



Analys av solcellsoptimeraren med avseende på dess elektromagnetiska kompatibilitet

Analysis of the solar power optimizer regarding its electromagnetic compatibility

Johannes Andersson
SA4JSA

Fakulteten för hälsa, teknik och naturvetenskap

Högskoleingenjörsprogrammet i elektroteknik

C-nivå 22,5 hp

Intern handledare: Andreas Theocharis

Extern handledare: Henrik Olsson

Examinator: Magnus Mossberg

26 augusti 2020

SAMMANFATTNING

I denna rapport presenteras en analys av solcellsoptimeraren med avseende på dess elektromagnetiska kompatibilitet. Syftet är att undersöka solcellsoptimerarens påverkan ur ett elektromagnetiskt kompatibilitets och interferensperspektiv. Analysen grundar sig på en kontrollmätning av en solcellsinstallation, genomförd i samarbete med Elsäkerhetsverket. I resultatet från kontrollmätningen presenteras störningsfenomen som går att härleda till optimeraren. Slutligen diskuteras överskridna krav utifrån svenska och europeiska bestämmelser.

ABSTRACT

This report presents an analysis of the solar power optimizer regarding its electromagnetic compatibility. The purpose is to investigate the effect of the solar power optimizer from an electromagnetic compatibility and interference perspective. The analysis is based on measurements of a photovoltaic installation, carried out in collaboration with the Swedish National Electrical Safety Board. The result from the measurements presents interference that can be derived from the optimizer. Finally, exceeded requirements are discussed based on Swedish and European regulations.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1	Inledning	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Syfte.....	1
1.3	Mål.....	1
1.4	Avgränsningar	2
2	Teori	3
2.1	Solcellsoptimeraren	3
2.1.1	Energiomvandling.....	3
2.1.2	Ström och spänningsförhållanden.....	4
2.1.3	Maximum Power Point Tracker	6
2.1.4	Buck-Boost omvandlare.....	6
2.1.5	Frekvensspektrumet och dess komponenter	8
2.2	Elektromagnetisk kompatibilitet	10
2.2.1	Elektromagnetisk interferens	10
2.2.2	Det elektromagnetiska fenomenet.....	11
2.2.3	EMC och solcellsinstallationer.....	12
2.3	Lagar och regler	15
2.3.1	EMC och Europa.....	15
2.3.2	Standardisering.....	15
2.3.3	Tillsynsansvar	16
2.3.4	Lagen om elektromagnetisk kompatibilitet (SFS 1992:1512)	17
2.3.5	Förordningen om elektromagnetisk kompatibilitet (SFS 2016:363).....	17
2.3.6	Elsäkerhetsverkets föreskrifter om elektromagnetisk kompatibilitet (ELSÄK-FS 2016:3)	18
3	Utförande av kontrollmätning	19
3.1	Förutsättningar	19
3.2	Genomförande	20
4	Mätvärden och resultat	24
4.1	Beskrivning av rådande signalmiljö	24
4.2	Solcellsinstallationen	26
4.3	Utstrålad emission 3–30 MHz med växelriktare i drift.....	29
4.4	Utstrålad emission 3–30 MHz med växelriktare ur drift.....	31

4.5	Utstrålad emission 30–87 MHz med växelriktare i drift.....	33
4.6	Utstrålad emission 30–87 MHz med växelriktare ur drift.....	35
4.7	Utstrålad emission 108–200 MHz med växelriktare i drift	36
4.8	Utstrålad emission 108–200 MHz med växelriktare ur drift.....	37
4.9	Utstrålad emission 200–500 MHz med växelriktare i och ur drift.....	37
4.10	Ledningsbunden emission 14–50 MHz med växelriktare i drift	38
4.11	Ledningsbunden emission 20–60 MHz med växelriktare ur drift	40
4.12	Ledningsbunden emission 30–87 MHz, växelriktare i drift med och utan ferriter.	42
5	Analys	44
5.1	Analys kontrollmätning	44
5.2	Analys EMC.....	47
6	Slutsatser	48
	Referenser	49
	Appendix	52
	Bilaga A	53

NOMENKLATUR

CCM	Continuous current conduction mode
CEN	Comité Européen de Normalisation
CENELEC	Comité Européen de Normalisation Électrotechnique
CM	Common mode
DCM	Discontinuous current conduction mode
DM	Differential mode
EEG	Elektroencefalografi
EKG	Elektrokardiografi
EMC	Elektromagnetisk kompatibilitet
EMI	Elektromagnetisk interferens
ESD	Electrostatic discharge
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
EUT	Equipment under test
FFT	Fast Fourier transform
FMV	Försvarets materielverk
FOI	Försvarets forskningsinstitut
FRA	Försvarets radioanstalt
HF	High frequency 3–30 MHz
IEC	International Electrotechnical Commission
MPP	Maximum power point
MPPT	Maximum power point tracker
P&O	Pertube and Observe
PWM	Pulse width modulation
VHF	Very high frequency 30–300 MHz

1 INLEDNING

1.1 BAKGRUND

Elsäkerhetsverket har under 2019 börjat få in anmälningar gällande solcellsinstallationer och dess påverkan på det elektromagnetiska spektrumet. Anmälningarna kommer bland annat ifrån radioamatörer som vittnar om förhöjda radiostörningsnivåer, men även från flygplatser som upplever liknande bekymmer [1], [2]. Störningarna anses vara ett problem, inte minst i det sistnämnda fallet där flygsäkerheten står i fokus. Problematiken har också fått medialt fokus där Försvarsmakten hindrat villaägare att installera solceller, med yttrandet att sådan installation riskerar att påtagligt skada riksintresse för totalförsvarets militära del [3], [4], [5].

Elsäkerhetsverket har varit på plats vid solcellsanläggningar och genomfört mätningar inom ramen för de EMC -lagar och direktiv som finns. Man har kunnat konstatera förhöjda störningsnivåer som korrelerar med soliga dagar då energiproduktionen från solcellsanläggningarna är hög. Från mätningarna kan vissa slutsatser dras [1], [2]:

- Del av störningarna går att härleda till de DC/AC -inverterare som nyttjas i solcellsanläggningen.
- Del av störningarna går att härleda till de DC/DC -optimerare som används för att öka solcellsanläggningens verkningsgrad.

1.2 SYFTE

Syftet med detta arbete är att göra en analys av solcellsoptimerare som sitter seriekopplade på likspänningssidan i anläggningen. Arbetet skall ge svar på:

- Hur en solcellsinstallation kan beskrivas med en ekvivalent krets i syfte att lättare förstå optimerarens funktion.
- Hur switchtekniken som nyttjas i optimeraren kan påverka spektrumet i HF-bandet, såväl som i VHF-bandet.
- Huruvida solcellsoptimerarnas anslutande kablage i anläggningen är en bidragande faktor till den elektromagnetiska interferensen.
- Om en solcellsinstallation installerad enligt gällande föreskrifter och anvisningar, överskrider kraven för elektromagnetisk kompatibilitet enligt svenska och europeiska bestämmelser.

1.3 MÅL

När arbetet är genomfört har solcellsoptimerarens påverkan på det elektromagnetiska spektrumet blivit tydligare och det går att hänvisa till framtagna parametrar som bidrar till de förhöjda störningsnivåerna. Mätningar har givit svar på störningarnas frekvensområden, dess amplituder, och varför de uppkommer. Elsäkerhetsverket skall kunna använda arbetet som underlag i ändrandet av framtida EMC-standarder.

1.4 AVGRÄNSNINGAR

Rapporten förklarar teorin bakom solcellsoptimerare, EMI samt EMC. Därefter presenteras en kontrollmätning, genomförd tillsammans med Elsäkerhetsverket vid en solcellsanläggning.

Därefter sammanställs mätdata och resultat analyseras. Slutligen vävs teorin tillsammans med mätdata samman i en analys och slutsatser redovisas.

Även om fokus i rapporten kommer att ligga på produkter från tillverkaren SolarEdge finns det flera aktörer på marknaden vars konstruktioner är likartade.

2 TEORI

2.1 SOLCELLSOPTIMERAREN

2.1.1 Energiomvandling

Förmågan att kunna omvandla solenergi till elektrisk energi är en viktig teknik i omställningen till ett förnybart samhälle. Bedömningen är att solcellsinstallationer kommer att öka avsevärt de kommande åren. I Sverige anser Energimyndigheten att 5–10% av elektriciteten bör komma från solceller år 2040 [6].

Det är solens strålning som möjliggör omvandlingen från solenergi till elektrisk energi. Solstrålningen som träffar solcellerna delas in i tre kategorier:

- Direkt solstrålning – Direkt strålning från solen.
- Diffus solstrålning – Strålning genom moln.
- Reflektion – Strålning som reflekteras från närliggande yta

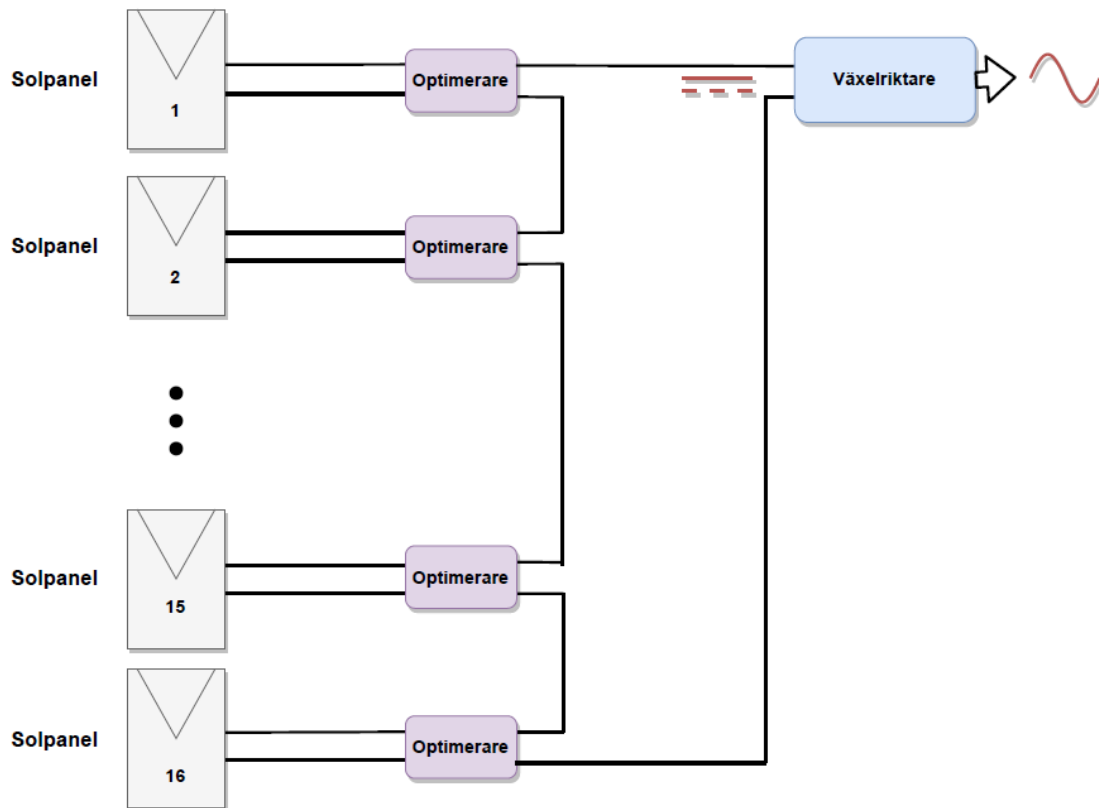
Av den sammanlagda strålning som träffar jordens yta är det bara vissa våglängder som besitter den energi som krävs för att i slutändan kunna skapa en elektrisk ström. Energi som solstrålningen besitter består av fotoner. Energin hos en foton kan beskrivas som

$$E = \frac{c * h}{\lambda} \quad (1)$$

Där c är ljusets hastighet, h Plancks konstant och λ våglängden [6].

För att kunna nyttja energin och omvandla den till elektricitet behövs ett halvledarmaterial, vanligtvis kisel. Halvledaren eller PN-övergången som den också kallas, kan liknas med en diod som enbart leder ström i en riktning. Det är jämviktsförändringar i spänningen över PN-övergången som skapar en elektrisk ström.

För att kunna få ut maximal effekt ur energiomvandlingen krävs det åtgärder för när solcellerna påverkas av externa faktorer så som exempelvis skuggning. När en solcellspanel i installationen utsätts för skuggning påverkar det hela installationen och det totala effektuttaget minskar. Det finns ett antal åtgärder som kan vidtas för att minska effektförlusterna. Användningen av så kallade decentraliserade solcellsoptimerare enligt Figur 1 är en av dem [6].



Figur 1: Solcellsinstallation med solceller, solcellsoptimerare och växelriktare.

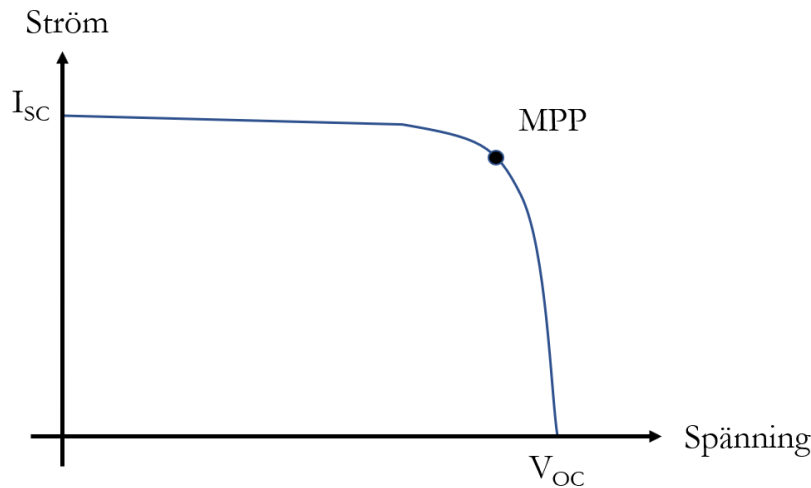
2.1.2 Ström och spänningsförhållanden

För att förstå solcellsoptimerarens funktion måste förhållandet mellan ström och spänning studeras.

Verkningsgraden η hos en solcell definieras som kvoten av den utgående elektriska effekten P_{el} över effekten av den inkommande solstrålningen ϕ [7].

$$\eta = \frac{P_{el}}{\phi} \quad (2)$$

Den elektriska uteffekten definieras fortsatt som $P_{el} = V \times I$, där V motsvaras av spänningen och I av strömmen. För att synliggöra sambandet mellan spänningen och ström i en solcell används vanligen en så kallad IV-Kurva som ses i Figur 2.



Figur 2: I-V Kurvan.

Den maximala ström som kan flyta i kretsen benämns kortslutningsström, I_{SC} och uppstår när spänningen är noll. Den maximala spänning som kan ligga över kretsen benämns tomgångsspänning, V_{OC} och uppstår när strömmen är noll. Emellan dessa två storheter, i kurvans knä befinner sig den punkt där korresponderande effekten är maximal. Detta tillstånd benämns **MPP** och är den punkt på kurvan där solcellen producerar mest elektrisk energi, således är denna punkt betydelsefull. Eftersom solcellen hela tiden påverkas av yttre faktorer kommer punkten variera över tid. Primärt är det solens strålning samt ändringar i temperatur som bidrar till att punkten antar nya värden längs med kurvan mellan I_{SC} och V_{OC} .

När ändringar i solinstrålning och klimat uppstår kommer uteffekten från solpanelen att variera. När mängden solstrålning G som träffar solcellen fluktuerar kommer variationer i kortslutningsströmmen I_{SC} att uppstå, medan tomgångsspänningen V_{OC} praktiskt taget är konstant. När temperaturen, T som påverkar solcellen fluktuerar kommer variationer i tomgångsspänningen V_{OC} att uppstå, medan kortslutningsströmmen I_{SC} praktiskt taget är konstant [8]. En molnig och varm dag kommer I_{SC} att minska linjärt med solstrålningen, samtidigt som den ökande temperaturen ger en minskad V_{OC} . En solig och kall dag kommer I_{SC} att öka linjärt med solstrålningen, samtidigt som den minskande temperaturen ger en ökad V_{OC} . Solpanelen ger därför som mest effekt under soliga och kalla förhållanden [6].

