

CHALMERS



Analys av högfrekvensstörningar och elnätskommunikation i distributionsnät

Fallstudie med frekvensomriktare i distributionsnät

Master of Science Thesis in Electric Power Engineering

HENRIK PÅHLSSON

Department of Energy and Environment
Division of Electrical Power Engineering
CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
Göteborg, Sweden, 2009

Analys av högfrekvensstörningar och elnätskommunikation

Fallstudie med frekvensomvandlare i distributionsnät

HENRIK S. L. PÅHLSSON

Department of Energy and Environment
CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
Göteborg, Sweden 2009

Analys av högfrekvensstörningar och elnätskommunikation
Fallstudie med frekvensomriktare i distributionsnät
HENRIK S. L. PÅHLSSON

© HENRIK S. L. PÅHLSSON, 2009.

Department of Energy and Environment
Chalmers University of Technology
SE-412 96 Göteborg
Sweden
Telephone + 46 (0)31-772 1000

Göteborg, Sweden 2009

Abstract

The use of Power Line Communication, PLC, as a communication solution for Automated Meter Reading, AMR, is popular by utilities in Sweden and other parts of the world due to demands of accurate and fast meter reading. However the use of the electrical grid as a communication medium is complex and sometimes problematic. This report handles some of the issues and problems that are important to understand when using the grid as a communications medium. Focus is mainly on investigating high frequency distortion in the Kristianstad power grid own by C4energi caused by a frequency converter. Measurements on site are done to investigate signal damping in the grid, different configurations for the frequency converter and signal strength of the PLC-system. The PLC-system that is used is an Echelon-system communicating on 75 kHz and 86 kHz. The results in this report can be applied to other systems communicating different frequencies in the CENELEC A-band.

The results from the measurements show that the communication fails due to the frequency converter and that the noise level is too high. Tests done during the measurements show how some of the high frequency noise can be avoided by changing settings in the converter but this is not enough. An important result was that the problem can be to solved by changing the position for the PLC-concentrator further away from the converter another solution can be to add a filter to the frequency converter.

COMSOL Simulations on connection cables are also done to analyze resistance due to skin effect at high frequency. The simulations are done to understand why stranded cables often works better then single stranded cables. The results from the simulations show clearly that it is better to use stranded cables then single stranded cables.

The report is written in Swedish.

Keyword: Power line communication, automated meter reading, high frequency, frequency converter, distortion, skin effect.

Sammanfattning

Att använda elnätet som kommunikationsmedium blir mer och mer vanligt i Sverige på grund av ny lagstiftning som kräver månadsvis avläsning av elmätare. Det finns även andra användningsområden för elnätskommunikation i distributionsnätet som till exempel bredband eller styrning av utrustning.

Användandet av distributionsnätet som kommunikationsmedium skapar problem då distributionsnätet inte är konstruerat för detta. I distributionsnätet finns flera källor till högfrekvensstörningar exempel på detta är utrustning som ansluts till nätet av kunder och även utrustning som används av nätbolagen i nätet.

Examensarbetet fokuserade på ett område i Kristianstad som ägs C4energi. C4energi använder elnätskommunikation för att överföra mätarvärden från elmätarna i elnätet. I det område där mätningarna för denna rapport genomfördes är elnätskommunikationen störd av en pumpstation som styrs av en frekvensomriktare. Frekvensomriktaren genererar ett högfrekvent brus i det område där elnätskommunikationen sker, 75 kHz och 86 kHz.

Vid sidan av detta problem genomfördes även en studie av anslutningskablar. Tidigare mätningar och erfarenhet har visat att kommunikationen oftast fungerar bättre när anslutning av elnätskommunikationsutrustningen sker med flerkardelig kabel än om den ansluts med enkelkardelig kabel. I rapporten undersöktes detta med hjälp av beräkningar, mätningar och simuleringar i COMSOL. Simuleringarna som genomförts visar att anledningen till skillnaden mellan kablarna beror på att resistansen ändras i de olika kablarna vid högre frekvens på grund av det som kallas "skin effect".

Resultaten i rapporten visar hur dämpningen i nätet samt styrningen av frekvensomriktaren påverkar elnätskommunikationen. Mätningarna visar tydligt att kommunikationen misslyckas på grund av de störningar som frekvensomriktaren genererar. Resultaten är tillämpningsbara för flera olika elnätskommunikationslösningar. Resultaten visar bland annat hur dämpningen i nätet påverkar elnätskommunikationen.

Förord

Arbetet har genomförts på Metrums kontor i Göteborg under hösten och vintern 2008/2009. Mätningarna för detta arbete har utförts i Kristianstads elnät som ägs av C4energi.

Jag vill tacka de som varit inblandade, Metrum Sweden AB och min handledare Michel Ingeldi för att jag fått genomföra arbetet, C4energi för att vi fick genomföra mätningarna i deras nät och att de tog sig tid och hjälpte oss speciellt Kenneth Andersson, Per Karlsson på Emotron för information och ritning på deras frekvensomriktare, min handledare på Chalmers Torbjörn Thiringer, ett stort tack till Tarik Abdulahovic som hjälpte mig med COMSOL simuleringar och med teori kring överföring i kablar samt min sambo Maria Ekdahl för all korrekturläsning och tålamod.

Innehåll

Abstract	V
Sammanfattning.....	VI
Förord.....	VII
Innehåll.....	VIII
1 Inledning.....	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte.....	2
1.3 Begränsningar.....	2
2 Elnätskommunikation.....	4
3 Standarder och indelning	5
3.1 Elnätsstandarder, CENELEC och FCC	5
3.2 EN 50 160	7
3.3 EMI och övertoner.....	8
4 PLC i distributionsnät.....	12
4.1 Uppbyggnad - princip	12
4.2 Koncentrator	13
4.3 Elmätare	13
4.4 Repeterare.....	14
4.5 Olika system	14
4.5.1 Echelon	14
4.5.2 Senea	15
4.5.3 Turtle	15
4.6 Kommunikation	15
4.7 Modulering.....	16
4.8 Amplitudmodulering	16
4.9 Frekvensmodulering.....	17
4.10 Fasmodulering.....	17
4.11 Spread spectrum tekniker	18
5 Distributionsnätverk – HF egenskaper	19
5.1 Störningar	19
5.1.1 Synkroniserade störningar	21
5.1.2 Osynkroniserade störningar	22

5.1.3	Enskilda störningar	22
5.1.4	Bakgrundsbrus.....	23
5.2	Impedans	24
5.3	Egenskaper för kabel i distributionsnät (400 V)	26
5.4	Långa ledningar	28
5.5	Dämpning	28
5.6	Luftledning i distributionsnät	29
5.7	Reflektion i skarvar.....	31
5.8	Övergång mellan kabel och luftledning.....	32
5.9	Minimering av reflektion.....	34
5.10	Stående vågor - förstärkning och utsläckning.....	35
6	Frekvensomriktare	36
6.1	Modulering.....	37
6.2	Filter.....	38
7	Inledande mätningar och genomförande	40
7.1	Genomförande av mätningarna	40
7.1.1	Mäta med Metrum HF-instrumentet	41
7.1.2	Analys med Metrum HF Controller	42
7.1.3	Mäta med Metrum SPQ	43
7.1.4	Analys med Metrum PQ Controller	44
7.2	Inledande mätningar i Kristianstad	46
7.3	Undersökande mätningar.....	52
7.3.1	Undersökning av utbredning av störningen i nätet.....	52
7.3.2	Mätning direkt på likriktaren.....	52
7.3.3	Byte av switchfrekvens.....	52
7.3.4	Jämförande mätning mellan faserna.....	53
7.3.5	Mätning med elkvalitetsmätare	53
8	Analys av anslutningskablar	56
8.1	Mätningar på kablar	59
8.2	COMSOL-simuleringar	61
8.2.1	Utvärdering av simuleringar	62
9	Resultat undersökande mätningar	68
9.1	Jämförelse med inledande mätningar.....	68
9.2	Skillnad mellan faserna.....	69

9.3	Spridning i nätet	70
9.4	Byte av switchfrekvens.....	75
9.5	Mätning med Elkvalitetsmätare	79
10	Slutsatser.....	81
11	Källor.....	82
12	Bilagor.....	84
12.1	Bilaga A – MATLAB-kod övertoner	84
12.2	Bilaga B – Karta över område i Kristianstad där mätningarna genomfördes.....	85
12.3	Bilaga C – Teknisk beskrivning Metrum HF-instrument	86
12.4	Bilaga D – Teknisk beskrivning Metrum SPQ-instrument.....	87
12.5	Bilaga E- MATLAB-kod skin effect.....	88
12.6	Bilaga F – Övertoner enligt EN 50 160.....	89

1 Inledning

1.1 Bakgrund

I september 2000 fick Statens energimyndighet tillsammans med Konsumentverket och företrädare för elbranschen i uppdrag att studera om mätperiodens längd och preliminärdebiteringen av elförbrukningen bör avskaffas. Detta arbete ledde fram till slutrapporten *Månadsvis avläsning av elmätare*. Med denna som bakgrund beslutade Regeringen att det nu var möjligt att införa tätare mätaravläsningar och att sänka gränsen för timvis mätning[1].

Som riktlinjer sattes upp att månadsvis mätaravläsning skall införas för kunder upp till och med 63 A innan 1 juli 2009. För kunder över denna gräns skall timvis avläsning införas. Beslutet togs med bakgrunden att detta skall förbättra elmarknadens funktion och underlätta för kunderna i och med avregleringen av marknaden som skedde 1996[1]. Tidigare har elnätsägaren haft krav på sig att läsa av mätarna minst en gång per år. Det finns även en tanke om att den nya lagstiftningen skall skapa incitament till förändrad elförbrukning hos slutkunder, då detta ger en tydligare och snabbare bild av olika energisparåtgärder.

Dessa nya lagkrav har medfört införandet av flera olika insamlingssystem för mätdata. Vanliga system är via GSM, via PLC (Power Line Communication, elnätskommunikation) eller via Radio. PLC är det område som detta examensarbete kommer att fokusera på.

I rapporten fokuseras på ett område i Kristianstad tillhörande C4 energis elnät, benämns huvudproblemet i rapporten. Detta område består av en nätstation innehållandes en transformator samt router för mätdatainsamling. Till nätstationen är ett antal lägenheter och villor anslutna samt en pumpanläggning med tillhörande frekvensstyrning. Pumpstationen används periodvis upp till två månader åt gången. Frekvensstyrningen av pumpen genererar mycket störningar inom det frekvensområdet som används för kommunikationen. Vilket skapar problem för elnätskommunikationen, när pumparna är igång slås kommunikationen ut och inga mätvärden går att samla in från omkringliggande elmätare.

1.2 Syfte

Syftet med examensarbetet är främst samla information om elnätskommunikation och högfrekvensstörningar samt att se som om det går att finna en lösning och att kartlägga huvudproblemet. Huvudproblemet i Kristianstad skall medföra ökad förståelse för liknade problem och hur optimeringar av elnätskommunikation kan genomföras. Syftet är även att få en bild av hur högfrekvensstörningar sprids i nätet. Kabelval och egenskaper i kablar och luftledningarna kommer också att granskas. Där vikt kommer läggas på anslutningskablar då detta har visat sig vara ett viktigt område som har stor betydelse.

Frekvensområdet, 5-95 kHz som används för elnätskommunikation är ofta utsatt för störningar från kraftelektronik. Syftet är att ta reda på hur dessa störningar undviks för att möjliggöra elnätskommunikation. Flera verkliga fall finns bland annat i Kristianstad där anslutna vattenpumpar med frekvensstyrning stör ut all elnätskommunikation inom respektive nätstation.

1.3 Begränsningar

De begränsningar som finns i arbetet bestäms bland annat av tillgången till information från tillverkare för frekvensomriktare och elnätskommunikationsutrustning. Förutom studie på anslutningskablar kommer endast de vanligaste typerna av kablar och dess egenskaper att tas upp. Studierna kommer främst att röra det berörda frekvensområdet med indelning enligt CENELEC-standard och det som där benämns A-band. Mätningarna är begränsade till ett område och en nätstation med tillhörande utrustning och ett fåtal mättillfällen.

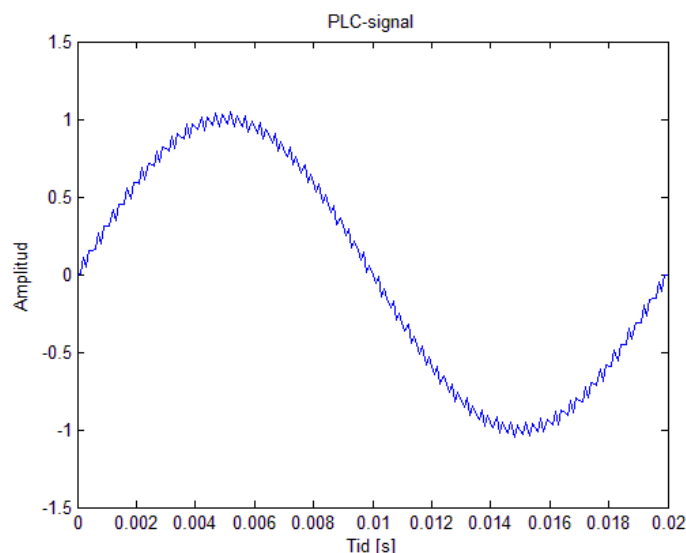
Teori

2 Elnätskommunikation

Power Line Communication, PLC, ibland även kallat Power Line Tele Communication, PLT, är ett samlingsnamn för flera olika tekniker för att sända data över eldistributionsnät. Detta har använts länge och inom flera olika tillämpningar även om användandet för elmätaravläsning (AMR, Automated Meter Reading) är relativt nytt. Tidigare användningsområden har varit radiokommunikation som redan 1930 användes i Sovjetunionen. Det används ofta för styrning av ljus, ventilation med mera i fastigheter[2].

Ett relativt nytt område inom elnätskommunikation är BPL, Broadband over Power Lines, där frekvenser upp till 30 MHz används [3], vilket möjliggör användandet av elnätet för datorkommunikation med hög överföring i teorin. Detta finns i Sverige främst för hemmabruk där elnätet hemma kan användas som datornätverk, det har även testats för distributionsnätet men har fungerat dåligt på grund av distributionsnätets svårhanterliga miljö som överföringsmedium. Mycket forskning genomförs på området. Ett användningsområde inom datorkommunikation har en stor marknad eftersom distributionsnätet har stor geografisk spridning och är ett billigt medium att använda för kommunikation. I och med avregleringen av elmarknaden och telemarknaden finns stor potential med flera potentiella kunder och användare.

I denna rapport kommer system på främst lågspänning < 1 kV och CENELEC A –bandet, att behandlas. Då det mest förekommande PLC-systemet inom AMR är uppbyggt på Echelon Power Line Transceivers[4] vilket kommunicerar primärt på frekvensen 86 kHz och sekundärt på 75 kHz. Signalen är överlagrad på elnätets grundton, 50 Hz, se Figur 1. Denna begränsning gör ändå att resultaten och slutsatserna kommer att kunna appliceras till andra system och spänningsnivåer, då denna rapport främst kommer att behandla de fysikaliska egenskaperna i elnätet. Se nästa kapitel för standarder och indelning.

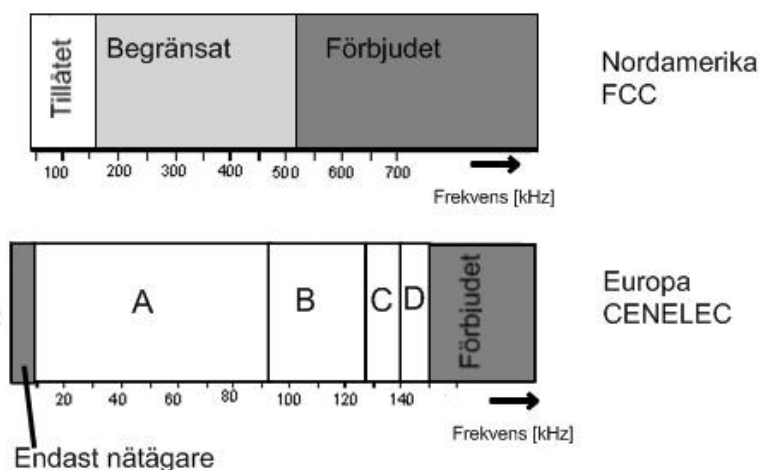


Figur 1. PLC-signal i elnätet, PLC-signalen är överlagrad på grundtonen, 50 eller 60 Hz.

3 Standarder och indelning

3.1 Elnätsstandarder, CENELEC och FCC

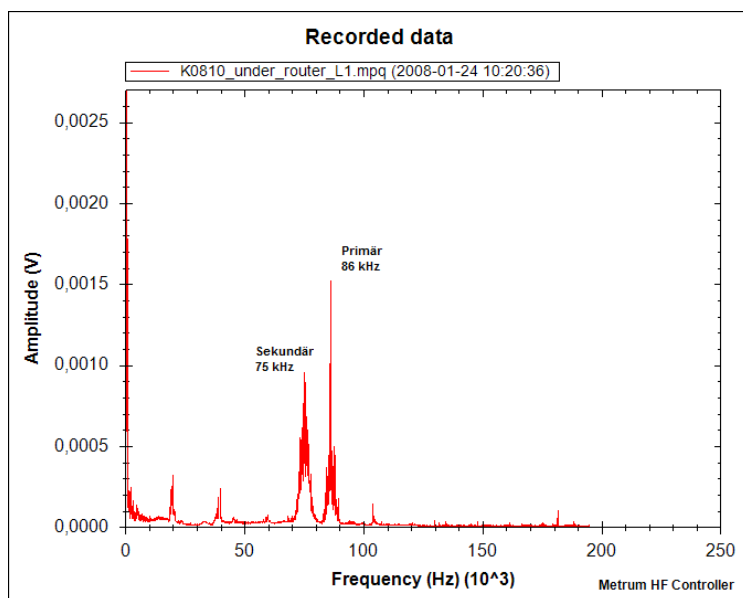
Elnätskommunikationen kan indelas i ett antal spänningsnivåer, lågspänning <1 kV, mellanspänning 1 kV – 100 kV och högspänning >100 kV. Kommunikationen delas även in i olika frekvensområden som bestäms i Europa av CENELEC-standard EN 50065-1 och av FCC i Nordamerika, se Figur 2 för indelningen enligt FCC och CENELEC [5]. I CENELEC indelas frekvensspektrumet i olika band. Banden som kallas A,B,C och D, där A får användas av nätbolag, B och D får användas utan protokoll och C med protokoll.



Figur 2. Indelning av frekvensbandet, FCC och CENELEC. I CENELEC indelas frekvensspektrumet i olika band. A,B,C och D där A får användas av nätbolag, B och D får användas utan protokoll och C med protokoll. I FCC får området 0 till 150 kHz användas fritt.

CENELECs indelning är även uppdelat på ett nätbolagsområde/nätägare och ett användarområde/kunder där B-, C- och D-bandet är tillägnat användare med olika krav på protokoll. A-bandet från 9 kHz till 95 kHz och området 3 kHz till 9 kHz benämnt "Electric suppliers" i Figur 2 är tillägnat nätbolaget/nätägare. I Figur 2 finns även den amerikanska standarden FCC, denna standard kommer ej att behandlas i rapporten men är bra att vara medveten om. Eftersom FCC inte är lika snäv som CENELEC så påverkar denna standard inte produkterna på den Europeiska marknaden, dessa behöver inte anpassas till FCC denna då CENELEC indelning ligger inom det tillåtna området för FCC-standarderna.

Som tidigare nämns kommer system på främst lågspänning < 1 kV och CENELEC A –bandet , Figur 2, att behandlas. Det system som främst behandlas i rapport är uppbyggda på Echelon Power Line Transceivers vilket kommunicerar primärt på frekvensen 86 kHz och sekundärt på 75 kHz[4], Figur 3.



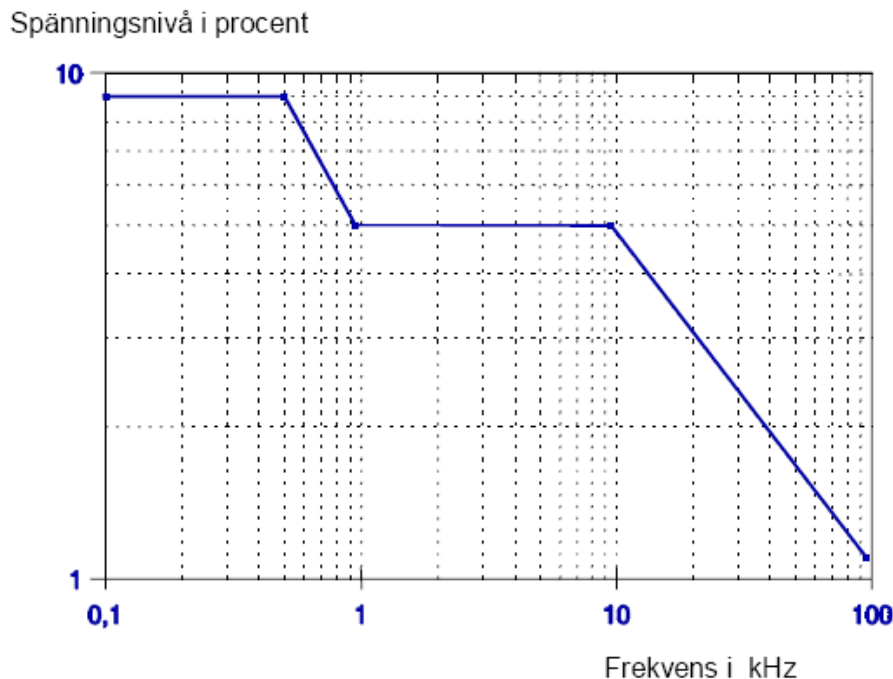
Figur 3. Echelons primära och sekundära frekvenser i A-bandet, figuren visar en skillnad i amplitud vilket troligtvis beror på medelvärdesbildning av signalen i mätinstrumentet.

3.2 EN 50 160

Den europeiska standarden CECELEC EN 50 160 sätter regler för störningar i elnätet, denna standard är den som elbolagen i Sverige följer, liknande standarder finns i övriga världen. I denna standard finns regler för till exempel spänningsnivå, grundfrekvens, transienter, övertoner med mera. Under kapitel "2.13 Signalering" finns begränsningen för hur stark signal som får användas se Figur 4. Citatet är hämtat från EN 50 160 och beskriver hur stor signalspänningen skall vara för att inte kommunikationssignalen i sig skall generera störningar.

"I vissa länder kan nätägare använda det allmänna distributionsnätet för överföring av signaler. Under mer än 99 % av dygnet skall tresekundersmedelvärdet hos signalspänningen vara mindre än eller lika med värdena i figur"[6]

Det vill säga, alla mätningar skall göras i tre sekunder sedan sammanställs ett medelvärde för varje tresekundersintervall och utav dessa får endast 1 % överstiga de värden som visas i Figur 4. Detta gäller per dygn.



Figur 4. Maximal signalstyrka enligt EN 50 160.

Det som tyvärr inte finns i standarden CENELEC EN 50 160 är reglering på hur stora störningar ansluten utrustning får generera. Det finns även bestämmelser för THD, Total Harmonic Distorsion, som inkluderar alla övertoner upp till den 40:e, vilket motsvarar $50 \times 40 = 2000$ Hz. Över detta finns inga riktiga regler förutom tillverkar regler till exempel FCC och VDE se kapitel EMI samt ovan nämnda signalstyrka som kan uppfattas som svårtyd.

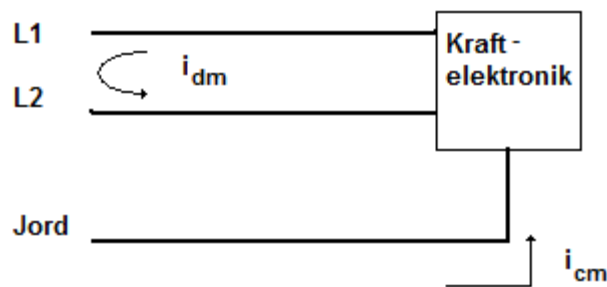
Anledningen till bristen på regler och riktlinjer kan bero på svårigheten att beräkna och uppskatta störningarna i nätet, då de varierar stort beroende på vart man mäter och övrig ansluten utrustning.

3.3 EMI och övertoner

EMI, Electro Magnetic Interference (elektromagnetisk störning), är ett vanligt begrepp inom modern kraftelektronik. I och med att mer och mer känslig utrustning införs i elnätet måste mer hänsyn tas till denna typ av störningar. För att beskriva utrustning som används i störda miljöer finns begreppet EMC, Electro Magnetic Compability, elektromagnetisk kompatibilitet, det vill säga utrustning som ej stör annan utrustning elektromagnetiskt.

