

Mätningar av ledningsbundna störningar i två solcellsanläggningar

SARA LINDER, PATRIK ELIARDSSON
OCH ARWID KOMULAINEN



Sara Linder, Patrik Eliardsson och Arwid
Komulainen

Mätningar av ledningsbundna störningar i två solcellsanläggningar

Titel	Mätningar av ledningsbundna störningar i två solcellsanläggningar
Title	Measurements of conducted emissions in two photovoltaic systems
Rapportnr/Report no	FOI-R--5134--SE
Månad/Month	Mars
Utgivningsår/Year	2021
Antal sidor/Pages	21
ISSN	1650-1942
Kund/Customer	FMV
Forskningsområde	Ledningsteknologi
FoT-område	Inget FoT-område
Projektnr/Project no	E725494
Godkänd av/Approved by	Christian Jönsson
Ansvarig avdelning	Ledningssystem

Bild/Cover: FOI

Detta verk är skyddat enligt lagen (1960:729) om upphovsrätt till litterära och konstnärliga verk, vilket bl.a. innebär att citering är tillåten i enlighet med vad som anges i 22 § i nämnd lag. För att använda verket på ett sätt som inte medges direkt av svensk lag krävs särskild överenskommelse.

This work is protected by the Swedish Act on Copyright in Literary and Artistic Works (1960:729). Citation is permitted in accordance with article 22 in said act. Any form of use that goes beyond what is permitted by Swedish copyright law, requires the written permission of FOI.

Sammanfattning

Solcellsanläggningar har visat sig kunna generera elektromagnetiska signaler som kan störa radiomottagare i närheten. För att undersöka karaktären och styrkan på eventuella störsignaler har mätningar på två olika typer av anläggningar genomförts. I den ena anläggningen var optimerare inbyggda i växelriktarna och i den andra anläggningen fanns en optimerare på varje enskild solpanel på taket. Vid mätningarna mättes ledningsbundna signaler i anläggningarna med hjälp av en strömtång. Resultaten visar att störsignalerna kan variera mycket mellan olika typer av anläggningar, både i styrka och i frekvensinnehåll.

Nyckelord: Solcell, störning, interferens, EMC

Summary

Photovoltaic systems have been shown to generate electromagnetic signals that can interfere with nearby radio receivers. Measurements have been performed at two different types of facilities to investigate the characteristics and strength of the interference signals. In one installation, optimizers were built into the inverters and in the other installation optimizers were installed on each solar panel on the roof. Conducted emissions were measured in both facilities. The results show that the frequency content and strength of the interference signals can differ greatly between different photovoltaic systems.

Keywords: Photovoltaic systems, EMI, interference, EMC

Innehållsförteckning

1	Inledning	7
1.1	Tekniska verken	7
1.2	Villainstallation	7
2	Mätuppställning	9
2.1	Inställningar	10
2.2	Mätningar	10
3	Resultat från mätningarna	11
3.1	Mätningar Tekniska verken	11
3.2	Mätning på villainstallation	13
3.3	Jämförelse mellan mätningarna	15
3.4	Jämförelse med krav i EMC-standard	17
4	Diskussion och slutsatser	19
5	Referenser	20
	Appendix A: Kalibreringskurva strömtång	21

1 Inledning

Solcellsanläggningar har visat sig kunna generera elektromagnetiska signaler som kan störa exempelvis radiomottagare i närheten [1]. Mätningar av olika anläggningar är ett viktigt verktyg för att undersöka de störsignaler som genereras och om de skiljer sig åt mellan olika typer av solcellsanläggningar. Installationen av en anläggning kan ske på olika sätt, med bland annat olika ingående komponenter, konstruktionssätt och kabeldragning.

I denna rapport presenteras mätningar från två olika typer av solcellsanläggningar; en med optimerare inbyggt i växelriktarna och en med optimerare på varje enskild solpanel på taket. För denna rapport mättes ledningsbundna signaler i de olika anläggningarna, vilket kan komma att kompletteras med mätningar av utstrålade störningar senare.

Anläggningen på Tekniska verken är en installation bestående av solpaneler kopplade till växelriktare med inbyggda optimerare. Villainstallationen består däremot av solpaneler som var och en har en optimerare ute på taket och som sedan är kopplade till en växelriktare.

I rapporten jämförs resultaten för de två olika anläggningarna även med resultat från en tidigare mätning i Skövde [2] och med EMC-krav på DC-sidan för växelriktare [3].

1.1 Tekniska verken

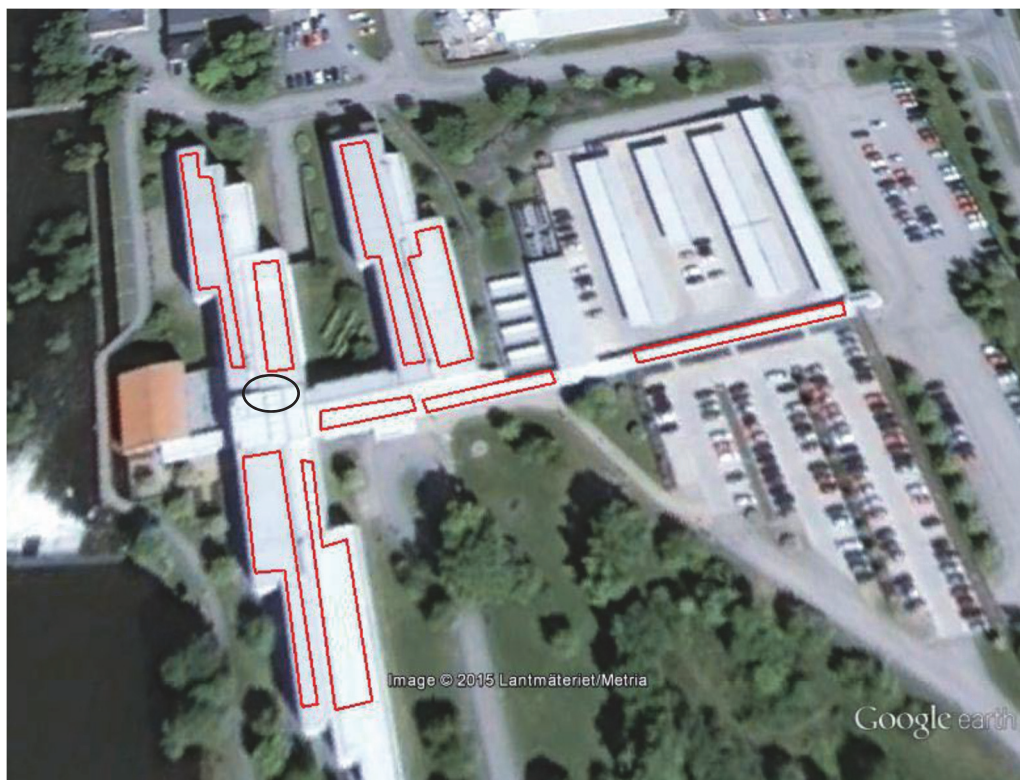
Solcellsanläggningen är uppförd på taket på Tekniska verkens kontor på Brogatan 1 i Linköping, se översiktsbild i Figur 1. Anläggningen består 864 solcellsmoduler (290 Wh multikristallin solcellsmodul från PPAM-290P). Solcellsmodulerna är kopplade i slingor till 21 växelriktare. Alla växelriktare är av typen "Sunny mini central 11000TL RP" från SMA.

