

Utvärdering av solcellsanläggningen på Universeum

Evaluation of the solarplant at Universeum

Henrik Weisbach

ISSN 1401-6184

INSTITUTIONEN FÖR ELTEKNIK

Examensarbete 67E

2002

Titel

Utvärdering av solcellsanläggningen på Unviverseum.

Title in english

Evaluation of the solarplant at Unviverseum.

Författare/Author

Henrik Weisbach

Utgivare/Publisher

Chalmers Tekniska Högskola
Institutionen för elteknik
412 96 Göteborg, Sverige

ISSN

1401-6184

Examensarbete/M.Sc. Thesis No.

67E

Ämne/Subject

Kraftelektronik

Examinator/Examiner

Math Bollen

Datum/Date

2002-11-29

Tryckt av/Printed by

Chalmers tekniska högskola
412 96 GÖTEBORG

Inledning

Detta projekt utfördes under höstterminen 2002 som ett examensarbete vid Chalmers Tekniska Högskola, på uppdrag av Institutionen för elteknik och Göteborg Energi. De solceller som har undersökt är placerade på taket till Universeum i Göteborg.

Projektet består av tre skilda delar.

Till att börja med skulle det undersökas om solcellsanläggningen fungerar som planerat, dvs. om den producerar så mycket energi som förväntas.

Vidare skulle det undersökas om det fanns något samband mellan den på elnätet inmatade effekten och elkvalitén.

Dessutom skulle presentation av produktionsdata på internet möjliggöras, helst med kontinuerlig uppdatering.

Sammanfattning

Denna rapport beskriver hur solcellsanläggningen på Universeum i Göteborg, Sverige fungerar, och om allting arbetar som det är tänkt. Rapporten beskriver även hur solcellsanläggningen påverkar elkvalitén avseende övertoner, rms-värde av spänningen, flimmer och frekvens. Dessutom ges information om den websida som konstruerats för att kunna åskådliggöra anläggningens produktion för allmänheten.

Abstract

This report describes how the solarplant at Universeum in Göteborg, Sweden works, and if everything operates as it should. The report also describes how the solarplant affects the powerquality regarding harmonics, rms-value of the voltage, flicker and frequency. Besides, information is given about the designed website which shows the powerproduction of the plant to the public.

Innehåll

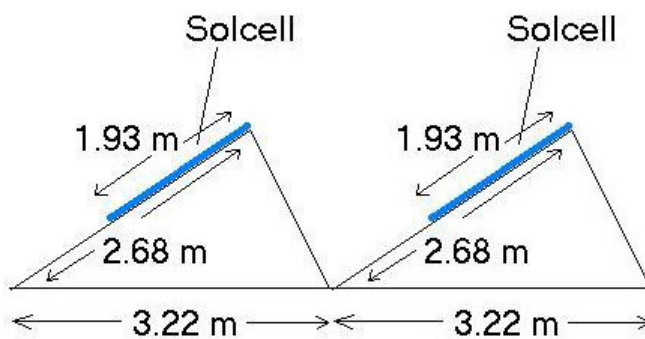
| | | |
|-----|---|----|
| 1 | Verifiering av produktion | 1 |
| 1.1 | Parametervärden | 1 |
| 1.2 | Kontroll av att produktionen matchar instrålad effekt | 2 |
| 1.3 | Kontroll av de enskilda växelriktarna | 3 |
| 1.4 | Solens rörelsemönster | 5 |
| 1.5 | Resultat | 6 |
| 1.6 | Slutsats | 7 |
| 2 | Så fungerar solcellerna | 8 |
| 2.1 | PN-övergången | 8 |
| 2.2 | Den fotovoltaiska effekten | 9 |
| 2.3 | Hur solcellerna ansluts till elnätet | 10 |
| 3 | Elkvalité | 11 |
| 3.1 | Introduktion | 11 |
| 3.2 | Övertoner | 11 |
| 3.3 | Spänningens RMS-värde | 11 |
| 3.4 | Flimmer | 12 |
| 3.5 | Frekvens | 13 |
| 4 | Förutsättningar | 14 |
| 4.1 | Anläggningen | 14 |
| 4.2 | Mätinstrument | 14 |
| 4.3 | Tidpunkt för mätningarna | 14 |
| 5 | Mätningar | 17 |
| 5.1 | Spänningens RMS-värde | 17 |
| 5.2 | Övertoner | 20 |
| 5.3 | Flimmer | 24 |
| 5.4 | Frekvens | 25 |
| 5.5 | Slutsatser | 26 |
| 6 | Hemsidan | 27 |
| 6.1 | Utseende och placering | 27 |
| 6.2 | Html kod | 28 |
| 7 | Källor | 30 |
| 7.1 | Tryckta källor | 30 |
| 7.2 | Hemsidor | 31 |
| 8 | Tack | 31 |

1 Verifiering av produktion

För att kontrollera att anläggningen fungerade som tänkt användes solcellssimuleringsprogrammet PVsyst med vars hjälp man kan beräkna en förväntad elproduktion. För att kunna utföra beräkningarna behövs följande parametrar

1.1 Parametervärden

| | |
|---|---|
| Geografisk placering: | Sverige/Göteborg (Latitud: 57.19° N, Longitud: 12.16 ° öst, höjd: 5m över havet) |
| Lutning: | 34° |
| Vridning från söder: | 3° |
| Skuggning: | Ingen, utom den från det vinklade taket. |
| Total area: | 104 m ² |
| Maxeffekt: | 4320 W _p * Vid STC** |
| Verkningsgrad | 4.15 % |
| Växelriktarnas verkningsgrad: | <93 % |
| Energiförbrukning för växelriktarna (4 st.): | 16 W (4*4 W) aktiva, 0 W passiva |
| Energiförbrukning för kontrollenheten: | 9-11 W aktiv, 8 W i standby |
| Placering på taket: | Se Figur 1.1 |



Figur 1.1

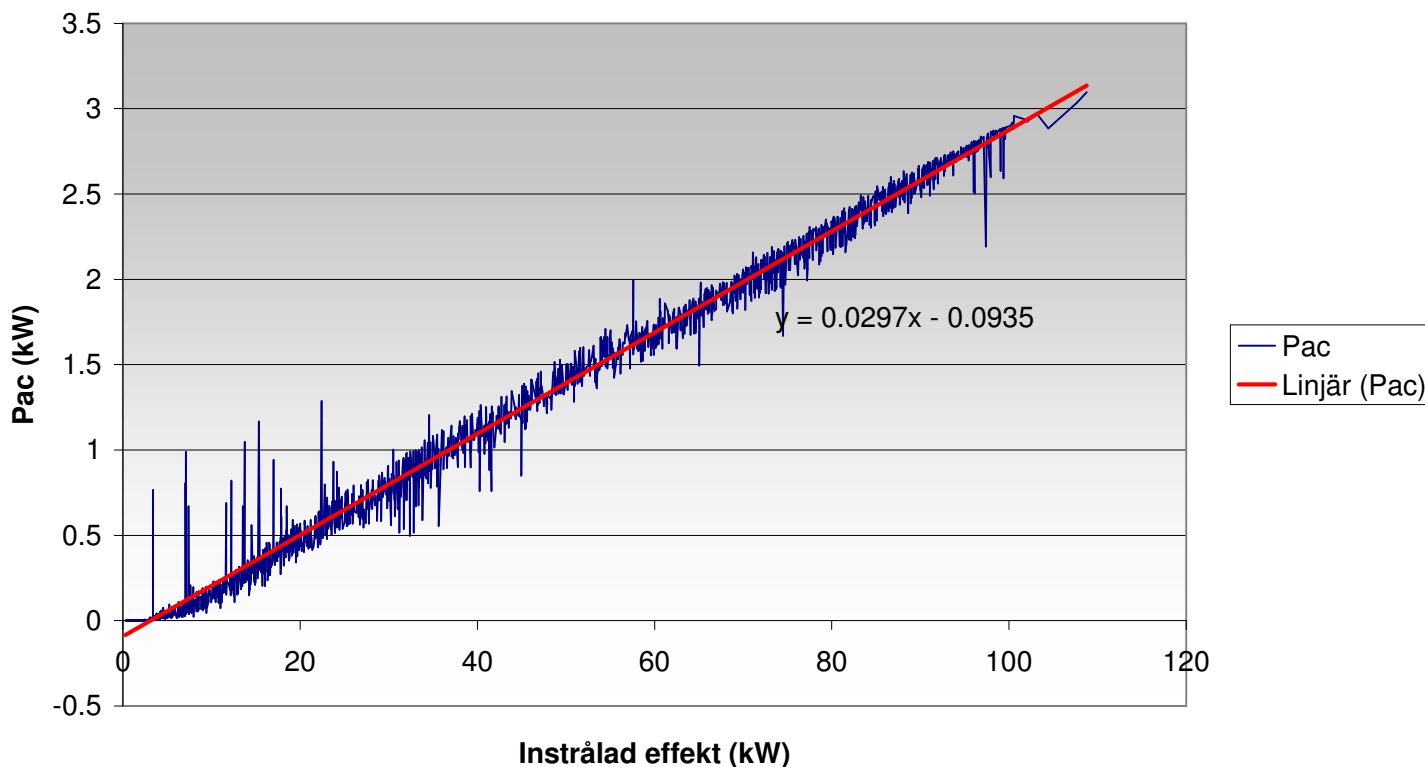
*Enheten W_p är en enhet som anger vilken effekt man får ut av solceller under speciella standardiserade förhållanden (STC).

**STC = Standard Test Conditions: Solinstrålning: 1kW/m²;
Celltemperatur: 25°C; Luftmassa 1.5.

1.2 Kontroll av att produktionen matchar instrålad effekt

För att verifiera att den instrålade solenergin verkligen omvandlas till elektrisk energi plottas avgiven effekt som funktion av instrålad effekt i figur 1.2.

Matchar produktionen solinstrålningen?