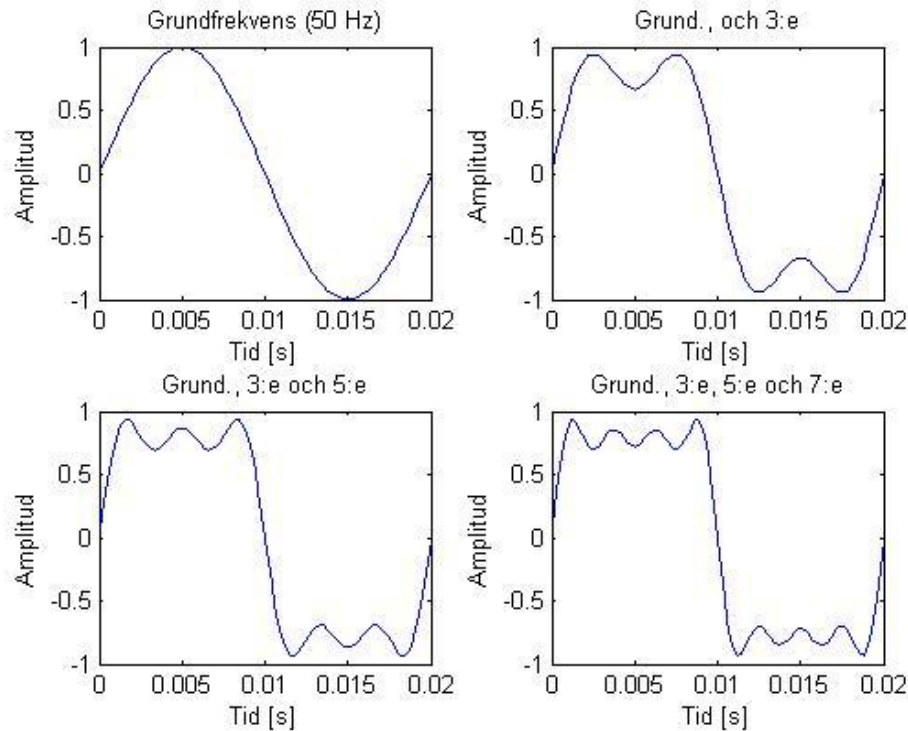
EMI kan delas in i två områden, det område som kommer koncentreras på i denna rapport är conducted (ledningsledd) det andra området är radiated (strålad). Conducted EMI är det som leds via ledningarna från störkällan till övriga nätet. Radiated beskrivs som det som sprids från en komponent till en närliggande komponent och/eller via ledare.

Conducted störningar kan delas in i två kategorier den ena är CM, common mode, och DM, differential mode. Common Mode störningar är störningar som är jämnt fördelade över ledningarna. Differential mode störningar är störningar skiljer mellan ledningarna. Störningarna som upplevs i nätet är en kombination av dessa. Filter och åtgärder för att undvika störningar behöver ta hänsyn till båda dessa typer av störningar. Se Figur 5 för förklaring.



Figur 5. Förklaring på elnätsstörningarna Differential Mode, i_{dm} , skillnaden mellan ledningarna och Common Mode, i_{cm} som är gemensamt för båda.

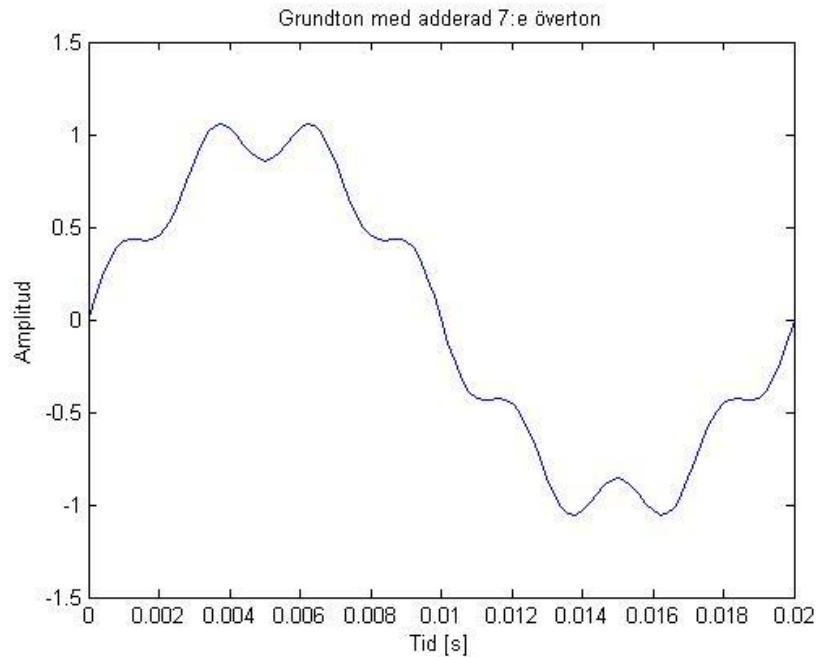
Kraftelektronik så som frekvensomriktare och dylikt är ofta en källa till EMI. När det gäller kraftelektronik kommer detta av funktionen i denna typ av kraftelektronik. Störningarna beror på att det är switchande kraftelektronik vilket inte producerar en sinusformad spänningskurva utan just switchad. Detta ger kraftiga ändringar i ström och spänning då detta switchas på och av med en till grundfrekvensen hög frekvens, storleksordningen 1-10 kHz för mindre utrustning är högre frekvenser vanligt [7]. Se Figur 6 för exempel på fyrkantsvåg, all kraftelektronik ger ifrån sig någon typ av switchad våg som, till exempel fyrkantsvågen, mer eller mindre beroende på hur bra utrustningen är.



Figur 6. Uppbyggnad av fyrkantsvåg, de enskilda övertonernas bidrag visas i figuren ovan, matlab-kod för figuren finns i Bilaga A.

Figur 6 visar hur en fyrkantsvåg byggs upp av övertoner till grundtonen, 50 Hz. Övertoner är definierad som frekvenser som är multipler på grundtonen, 50 Hz, det vill säga 100 Hz (2:a övertonen), 150 Hz (3:e), 200 Hz (4:e) och så vidare. I kraftelektronik är det de udda övertonerna som är dominerande, för enfasssystem uppträder 3:e, 5:e och så vidare. För jämt belastade trefasssystem försvinner jämna multipler av tre så som 3:e och 9:e övertonen, det beror på att den tredjeövertonen är lika stor för alla faserna och förskjutna 120 grader [8].

En mer kantig fyrkantsvåg innehåller fler övertoner, ju brantare kanter desto fler övertoner. Omvänt förklarar att en jämn sinuskurva innehåller väldigt lite övertoner. Figur 7 visar ett exempel på hur en sinuskurva kan se ut i elnätet, här är en grundton på 50 Hz med adderad sjunde överton, vilket kan finnas i kraftsystem med olika typer av kraftelektronik [7]. Övertonerna ifrån kraftelektronik sprider sig genom nätet och är svåra att filtrera bort helt och hållet.

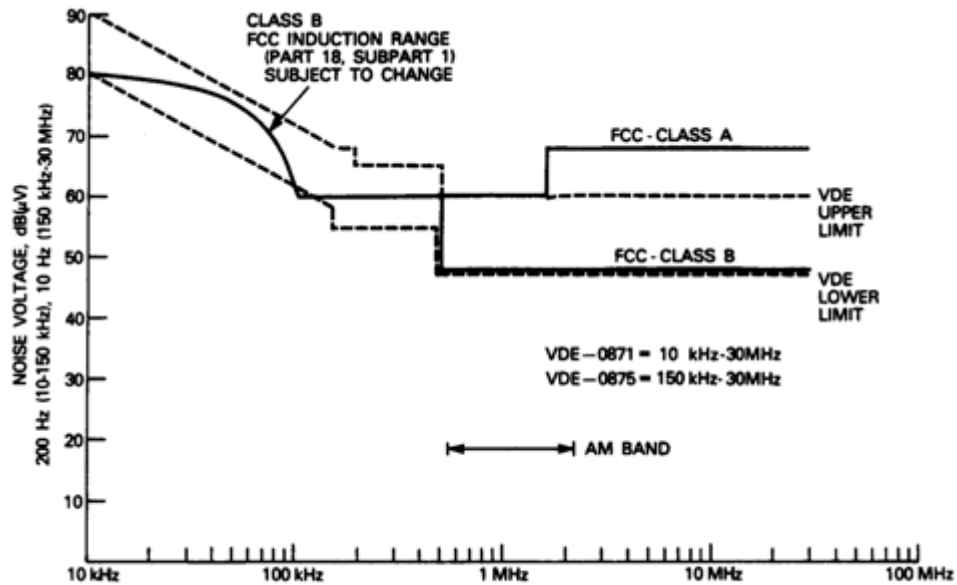


Figur 7. Exempel på ojämn sinuskurva på grund av dålig elkvalite, grundton, 50 Hz, med en adderad sjunde överton.

Oftast används filter för att ta bort de dominerande övertonerna 5:e, 7:e och så vidare. Efter dessa filter sitter ett lågpassfilter. Lågpassfiltret tar bort störningar från till exempel switchfrekvensen. Enligt [7] är det mest kostnadseffektiva sättet att försöka minska störningarna direkt i kraftelektronikutrustningen. Detta görs med bland annat snubberkretsar vilket minskar effektivt di/dt och även dv/dt om dessa konstruerats korrekt. Det finns ett antal olika sätt att konstruera snubberkretsar, det vanligaste för att undvika störningar är att montera en snubberkrets över transistorerna, thyristorerna eller IGBT:erna i till exempel en växelriktare.

För att få bort EMI är det i de flesta kraftelektronikkretsar nödvändigt med filter men generellt vill helst filter undvikas, speciellt för produkter anslutna direkt till distributionsnätet. Det finns flera anledningar för att vilja undvika filter. Passiva filter innehåller komponenter som åldras[9] detta gör att filter kanske inte filtrerar lika bra som de gjorde när de var nya. Ett annat problem som kan dyka upp när filter användes i kraftsystem är att det är svårt att dimensionera och avgränsa hur mycket som skall filtreras, även hänsyn till produkter runt omkring måste tas. Filter är även kostsamt främst genom förluster men även komponentkostnader vid behov av stora filter.

För att undvika att produkter stör ut varandra finns tillverkarrekommendationer som till exempel FCC och VDE, illustrerade i Figur 8.



Figur 8. FCC och VDE standard för tillverkare, anger högsta brusspänning för kraftelektronik med mera.

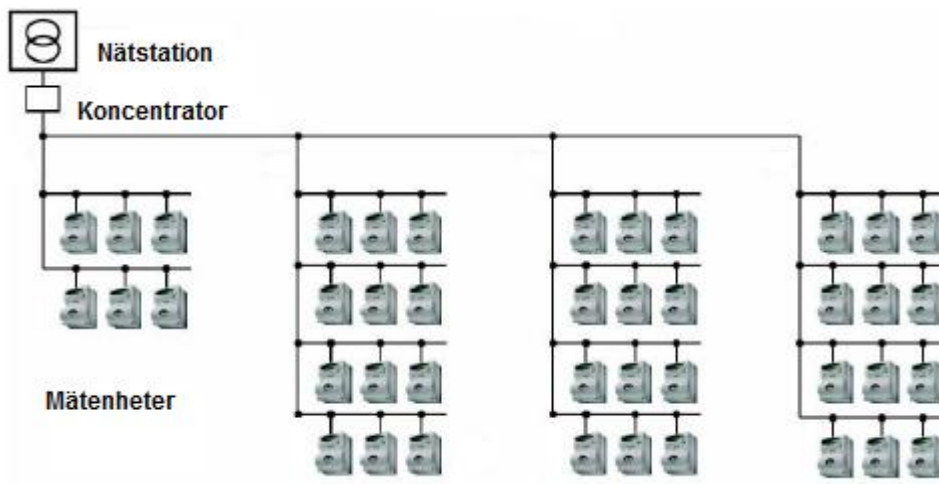
En jämförelse mellan Figur 8 och Figur 4 som är standarden EN 50 160 visar att de båda är ganska lika beroende på vilken standard som följs. Detta fungerar bra när endast en eller ett fåtal produkter finns i nätet men om flera produkter som ligger nära gränsen i FCC eller VDE finns eventuellt en chans att de går över gränsvärdena för nätet, Figur 4.

4 PLC i distributionsnät

Det elektriska distributionsnätet är ett mycket komplext medium för kommunikation, det innehåller ofta flera störkällor varierande i amplitud och frekvens. Nätet i sig uppträder ofta olika beroende på tidpunkt och anslutna produkter. Detta beror på varierande belastning och storlek när, var och hur olika produkter ansluts. Belastningen och apparater ger hela tiden varierande impedans i nätet vilket påverkar frekvensöverföringen. Signalöverföring på höga frekvenser är ofta känslig för sådana störningar.

4.1 Uppbyggnad - princip

Ett PLC-nätverk för AMR kan vara uppbyggt enligt Figur 9, vilket är ett lågspänningsnät 230/400 V med nätstation innehållande MV/LV transformator och utgrening till kunderna med AMR elmätare. I nätstationen är en koncentrator placerad som samlar in mätdata från elmätarna. Koncentratoren används även ibland för att skicka anrop till de olika mätarna när det är dags att skicka mätdata, så kallad tvåvägskommunikation.



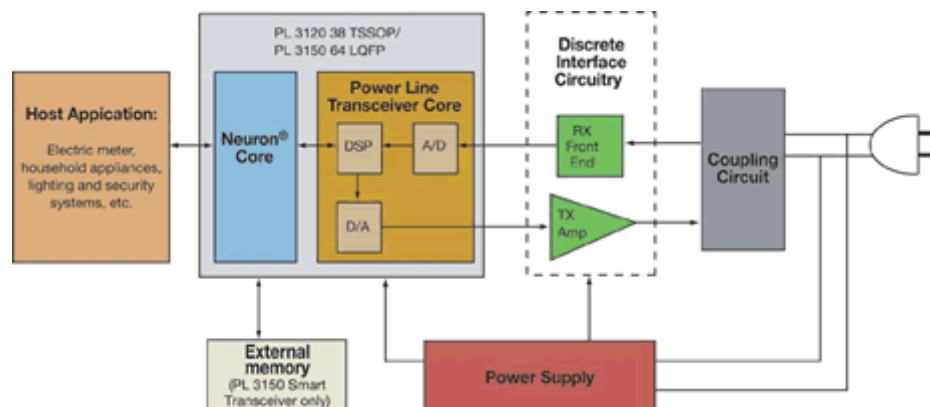
Figur 9. Uppbyggnad av ett PLC-nätverk för AMR, här en nätstation med flera anslutna elmätare (abonnenter) i grupper.

4.2 Koncentrator

Koncentrator även kallad router är den enhet som samlar in mätdata och sköter kommunikationen mellan elmätarna och databasmjukvaran. Kommunikationen från routern sker oftast via TCP/IP protokoll för att skicka insamlad information från elmätarna till databasen, vilket kan göras via Ethernet, radio, GSM eller ett antal olika system. Det finns olika principer för hur kommunikationen skall gå till. I koncentratorn sitter oftast en PLC-modul samma som i elmätaren se del Elmätare för mer information om hur denna fungerar.

4.3 Elmätare

AMR-elmätarna i ett PLC nätverk är standardmätare ofta med möjlighet att montera en GSM-modul, Radiomodul eller en PLC-modul beroende på vilken teknik som används. PLC-modulen som används är sändare och mottagare, se Figur 10 för schema över PLC-modulen.



Figur 10. Schema över PLC-modul, grundläggande uppbyggnad för Echelons modem.

I PLC-modulen finns en "Coupling Circuit" som skiljer ut PLC-signalen från 50 grundtonen, det vill säga den överlagrade signalen på elnätet, eller matar ut beroende på om mätaren sänder eller tar emot. Överföringen till elnätet sker via induktion med två spolar, en placerad i "Coupling Circuit" ut från PLC-modellen och en kopplad mellan ledaren och nollan i nätet.

Elektroniken i PLC-modulen har sin nätenhet ansluten till samma kablar som är anslutna till sändarenheten som figuren ovan visar. Efter kopplingskretsarna finns sändarförstärkare och mottagarenhet. Efter sändar/mottagarenheten finns A/D och D/A omvandlare som ger elmätaren en digital signal och skickar ut en analog signal på elnätet. Innan elmätaren sitter även utrustning för kommunikation som omvandlar signalen så att PLC nätet och elmätaren kan kommunicera. Här finns även felkorrigerande utrustning[10]. Se mer om detta i kapitlet Kommunikation.

4.4 Repeterare

Repeterare används där sträckan i nätet är för lång eller där dämpningen i kablarna är för hög för att signalen skall nå fram mellan koncentratorn och elmätaren. Funktionen är ganska lik elmätarens och koncentratorns sändar- och mottagardel. Repeteraren tar emot signalen i nätet, lagrar den, förstärker den och sänder den vidare. Mottagardelen och sändardelen är den samma som i elmätare och koncentrator.

4.5 Olika system

Inom elnätkommunikation finns flera olika system och lösningar på hur kommunikationen skall gå till. Principen för dessa system är ganska lika med mottagare, sändare och elnätet som överföringsmedium. Det skiljer mellan systemen om de är envägs eller tvåvägs kommunikation, vilken frekvens eller vilka frekvenser som används och hur moduleringen går till. Tre av de vanligaste systemen beskrivs mer ingående i följande kapitel.

Echelon är det system som används av C4 i Kristianstad och är det som fokuseras på i rapporten. Senea används även detta av C4 och är ett liknande system, Seneas system finns även i nätstationen där mätningarna genomförts men sändningarna regleras med ett tidsur eftersom de stör kommunikationen med Echelon-systemet. Turtle är ett system som skiljer sig markant från de andra genom att kommunicera på en mycket lägre frekvens än de andra, det använder 5 Hz-10 Hz [11].

4.5.1 Echelon

Echelon är det system som är vanligast och som denna rapport i huvudsak fokuserar på. Det använder sig av tvåvägskommunikation, en primär och en sekundär frekvens och modulering som kallas BPSK, läs mer om hur detta fungerar i kapitlet "Kommunikation". Kommunikationen startar genom att koncentratorn anropar mätarna en och en för att samla in värden, detta bestäms av ett databassystem[12]. Koncentratorn kommunicerar bara med en mätare åt gången men håller relativt hög hastighet, runt 2-4 kbits/s [13]. Modemet som används i elmätaren och koncentratorn kallas av Echelon PLT 22[13].

Det som skiljer Echelons system från ett rent BPSK system är att det använder sig av en sekundär frekvens. Den sekundära frekvensen används när elmätarna inte går att anropa med primära frekvensen eller för att sändarkvaliteten är för dålig. PLT-22 sänder alltid först på den primära frekvensen (I CENELEC A-band, 86 kHz) men byter till sekundära (75 kHz) om den inte får svar, detta upprepas en gång innan den börjar kommunicera med nästa mätare, det vill säga den anropar mätaren upp till fyra gånger två gånger per frekvens [14].

4.5.2 Senea

Senea använder sig också av området CENELECs A-band. Det använder sig av teknik som är "frekvenshoppande" tvåvägskommunikation. Systemet liknar FH-SS, Spread Spectrum Frequency Hopping men är lite modifierat och kallas ICSS, Integrated Circuit Spread Spectrum, för att följa EN 50065[15] Se kapitlet "Spread spectrum tekniker" hur detta fungerar. Frekvensen varierar mellan två frekvenspar 52,381 kHz, 66,667 kHz, 61,905 kHz och 76,190 kHz dessa är valda för att inte interferera med varandra. [15]

4.5.3 Turtle

Turtle skiljer sig från de andra systemen genom att det använder sig av ultrasnabbt band (UNB) och kommunicerar på 5-10 Hz samt att de endast kommunicerar i en riktning. Att systemet kommunicerar på så låg frekvens har några fördelar, främst att kommunikationen kan ske på mycket längre avstånd än högfrekventa system, tiotalsmil enligt tillverkaren som jämförelse klarar de andra systemen endast några hundratal meter[15]. En annan fördel är att detta kräver mindre energi från utrustningen[11]. Den största nackdelen är att kommunikation med så låg frekvens tar väldigt lång tid, för att överföra mätvärden från en mätare tar cirka 16-27 h jämfört med de andra systemen som klarar överföringen på mindre än en minut[11][15]. Systemet använder sig av nollgenomgångar i 50 Hz signalen och laddar ur eller laddar upp en kondensator vid nollgenomgång för att förskjuta denna lite. Alla halva perioder i 50 Hz grundfrekvensen delas in i grupper om tre, var tredje puls innehåller en modulering.

4.6 Kommunikation

Kommunikationen i ett PLC-system bygger på flera olika tekniker för att undvika de problem som uppstår vid kommunikation i distributionsnätet. Denna rapport fokuserar främst på de lösningar som används i Echelons-system men tar även upp några andra vanliga tekniker.

Vanligt inom elnätskommunikation är att använda sig utav två eller flera frekvenser, och på så sett undvika störningar inom ett specifikt område vilket är vanligt. Detta löser inte störningar som är utspridda över frekvensbandet eller högt bakgrundbrus men är en enkel lösning som undviker flera störningar.

4.7 Modulering

För att kunna sända information behöver signalen som sänds moduleras för att mottagaren skall uppfatta vad det är som sänds, detta finns det olika metoder för. De vanligaste är frekvensmodulering där frekvensen ändras, amplitudmodulering där amplituden ändras och fasmodulering där fasen skiftas i den skickade signalen. De vanligaste metoderna inom PLC kommer att beskrivas i följande kapitel. fördelar och nackdelar går igenom kortfattat.

4.8 Amplitudmodulering

ASK, "Amplitude Shift Keying", är en historiskt vanlig modulering i elnättskommunikation och har används i flera olika applikationer [3]. Metoden använder sig av förändringar i amplituden i signalen, samma frekvens men med variationer på amplituden. Enklaste metoden är med två nivåer, etta och nolla, för till exempel nolla så är amplituden noll. Mer avancerade metoder kan teoretiskt innehålla fler nivåer. Varje etta eller nolla sänds under den tid som benämns bitlängd på så sätt kan mottagaren avgöra hur många ettor eller nollor som sänds i rad. Metoden beskrivs matematisk med formeln[3].

$$S_{ASK}(t)=d(t)\cdot A\cdot\sin(2\pi f\cdot t)$$

Där $d(t)$ avgör amplituden och bestämmer bitvärdet, det vill säga 1 eller 0.

Denna metod har visat sig fungera dåligt i elnätet där störningar ställer till med stora variationer i amplituden och ligger signalnivån lågt så får mottagaren svårt att urskilja ettor och nollar vid störningar[3].

4.9 Frekvensmodulering

FSK från engelskan "Frequency Shifting Keying", använder sig av variationer i frekvensen för att kommunicera där den enklaste metoden sänder med en frekvens under en bitlängd för att representera etta och byter frekvens och sänder en annan frekvens för att representera nolla. FSK har varit det vanligaste systemet inom PLC[3]. I boken *Power Line Communications*[3] används exemplet med låg frekvens på 76,8 kHz och hög frekvens på 81,6 kHz detta ger ett 4,8 kHz mellanrum. Mellanrummet är det som bestämmer högsta överföringshastighet i det här fallet 4,8 kbits/s[3] för att fel-detektering med mera skall fungera. Metoden beskrivs matematiskt med formeln[3].

$$S_{FSK}(t) = A \cdot d(t) \cdot [b_1 \sin(2\pi \cdot f_1 \cdot t) + \bar{b}_1 \sin(2\pi \cdot f_2 \cdot t)]$$

Där \bar{b} är inversen av b och avgör vilken frekvens som skall skickas.

FSK är ett vanligt system på grund av att det är enkelt och billigt att implementera[3]. Det fungerar bättre i distributionsnätet än amplitudmodulering då det inte är lika känsligt för störningar som oftast drabbar amplitudförändringar mer.

4.10 Fasmodulering

BPSK, Bit Phase Shifting Keying, liknar de båda metoderna ovan. I princip är skillnaden att fasmodulering byter bitvärde genom att vrida fas men med en fast frekvens. De kan beskrivas som om sinuskurvan byter riktning, 180° i det här fallet. Därför får metoden två olika bitlägen.

$$S_{BPSK}(t) = A \cdot \sin(2\pi f \cdot t + d(t) \cdot \pi)$$

Fasmodulering är inte känsligt för amplitud- och frekvensvariationer som kan förekomma i distributionsnätet som de två tidigare modulationerna är. Det är ett enklare system som fungerar bra i elnätkommunikation [3]. BPSK används bland annat av Echelon men med en sekundär frekvens som kan växla mellan, om till exempel den primära är störd.