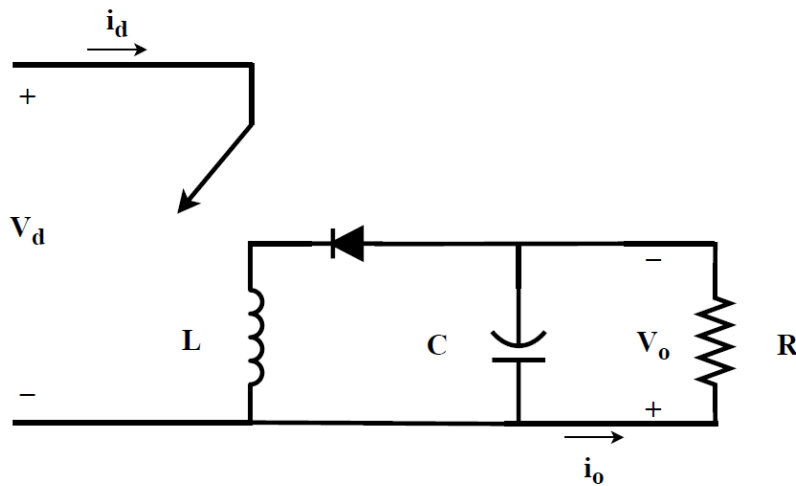
En solcellsinstallation för anslutning till elnätet består av ett antal seriekopplade solcellsmoduler som levererar DC-spänning till en växelriktare [9]. När en solcell i installationen utsätts för försämrade förhållanden kommer uteffekten P_{MPP} att minska och efterhand övergå från elproducent till last vilket är olämpligt. För att undvika denna problematik används optimeringsutrustning som har till uppgift att följa upp MPP och därefter genomföra motverkande åtgärder. Denna uppföljningsprocess kallas för "Maximum Power Point Tracker".

2.1.3 Maximum Power Point Tracker

MPPT är en mjukvaruprocess som har till uppgift att följa upp ändringar i MPP för att få ut maximal effekt. För att kunna genomföra uppföljningen förlitar sig processen på vald algoritm. Det finns ett flertal effektiva algoritmer, som till exempel "P&O method" [8]. När mjukvaruprocessen återfunnit MPP är det den underliggande hårdvarans uppgift att justera förhållandet mellan spänning och ström så att maximalt effektuttag återuppnås. Denna hårdvara benämns i detta fall optimerare och kommer i olika utföranden. I denna rapport fokuserar på den så kallade moduloptimeraren.

2.1.4 Buck-Boost omvandlare

En Buck-Boost omvandlare, illustrerad i Figur 3 är en typ av DC-DC -regulator som omvandlar utspänningen till att vara antingen högre eller lägre än inspänningen. Omvandlaren är en sammansättning av så kallade "Step-Down" och "Step-Up" -omvandlare [10]. Buck-Boost omvandlaren nyttjas vanligen i applikationer där det krävs att spänningen skall vara ställbar, vilket gäller för en moduloptimerare.



Figur 3: Buck-Boost omvandlare.

För att kunna kontrollera utspänningen används en brytare, ofta en MOSFET transistor. Genom att med PWM och en hög frekvens styra tidsintervallet mellan transistorens två lägen t_{on} och t_{off} omvandlas spänningen till avsedd nivå.

Sambandet mellan inspänningen V_d och utspänningen V_o för en Buck-Boost omvandlare kan beskrivas som [10]

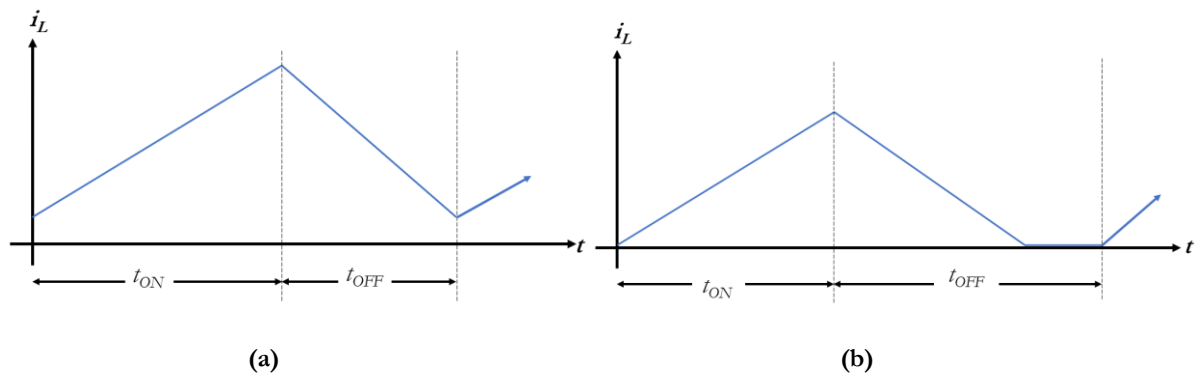
$$\frac{V_o}{V_d} = D \frac{1}{1 - D} \quad (3)$$

Sambandet mellan inströmmen I_d och utströmmen I_o för en Buck-Boost omvandlare kan beskrivas som

$$\frac{I_o}{I_d} = \frac{1-D}{D} \quad (4)$$

Där D benämns ”duty ratio” och anger en delmängd ur tidsperioden T_s enligt

$$D = \frac{t_{on}}{T_s} = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} \quad (5)$$



Figur 4: Strömmen genom omvandlarens spole. **(a)** Omvandlaren körs i CCM. **(b)** Omvandlaren körs i DCM.

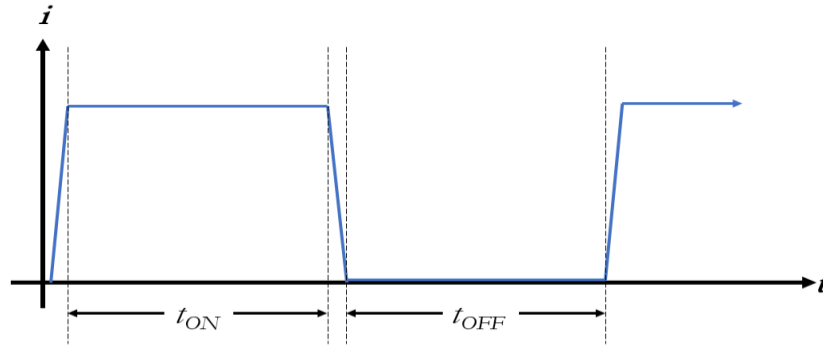
När transistorn är i tillslaget läge t_{on} enligt Figur 4 kommer energin från den inkommande spänningen att lagras i spolen samtidigt som backspänning ligger över dioden. När transistorn är i frånslaget läge t_{off} enligt samma figur transporteras energin från spolen till utgången V_o samtidigt som framspänning ligger över dioden. Polariteten till omvandlarens utspänning blir då omvänd med avseende på inspänningen. Ingen energi tillförs från ingången V_d under förfarandet t_{off} . Denna beskrivning utgår ifrån kondensatorn som ligger över utgången är mycket stor, vilket resulterar i en konstant utspänning där $v_o(t) \approx V_o$ [10].

Under drift körs omvandlaren i något två olika lägen; CCM eller DCM.

I CCM är transistorn i läge t_{on} under en längre tid i förhållande till t_{off} . Resultatet blir att $D > 50\%$ och $V_o > V_d$.

I DCM är transistorn i läge t_{on} under en kortare tid i förhållande till t_{off} . Resultatet blir att $D < 50\%$ och $V_o < V_d$.

Högfrekventa ändringar i transistorn mellan t_{on} och t_{off} som Buck-Boost omvandlaren kräver kan ha en negativ påverkan på närliggande apparatur. Ändringarna genererar störningar som fortplantar sig genom utstrålad och ledningsbunden emission [10]. Den ledningsburna störverkan delas upp i två kategorier; CM och DM. DM är det brus som mäts upp mellan två ledningar, medan CM mäts upp från ledning till jord.



Figur 5: Transistorn i tillslaget läge t_{on} och fränslaget läge t_{off} .

Det är på grund av den fyrkantiga vågformens stig och falltider, illustrerat i Figur 5 som gör att switchade omvandlare skapar problem. I syfte att undvika resistiva förluster i transistorn skall stig och falltiderna vara så korta som möjligt för att inte skapa onödig värmeutveckling i apparaten. Energin som bildas från korta stig och falltider skapar så kallade övertoner långt upp i frekvensspektrumet utgående från grundtonen. En överton uppstår vid snabba strömförändringar i induktiva belastningar. Karakteristiken hos en överton är beroende av det matande nätets impedans och dess strömapplitud och förekommer som heltalsmultiplar av grundfrekvensen. I ett svagt nät kommer övertonshalten att öka med antalet anslutna olinjära laster [11]. En Buck-Boost omvandlare är ett exempel på en olinjär last.

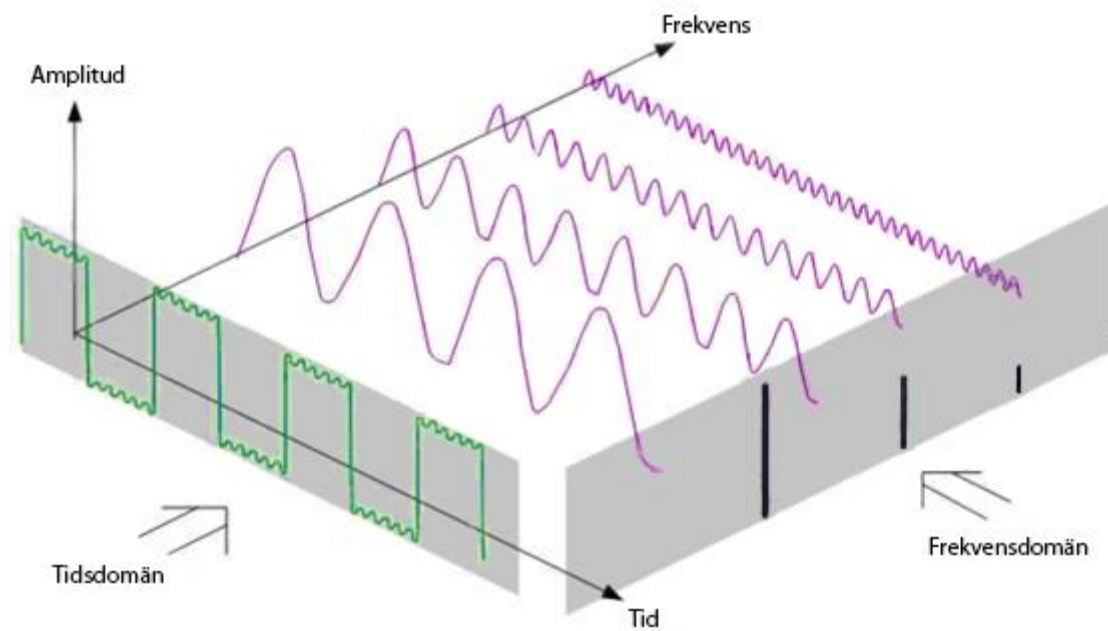
2.1.5 Frekvensspektrumet och dess komponenter

För att kunna genomföra komplexa analyser av frekvensspektrumet nyttjas vanligen ”Fourieranalys”. Metoden möjliggör att komplexa repetitiva vågformer kan beskrivas med en oändlig seriemängd av sinus och cosinustermer samt en likströmskomponent. Fourieranalysen är ett verktyg när det kommer till förståelsen kring övertoner [12].

Fourierserien för en fyrkantsvåg definieras som summan av frekvenskomponenter i form av sinustermer som ökar i frekvens, multiplicerat med en konstant.

$$v = \frac{4V}{\pi} \left(\sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \dots \right) \quad (6)$$

Den första termen i serien; $\sin \omega t$ kallas för frekvensens grundton. Andra termen; $\sin 3\omega t$ benämns andra övertonen. Tredje termen; $\sin 5\omega t$ benämns fjärde övertonen, och så vidare. Bråket framför andra och fjärde övertonen motsvarar amplituden, vilken är avtagande med ökande frekvens. En signal enbart bestående av grundtonen är helt sinusformad. En fyrkantsvåg är en summering av ett oändligt antal frekvenskomponenter enligt illustrationen i Figur 6. Desto fler frekvenskomponenter, desto fyrkantigare form kommer signalen att ha [12].



Figur 6: Summering av frekvenskomponenter i tidsdomänen och i frekvensdomänen.

För att kunna få överblick över en fyrkantsvågs påverkan i frekvensspektrumet används en teknik som kallas FFT. Tekniken grundar sig i en matematisk algoritm som tar signalen från tidsdomänen till frekvensdomänen. FFT konverterar en tidsvarierande signal i tidsdomänen, till dess frekvenskomponenter i frekvensdomänen [12].

2.2 ELEKTROMAGNETISK KOMPATIBILITET

2.2.1 Elektromagnetisk interferens

Elektromagnetisk interferens är en allvarlig och ökande form av eterförorening [13]. Olika former av EMI, skapade av bland annat switchade utrustningar ger störningar hos elektriska apparater och hindrar dem att fungera som avsett. I och med den ökande användningen av elektroniska system i samhället, ses också en ökning av denna typ av problematik. EMI beskrivs som en störning i form av ett elektromagnetiskt fenomen som orsakar försämring av apparats, utrustning eller systems egenskaper [11].

Elektromagnetisk kompatibilitet är frånvaron av de negativa effekter som orsakas av EMI. Enligt 1 § i Lagen om elektromagnetisk kompatibilitet (SFS 1992:1512) beskrivs EMC som:

- *Krav på egenskaper hos eller användning av utrustning för att den ska kunna fungera tillfredsställande i sin elektromagnetiska omgivning utan att orsaka oacceptabla elektromagnetiska störningar för annan utrustning* [14].

Om dessa egenskaper uppfylls ses den utrustning som befinner sig i en given volym som elektromagnetiskt kompatibel och kan därför existera i harmoni med andra apparater.

Det finns ett flertal exempel på när kunskap kring EMC blir särskilt viktigt. Inom den civila flygtrafiken har det genom åren rapporterats om passagerarnas elektriska apparater och dess påverkan på flygplanets elektroniska instrument. En följd av detta är att passagerare ombeds att stänga av sådan utrustning under start och landning. Medicinsk utrustning ligger också i riskzonen för att påverkas av EMI och är ytterligare en situation där konsekvenserna kan bli förödande. EKG-utrustning, EEG-utrustning och Pacemaker är några exempel på sådana apparater [13].

Radio och telekommunikationsutrustning löper också stor risk att påverkas av EMI där det istället är informationsöverföringen som utsätts för påverkan av både bredbandig och smalbandig störning. En bredbandig störning sträcker sig över hela det spektrum mottagaren är avsedd för, medan en smalbandig störning upptar del av mottagarens bandbredd. För att undvika oönskade signaler används passfilter för att öka mottagarens selektivitet.

Även eldistribution är utsatt för negativ påverkan av EMI. Störningarna har sitt ursprung antingen inom distributionen eller från laster i nätet och leder till olika typer av spänningsvariationer. Ett exempel är den vågformsdistorsion som uppstår när en ren sinusvåg utsätts för reaktanser från det matande nätet tillsammans med olinjära laster, så som nätaggregat och spänningsreglerare. När en sådan last dessutom är switchad genereras genom deformation av spänningen, övertoner som riskerar att störa elektronisk utrustning samt telekommunikation i sin omgivning [13].

Det skall också tilläggas att EMC berör alla frekvenser i det elektromagnetiska spektrumet samt transienta förlopp och likström. Det är alltså inte enbart de höga frekvenserna som omfattas [13].