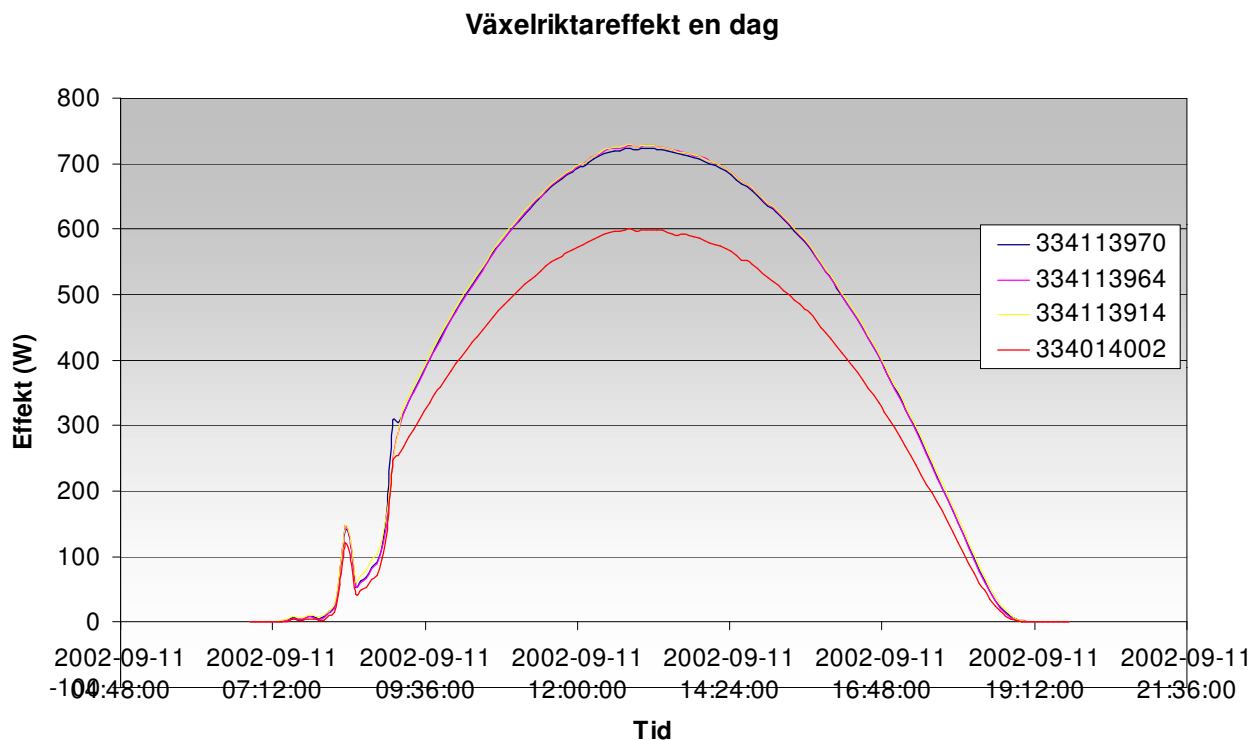


Figur 1.2

Man ser att det råder ett linjärt samband mellan instrålad och producerad effekt P_{ac} enligt $P_{ac} = 0,0297 \cdot (\text{instrålad effekt}) - 0,0935$ med effekter i kW. det betyder att vi har en verkningsgrad på 2.97% och att systemet konsumerar ca 90 W. Verkningsgraden är ca 1 %-enhet lägre än den maximala, alltså får man bara ut ca 75 % av den energi man teoretiskt hade kunnat utvinna om förhållandena hade varit som STC. Men det beror troligen på att det under mätperioden har varit mycket varmt. Enligt tillverkaren SMA skall växelriktarna konsumera 16 W och kontrollenheten upp till 11 W i aktivt tillstånd, detta är dock mycket lägre än vad som visas i diagrammet, denna skillnad kan bero på dålig mät noggrannhet vid låga effekter.

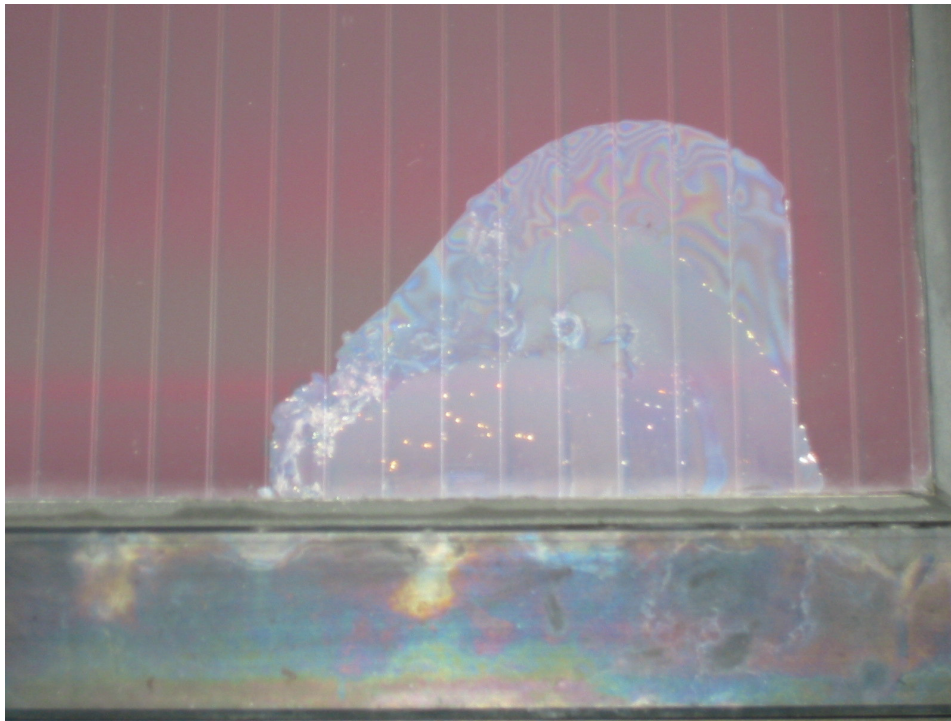
1.3 Kontroll av de enskilda växelriktarna

För att kontrollera att alla växelriktarna fungerar som tänkt har deras enskilda produktion plottats i samma diagram under en dag, detta visas i figur 1.3, där ser man att växelriktaren med nummer 334014002, även kallad växelriktare B, ligger runt 20 % lägre gällande producerad effekt än de övriga. Så är fallet även för de andra dagarna som mätningar har gjorts, till detta finns det ingen bra förklaring annat än någonting har gått sönder på anläggningen. På solcellerna har det observerats ljusa fläckar. Dessa fläckar förekommer på alla solcellsradar, men mest på rad B, den rad som är kopplad till växelriktare B. Dessa fläckar är förmodligen fuktskador och kan om de är tillräckligt allvarliga förstöra solcellerna. För att kontrollera om felet ligger hos växelriktaren eller solcellerna skulle man kunna koppla om så att en annan växelriktare ansluts till rad B. Rad B ligger på det södra taket längst ner. Skuggning hade kunnat vara ett problem, men eftersom det inte finns några höga byggnader som skymmer solen så skuggas rad B lika mycket som rad D vilken ligger längst ned på det norra taket.



Figur 1.3

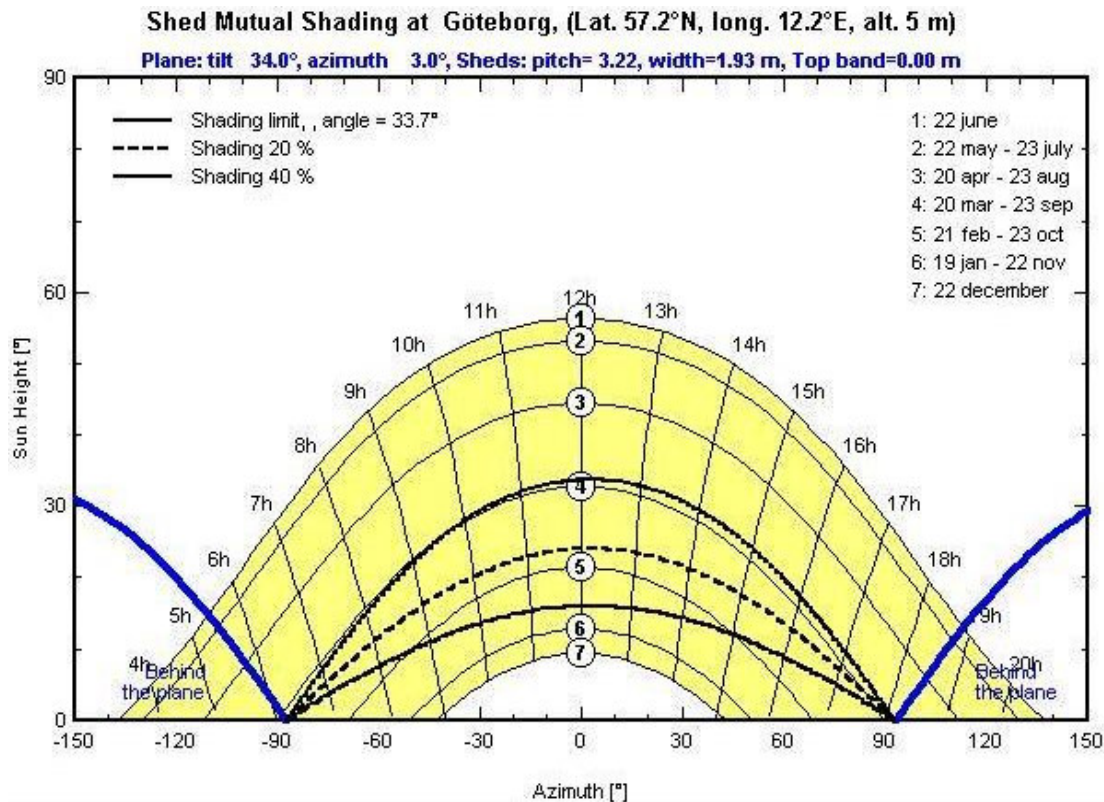
I figur 1.4 visas den största av de fläckar på solcellerna som kan tänkas orsaka den minskning i producerad energi som uppmätts för växelriktare B. Fläcken på bilden är ca 100 cm² stor.



Figur 1.4

1.4 Solens rörelsemönster

Ur figur 1.5 nedan ser man att under perioden 20 mars till 23 september har man i princip ingen skuggning alls från framförvarande takdel. Det finns heller inga höga byggnader eller annat som skymmer solen, vilket gör att man kan man förvänta mycket goda resultat. En jämförelse mellan en solig dag i augusti då det inte förekommer någon skuggning alls och en solig dag i oktober då ca 20 % av solcellerna skuggas visar att produktionen minskar med ca 30 %.



Figur 1.5

På vertikalaxeln visas solens höjd i grader, och på horisontalaxeln mäts solens vridning i grader från söder.

1.5 Resultat

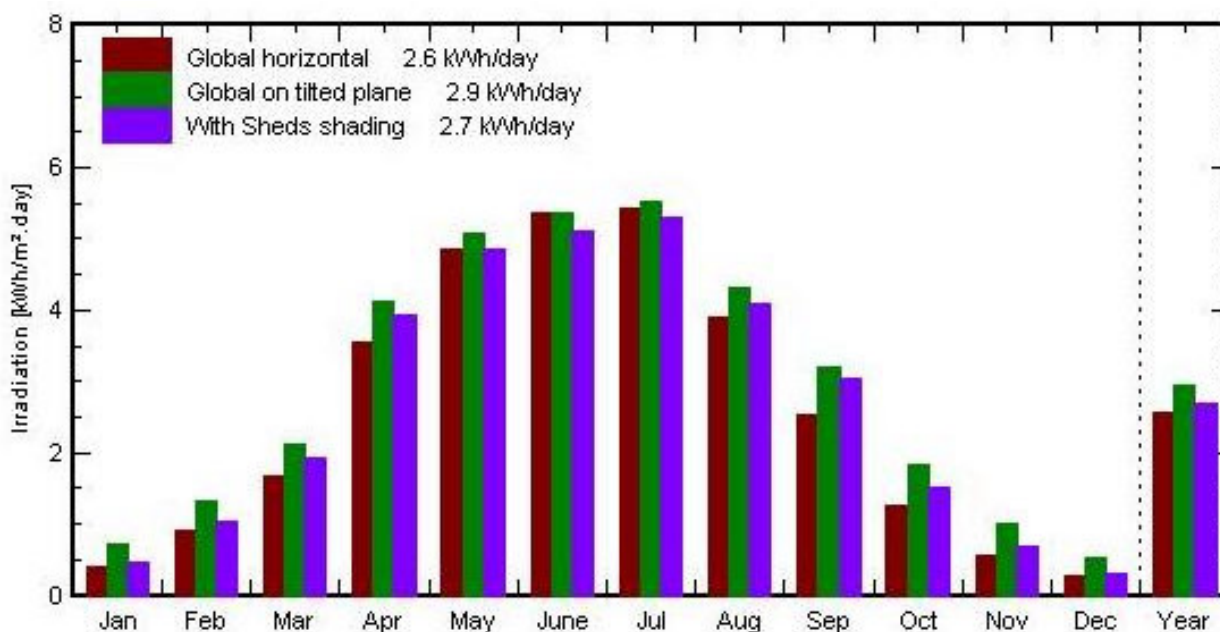
Från PVsyst fås en instrålad dagsenergi enligt figur 1.6. De högra (blå) staplarna visar hur dagsenergin varierar över året när hänsyn tas till skuggning från framförvarande takdel.