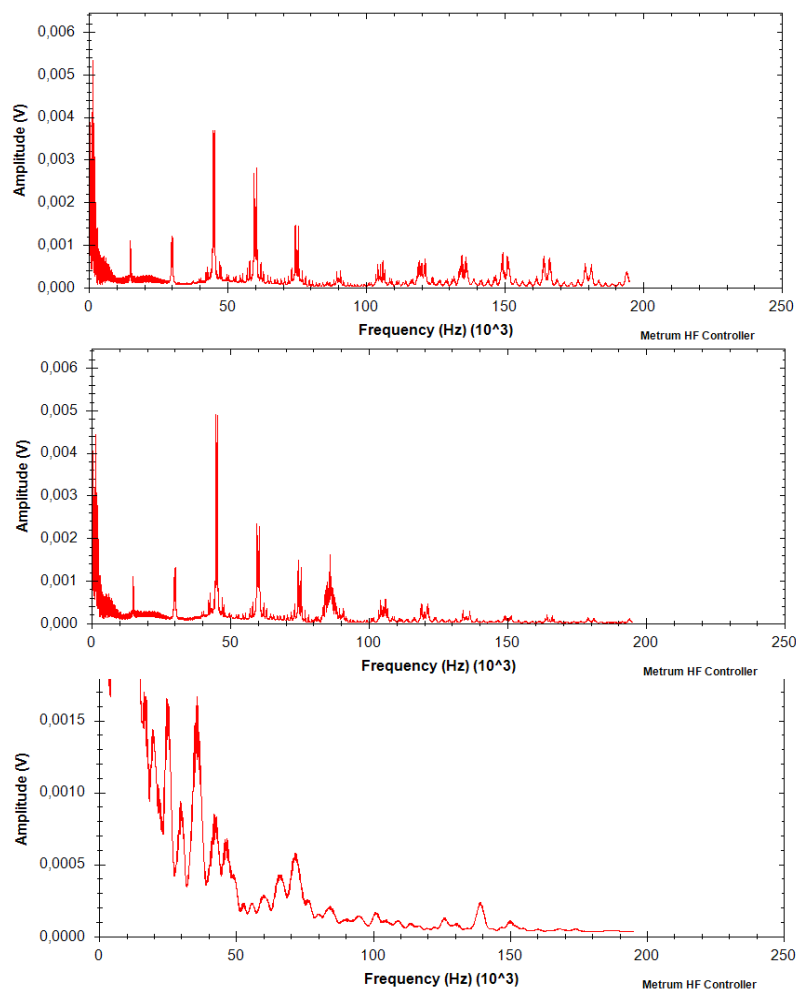
4.11 Spread spectrum tekniker

SST, Spread Spectrum Techniques, bygger på en princip som utvecklats för militärt bruk för att undvika störningar i radiokommunikation[3]. Dessa tekniker sprider ut signalen över ett bredare frekvensspektrum och undviker på så sätt störningar i form av enskilda frekvenser och andra smalbandiga störningar. Systemet använder sig av en modulator som skickar signalen och sprider ut den i bredare frekvensband och en demodulator som samlar ihop signalen. Det finns flera olika tekniker för detta bland annat PN-DS, Pseudonoise Direct Sequencing, och FH, Frequency Hopping,[3]. PN-DS använder sig av BPSK teknik med fashopp som moduleras för att bli bredbandigt frekvensspektrum runt bärfrekvensen. Frequency Hopping använder sig istället av FSK-teknik och hoppar mellan bärfrekvenser, varje etta eller nolla innehåller flera olika frekvenser som byts med olika sekvenser. En etta kan innehålla tre olika frekvenser $f_1+f_2+f_3$ och en nolla innehåller tre efterföljande frekvenser där varje är lägre än de tre första till exempel $f_1-\Delta f +f_2-\Delta f +f_3-\Delta f$ för att representera en nolla. Spread Spectrum teknikerna fungerar mycket bra i elnätet då de undviker smalbandiga störningar och är ungefär likvärdig de andra på att undvika bredbandiga störningar som de tidigare nämnda teknikerna[3].

5 Distributionsnätverk - HF egenskaper

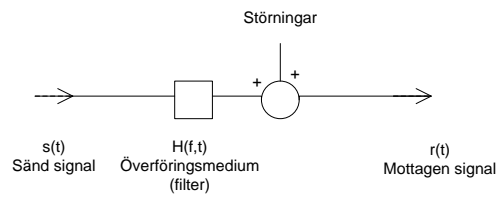
5.1 Störningar

Ett distributionsnätverk är en komplex miljö för dataöverföring. Det finns mängder av applikationer och produkter som genererar störningar. Störningarna kommer från kraftelektronik så som frekvensstyrning, olika kompensering som kondensatorbatteri, likriktare, omvandlare men även konsumentprodukter som datorer, ljusdimmer med mera. Allt detta ställer höga krav på kommunikationsutrustningen. Störningar brukar variera i frekvens och tid, vissa störningar håller sig inom ett smalt frekvensområde andra sprider ut som över ett stort område. Störningarna varierar även i tidsintervall från kortare störningar som transienter upp till längre störningar från till exempel kraftelektronik, som kan vara konstant under tiden. Figur 11 visar exempel på olika störningar, bakgrundstörning och datorbrus som är stokastiska och varierar över hela frekvensområdet. Störningar från ljusdimmer och bormaskiner beror till stor del på övertoner och uppträder periodvis i frekvensspektrumet som översta grafen i figuren nedan.



Figur 11. Störningar från konsumentprodukter. Ovan exempel på periodisk störning, mitten visar osynkroniserad störning och nedan mer stokastisk.

I en signalmässig modell är det enklast att illustrera elnätet som i Figur 12, där den sända signalen är $S(t)$ och mottagna signalen är $r(t)$ därigenom störningarna är adderade till $s(t)$.



Figur 12. Överföringsmodell elnätskommunikation, med de bidragande funktionerna till $r(t)$

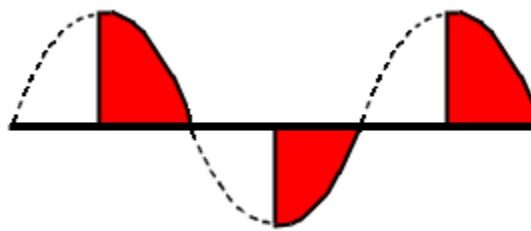
Störningar i elnätet delas vanligen in i upp till tre eller fyra grupper, dessa är:

- Synkroniserade störningar.
- Osynkroniserade störningar.
- Enskilda händelser.
- Bakgrundsbrus.

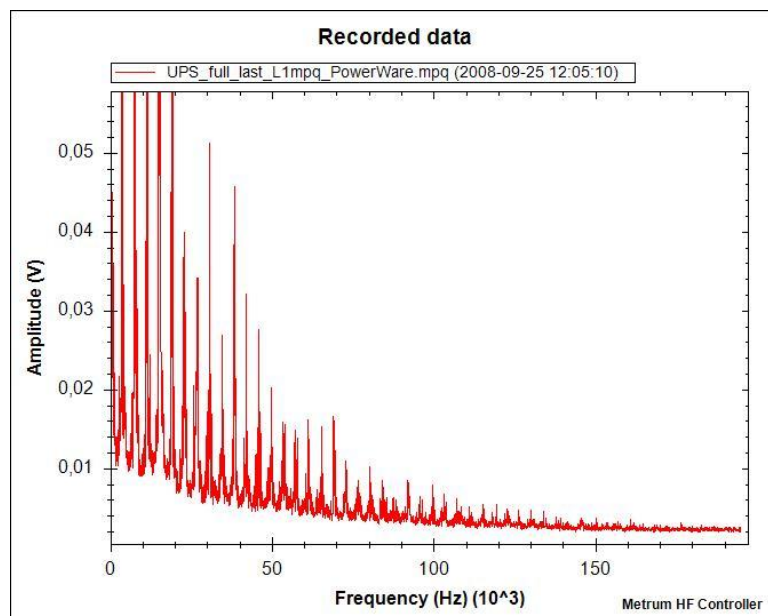
Uppdelningen varierar i litteraturen men huvudsakligen är indelningen av synkroniserade, ej synkroniserade och bakgrundsbrus. Viss litteratur tar även upp enskilda störningar och/eller smalbandigstörning.

5.1.1 Synkroniserade störningar

Synkroniserade störningar är störningar som är synkroniserade med elnätsfrekvensen. Störande apparatur är till exempel dimmer eller kopieringsapparater dessa skapar övertoner på den dubbla elnätsfrekvensen 100 Hz[16]. Störningarna från till exempel en dimmer kommer från styrningen som reglerar vid varje nollgenomgång det vill säga dubbla grundfrekvensen se Figur 13, vilket ger upphov till en grundton (100 Hz) och ganska stora övertoner[16]. Eftersom signalen bryts direkt ger detta störningar i såväl höga som låga frekvenser. Synkroniserade störningar kommer ofta ifrån någon sorts kraftelektronik i nätet, det kan vara motorstyrning, frekvensomriktare och likriktare som exempel, se Figur 14. Enligt EN 50-160 finns begränsningar för övertoner upp till och med den 40:e övertonen. Om detta skall följas kan störningar som är multipler över 40:e klassas som osynkroniserade störningar. Synkroniserade störningar som är multipler på en annan frekvens än grundfrekvensen eller som beror på en annan frekvens till exempel en switchfrekvens kan ibland även ses som synkroniserade störningar, i denna rapport kommer endast frekvenser som beror på grundfrekvensen klassas som synkroniserade störningar.



Figur 13. Inströmmen till en ljusdimmer, de röda fälten är strömmen som matas och streckade området är när dimmern bryter.



Figur 14. Exempel på synkroniserad störning, här från en UPS.

5.1.2 Osynkroniserade störningar

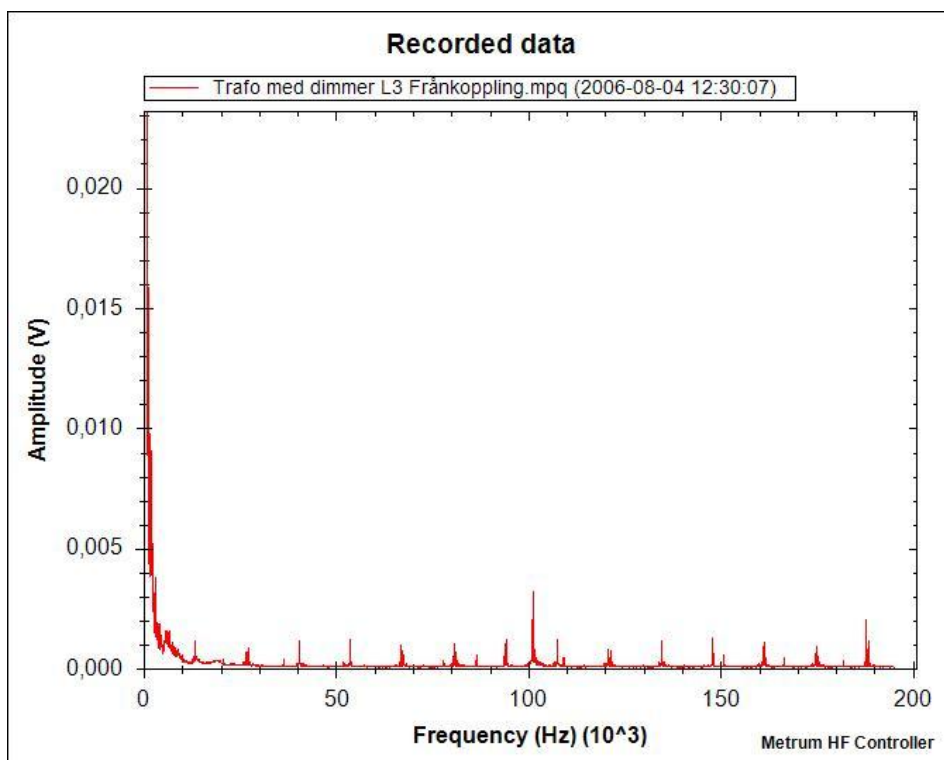
Denna kategori av störningar är inte övertoner till grundfrekvensen eller beroende på denna. En vanlig källa till dessa störningar är TV-apparater som varje 63,5 μ s skickar ut en synkroniseringssignal med frekvensen 15 734 Hz med tillhörande övertoner [16]. För gamla TV apparater är detta inget problem för PLC kommunikation då denna störning är fixerad och då lätt kan undvikas. Moderna skärmar och speciellt skärmar till datorer är ofta designade för flera olika frekvenser och synkroniseringstider vilket skapar ett problem, då det inte längre lätt går att konstruera utrustningen runt dessa störningar. Hushållsmaskiner ger också ofta upphov till osynkroniserade störningar då det är vanligt förekommande med motorer av typen enfasseriemotor så kallade universalmotorer[16]. En annan källa till osynkroniserade störningar är lågenergilampor även om dessa störningar är låga så finns de. Lågenergilampor använder en switchfrekvens på ungefär 15 kHz.

5.1.3 Enskilda störningar

Enskilda störningar kommer ifrån händelser i nätet som inte är kontinuerliga. Dessa brukar variera i amplitud och tid, de kommer ifrån inkoppling eller bortkoppling av, brytare i nätet, vid till exempel omkoppling eller inkoppling av till exempel kondensatorbatterier och lindningsomkoppling är också vanligt. Dessa störningar brukar inte vara något problem för PLC-kommunikation då detta undviks med enkel felrättande kod eller genom att skicka signalen igen, se kapitlet "Kommunikation". Problem kan uppstå om de finns flera källor som genererar dessa störningar eller om störningarna är vanliga.

5.1.4 Bakgrundsbrus

Bakgrundsbrus är stokastiskt och ofta svårt eller omöjligt att bestämma källorna till. Detta är summan av flera olika mindre störningar i nätet och hålls ofta konstant under längre tider men följer till viss del lasten i nätet. Även enskilda störningskällor kan ibland uppfattas som bakgrundsbrus då de genererar en störning med ett brett frekvensspektrum. Högt bakgrundsbrus är vanligt hos olika kraftelektroniklösningar som filtrerar bort de huvudsakliga störningarna så som övertoner och lämnar kvar de som uppfattas som bakgrundbrus[16]. Figur 15 visar ett exempel på bakgrundbrus från en HF-mätning med Metrum HF instrument. Det som ses i figuren är bland annat switchfrekvensen från transformatorn i mätinstrumentet runt 100 kHz, samtliga frekvenser över grundtonen ligger mycket lågt i förhållande till grundspänningen.



Figur 15. Bakgrundbrus.

5.2 Impedans

Produkterna som används för elnätskommunikation är inte byggda eller anpassade för ett specifikt nät utan tillverkade med generella egenskaper. Generellt för kommunikation i trådmedium är att impedansmatchning kan behövas för att uppnå optimal överföring detta gäller speciellt för höga frekvenser i kHz området och uppåt. Impedansmatchning är mycket svårt i elnät speciellt i lokala distributionsnätverk, då impedansen i dessa nätverk varierar konstant beroende på vad som är anslutet och hur stort nätet är vid tidpunkten.[17]

I rapporten *RF Impedance of United States and European Power Lines*[17] är mätningar gjorda för att kartlägga impedansen i distributionsnät och dess frekvensberoende. Mätningarna är gjorda i Europa för att visa hur impedansen kan variera i frekvensspektrumet för Cenelecs A-band. Denna undersökning visar hur europeiska elnät varierar beroende på frekvens, se för olika frekvensvärden hur impedansen varierar i Tabell 1.

Tabell 1. Impedansvärden i europeiska elnät.

Frekvens	Reellt Z		Imaginärt Z	
	Min	Max	Min	Max
20	0	12,2	7,0	10,5
100	0,1	90,6	7,9	78,7
200	3,3	41,5	12,6	49,8
500	4,1	234	126	157
1000	6,1	320	91	132

För att få en uppfattning på hur impedansen varierar är det intressant att se hur olika hushållsapparater påverkar impedansen och hur varje apparats impedans varierar beroende på frekvensen. Att varje specifik apparat varierar beroende på frekvensen har i sammantaget inte så stor betydelse för den totala impedansen i nätet men det ger en bild på hur nätet kan variera under olika timmar på dygnet, se Tabell 2[3].

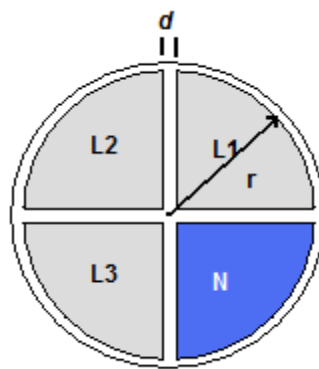
Tabell 2. Impedansvariation för olika hushållsprodukter.

Produkt	Effekt	Impedans för produkten [Ohm]				
		Frekvens [Hz]				
		50	50 000	100 000	150 000	200 000
Kaffebryggare	1200	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
Diskmaskin	1200	4,75	0,02	0,01	0,006	0,004
Mixer	127	8,25	23,5	10,4	6,43	4,91
Ugn	2500	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Strykjärn	1200	0,85	0,35	0,4	0,46	0,52
Brödrost	1150	3,5	0,03	0,02	0,01	0,007
Tvättmaskin	512	5,25	32,5	27,2	21,5	17,4
AC	860	45	11,2	9,75	6,35	4,45
Fläkt	88	11,9	27,2	18,9	12,6	8,5
Hårtork	600	4,72	47,1	39,2	24,2	12,7
Radio	70	21,2	23,3	6,66	4,28	3,15
TV	240	0,05	0,06	0,02	0,01	0,006
Antennförst.	4	100	21,4	13,3	4,7	5,09
Dammsugare	600	47	8,72	3,13	2,01	1,36
Lampa	75	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63
Värmeelement	2000	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
PC	500	6	0,27	0,3	0,315	0,33

Nätet belastas olika under hela dygnet och varierar över året, störst belastning är under vintermånaderna och mitt på dagen. Detta bidrar till impedansskillnad i nätet vilket i sin tur påverkar dämpningen av signal och brus i nätet[18].

5.3 Egenskaper för kabel i distributionsnät (400 V)

Detta kapitel kommer endast att inrikta sig på en typ av kabel den som anses vara den vanligaste kabeln i Europa[3] alternativt kunde en femledarkabel används men dessa är lika i uppbyggnad, skillnaden är att femledarkabeln innehåller även en jordledare. Kabeln är uppbyggd enligt Figur 16. Denna kabel är ej symmetrisk ur spänningssynpunkt då L1, L2 och L3 håller samma spänning med 120 ° förskjutning mellan varandra och den fjärde ledaren PEN, Protective Earth and Neutral, är spänningslös. Att den är osymmetrisk påverkar inte högfrekvensöverföringen nämnvärt visar mätningar[3], jämfört med kablar som är mer vanliga i USA tre ledare med PEN-ledaren som skärm runt de tre faserna[3] som kan tyckas vara lämpligare för högre frekvenser då de mer påminner om koaxialkablar.



Figur 16. Uppbyggnad av en fyrledarkabel i genomskärning

I Figur 16 kan observeras att området mellan till exempel L1 och L2 är smalt jämfört med radien $v \ll d$ vilket leder till att området kan ses som en kondensator som leder till hög kapacitans mellan L1 och N, L1 och L2, L2 och L3 och L3 och N men låga mellan N och L3 och L1 och L3. Detta ger kapacitansen per längdenhet[3]:

$$C' = 2 \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \frac{r}{d} \quad \text{Ekv 1}$$

Kabelns uppbyggnad ger även upphov till induktans, vilket kommer från de parallella planen mellan ledarna. Induktansen per längdenhet fås av:

$$L' = \mu_0 \cdot \frac{r}{2 \cdot d} \quad \text{Ekv 2}$$

Att de olika ledarna kommer att få olika resistansen i kabeln beror på "skin effekt", strömmen kommer att ledas olika i de tre ledarna. L1 och L3 får samma värde medans L2 skiljer lite men mycket lite, vilket gör att resistansen kan beskrivas genom:

$$R' = \frac{\rho_{ledare}}{d_{skin\ effect}} \left(\frac{1}{\pi 2r} \right) \quad \text{Ekv 3}$$

”Skin effect” djupet ges av formeln:

$$d_{skin\ effect} = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}} \quad Ekv\ 4$$

Formeln beskriver hur djupt strömmen flyter i ledaren, när $d < r$ flyter strömmen i hela ledaren.

Läckkonduktansen per längdenhet blir

$$G' = 2\pi f \cdot C' \cdot \tan(\delta) \quad Ekv\ 5$$

Här är $\tan(\delta)$ förlustfaktor för valt isolationsmaterial, vilket vanligtvis är PVC som till exempel för PEX kabel [19]. De ovan angivna formlerna kan nu användas i för att skapa den karakteristiska impedansen som är viktig för att beskriva egenskaper för olika kablar.

$$Z_l = \sqrt{\frac{R+j\omega L}{G+j\omega C}} \quad Ekv\ 6$$

Propageringskonstant som beskriver hur fort en våg rör sig i mediet det vill säga ledningen, fås av formeln:

$$\gamma = \sqrt{j\omega C(R + j\omega L)} \quad Ekv\ 7$$

5.4 Långa ledningar

För att beskriva överföring i längre ledningar och dess frekvensöverföring behövs mer avancerade beräkningar.

$$Z(l) = \frac{Z_L \cdot \text{Cosh}(\gamma l) + Z_0 \cdot \text{Sinh}(\gamma l)}{\text{Cosh}(\gamma l) + \left(\frac{Z_L}{Z_0}\right) \cdot \text{Sinh}(\gamma l)} \quad \text{Ekv 8}$$

Denna ekvation har visat sig stämma ganska bra för frekvenser upp till de berörda frekvenserna som undersöks i detta arbete. [19]

5.5 Dämpning

Med hjälp av formlerna som erhöles i kapitlet Egenskaper för kabel kan dämpningen i ledningen beräknas med hjälp av formeln, nedan:

$$D(f, l) = 20 \cdot \log_{10}(e^{\alpha(f) \cdot l}) = 8,686 \cdot \alpha(f) \cdot l \quad \text{Ekv 9}$$

Där α är en dämpningsfaktor som beror på ledningens resistans, karakteristiska impedans och konduktans:

$$\alpha(f) \approx \alpha_R + \alpha_G = \frac{R'}{2 \cdot Z_L} + \frac{G' \cdot Z_L}{2} \quad \text{Ekv 10}$$

Formlerna för dämpning och dämpningsfaktor ger goda approximationer för hur signalen dämpas i nätet[3].

5.6 Luftledningar distributionsnätet

Luftledningar börjar bli mindre vanliga i distributionsnät men tas upp kortfattat i detta kapitel. Luftledningar tillsammans med kablar i distributionsnätet skapar vissa problem, som beskrivs i kapitlet "Reflektion i skarvar.". Den största skillnaden mellan kabel och luftledning utifrån ett överföringsperspektiv för kommunikationssignal är att kapacitansen är mycket lägre i en luftledning och att induktansen är mycket högre jämfört med en kraftkabel.

För att beräkna de olika egenskaperna behövs först information om hur ledningen är upphängd och avstånd mellan de olika faserna, då detta är viktigt för att beräkna de olika konstanterna. Formlerna nedan används för att beräkna resistansen[20]:

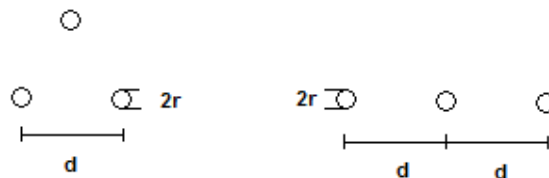
$$R_{Cu} = \frac{17,5}{a} \text{ ohm/km} \quad \text{För kopparledare}$$

$$R_{Al} = \frac{28}{a} \text{ ohm/km} \quad \text{För aluminiumledare}$$

Induktansen beräknas med hjälp av formeln och Figur 17 som beskriver två vanliga ledningsplaceringar:

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{\mu_r}{4} + \ln \frac{d}{r} \right) \quad \text{Ekv 11}$$

Där μ_r är permeabilitet för ledarmaterialet, μ_0 är permeabilitet för luft, r är ledarradie och d är avståndet mellan ledarna.



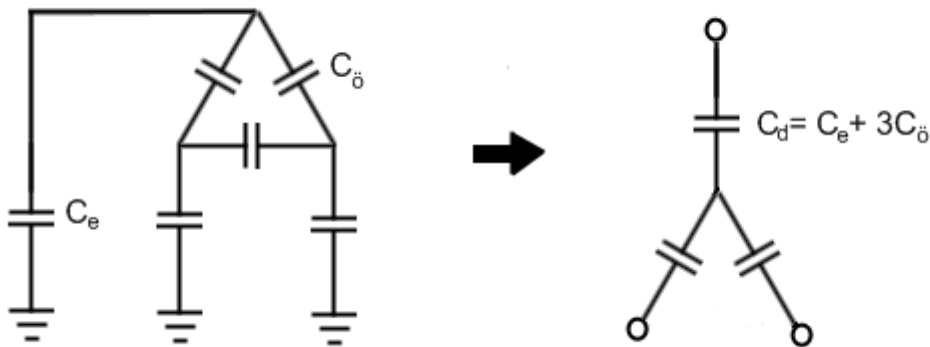
Figur 17. Olika ledarplaceringar.

Kapacitansen i ledningen fås genom att beräkna kapacitansen mellan ledarna och marken detta görs med hjälp av ekvation 12.

$$C = \varepsilon \frac{l \cdot 2r}{d}$$

Ekv 12

Där ε är materialets permitivitet/dielektriska konstant, l är ledningslängden, d är avståndet till ledare eller till marken och r är ledningsradien. För att få fram driftkapacitansen räknas de ovan beräknade samman enligt $C_d = C_e + 3C_0$ sambandet förklaras i Figur 18.



Figur 18. Beräkning av driftkapacitans i luftledningar.

Kapacitansen är högre i kabel jämfört med luftledning på grund av att det är längre mellan ledarna och att luft har lägre dielektricitetsvärde än kabelisoleringen.

5.7 Reflektion i skarvar.

Distributionsnätet består oftast av flera olika sorters kablar och ledningar, vilket kan bero på flera olika anledningar så som utbyggnad, ombyggnad eller övergång från luftledning till jordkabel. Detta i sin tur medför att de kan finnas flera kablar och ledningar med olika impedans i nätet. Variationen av kablar och impedans har liten eller ingen betydelse vid 50 Hz och normalt användande av nätet men kan medföra problem vid överföring av information via höga frekvenser. Vid övergångar mellan olika impedansnivå oftast bildas en reflektion. Detta är lätt att förstå med enkel fysik, då liknande fenomen uppstår vid ljus som passerar genom olika medium. Vilket beror på tjocklek och täthet i materialet och våglängd på ljuset. För att beskriva detta fenomen i ledningar kan formeln nedan användas[3]:

$$r = \frac{Z_{L2} - Z_{L1}}{Z_{L2} + Z_{L1}} \quad \text{Ekv 13}$$

Ger förhållande mellan reflekterad våg och fortskridande våg.

För att sedan beräkna överförd energi genom övergången/skarven används ekvation 14.

$$\frac{P_T}{P_E} = 1 - |r|^2 \quad \text{Ekv 14}$$

Där P_T är överförd energi och P_E är tillförd energi.

För att se hur stor del av vågen som reflekteras används ekvation 15.

$$\frac{P_R}{P_E} = |r|^2 \quad \text{Ekv 15}$$

P_R är reflekterad energi.

