Superkond.
Energilager				
Pris per kapacitet (kr/"nyttig" Wh)	2	210	2	210
Storlek energilager ("nyttig" Wh)	10	10	30	30
Kostnad energilager (kr)	20	2 100	60	6 300
Solceller				
Pris per energi (kr/"nyttig" Wh)	18,9	14,40	18,9	14,40
Kostnad solceller (kr)	189	144	567	432
Reglerutrustning				
För urladdn. (SC) och laddn. (kr)	500	500	500	500
Totalt				
Investering (kr)	709	2 744	1 127	7 232

4.4.2 Underhållskostnad

Blybatterierna byts ut vart femte år för att garantera god funktion. Kostnaderna för att byta ut batterierna beror på hur avlägset systemet är. Om det används för att registrera mätvärden av något slag skulle man kunna tänka sig en mycket avlägsen plats. Restid och byte av batterier kan då ta en hel dag eller mer i anspråk. Dessutom krävs säkerligen några timmars administration för att anskaffa batterier och förbereda resan. Förutom kostnader för nedlagd tid tillkommer dessutom kostnader för själva resan. Vi antar en byteskostnad om 10 000 kr per gång i detta fall. Dessutom tillkommer kostnader för nya batterier. Dessa är dock små i sammanhanget.

En belysningstillämpning är troligen belägen närmare civilisationen, men man kan ändå inte försumma byteskostnaden. Restid och tid på plats tar några timmar i anspråk, plus tid för administration. I detta fall antas en byteskostnad på 4 000 kr.

Naturligtvis kan man tänka sig att byteskostnaderna per anläggning reduceras om man samordnar batteribytten i flera anläggningar. I våra exempel tänker vi oss dock att detta inte är möjligt.

I tabell 4.4 sammanfattas de totala underhållskostnaderna.

Tabell 4.4 Underhållskostnader för system med blybatterier

	5 dygns autonomi		15 dygns autonomi	
	Avlägset	Närbeläget	Avlägset	Närbeläget
Kostnad för byte				
Byteskostnad per gång (kr)	10 000	4 000	10 000	4 000
Nuvärdesfaktor	1,72	1,72	1,72	1,72
Nuvärde byteskostnad (kr)	17 200	6 880	17 200	6 880
Extra batterier				
Kostnad per gång (kr)	20	20	60	60
Nuvärde batterikostnad (kr)	34	34	103	103
Totalt				
Underhåll (kr)	17 234	6 914	17 303	6 983

4.4.3 Nuvärdesjämförelse, avlägset system

De sammanlagda kostnaderna för ett avlägset system framgår av tabell 4.5.

Tabell 4.5 Totalkostnader för avlägset system

	5 dygns autonomi		15 dygns autonomi	
	Pb	Superkond.	Pb	Superkond.
Investering (kr)	709	2 744	1 127	7 232
Underhåll (kr)	17 234		17 303	
Nuvärde (kr)	17 943	2 744	18 430	7 232

Enligt ovan är anläggningen med superkondensatorer överlägset billigast i ett avlägset system med de antagna förutsättningarna.

4.4.4 Nuvärdesjämförelse, närbeläget system

De sammanlagda kostnaderna för ett närbeläget system framgår av tabell 4.6.

Tabell 4.6 Totalkostnader för närbeläget system

	5 dygns autonomi		15 dygns autonomi	
	Pb	Superkond.	Pb	Superkond.
Investering (kr)	709	2 744	1 127	7 232
Underhåll (kr)	6 914		6 983	
Nuvärde (kr)	7 623	2 744	8 110	7 232

Något oväntat visar det sig att ett system med superkondensatorer blir billigare än det med batterilager också i det närbelägna systemet. Även vid 15 dagars autonomi. Den tänkta energiåtgången, 2 Wh per dygn, är visserligen måttlig men tillräcklig för vissa tillämpningar. Då priset på superkondensatorer faller blir de konkurrenskraftiga även i system med något större energiåtgång.

5 Utvecklingsmöjligheter

5.1 Förbättring av komponenter

När det gäller komponentutveckling är reglerutrustningen för laddning och urladdning av superkondensatorerna helt klart det som har störst potential till förbättring. Efter kontakt med en tillverkare av reglerutrustning verkar detta inte heller vara särskilt svårt att ta fram. Om initiativ tas från Elforsk eller annan lämplig aktör bedömer vi att sådan utrustning kan finnas tillgänglig inom ett halvt till ett år. Enligt Dectron AB bedöms utvecklingskostnaden vara 25 000-40 000 kr för respektive reglerkrets, det vill säga totalt 50 000 – 80 000 kr.

För övrigt bedöms att superkondensatorerna även fortsättningsvis kommer att bli både något bättre och så småningom avsevärt billigare. Genom ny tillverkningsteknik kan Epcos nu leverera superkondensatorer på 5000 F och 2,5 V. Priset för denna enhet väntas enligt tillverkaren sjunka från dagens 770 kr till 450 kr inom 1-1,5 år (c:a 100 kr/Wh eller 1 Eurocent per Farad).

5.2 Förbättring av system

Generellt för solcellssystem med eget lager gäller att dessa kan förbättras med elektronik för smart styrning av förbrukningen. Dels kan sådan elektronik ge lägre elförbrukning vid normal drift, dels kan man se till att systemet fungerar ”på sparlåga” om energiinnehållet i lagret är lågt. I och med detta kan systemets funktion i många fall göras tillräckligt tillfredsställande med betydligt mindre energilager och/eller solcellsyta, vilket naturligtvis sänker kostnaderna. Det är dessutom enklare att avgöra energiinnehållet i ett SC-lager eftersom det är direkt proportionellt mot kvadraten på kondensatorspänningen.

6 Slutsatser

Demonstrationsanläggningen har visat att superkondensatorer kan fungera väl som energilager i små solcellssystem. För optimal funktion krävs nya reglerkretsar, som för närvarande saknas på marknaden. På initiativ från en intresserad aktör bör sådana kretsar kunna finnas tillgängliga inom ett halvt till ett år.

De ekonomiska förutsättningarna för solcellssystem med superkondensatorer i stället för laddningsbara batterier är gynnsammast för små system på otillgängliga platser. Med dagens priser på superkondensatorer är de konkurrenskraftiga i system med en lagerstorlek upp till c:a 80 Wh.

Även vid relativt närbelägna anläggningar kan SC hävda sig väl mot konventionella system vid små anläggningsstorlekar.

I övriga fall är det fortfarande billigare med konventionella laddningsbara batterier. I takt med att priset på SC sjunker ökar den lagerstorlek där SC kan konkurrera. Enligt Epcos kommer priset att sjunka ytterligare 40 % inom ett till ett och ett halvt år.

I små solcellssystem är den lägre energidensiteten i superkondensatorn oftast inget problem. Lagret får plats ändå. I större system kan detta vara mer kritiskt. I större system, med höga strömmar, kan det även krävas mer av reglerkretsen.

7 Referenser

- [1] Holmström S, Robelius F, Larsson D (2001) "Superkondensatorer i solcellsanläggningar" Rapportnummer 2096400-2, Birka Teknik & Miljö AB

ELFORSK

SVENSKA ELFÖRETAGENS FORSKNINGS- OCH UTVECKLINGS – ELFORSK – AB
Elforsk AB, 101 53 Stockholm. Besöksadress: Olof Palmes Gata 31
Telefon: 08-677 25 30. Telefax 08-677 25 35
www.elforsk.se