Till varje växelriktare kan 5 strängar kopplas. Maxeffekten för växelriktaren är 11,4 kW, max DC-spänning är 700 V, och arbetsområdet är 333-500 V. I snitt är det $864/21 \approx 41$ solcellsmoduler kopplade till en växelriktare och i var och en av de fem strängarna är det då åtta moduler.

Växelriktarna är samlade i grupper och placerade på taket, typiskt på ytterväggen av trapphuset. Mätningarna skedde för de slingor som är längs upp till vänster i Figur 1 och platsen för mätningarna är markerad med en svart cirkel. Mellan växelriktare och solceller är kablarna dragna i kabelskyddsrör och på taket genom kabelkanaler av metall. Det råder osäkerhet i hur DC-kablagen mellan panelerna är draget, men utifrån Figur 2 är DC-kablagen troligtvis inte tvinnat utan bildar en loop. Dock ligger kablarna bitvis mot byggnadens plåttak.

1.2 Villainstallation

Solcellsanläggningen är uppförd på ett villatak och består av 22 paneler av märket Jinko 310 W. Till varje panel är en optimerare kopplad av märket SolarEdge. Alla paneler med tillhörande optimerare är kopplade i en slinga till en växelriktare, också av märket SolarEdge. Installationen skedde enligt tillverkarens dåvarande installationsanvisningar och ledarna på taket är inte dragna parallellt utan som en slinga. Växelriktaren sitter inne på övervåningen i huset. Likspänningen in till växelriktaren har ett nominellt värde på 750 V och ett maxvärde på 900 V.



Figur 1. Solcellernas placering på taket av Tekniska verken i Linköping (bild från Tekniska verken).



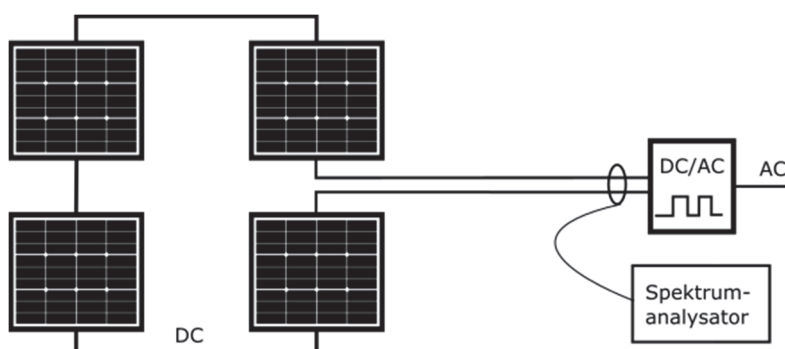
Figur 2. DC-kablage mellan plåttak och paneler på Tekniska verken.

2 Mätuppställning

För att undersöka vilka störssignaler som förekommer i solcellsanläggningarna genomfördes mätningar av ledningsbundna signaler på DC-slingan. En kalibrerad strömtång Fairchild PCL-25 (snr. 149) kopplad till en spektrumanalysator, R&S FPH Spectrum rider (snr. 1321.1111K02-101135-PS) användes vid mätningarna. Strömtångens frekvensområde är från 14 kHz till 110 MHz. Kalibreringsprotokoll för strömtången finns bifogat i Appendix A. Utifrån strömprobens impedans från kalibreringen och den uppmätta spänningen beräknades strömmen med hjälp av Ohms lag.

Mätningar skedde vid växelriktaren med strömtången kring likströmsledarna som går till panelerna, se schematisk bild i Figur 3. Med strömtången kring båda ledarna mäts "common mode" (CM) och med strömtången kring en av ledarna mäts den totala strömmen med både CM och differential mode (DM). DM är vanligen den funktionella strömmen som innehåller den önskade signalen och övertoner medan CM kan vara mer oförutsägbar. CM-störningar betraktas i EMC-sammanhang som ett större problem eftersom de kan orsaka högre nivåer av utstrålad emission vid samma strömstyrka och därmed löper större risk att orsaka problem med radiostörningar [4].

Figur 4 visar bilder från mätningarna med strömtången på Tekniska verken och villainstallation. På Tekniska verken var det möjligt att genomföra mätningar på olika slingor på samma växelriktare och även på olika växelriktare. I villainstallation var ledarna endast åtkomliga vid växelriktaren.



Figur 3. Schematisk bild över mätning med strömtång kring båda ledarna vid växelriktaren.



Figur 4. Bilder från mätningarna med strömtången vid växelriktarna, till vänster på taket på Tekniska verken och till höger inne i villan.

2.1 Inställningar

Mätningarna genomfördes med inställningar på spektrumanalysatorn enligt Tabell 1. Mätningarna skedde med en mätbandbredd (RBW, resolution bandwidth) på 3 kHz och en RMS-detektor.

Spektrumanalysatorns brusgolv mättes upp och visas som referens i figurerna.

Tabell 1. Inställningar på spektrumanalysatorn.