2.2.2 Det elektromagnetiska fenomenet

Elektromagnetiska fenomen inom ramen för EMI förväntas interferera med närbelägna system när:

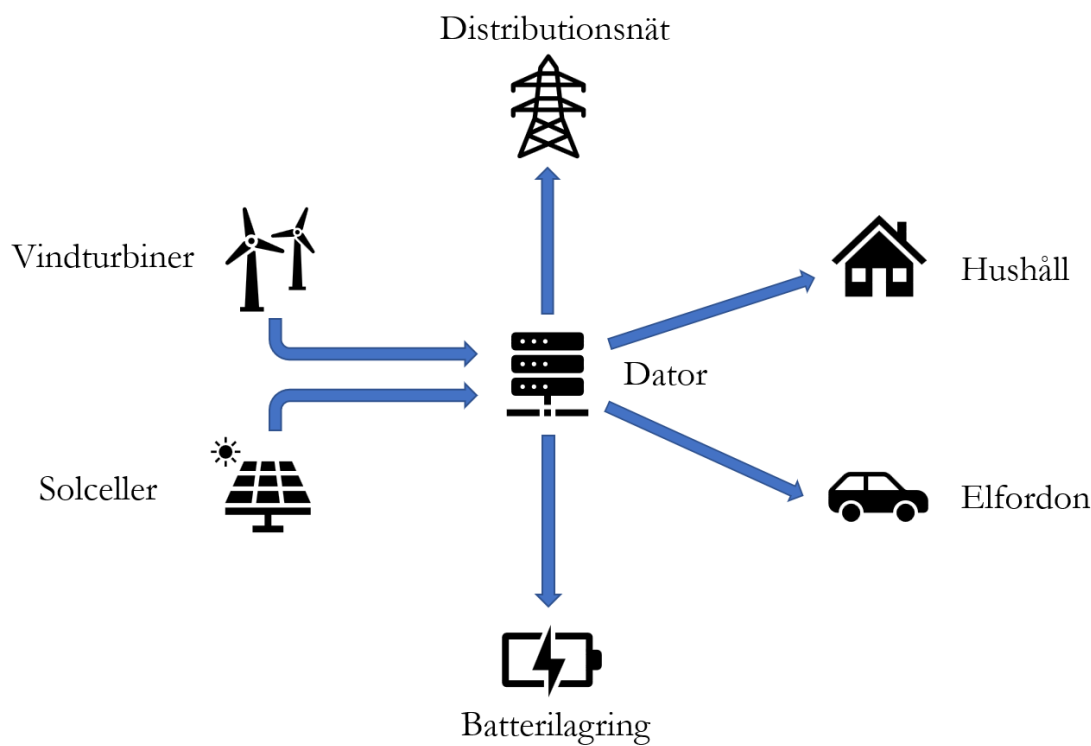
- Spänningsavbrott, överspänningar eller motsvarande fluktuationer uppstår.
- Transienta förlopp på signal eller ledning uppstår.
- Elektromagnetiska fält uppstår, (både pulserande och kontinuerliga) kopplade direkt mot utrustning eller i anslutande kabel.
- ESD sker från ett uppladdat objekt eller person.
- Lågfrekventa magnetiska eller elektriska fält förekommer.

Det är svårt att förutspå magnituden av de störande signaler som uppkommer på grund av dessa fenomen då omkringliggande miljö är en bidragande faktor [13].

Det är känt att signalstyrkan hos en emitterad signal avtar med avståndet från källan. För ett emitterat elektriskt fält gäller därför att avtagandet är omvänt proportionellt mot avståndet. Dessutom kommer fältet att reduceras ytterligare när det utsätts för externa faktorer så som avskärmning, kuperad terräng, bebyggelse eller vegetation. Elektrisk fältstyrka mäts oftast i V/m och är ett mått på fältets effekttäthet. Gränser för oavsiktliga emissioner baseras på den acceptabla fältstyrka som får förekomma vid en mottagare, avsedd för att kunna mottaga en given tjänst vid ett nominellt avstånd från sändaren. Även om denna gräns är starkt generaliserande täcker den in majoriteten av problematiken och ligger därför till grund för publicerade standarder [13].

2.2.3 EMC och solcellsinstallationer

Dagens tekniska infrastruktur är under ständig utveckling. Teknologiska framsteg leder till möjligheter där energiomvandling kan ske i hemmet och skall där kunna samsas med redan befintliga apparater.



Figur 7: Översiktsexempel Microgrid.

Begreppet ”Microgrid” illustreras i Figur 7 och ses som en av möjligheterna att kunna penetrera marknaden för förnybara energikällor. Microgrid innebär möjligheten till lokal energiförsörjning bestående av lokal generering och energilagring, antingen anslutet till distributionsnätet eller helt självförsörjande [15]. Ett Microgrid vars huvudsakliga energiomvandling genereras från solceller innebär samtidigt en implementering av apparater så som växelriktare, konverterare och kommunikationssystem som alla bär ett EMC -ansvar. En tumregel är att emissioner från sådana apparater multipliceras med antalet befintliga i installationen, vilket kan bidra till att EMI i bostadsområden ökar [16].

Utöver ovanstående problematik finns det flertalet studier som visar på att en solcellspanel är en god antenn för både sändning och mottagning av EMI [15], [16]. Mottagen EMI blir därefter ledningsburen och adderas till störningar från olinjära laster i nätet. Resultatet är en spridning av övertoner och annat brus i elnätet. I en av studierna, gjord vid ”Griffith University” i Australien utvärderas solpanelernas påverkan på Microgrid. Laborationen består av en signalgenerator som anslutits till en antenn. Antennen placeras framför solpanelen, vars störningar uppmättes med en spektrumanalysator. Analysen visar att solpanelerna absorberar elektromagnetisk energi över ett brett spektrum, som i sin tur blir ledningsburet [15].

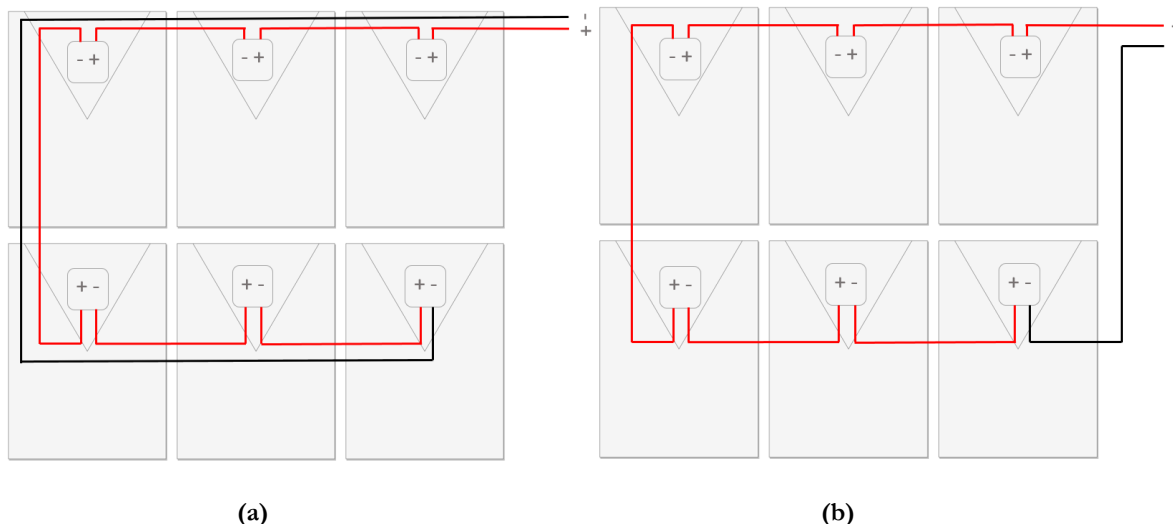


Figur 8: Kopplingsdosa.

I syfte att minska påverkan från oavsiktlig emission och för att skydda radiomottagare används EMI-filtrer. I en solcellsinstallation är de flesta växelriktare utrustade med ett filter på växelströmssidan så att lågfrekventa övertoner som genereras dämpas. Däremot är implantering av filter och dämpning av övertoner på likströmssidan inte lika utbredd för alla frekvenser. Frånvaron av filtrering av EMI på likströmssidan gäller inte bara växelriktare utan även annan installerad utrustning så som optimerare eller mikroinverterare. De ledningsburna störningarna på likströmssidan emitteras omkring resonansfrekvensen vid halv och kvarts våglängd av längden kabel som ansluter solcellspanelerna till kopplingsdosen enligt Figur 8. För att dämpa dessa störningar behövs ett filter mellan solcellspanelen och konverteringsutrustningen [17].

Större solcellsinstallationer av typen solcellsparker bidrar till ökad EMC-problematik, inte minst på grund av den mängd likströmskablage som nyttjas. Generellt genereras mest störningar ifrån installationer innehållande optimeringsapparater, därefter installationer med mindre växelriktare och halvledarlösningar. Minst stör installationer med få stora växelriktare innehållandes transformatorlösningar. Ur ett EMC-perspektiv är det många parametrar som skall tas i beaktande när en analys kring parkerna genomförs. Även här grundar sig problematiken i mottagna störningar och ledningsburna dito från switchade apparater i installationen, och är framförallt påtagligt i området 150 kHz-30MHz. Den elektromagnetiska interferensen på likströmssidan upprätthålls av den kapacitans som uppstår mellan solcellspanelerna och jord på grund av panelernas stora area, samt induktansen som uppstår i anslutande likströmskablage. Förutom panelernas area är kapacitansen beroende av höjden över jord, avstånd mellan paneler och luftfuktigheten som i sin tur påverkas av luftens permittivitet. Genom att jorda både solcellspanelerna och dess negativa likströmsledare kan kapacitansen till jord reduceras. En ordentlig genomförd jordning av panelens ram och byggnadsställning till gemensam jordningspunkt är därför att föredra i syfte att få kontroll över den sammanlagda impedansen [17].

När en nyinstallation av solceller ska genomföras är det i första hand ”Elinstallationsreglerna, SS 436 40 00” som skall tas i beaktande. Utöver dessa regler har ”Svensk Elstandard” givit ut en handbok som syftar till att komplettera elinstallationsreglerna med vägledning och förtydliganden för att arbetet skall gå rätt till [9]. Ett av handbokens kapitel förklarar begreppet EMC och beskriver kraven. Innan en installation påbörjas ska ett analysarbete genomföras där hänsyn tas till omgivningen ur ett EMC-perspektiv. Arbetet ska dokumenteras vilket är ett krav enligt EMC-direktivet och Elsäkerhetsverkets föreskrifter.



Figur 9: Kabelförläggning av likströmskablage. **(a)** Parallell förläggning. **(b)** Öppen slinga.

Metoder som avskärmning av kabel, filtrering och zonindelning av installationen är tekniska metoder som kan användas för att minska påverkan från EMI i de anslutande kablagen. Störst påverkan har valet av apparater i installationen samt förläggningen av likströmskablagen. Det är av största vikt att de två ledarna förläggs parallellt med varandra, som i Figur 9 (a) och inte i öppen slinga som i (b). En öppen slinga försämrar EMC-egenskaperna i och med att slingan riskerar fungera som en antenn för hela installationen. Vidare beskrivs tidigare diskuterad jordning av installationen, också kallad funktionsutjämning. En funktionsutjämning kan genomföras om det finns en galvanisk isolering mellan växelströms och likströmssidan. Denna isolering utgörs vanligtvis av en fulltransformator inbyggd i, eller placerad i anslutning till växelriktaren [9].

2.3 LAGAR OCH REGLER

2.3.1 EMC och Europa

Inom EU och mellan dess medlemsländer tillämpas den inre marknaden [18]. Syftet med denna marknad är att, genom direktiv reglera så att varor och tjänster fritt kan tillhandahållas utan nationella begränsningar som till exempel typgodkännande. En av den Europeiska kommissionens uppgifter är att kontrollera att framtagna direktiv efterföljs. Ett direktiv skall gynna den europeiska marknaden och dess krav skall uppfyllas innan en produkt kan marknadsföras i en medlemsnation.

Gällande EMC-direktiv publicerades 2014 och är den tredje utgåvan [19]. Direktivet gäller för apparater som kan orsaka elektromagnetisk störning eller som i sig själva kan påverkas av sådan störning. I huvudsak gäller direktivet alla apparater som drivs av elektricitet, oberoende matningskälla. Direktivet redogör också för alla elektromagnetiska fenomen som kan uppstå utan att exkludera något. Syftet med direktivet är att skydda, inte bara radio och telekommunikationsutrustning utan all utrustning som är mottagliga för EMI i en godtycklig miljö.

2.3.2 Standardisering

Inom ramen för det som benämns ”den nya metoden” tillhandahålls tekniska detaljer gällande bland annat EMC av standardiseringsorgan inom EU så som CEN, CENELEC och ETSI [20]. En standard ses som ett verktyg och ska kunna ge hjälp att följa lagstiftningen på nationell nivå. Ett vanligt begrepp i sammanhanget är harmoniserad standard, vilket är en standard som belyser de väsentliga krav som återfinns i ett direktiv. Ett väsentligt krav är utformat på ett sådant sätt att det skall skydda en användares hälsa och säkerhet genom att säkerställa en hög skyddsnivå. Det väsentliga kravet anger inga tekniska detaljer gällande hur en fara skall undvikas, utan definierar enbart det resultat som skall uppnås [21].

IEC är en kommission som har ett nära samarbete med standardiseringsorganen, vars uppdrag är att främja fastställandet av standarder på nationell och internationell nivå. En svensk fastställd standard är oftast helt baserad på en IEC-standard [22]. Detta känns igen genom att sifferkombinationerna är densamma för nationell som internationell standard. Ett exempel på en av serierna som berör EMC betecknas internationellt som ”IEC-61 000 Electromagnetic compatibility” och har den svenska beteckningen ”SS-EN 61000 Elektromagnetisk kompatibilitet”. Serien är indelad i ett antal underrubriker som berör detaljerna inom ämnet.

Den standard som i sammanhanget är särskilt angelägen att granska benämns; ”SS-EN 61000-6-3 Elektromagnetisk kompatibilitet (EMC) Del 6–3: Generella fordringar – Emission från utrustning i bostäder, kontor, butiker och liknande miljöer” [23].

I standardens första tabell gällande emission återfinns de krav som måste tillfredsställas för att en produkt ska uppfylla standarden. Testerna genomförs i en laborationsmiljö med utgångspunkt för de riktlinjer och gränser som återfinns i den harmoniserade standarden. Att ”SS-EN 61000-6-3” är särskilt intressant beror på att en solcellsinstallation ofta är installerad i den miljö som standarden berör. Standarden är en av flertalet standarder som tillverkande företag ofta hänvisar till i sina emissionsanalyser av solcellsoptimerare [24]. Två av raderna i standardens emissionstabell är inom ramen för rapporten särskilt intressant att granska.

Den första raden i standardens emissionstabell, ”Enclosure port” beskriver kraven för emission i givet frekvensområdet 30–1000 MHz för EUT fysiska hölje varifrån apparatens elektromagnetiska fält kan påverka annan utrustning. Kravet är direkt tillämplbart för en solcellsoptimerare och ger inget utrymme för någon tolkning [23].

Den tredje raden i standardens emissionstabell, ”DC power port” beskriver kraven i frekvensområdet 0.15–30 MHz för den likströmskontakt som försörjer EUT och får apparaten att fungera. Vidare definieras tillämpningen av det matande likströmsnätverket där fokus ligger på beskrivning av batterier, nödbelysning och avbrottsfri kraft. Kravet skulle kunna vara direkt tillämplbart för en solcellsoptimerare då den strömsätts via solcellspaneler på likspänningssidan i en solcellsinstallation, vilket får den att fungera [23].

2.3.3 Tillsynsansvar

Elsäkerhetsverket är den myndighet i Sverige som tilldelats tillsynsansvaret för EMC.

Elsäkerhetsverket beskriver på sin hemsida EMC som förmågan till samexistens mellan elektrisk utrustning, både bland apparater och fasta installationer [25]. Strävan är att de olika utrustningarna inte skall påverka varandra negativt, det vill säga inte störa varandra. För att uppnå detta så är EMC reglerat i svensk lag, förordning och föreskrift.