5.8 Övergång mellan kabel och luftledning

I ett exempel från Klaus Dostert bok *Powerline communications*[3] på övergång mellan luftledning och kabel används ekvation 13, där övergången mellan en kabel med impedansen Z_{LE} till en luftledning Z_{LF} med ger reflektionsfaktorn -80,7 %. Då är de olika impedanserna 50 Ω för kabeln och 470 Ω för luftledningen.

$$r_{EF} = \frac{50 - 470}{520} = -80,7 \%$$

Går övergången åt andra hållet, från materialet med hög impedans till det med låg, erhålls reflektionsfaktorn 80,7 %.

$$r_{FE} = \frac{470 - 50}{520} = 80,7 \%$$

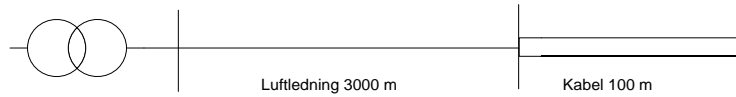
Detta betyder att endast 19 % av vågen överförs genom en övergång mellan kabel och luftledning om signalen senare går genom en luftledning till kabel övergång till finns endast runt 3,7 % kvar av signalen. Exemplet visar tydligt vilket problem liknande övergångar kan göra för signalöverföringen i distributionsnät.

Extremfallen för reflektion- och transmitteradevågor är när ledningen är öppen eller kortsluten. Kortsluten är ett fall som kan bortses ifrån i distributionsnätet. Öppen ledning ger en total reflektion:

$$r_{FE} = \frac{\infty - Z}{\infty + Z} = 100 \%$$

Den oändliga impedansen kommer från övergången från ledning till luft det vill säga den öppna änden, vilket medför att den reflekterade strömmen blir negativ eller 180 ° ur fas och spänningen är den samma.

För att få en förståelse för vad detta kan göra i distributionsnätet kan det vara lämpligt att titta på hur dessa reflektioner och speglingar kan spridas i nätet. Som exempel används nätet i Figur 19 som består av en kraftkälla/transformator, 3000 m luftledning och 100 m kabel.

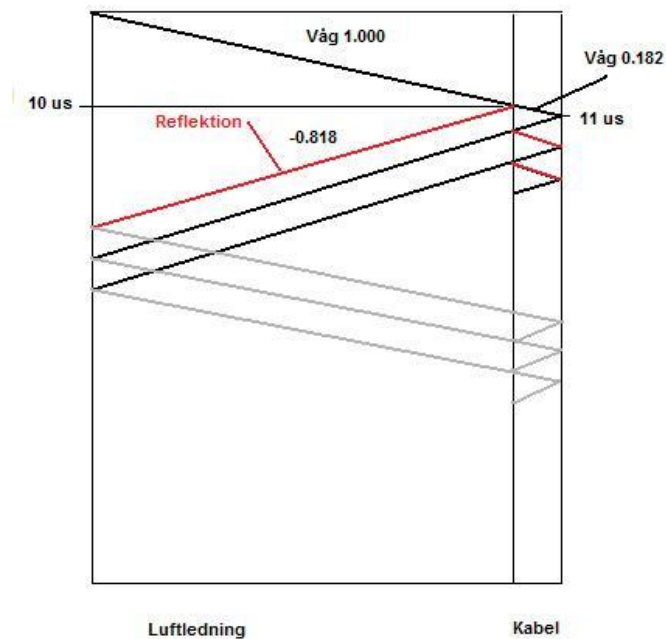


Figur 19. Exempelnät för reflektion.

Egenskaper för nätet:

Luftledning:	Karakteristisk impedans: 400Ω	Kabel:	Karakteristisk impedans: 400Ω
	Längd: 3000 m		Längd: 100 m
	Propageringshastighet: 300000 km/s		Propageringshastighet: 100000 km/s
	Restid genom ledningen: $10 \mu\text{s}$		Restid genom kabeln: $1 \mu\text{s}$

Exemplet redovisas i ett Lattice-diagram, Figur 20, där vågen utbreder sig längs med x-axeln, x-axeln är även uppdelad i luftledning och kabel. Y-axeln visar tidsaxeln.



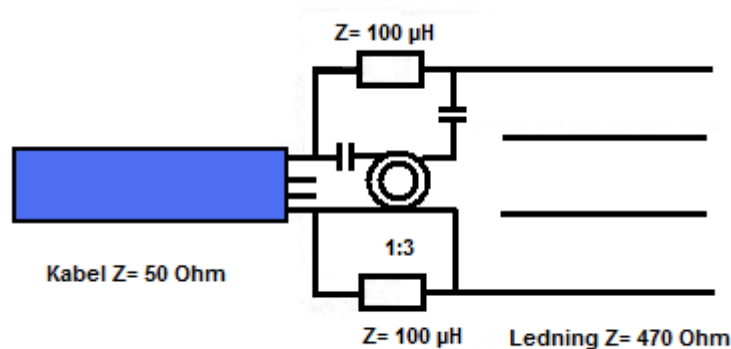
Figur 20. Lattice-diagram med reflektioner och vågutbredning i nätet för transienter.

Den inkommande vågen (start längst upp till vänster) träffar kabelskarven efter $10 \mu\text{s}$ vilket resulterar i en våg som fortsätter att utbreda sig i positiv riktning utmed x-axeln och en som reflekteras och fortsätter i motsatt riktning. Den reflekterade vågen får nu amplituden 0,818 fasförskjuten 180° , den ursprungliga vågen fortsätter i kabeln med bara 0,182 och de båda vågorna fortsätter som diagrammet visar.

De båda exemplen ovan illustrerar vilka problem som kan uppstå vid skarvar i elnätet. Fenomenet med reflektioner är till viss del beroende av frekvensen på vågorna, det är därför till exempel inte 50 Hz grundfrekvensen reflekteras i skarvar. Det behövs mycket högre frekvensener och kortare våglängder för att reflektionerna skall vara möjliga [21].

5.9 Minimering av reflektion

För att undvika allt för stark reflektion i övergångar mellan till exempel luftledning till jordkabel kan en balun-lösning enligt Figur 21 användas för att minimera reflektionen.



Figur 21. Skiss på balun för minimering av reflektion.

Denna lösning skall ge en högfrequensövergång helt fri från reflektioner utan att påverka säkerheten i elleveransen. Varvsförhållandet beräknas genom $\sqrt{\frac{470}{50}} = 3$, det vill säga 1:3 som figuren visar. Storleken är ungefär 20 cm lång med en diameter på 10 cm [3].

5.10 Stående vågor - förstärkning och utsläckning

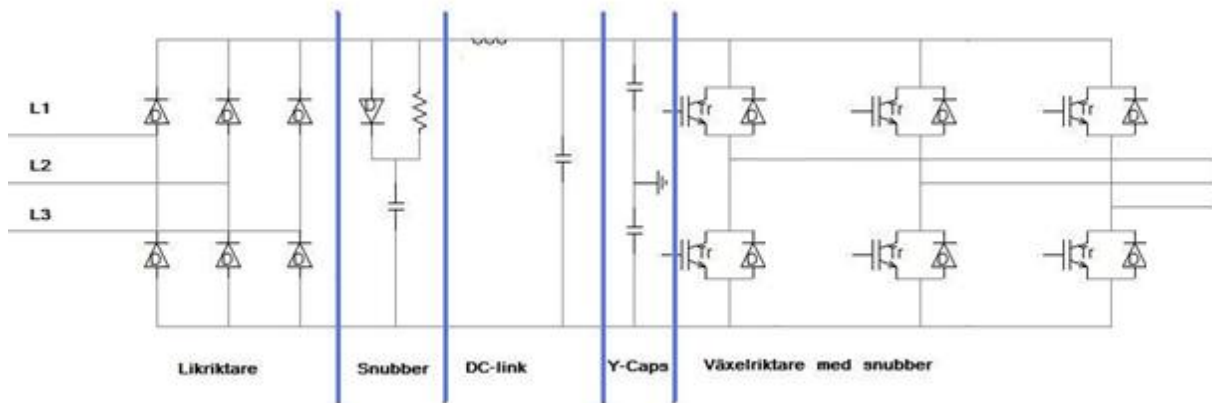
PLC-system arbetar i miljöer med flera olika kabellängder vilket kan ge upphov till fenomen som stående vågor. Normalt i PLC-system för AMR är stående vågor inte ett problem på grund av de långa våglängderna vilket ofta brukar vara längre än kabellängden men uppstår vid höga frekvenser, i MHz området. Fenomenet beskrivs då det finns en möjlighet att man råkar ut för det i PLC-system som används för höghastighetsdataöverföring eller när mätningar görs på kablar.

När två vågor superpositionerar med varandra och beroende vart på vågen sändaren eller mottagaren sitter så resulterar detta i en förstärkning eller en utsläckning av vågen [23]. Stående vågor uppstår när kabellängden är jämt delbar på våglängden. Därför är detta fenomen mycket svårt att förutspå men ett enkelt sett att undvika detta är att använda flera frekvenser för att sända och alternera om informationen inte kommer fram. Flera PLC-system använder två eller flera frekvenser, ofta räcker detta för att undvika problem med stående vågor. Det kan bli problem om en stående våg uppstår och den alternativa frekvensen ej går att använda på grund av brus[23].

6 Frekvensomriktare

Detta kapitel kommer att beskriva frekvensomriktare och hur de uppträder i elnätet, kapitlet ger en allmän beskrivning men utgår ifrån frekvensomriktaren som används i Kristianstad där mätningarna har genomförts. Frekvensomriktare används bland annat för varvtalsreglering och/eller för att begränsa startströmmar vid start av asynkronmotorer. Begränsning av strömmen vid start görs genom att frekvensomriktaren hela tiden styrs så att en optimal spänning för varje varvtal används på så sätt kan de högsta strömmarna undvikas som uppkommer från trögheten i pump med mera som finns vid låga varv. Frekvensomriktare är mer energibesparande jämfört med traditionell motorstyrning som till exempel pulsstyrning[24].

I området i Kristianstad där mätningarna genomfördes används en frekvensomriktare för att styra de tre pumparna som är konstruerad för 400 V och 146 A med en nominell effekt $P_{nom}=75$ kW. Switchfrekvensen är satt till 3 kHz som standard men går att variera stegvis från 1,5 kHz till 6 kHz. För ungefärlig uppbyggnad se Figur 22. Frekvensomriktaren är av en ganska enkel modell och fungerar så att inkommande faser L1, L2 och L3 likriktas genom en diodlikriktare med snubber, DC-länk filter och y-kondensatorerna som används för att få en jämn och filtrerad likström. Snubberkretsen här används för att jämna ut spänningen och ta bort överspänning. DC-länk filtret är ett vanligt LC-filter för att filtrera dc-spänningen. Y-capacitor är en benämning på kondensatorerna som används, dessa har höga säkerhetskrav då risk för skada föreligger om de fallerar[25], här används de tillsammans med snubberkretsen och LC-filtret för en jämn likspänningsnivå. För att få rätt spänning används en växelriktare som är vektorstyrd i detta fall. Filter finns även, läs mer om filtret i separat kapitel "6.2 Filter".



Figur 22. Principiell huvudkrets för frekvensomvandlaren.

Frekvensomriktare av denna typ medför att både frekvensen och spänningen kan regleras. Detta görs med hjälp av styripulser till de sex IGBT:erna, för att erhålla önskad frekvens. Detta gör det möjligt att styra en motors eller flera motorers varvtal, då frekvensen är proportionell mot varvtalet[7].

6.1 Modulering

Det finns olika metoder för att styra en frekvensomriktare, de vanligaste är six-pulse, PWM, Pulse Width Modulation, och vektorstyrning. Six-pulse är den enklaste styrningen och fungerar så att styripulser skickas och bestäms i storlek med en tändvinkel, detta ger för ett enfasssystem en fyrkantssvåg där pulserna kan bestämmas i storlek för att trefasssystem ser utspänningen ut som en trappa. Som tidigare beskrivits i kapitlet "EMI och övertoner" så ger detta upphov till övertoner och dålig elkvalite[7].

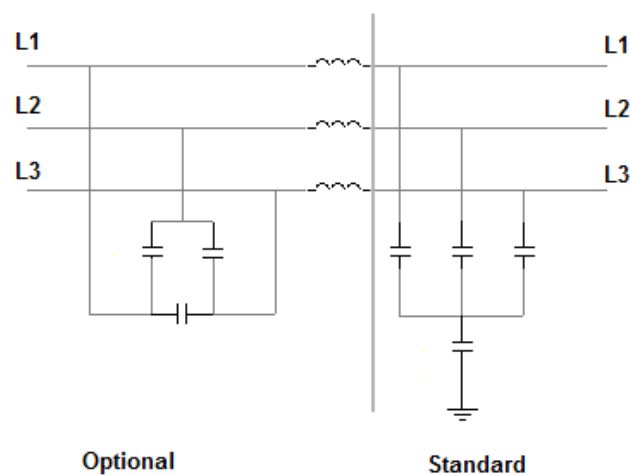
PWM skapar en sinuskurva genom att pulsa olika stora pulser, dessa bestäms i tid för att få till en sinusformad kurva. Utspänningen blir "finare" än vid six-pulse modulering och innehåller färre övertoner. Nackdelen är att denna metod ger ifrån sig högfrekvensstörningar som beror på switchfrekvensen.

Vektormodulering kallas den metod som används på den aktuella frekvensomriktaren i Kristianstad. Det fungerar, mycket kortfattat, så att varje önskad spänningsnivå bestäms med hjälp av vektorer som placeras i ett sexkanting diagram, där hörnen är olika driftlägen. För att styra frekvensomriktaren tidsbestäms varje driftläge för att representera spänningsvektorn[26]. Den är bättre än de två metoderna ovan då även hänsyn kan tas till momentet även övertonerna är mindre och styrning är bättre med denna metod[26]. Denna metod ger också ifrån sig störningar från switchfrekvensen. Vektormodulering är en komplex metod som bygger på olika driftlägen och förklaras enklast genom att illustrera dessa driftlägen

6.2 Filter

För att kunna ansluta frekvensomriktare till elnätet behövs oftast filter för att klara de krav som ställs. Dessa filter kan vara designade på olika sätt. De finns filter för att eliminera olika övertoner, detta är vanligt på större kraftelektronikanläggningar[26] för mindre utrustning räcker det ofta med ett EMC-filter för att uppnå de krav som nätbolagen och normer ställer. EMC-filtren fungerar som ett lågpasfilter tillsammans med induktansen i kablarna tar dessa effektivt bort de största störningarna.

För frekvensomriktaren som används Kristianstad finns ett EMC-filter, ElectroMagnetic Compatibility, som standard och som tillval går att få ett till filter, se Figur 23.



Figur 23. EMC-filter.

Figuren visar standardfilter och ett tillvalfilter för frekvensomriktaren. De båda eller eventuellt bara standardfiltret sitter anslutet till frekvensomriktaren efter anslutningspunkten, innan L1, L2 och L3 i Figur 22. I frekvensomriktaren som finns i området där mätningarna utförts finns endast standardfilter.

Inledande mätningar

7 Inledande mätningar och genomförande

Den första omgången mätningar som genomfördes i Kristianstad utfördes för att kartlägga problemet. Här uppmättes brusnivåer när frekvensomriktaren var igång, bakgrundsbrus när frekvensomriktaren var avstängd och nivåer för kommunikationssignalen. Mätningarna samt hur mätningarna genomförts beskrivs i de följande kapitlen.

7.1 Genomförande av mätningarna

Mätningarna genomfördes med hjälp av Metrum HF mätinstrument och analysverktygen Metrum HF Controller. Dessa kommer att beskrivas närmre i följande kapitel. De inledande mätningarna gjordes i direkt anslutning till routern se Figur 24, vilket gjorde att hela tiden kunde signalen från routern observeras. Mätningarna gjordes med olika konfiguration på frekvensomriktaren, se kapitlet "7.3 Undersökande mätningar" hur de mätningarna gjordes och varför de valdes att göra.



Figur 24. Områdeskarta, nätstationen finns längst upp till vänster (svart ring), frekvensomriktaren längst ner till höger (röd ring) och mätarrum finns till vänster om den gula markeringen. Större karta finns i bilaga B.

7.1.1 Mäta med Metrum HF-instrumentet

Metrum HF är speciellt utvecklat för att utföra mätningar i området för elnätskommunikation. Instrumentet har en samplingsfrekvens på 400 kHz vilket möjliggör mätningar upp till 200 kHz. Instrumentet mäter spänningen mellan fas och nolla och kan användas på spänningsnivåer upp till 275 V växelström utan spänningstransformator. Instrumentet ger en bild av frekvenser högre än grundfrekvensen, frekvenser runt grundfrekvensen och en bit över är bortfiltrerade med ett högpassfilter i instrumentet, det innebär att övertoner ej går att observera därför kommer även ett annat instrument att användas, SPQ 143.

Instrumentet ansluts via ingångar för fas, nolla och jord samt två kommunikationsportar, Figur 25. Enheten strömförsörjs via fas- och nollanslutningen.



Figur 25. Metrum HF-instrument

För att överföra insamlad data finns modemport och datorport. I mätningarna som genomförs för detta examensarbete kommer endast datorporten att användas som ansluts till datorns seriell- eller USB-port.

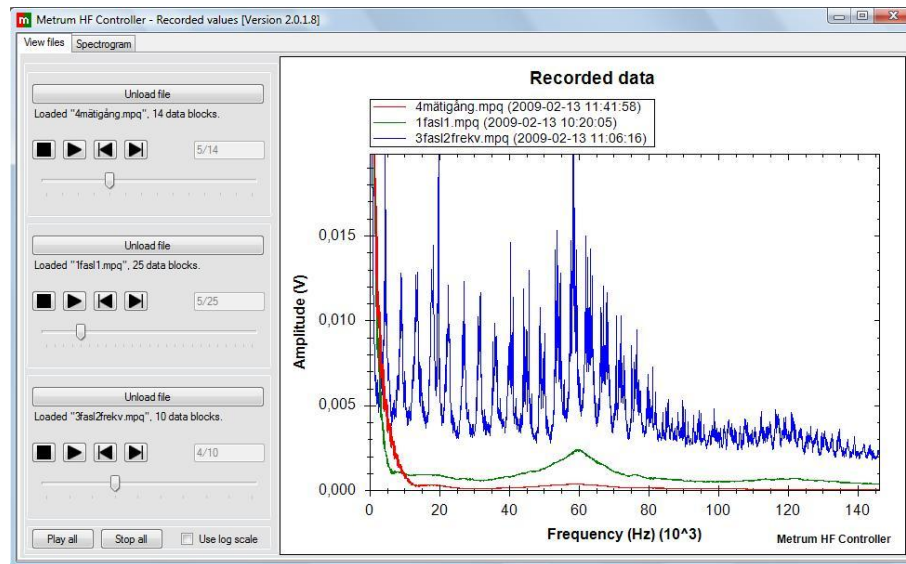
För att utföra mätningar ansluts fas och nolla från nätet som skall mätas till instrumentet och mätningen startas genom att trycka på "start" och avslutas genom att trycka på samma knapp. När mätningen är klar kan mätfilerna utvärderas med programmet HF-controller som beskrivs i följande kapitel.

I instrumentet finns möjlighet att välja olika lagringsintervall. I mätningarna som görs för denna rapport används sexsekunderslagringsintervall. Denna inställning används för att få så bra upplösning som möjligt och därför att mätningarna görs under en kort tid ca en till två minuter, vilket medför att det blir en lagom stor datamängd att föra över från instrumentet.

För mer information om instrumentet se bilaga C.

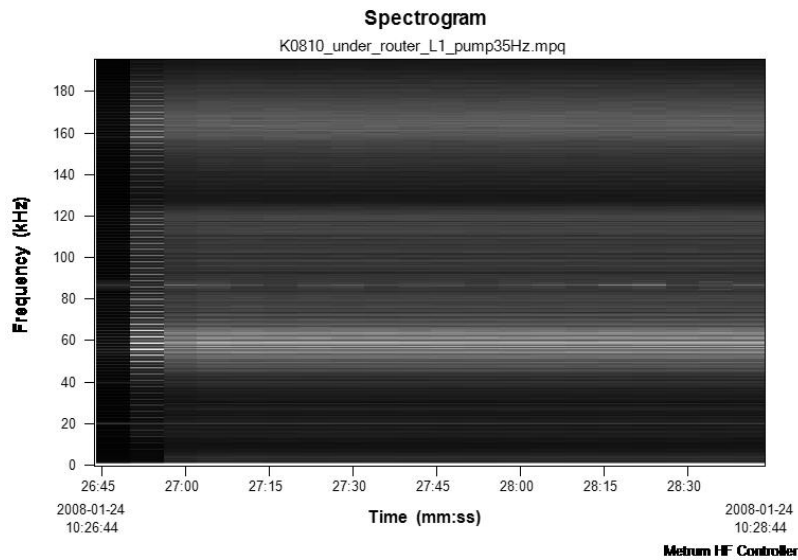
7.1.2 Analys med Metrum HF Controller

För att analysera högfrequensmätningarna används programmet Metrum HF Controller. Metrum HF Controller överför data från HF instrumentet till en PC där analys av mätningarna kan göras. I programmet kan man jämföra upp till tre olika mätningar, se Figur 26.



Figur 26. Metrum HF Controller jämförelse av mätdata

Denna funktion medför att man kan granska flera mätningar, till exempel utbredning i nätet som figuren ovan visar, det går även att stega i mätvärden med knapparna till vänster i bilden, vilket gör att man kan granska data under tiden. I programmet finns även en funktion för att granska filerna i ett spektrogram för att få en överblick över tiden.



Figur 27. HF Controller spektrogrampresentation av mätdata.

Figur 27 visar funktionen spektrogram i Metrum HF Controller. Mätningen som visas är uppstarten av en frekvensomriktare, det mörka området till vänster är innan start sen visas bruset i tidsaxeln, ju högre amplitud desto ljusare färg.

Samtliga bilder från mätningarna i detta examensarbete är skapade i Metrum HF Controller.

7.1.3 Mäta med Metrum SPQ

För mätning av elkvalitetsparametrar används Metrum SPQ vilket är ett portabelt elkvalitetsinstrument. Metrum SPQ kan mäta elkvalitetsparametrar så som spänning, ström, övertoner, transienter, flimrar med mera. Metrum SPQ påminner om HF-instrumentet men har fler ingångar för mätning på samtliga faser samt för mätning av både spänning och ström, se Figur 28.



Figur 28. Metrum SPQ mätinstrument.

Till skillnad från Metrum HF-instrumentet så finns det ingen start/stopp knapp utan mätningen startar när man ansluter instrumentet och slutar när man kopplar ifrån nätspänningen. Det finns även en lampa på instrumentet som indikerar om mätningen är godkänd eller underkänd.

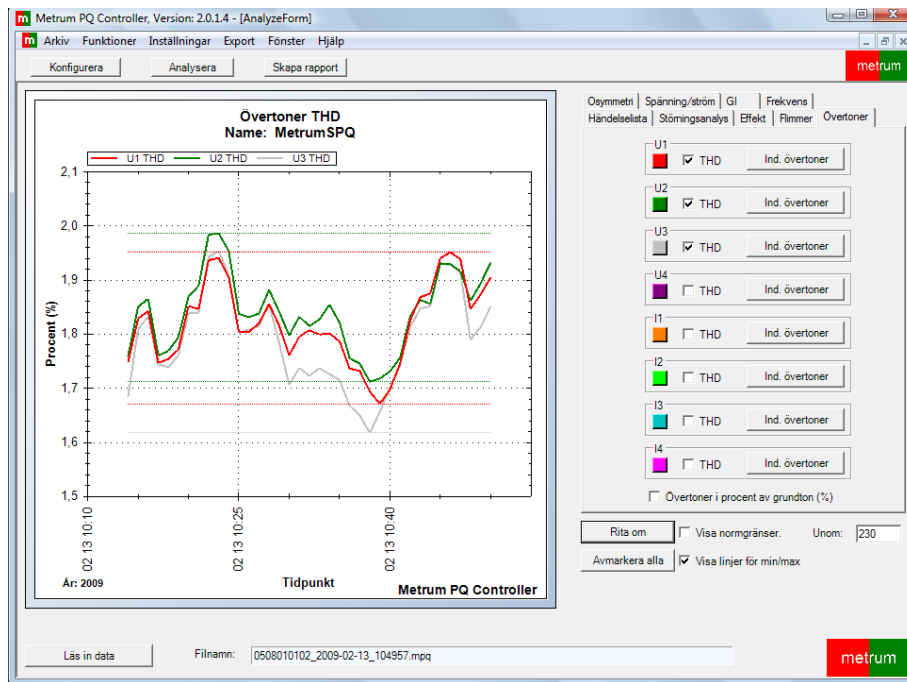
Precis som för HF-instrumentet så kan data överföras direkt via seriellanslutning till en PC eller via modem. För att konfigurera instrumentet används en PC och programvaran Metrum PQ Controller. Det går även att använda en handdator.

Även detta instrument är inställt på lagringsintervallet sex sekunder, vilket ger ett sexsekunders -medelvärde av uppmätta parametrar, ett lägre värde skulle ge en för stor mätfil.

För mer information om instrumentet se bilaga D.

7.1.4 Analys med Metrum PQ Controller

Metrum PQ Controller är utvecklat för att analysera elkvalitetsparametrar och elnätsstörningar. PQ Controller används för att konfigurera SPQ mätinstrumentet inför mätningar samt att överföra mätdata.