Man får ett årligt medelvärde av $2.7 \text{ kWh}/(\text{dag} \cdot \text{m}^2)$, och under september då mätningarna på universeums anläggning startade beräknar PVsyst dagsenergin till $3.2 \text{ kWh}/(\text{dag} \cdot \text{m}^2)$.

Använder man dessa värden och en verkningsgrad för solcellerna på 4.15 % och för växelriktarna 93 % fås att anläggningen borde producera 3945 kWh/år och i september månad ha en energiproduktion på 12.8 kWh/dag.

NAPS, leverantören av solcellsanläggningen beräknade den årliga energiproduktionen till 3821 kWh/år vilket endast skiljer sig marginellt från ovanstående beräkningar. Det uppmätta värdet av producerad energi under ett år är 3650 kWh/år vilket är 295 kWh/år lägre än det beräknade.

Det uppmätta värdet av den dagliga energiproduktionen i september är ca 16.0 kWh/dag, vilket är 3.2 kWh/dag högre än det beräknade värdet.



Figur 1.6

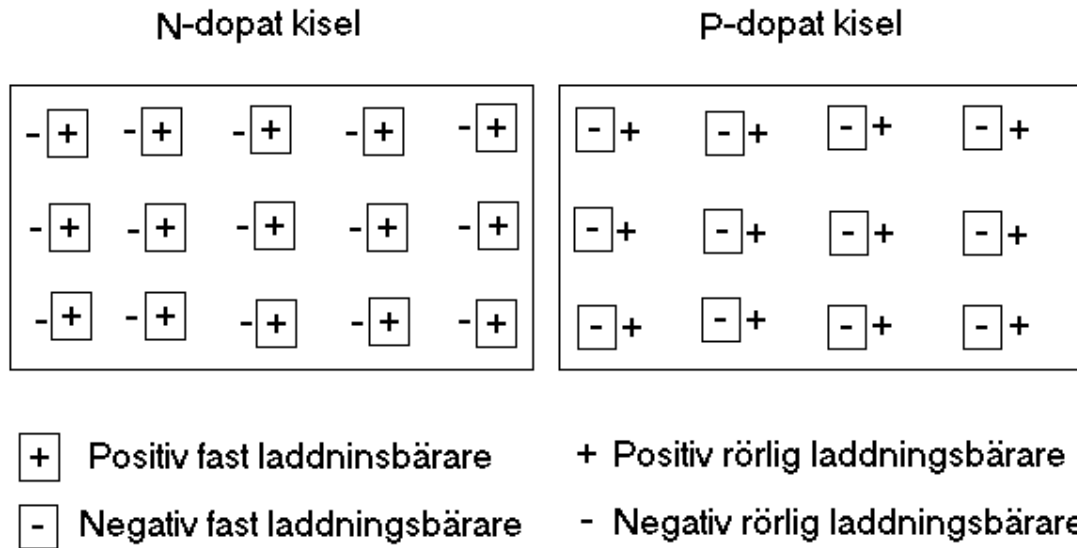
1.6 Slutsats

Den uppmätta årliga energiproduktionen är något lägre än den beräknade, men inte större än att man kan säga att anläggningen fungerar som tänkt. Det har dock förekommit problem vid igångkörningen som kan bidra till en sämre energiproduktion i början av mätåret. Man kan vänta sig att den växelriktare som har en avvikande produktionsnivå sänker anläggningens totala produktion med 5 %, detta skulle också vara en anledning till en lägre årlig energiproduktion än väntat. Att det under september var en högre energiproduktion än beräknat kan förklaras med att det har varit ovanligt molnfritt i år. Enligt NAPS måste de solceller som har fläckar bytas ut, de är förmodligen fuktskadade pga. att tätningen mellan skyddsglasat och kiselytan fungerat.

2 Så fungerar solcellerna

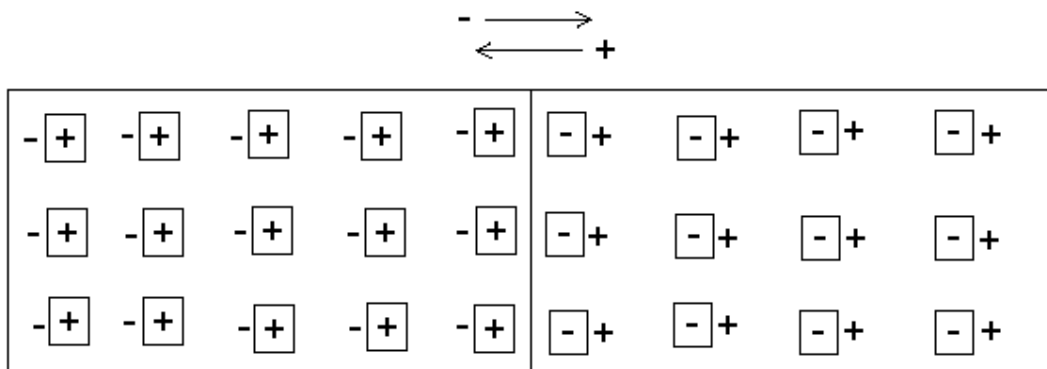
2.1 PN-övergången

Solcellerna som finns på Universeum är tunnfilmsceller av amorft kisel. De består av kisel där man har N-dopat ovasidan och P-dopat undersidan så att det uppstår en PN-övergång. Dopningens effekt kan schematiskt beskrivas genom figur 2.1a-d [11]. Figur 2.1a visar hur PN-övergången skulle ha sett ut om det P- och N-dopade kiset inte vore sammanfogat.



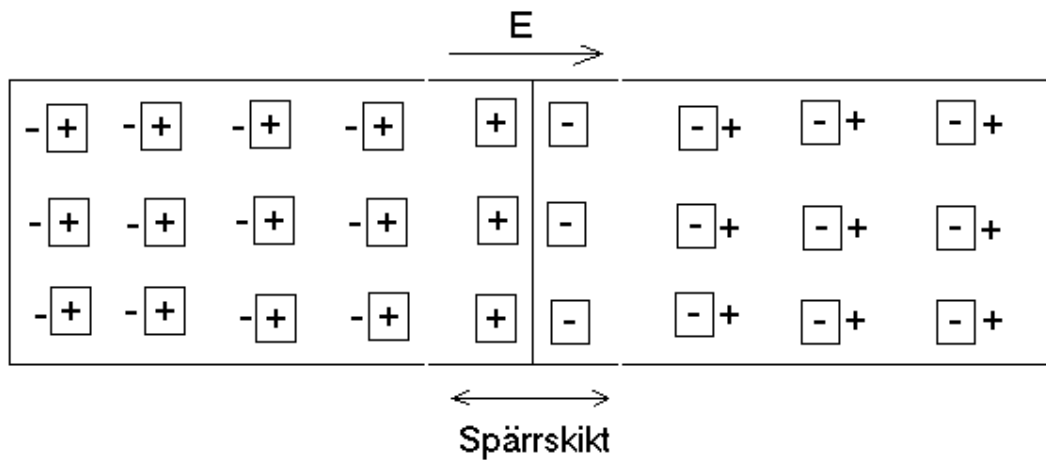
Figur 2.1a

När de P- och N-dopade kiseldelarna sitter ihop kommer de fria laddningsbärarna, positiva hål och negativa elektroner närmast PN-övergången att strömma över till andra sidan för att rekombinera med varandra som i figur 2.1b.



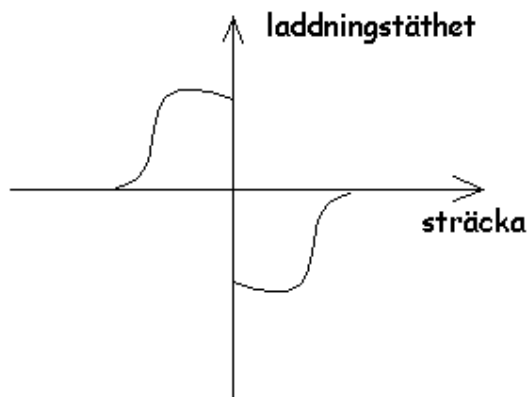
Figur 2.1b

På detta sätt uppstår ett spärrskikt där det inte finns några rörliga laddningsbärare utan endast fasta joner, positiva på den N-dopade halvan och negativa på den P-dopade halvan vilket illustreras i figur 2.1c.



Figur 2.1c

Till följd av den inhomogena laddningsfördelningen som råder i spärrskiktet, se figur 2.1d, så kommer det att byggas upp ett elektriskt fält E och därmed även en spänning. Denna inre spänning är i storleksordningen 0.6 V

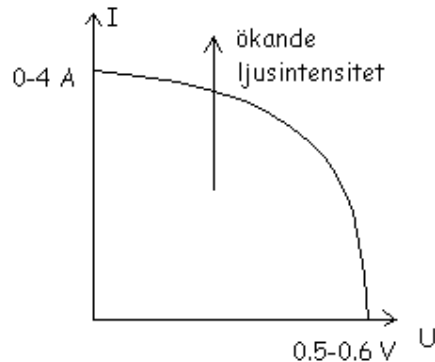


Figur 2.1d

2.2 Den fotovoltaiska effekten

När fotoner med tillräckligt hög energi träffar atomer i halvledaren exciterar de elektroner så att de lämnar valensbandet och kommer in i ledningsbandet. Om detta sker tillräckligt nära PN-övergången på P-sidan så trycker det elektriska fältet över elektronerna till N-sidan, och om det sker tillräckligt nära PN-övergången på N-sidan så trycker fältet över de hål som bildas när elektronen lämnar valensbandet till P-sidan. På så sätt uppstår det en ström från N- till P-sidan.

Formen av solcellernas ström- spänningskurva visas i figur 2.2 [4], denna kurva varierar dock med intensiteten av solinstrålningen eftersom antalet exciterade elektroner ökar med antalet infallande fotoner. Typiska värden för kortslutningsströmmen och tomgångsspänningen är 0-4 A respektive 0.5-0.6 V.



Figur 2.2

2.3 Hur solcellerna ansluts till elnätet

Den effekt som kan tas ut ur solcellen är produkten av ström och spänning, $U \cdot I$, därför har man ett regelsystem som ser till att solcellen alltid arbetar i den punkt på ström- spänningskurvan som ger det högsta värdet för $U \cdot I$. Denna punkt kallas MPP, Maximum Power Point.

Eftersom utspänningen är så låg som endast ett par tiondels volt seriekopplar man flera celler i moduler för att komma upp till en högre spänning. I mörker fungerar solcellerna som vanliga PN-dioder, vilka bara släpper igenom ström från P- till N-sidan, alltså i motsatt riktning mot den ström som solcellerna producerar. Detta gör att andra parallellkopplade solceller kan driva en oönskad backström genom en skuggad solcell/panel. För att undvika att skuggade celler i en seriekoppling backspäns parallellkopplar man så kallade frihjulsdioder som kortsluter de solceller som ligger i serie med den skuggade solcellen om spänningen över den blir tillräckligt hög. Frihjulsdioderna skyddar solcellerna från att förstöras, men samtidigt gör de att ingen av de celler som är parallellkopplade med dioden kan producera någon energi. Det är därför viktigt att välja på vilket sätt solcellerna skall seriekopplas och parallellkopplas med frihjulsdioder, annars kan det ske att hela solcellsanläggningens produktion slås ut även om bara en bråkdel av anläggningens solceller är skuggade.