- EMC behandlas enligt ”Lagen om elektromagnetisk kompatibilitet (SFS 1992:1512)” [14].
- EMC behandlas vidare enligt ”Förordningen om elektromagnetisk kompatibilitet (SFS 2016:363)” [26].
- EMC behandlas vidare enligt ”Elsäkerhetsverkets föreskrifter om elektromagnetisk kompatibilitet (ELSÄK-FS 2016:3)” [27].

Utöver lag, förordning och föreskrift förhåller sig Elsäkerhetsverket till de direktiv som den Europeiska unionen utfärdar. Direktiven är bestämmelser som riktar sig mot medlemsstaterna och är bindande [28]. Europaparlamentets och rådets direktiv ”2014/30/EU” behandlar harmonisering av medlemsstaternas lagstiftning om elektromagnetisk kompatibilitet.

Direktivet redogör för två väsentliga krav [19].

- 1) **Allmänna krav.** Utrustning ska med beaktande av aktuell tillämpbar teknik vara så konstruerad och tillverkad att
 - a) den elektromagnetiska störning den alstrar inte överskrider den nivå över vilken radio- och teleutrustning inte kan fungera som avsett.
 - b) den har en sådan tålighet mot den elektromagnetiska störning som kan förväntas vid avsedd användning att dess avsedda funktion inte i oacceptabel utsträckning försämras.
- 2) **Särskilda krav för fasta installationer.** Installation och avsedd användning av komponenter:

En fast installation ska installeras enligt god branschpraxis och i enlighet med informationen om hur dess komponenter är avsedda att användas för att uppfylla de väsentliga kraven enligt punkt 1.

2.3.4 Lagen om elektromagnetisk kompatibilitet (SFS 1992:1512)

Lagtexten beskriver skyldigheter i frågan om elektromagnetisk kompatibilitet. Det är regeringen eller den myndighet som regeringen bestämmer som meddelar föreskrifter inom området [14].

Den som uppsåtligen bryter mot föreskrifter som upprätts med stöd av lagen kan få betala vite eller sanktionsavgift, alternativt böter eller fängelse i högst ett år.

2.3.5 Förordningen om elektromagnetisk kompatibilitet (SFS 2016:363)

Förordningen beskriver synen på hur en apparat är konstruerad och likställer den med

- En komponent eller en inbyggnadsdel som kan alstra elektromagnetiska störningar eller vars funktion kan påverkas av störningar.
- En installation som kan användas på olika platser och består av en kombination av anordningar.

Förordningen beskriver att elektromagnetisk störning eller elektromagnetiskt fenomen anses vara brus, oönskad signal, förändring i övergångsmediet eller motsvarande som försämrar funktionen hos en utrustning [26].

En utrustning skall vara konstruerad så att den

- Inte alstrar en elektromagnetisk störning som överskrider en nivå som tillåter radio eller teleutrustning, eller annan utrustning att fungera som avsett.
- Har en sådan tålighet att den elektromagnetiska störning som kan förväntas vid avsedd användning inte medför att utrustningens funktion försämras i oacceptabel utsträckning.

Utöver ovanstående ska en fast installerad utrustning vara installerad enligt god branschpraxis och i enlighet med information om hur de ingående komponenterna är avsedda att användas. Utrustningen får bara användas så att den fungerar tillfredställande i sin elektromagnetiska omgivning och inte orsakar störningar för annan utrustning.

Det är Elsäkerhetsverket som utövar tillsynen över att förordningar och föreskrifter följs. När det gäller utrustnings användande hos bland annat Försvarsmakten, FRA eller FOI utövas tillsynen av FMV.

2.3.6 Elsäkerhetsverkets föreskrifter om elektromagnetisk kompatibilitet (ELSÄK-FS 2016:3)

Föreskriften likställer definitionen av elektromagnetisk kompatibilitet i enlighet med lagen (SFS 1992:1512) och förordningen (SFS 2016:363) [27].

Innan en apparat släpps ut på marknaden ska den CE-märkas [29]. Märkningen skall anbringas på apparaten så att den är lätt synlig och läsbar. Märkningen ska ske i enlighet med de krav för ackreditering och marknadskontroll som är fastställt av EU i samband med saluföring av produkten.

En tillverkare som släpper ut apparater på marknaden är ansvarig för att konstruktion och tillverkning har skett i enlighet med förordningen om EMC. I tillverkarens skyldigheter ingår bland annat att utarbeta teknisk dokumentation i form av en EU-försäkran (eng. Declaration of conformity) där det framgår vilka harmoniserade standarder apparaten uppfyller. Dessutom skall dokumentation gällande apparaten behållas i 10 år efter att den lanserats på marknaden.

En importör som avser släppa ut en apparat på marknaden måste tillse att tillverkaren har utfört det som åligger tillverkaren, gällande dokumentation och CE-märkning enligt ovan. Om importören har skäl att tro att kraven inte efterföljts får importören inte släppa ut produkten på marknaden. Om apparaten dessutom utgör en risk skall Elsäkerhetsverket kontaktas och uppgifter om brister skall dokumenteras och lämnas in.

En distributör som tillhandahåller apparater på marknaden ska iaktta vederbörlig omsorg för att se till att kraven i föreskrifter uppfylls. Innan apparater tillhandahålls på marknaden ska distributören kontrollera så att den åtföljs av dokument, bruksanvisning och CE-märkning. Om en apparat inte överensstämmer med dessa krav får den inte tillhandahållas på marknaden. Om apparaten utgör en risk skall detta rapporteras.

3 UTFÖRANDE AV KONTROLLMÄTNING

3.1 FÖRUTSÄTTNINGAR

Den 31 mars 2020 genomfördes tillsammans med Elsäkerhetsverkets representant från avdelningen för tillsyn och marknadskontroll, en kontrollmätning vid Glava Energy Center. Glava Energy Center är beläget söder om Arvika i Värmlands län och är ett testcenter för framtidens förnybara energilösningar och en mötesplats för både utbildning och innovation [30]. Under mätningen nyttjades deras solcellspark.



Figur 10: Glava Energy Center solcellspark.

Vädret var under dagen klart med enstaka slöjmoln enligt Figur 10 med en temperatur kring +5°C.

3.2 GENOMFÖRANDE



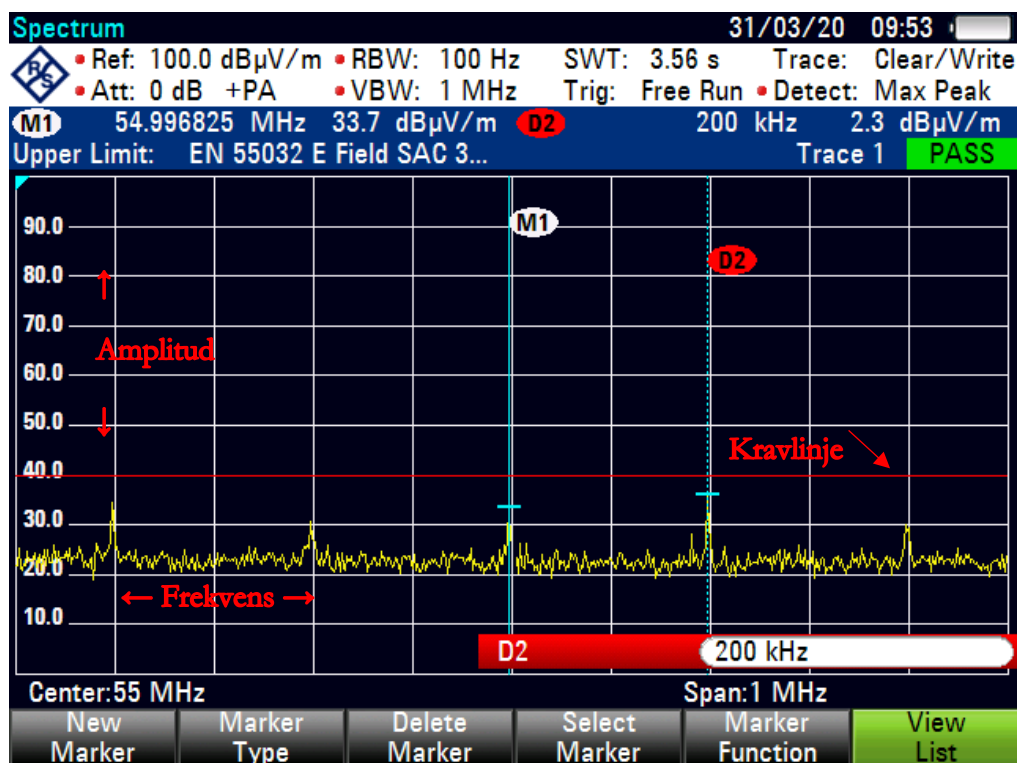
Figur 11: Bikonantenn på stativ framför solpaneler.

Mätningen inleds med att upprätta mätriggen, med material redovisat i bilaga A framför det första mätobjektet enligt Figur 11 som består av en fullständig solcellsinstallation från produkttillverkaren SolarEdge. Avståndet mellan solpanelerna och antennstativet är 3 meter under samtliga mätningar. Antennen är i sin tur kopplad till spektrumanalysatorn via en 5 meter lång koaxialkabel av typen RG214.



Figur 12: Produkter från SolarEdge. **(a)** SE5K, 5kW växelriktare med säkringsskåp. **(b)** P300, 300W optimerare.

Installationen består av en växelriktare enligt Figur 12 (a) som är ansluten till distributionsnätet där produktionen under dagen varierade mellan 2300-3000W. Växelriktaren är seriekopplad med 16 solcellsoptimerare, vilken kan ses i Figur 12 (b). Varje solcellsoptimerare är i sin tur, var och en anslutna till de 16 solpanelerna som ses i Figur 11.



Figur 13: Exempel på skärmdump.

Vid varje mätillfälle tas en skärmdump enligt Figur 13 i spektrumanalysatorn där anslutande kablage eller annan mätutrustning är korrigerad för. Under hela mätgenomförandet sparas resultatet med hjälp av dessa skärmdumpar i spektrumanalysatorn.

Frekvensspektrumet presenteras i frekvensdomänen där y-axeln representerar amplituden i dB μ V/m och x-axeln representerar frekvensen i MHz.

En röd linje i mitten av skärmdumpen markerar kravlinjen för utstrålad emission på ett avstånd av tre meter med en amplitud på 40 dB μ V/m. Kravet återfinns i ett flertal standarder som berör emission, bland annat i EN 55032 för mätning i laborationsmiljö. Kravlinjen användes enbart som referens eftersom mätningen genomfördes i fält.

Mätområdet sträcker sig mellan 3–30 MHz, 30–87 MHz, 108–200 MHz och 200–500 MHz eftersom det är i dessa frekvensområden som mest störningar rapporterats till Elsäkerhetsverket. Området 87–108 MHz är det frekvensband som i Sverige allokerats för rundradio och valdes därför bort.

Den första mätserien består av:

- Mätning av selektiva frekvenser samt hela spektrumet i området 30–87 MHz med bikonantennen både vertikalt och horisontellt polariserad.
- Mätning av selektiva frekvenser samt hela spektrumet i området 108–200 MHz med bikonantennen både vertikalt och horisontellt polariserad.
- Mätning av selektiva frekvenser från 3.5 MHz upp till 170 MHz med strömprobe placerad på kabel mellan växelriktare och optimerare, invid optimeraren.

Den andra mätserien består av:

- Mätning av selektiva frekvenser samt hela spektrumet i området 380-440 MHz med Rohde & Schwarz HE300 antenn både vertikalt och horisontellt polariserad.
- Mätning av selektiva frekvenser samt hela spektrumet i området 20-30 MHz med Rohde & Schwarz HE300 antenn både vertikalt och horisontellt polariserad.
- Mätning av hela spektrumet i området 3-20 MHz med Rohde & Schwarz HE300 antenn vertikalt polariserad.

Den tredje mätserien tas växelriktaren ur drift av och består av:

- Mätning av hela spektrumet i området 3-20 MHz med Rohde & Schwarz HE300 antenn både vertikalt och horisontellt polariserad.
- Mätning av hela spektrumet i området 30-87 MHz med bikonantennen både vertikalt och horisontellt polariserad.
- Mätning av hela spektrumet i området 108-200 MHz med bikonantennen både vertikalt och horisontellt polariserad.
- Mätning av selektiva frekvenser från 21 MHz upp till 87 MHz med strömprobe placerad på kabel mellan växelriktare och optimerare, invid optimeraren.



Figur 14: Kabel med ferriter av typen Fair-Rite material 43.

Den fjärde och sista mätserien jämför skillnader med växelriktaren i respektive ur drift och består av:

- Mätning av hela spektrumet i området 30-87 MHz med bikonantennen vertikalt polariserad.
- Mätning av hela spektrumet i området från 2 MHz upp till 87 MHz med strömprobe placerad på kabel mellan växelriktare och optimerare, invid växelriktaren. Denna mätning genomförs både med och utan ferriter på anslutningskabelns positiva ledare enligt Figur 14, mellan säkringsskåp och växelriktare.

Kontrollmätningen fortsätter med att mäta in och utgående strömmar till de olika optimerarna med hjälp av en strömtång. Det finns också en vilja att koppla ur optimerarna i syfte att mäta emission med apparaterna ur drift, likt utfört med växelriktarna. En sådan urkoppling bedöms senare inte vara möjlig på grund av optimerarnas svårtillgängliga placering bakom solcellerna, vilket gjorde att optimerarna är inkopplade under hela mätserien. När växelriktaren tas ur drift begränsas solcellsoptimerarna till en låg likspänning nära noll [9].

Slutligen upprättas bikonantennen i solcellsparkens utkant, cirka 100 meter bort från närmsta solcellspanel. Här görs en bakgrundmätning av hela spektrumet i området 30-87 MHz och 108-200 MHz i syfte att få en referensnivå till tidigare genomförda mätningar.

4 MÄTVÄRDEN OCH RESULTAT

I detta kapitel redovisas de viktigaste resultaten ifrån kontrollmätningen. Skärmdumparna presenteras i ordningen lägsta till högsta frekvens.

4.1 BESKRIVNING AV RÅDANDE SIGNALMILJÖ



Figur 15: Referensmätning av signalmiljö 30-87 MHz.



Figur 16: Referensmätning av signalmiljö 108-200 MHz.

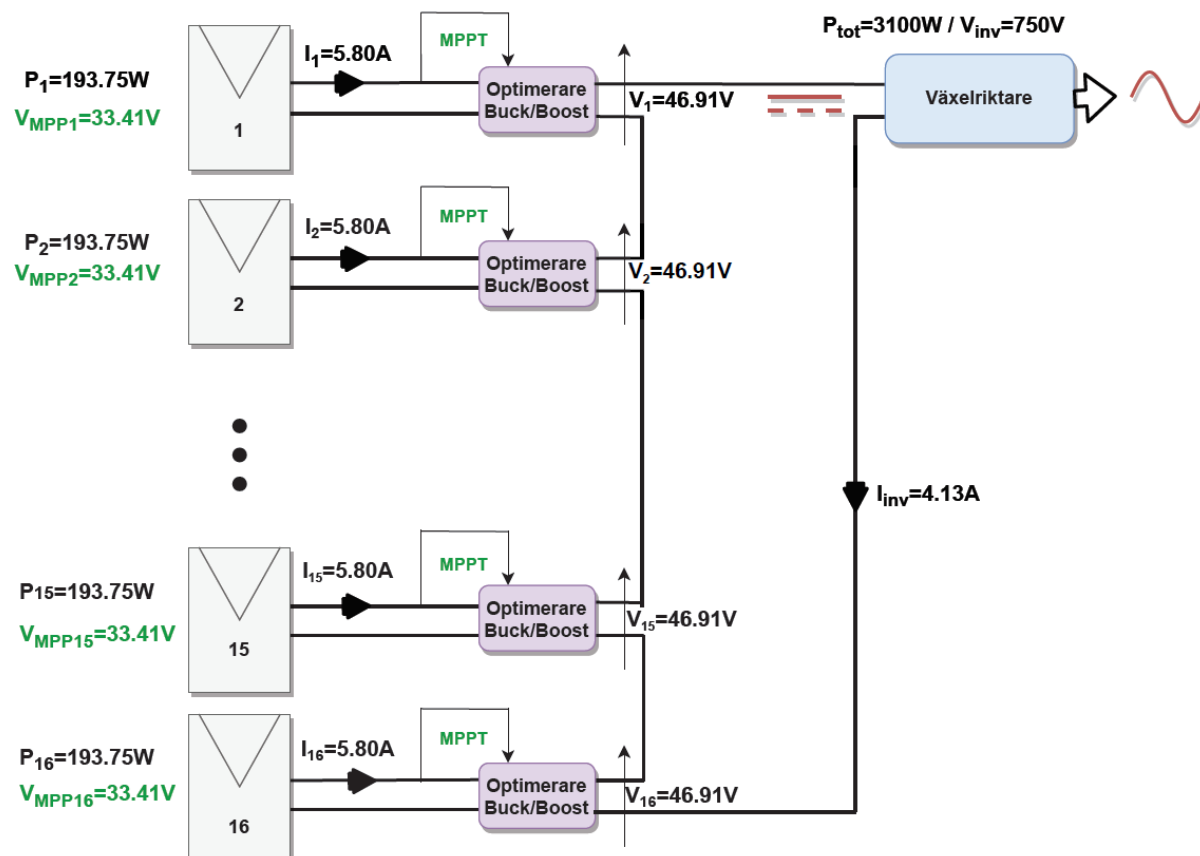
Den gula linjen i Figur 15 och Figur 16 beskriver mätplatsens signalmiljö inom ramen för genomförd bakgrundsmätning. Signalnivån bedöms vara förhållandevis hög med tanke på mätplatsens lantliga läge på landsbygden.