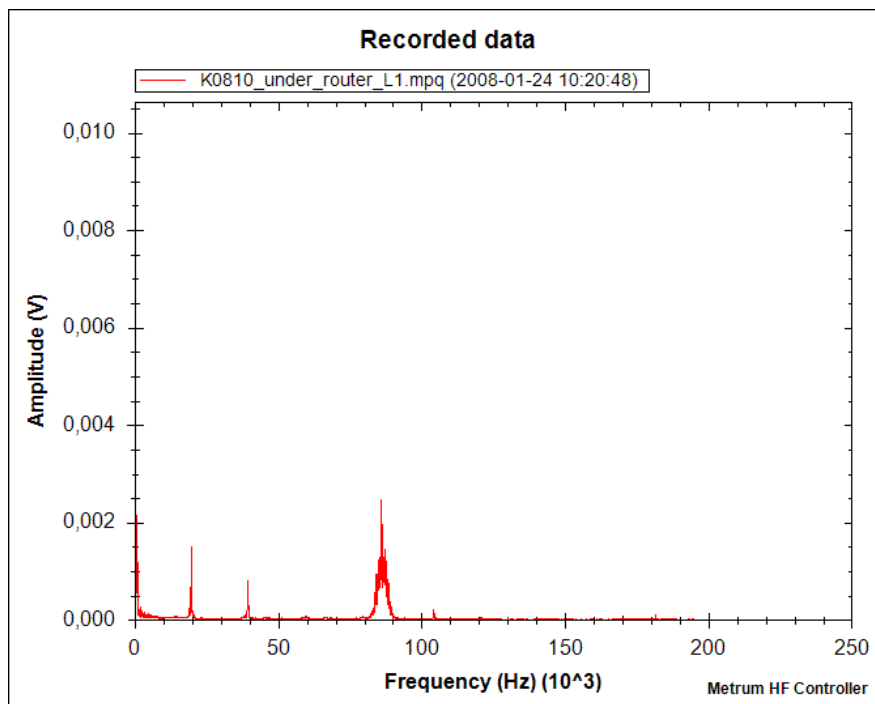


Figur 29. Analys av mätvärden med Metrum PQ Controller.

När mätfilerna är överförda till datorn används Metrum PQ Controller för att göra analys av dessa. Det går att analysera spänning/ström med min/max-värden, nätfrekvens, övertoner till och med den 50:e, osymmetri, THD (total harmonic distortion), flimmer samt effektmätning. För att göra detta läses mätfilen in i analysdel av programmet som visas i Figur 29, val görs för vilka parametrar som skall presenteras i fönstret till vänster och resultatet presenteras över tiden.

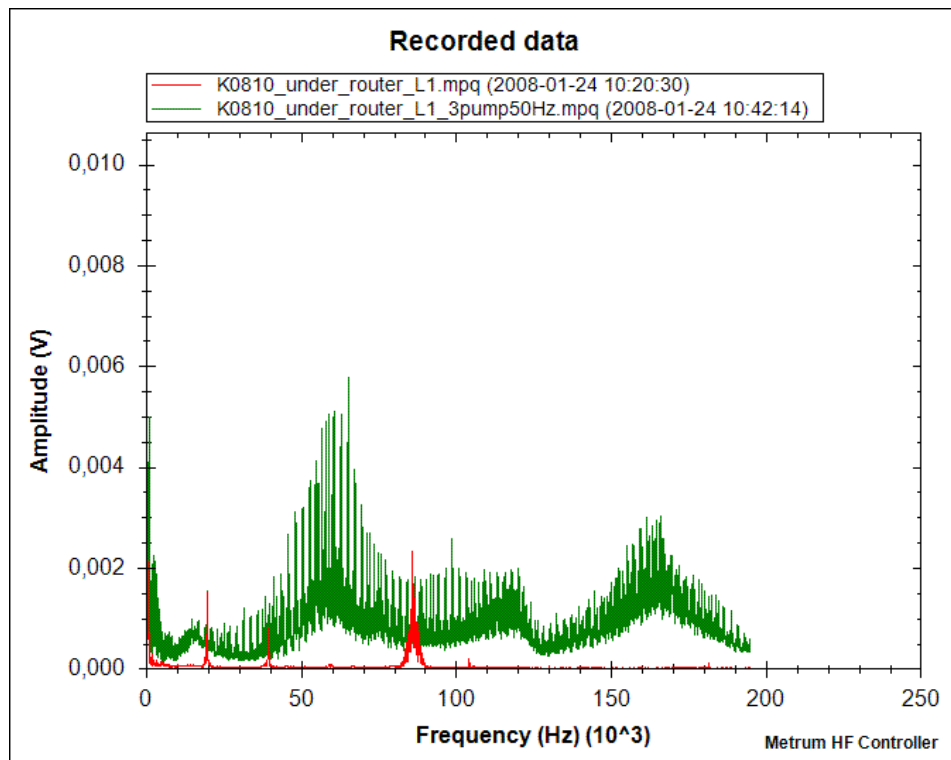
7.2 Inledande mätningar i Kristianstad

För att få en bild över problemet, varför mätdata inte kunde tas emot, gjordes ett antal mätningar för att fastställa vad som störde mätdatainsamlingen. Dessa gjordes av i början av examensarbetet hade påbörjats av Metrum på uppdrag av C4 Energi. Då prövades ett antal olika konfigurationer på pumparna. Först en mätning för att endast mäta signalstyrkan på Kommunikationen. Sedan gjordes test där en enskild pump kördes och ett där alla tre pumparna kördes. Test gjordes även med en pump där frekvensomriktaren sänkte frekvensen till 35Hz. Kommunikationen misslyckades under samtliga fall under samtliga tester. Utan några pumpar i gång fanns väldigt lite brus eller störningar, se Figur 30. Figurerna är hämtade från Metrum HF Controller 2 vissa bilder innehåller flera mätningar vilket syns längst upp i figuren. Mätningarna är gjorda innan routern för mätdatainsamling direkt på plinten i nätstationen på fas L1. Se karta i bilaga B.



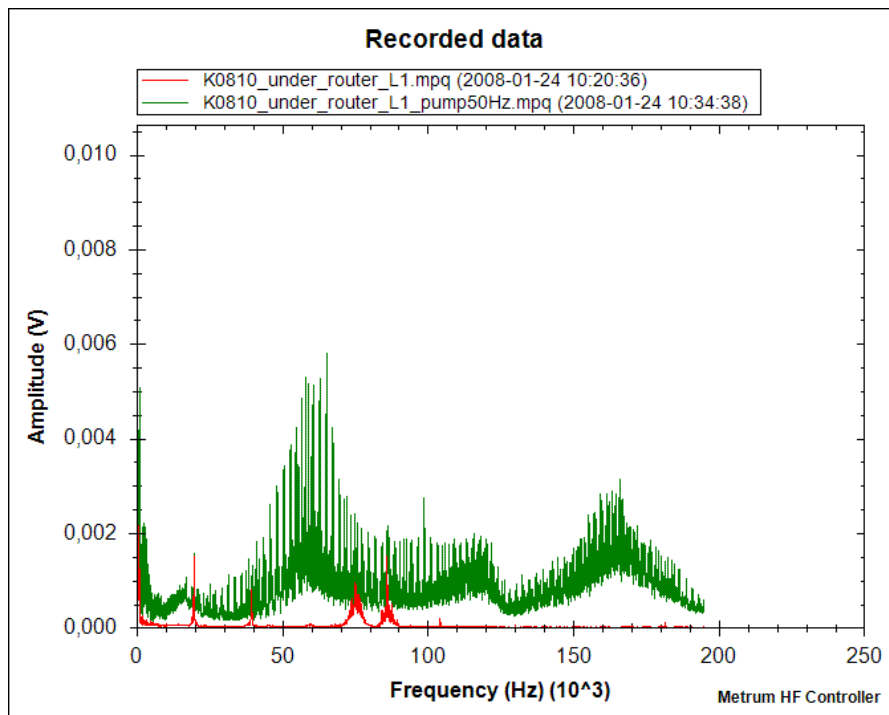
Figur 30. Mätning där ingen pump är igång, i figuren syns PLC-signalen.

Signalen i Figur 30 syns tydligt runt 87 kHz i övrigt syns endast små störningar som ej påverkar kommunikationen. Nästa mätning görs där alla tre pumparna körs för fullt, frekvensomriktaren ger 50 Hz, se Figur 31.



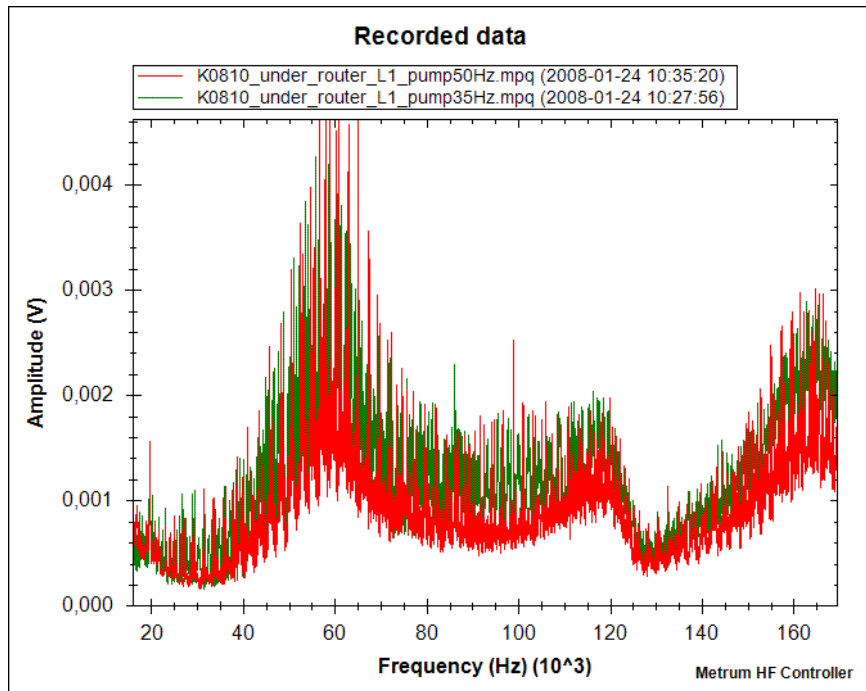
Figur 31. Tre pumpar igång på 50 Hz (grön) med signal (röd) infogat.

I Figur 31 syns tydligt att elnätskommunikationen är för låg för bruset genererat av frekvensomriktaren. PLC systemets alternativa frekvens 75 kHz finns med i följande bild, Figur 32.



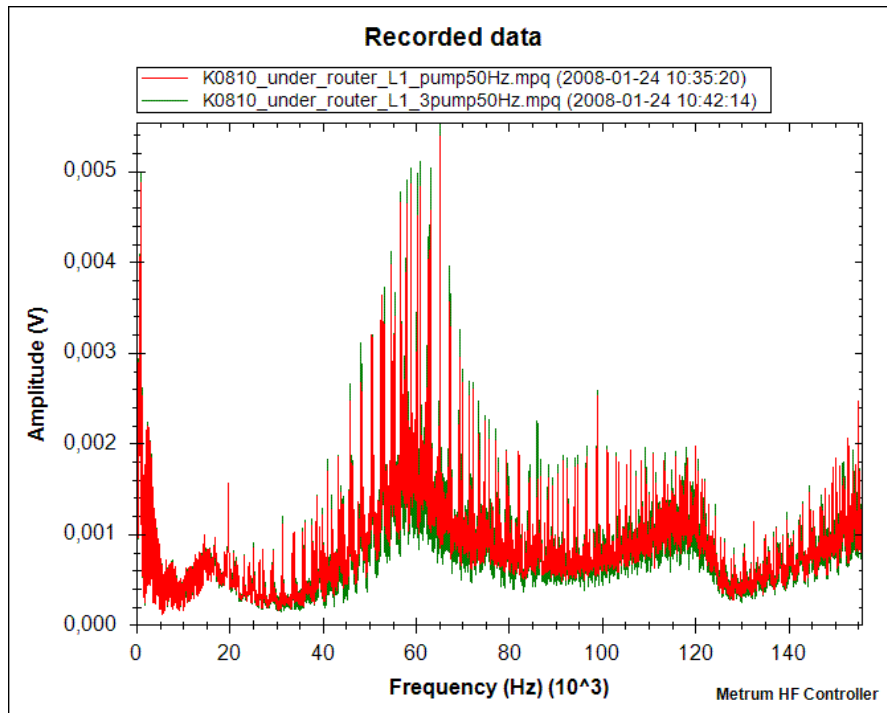
Figur 32. Alternativ frekvens för PLC-kommunikation bredvid primära frekvensen.

Figur 32 visar att även den alternativa frekvensen hamnar i ett område med mycket brus från pumparna. Denna frekvens är sämre i signalsynpunkt än den primära på 86 kHz. De olika driftkonfigurationerna för frekvensomrikaren/pumparna visade skilja sig åt i brusamplitud, se Figur 33.



Figur 33. Olika driftkonfigurationer, här 35 Hz (grön kurva) samt 50 Hz (röd kurva).

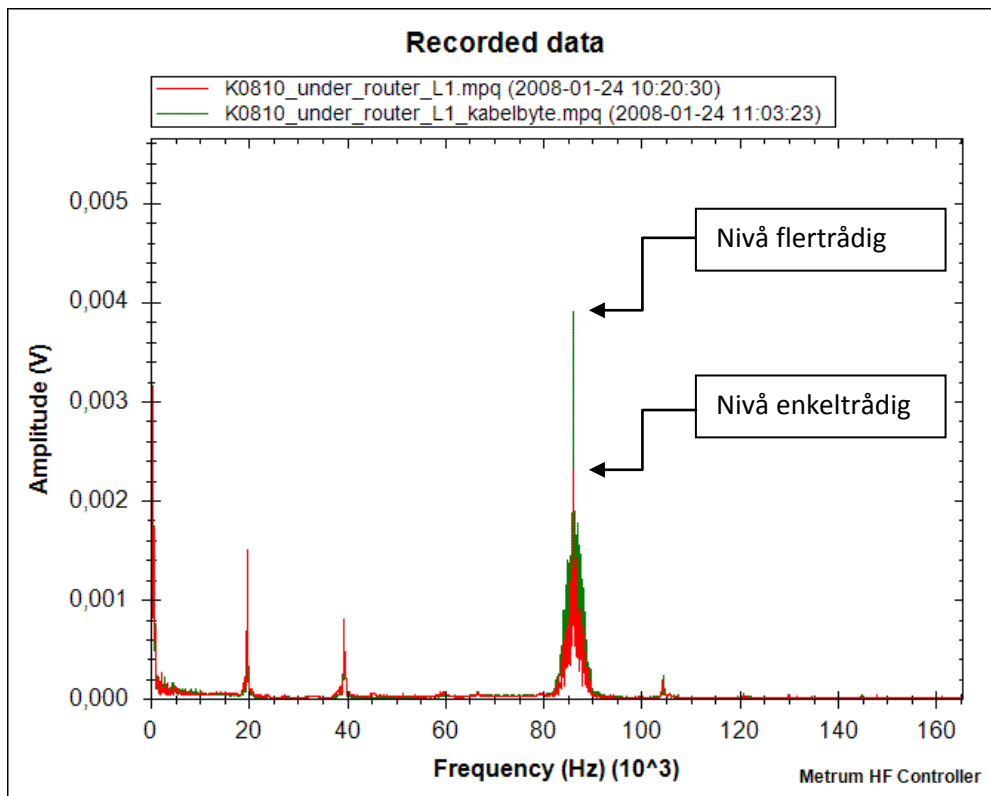
Figur 33 visar att de olika driftkonfigurationerna påverkar de högfrekventa störningarna. Det är kraftigast störningar är när en pump drivs på 35 Hz jämfört med 50 Hz. Pumparna drivs i dagsläget på 35 Hz på grund av klagomål på högt driftljud från närliggande lägenheter. Variation i antal pumpar påverkar inte störningarna nämnvärt se Figur 34.



Figur 34. Jämförelse tre pumpar (grön) i drift jämfört med en pump (röd)

Figur 34 visar två olika driftlägen för pumpen, den röda kurvan är med en pump igång och den gröna är med tre pumpar igång. Anmärkningsvärt för denna mätning är att antalet pumpar inte påverkar brusets på nätet. Det visar att störningar från frekvensomriktaren är okänsligt för lasten och påverkas av brytningarna/kopplingarna i frekvensomriktaren. På dessa höga frekvenser verkar antalet kopplingar/brytningar vara viktigare då det är dessa som skapar detta höga brus.

Efter de första mätningarna var genomförda byttes kabel från enkelkardelig, EK, till flerkardelig, FK, av samma area. Detta har i flera tester tidigare visats kunna höja signalstyrkan. Vilket det även i detta fall gjorde men inte tillräckligt för att få fungerande kommunikation, Figur 35.



Figur 35. Signalnivå med enkel- och flerkardelig kabel

Figur 35 visar en tydlig skillnad mellan flerkardelig kabel och enkelkardelig. Flerkardelig ger nästan dubbla amplituden, 4,0 mV, jämfört med enkeltrådig, 2,3 mV. Detta behandlas i ett eget kapitel ”
 Analys av anslutningskablar”

7.3 Undersökande mätningar

Efter studerat problemet i och med de inledande mätningarna behövdes nya mätningar och tester utföras på pumpstationen. De mätningarna som behövde utföras för att ytterligare kartlägga problemet var:

- Undersöka utbredning av störningen i nätet.
- Mätningar direkt på frekvensomriktaren.
- Mätningar med ändrad switchfrekvens.
- Jämförande mätning mellan faserna.
- Mätning med elkvalitetsmätare

Anledningen till dessa mätningar beskrivs kortfattat i följande kapitel. Resultaten av respektive punkt presenteras i Kapitlet "Resultat".

7.3.1 Undersökning av utbredning av störningen i nätet.

Mätning där undersökning av utbredning skall göras då det i flera källor har visat sig att både störningarna och signalen kan variera mycket beroende på vart i nätet. Främst skall dämpningen i nätet undersökas.

7.3.2 Mätning direkt på likriktaren

Mätningar på likriktaren är intressant att undersöka för att se vad som genererar störst störningar, om störningarna beror till största del av övertoner från likriktaren eller om de kommer ifrån övertoner från switchfrekvensen. Det kan också vara en kombination eller om det eventuellt finns någon annan anledning till de stora störningarna vid de aktuella frekvenserna.

Även för att kunna se impedansen i nätet om möjligt.

7.3.3 Byte av switchfrekvens

Det finns för den aktuella frekvensomriktaren möjlighet att byta switchfrekvensen. Efter att ha studerat de inledande mätningarna går det att utläsa i karakteristikerna att bruset verkar upprepa sig i grupper med steg i storlek med switchfrekvensen. Det är även intressant att undersöka hur stor del av switchförlusterna som uppträder som brus i nätet. En minskning av switchfrekvensen skulle då ge en lägre brusnivå.

7.3.4 Jämförande mätning mellan faserna.

Enligt teorin som beskriver kablar i distributionsnätet så finns det skillnad i egenskaper i kabeln beroende på vilken ledare som används, dessa skall ses som små men kan göra viss skillnad. Även andra orsaker finns för denna mätning så som impedansdifferens i lasten och nätet.

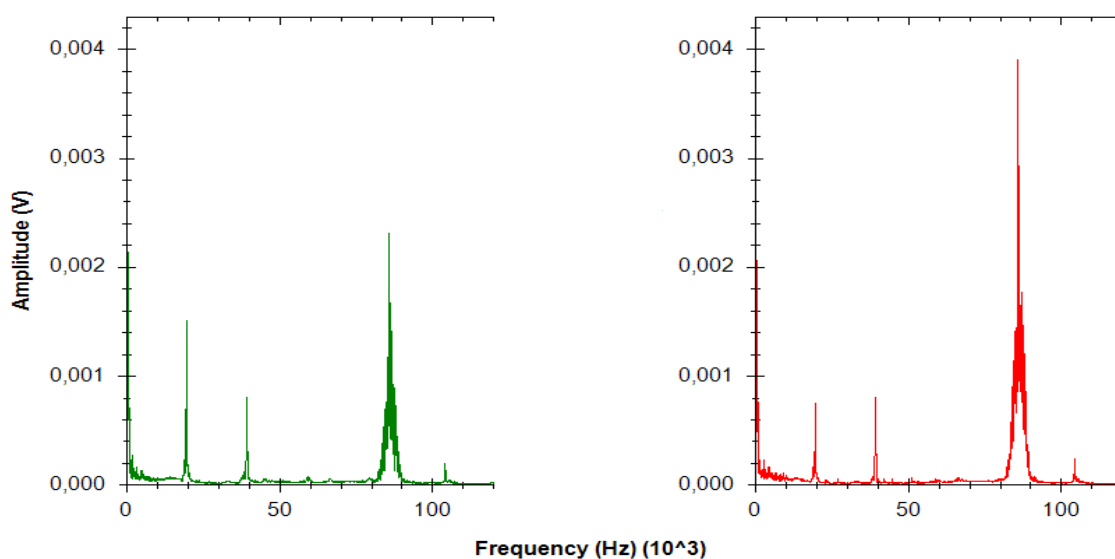
7.3.5 Mätning med elkvalitetsmätare

Mätning med elkvalitetsmätare genomförs för att se hur väl frekvensomriktaren uppfyller de krav som ställs i EN 50160 standarden för till exempel övertoner, flimmer med mera. Detta kan även ge en tydlig bild om det är något felaktigt med utrustningen, till exempel om den har för höga värden för övertoner.

Studie anslutningskabel

8 Analys av anslutningskablar

Ett problem som upptäcktes vid installation och användandet av elnätskommunikation med höga frekvenser är valet av kabel och dess dämpning av signalen. Valet av flerkardelig kabel, så kallad FK, RK eller SK, har visat sig fungera bäst. Ofta så används kabel av typ EK det vill säga kabel med en kardel då detta är enklare vid montering av utrustningen. I kapitlet med de inledande mätningarna visas ett exempel på detta, se Figur 36 för en jämförelse mellan signalstyrka för en EK kabel och en FK kabel.

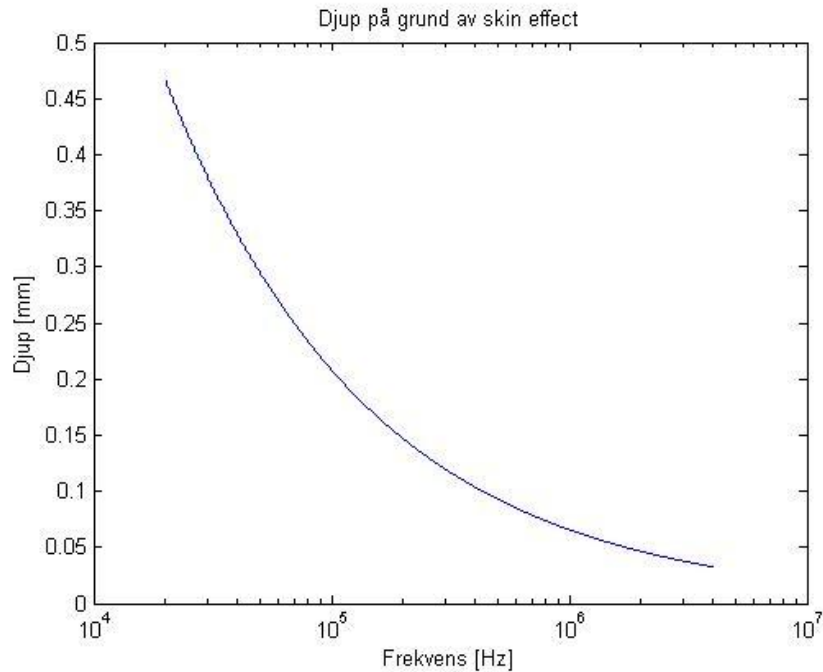


Figur 36. Signalstyrka vänstra innan byte av kabel, högra efter byte av kabel.

Det finns ett antal olika teorier om varför detta fungerar som det gör, teori är att det beror på impedansen i kablarna, vilket skulle skapa reflektioner i skarven mellan de olika kablarna. Den tunnare kabeln i det här fallet den som användes som installationskabel hade en annorlunda impedans jämfört med den kraftigare anslutningskabeln på anslutningskenan i nätstationen. Bytet mot en annan typ av kabel skulle då ge en bättre impedansmatchning. Denna teori verkade inte stämma i detta fall. Dels för att ledaren ej är tillräckligt lång för reflektion, se teorikapitlet och "5.7 Reflektion i skarvar.", och dels för att det skiljer mycket lite i impedans mellan de två typerna av kablar. Därför gjordes lite mer studier i högfrekvensöverföring i kabel. Denna teori lämnades då den inte stämde överrens med mätningarna, efter lite tid skapades en annan teori. Det verkade som att de hade med den höga frekvensen att göra istället. Det visade sig att det mest troliga vara att detta fenomen berodde på den så kallade "skin effect" som uppträder i kablar vid överföring av högfrekventa signaler[27]. Även så låg frekvens som 50 Hz kan denna effekt observeras[27].

Olika beräkningsmodeller togs fram. En modell där den flerkardeliga kabeln ses som en kabel där signalen överförs i DC. Denna metod räknar med att varje kardel i kabeln kan ses som en ensam

ledare isolerad ifrån de övriga kardelarna och eftersom "skin depth" är större än radien på kabeln så kommer inte detta påverka resistansen. Resultat från dessa beräkningar presenteras följande figurer. Figur 37 visar hur djupt strömmen går i en ledare beroende på "skin effect", se Figur 37.