För att kunna ansluta solcellsanläggningen till elnätet måste den av solcellerna producerade likströmmen omvandlas till växelström. Detta sker med växelriktare. Dessa växelriktare känner av när nätspänningen har sin nollgenomgång och har sedan en egen klocka för att kunna omvandla likströmmen till en sinusformad växelström med samma frekvens som den spänning som finns på nätet, vilken i Sverige är 50 Hz.

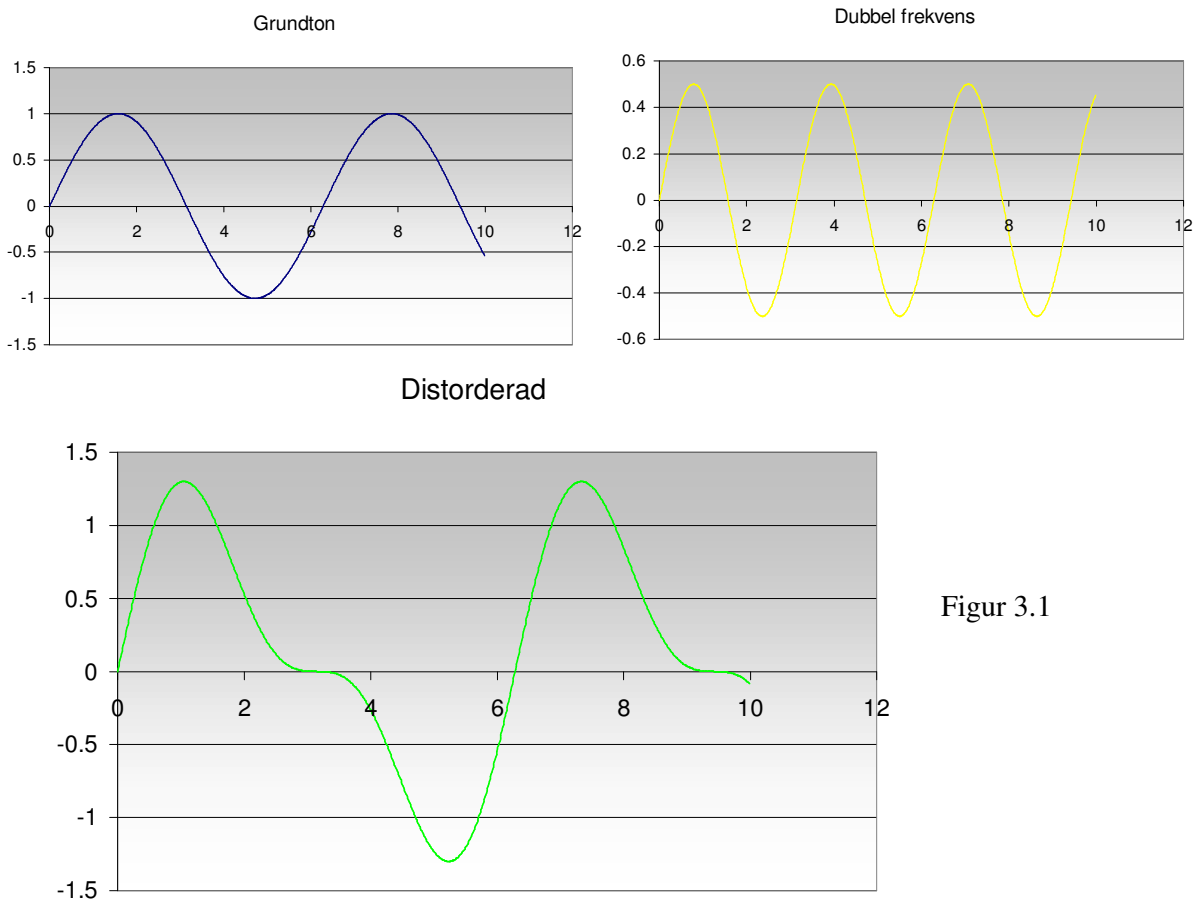
3 Elkvalité

3.1 Introduktion

Området elkvalité innefattar en mängd olika egenskaper hos strömmen och spänningen, men i denna rapport tas endast de upp vilka kan väntas påverkas av solcellerna och deras växelriktare. De storheter som kommer att behandlas är övertoner, spänningens RMS-värde, frekvens och flimmer. För att få en uppfattning om hur mycket dessa olika storheter får variera har den svenska standarden SS-EN 50160 [12] använts. Denna standard anger vilken elkvalité kunden kan vänta sig.

3.2 Övertoner

När ström eller spänningskurvorna avviker från perfekta sinuskurvor säger man att det förekommer övertoner på elnätet. Figur 3.1 visar ett exempel där grundtonen har överlagrats med en signal med dubbla frekvensen och halva amplituden.



Figur 3.1

Övertoner uppstår vanligtvis på grund av icke linjära laster, men de kan även uppstå när kraftelektroniska komponenter är med i bilden. Utvecklingen går mot att det kommer att anslutas allt mer kraftelektronik till elnätet.

Några av de problem som kan uppstå pga. övertoner på elnätet är att om övertonsströmmarnas magnetfält har samma frekvens som den mekaniska egenfrekvensen hos höljen till apparatskåp och elcentraler kan det uppstå obehagliga ljud och vibrationer. Strömmar som avviker från grundfrekvensen kommer inte att ta ut varandra i elnätets nollledare, detta gör dels att det kan induceras störningar i intilliggande teleledningar, men om övertonsströmmarna är tillräckligt höga kan de även orsaka överhettning av nollledaren och i värsta fall att den bränns av. De kan orsaka driftstörningar och onormalt slitage med haverier till följd hos trefasmotorer. Transformatorer kan överhettas även vid låga effekter, vilket har till följd att de inte kan verka vid märkeffekt. På samma sätt kan brytare och skensystem överbelastas, och säkringar kan komma att lösa ut i onödan. Kondensatorer för t.ex. faskompensering kan komma att fatta eld eller explodera.

Den totala övertonshalten THD i nätspänningen om man tar med upp till 40:e övertonen ska vara högst 8 % av nominell spänning (230 V). Dessutom ska 95 % av 10-minuters effektivvärdet för varje enskild överton under 1 vecka vara högst det värde som anges i % av nominell spänning i tabell 3.1 nedan.

Tabell 3.1

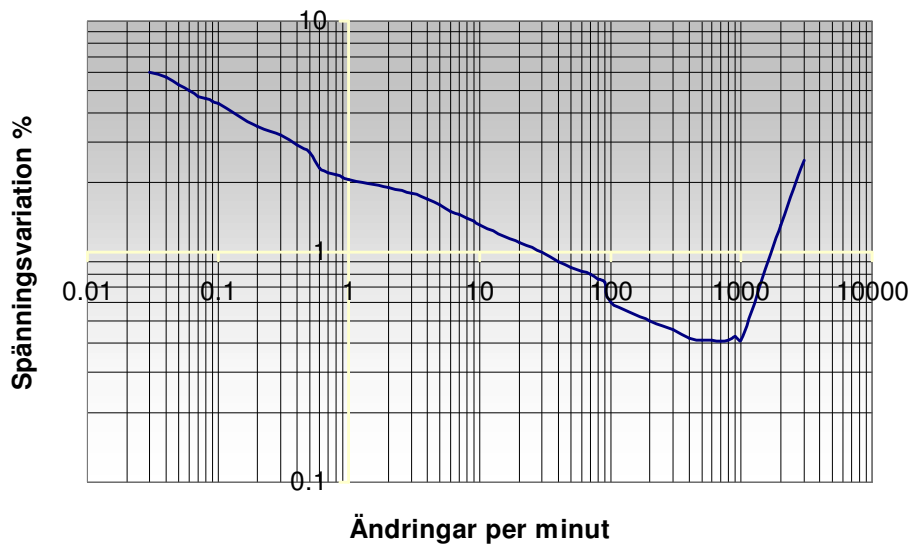
| <i>Udda övertoner</i> | | | | <i>Jämna övertoner</i> | |
|---------------------------|-------------------------------|-----------------------|-------------------------------|------------------------|-------------------------------|
| <i>Ickemultipler av 3</i> | | <i>Multipler av 3</i> | | | |
| <i>Ordning n</i> | <i>% av nominell spänning</i> | <i>Ordning n</i> | <i>% av nominell spänning</i> | <i>Ordning n</i> | <i>% av nominell spänning</i> |
| 5 | 6 % | 3 | 5 % | 2 | 2 % |
| 7 | 5 % | 9 | 1.5 % | 4 | 1 % |
| 11 | 3.5 % | 15 | 0.5 % | 6-24 | 0.5 % |
| 13 | 3 % | 21 | 0.5 % | | |
| 17 | 2 % | | | | |
| 19 | 1.5 % | | | | |
| 23 | 1.5 % | | | | |
| 25 | 1.5 % | | | | |

3.3 Spänningens RMS-värde

Det normala värdet på spänningens RMS-värde är 230 V. Vid kraftiga spänningsvariationer kommer även moment hos elektriska maskiner att variera vilket kan leda till problem för de laster som motorn är tänkt att driva. När spänningen sänks alltför mycket eller det blir avbrott kan det leda till t.ex. dataförluster. Under varje period om en vecka ska 95 % av 10-minuters värdena vara inom $230\text{ V} \pm 10\%$ dvs. 207 –253 V, dessutom skall varje 10-minuterseffektivvärde vara inom $230\text{ V} +10\% -15\%$, dvs. 196 V - 253 V.

3.4 Flimmer

Flimmer kallas de periodiska spänningsvariationer som är lägre än 25 Hz [8]. Flimmer orsakar inga större skador, men det kan få till följd att glödlampor börjar blinka, vilket kan vara irriterande. Därför har det tagits fram en flimmerkurva som visar vilka spänningsvariationer som uppfattas som störande vid olika ändringsfrekvenser av spänningen, se figur 3.2. För solceller kan man vänta sig att ändringar i spänning tar kan ske på mellan 4 och 10 sekunder [10], avläsning i flimmerkurvan ger då tillåtna spänningsvariationer på 1.2% av nätspänningen.



Figur 3.2

3.5 Frekvens

Nätfrekvensen i Sverige skall ligga på 50 Hz. Om Spänningen inte synkroniseras i hela landet uppstår det strömrusningar som vållar problem för transmissionsnätet. därför skall frekvensen hållas inom $50\text{ Hz} \pm 2\%$ dvs. 49.5-50.5 Hz under 99.5 % av ett år och inom $50\text{ Hz} \pm 4\%$ dvs. 47-52 Hz under 100 % av tiden.

4 Förutsättningar

4.1 Anläggningen

Anläggningen består av 104 m² solceller av amorft kisel som levererar en maxeffekt på 4320 W_p. Solcellerna matar fyra växelriktare av typ Sunny Boy SWR 850, tillverkade av SMA Regelsysteme GmbH. De har vardera en märkeffekt på endast 850 W, alltså totalt 4*850=3400 W, vilket är mindre än solcellernas maxeffekt. Det orsakar dock inga problem eftersom solcellerna inte uppnår sin fulla verkningsgrad under rådande förhållanden. Av växelriktarna är två anslutna till samma fas, och de övriga till olika faser. De är alla inställda på att arbeta med en effektfaktor $\cos(\varphi)$ på 1, dvs. det produceras endast aktiv effekt. Växelriktarnas switchfrekvens ligger på 20 kHz. I anläggningen finns det även en kontrollenhet Sunny Boy Control Plus, från samma tillverkare som växelriktarna. Denna kontrollenhet utför kontinuerliga mätningar på växelriktarna, och sparar de parametrar man ställt in. Nattetid eller dagar då solinstrålningen inte är tillräckligt hög försätts både växelriktarna och kontrollenheten i viloläge för att inte konsumera energi i onödan. Anläggningen har även kompletterats med en Pt-100 temperaturgivare och en referenssolcell, SolData Pyranometer 80SP, tillverkad av SolData Consulting.