Amplituder på utvalda frekvenser mäts upp ur Figur 15 och redovisas i Tabell 1.

Tabell 1: Mätvärden enligt skärmdump.

Amplitud (dB μ V/m)	Frekvens (MHz)
35.2	50
36.9	75

4.2 SOLCELLSINSTALLATIONEN



Figur 17: Ekvivalent kopplingsschema SolarEdge.

I Figur 17 illustreras ett ekvivalent kopplingsschema över solcellsinstallationen med produkterna från SolarEdge med utgångspunkt ifrån företagets "Concept of Operation" [31]. Då installationen bestod av 16 paneler och optimerare med växelriktaren på baksidan av byggställningen enligt Figur 11 bedöms kabeldragningen på likströmssidan som relativt lång. Förläggningssättet är parallellt men med viss öppen slingbildning under panelerna. Parallellt med varje enskild solpanel sitter en optimerare. I praktiken uppskattas förlusterna vara cirka 2% per optimerare [31].

I syfte att förenkla beräkningarna nedan negligeras optimerarnas tidigare angivna förluster.

Växelriktaren angav vid tillfället en produktion av cirka $P_{tot} = 3100W$ samt en nominell spänning på cirka $V_{inv} = 750V$. Då solstrålningen under dagen var konstant utan hel eller partiell skuggning antas det att produktionen är jämnt fördelad över samtliga 16 solpaneler, där enskild solpanel då producerar $P_{1-16} = 193.75W$. Försättningsvis mättes inkommande ström från solpanel till optimerare upp till $I_{1-16} = 5.8A$ som också antas för samtliga 16 paneler.

Inkommande likström till växelriktaren beror av den totala effekten över växelriktarens nominella spänning.

$$I_{inv} = \frac{P_{tot}}{V_{inv}} = \frac{3100W}{750V} = 4.13A$$

Den beräknade inkommande likströmmen till växelriktaren stämmer överens med den uppmätta på cirka 4A.

Spänningen för MPP över varje enskild optimerare kan beräknas genom effekten över den korresponderande inkommande strömmen.

$$V_{MPP\ 1-16} = \frac{P_{1-16}}{I_{1-16}} = \frac{193.75W}{5.8A} = 33.41V$$

Solcellsoptimerarnas utspänning beror av optimerarnas effekt över inkommande likström till växelriktaren.

$$V_{1-16} = \frac{P_{1-16}}{I_{inv}} = \frac{193.75W}{4.13A} = 46.91V$$

Duty ration D beräknas enligt

$$\begin{aligned} \frac{V_o}{V_d} &= D \frac{1}{1-D} \\ \frac{V_{1-16}}{V_{MPP\ 1-16}} &= D \frac{1}{1-D} \\ \frac{46.91V}{33.41V} &= D \frac{1}{1-D} \rightarrow D = 0.58 \end{aligned}$$

Alternativt

$$\begin{aligned} \frac{I_{inv}}{I_{1-16}} &= \frac{1-D}{D} \\ \frac{4.13A}{5.80A} &= \frac{1-D}{D} \rightarrow D = 0.58 \end{aligned}$$

$D = 58\%$ innebär att optimerarens omvandlare körs i boost-läge.

Slutligen kan samtliga spänningsnivåer kontrollräknas enligt

$$V_{inv} = V_{1-16} = (46.91 * 16) \approx 750V$$

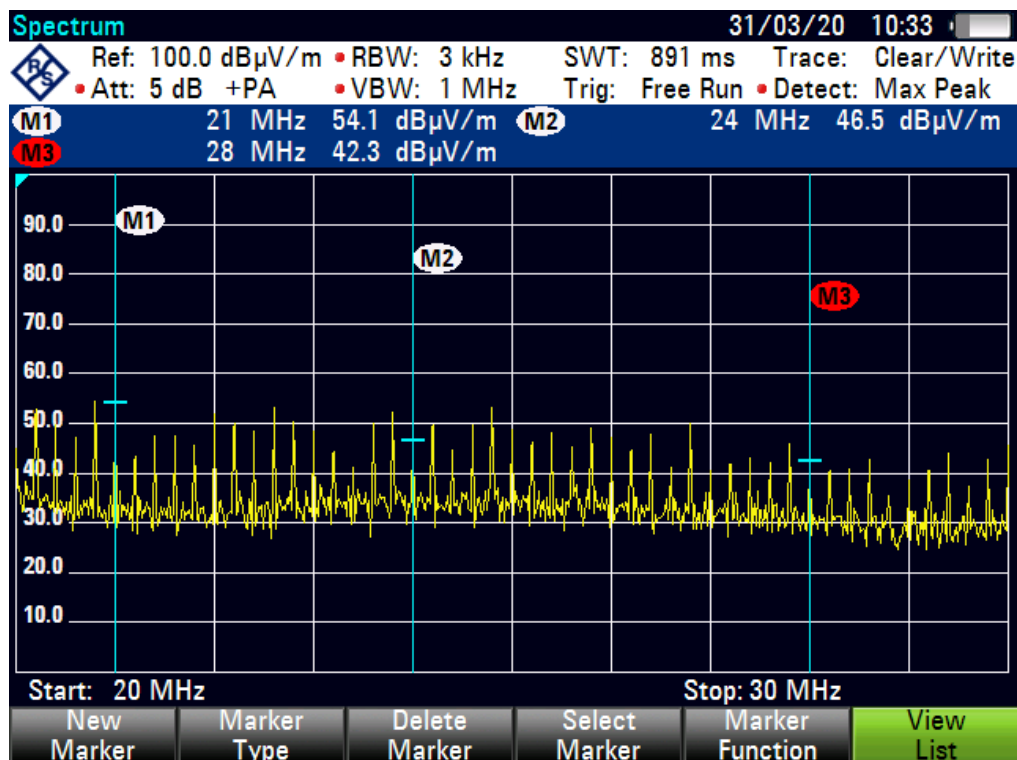
Eftersom det i en seriekopplad krets enbart kan finnas en ström är det omvandlarens uppgift att anpassa strömmen I_{1-16} från vare solpanel till växelriktarens inkommande ström I_{inv} med effekten P_{tot} , vilket sker genom att reglera spänningen på bekostnad av strömmen. I detta fall när spänningen $V_{1-16} > V_{MPP\ 1-16}$ och $D > 50\%$ är också $I_{inv} < I_{1-16}$.

Motsatsen till ovanstående uppstår när en eller flera paneler i en sträng utsätts för skuggning så att effektuttaget från panelen minskar till den grad att $I_{inv} > I_{1-16}$. Omvandlaren måste då köras i buck-läge där $D < 50\%$ och $V_{1-16} < V_{MPP\ 1-16}$ för att kompensera för effektförlusten.

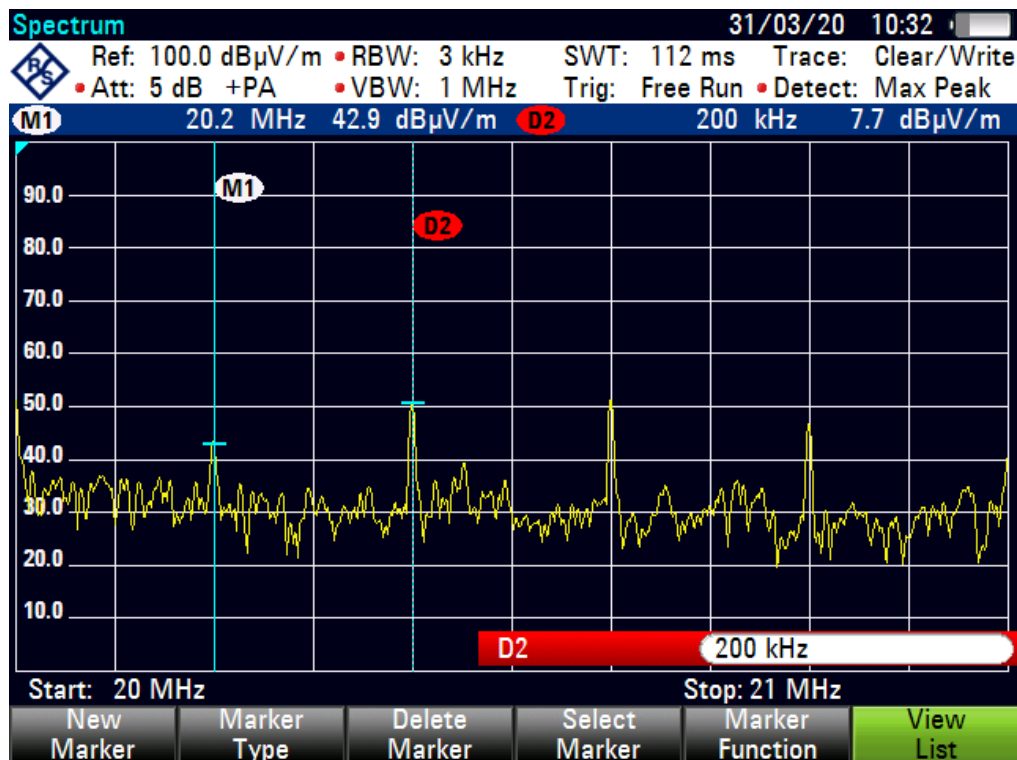
4.3 UTSTRÅLAD EMISSION 3–30 MHz MED VÄXELRIKTARE I DRIFT



Figur 18: Utstrålad emission, vertikal polarisation.



Figur 19: Utstrålad emission, horisontell polarisation.



Figur 20: Utstrålad emission, horisontell polarisation.

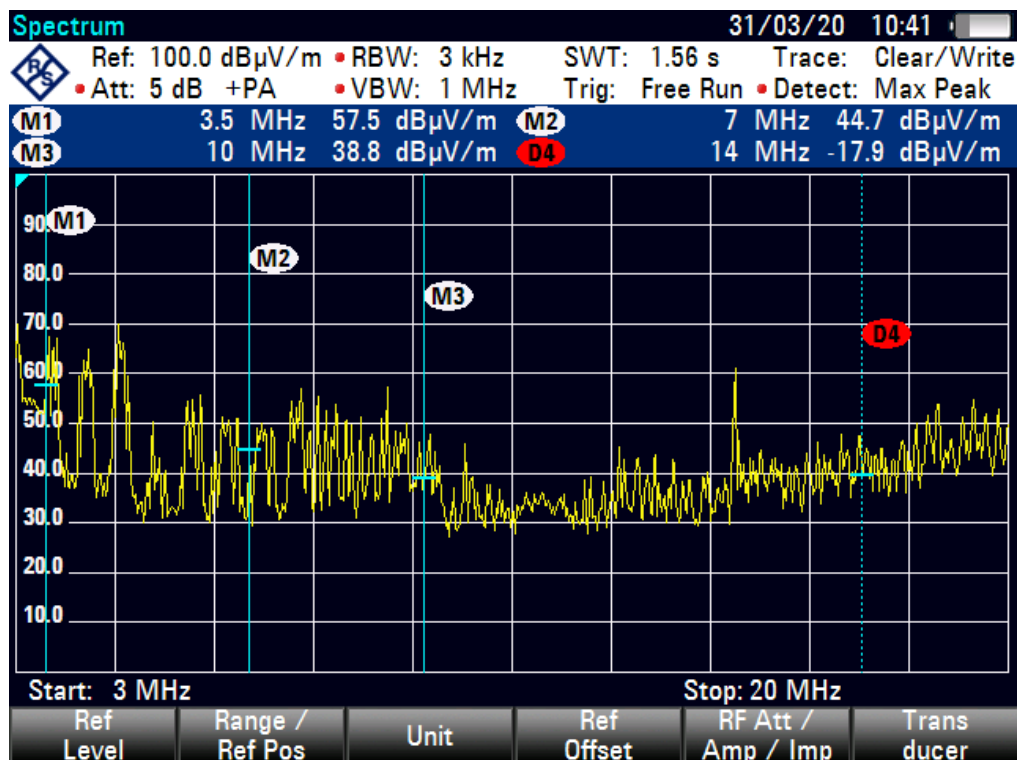
I Figur 18 och Figur 19 är växelriktaren i drift och visar att frekvensspektrumet är påverkat av återkommande signaler som är närvarande över hela frekvensbandet. Figur 20 visar att dessa signaler har en separation på 200 kHz.

Amplituder på utvalda frekvenser mäts upp ur Figur 18 och Figur 19 enligt Tabell 2.

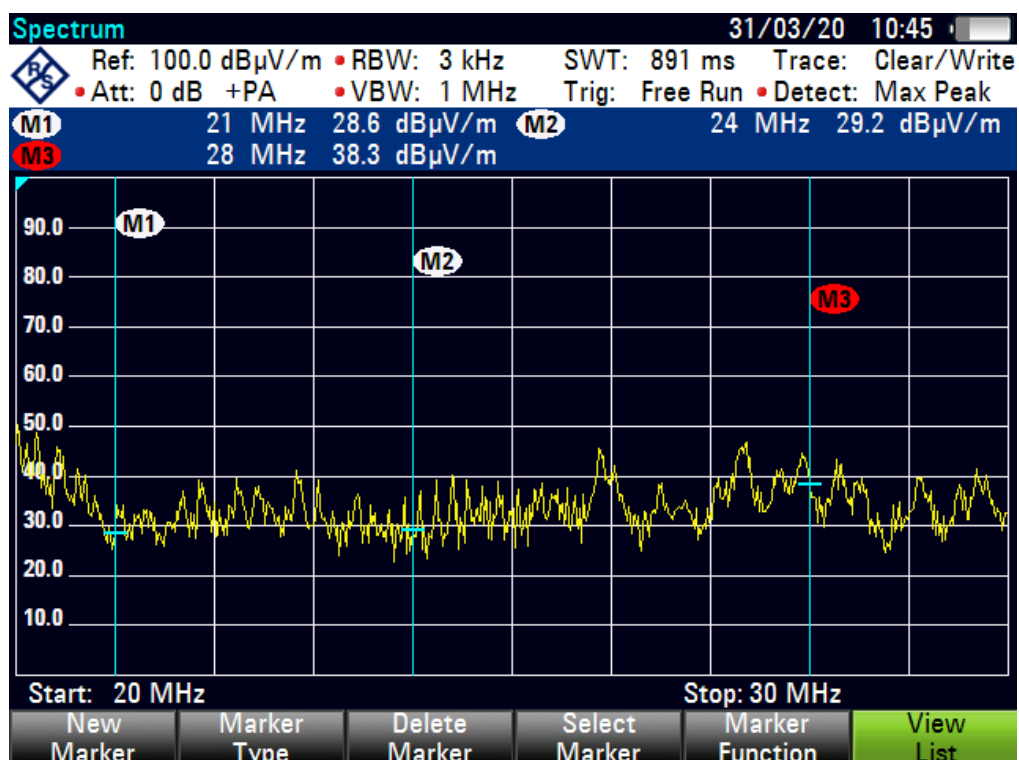
Tabell 2: Mätvärden enligt skärmdump.