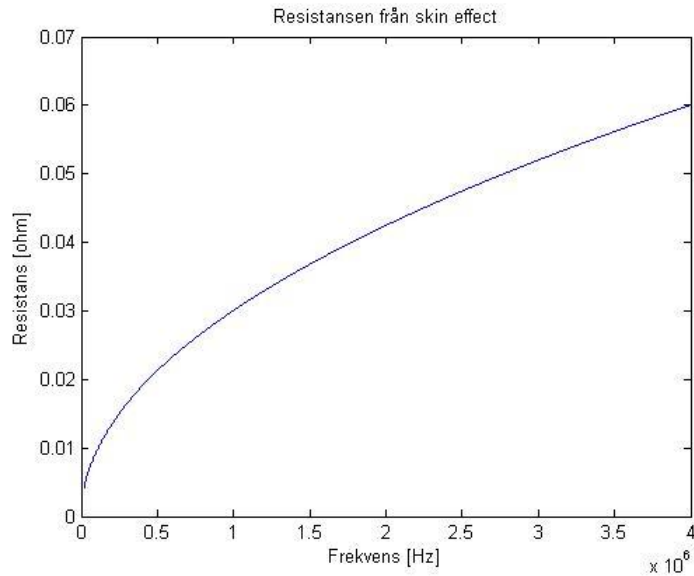


Figur 37. Skin depth variation på grund av frekvensen.

Figur 37 visar tydligt att för ledare som innehåller kardeler som är isolerade ifrån varandra så skulle varje ledare vid 86 000 Hz vara opåverkade av "skin effect" om ledaren innehåller kardeler som är mindre än $2 \cdot 2.25 \cdot 10^{-4}$ m vilket kardelerna är i de kablar som undersökts för detta examensarbete. Resistansen som blir i en solidledare på $1,5 \text{ mm}^2$ beräknas med formeln nedan och visas för frekvensspektrumet 20 000 till 4 000 000 Hz i Figur 38.

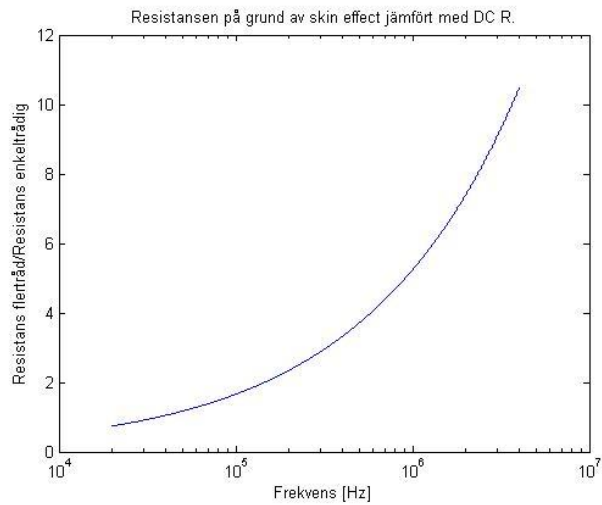
$$R_{AC} = \frac{\rho}{d} * \frac{L}{2r}$$

Där L är längden på ledaren, d är skin depth, r är radien och ρ är resistivitet.



Figur 38. Resistansen på grund av skin effect

En jämförelse mellan resistansen för kabel med flera kardeler och en kabel med en kardel visar att resistansen skulle vara ungefär dubbel så stor vid 86 kHz, se Figur 39.

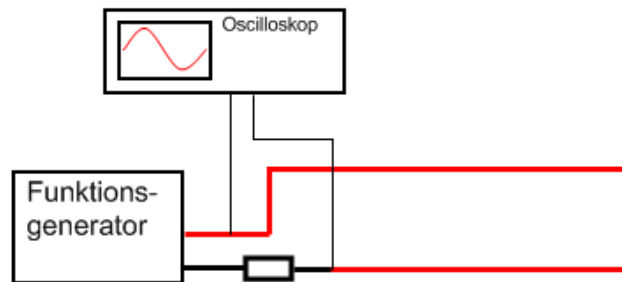


Figur 39. Resistansen i flerkardelkabel jämfört med enkel.

För att bekräfta detta gjordes mätningar på de vanligaste anslutningskablarna som används, vilket presenteras i kapitlet "Mätningar på kablar". Matlab-koden för beräkningarna i detta kapitel finns i bilaga E.

8.1 Mätningar på kablar

För att bekräfta de olika modellerna och undersöka vad som händer med kablar vid höga frekvenser gjordes mätningar i elkraftsgrundkurslaboratoriet på Chalmers där de olika kablarna anslöts till en funktionsgenerator i serie med kabeln kopplades även en resistor för att begränsa strömmarna, se Figur 40. Uppkoppling för mätning av kabel. Figur 40 beskriver hur detta kopplades.



Figur 40. Uppkoppling för mätning av kabel.

Utrustningslista: Funktionsgenerator: Hewlett Packard 33120A
Oscilloskop: Tektronix TDS2000B

I serie anslöts ett 100 ohm motstånd för att begränsa strömmen och förenkla beräkningen av den. Mätresultaten från mätningarna presenteras i Tabell 3. Övriga mätningar på impedans och resistans genomfördes med olika instrument men gav liten eller ingen skillnad mellan kablarna, detta främst för att bekräfta att de hade liknande egenskaper vid likspänning och låga frekvenser.

Tabell 3. Mätresultat EK kabel jämfört med SK.

kHz	EK I Volt (V)			Ström	Resistans	RK I Volt (V)		
	UT	IN	Diff			UT	IN	Diff
10	14,2	14,2	0,0	0,142		14,4	14,6	0,2
240	14,2	14,4	0,2	0,142	1,408	14,4	14,6	0,2
1000	14,0	14,8	0,8	0,140	5,714	14,4	14,8	0,4
2000	13,4	15,2	1,8	0,134	13,433	13,8	14,8	1,0
3000	13,0	15,2	2,2	0,130	16,923	13,2	15,2	2,0
4000	12,6	16,0	3,4	0,126	26,984	12,8	15,8	3,0
10000	8,4	17,2	8,8	0,084	104,762	8,0	17,2	9,2

Tabellen visar mätningarna som gjordes i på EK (enkelkardel) och RK (flerkardelig kabel). För EK räknades även ström och resistans ut men detta bör ses som en parantes som används för att visa på den dåliga standarden på mätvärdena.

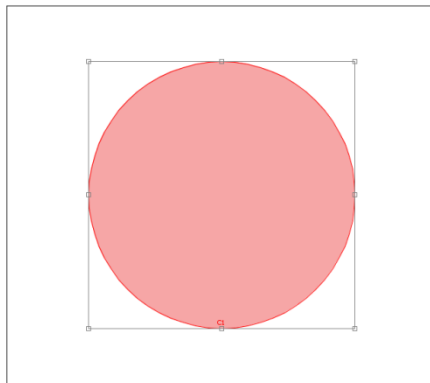
Vid beräkningen får man orimligt höga resistansvärden men på grund av de höga frekvenserna finns stor sannolikhet att det är andra faktorer som ställer till med problem här. Utrustningen som användes är starkt begränsad i ström (några mA) och är ej tillräckligt för att ge ett tillräckligt högt spänningsfall i kabeln. Mätningarna som gjordes var lägre än felmarginalen för instrumentet och för värdena under 1 MHz gick knappt något spänningsfall att uppmäta. För de högre frekvenserna är det inte säkert att detta beror på "skin effect" eller om det beror på något annat fenomen endast att man kan se en liten skillnad mellan kablarna. Eftersom det finns en skillnad är det troligt att detta kan bero på "skin effect" då denna effekt skulle vara stor vid så höga frekvenser.

De hade eventuellt vart möjligt att göra om testerna med hjälp av en förstärkare för att öka strömmen genom kabeln och på så sätt få ett bättre mätresultat.

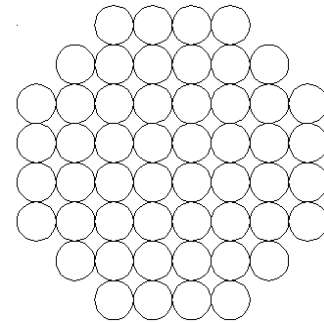
För att istället se hur överföringen i kablarna fungerar används COMSOL för att modellerna kablarna och analysera dessa noggrannare.

8.2 COMSOL-simuleringar

För att bekräfta "skin effect"-teorin gjordes ett antal COMSOL-simuleringar. Två modeller skapades för att göra en jämförelse mellan kabel med endast en kardel och kabel med flera kardeler. Modellen med flera kardeler gjordes så lik en FK-kabel som möjligt, dock ej så många kardeler som det är i den egentliga kabeln men som en modell mellan vanliga grovkardeliga kablar av typ RK och kabel med finare kardeler typ FK. Se modellerna här under, Figur 41.

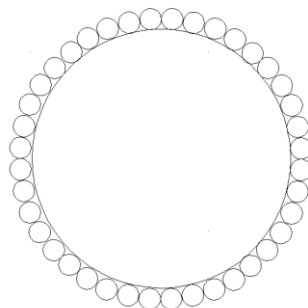


Figur 41. Enkelkardelig modell



Flerkardelig modell

En tidig observation som gjordes var att skillnaden mellan kablarna var mindre än vad som antagits från början. Strömmen går inte som antogs i beräkningarna, då det antogs att varje kardel kunde ses som en ensam ledare. Flerkardelmodellen visade sig vara en ganska dålig modell vid lägre frekvenser på grund av att kardelerna packas bättre i riktiga kablar, därför skapades en modell som ger mer korrekt resistans i de lägre frekvenserna, se Figur 42. För att jämföra kablar med grövre och finare kardeler gjordes den nya modellen med finare kardeler än den första flerkardeliga modellen.

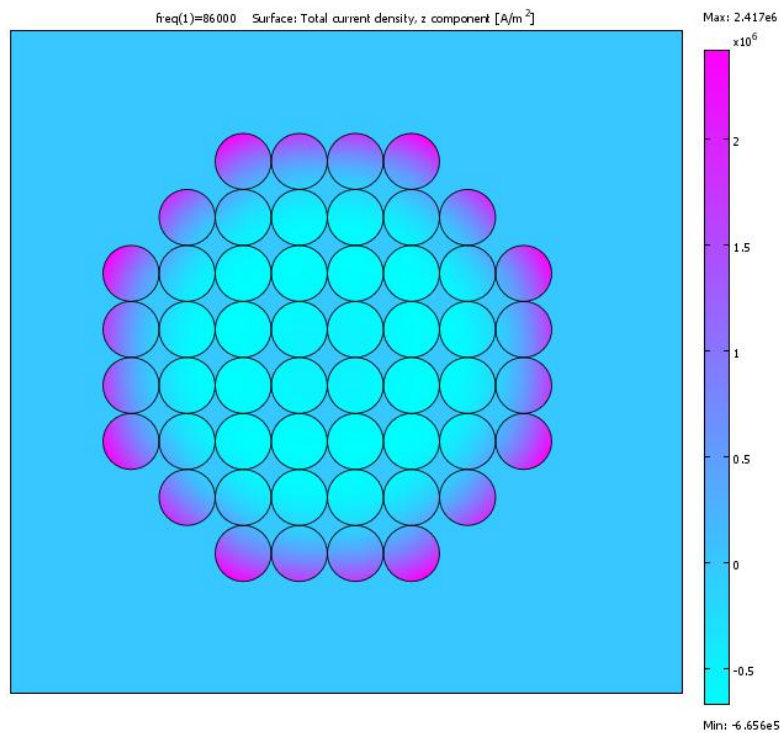


Figur 42. Flerkardelig modell av kabel med kompakt kärna för att stämma bättre vid lägre frekvenser.

Figur 42 visar en modell av en flerkardelig kabel där kärnan är mer kompakt vilket medför en bättre simulering vid lägre frekvenser. Kardelerna är även smalare i denna modell jämfört med den första, därför är det intressant att ha med båda modellerna i simuleringarna för att se hur detta varierar vid högre frekvenser.

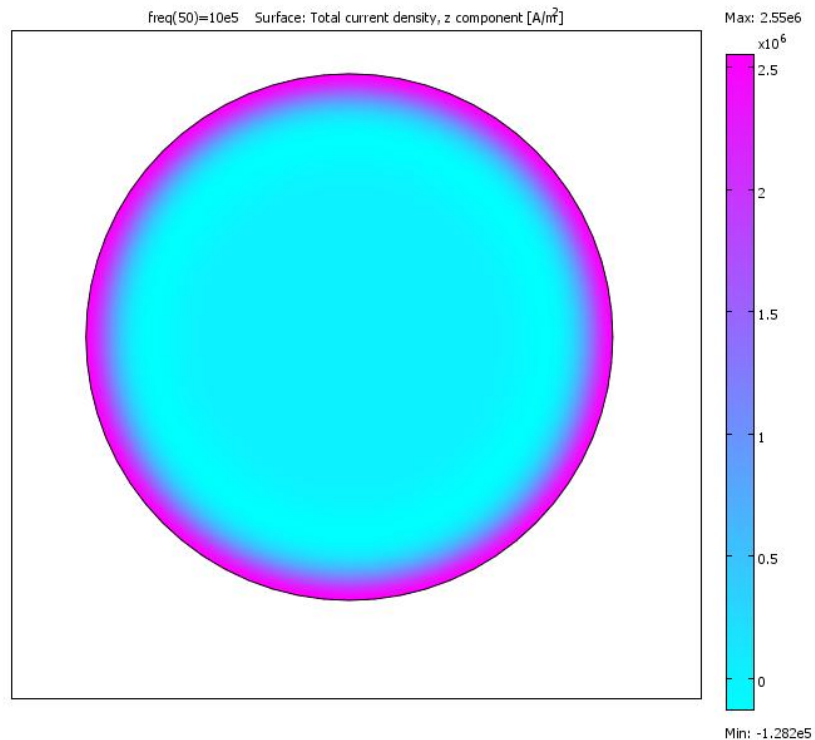
8.2.1 Utvärdering av simuleringar

Första observationerna från simuleringarna kan ses i följande figurer, Figur 43 och Figur 44, där visas hur strömmen koncentreras för de aktuella frekvenserna, här 86 kHz. Stapeln till höger i varje figur visar strömtätheten i modellerna. Minst är i botten på stapeln och högst är de lila i toppen.



Figur 43. Simulering av flerkardelkabel, stapeln till höger visar hur strömtätheten varierar.

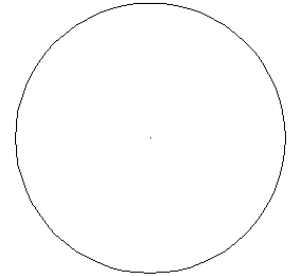
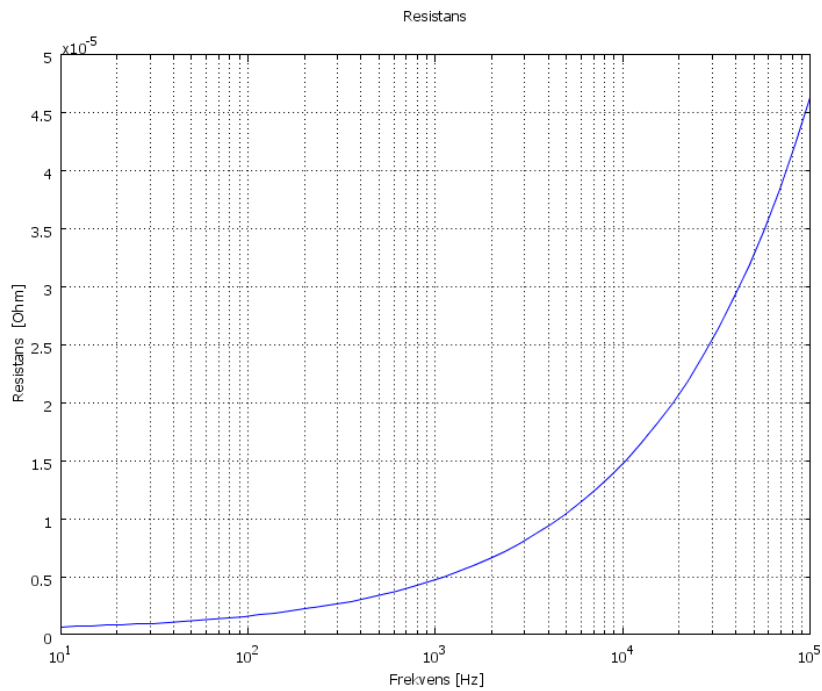
Figur 43 visar att strömmen koncentreras till de yttersta kardelerna i kabeln och kardelstorleken har liten betydelse inuti modellen om kardelerna har god kontakt mellan varandra vilket var en anledning till varför den nya modellen togs fram. Detta ska jämföras med enkelkardelmodellen i Figur 44.



Figur 44. Simulering av enkelkardelledare.

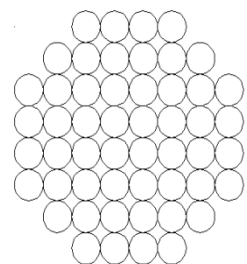
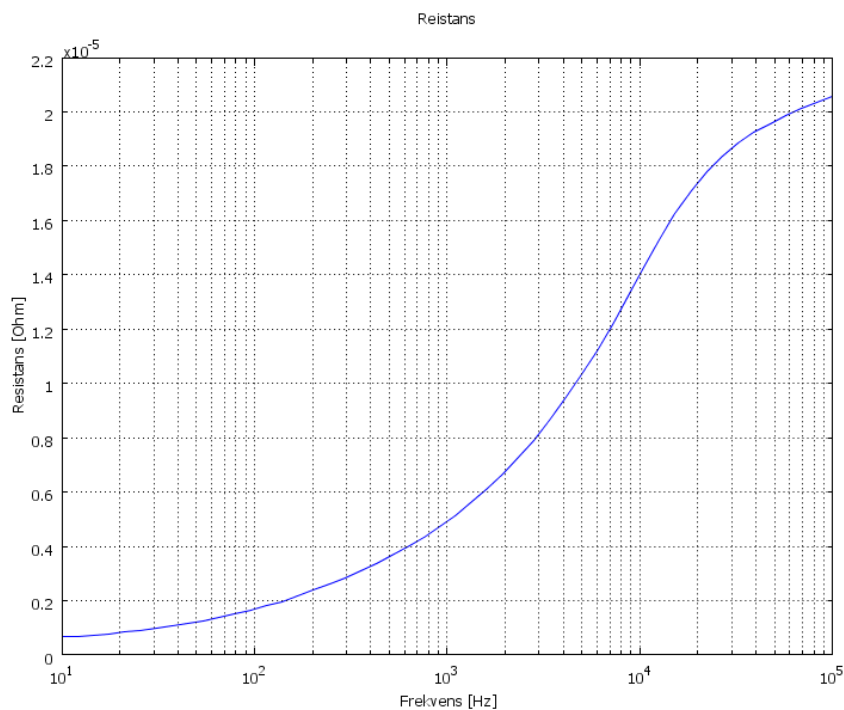
Figur 44 visar enkelkardelledaren, här syns en jämn strömtäthet som är koncentrerad runt kanten på ledaren som i Figur 43. Vad som kan antas från dessa observationer är att för flerkardelmodellen blir arean där strömtätheten är hög större, det vill säga ytan eller omkretsen för den enkelkardeliga kabeln blir mindre än för den flerkardeliga.

För att kontrollera om ytan där strömmen leds blir större i flerkardelmodellen och därigenom får lägre resistansen, beräknas resistansen för varje modell. För att beräkna resistansen används COMSOL där en ström leds igenom kabeln och en spänningspotential sätts i modellen. Resistansen som beräknades presenteras i följande figurer. Figur 45 visar första modellen med en kardel.



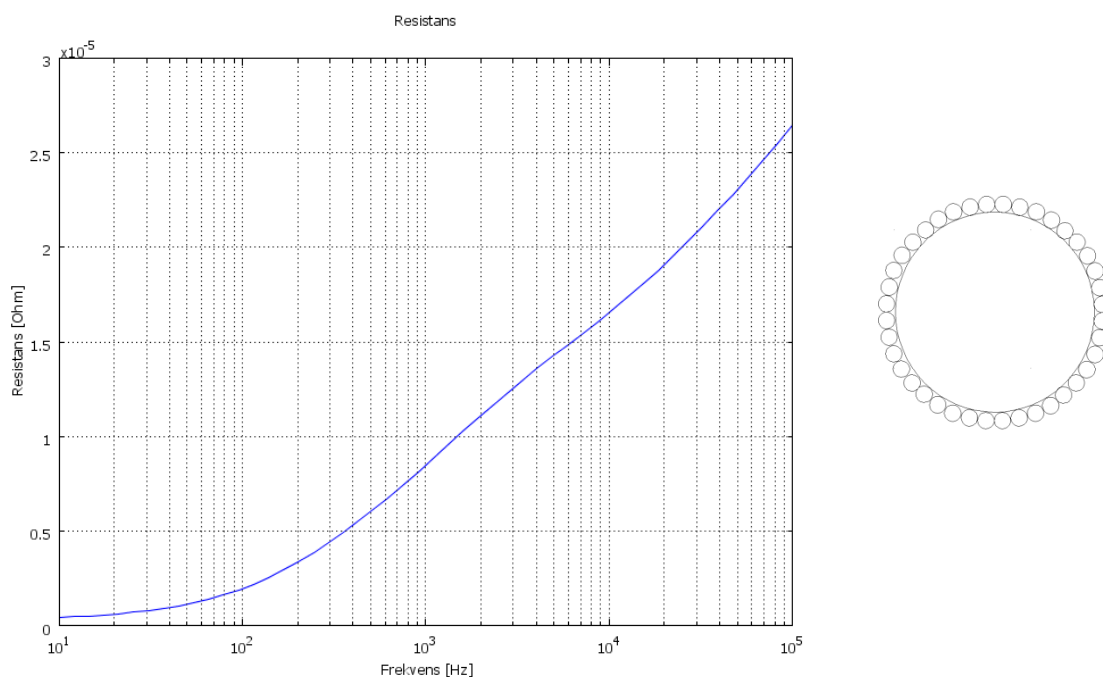
Figur 45. Resistansen beroende på frekvensen för modellen med en kardel, figur till höger.

Figur 45 visar enkelkardelig kabel och dess resistans som ökar med frekvensen vilket kommer från "skin effect" detta ska jämföras med de flerkardeliga kablarna, Figur 46 och Figur 47.



Figur 46. Resistansen beroende på frekvensen för modellen med flera grova kardeler, figur till höger.

Figur 46 visar en flerkardelig modell med grövre kardeler, grafen visar en lägre resistans än för enkelkardelig kabel men en högre resistans vid de lägre frekvenserna. Den högre resistansen beror på att genomskärningsarean är mindre på grund av de områdena mellan kardelerna. För att få en mer korrekt modell av en flerkardelig kabel används modellen med solid kärna och finare kardeler.



Figur 47. Resistansen beroende på frekvensen för modellen med flera fina kardeler och solid kärna, figur till höger.

Figur 46 och Figur 47 visar att skillnaden på kardelerna har betydelse, här är modellen med grova kardeler bättre än den med fina kardeler. Den solida kärnan i den finkardeliga modellen påverkar inte vid höga frekvenser, anledningen till detta beror på förhållandet mellan "skin depth" och kardelradien. De modeller som redovisas ovan är inte exakta till storleken och resultaten kan variera för olika kabelareor men resultat visar att de är bättre med kardeler än utan och att det beror på den större ytan runt kabeln. För modellen med grövre kardeler erhöles ett resistansvärde som var ungefär dubbelt så stort som för en kabel med endast en kardel. Mätningarna som utfördes i laboriet genomfördes med kabel med finare kardeler vilket kan vara en anledning till svårigheten att få ett gott resultat vid de aktuella frekvenserna och med tillgänglig uteffekt.

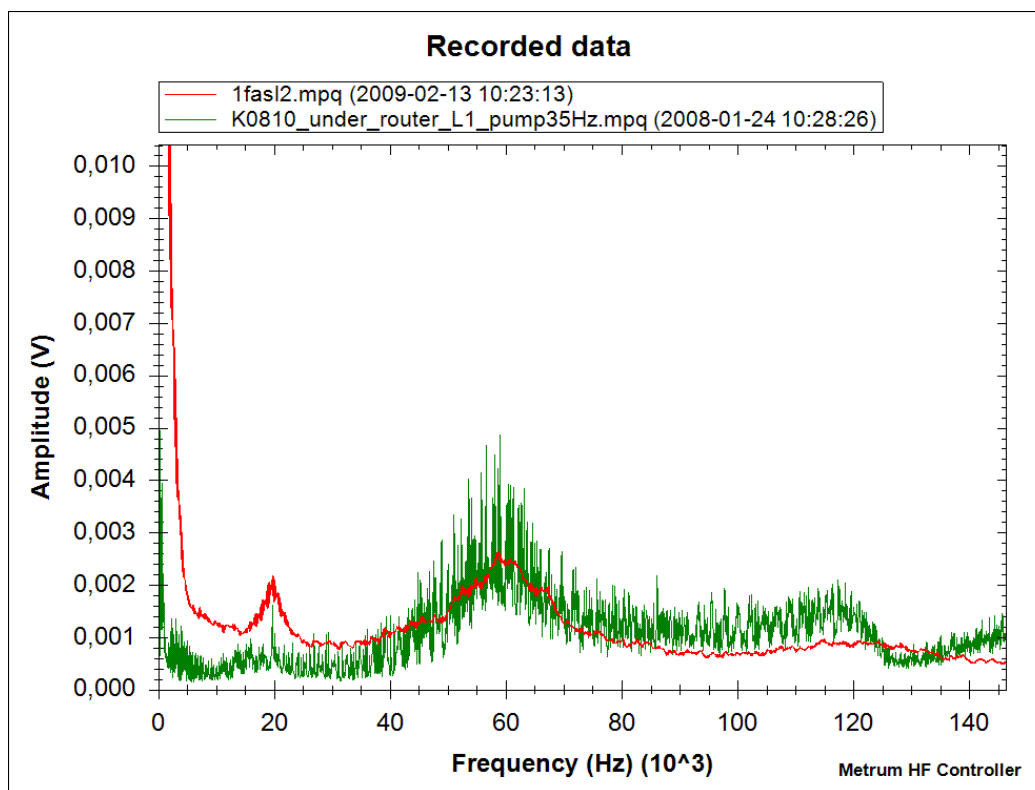
Resultat

9 Resultat undersökande mätningar

Följande kapitel presenterar resultaten från de utvärderade mätningarna dessa genomfördes som en andra omgång mätningar i Kristianstad. Förklaring till varför vissa mätningar genomfördes finns i kapitel "7.3 Undersökande mätningar". Resultatredovisningen börjar med en jämförelse mellan de två olika mättillfällena för att säkerställa att resultaten från de två mätningarna är likvärdiga. Mätningarna begränsades till viss del då det ej gick att genomföra strömmätning på frekvensomriktaren utan endast spänningsmätning. Därför gick ej att uppskatta impedansen i nätet men spänningsmätningarna gav ändå en god bild av dämpningen i nätet.