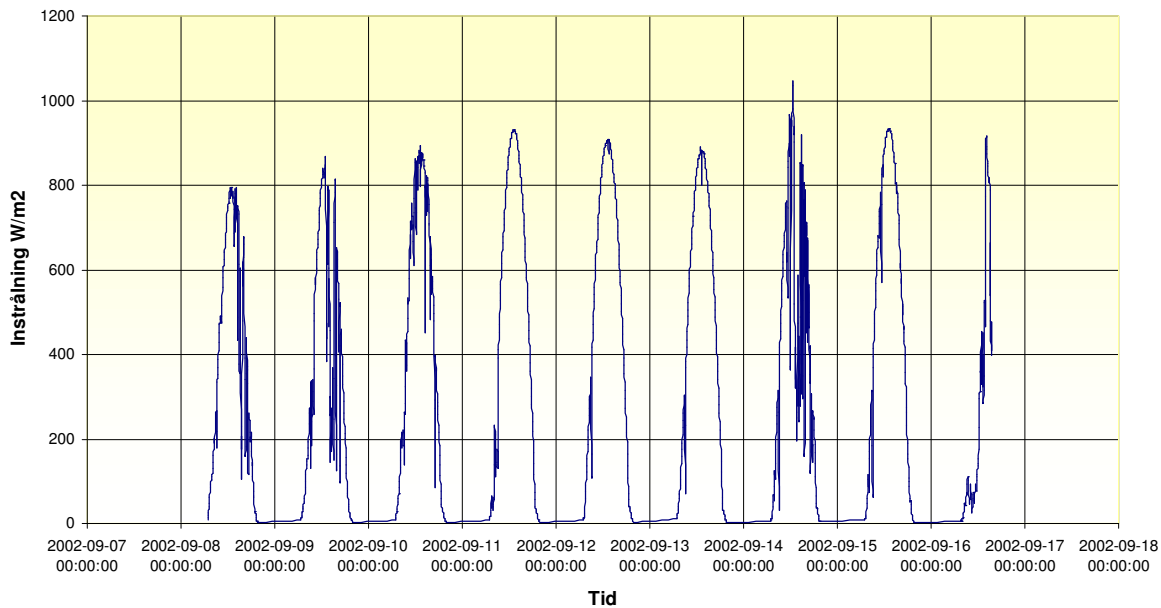
4.2 Mätinstrument

För att mäta elkvalitén har mätinstrumentet Dranetz PP1 använts.

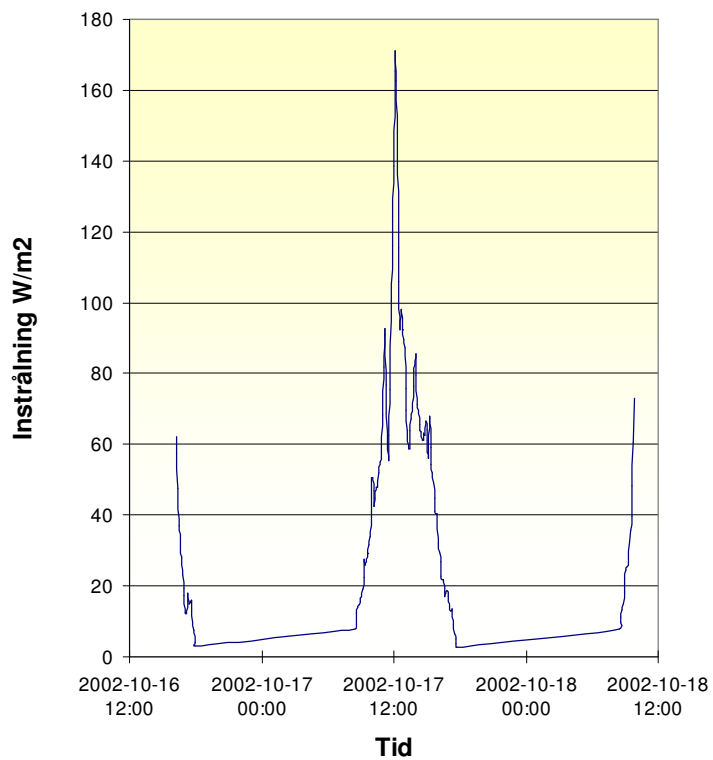
4.3 Tidpunkt för mätningarna

Mätningarna som rapporten grundar sig på utfördes under en åttadagarsperiod under sensommaren 2002, 7-16 september. Som man kan se i figur 4.1 har det under mätperioden varit helt molnfritt i fyra dagar, och blandad molnighet i fyra dagar. För att även få med en helt molnig dag har mätningarna kompletterats med ytterligare en dag, den 17 oktober.

Solinstrålning

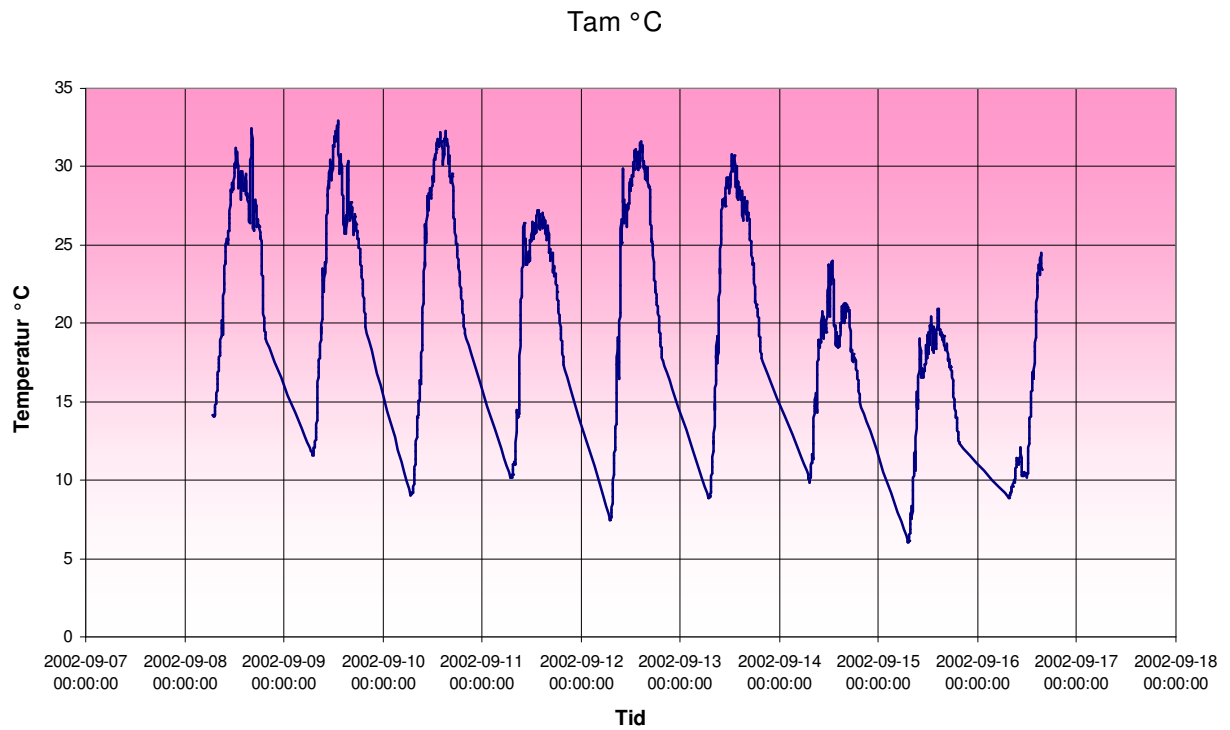


Solinstrålning

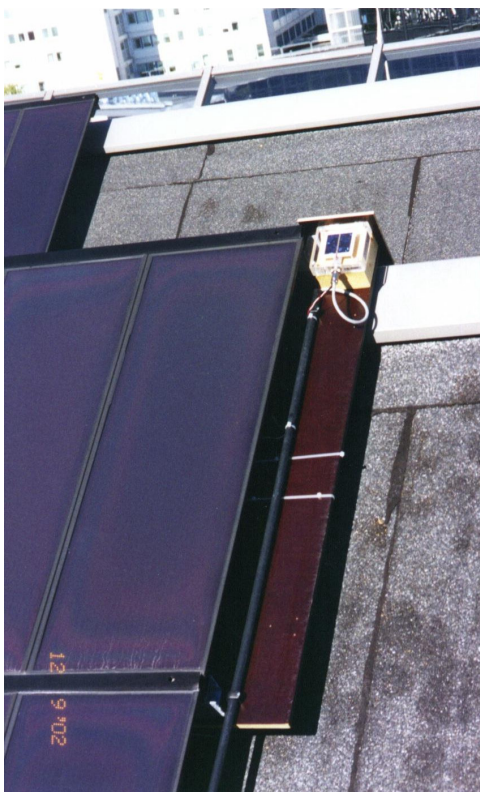


Figur 4.1

Figur 4.2 visar hur temperaturen varierar med tiden, detta har betydelse därför att solcellernas verkningsgrad sjunker med ökande temperatur.



Figur 4.2



Figur 4.3 visar ett foto av hur referenscellen och temperaturgivaren är monterade bredvid solcellerna.

Figur 4.3

5 Mätningar

En defekt strömtång gjorde att inga värden för strömmen i fas C kunde mätas upp. Därför finns det bara med två kanaler, A och B. Mätningar gjordes med 5 minutersintervall med båda instrument, Sunny Boy Control Plus och Dranetz PP1. Problem med att synkronisera mätningarna uppstod dock vilket ledde till att man fick välja ett intervall på hur stor tidsskillnaden mellan de båda mätinstrumenten fick vara. Den maximala tidsskillnaden valdes då till 1 minut, ca 300 mätpunkter uppfyllde detta krav. Den sammanlagda tiden för dessa 300 5 minutersintervall blir då 25 timmar utspritt över hela mätperioden.

5.1 Spänningens RMS-värde

För att kontrollera om det finns ett samband mellan variationer hos spänningens RMS-värde och den av solcellerna levererade effekten har följande statistiska formler använts [13], se ekvation 1-3.

$$s_{x,y} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y}) \quad \text{ekvation 1}$$

$$s_q = \sqrt{\frac{1}{n-1} \left(\sum_{i=1}^n q_i^2 - n \cdot \bar{q}^2 \right)} \quad \text{ekvation 2}$$

$$r_{x,y} = \frac{s_{x,y}}{s_x \cdot s_y} \quad \text{ekvation 3}$$

I ekvation 1-3 ovan gäller följande.