RBW	3 kHz
VBW	30 kHz
Trace mode	Clear/write
Trace detector	RMS

2.2 Mätningar

Mätningarna genomfördes 18 september 2020. På förmiddagen skedde mätningar på Tekniska verken och på eftermiddagen på villainstallationen. Vädret var relativt klart men med vissa moln. Produktion av el skedde i båda anläggningarna.

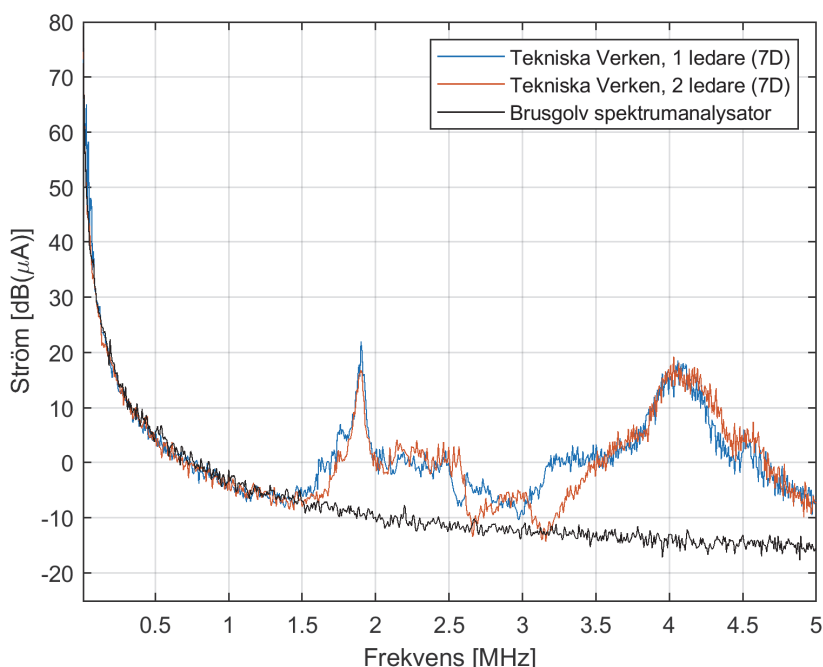
3 Resultat från mätningarna

I kapitlet redovisas först resultat från mätningar vid Tekniska verken, följt av mätresultat från villainstallationen. Resultaten från de olika anläggningarna jämförs sedan med varandra och med resultat från en tidigare mätning. Sist jämförs mätresultaten med de krav som ska uppfyllas vid EMC-tester av växelriktare med hög effekt.

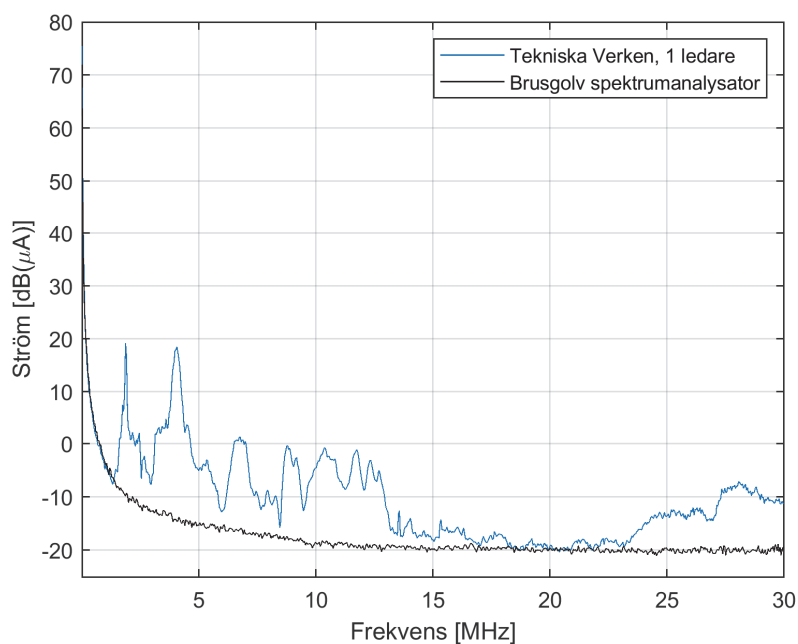
3.1 Mätningar Tekniska verken

Figur 5 visar uppmätt strömstyrka i frekvensområdet upp till 5 MHz, då strömtången placerades runt en respektive två ledare. Båda ledarna var märkta med 7D vilket innebär att de tillhör samma slinga och mätningen skedde vid växelriktaren. Strömstyrkan varierar inom frekvensbandet och det skiljer runt 30 dB mellan högsta och lägsta värdet i Figur 5. Det finns en tydlig topp för frekvenser strax under 2 MHz och en bredare topp vid 4 MHz. Båda dessa toppar syns för båda mätfallen och att båda mätningarna ger liknande resultat innebär att de störningar som uppmäts är common mode, vilket mäts med strömtången kring båda ledarna. Med strömtången kring en av ledarna mäts den sammanlagda strömmen av både common och differential mode.

Figur 6 visar strömstyrkan mätt runt en ledare för det militära kortvågsbandet, 1-30 MHz. De högsta nivåerna finns på frekvenser under 5 MHz. För högre frekvenser är de högsta nivåerna ungefär 20 dB lägre än de toppar som fanns mellan 1 och 5 MHz. För frekvenser mellan 14 och 22 MHz är nivåerna låga och utan större variationer, nivåerna stiger sedan något för frekvenser över 22 MHz, men är ändå 25 dB lägre än de toppar som finns mellan 1-5 MHz.