Amplitud (dBμV/m)	Frekvens (MHz)
59.0	3.5
45.4	7
42.1	10
43.0	14
54.1	21
46.5	24
42.3	28

4.4 UTSTRÅLAD EMISSION 3–30 MHz MED VÄXELRIKTARE UR DRIFT



Figur 21: Utstrålad emission, vertikal polarisation.



Figur 22: Utstrålad emission, horisontell polarisation.

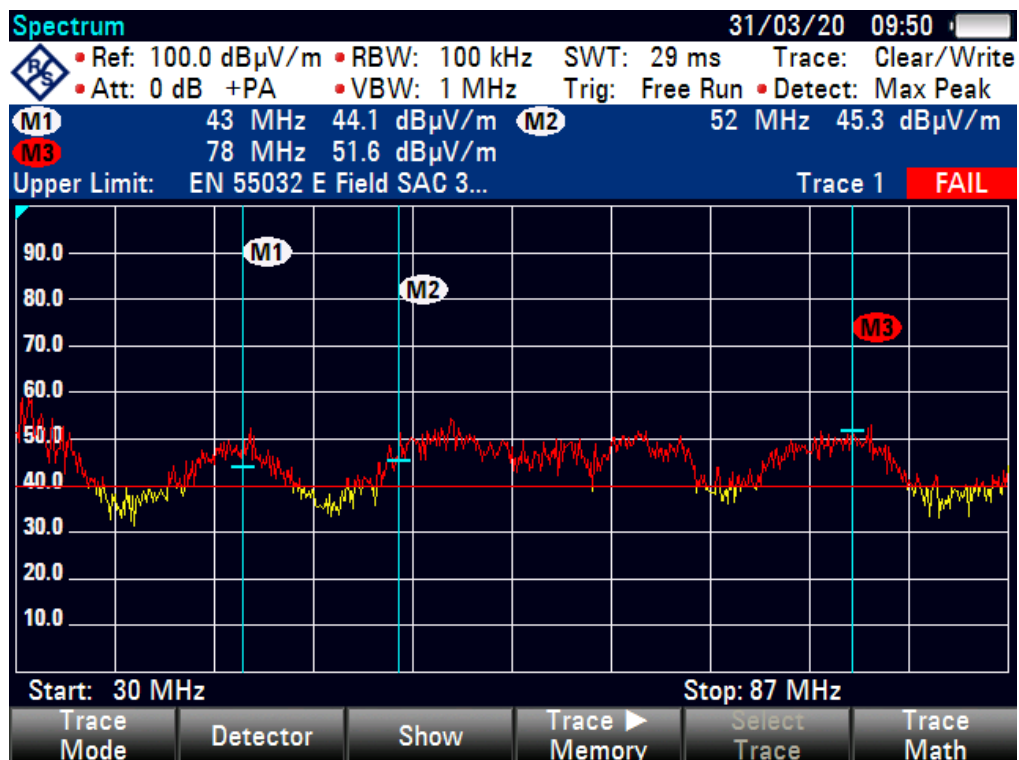
I Figur 21 och Figur 22 är växelriktaren tagen ur drift visar att signalerna med 200 kHz separation inte längre kan utläsas.

Amplituder på utvalda frekvenser mäts upp ur Figur 21 och Figur 22 enligt Tabell 3.

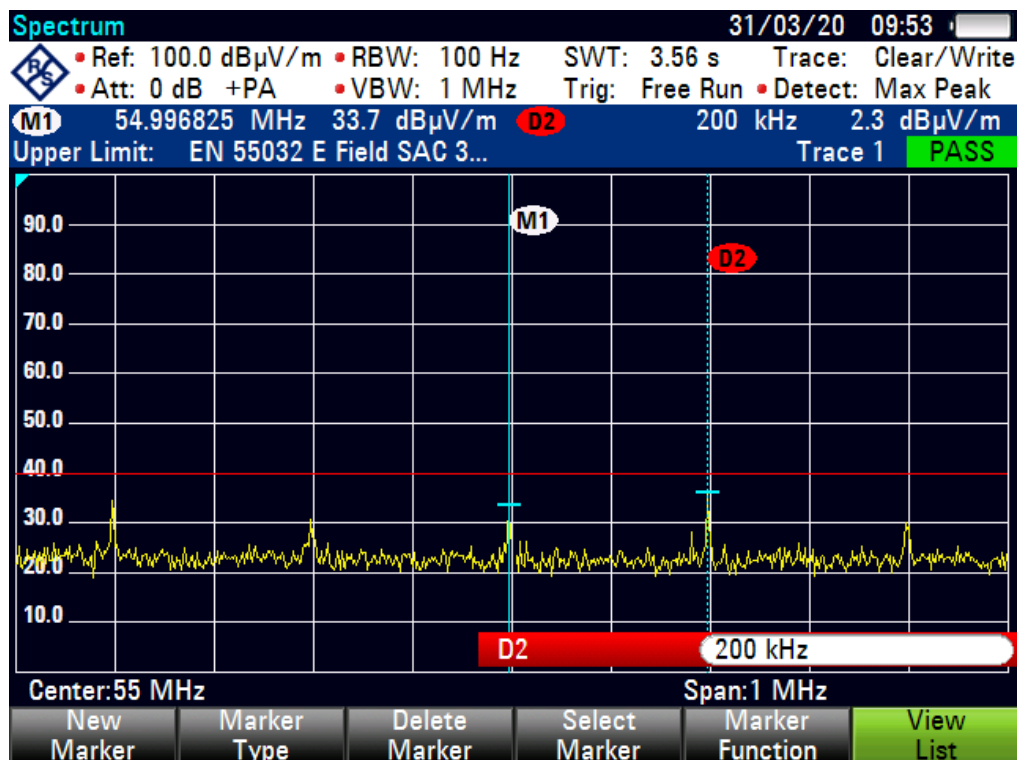
Tabell 3: Mätvärden enligt skärmdump.

Amplitud (dB μ V/m)	Frekvens (MHz)
57.5	3.5
44.7	7
38.7	10
39.6	14
28.6	21
29.2	24
38.3	28

4.5 UTSTRÅLAD EMISSION 30–87 MHz MED VÄXELRIKTARE I DRIFT



Figur 23: Utstrålad emission, vertikal polarisation.



Figur 24: Utstrålad emission, vertikal polarisation.

I Figur 23 är växelriktaren i drift och visar att frekvensspektrumet är påverkat av signaler med en amplitud som sträcker sig över kravlinjen. I Figur 24 omkring 55 MHz ses enligt tidigare signaler med en separation på 200 kHz och en amplitud på upp till 36 dB.

Amplituder på utvalda frekvenser mäts upp ur Figur 23 och Figur 24 enligt Tabell 4.

Tabell 4: Mätvärden enligt skärmdump.

Amplitud (dB μ V/m)	Frekvens (MHz)
44.1	43
45.3	52
33.7	55
36	55.2
51.6	78

4.6 UTSTRÅLAD EMISSION 30–87 MHz MED VÄXELRIKTARE UR DRIFT



Figur 25: Utstrålad emission, vertikal polarisation.

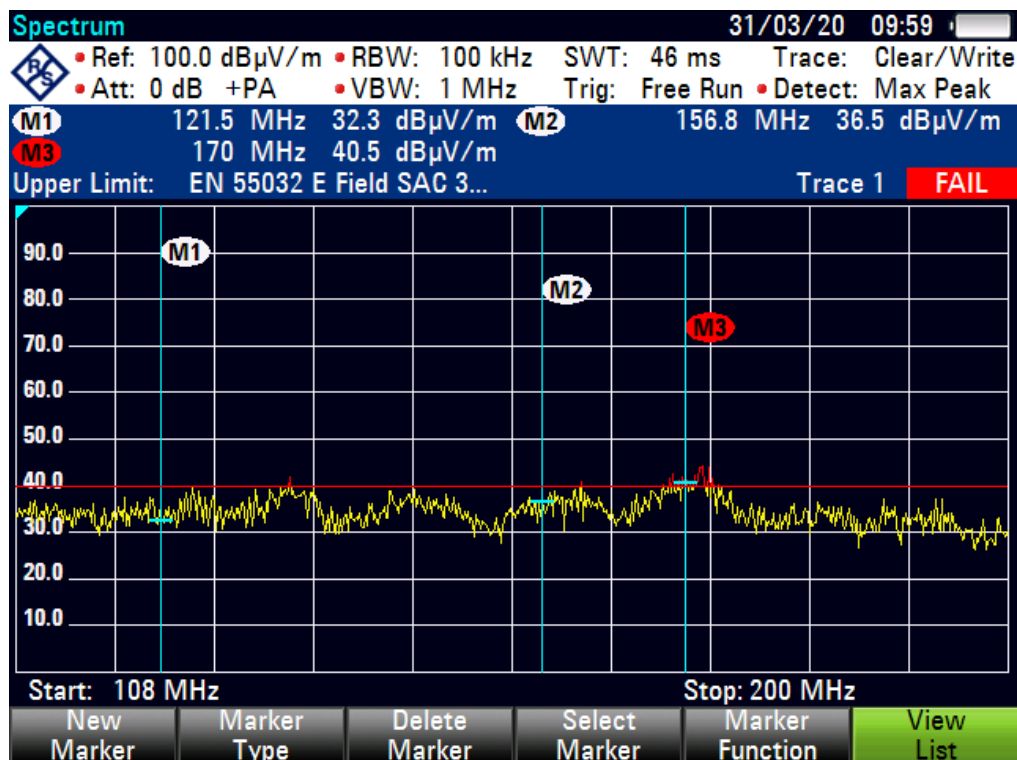
I Figur 25 är växelriktaren tagen ur drift och visar att frekvensspektrumet är påverkat av signaler vars amplitud överstiger kravlinjen.

Amplituder på utvalda frekvenser mäts upp ur Figur 25 enligt Tabell 5.

Tabell 5: Mätvärden enligt skärmdump.

Amplitud (dB μ V/m)	Frekvens (MHz)
47.1	42
41.6	55
50.5	77

4.7 UTSTRÅLAD EMISSION 108–200 MHz MED VÄXELRIKTARE I DRIFT



Figur 26: Utstrålad emission, vertikal polarisation.

I Figur 26 är växelriktaren i drift och visar att frekvensspektrumet är påverkat av signaler med en amplitud som tangerar kravlinjen. De tidigare kontinuerliga signalerna med 200 kHz separation som varit framträdande på lägre frekvenser går i detta frekvensband inte att utläsa. Markör M1 står på 121.5 MHz vilket är tillika nödfrekvensen för flygtrafik, VHF Guard. Markör M2 står på 156.800 MHz vilket är tillika nödfrekvensen för marin VHF, kanal 16.

Amplituder på utvalda frekvenser mäts upp ur Figur 26 enligt Tabell 6.

Tabell 6: Mätvärden enligt skärmdump.

Amplitud (dBμV/m)	Frekvens (MHz)
32.3	121.5
36.5	156.8
40.5	170

4.8 UTSTRÅLAD EMISSION 108–200 MHz MED VÄXELRIKTARE UR DRIFT



Figur 27: Utstrålad emission, vertikal polarisation.

I Figur 27 är växelriktaren ur drift och visar att frekvensspektrumet är påverkat av signaler med en amplitud som tangerar kravlinjen. Markör M1 står på 121.5 MHz vilket är tillika nödfrekvensen för flygtrafik, VHF Guard. Markör M3 står på 156.800 MHz vilket är tillika nödfrekvensen för marin VHF, kanal 16.

Amplituder på utvalda frekvenser mäts upp ur Figur 27 enligt Tabell 7.

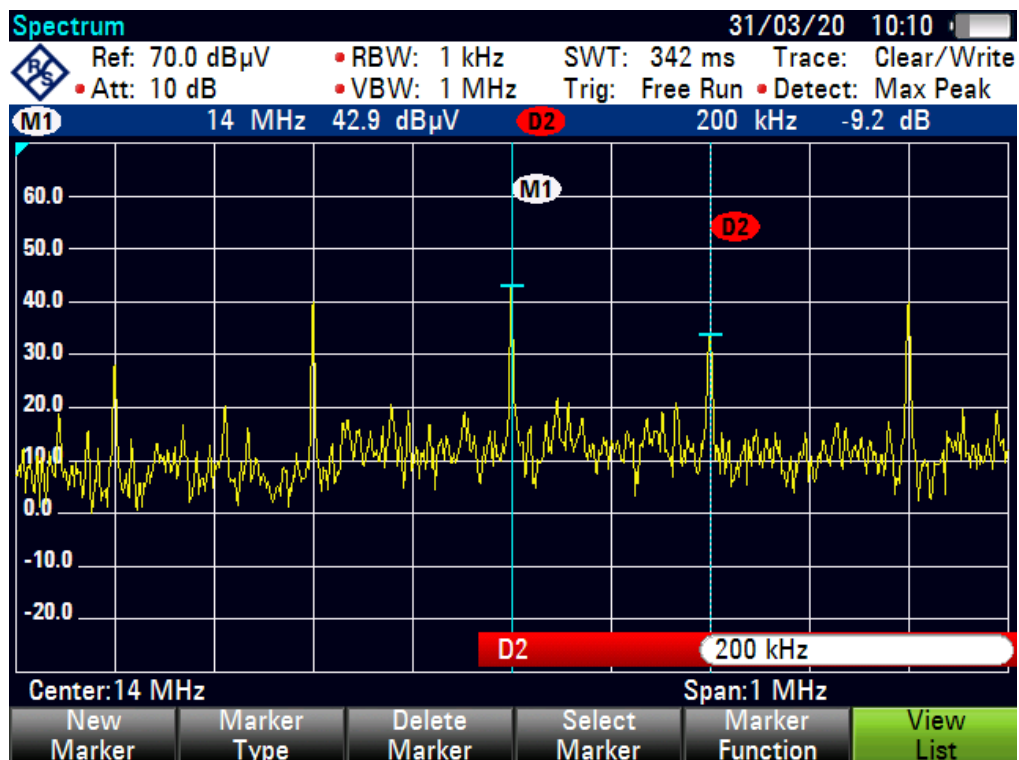
Tabell 7: Mätvärden enligt skärmdump.