$S_{x,y}$ är kovariansen för x & y

x och y är de variabler som skall jämföras

n är antal mätpunkter

S_q är standardavvikelsen för q

q är den variabel för vilken S_q beräknas (x,y)

$r_{x,y}$ är korrelationskoefficienten

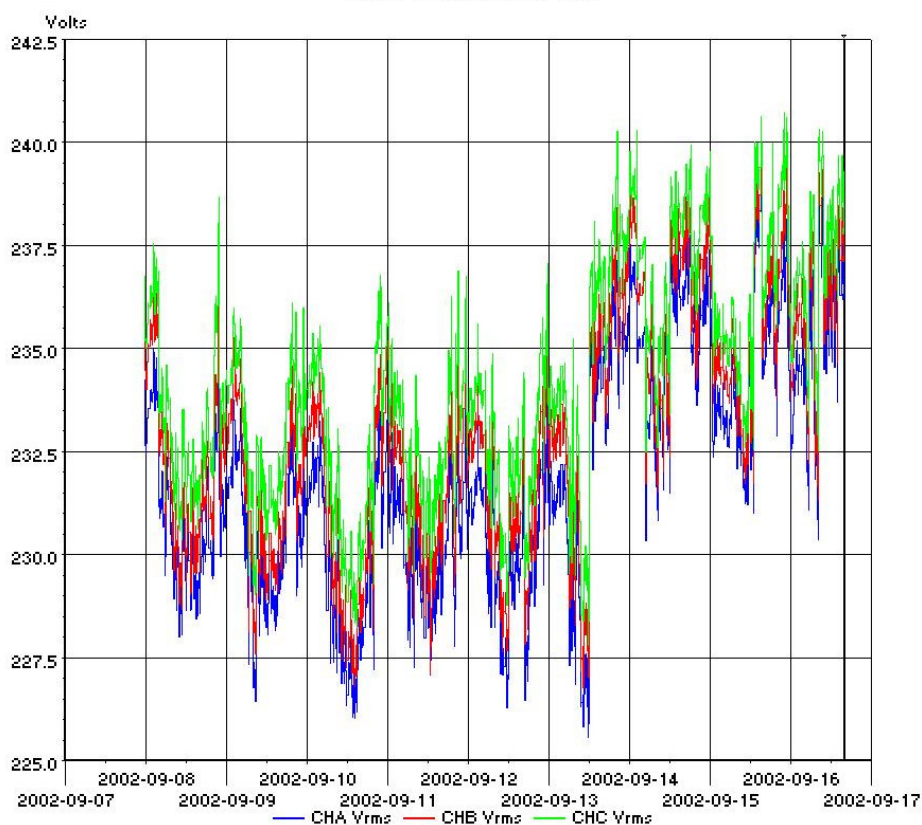
Korrelationskoefficienten r kan anta alla värden mellan -1 och 1, där $r = -1$ betyder att det finns ett negativt samband mellan de båda variablerna som är så starkt att alltid när den ena ökar så minskar den andra. $r = 0$ betyder att det inte finns något som helst samband mellan variablerna, och $r = 1$ betyder att det råder ett positivt samband mellan variablerna så att alltid när den ena ändrar sitt värde åt något håll gör den andra det också åt samma håll. För att se hur stor del av förändringarna i den ena variabeln som beror på den andra använder man sig av r^2 som kan anta alla värden mellan 0 och 1, där brukar man anta att om $r = 0$ betyder det att 0 % av förändringarna i den ena variabeln beror på förändringar i den andra, $r = 1$ betyder således att 100 % av förändringarna i den ena variabeln beror på förändringar i den andra.

Resultatet som då erhöles presenteras i tabell 5.1.

| Tabell 5.1 | | |
|------------|--------------|----------------|
| Kanal | r | r ² |
| A | -0.918218218 | 0.843124696 |
| B | -0.920515451 | 0.847348696 |
| C | -0.926942447 | 0.859222301 |

Man ser att det råder ett mycket starkt samband mellan inmatad effekt och nätspänningen, hela 85 % av variationerna i nätspänningen skulle bero på solcellerna. Men eftersom korrelationskoefficienten är negativ, dvs. hög effekt ger låg spänning är det orimligt att det är solcellerna som påverkar nätet. Ett mer rimligt antagande är att elförbrukningen varierar över dygnet på ett sådant sätt att den är som störst då solinstrålningen är som högst, alltså mitt på dagen.

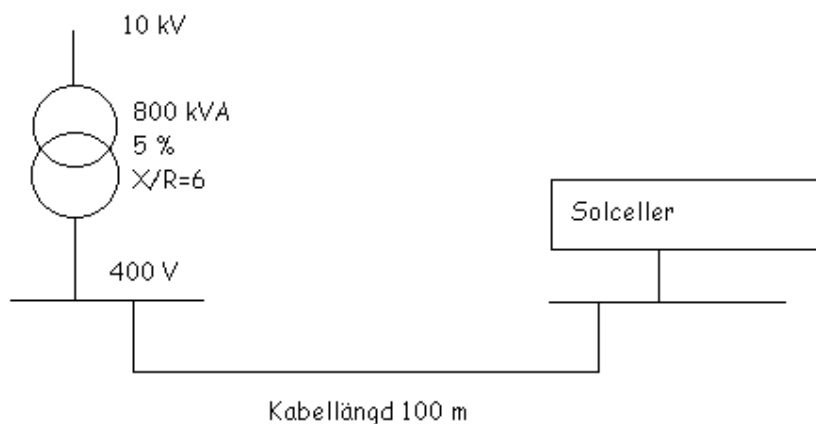
Översiktsdiagram



Figur 5.1

Figur 5.1 visar att nätspänningens RMS-värde aldrig hamnar utanför det tillåtna intervallet på 207-253 V. Det uppstår alltså hur som helst inga problem med nätspänningen. Spänningen varierar mellan 225 och 241 V under mätperioden.

För att se hur stor förändring av spänningens rms-värde som kan väntas uppstå pga. solcellsanläggningen har följande modell av elnätet använts, se figur 5.2 nedan.



Figur 5.2

Om man använder att $\Delta U = RI \cos \varphi + XI \sin \varphi$ [14], där

ΔU är den variation i nätspänning som uppstår pga. solcellsanläggningen.

R är summan av Ledningsresistansen R_L och Resistansen i transformatorn R_T .

I är den ström som solcellerna matar in på elnätet. φ är fasvinkeln mellan ström och spänning, som för solcellsanläggningen är noll. X är den reaktiva delen av transformatorns impedans. Eftersom strömmen och spänningen ligger i fas fås att $\Delta U = RI$.

$R_T \approx Z_T/6$ där Z_T är transformatorns totala impedans,

$$Z_T = 0.05 \frac{(400 V)^2}{800 kVA} = 0.01 \Omega = (R + jX), \text{ detta ger att } R_T = 0.01/6 = 0.00167 \Omega. R_L$$

beräknas med formeln $R_L = 18.5/A \Omega/\text{km}$, där A är kabelns tvärsnittsarea i mm^2 . Med $A = 20 \text{ mm}^2$ och en kabellängd på 0.1 km fås att $R_L = \frac{18.5}{20} 0.1 = 0.0925 \Omega$. Då blir

$R = R_L + R_T = 0.0925 + 0.00167 = 0.09417 \Omega$. Om man istället antar att kabeln är 200 m fås R_L till 0.185 Ω , och R blir då 0.18667 Ω , Det maximala effektivvärdet av strömmen I uppmättes för kanal A, där 2 växelriktare är anslutna till 6.5 A.

Då fås att $\Delta U = 0.09417 \cdot 6.5 = 0.612 V$ med en kabellängd på 100m, med en kabellängd på 200 m fås att $\Delta U = 0.18667 \cdot 6.5 = 1.213 V$. Detta är den maximala påverkan av växelriktarna på nätspänningens rms-värde, figur 5.1 visar dock att den dagliga variationen av nätspänningen är 7-8 V vilket är mycket högre än det som kan orsakas av solcellsanläggningen.

5.2 Övertoner

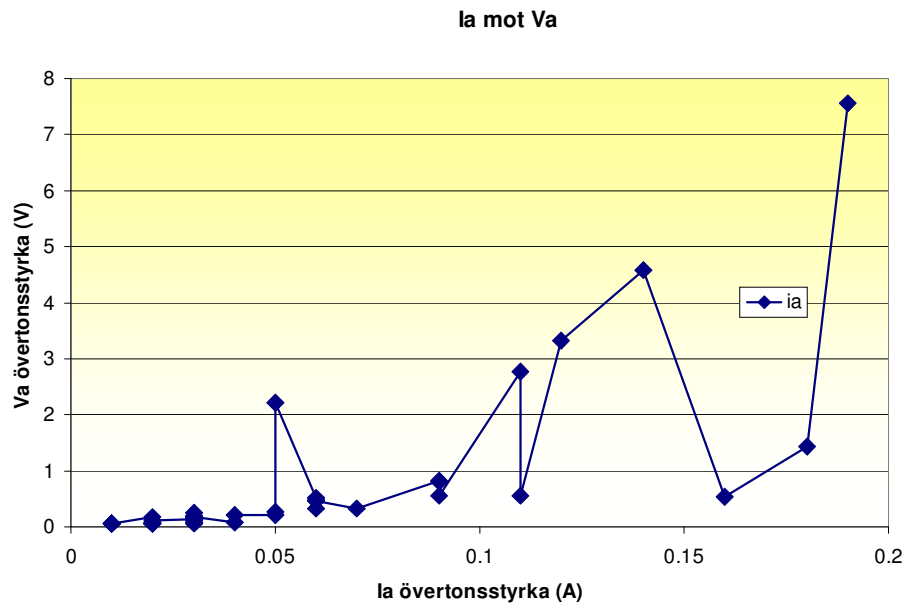
Mätinstrumentet för elkvalitet mäter övertoner från dc till 2500 Hz, dvs. upp till 50:e övertonen. Men eftersom växelriktarna arbetar med en switchfrekvens på 20 kHz förekommer högre övertoner än den 50:e, det finns dock ingen mätutrustning tillgänglig för att mäta dessa. För att kontrollera vilka övertoner som generas av växelriktarna kontrolleras först vilka övertoner i spänning som förekommer i elnätet, sedan kontrolleras vilka övertoner som finns i den ström som växelriktarna matar in på nätet. De spänningsövertoner som även är höga i ström kan komma från växelriktarna, de kommer därför att undersökas närmare. Med hjälp av den till mätinstrumentet hörande mjukvaran kan man avläsa övertonernas min-, max-, och medelvärde. För att välja ut vilka övertoner som skall undersökas har maxvärdet av övertonerna undersökts. Nedan i tabell 5.2 visas hur övertonerna har sorterats efter storleken av spänningens överton. Tabell 5.2 avser kanal a, men samma sak har gjorts för kanal b.

Tabell 5.2

| Överton | Vrms (V) | Irms (A) | Överton | Vrms (V) | Irms (A) | Överton | Vrms (V) | Irms (A) |
|---------|-------------|-------------|---------|-------------|-------------|---------|-------------|-------------|
| 5 | 7.56 | 0.19 | 31 | 0.21 | 0.05 | 22 | 0.06 | 0.02 |
| 3 | 1.43 | 0.18 | 27 | 0.21 | 0.04 | 26 | 0.06 | 0.02 |
| 2 | 0.53 | 0.16 | 33 | 0.08 | 0.04 | 28 | 0.08 | 0.02 |
| 7 | 4.59 | 0.14 | 10 | 0.17 | 0.03 | 30 | 0.06 | 0.02 |
| 13 | 3.33 | 0.12 | 12 | 0.13 | 0.03 | 34 | 0.06 | 0.02 |
| 4 | 0.55 | 0.11 | 32 | 0.06 | 0.03 | 36 | 0.06 | 0.02 |
| 9 | 2.76 | 0.11 | 35 | 0.25 | 0.03 | 37 | 0.17 | 0.02 |
| 6 | 0.55 | 0.09 | 39 | 0.08 | 0.03 | 18 | 0.06 | 0.01 |
| 15 | 0.8 | 0.09 | 41 | 0.19 | 0.03 | 24 | 0.06 | 0.01 |
| 17 | 0.82 | 0.09 | 43 | 0.17 | 0.03 | 38 | 0.06 | 0.01 |
| 19 | 0.32 | 0.07 | 45 | 0.11 | 0.03 | 40 | 0.06 | 0.01 |
| 8 | 0.46 | 0.06 | 47 | 0.15 | 0.03 | 42 | 0.06 | 0.01 |
| 21 | 0.32 | 0.06 | 49 | 0.13 | 0.03 | 44 | 0.06 | 0.01 |
| 23 | 0.48 | 0.06 | 14 | 0.11 | 0.02 | 46 | 0.06 | 0.01 |
| 25 | 0.51 | 0.06 | 16 | 0.08 | 0.02 | 48 | 0.06 | 0.01 |
| 11 | 2.21 | 0.05 | 20 | 0.06 | 0.02 | 50 | 0.06 | 0.01 |
| 29 | 0.27 | 0.05 | | | | | | |

Tabell 5.2 har använts för att rita ett diagram så att man kan se vilka övertoner är stora såväl i ström som i spänning, dessa övertoner väljs ut för en noggrannare undersökning.