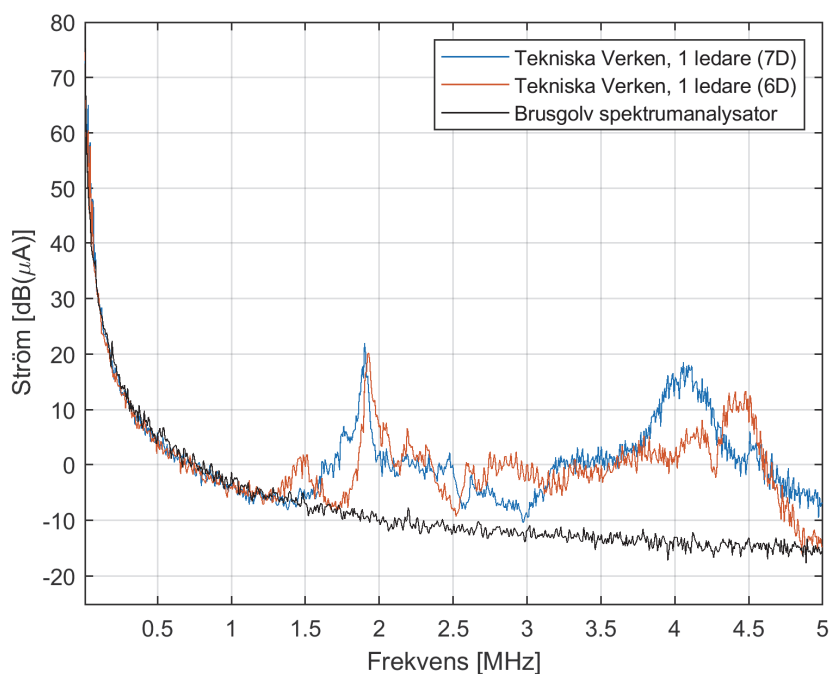


Figur 5. Ledningsbundna strömmar mätt med strömtången runt en respektive två ledare.



Figur 6. Ledningsbundna strömmar mätt med strömtången kring en ledare för frekvenser upp till 30 MHz.

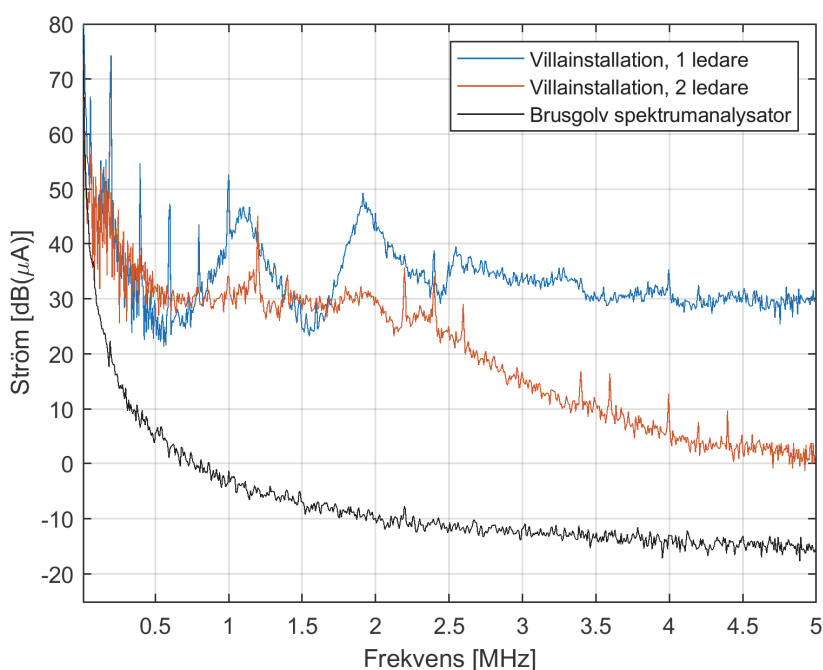
I Figur 7 visas uppmätt ström i en ledare för två olika växelriktare. Båda växelriktarna har en topp kring 2 MHz och ytterligare en topp vid 4,1 eller 4,4 MHz. Även om mätningarna inte visar exakt samma frekvensinnehåll så är nivåerna liknande och framförallt toppen vid 2 MHz är tydlig för båda växelriktarna. För frekvenser under 1 MHz uppmättes inga signaler som var starkare än spektrumanalysatorns brusgolv.



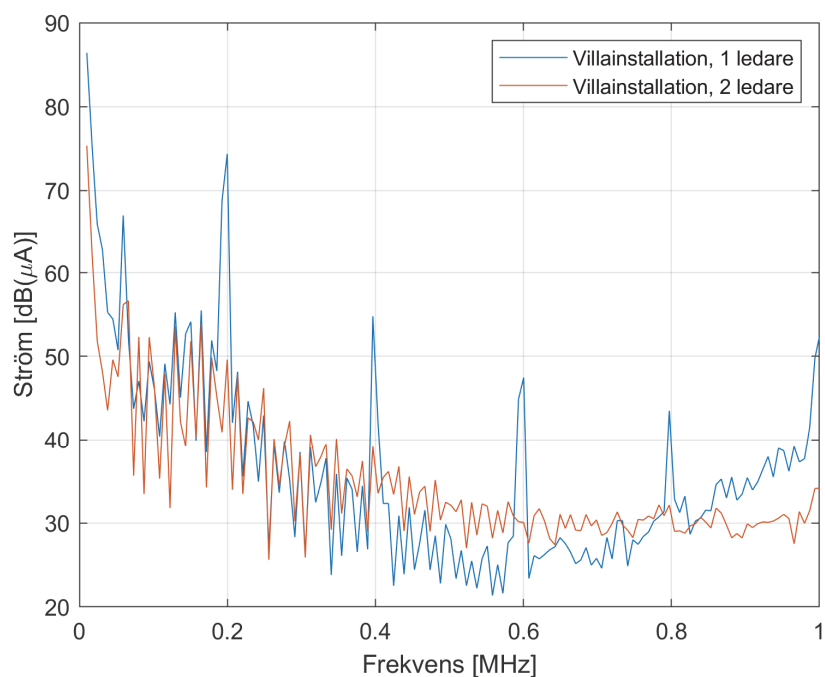
Figur 7. Ledningsbundna strömmar mätt med strömtången kring en ledare för två olika växelriktare.

3.2 Mätning på villainstallation

Figur 8 visar uppmätt strömstyrka i frekvensområdet upp till 5 MHz med strömtången placerad runt en respektive två ledare. Resultatet visar högre strömstyrka då strömtången är placerad kring en av ledarna för de flesta av frekvenserna. Speciellt skiljer sig resultaten för de högre frekvenserna 3-5 MHz. Vid 5 MHz är mätningen runt en ledare ungefär 30 dB högre. Mätningen runt en ledare har också två distinkta toppar under 2 MHz. Det finns även ett antal smalbandiga signaler med 20 dB högre nivå än på närliggande frekvenser. De smalbandiga signalerna syns för frekvensen 1 MHz och lägre. Dessa signaler syns tydligare i Figur 9 som visar signaler upp till 1 MHz. Från denna figur framgår det tydligt att avståndet mellan topparna är 200 kHz.