Amplitud (dBμV/m)	Frekvens (MHz)
32.7	121.5
37.4	145
34.3	156.8

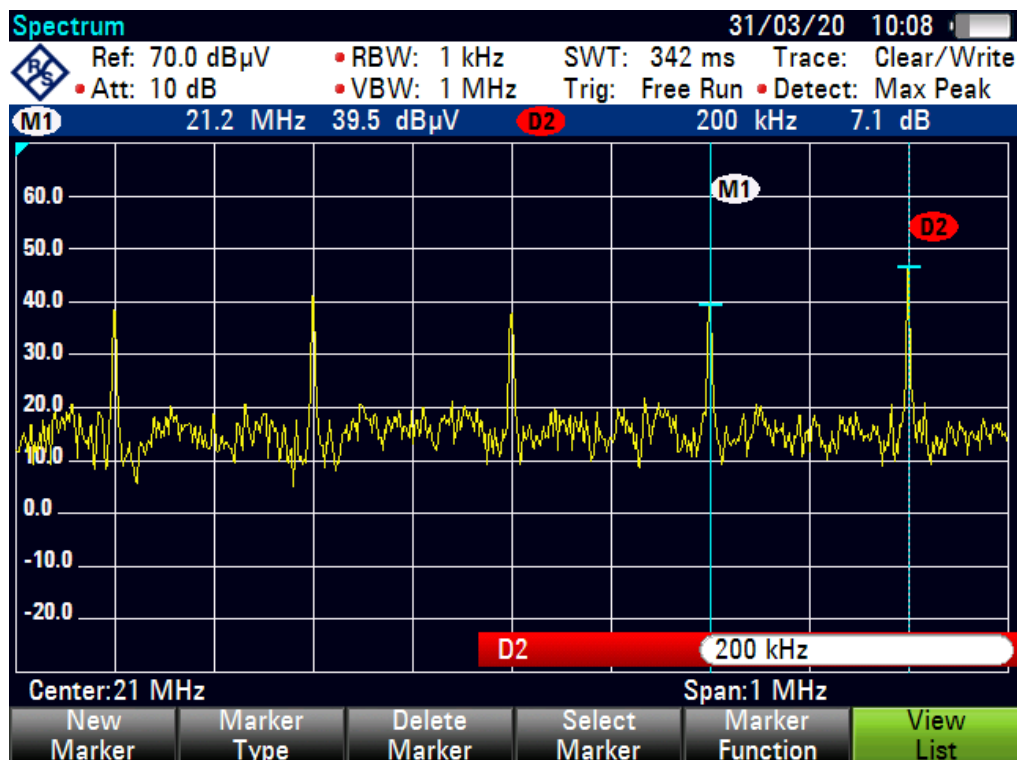
4.9 UTSTRÅLAD EMISSION 200–500 MHz MED VÄXELRIKTARE I OCH UR DRIFT

I mätresultaten för emission i området 200–500 MHz går det inte att utläsa någon skillnad i signalnivåer när växelriktaren tas i och hur drift, samtidigt som nivåerna ligger under kravlinjen. De signaler som tidigare uppmätts för lägre frekvenser med 200 kHz separation går heller inte att återfinna i frekvensbandet.

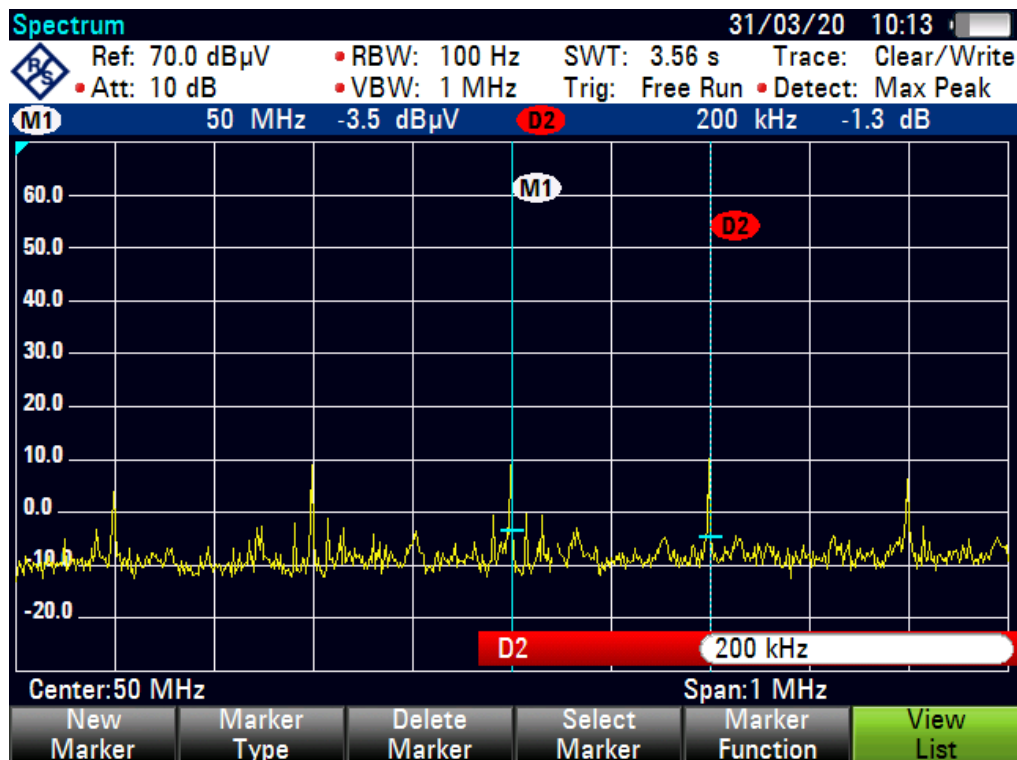
4.10 LEDNINGSBUNDEN EMISSION 14–50 MHz MED VÄXELRIKTARE I DRIFT



Figur 28: Ledningsbunden emission på växelriktarens likströmskablage.



Figur 29: Ledningsbunden emission på växelriktarens likströmskablage.



Figur 30: Ledningsbunden emission på växelriktarens likströmskablage.

I Figur 28, Figur 29 och Figur 30 är växelriktaren i drift och visar att frekvensspektrumet är påverkat av återkommande signaler i uppmätta frekvensband. Här, likt vid utstrålad emission har signalerna en separation på 200 kHz.

Amplituder på utvalda frekvenser mäts upp ur Figur 28, Figur 29 och Figur 30 enligt Tabell 8.

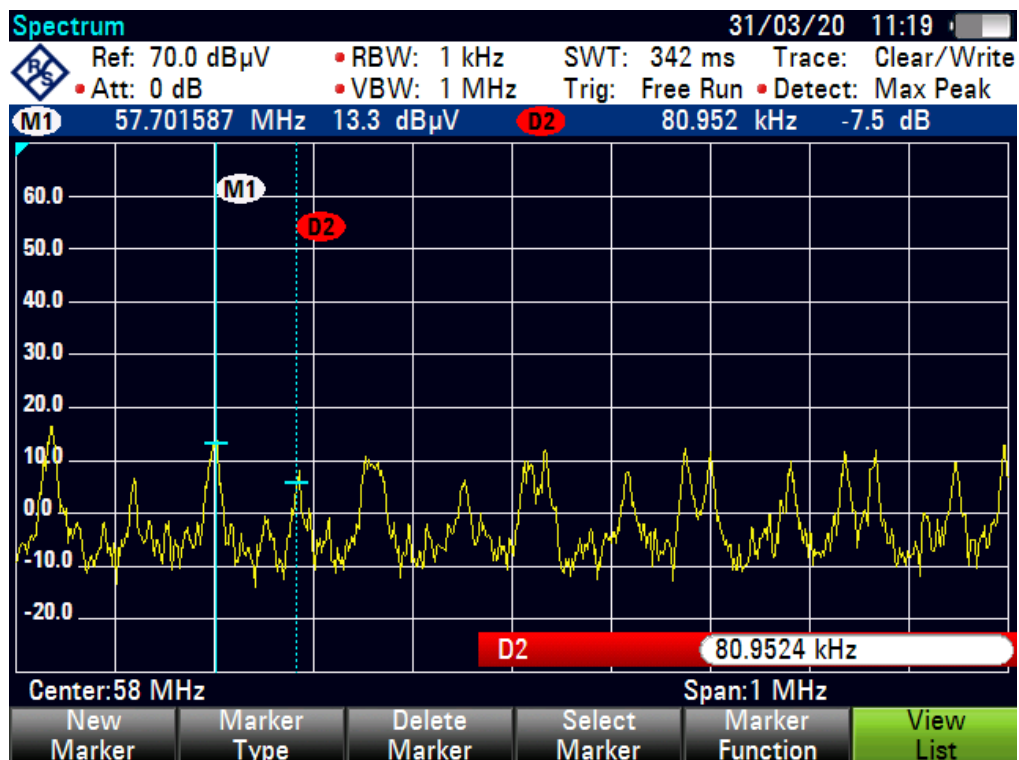
Tabell 8: Mätvärden enligt skärmdump.

Amplitud (dB μ V/m)	Frekvens (MHz)
27.3	13.6
39.8	13.8
42.9	14
33.7	14.2
39.8	14.4
39.3	20.6
40.9	20.8
39.0	21
39.5	21.2
46.6	21.4
4.2	49.6
9.6	49.2
9.7	50
10.2	50.2
6.0	50.4

4.11 LEDNINGSBUNDEN EMISSION 20–60 MHz MED VÄXELRIKTARE UR DRIFT



Figur 31: Ledningsbunden emission på växelriktarens likströmskablage.



Figur 32: Ledningsbunden emission på växelriktarens likströmskablage.

I Figur 31 och Figur 32 är växelriktaren ur drift och visar att signalerna med 200 kHz separation inte längre kan utläsas, likt skärmdumparna för utstrålad emission. Separationen mellan markör M1 och D2 i Figur 32 är cirka 81 kHz.

Amplituder på utvalda frekvenser mäts upp ur Figur 32 enligt Tabell 9.

Tabell 9: Mätvärden enligt skärmdump.

Amplitud (dBμV/m)	Frekvens (MHz)
13.3	57.7
5.8	58.6

4.12 LEDNINGSBUNDEN EMISSION 30–87 MHz, VÄXELRIKTARE I DRIFT MED OCH UTAN FERRITER.



Figur 33: Ledningsbunden emission på växelriktarens likströmskablage med ferriter.

I Figur 33 är växelriktaren i drift med ferriter på anslutningskabelns positiva ledare enligt Figur 14, mellan säkringsskåp och växelriktare.

Amplituder på utvalda frekvenser mäts upp ur Figur 33 enligt Tabell 10.

Tabell 10: Mätvärden enligt skärmdump.

Amplitud (dBμV/m)	Frekvens (MHz)
0.9	42.8
6.9	50



Figur 34: Ledningsbunden emission på växelriktarens likströmskablage utan ferriter.

I Figur 34 är växelriktaren i drift utan ferriter på anslutningskablaget men med samma mätintervall som i Figur 33.

Amplituder på utvalda frekvenser mäts upp ur Figur 34 enligt Tabell 11.

Tabell 11: Mätvärden enligt skärmdump.

Amplitud (dB μ V/m)	Frekvens (MHz)
30.1	42.8
15.6	50

5 ANALYS

5.1 ANALYS KONTROLLMÄTNING

Tabell 12: Sammanställda mätdata.

Mätområde	Lägsta uppmätta amplitud (dB μ V/m)	Högsta uppmätta amplitud (dB μ V/m)	Skillnad uppmätt amplitud (dB μ V/m)
Utstrålad emission 3–30 MHz med växelriktare i drift	42.1	59.0	16.9
Utstrålad emission 3–30 MHz med växelriktare ur drift	28.6	57.5	28.9
///	///	///	///
Utstrålad emission 30–87 MHz med växelriktare i drift	33.7	51.6	17.9
Utstrålad emission 30–87 MHz med växelriktare ur drift	41.6	50.5	8.9
///	///	///	///
Utstrålad emission 108–200 MHz med växelriktare i drift	32.3	40.5	8.2
Utstrålad emission 108–200 MHz med växelriktare ur drift	32.7	37.4	4.7
///	///	///	///
Ledningsbunden emission 14–50 MHz med växelriktare i drift	4.2	46.6	42.4
Ledningsbunden emission 20–60 MHz med växelriktare ur drift	5.8	13.3	7.5
///	///	///	///
Ledningsbunden emission 30–87 MHz, växelriktare i drift utan ferriter	15.6	30.1	14.5
Ledningsbunden emission 30–87 MHz, växelriktare i drift med ferriter	0.9	6.9	6.0

Det finns en komplexitet när det kommer till analys mellan interferens och kompatibilitet, särskilt när apparater skall fungera i befintlig miljö och i samklang med varandra. Riskanalyser och utprovningar i laborationsmiljö tar inte hänsyn till den uppsjö av parametrar som spelar in när apparaten installeras i hemmet, kontoret, butiken eller motsvarande miljöer. I dessa miljöer adderas faktorer som till exempel befintligt brus, effekten av flertalet apparater inom ett godtyckligt område samt installationsmetod och eventuell anslutande utrustning. En solcellsinstallation är ett exempel på sådan miljö.

För att kunna säkerställa att optimerarna är i drift under kontrollmätningen mäts in och utgående strömmar till apparaten. Genom att med hjälp av de uppmätta värdena beräkna driftläget hos optimerarna påvisar det om apparaten går i buck eller boostläge. Driftläget är en indikation på att transistorerna är i drift och att apparaten då är en potentiell EMI -källa.

Genom att analysera beräkningar och spektrumbilder tillsammans med mätdata för både utstrålad samt ledningsbunden emission kan skillnader studeras. Det går att se en förändring av ett givet uppmätt frekvensområde när växelriktaren tas i och ur bruk. Förändringen består dels av skillnad i amplituder, dels av förekomsten respektive frånvaron av repetitiva smalbandiga signaler.

Tabell 12 visar hur det de högsta uppmätta amplituderna tillhör de lägsta frekvenserna, vilket tillika är de frekvenser där mest störning rapporterats till Elsäkerhetsverket. Det går även att se hur skillnaden mellan lägsta och högsta amplitud är som störst för låga frekvenser. Allteftersom frekvensen ökar, minskar den högsta uppmätta amplituden och med den också amplitudskillnaden. Den kombinerade bedömningen mellan amplituder och spektrumbilder är att de generella brus och störningsnivåerna minskar med ökande frekvens. I det högsta mätområdet 200–500 MHz, är det svårt att längre se någon skillnad när växelriktaren tas i och ur drift och därmed också svårt att göra en fortsatt analys.

Vidare är det rimligt att amplitudskillnaden är som störst när växelriktaren är i drift, vilket är faktumet för nästan samtliga mätningar. När växelriktaren är i drift ingår samtliga apparater i produktionen vilket leder till att brus och störningsfenomenen är höga.

Det går också att se hur ferriterna på anslutningskablagen har inverkan. Brus och störningsnivåerna är väsentligt mycket lägre när anslutningskablagen är försett med ferriter, kontra utan ferriter.

Utifrån den kontrollmätning som genomförts går det inte att i detalj avgöra för vilken apparat eller komponent i solcellsinstallationen som bidrar till den generellt ökade störningsnivån under produktion. Bedömningen är att alla ingående komponenter bidrar och att additionen av störningar blir sammanlagt hög. Däremot så fodras en djupare, specifik analys av de smalbandiga signalerna.

De smalbandiga signalerna ses tydligt i bland annat i Figur 28 och Figur 29 med dess amplituder i Tabell 8. Signalerna har en bandbredd på 5-10 kHz med en separation på 200 kHz. Signalerna är tydligt återkommande i området 3-87 MHz, även här avtagande amplitud med ökande frekvens. Någonstans kring 100 MHz antas det att signalen försvinner i befintlig signalmiljö. Signalerna går inte att utläsa när växelriktaren är tagen ur drift.

I och med att signalerna har en förhållandevis hög amplitud kontra befintlig signalmiljö, framförallt i kortvågsbandet går det att argumentera för att de väsentliga kraven i EU-direktivet inte uppfylls. Det finns risk att signalerna alstrar en så pass hög elektromagnetisk störning att nivån över vilken radio och teleutrustning kan fungera som avsett överskrids. Detta bekräftas genom tidigare genomförda tillsynsbesök [1], [2], [4].

I syfte att ytterligare möjliggöra specifik analys av de smalbandiga signalerna i allmänhet och solcellsoptimeraren i synnerhet har Elsäkerhetsverket ställt ett antal produktspecifika frågor till tillverkaren SolarEdge om deras utprovning av sina optimerare. Svaret innehåller bland annat testrapporter och företagets syn på EMC-problematiken kring solcellsoptimerarna [24].

I svaret till Elsäkerhetsverket medger SolarEdge att de känner till diskussionen kring solcellsoptimerare och EMC-problematiken. Företaget hävdar samtidigt att utav miljoner sålda optimerare så är antalet mottagna rapporter gällande interferens minimal. Vidare beskriver SolarEdge bakgrunden till varför kontrollmätningar av deras produkter visar på höga EMI-nivåer. Den oavsiktliga emission som uppstår härstammar ifrån optimerarens DC-DC-konverterare, där arbetsfrekvensen för transistorn är 200 kHz. Störningarna sprider sedan sig via apparatens hölje samt via anslutande kablage. Hårdvarumässigt har SolarEdge valt att implementera filtrering vid in och utgångar för kablage i frekvensområdet 30 MHz-1 GHz.