I figur 5.3 visas det diagram för kanal a som legat till grund för urvalet av vilka övertoner som skall undersökas. Ett likadant diagram har ritats för kanal b.



Figur 5.3

Ur diagrammen och med tillhörande tabell för att kunna avgöra vilken överton varje punkt i diagrammet motsvarar fås att de intressanta övertonerna för kanal A är 5:e, 7:e, 9:e, 3:e, 13:e och 11:e. För kanal B är de intressanta övertonerna 5:e, 3:e, 2:a, 7:e, 13:e och 9:e. Eftersom 2:a och 11:e övertonen inte finns med i båda kanaler kan de uteslutas från vidare undersökningar.

Nästa steg är att undersöka om det finns något samband mellan spänningens och strömmens övertoner. För att göra detta har samma metod med korrelationskoefficient använts som för spänningens rms-värde.

I tabell 5.3 nedan visas vilka värden på r , respektive r^2 som beräknats för ström och spänning i kanal A och B hos de övertoner som tidigare valdes ut.

| Övertton | Kanal A | | Kanal B | |
|----------|--------------|-------------|-------------|-------------|
| | r | r^2 | r | r^2 |
| 3:e | 0.233099724 | 0.054335481 | 0.257113333 | 0.066107266 |
| 5:e | 0.25319153 | 0.064105951 | 0.399139001 | 0.159311942 |
| 7:e | 0.237575413 | 0.056442077 | 0.612507116 | 0.375164967 |
| 9:e | 0.161423498 | 0.026057546 | 0.105231668 | 0.011073704 |
| 13:e | -0.088385121 | 0.00781193 | 0.086163463 | 0.007424142 |

Ur tabellen kan man sluta sig till följande, den 13:e övertonen verkar inte korrelera alls, den har extremt svag korrelation i kanal A, och i kanal B har den en mycket liten negativ korrelation, den kan därför uteslutas.

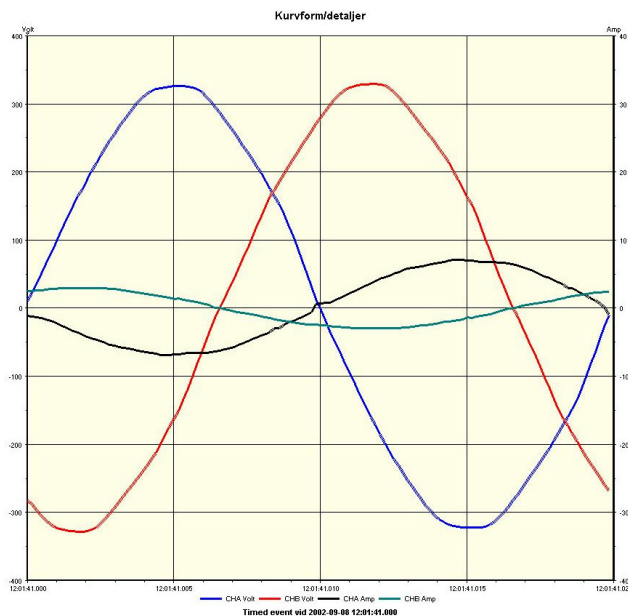
3:e, 5:e och 9:e övertonerna har likvärdig korrelation i båda kanaler, tabellen visar att övertonerna i spänningen beror till mellan 1 och 16 % på övertonerna i ström, varför man kan misstänka att de till viss grad genereras av växelriktarna.

Den 7:e övertonen har mycket hög korrelationskoefficient i kanal B och relativt hög i kanal A, det verkar som att den genereras av växelriktarna, men den stora skillnaden mellan faserna är svår att förklara.

Eftersom det är 2 växelriktare anslutna till kanal A hade man kunnat vänta sig en högre korrelationskoefficient för de övertoner som generas av växelriktarna i den kanalen, men så är endast fallet för 9:e övertonen.

Efter att ha undersökt vilka övertoner som finns på elnätet under en molnig dag helt utan solsken och jämföra resultatet med de tidigare uppmätta värdena såg man att de enda värdena som förändrades var THD-värdet som var ca 7 % lägre, och värdet för den 5:e övertonen som var ca 20 % lägre, detta stärker teorin att växelriktarna genererar den 5:e övertonen.

Figur 5.4 nedan visar hur kurvformen för spänning respektive ström ser ut under en solig dag klockan 12. Man ser att både spänningskurvorna och strömkurvorna avviker från sinusform, vid närmare betraktelse ser man även att strömkurvan avviker något kraftigare.



Figur 5.4

Eftersom spänningen på nätet kan anses vara konstant är strömmen direkt proportionell mot den effekt som skall matas in på nätet, och då kan man anta att det finns ett samband mellan instrålad effekt och övertonshalten. Varken den totala övertonshalten THD eller de enskilda övertonerna överskrider de värden som är tillåtna, maxvärdet av THD är för kanal A 3.41 % för kanal B 3.35 %, och för kanal C 3.62 %, medelvärdena ligger dock runt 2.20 %. För strömmen gäller att medelvärdet för THD är 18.27 % för kanal A och 2.85 % för kanal B. Visserligen är det två växelriktare anslutna till kanal A och bara en till kanal B, detta förklarar en del av den stora skillnaden i övertonshalt, men inte att det skiljer en faktor 6 mellan de båda kanalerna.

För att se hur stor del av spänningsövertonerna som uppkommer pga. den ström som matas in på elnätet av växelriktarna har följande formler använts,

$$Z_1 = 0.05 \frac{(400 V)^2}{800 kVA} = 0.01 \Omega, Z_k = kZ_1, \text{ där } k \text{ är numret på övertonen och } Z \text{ är}$$

transformatorns impedans, se figur 5.2. $U_k = Z_k I_k$, U_k är rms-värdet av spänningen för överton k och I_k är det uppmätta rms-värdet av strömmen för överton k.

Den del av övertonshalten hos spänningen som förväntas för de toner som tidigare valts ut för noggrannare undersökning visas i tabell 5.4.

| Övertton | Uppmätt ström fas A (A) | Beräknad spänning fas A (V) | Uppmätt spänning fas A (V) | Uppmätt ström fas B (A) | Beräknad spänning fas B (V) | Uppmätt spänning fas B (V) |
|----------|-------------------------|-----------------------------|----------------------------|-------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| 3 | 0.18 | 0.0162 | 1.43 | 0.07 | 0.0063 | 2.51 |
| 5 | 0.19 | 0.0475 | 7.56 | 0.09 | 0.0225 | 6.54 |
| 7 | 0.14 | 0.0686 | 4.59 | 0.08 | 0.0392 | 4.43 |
| 9 | 0.11 | 0.0891 | 2.76 | 0.07 | 0.0567 | 2.58 |
| 13 | 0.12 | 0.2028 | 3.33 | 0.06 | 0.1014 | 2.58 |

Man ser att den övertonsstyrka som växelriktarna beräknats ge upphov till är som högst 6 % av den uppmätta, av detta kan man sluta sig till att solcellsanläggningen knappt påverkar övertonshalten på elnätet.

5.3 Flimmer

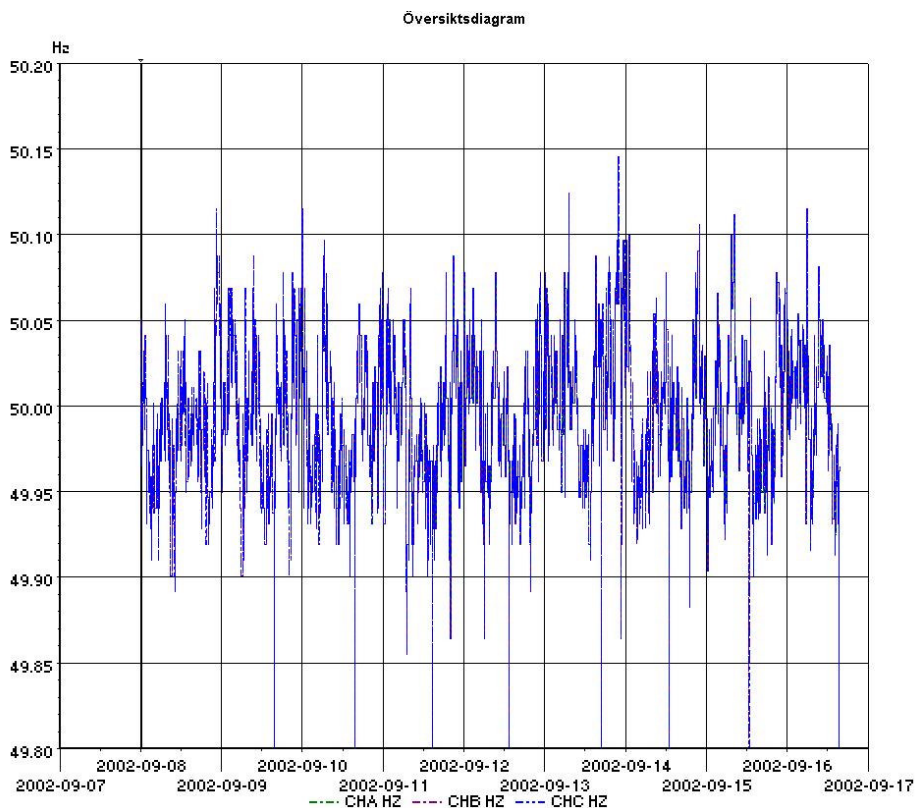
Eftersom det inte väntas något flimmer och det inte finns någon flimmermätare tillgänglig har det inte gjorts några undersökningar av flimmerhalten.

5.4 Frekvens

Eftersom det inte går att styra växelriktarnas frekvens då den är satt till att konstant vara 50 Hz kan man förmoda att det inte finns några negativa effekter av solcellerna på nätfrekvensen. Dessutom är den av solcellsanläggningen avgivna effekten mycket liten i förhållande till övrig produktion och last på elnätet vilket leder till att växelriktarna inte kan påverka nätfrekvensen märkbart. För att undersöka detta har samma metod använts som tidigare, det har undersökts om det finns någon korrelation mellan på nätet inmatad effekt och frekvens. Detta visas i tabell 5.5.

| Kanal | r | r ² |
|-------|--------------|----------------|
| A | -0.954928899 | 0.911889203 |
| B | -0.238948192 | 0.057096239 |
| C | -0.228867797 | 0.052380468 |

Här ser man ett negativt beroende mellan frekvensen och effekten, den starka korrelationen för kanal A kan inte förklaras. Förmodligen uppkommer den negativa korrelationen pga. att effektförbrukningen är som högst då solcellerna producerar mest energi, precis som fallet var för spänningens RMS-värde. I figur 5.5 ser man att förutom att frekvensen går ner till noll, förmodligen därför att mätinstrumentet stängs av i samband med nedladdning av mätvärden under en mätning varje eftermiddag håller den sig inom det tillåtna intervallet.