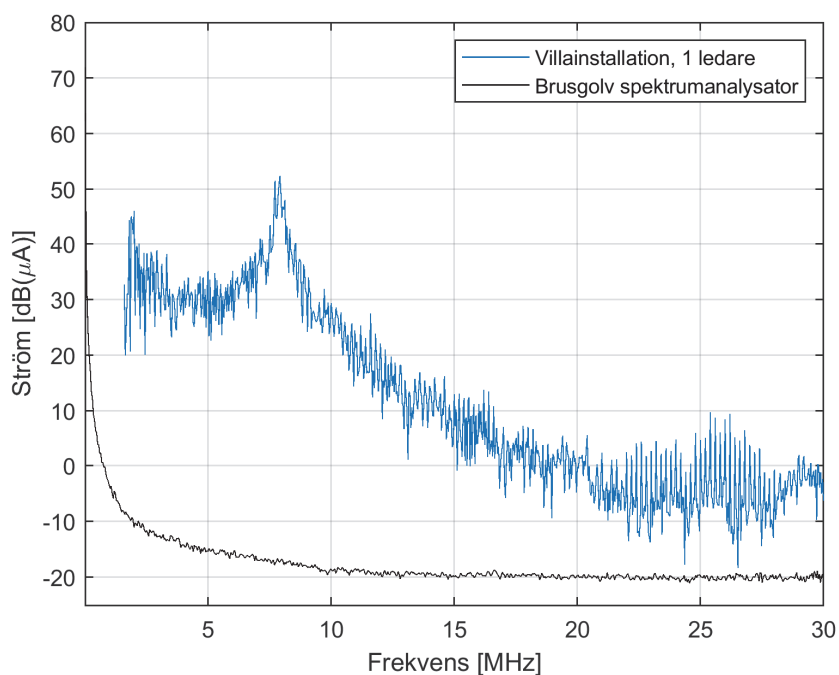


Figur 8. Ledningsbundna strömmar vid villainstallation, mätta med strömtången runt en respektive två ledare.



Figur 9. Samma mätning som illustreras i Figur 8 men enbart för frekvenser upp till 1 MHz. I denna figur framgår att avståndet mellan topparna är 200 kHz.

I Figur 10 visas uppmätt ström genom en ledare för frekvenser upp till 30 MHz. Från dessa resultat syns en kraftig störning kring 8 MHz. Mellan 8 och 20 MHz avtar den uppmätta strömmen. Över i stort sett hela bandet, men tydligast vid 20 till 30 MHz, syns ett band av smalbandiga, repeterade störningar. Avståndet mellan dessa störningar är 200 kHz, det är därmed troligt att det är samma störning som syntes på låga frekvenser. Nivån på dessa störningar är klart lägre än den vid 8 MHz.

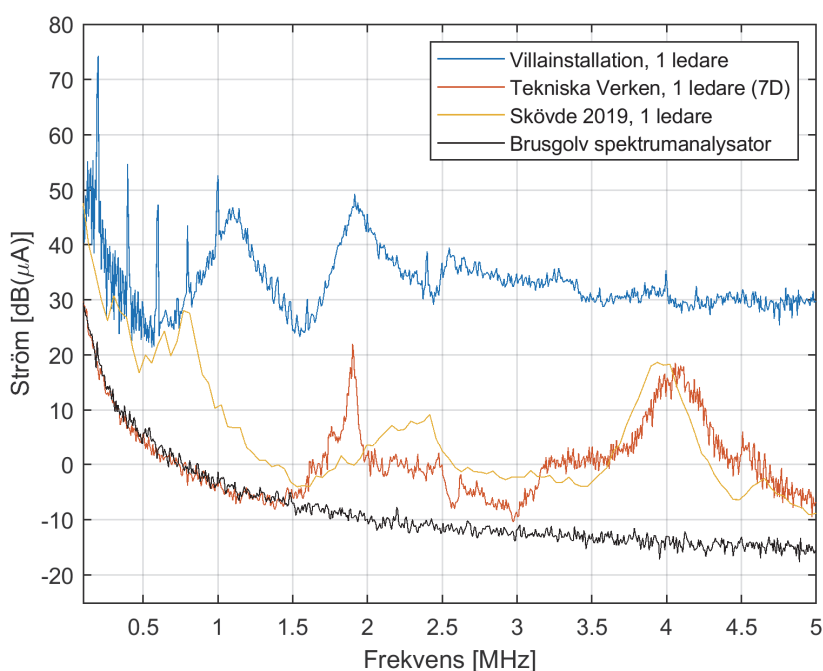


Figur 10. Ledningsbundna strömmar mätta med strömtången kring en ledare för frekvenser upp till 30 MHz.