Med informationen från SolarEdge tillsammans med redovisad teori och egna mätningar, bedöms det med hög sannolikhet att de smalbandiga repetitiva signalerna är oönskade övertoner ifrån solcellsoptimerarens konverterare. Transistorns arbetsfrekvens i konverteraren korrelerar med signalernas uppmätta separation på 200 kHz. Att signalernas amplitud minskar med ökande frekvens stödjer det faktum att det är konverterarens övertoner som uppmätts vid kontrollmätningen.

Att de högsta uppmätta amplituderna tillhör de lägsta frekvenserna i mätområdet 3–30 MHz skulle kunna bero på frånvaron av EMI-filter i detta frekvensområde. Frånvaron av filter i kombination med oskärmade enkelledare som förlagds i slinga och ansluts till optimerarens likströmsingång bidrar till förhöjd EMI på kortvågsbandet.

5.2 ANALYS EMC

När utvärdering av en apparats elektromagnetiska kompatibilitet med avseende på dess omgivning genomförs är variablerna många. Parametrar som lagar, standarder och fysikaliska egenskaper ska alla tas i beaktande vilket gör en analys allt annat än binär.

Svensk lag, förordning och föreskrift gällande EMC bildar tillsammans med ”EU-direktivet 2014/30/EU” det ramverk som kedjan, från tillverkaren till konsumenten måste förhålla sig till. Det fastställs vilka krav apparaten måste uppfylla, hur dokumentation och uppmärkning skall framställas samt riktlinjer för om kraven inte följs. Dessutom finns det krav på att all fast installation skall göras enligt gällande branschpraxis.

I dessa sammanhang används begrepp som; ”överskriden nivå”, ”tålighet mot elektromagnetisk störning” och ”fungera tillfredsställande i sin elektromagnetiska omgivning” vilket alla ger upphov till viss tolkning. Det är inte med hjälp av storheter definierat när en nivå är överskriden, när en apparats tålighet är undermålig eller hur en apparat beter sig i en icke tillfredsställande miljö.

Efter att Elsäkerhetsverket fått in en anmälan och genomfört ett tillsynsbesök vid berörd anläggning finns det möjlighet att begära in den dokumentation från tillverkaren som finns tillgänglig vad beträffar apparaten i fråga. Här går det att bland annat att följa upp de testrapporter som tillverkaren upprättar efter mätningar, genomförda för att uppfylla kraven mot en harmoniserad standard. Även om en standard i grunden är frivillig att efterfölja finns inget incitament hos ett företag att helt bortse från dem, då samspelet mellan apparater i grunden gynnar samtliga inblandade parter.

Standarden ”SS-EN 61000-6-3 Elektromagnetisk kompatibilitet” är en av flertalet standarder som behandlar EMC. Att standarden i detta sammanhang är särskilt angelägen att analysera beror på dess avgränsning gällande emission ifrån utrustning i bostäder, kontor, butiker och liknande miljöer [23]. Det är framförallt tredje raden gällande ”DC power port” i standardens emissionstabell som fodrar en djupare analys och där utrymme ges för viss tolkning. Det går att argumentera sig fri från ansvar i frekvensområdet 0.15- 30 MHz då likströmssidan i solcellsanläggningen inte nyttjas för avbrottsfri kraft, utan istället behandlar transport av ström fram till växelriktaren. Det finns även en norm inom ramen för standarden som säger att matningskablagen till EUT enbart berör kort kablage, vilket sällan är fallet när det gäller solcellsinstallationer. Denna tolkning gör standarden otillräcklig för solcellsprodukter och ger utrymme för en godtycklig tillverkare att hävda ansvarsfrihet och samtidigt hävda att standarden är uppfylld. Resultatet av tolkningen blir att det inte finns några bindande krav gällande EMC för solcellsoptimerare i kortvågsbandet.

Även om ovanstående resonemang förs går det inte att avskriva sig ansvar från de tekniska detaljerna i frekvensområdet som EU-direktivet krävställer. Om tillverkaren väljer att helt eller till del inte följa de harmoniserade standarderna skall beskrivningar av vilka delar som tillämpats dokumenteras. Samtidigt skall det säkerställas att det väsentliga kravet, också benämnt ”skyddskravet” i direktivet fortfarande är uppfyllt. Dokumentationen skall vara tillfredsställande och innehålla en bedömning av riskerna genom en upprättad riskanalys [19], [21].

6 SLUTSATSER

Slutsatserna i rapporten sammanställs utifrån det tillverkande företags, Elsäkerhetsverkets och anläggningsinnehavarens perspektiv.

Ur det tillverkande företags perspektiv är problematiken känd. Generellt vet tillverkaren att konstruktionen av deras optimerare, tillsammans med bristande kabelförläggning av enkelskärmad ledare på likströmssidan i en solcellsinstallation är en bidragande orsak till ökad EMI. Tillverkaren genomför emissionsanalyser i EMC-laborationsmiljö gentemot enskilda apparater och visar med hjälp av tekniska rapporter att EMC-kraven i området 30 MHz-1 GHz är uppfyllda [24]. Under 30 MHz hävdas ansvarsfrihet på grund av bristande standardisering i frekvensområdet. SolarEdge anser därmed att de dragit sitt strå till stacken.

Ur Elsäkerhetsverkets perspektiv tar inte de tillverkande företagen sitt fulla ansvar. Det går inte att hävda ansvarsfrihet utan att ta hänsyn till helhetsbilden. Oberoende EMC-rapporter, bristfälliga standardiseringar eller frekvensområden måste det så kallade skyddskravet vara uppfyllt, vilket det för vissa frekvensband inte är. När en kontrollmätning utförs i fältmiljö är det solcellsinstallationen som ligger i fokus och inte en enskild apparat. Detta innebär att skyddskravet kan anses vara uppfyllt först när hela installationen, med alla dess ingående apparater och komponenter inte stör annan utrustning.

Gällande kommande standardiseringar ser framtiden ljus ut. Enligt Elsäkerhetsverket kommer den ännu icke harmoniserade standarden ”EN 55011” innehålla uppdaterade krav på ledningsbunden emission [24]. Med den nya standarden kommer även bedömningen om att framtida EMI-bekymmer kommer kunna minimeras.

Ur anläggningsinnehavarens synvinkel, det vill säga den individ som bär ansvaret för solcellsinstallationen är problematiken ett faktum. I och med att innehavaren som ofta är en privatperson, har ansvar för solcellsanläggningen är det tillika den individ som blir drabbad i slutändan. Att som radioamatör eller villaägare själv behöva bestrida byråkratin kring överklaganden gällande förhöjda störningsnivåer är ingen enkel uppgift.

Frågor kring den elektromagnetiska kompatibiliteten i en solcellsanläggning bedöms vara fortsatt aktuell framöver. Med en ökad mängd solcellsinstallationer kommer också oundvikligen en ökad mängd EMI, vilket innebär ett ansvar för samtliga berörda parter.

REFERENSER

- [1] Elsäkerhetsverket, ”Radiostörningar från solcellsanläggning; Dnr 18EV3012,” 2018.
- [2] Elsäkerhetsverket, ”Solcellsanläggningar vid Kalmar flygplats; Dnr 18EV4815,” 2018.
- [3] S. Soxbo, ”Försvaret stoppar solceller för villaägare på näset,” Expressen, 10 02 2020. [Online]. Available: <https://www.expressen.se/kvallsposten/forsvaret-stoppar-solceller-for-villaagare-pa-naset/>.
- [4] Elsäkerhetsverket, ”Tillsynsbesök solcellsanläggning försvaret; Dnr 19EV4472,” 2019.
- [5] C. von Schultz, ”Elinstallatören,” 04 05 2020. [Online]. Available: <https://www.elinstallatoren.se/innehall/nyheter/2020/maj/per-ove-tvingades-ta-ner-solcellerna-de-stor/>.
- [6] A. Bengtsson, E. Holm, D. Larsson och K. Björn, ”Skuggningshandbok Energiforskrappport 2017-385,” Energiforsk, Stockholm, 2017.
- [7] V. Quaschnig, Renewable energy and climate change, West Sussex: John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex, PO19 8SQ,, 2010.
- [8] A. K. Podder, N. K. Roy och H. R. Pota, ”MPPT Methods for Solar PV Systems: A Critical Review Based on Tracking Nature,” IET Renewable Power Generation, 2019.
- [9] Svensk Elstandard, SEK Handbok 457; Solceller - Råd och regler för elinstallation, Malmö, Utgåva 1, 2019.
- [10] N. Mohan, T. M. Undeland och W. P. Robbins, Power Electronics, Third edition red., 111 River Street, Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2003.
- [11] Försvarets materielverk (FMV), Elektromagnetisk miljö användarhandbok (EMMA), Försvarets bok- och blankettförråd, 2002.
- [12] J. S. Beasley och G. M. Miller, Modern electronic communication, Ninth Edition red., Pearson Prentice Hall, 2008.
- [13] T. Williams, EMC FOR PRODUCT DESIGNERS, 5th Ed. red., The Boulevard, Langford Lane, Kidlington, Oxford OX5 1GB, United Kingdom: Elsevier Ltd, 2017.
- [14] Lagen om elektromagnetisk kompatibilitet (SFS 1992:1512), 1992.
- [15] B. Zhu, D. Leskarac, J. Lu och M. Wishart, ”Electromagnetic Interference Investigation of Solar PV System for Microgrid Structure,” IEEE, Nathan, Australia, 2016.

- [16] R. Maltione, M. V. G. dos Reis, D. I. Narvaez, M. Gradella Villalva och L. C. Kretly, "Small Size Inverters: Development Challenges for PV, Renewable Energy Applications, as Well IoT, EMC, Lightning and Robustness Tradeoffs," IEEE, University of Campinas, Brazil, 2018.
- [17] R. Araneo, S. Lammens, M. Grossi och S. Bertone, "EMC Issues in High-Power Grid-Connected Photovoltaic Plants," IEEE, Italy, 2009.
- [18] "Single market for goods," Europeiska kommissionen, 24 02 2020. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/growth/single-market/goods_en.
- [19] EUROPAPARLAMENTETS OCH RÅDETS DIREKTIV 2014/30/EU, 2014.
- [20] "EU och standarder," Svenska institutet för standarder, 24 02 2020. [Online]. Available: <https://www.sis.se/standarder/vad-ar-en-standard/eu-och-standarder/>.
- [21] Europeiska kommissionen , "2016 års blåbok om genomförandet av EU:s produktbestämmelser (2016/C 272/01)," Europeiska unionens officiella tidning, 26 juli 2016.
- [22] "Standarder och generella krav; TR02-03-02," Svenska kraftnät, 2018.
- [23] SS-EN 61000-6-3 Elektromagnetisk kompatibilitet (EMC) – Del 6-3: Generella fordringar – Emission från utrustning i bostäder, kontor, butiker och liknande miljöer, 2007.
- [24] Elsäkerhetsverket, "Marknadskontroll - Elektromagnetisk kompatibilitet; Dnr 19EV5177," 2019.
- [25] Elsäkerhetsverket, "EMC - elektromagnetisk kompatibilitet," Sidansvarig: Henrik Olsson, 24 02 2020. [Online]. Available: <https://www.elsakerhetsverket.se/om-oss/vi-arbetar-med/tillsyn-och-marknadskontroll/EMC/>.
- [26] Förordning (2016:363) om elektromagnetisk kompatibilitet, 2016.
- [27] Elsäkerhetsverkets föreskrifter (2016:3) om elektromagnetisk kompatibilitet, 2016.
- [28] Elsäkerhetsverket, "Rättsakter inom EU," Sidansvarig: Karin Sjöberg, 24 02 2020. [Online]. Available: <https://www.elsakerhetsverket.se/om-oss/lag-och-ratt/rattsakter-inom-eu/>.
- [29] Elsäkerhetsverket, "CE-märket," Sidansvarig: Per Samuelsson, 24 02 2020. [Online]. Available: <https://www.elsakerhetsverket.se/yrkespersoner/tillverkare-aterforsaljare/de-olika-produktkraven/ce-marknet/>.
- [30] Glava Energy Center, "Om Glava Energy Center," 02 04 2020. [Online]. Available: <https://www.glavaenergycenter.se/om-glava-energy-center/>.

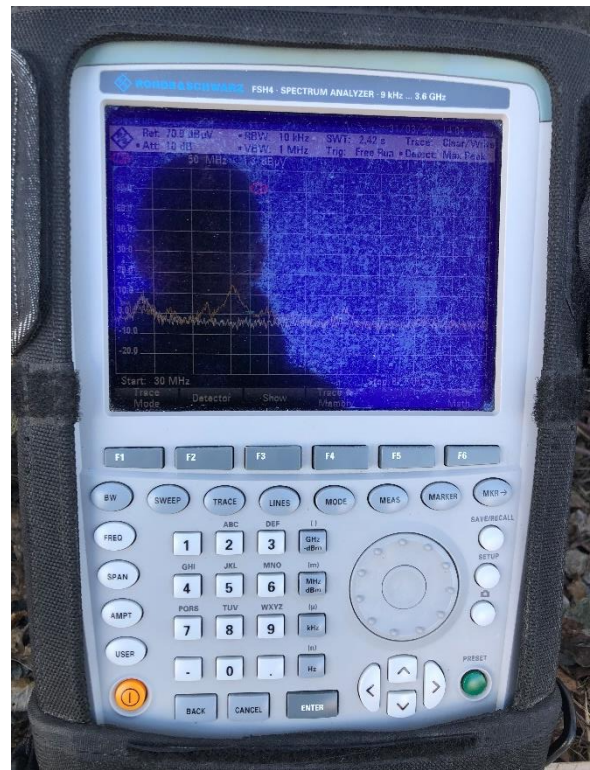
[31] Solar Edge, "Application Note: SolarEdge Fixed String Voltage, Concept of Operation," Februari 2019. [Online]. Available: https://www.solaredge.com/sites/default/files/se_application_fixed_string_voltage.pdf.

APPENDIX

BILAGA A



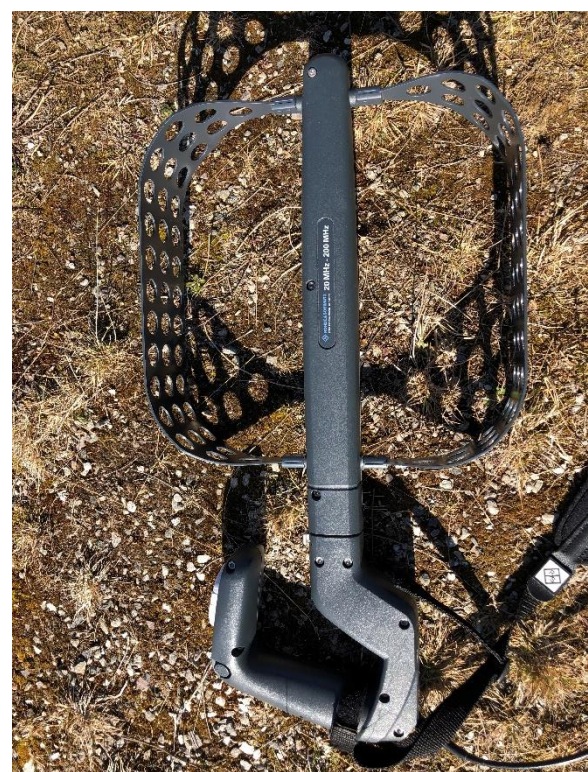
Figur 35: Bikonantenn 30 – 200 MHz. Emco 3104 s/n: 2418 kal: 2019-12-04



Figur 36: Rohde & Schwarz FSH4 Spektrumanalysator. s/n: 101669 kal: 2019-12-04



Figur 37: Elma 3055 Strömtång.



Figur 38: Rohde & Schwarz HE300 antenn 20 – 200 MHz.



Figur 39: Rohde & Schwarz HE300 antenn
9 kHz - 20 MHz.



Figur 40: Fisher F-33-1 Strömprobe. s/n: 140682 kal:
2014-07-18