5.5 Slutsatser

Växelriktarna bidrar till att 3:e, 7:e, och 9:e övertonerna i viss mån sprids på elnätet, men den överton som är klart dominerande är den 5:e vilken med säkerhet generas av växelriktarna. Man kan vänta sig att de även genererar högfrekvent brus omkring switchfrekvensen 20 kHz, det saknas dock mätutrustning för att kunna påvisa detta.

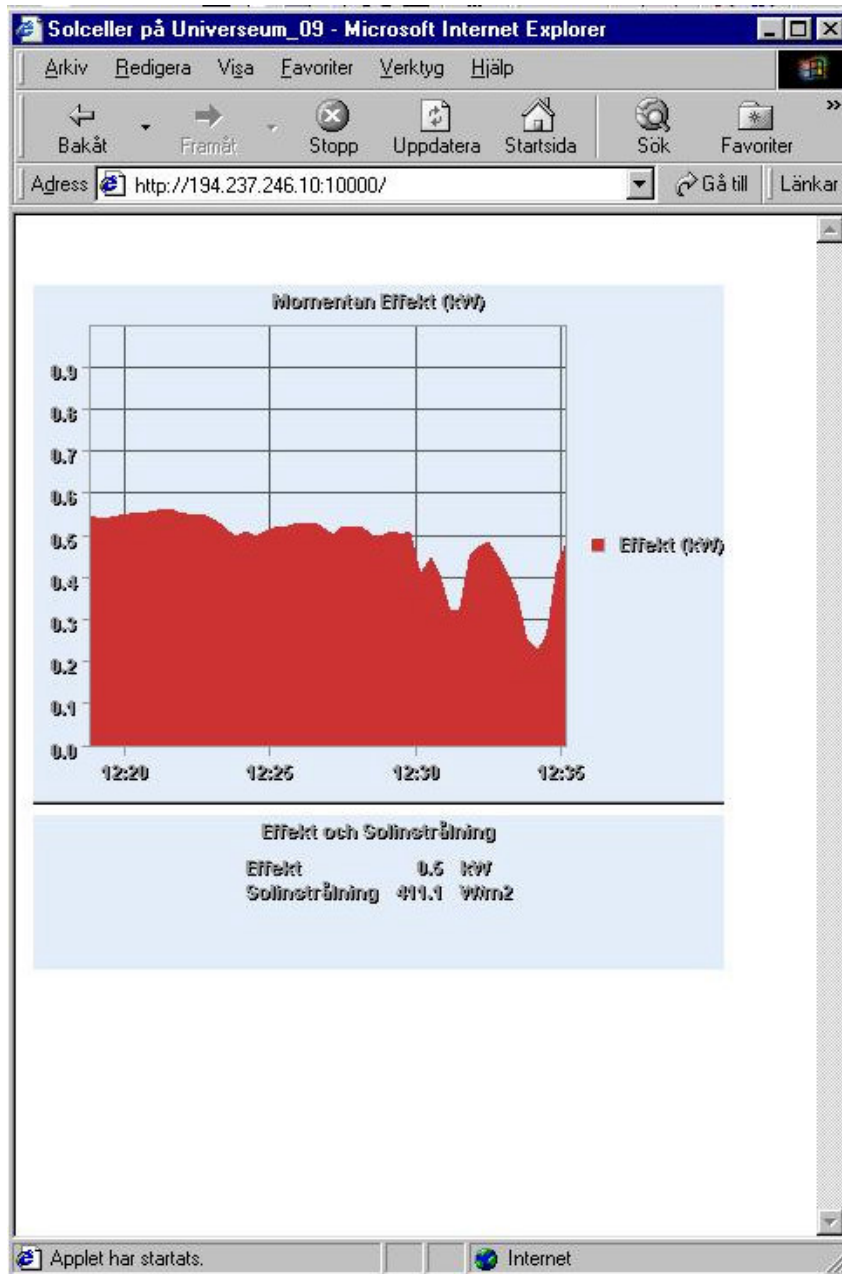
I och med att anläggningen inte är så stor påverkas inte nätspänningen nämnvärt. Men eftersom solcellernas energiproduktion är som störst mitt på dagen när även konsumtionen är som störst vore det ett bra komplement med fler solcellanläggningar anslutna till elnätet. Den negativa korrelation mellan av anläggningen producerad effekt och spänningens rms-värde beror troligen på brister i mätdata. Det hade varit bättre att utföra alla mätningar under samma tid på dygnet och året, då hade man förmodligen fått ett annat resultat.

Det finns ingen direkt möjlighet att påverka nätfrekvensen för solcellsanläggningen, eftersom växelriktarnas effekt är liten jämfört med övrig produktion. Man kan dock förmoda att växelriktarna genererar övertoner när nätfrekvensen inte är exakt 50 Hz. Eftersom växelriktarna då försöker att mata in en ström med annan frekvens än nätfrekvensen kommer strömmens kurvform att bli deformerad

6 Hemsidan

6.1 Utseende och placering

För att sprida information om solcellerna till allmänheten har en hemsida skapats som visar momentan effekt, och solinstrålning i W/m^2 , dessa värden uppdateras automatiskt var tjugonde sekund. I dagsläget finns det bara en javaapplet på en webbserver hos Universeum som visar detta. Det är dock meningen att hemsidan ska ligga som en del i Göteborg Energis webbsida. Den nuvarande adressen till hemsidan är <http://194.237.246.10:10000/>. I figur 6.1 nedan visas hur hemsidan ser ut nu.



Figur 6.1

6.2 Html kod

Nedan redovisas den html kod och de parametrar som ges till javaappleten.

```
<html>
<head>
<title>Solceller på Universeum_08</title>
</head>
<body>

<b></b>
<br>
<p><applet
      CODE = "de.sma.SunnyViewer.SunnyApplet.class"
      ARCHIVE = "SunnyViewer.jar"
      CODEBASE = "."
      WIDTH = 396

      HEIGHT = 400
      ALIGN = center>

<!-- Allmänna Parametrar -->
<PARAM name=ServerPort value=18500>

<PARAM name=ServerAlias value=Server1>

<PARAM name=DisplayErrMsg value=0>
<PARAM name=Channel1 value=Energi>
<PARAM name=Channel2 value=Effekt>
<PARAM name=Channel3 value=Solinstrålning>

<!-- Parametrar till 1:a Rutan -->
<PARAM name=Component1 value=de.sma.SunnyViewer.ViewerDiagram>
<PARAM name=Name1 value=chart1>
<PARAM name=chart1.Title value="Momentan Effekt (kW)">
<PARAM name=chart1.FontName value="verdana">
<PARAM name=chart1.FontSize value=11>
<PARAM name=chart1.LegendTextColor value=#333333>
<PARAM name=chart1.TitleColor value=#333333>
<PARAM name=chart1.Channels value="Effekt">
<PARAM name=chart1.LegendVis value=1>
<PARAM name=chart1.BGColor value=#e4edfa>
<PARAM name=chart1.AxisLabelColor value=#333333>
<PARAM name=chart1.AxisColor value=#333333>
<PARAM name=chart1.ChartColor1 value=#cc3333>
<PARAM name=chart1.ImageHighlight value=0>
<PARAM name=chart1.HighlightRate value=20>
<PARAM name=chart1.SizeX value=350>
<PARAM name=chart1.SizeY value=200>
<PARAM name=chart1.ChartStyle value=Fill>
```

```
<!-- Parametrar till 2:a Rutan -->
<PARAM name=Component2 value=de.sma.SunnyViewer.ViewerDigital>
<PARAM name=Name2 value=num2>
<PARAM name=num2.Title value="Effekt och Solinstrålning">
<PARAM name=num2.TitleColor value=#333333>
<PARAM name=num2.FontName value="verdana">
<PARAM name=num2.FontSize value=11>
<PARAM name=num2.Channels value="Effekt,Solinstrålning">
<PARAM name=num2.BGColor value=#e4edfa>
<PARAM name=num2.ValueColor value=#333333>
<PARAM name=num2.ChanTextColor value=#333333>
<PARAM name=num2.SizeX value=350>
<PARAM name=num2.SizeY value=100>
```

```
</applet>
<p><br>
</body>
</html>
```

7 Källor

7.1 Tryckta källor

- [1] P. Holoch (1998) "Control of Low-power Inverters for Photovoltaic Applications", Projekt rapport vid Chalmers Tekniska Högskola, Institutionen för Elteknik.
- [2] B. Lindgren och O. Carlson 2000 "Slutrapport för projektet Omriktarutveckling för solcellsanläggningar (96-03)", Projektrapport vid Chalmers Tekniska Högskola Institutionen för Elteknik.
- [3] A. Abbas, A. Almqvist, P. Bengtsson, M. Hansson, S. James, J. Larsson, B. Petterson och M. Svensson 1997 "Solar Energy from Photovoltaics", Projektrapport vid Chalmers Tekniska Högskola Institutionen för Elteknik.
- [4] B. Lindgren 2000 "A Power Converter for Photovoltaic Applications", Teknisk Rapport nr. 335L.
- [5] R.J. Dugan, M.F. McGranaghan och H.W. Beaty 1996 "Electrical Power Systems Quality", New York: McGraw-Hill. ISBN 0-07-018031-8.
- [6] 2001 "SolEl 00-02 Tillämpat program för solcellssystem Årsrapport 2001" Elforsk Rapport 02:02.
- [7] B. Peres, L. Spante, G. Tunell, M. Andersson och S. Holmström 1994 "Byggnadsintegrerade solcellssystem IEA-projekt PV in Buildings Årsrapport 1994" Elforsk Rapport 94:15
- [8] J. Åkerlund 1999 "Förslag till FoU-program inom området Elkvalitet" Elforsk Rapport 99:46
- [9] 2000 "IEEE Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic (PV) Systems
- [10] T. Kay 2001 "Distributed Resource Integration Issues"
- [11] R. F. Pierret 1996 "Semiconductor Device Fundamentals" Addison-Wesley Publishing Company ISBN 0-201-54393-1
- [12] 1999 "Svensk Standard SS-EN 50160"
- [13] P. Carlson, S. Johansson 1997 "Modern Elektronisk Mätteknik" Liber AB ISBN 91-47-01098-3
- [14] M. Bollen 2001 "Transmission and Distribution EEK112, Autumn 2001" Dept. Electric Power Engineering.

7.2 Hemsidor

[15] <http://hem.passagen.se/benthorn/statistik/korrelation.htm>

[16] <http://w1.852.telia.com/~u85209111/toner/sid6.html>

[17] www.sma.de

[18] www.elforsk.se

[19] www.soldata.dk

[20] <http://www.mat.stevens-tech.edu/faculty/libera/courses/>

[21] <http://emsolar.ee.tu-berlin.de/simulation/sundi.html>

[22] <http://www.unige.ch/cuepe/pvsyst/pvsyst/index.htm>

8 Tack

Jag skulle vilja tacka alla som har ställt upp hjälpt mig.

Personalen på Institutionen för elteknik på chalmers. Min examinator Mathias Bollen. Men speciellt min handledare Björn Lindgren som alltid har tagit sig tid att hjälpa mig och varit där för mig när något har krånglat.

På Göteborg Energi Vill jag tacka min handledare Kjell Jonasson som hjälpt mig med material och gett mig många användbara telefonnummer. Jag vill även tacka Ingemar Andersson som vikarierat som handledare, och alla andra som hjälpt mig.

På NAPS Vill jag tacka Leif Selhagen som hjälpt mig väldigt mycket.

På Universeum vill jag speciellt tacka Gunnar Fondén och Martin Skarhall.