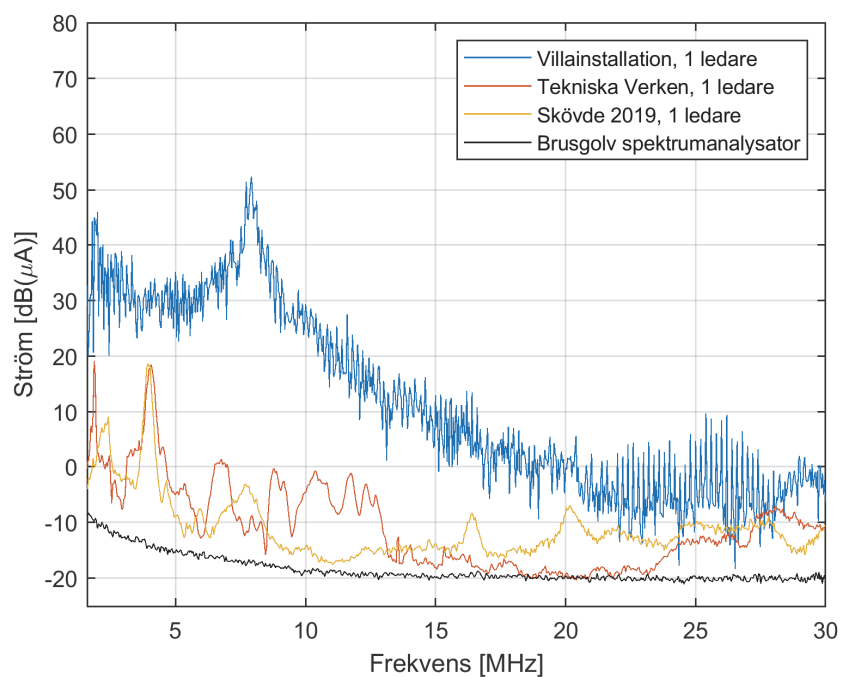
3.3 Jämförelse mellan mätningarna

För att jämföra strömnivåerna som uppmätts i de två anläggningarna visas resultaten i samma figur, tillsammans med resultat från en tidigare mätning. Den tidigare mätningen genomfördes på Fortifikationsverkets anläggning i Skövde, som är en relativt stor solcellsanläggning placerad på marknivå [2]. Det är intressant att jämföra flera anläggningar för att se likheter och skillnader. Till sin uppbyggnad är anläggningen i Skövde mer lik Tekniska verkens anläggning eftersom den inte har optimerare vid panelerna. De mätningar som jämförs i figurerna täckte ursprungligen olika frekvensområden, det vill säga även frekvenser som inte syns i figurerna. Detta leder till att det är olika antal frekvenspunkter som visas i figurerna och därmed kan vissa mätningar se slätare eller mer varierande ut. För övrigt ska dock mätningarna vara mätta med samma inställningar på spektrumanalysatorn.

Figur 11 visar resultatet från mätningar med strömtången kring en ledare. Anläggningen på Tekniska verken har då lägst nivåer på de flesta frekvenser, men några toppar i frekvensbandet 1-5 MHz. Anläggningen i Skövde har liknande nivåer i det frekvensområdet, något högre grundnivå men ungefär lika starka toppar. I frekvensområdet 100 kHz – 1 MHz har anläggningen i Skövde högre nivåer än den på Tekniska verken. Villaanläggningen skiljer sig markant från de övriga för frekvenser över 100 kHz, med genomgående högre nivåer. Störst skillnad är det i bandet 1-5 MHz. I Figur 12 visas strömnivåer för frekvenser från 1,6 MHz till 30 MHz också uppmätta med strömtången kring en ledare. Villainstallationen har högst nivå genom hela bandet, skillnaden minskar dock med ökande frekvens. Anläggningen vid Tekniska verken har fler störningar mellan cirka 8 och 13 MHz jämfört med anläggningen i Skövde. Mellan ungefär 15 och 25 MHz är förhållandet mellan dessa två det omvända.

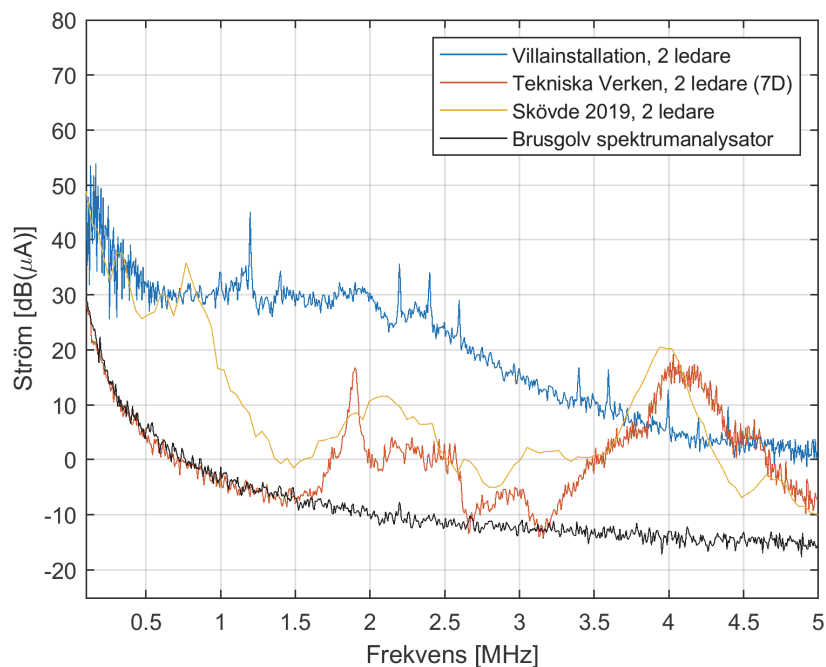


Figur 11. Uppmätt ström i en ledare för frekvenser mellan 100 kHz och 5 MHz.



Figur 12. Uppmätt ström i en ledare för frekvenser mellan 1,6 och 30 MHz.

Figur 13 visar en jämförelse av de tre anläggningarna från mätningar med strömtången placerad runt två ledare för frekvenser under 5 MHz. Villainstallationen har högst nivåer, förutom vid 4 MHz där de båda andra anläggningarna har toppar.



Figur 13. Uppmätt ström i två ledare (CM) för frekvenser mellan 0,1 och 5 MHz.

3.4 Jämförelse med krav i EMC-standard

I CISPR11 finns krav för ledningsbundna störningar på likströmsledningarna för komponenter som ingår i solcellsanläggningar. Den senaste versionen av standarden där detta tillägg finns med är ännu inte en harmoniserad standard inom EU. Nivåerna gäller för mätningar i ett testlab och inte för mätningar på en uppförd anläggning.

Nivåer för strömstyrka finns angivet i standarden (Tabell 3) för utrustningar tänkta att användas i industrimiljöer (ej i bostäder) för växelriktare över 20 kVA.

Krav finns för mätning med average (AV) och quasi peak (QP)-detektor för CM-strömmar (mätt runt båda ledarna). Resultatet mätt med olika detektorer förhåller sig olika till varandra beroende på vilken typ av signal som mäts. Mättagare är kalibrerade så att för en omodulerad sinussignal ger alla samma resultat,

$$PK = QP = RMS = RMS-AV = AV,$$

där PK innebär peak-detektor.