9.1 Jämförelse med inledande mätningar

Mätningarna som genomfördes vid de två mättillfällena, de inledande mätningarna och utvärderande mätningarna genomfördes vid ungefär samma tidpunkt på dygnet och samma belastning på nätet. En snabb jämförelse visar att mätresultaten ändå skilde mellan de två mättillfällena, se Figur 48.

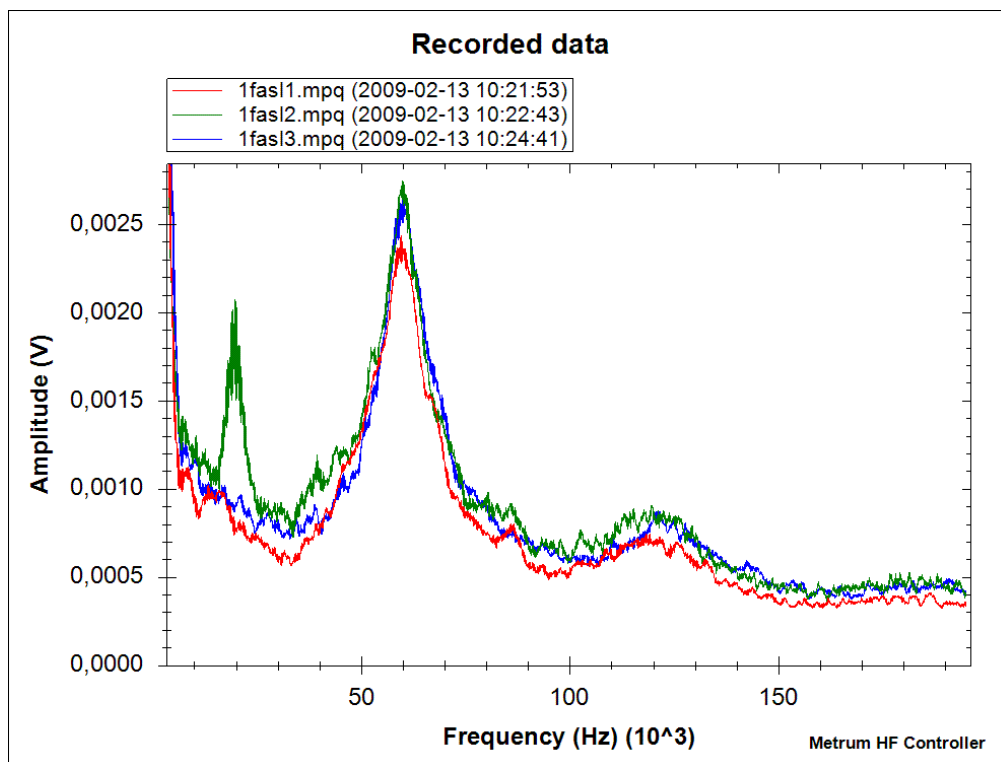


Figur 48. Jämförelse mellan den första mätningen (grön) och den andra utvärderande mätningen (röd).

Den tydligaste skillnad som går att observera är att det är större fluktuation, detta kan bero på belastning i nätet eller variation på frekvensomriktaren. Medelvärdet för störningarna i de båda fallen ligger på ungefär samma nivå i båda fallen med lite variation i kurvorna men med samma nivåer i det intressanta området, det vill säga det område där kommunikationen sker, 75-86 kHz så troligtvis kommer inte detta att påverka resultaten i mätningarna.

9.2 Skillnad mellan faserna

För att se om det eventuellt fanns någon skillnad i högfrekvensbrus mellan de olika faserna vid drift av frekvensomriktaren gjordes jämförande mätningar. Anledningen till skillnad mellan faserna kan bero på olika saker så som uppbyggnad av kabel där kapacitansen i kabeln samt "skin effect" varierar beroende på vilken ledare det är i kabeln, se teorikapitlet "Egenskaper för kabel i distributionsnät (400 V)" angående markkabel. Mätningen är intressant kommunikationsutrustningen som enbart kommunicerar på en fas. Därför genomfördes den för att se hur mycket dämpningen varierar på varje fas, om den gör det. Mätresultaten från denna mätning presenteras i Figur 49.



Figur 49. Jämförelse mellan faserna i nätstationen.

I Figur 49 syns att samtliga faser har en liknande profil, den största skillnaden som syns är på L2 (grön) runt 20 kHz, där syns också en avvikelse från de andra kurvorna. Avvikelsen syns en kort stund

på fas L3 (blå) så detta är troligt endast en tillfällig avvikelse som kan komma från någon annan last i nätet. Fas L2 och L3 följs åt i profil medan L1 (röd) har en lite lägre amplitud under hela frekvensspektrumet. Skillnaden kan eventuellt bero på ledaregenskaper men denna lilla skillnad är inte tillräcklig för att påverka elnätkommunikation eller grund för att dra någon slutsats i hur ledaregenskaperna påverkar störningen.

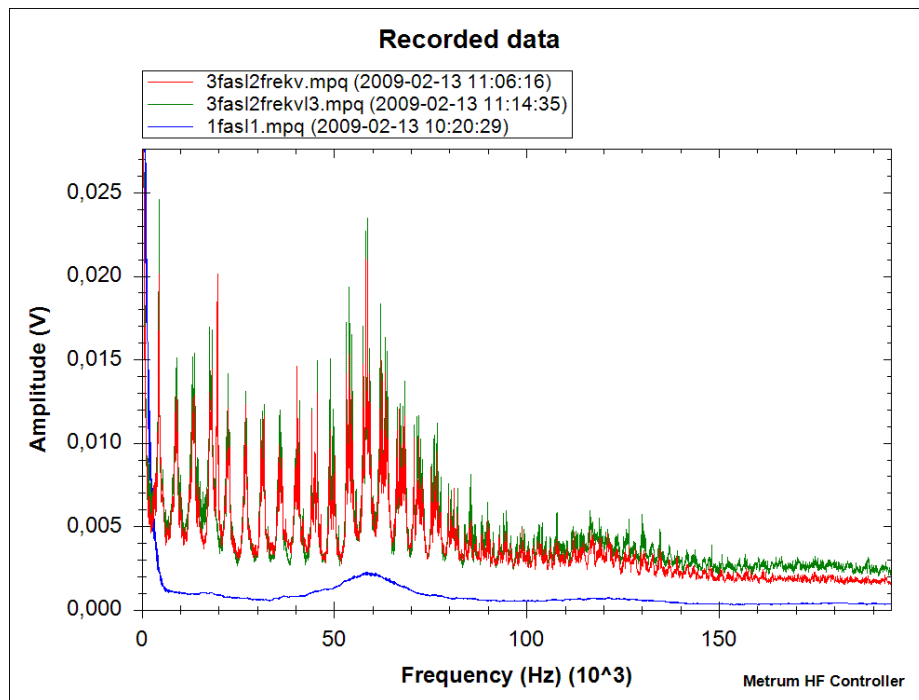
9.3 Spridning i nätet

För att se dämpningen/spridningen i nätet genomfördes mätningar först direkt på frekvensomriktaren för att få ett toppvärde på störningarna, som sedan jämfördes med mätningarna i nätstationen och med mätningar i ute i nätet när frekvensomriktaren var igång. Se Figur 50 för karta på de olika mätpunkterna.



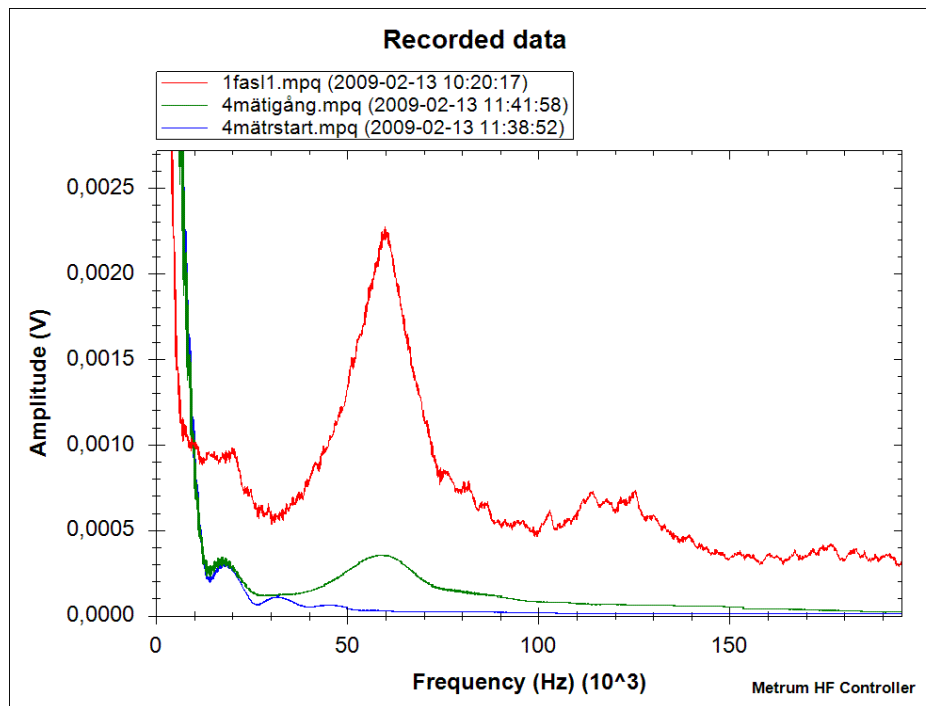
Figur 50. Områdeskarta, nätstationen finns längst upp till vänster (svart ring), frekvensomriktaren längst ner till höger (röd ring) och mätarrum finns till vänster om den gula markeringen. Större karta finns i bilaga B.

Figur 51 är resultatet ifrån mätningen på frekvensomriktaren, mätt vid energimätaren direkt på inkommande ledningar till frekvensomriktaren.



Figur 51. Fas L1 och L2 direkt vid frekvensomriktare jämfört med L1 mätt i nätstationen.

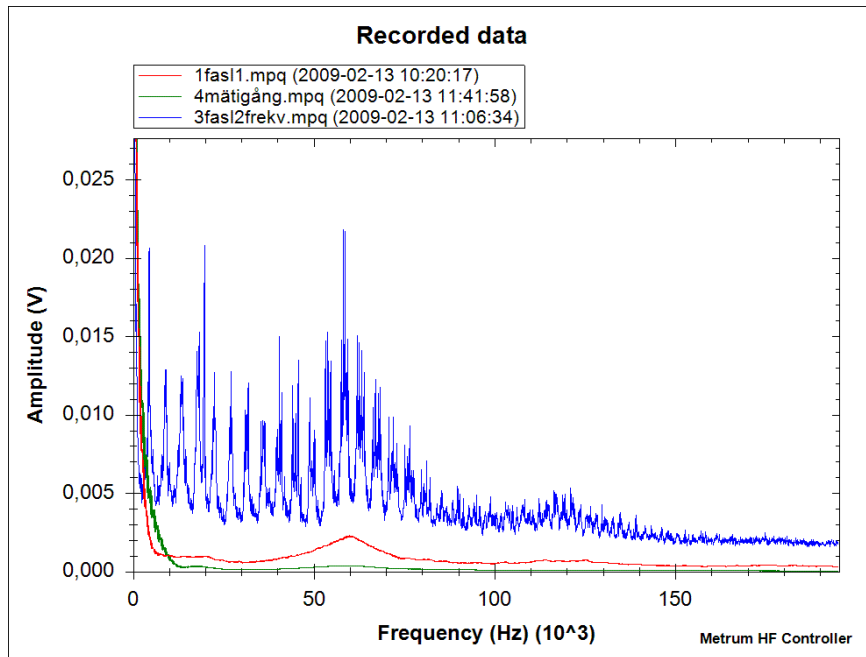
Figur 51 visar att avståndet på cirka 150 meter gör stor skillnad i amplitud, här är fas L1 och fas L2 direkt vid frekvensomriktaren röd respektive grön kurva, som referens används fas L1 i nätstationen, blå kurva. För att få ännu en bild av hur stor dämpningen är nätet, gjordes en mätning i ett mätarrum ca 50 m ifrån nätstationen. Se Figur 52.



Figur 52. Mätning fas L1 (grön) i mätarrum när frekvensomriktaren är igång jämfört med nätstation (röd) samt mätarrum när frekvensomriktaren är avstängd, bakgrundsbrus (blå). Observera att upplösningen skiljer mot övriga figurer i detta stycke.

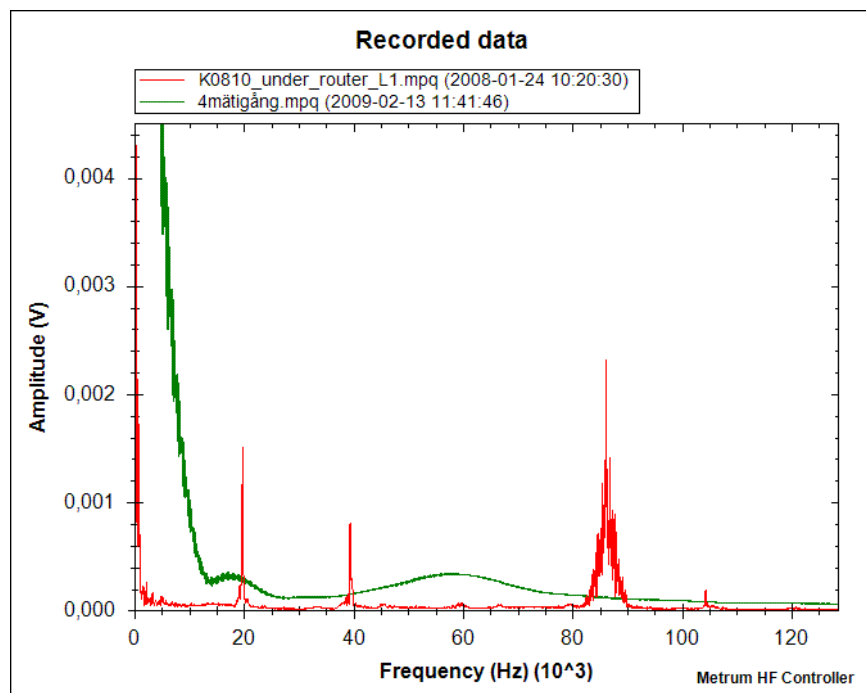
Figur 52 visar mätningarna ifrån mätarrummet, där grön kurva visar när frekvensomriktaren är igång och blå när frekvensomriktaren är avstängd, med i figuren är även mätning från nätstationen (röd). Mätningen som genomfördes när frekvensomriktaren var avstängd användes för att få en referens på hur högt bakgrundsbrus det fanns på mätplatsen innan frekvensomriktaren startades.

En jämförelse mellan de olika mätningarna som genomfördes på de tre mätpunkterna finns i Figur 53. Observera skillnaden i upplösningen på axlarna.



Figur 53. Störningsutbredning i nätet, intill frekvensomriktaren (blå) jämfört med nätstationen (röd) cirka 150 meter ifrån frekvensomriktaren samt närliggande mätarrum cirka 200 meter ifrån frekvensomriktaren.

Figur 53 visar tydligt vilken skillnad avstånden i nätet gör, för att sätta dämpningen i nätet i perspektiv till de problem som finns i nätstationen kan en jämförelse göras mellan signalstyrkan och brusnivån i nätstationen. En jämförelse kan ge en god bild på hur kommunikationen skulle fungera i mätarrummet, se Figur 54.

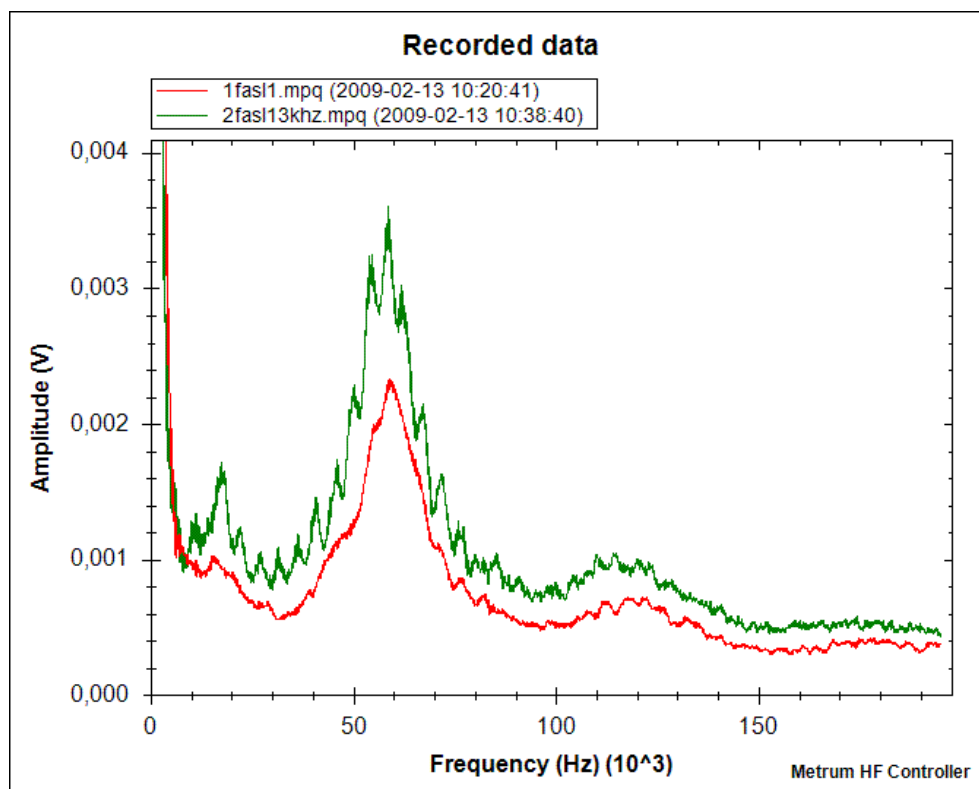


Figur 54. Jämförelse mellan brusnivån med kommunikationssignal (grön) och störningsnivå i mätarrum (röd).

Figur 54 ger en god bild av hur hög nivån på störningen är ifrån frekvensomriktaren ca 200 meter bort. Jämfört med brusnivån i nätstationen när frekvensomriktaren ger ett gott värde på hur eventuell kommunikation skulle fungera i mätarrummet. I Figur 54 visas även kommunikationssignalen som är avsevärt högre än brusnivån. Jämfört med tidigare mätningar när frekvensomriktaren är igång och kommunikationen genomförs i nätstationen visar att det är troligt att kommunikationen skulle fungera om konzentratoren flyttades till mätarrummet.

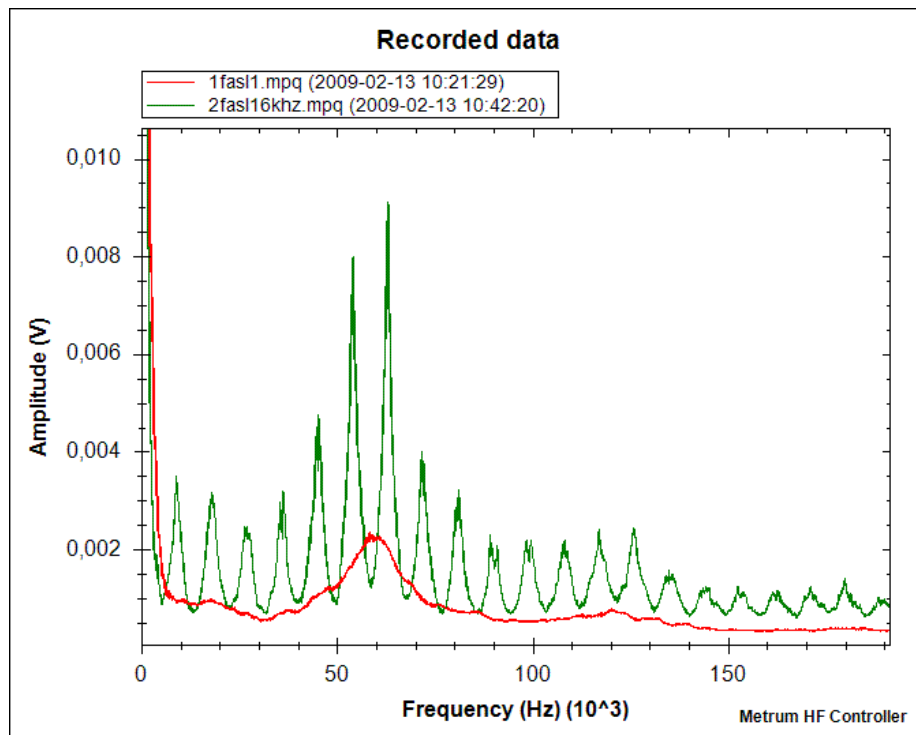
9.4 Byte av switchfrekvens

Omriktaren Emotron FDU40-146 har möjlighet att variera switchfrekvensen i fyra olika lägen, tre fasta 1,5 kHz, 3 kHz och 6 kHz samt ett läge som heter 6 kHz +/- 750 kHz, där frekvensen varierar runt 6 kHz med 750 Hz steg. Anledningen till att detta testas är för att se om eventuellt någon inställning ligger lägre i störningsamplitud än grundinställningen. Eventuellt kan de högre frekvenserna ändra utseendet så att kommunikationen kan kommunicera i ostört område runt switchfrekvensövertonerna. Den första frekvensen som testades var 3 kHz mätningarna genomfördes i nätstationen där kommunikationsutrustningen sitter, se Figur 55 där 3 kHz jämförs med 1,5 kHz.



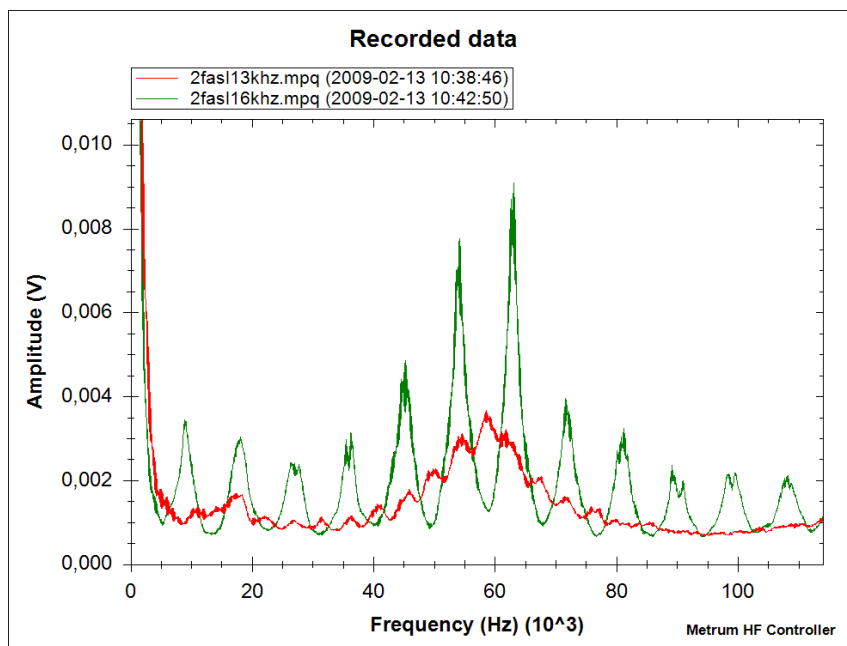
Figur 55. Jämförelse mellan 1,5 kHz (röd) switchfrekvens och 3 kHz (grön) switchfrekvens.

Figur 55 visar tydligt att 3 kHz switchfrekvens, grön kurva, ger ett högre brus utmed hela det uppmätta frekvensområdet jämfört med 1,5 kHz, röd kurva. Att 3 kHz switchfrekvens ger ett högre brus beror på att den högre switchfrekvensen ger fler switchtillfällen samt högre switchförlust, det som här uppträder som störningar. Så den kraftiga störningen vid högre frekvens är väntad. Det går även att se switchfrekvensen och dess påverkan på störningarna i den gröna kurvan, 3 kHz, syns toppar som skiljer ca 3 kHz mellan varandra samt avtar ju högre frekvensen blir vilket troligtvis beror på övertoner på switchfrekvensen. Nästa mätning genomfördes med 6 kHz switchfrekvens, se Figur 56.