För en tidsvariant signal (till exempel pulsad) är förhållandet [5]

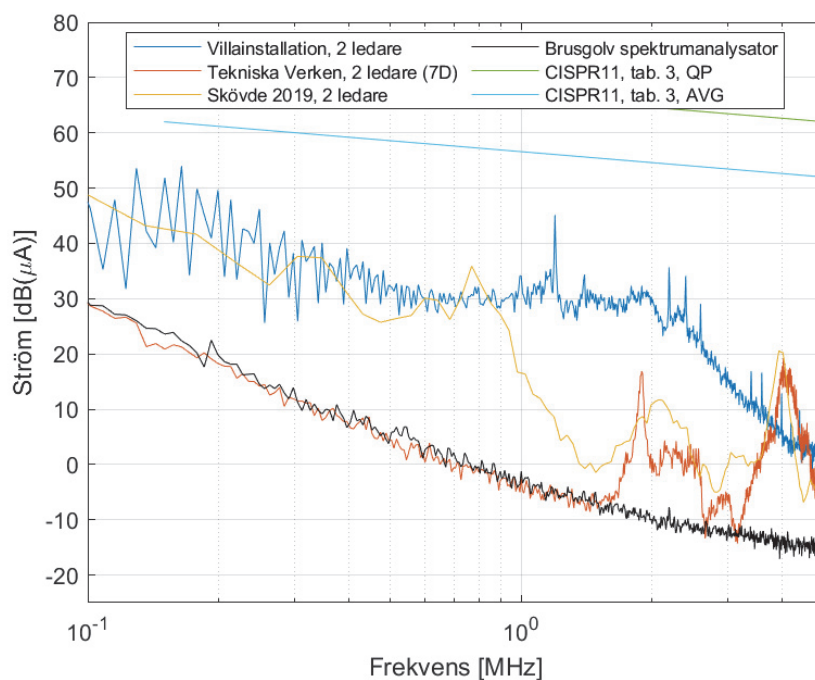
$$PK > QP > RMS > RMS-AV > AV.$$

Beroende på signal kan förhållandet mellan måtten preciseras, exempelvis för normalfördelat brus ger QP ett resultat som är 1,85 ggr högre än RMS för amplituden [6].

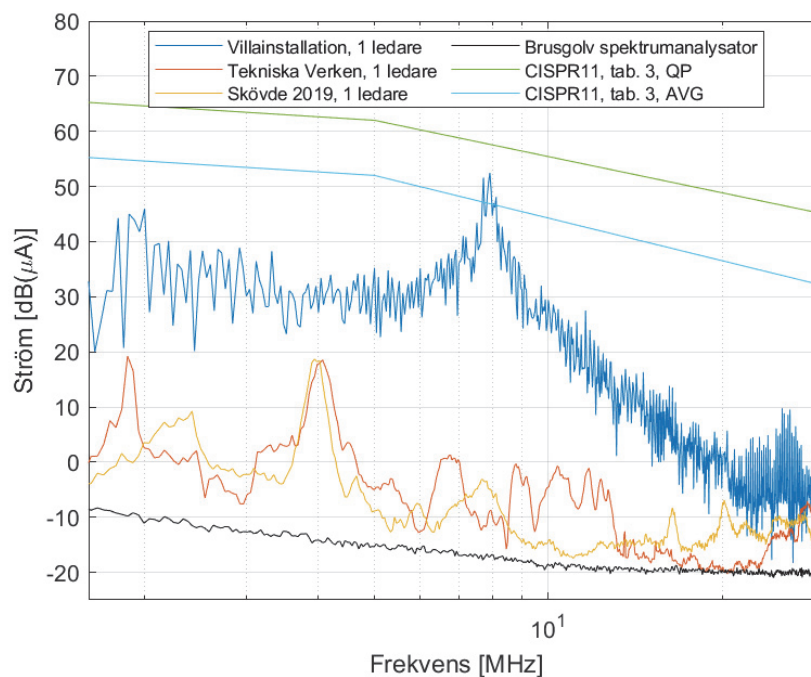
Mätbandbredden kan också påverka resultatet beroende på vilken signal som uppmätts. För bredbandiga brusiga signaler skalar resultatet proportionellt mot bandbredden. För en signal som har mindre bandbredd än mätbandbredden så påverkas inte mätresultatet om mätbandbredden ökas (under förutsättning att bruset är försumbart i jämförelse med signalen).

Vid mätningarna användes en bandbredd som är smalare än mätbandbredden angiven i standarden, 3 kHz jämfört med 9 kHz. Om en större bandbredd använts vid mätningarna hade mätvärdena troligen varit högre beroende på hur signalen såg ut, om det var bredbandigt brus eller smalbandiga signaler. Vi gör inget antagande om de uppmätta signalerna eftersom det är troligt att det finns såväl brus som smalbandiga signaler, därför jämför vi mätvärden okorrigerade. Det innebär att för bredbandiga signaler skulle nivåerna kunna vara tre gånger högre (knappt 5 dB). Mätningarna genomfördes också med RMS-detektor vilket, enligt ovan, borde ge ett resultat mellan resultatet för detektorerna QP och AVG som används i standarden.

I Figur 14 visas den uppmätta strömmen (CM) jämfört med CISPR-kraven som beskrivits ovan, i figuren används en logaritmisk frekvensskala. Alla de uppmätta nivåerna ligger under kraven i standarden, men det går inte att säga om utrustningarna skulle klara kraven i en standardiserad mätning i en EMC-kammare. I Figur 15 visas motsvarande jämförelse för uppmätt ström över en ledare (CM och DM). Kraven är specificerade för CM, men det är ändå intressant att jämföra den totala strömmen med kravnivåerna för CM.



Figur 14. Uppmätt ström kring två ledare (CM) samt CISPR-krav. Observera att mätningarna är gjorda med RMS-detektor och med mätbandbredden 3 kHz i stället för 9 kHz.



Figur 15. Uppmätt ström kring en ledare (CM+DM) samt CISPR-krav för CM. Observera att mätningarna är gjorda med RMS-detektor och med mätbandbredden 3 kHz i stället för 9 kHz.