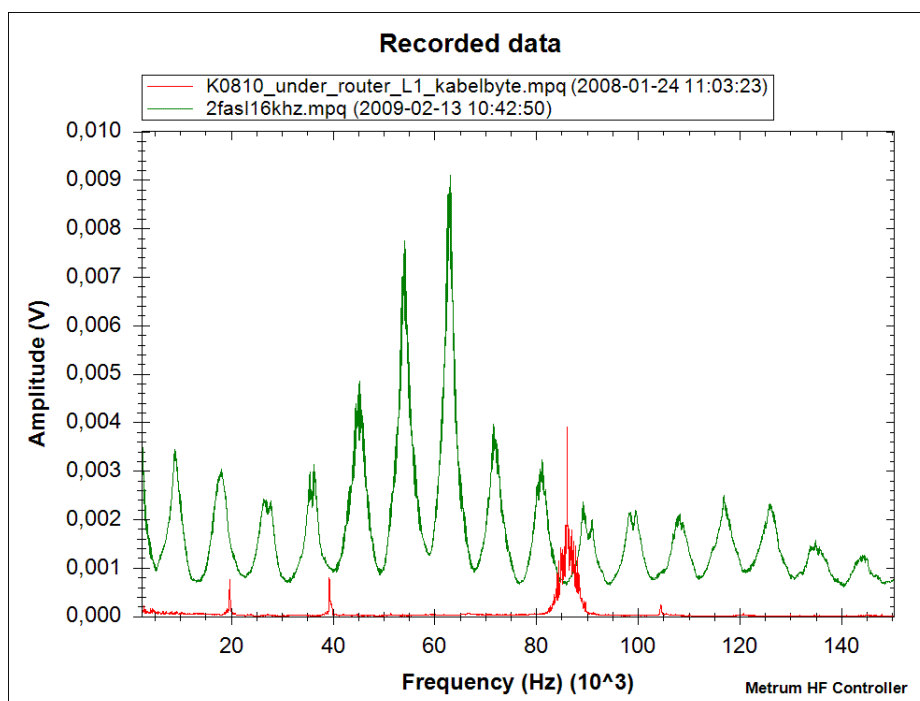
Figur 56. Jämförelse mellan 1,5 kHz (röd) switchfrekvens och 6 kHz (grön) switchfrekvens.

En förhoppning med att ändra till 6 kHz skulle vara att de återkommande topparna i rippet skulle bli glesare, vilket eventuellt skulle medföra att den primära eller sekundära frekvensen skulle hamna emellan två toppar och därigenom inte bli störd. Figur 56 visar hur bruset är mycket högre än för 1,5 kHz vilket kunde förväntas. Däremot var bruset lägre på vissa ställen än 1,5 kHz mätningen och på flera ställen mycket lägre än 6 kHz. Mätningarna med 6 kHz jämfört med 3 kHz signalen visas i Figur 57



Figur 57. 6 KHz switchfrekvens jämfört med 3 kHz switchfrekvens.

Tanken med att ändra switchfrekvensen var att undersöka hur switchförlusterna påverkade högfrequensbruset men även att undersöka hur karakteristiken på bruset ändrades. Den största förändring skedde när switchfrekvensen ändrades till 6 kHz, se Figur 58.

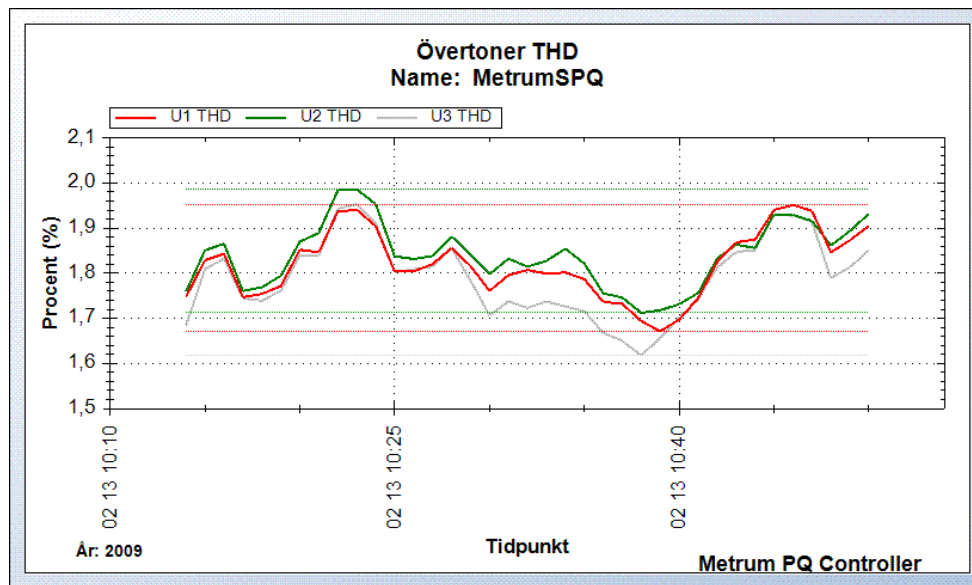


Figur 58. Grön kurva är uppmätt med 6 kHz switchfrekvens här jämfört med röd kurva som är kommunikationssignalen.

När switchfrekvensen ändrades till 6 kHz ändrades karaktäristiken ganska rejält, förhoppningen var att få till en ändring i bruset så att kommunikation skulle vara möjlig, då PLC-utrustningen som används har ett ganska smalt bandpassfilter[14]. Samtidigt som utseendet ändrades höjdes lägsta nivån så förutsättningarna för kommunikationen ändrades inte. I detta fall påverkade inte ändringen av switchfrekvens kommunikationssituationen nämnvärt. Mätningarna visar att en förändring kan påverka högfrekvensbruset främst vid en sänkning av switchfrekvensen eftersom switchtillfällerna blir färre och därigenom erhålls mindre brus i nätet. En högre switchfrekvens kan även påverkas men det är ifall det är switchövertoner som stör kommunikationen, en ändring kan då "flytta" störningen.

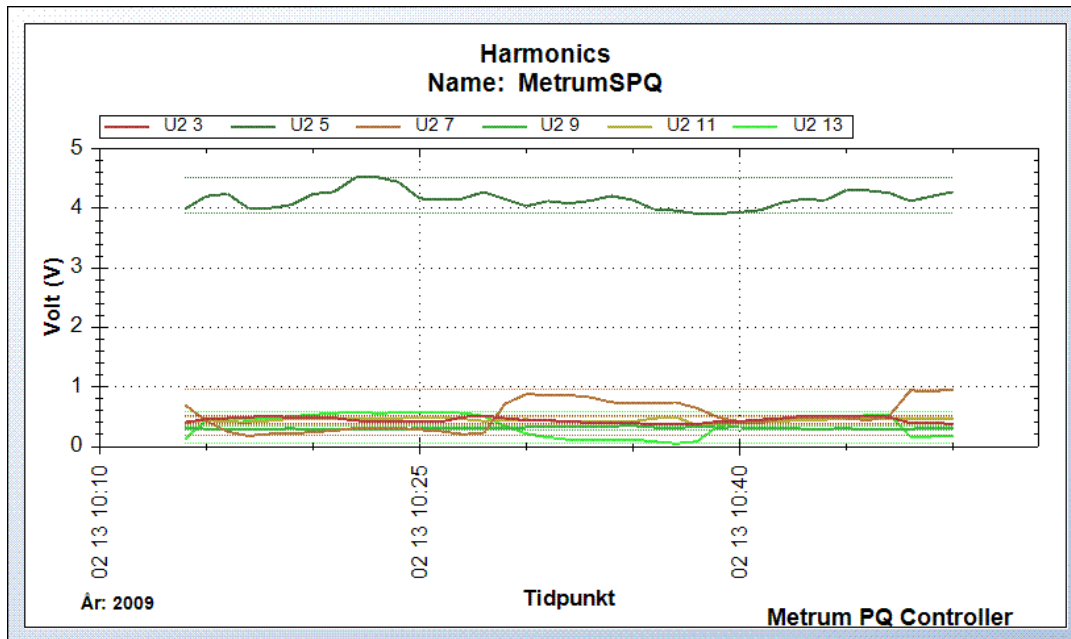
9.5 Mätning med Elkvalitetsmätare

Mätning med elkvalitetsmätare gjordes för att se hur väl frekvensomriktaren samt övrig last i nätet uppfyller de krav som finns enligt standarden, CENELEC EN 50 160. Mätningarna inkluderar all last som är anslutet till nätstationen även störningar som kommer från nätet, uppströms är även inkluderade. Så de värden som uppmäts kan inte tillskrivas frekvensomriktaren även om detta är den ensamt största lasten[12]. Först kontrolleras THD, Total Harmonic Distortion, det vill säga hur mycket övertoner det finns i nätet, se Figur 59.



Figur 59. THD uppmätt i nätstationen

Figur 59 visar det totala bidraget från övertoner i förhållande till grundfrekvensen detta skall ej överstiga 8 % så god marginal finns. Även om THD går under gränsvärdet så kan enskilda övertoner ligga över därför är det även intressant att titta på dessa, se Figur 60.



Figur 60. Individuella övertoner på fas två i nätstationen.

Även de individuella övertonerna ligger inom de krav som finns från CENELEC EN 50 160 standarden. Mätningen visar det som kunde förväntas här är, att den 5:e övertonen den dominerande med ett toppvärde på 4,52 V vilket motsvarar ungefär 2 % vilket är långt under gränsen enligt EN 50 160 som är 6 %. Övriga övertoner ligger under 1 V som motsvarar ungefär 0,5 %, så alla övertoner ligger väl under gränserna. I övrigt så är alla andra elkvalitetsvärden spänning, frekvens, balans med mera inom de gränsvärden som finns.

Kraven för övertoner från CENELEC EN 50 160 finns i bilaga F.

10 Slutsatser

Mätningarna som genomfördes i detta examensarbete visar att störningen från frekvensomriktaren som finns ansluten till C4energis elnät är för stor för att kommunikationen skall fungera utan ytterligare åtgärder. Dessa åtgärder kan innefatta filter, flytt av koncentratorn eller byte av kommunikationssystem.

Den aktuella frekvensomriktaren saknar ett tillvalsfilter, för att säkerställa om detta filter skulle lösa kommunikationsproblemen behöver tester först utföras med filtret anslutet innan det säkert går att säga att kommunikationen skulle fungera med detta. En flytt av koncentratorn skulle eventuellt också kunna lösa kommunikationsproblemen vilket även mätningarna visar men detta är inte aktuellt då C4energi ej har möjlighet att flytta koncentratorn.

Mätningarna som genomfördes på olika platser i nätet visar att nätet dämpar störningarna effektivt på förhållandevis kort avstånd, vilket är positivt ur störningssynpunkt men negativt ur kommunikationssynpunkt då även kommunikationssignalen dämpas.

De olika driftlägen som finns på frekvensomriktaren möjliggjorde viss ändring av switchfrekvensen, vilket visade att olika switchfrekvens har betydelse för högfrekvensbruset. I fallet Kristianstad räckte inte denna förändring i bruset för att få en fungerande kommunikation men ändringarna visade på hur bruset varierade beroende på switchfrekvens. Mätningarna visar att de lägre switchfrekvenserna i regel var bättre än de högre.

Simuleringarna som genomfördes på anslutningskablarna visar hur "skin effect" påverkar de olika kablarna vid högfrekvent överföring. De resultat som simuleringarna gav kan inte helt förklara varför de uppmätta signalvärdena skilde så mycket som de gjorde mellan flerkardelig och enkelkardelig kabel men räcker för att förklara fenomenet. Som slutsats går att dra av simuleringarna är att det är bäst signalmässigt att använda flerkardelig kabel istället för enkelkardelig kabel.

Skillnaden mellan den första inledande mätningen och den efterföljande mätningen visar hur svårt det är att använda elnätet som kommunikationsmedium även om de flesta faktorer såsom belastning, tidpunkt och driftläge på frekvensomriktare var samma vid de båda tillfällena så skilde mätningarnas resultat.

För att få ett bra fungerande elnätskommunikationssystem behövs stor kunskap om det egna nätet och anslutna laster, vilket är svårt i distributionsnät. För att underlätta detta kan bättre lagstiftning angående störande laster behövas då det i dagsläget inte finns bra riktlinjer för hur mycket ansluten last får störa i de högre frekvensområdena. En sådan lagstiftning är förstas svår att skapa då det är komplext att mäta produkters effekt i det berörda området då den också varierar beroende på vart i nätet den är ansluten och övriga produkter som finns anslutna, då effekten blir sammanslagen för flera produkter. Även om detta arbete för att ta fram en lagstiftning är komplicerat så skulle det underlätta mycket för elnätsägarna. Störningarna som uppmättes är inte unika för frekvensomriktaren i Kristianstad utan finns för flera typer av frekvensomriktare, liknande kraftelektronik och andra fabrikat.

11 Källor

- [1] Näringsdepartementet. (2003). *Månadsvis avläsning av elmätare och sänkt gräns för timvis mätning*. Faktablad. URL:<http://www.regeringen.se/content/1/c4/23/31/f6307270.pdf>.
- [2] Australia Communications Authority. (2003). *Broadband Powerline Communications Systems*. Rapport. URL:http://www.acma.gov.au/webwr/radcomm/frequency_planning/spps/0311spp.pdf.
- [3] Dostert, Klaus. (2001). *Powerline communications*. New Jersey: Prentice Hall.
- [4] Echelon. (2008). *Smart Metering Systems*. Webportal. URL:<http://www.echelon.com/metering/>.
- [5] Montoya, Luis F. (2003). *Power Line Communications -Performance Overview of the Physical Layer of Available protocols*. University of Florida Gainesville, Florida
- [6] CENELEC. (2008). *Spänningens egenskaper i elnät för allmän distribution: europeisk standard EN 50160 utgåva 3*. Bryssel.
- [7] Mohan, Ned; Undeland, Tore; Robbins, William. (2003). *Power Electronics, Converters, Applications and Design*. New Jersey: John Wiley and Sons.
- [8] Bergqvist, Kennert; Collin, Martin. (2003) *Dämpning av harmoniska övertoner på ett trefas nät*. Examensarbete VXU. URL:<http://www.vxu.se/msi/utb/exarb/2003/03094.pdf>.
- [9] Hingorani, Narain G.; Gyugyi, Laszlo. (1999) *Understanding facts*. New Jersey: Wiley-IEEE Press.
- [10] Echelon. (2001). *Power Line Smart Transceiver Data Book* Teknisk beskrivning URL: http://www.echelon.com/support/documentation/manuals/transceivers/005-0193-01B_PL_Data_Book.pdf
- [11] HM Power AB. (2008). *Produktbeskrivning*. Teknisk beskrivning. URL:<http://www.turtle.nu>
- [12] Enligt uppgift från C4energi.
- [13] Echelon. (2001). PLT-22 Power Line Transceiver Model 50100-01. Datablad. URL:<http://www.echelon.com/support/documentation/datashts/50090.pdf> .
- [14] Echelon. (1999). *Using the LONWORKS PLT-22 Power Line Transceiver in European Utility Applications*. Datablad. URL:<http://www.echelon.com/support/documentation/manuals/transceivers/078-0180-01A.pdf>
- [15] Asplund, Daniel. (2006). *Prestandautvärdering av tre elnätskommunicerande AMR-system*. Exemansarbete. KTH.
- [16] Majumder, A.; Caffery J, Jr. *Power line communications*. IEEE Potentials Volume 23, Issue 4, Oct.-Nov. 2004 Sidorna: 4 - 8
- [17] Malack, J.A.; Engstrom, J.R. *RF Impedance of United States and European Power Lines*. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Feb. 1976 Volume: EMC-18, Issue: 1 Sidorna: 36-38

- [18] Cavdar, I. H. Performance Analysis of FSK Power Line *Communications Systems over the Time-varying Channels: Measurements and Modeling.*, IEEE Transactions on Power Delivery Volume 19, Issue 1, Jan. 2004 Sidorna: 111 – 117.
- [19] Kosonen, A.; Ahola, J.; Silventoinen, P. *Measurements of HF current propagation to low voltage grid through frequency converter.* IEEE 2007 European Conference on Power Electronics and Applications. Volume , Issue , 2-5 Sept. 2007 Sidorna: 1 – 10.
- [20] Andersson, leif. (2003). *Elkraftshandboken. Elkraftsystem 1.* Solna: Liber AB.
- [21] Abdel-Rahman, Mansour H. (2009). *Electromagnetic Transients in Power Systems.* Opublicerat presentation. University of El-Mansoura, Egypt.
- [22] Ericsson Network Technologies. (2008). *KRAFTKABLAR Produktinformation.*
[URL:www.ericsson.se/http://archive.ericsson.net/service/internet/picov/get?DocNo=28701-SV/LZT108511](http://www.ericsson.se/http://archive.ericsson.net/service/internet/picov/get?DocNo=28701-SV/LZT108511)
- [23] Tran-Anh, T.; Auriol, P.; Tran-Quoc, T. *Distribution network modeling for power line communication applications.* IEEE 2005 International Symposium on Power Line Communications and Its Applications, Publication Date: 6-8 April 2005 Sidorna: 361- 365
- [24] Berglund, Sven-Erik; Gustavsson, Rejdar; Englund, Gunnar; Åkerlund, John. (2004) *Frekvensomriktare.* Guide/Rapport. Energimyndigheten, Elforsk.
- [25] Maniktala, Sanjaya. (2006). *Switching Power Supplies A to Z.* Oxford: Elsevier.
- [26] Bongiorno, Massimo. (2008). *Lecture slides.* Power Electronic Solutions for Power Systems. Opublicerat.
- [27] DellaSala, Gene. (2004). Skin Effect Relevance in Speaker Cables. Webartikel.
URL:<http://www.audioholics.com/education/cables/skin-effect-relevance-in-speaker-cables>
- Samtliga webbadresser fanns tillgängliga 2009-03-24.

12 Bilagor

12.1 Bilaga A - MATLAB-kod övertoner

```
x = [0:pi/50:2*pi]; %Tidsaxeln
h1 = sin(x); %grundtonen
h3 = h1+1/3*sin(3*x); % 3:e överton
h5 = h3+1/5*sin(5*x); % 5:e
h7 = h5+1/7*sin(7*x); % 7:e
subplot(2,2,1), plot(x/(pi*100),h1), title('Grundfrekvens (50 Hz)'),
xlabel('Tid [s]'), ylabel('Amplitud')
subplot(2,2,2), plot(x/(pi*100),h3), title('Grund., och 3:e'), xlabel('Tid
[s]'), ylabel('Amplitud')
subplot(2,2,3), plot(x/(pi*100),h5), title('Grund., 3:e och 5:e'),
xlabel('Tid [s]'), ylabel('Amplitud')
subplot(2,2,4), plot(x/(pi*100),h7), title('Grund., 3:e, 5:e och 7:e'),
xlabel('Tid [s]'), ylabel('Amplitud')

% för figur med grundton med adderad 7:e överton
h1 = sin(x);
h7 = h1+1/7*sin(7*x);
plot(x/(pi*100),h7), title('Grundton med adderad 7:e överton'), xlabel('Tid
[s]'), ylabel('Amplitud')
```


12.2 Bilaga B - Karta över område i Kristianstad där mätningarna genomfördes



12.3 Bilaga C – Teknisk beskrivning Metrum HF-instrument

metrum® HF - mätinstrument

Teknisk specifikation

Parametrar	Specifikation	Information	metrum® HF	
Ingångar				
Spänningskanaler (HF)	0-275 V RMS	Fas/Nolla HF-kanaler	1	
Strömkanaler (HF)		Specialströmtång (100 kHz)	1(Option)	
Strömförsörjning				
Matningsspänning	85-264 VAC/110-375 VDC (47-63 Hz)		230 V	
Inbyggd backup			Ja	
Hårdvara				
Minne	32 MB	Flash minnen (NAND)	32 MB	
Samplingsfrekvens			400 kHz	
Bandbredd HF			200 kHz	
Anti-alias filter			Ja	
PLL synkronisering			Ja	
Kommunikation				
RS-232		Datorport	Ja	
RS-232		Modem, terminaler etc.	Ja	
Funktionalitet				
Loggning av HF-störningar		Långtidsanalyser	Ja	
Triggning av HF-störningar		Ställbara gränsvärden	Ja	
Realidsvisning via spektrumanalys			Ja	
Intern nivåanalys av brus		Analys och visning via diod	Ja	
				
Fysiska data				
Storlek (B x L x D)	160 x 240 x 90 mm	Säkerhet	EN 61 010-1	
Vikt	1,3 Kg	EMC	EN 50 081-1,2; EN 50 082-1,2	
Arbetstemperaturar	-10°C till +40°C			
Luftfuktighet	10% - 85%, Icke-kondenserande			

- Metrum Sweden AB förbehåller sig rätten att ändra den tekniska specifikationen för beskrivna produkter i detta dokument -



Metrum Sweden AB
 Fabriksgatan 7, SE-412 50 Göteborg, Sweden Tel: +46 (0)31 7990280
 E-post: info@metrum.se Hemsida: www.metrums.se

Rev 1.2 SVE

12.4 Bilaga D – Teknisk beskrivning Metrum SPQ-instrument

metrum® SVQ/SPQ - portabla mätinstrument

Teknisk specifikation

Parametrar	Specifikation	Information	SVQ/SPQ
Ingångar			
Spänningskanaler	0-275 V RMS	Normenlig mätning (klass A)	3
Strömkanaler	0,05-120 A RMS alt. 1-1200 A RMS	Specialanpassade strömtänger (BNC) Anpassning kan ske för olika mätområden	0/4
Strömförsörjning			
Matningsspänning	85-264 VAC	Mätenheten försörjs via mätgång L1	Ja
Inbyggd backup			Ja
Normuppfyllande			
IEC 61000-4-30, klass A	< 0,1 %	Referensinstrument	Ja
IEC 61000-4-7		Övertonsmätning	Ja
IEC 61000-4-15		Flimmermätning	Ja
EN 50 160		Utförs i enheten	Ja
Norsk föreskrift (FoL)		Utförs i enheten	Ja
Kundanpassade normer		Utförs i enheten	Ja
Lagringsintervall		Ställbara intervall/parameter	Ja
PQDIF format		För allmänna PQ viewers	Ja
Hårdvara			
Minne		Flash minnen (NAND)	32 MB
Samplingsfrekvens		Ställbar samplingsfrekvens	12,8 kHz
Noggrannhet		Klass A (IEC61000-4-30)	< 0,1 %
Upplösning			16 bit
Ingångsimpedans spänningskanaler			1 MOhm
Ingångsimpedans strömkanaler			10 mOhm
Anti-alias filter			Ja
- Bandbredd			3,5 kHz
PLL synkronisering			Ja
Kommunikation			
RS-232		Datorport	Ja
RS-232		Modem, GSM, terminaler etc.	Ja
Ethernet kommunikation (RJ-45)		Ethernet adapter	Option
Fysiska data			
Storlek (B x L x D)	160 x 240 x 60 mm	Säkerhet	EN 61 010-1
Vikt	1,3 Kg	EMC	EN 50 081-1,2; EN 50 082-1,2
Arbetstemperatur	-10°C till +55°C		
Luftfuktighet	10% - 85%, Icke-kondenserande		

- Metrum Sweden AB förbehåller sig rätten att ändra den tekniska specifikationen för beskrivna produkter i detta dokument -



Metrum Sweden AB
Vestagatan 2, SE-416 64 Göteborg, Sweden Tel: +46 (0)31 7990280
E-post: info@metrum.se Hemsida: www.metrums.se

Rev 1.7 SVE

12.5 Bilaga E- MATLAB-kod skin effect

```
%Skin effect fintrådig och enkeltrådig
%Flertrådig anses vara DC i dessa beräkningar på grund av antalet ledare
%och dess diameter.

%Konstanter
f=20000:1:4000000; %frekvensområde
L=0.5; %längd på ledaren i meter

%Materialkonstanter
u=4*pi*10^-7; % permeabilitet (koppar u=4*pi*10^-7)
p=1.72*10^-8; % resistivitet för ledaren (koppar p=1.76*10^-8)
o=1/p; %59.6*10^6;

%Beräkningar
w=2.*pi.*f;
A_mm=1.5 %kabelarean mm
A=A_mm/(10^6);
r=sqrt(A/pi);

d=sqrt(2.*p./(w.*u));
R_ac=(p./d) .* (L./(pi.*2*r));

R_dc=1/(pi*o*r^2) .* 0.5; % per ½ meter
R_dc2=p*(L/A)

%alternativ formel om R_dc istället används för båda fallen,
%med med varierande r i enkeltrådsfallet

ratio=r.^2./(r.^2-(r-d).^2);

figure(1)
plot(f, (R_ac))
title('Resistansen från skin effect')
xlabel('Frekvens [Hz]')
ylabel('Resistans [ohm]')
figure(2)
semilogx(f, (R_ac/R_dc2))
title('Resistansen på grund av skin effect jämfört med DC R.')
xlabel('Frekvens [Hz]')
ylabel('Resistans flertråd/Resistans enkeltrådig')
hold on
%figure(3)
%semilogx(f, ratio, 'r')
%title('Resistanstratio Rac/Rdc alt. beräkning')
%xlabel('Frekvens [Hz]')
%ylabel('Resistans flertråd/Resistans enkeltrådig')
figure(4)
semilogx(f, d*1000)
title('Djup på grund av skin effect')
xlabel('Frekvens [Hz]')
ylabel('Djup [mm]')
```

12.6 Bilaga F – Övertoner enligt EN 50 160

Tabell 1: Värdet av enskilda övertoner i anslutningspunkten för övertoner av ordningen upp till 25, angivna i procent av U_n

Udda övertoner				Jämna övertoner	
Ickemultipler av 3		Multipler av 3			
Ordning h	Relativ spänning	Ordning h	Relativ spänning	Ordning h	Relativ spänning
5	6 %	3	5 %	2	2 %
7	5 %	9	1,5 %	4	1 %
11	3,5 %	15	0,5 %	6 ... 24	0,5 %
13	3 %	21	0,5 %		
17	2 %				
19	1,5 %				
23	1,5 %				
25					

ANM - Inga värden är angivna för övertoner av högre ordning än 25 då dessa vanligtvis är små och i stor utsträckning oförutsägbara till följd av resonansfenomen.