4 Diskussion och slutsatser

De olika solcellsanläggningarna har lite olika uppbyggnad vilket gör det intressant att jämföra dem. Solcellsanläggningen på Tekniska verken består av många fler paneler och växelriktare totalt, men till varje växelriktare är i snitt 40 paneler kopplade och per slinga 8 paneler. Detta under förutsättning att alla växelriktares möjlighet att koppla in slingor används lika och fullt ut. Villainstallationen består av 22 paneler kopplade till en växelriktare. I villainstallationen finns också en optimerare per panel inkopplad. Vid tiden då installationerna uppfördes fanns troligen inte rekommendationen att förlägga ledarna parallellt, så i villainstallationen bildar ledarna en slinga på taket. I anläggningen på Tekniska verken är kabeldragningen under panelerna okänd.

Den största principiella skillnaden mellan anläggningarna är dock de optimerare som finns vid varje panel i villainstallationen. I villainstallationen används optimerare för att hantera viss skuggningsproblematik som finns på taket. I anläggningen på Tekniska verken finns istället en optimerare per slinga i växelriktaren. På Tekniska verken är förhållandena relativt lika för alla paneler som ingår i en slinga, vilket gör att det är tillräckligt att optimera effekten från dem som en helhet.

I anläggningen på Tekniska verken var mätningarna gjorda med strömtången kring en respektive två ledare relativt lika. För villainstallationen var skillnaden mellan mätningarna kring en och två ledare större. Resultaten från de två anläggningarna jämfördes också med varandra samt med tidigare resultat från en tredje anläggning. En tydlig skillnad var att villainstallationen hade generellt högre nivåer på de flesta frekvenser medan de två andra anläggningarna visade på toppar med högre nivåer.

5 Referenser

- [1] Elsäkerhetsverket, "Elektromagnetiska störningar", Dnr 20EV4540, november 2020.
- [2] Arwid Komulainen, Patrik Eliardsson, Arne Lindblad, "Mätningar av störningar från solcellspark", FOI-R--4871--SE, dec, 2019.
- [3] "Industrial, scientific and medical equipment – Radio-frequency disturbance characteristics – Limits and methods of measurement", CISPR 11 Edition 6.0, juni 2015.
- [4] Bogdan Adamczyk, "Measuring Differential- and Common-Mode Current Radiation from Cables", In Compliance Magazine, september 2020
(<https://incompliancemag.com/article/measuring-differential-and-common-mode-current-radiation-from-cables/>)
- [5] "Use of measurement detectors in radio measurement methods", ETSI TR 103 581 V1.1.1, november, 2019.
- [6] Peter Stenumgaard, "On Digital Radio Receiver Performance in Electromagnetic Disturbance Environments", PhD dissertation, KTH Signaler, sensorer och system, Stockholm, 2001.

Appendix A: Kalibreringskurva strömtång

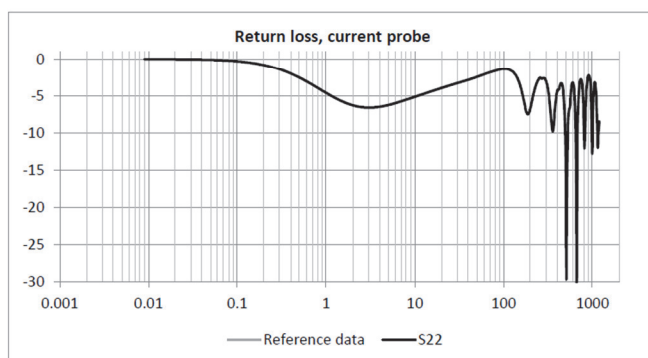
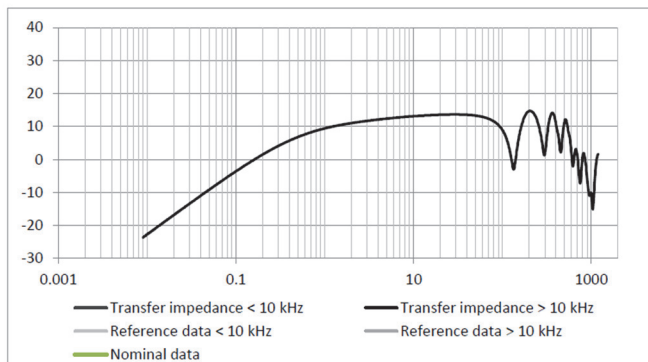


Current probe: Fairchild PCL-25
 Date of Calibration 2019-06-04
 Performed by Mikael Andersson, Saab AB, OFLBIA
 Comment FOI #72

Reference data file <10 kHz:

Reference data file >10 kHz:

Nominal Data file:



Equipment Used

Type	Manufacturer / model	S/N	Calibration date
General			
Calibration fixture	Saab calibration jigg	1094	N/A
Calibration fixture	Saab calibration jigg	1095	N/A
Calibration fixture	Saab calibration jigg	M638137	N/A
Calibration fixture	FCC BC1CF-1	1013	N/A
<10 kHz			
Multimeter	HP 344010A	3146A79020	
Multimeter	HP 344010A	3146A79126	
Signal generator	Agilent 33521B	MY52700499	
50 ohm termination	Suhner 6500.17.A	1092	N/A
50 ohm termination	Suhner 6500.17.A	1093	N/A
>10 kHz			
Network analyzer	Agilent Technologies E5071C	20831008 101	2019-03-27
Calibration kit	Agilent Technologies 85032B	3217M50283	2019-03-27
Calibration cable	SUCOTEST 18	1467316-1	2018-10-01
Calibration cable	SUCOTEST 18	1467316-2	2018-10-01
50 ohm termination	Suhner 6500.17.A	1093	N/A

FOI är en huvudsakligen uppdragsfinansierad myndighet under Försvarsdepartementet. Kärnverksamheten är forskning, metod- och teknikutveckling till nytta för försvar och säkerhet. Organisationen har cirka 1000 anställda varav ungefär 800 är forskare. Detta gör organisationen till Sveriges största forskningsinstitut. FOI ger kunderna tillgång till ledande expertis inom ett stort antal tillämpningsområden såsom säkerhetspolitiska studier och analyser inom försvar och säkerhet, bedömning av olika typer av hot, system för ledning och hantering av kriser, skydd mot och hantering av farliga ämnen, IT-säkerhet och nya sensorers möjligheter.



FOI
Totalförsvarets forskningsinstitut
164 90 Stockholm

Tel: 08-55 50 30 00
Fax: 08-55 50 31 00

www.foi.se