

Elkvalitet

Kompensering och övertoner

Rasmus Pyhäjärvi

Examensarbete för ingenjör (YH)-examen

Utbildningsprogrammet el- och automationsteknik

Vasa 2019



EXAMENSARBETE

Författare: Rasmus Pyhäjärvi
Utbildning och ort: El- och automationsteknik, Vasa
Inriktningsalternativ: Elkraftsteknik
Handledare: Lars Enström

Titel: Elkvalitet

Datum 21.2.2019

Sidantal 43

Abstrakt

Detta examensarbete behandlar frågor om elkvalitet och vad det innebär. Ämnen som behandlas mest är kompensering och övertoner. Syftet var att fördjupa sig inom ämnet för att klara av att upptäcka och åtgärda problem som uppstår i elförbrukarens elnät.

Arbetet innehåller en teoretisk del och en praktisk del. Material som har använts är böcker och artiklar.

I arbetet utförs en praktisk mätning med analysatorn Fluke 345 II hos en kund för att förbättra elkvaliteten, varefter resultatet analyseras, och problemet åtgärdas.

Språk: svenska

Nyckelord: elkvalitet, kompensering, övertoner

OPINNÄYTETYÖ

Tekijä: Rasmus Pyhäjärvi
Koulutus ja paikkakunta: Sähkö- ja automaatiotekniikka, Vaasa
Suuntautumisvaihtoehto: Sähkövoimatekniikka
Ohjaaja: Lars Enström

Nimike: Sähkönlaatu

Päivämäärä 21.2.2019

Sivumäärä 43

Tiivistelmä

Tämä opinnäytetyö käsittää kysymyksiä sähkönlaadusta ja miten siihen voi vaikuttaa. Suurin osa työstä käsittää termejä kuten yliaaltoja ja kompensointia. Tavoite on, että lukija saisi hyvän käsityksen siitä mitä sähkönlaatu on ja miten siihen voi vaikuttaa sähkökuluttajan näkökulmasta.

Opinnäytetyö sisältää teoreettisen osan ja käytännön osan. Materiaalit mitä opinnäytetyöhön on käytetty ovat oppikirjoja ja artikkeleita.

Käytännön osa koostuu sähkönlaatumittauksesta asiakkaan sähköverkossa sähkönlaatuanalysointilla Fluke 345 II. Mittaustulokset analysoitiin, jonka jälkeen suoritettiin tarpeelliset toimenpiteet parantaakseen sähkönlaatua asiakkaan verkossa.

Kieli: suomi

Avainsanat: sähkönlaatu, kompensointi, yliaallot

BACHELOR'S THESIS

Author: Rasmus Pyhäjärvi
Degree Programme: Electrical engineering, Vaasa
Specialization: Electrical Power Engineering
Supervisor: Lars Enström

Title: Electric Power Quality

Date February 21, 2019

Number of pages 43

Abstract

This Bachelor's thesis covers questions about power quality and how to improve it. The main subjects in this thesis are harmonics and reactive power compensation. The purpose with this thesis is to understand the factors that affect our power quality and how to improve it.

This thesis consists of a theoretical part and a practical part. Materials that have been used in this thesis are textbooks and articles.

The practical part consists of a power quality measurement in a customer's electricity grid with a power quality analyzer. The results of the measurements are analyzed, and necessary actions are taken to improve the power quality.

Language: English Key words: power quality, reactive power compensation, harmonics

Innehållsförteckning

1	Inledning.....	1
1.1	Syfte och problembeskrivning	1
1.2	Arbetsgivare JAP-Sähkö Oy	1
2	Elkvalitet.....	1
2.1	Vad är bra elkvalitet?	2
2.2	Elektromagnetisk kompatibilitet	3
2.3	Störningstyper.....	3
2.3.1	Spänningsdippar	3
2.3.2	Transienter.....	4
2.3.3	Övertoner.....	5
2.3.4	Harmoniska övertoner	8
2.3.5	Skador som uppkommer av övertoner	9
2.3.6	Åtgärder	9
2.4	Reaktiv effekt	10
2.5	Faskompensering.....	10
2.6	Kompensering av reaktiv effekt och filtrering av övertoner.....	12
2.6.1	Kondensatorenheter	12
2.6.2	Parallellkopplade kondensatorbatterier	13
2.6.3	Seriekopplade kondensatorer	15
2.6.4	Statiskt batteri	15
2.6.5	Övertonsfilter	18
2.6.6	Filtrering av tredje övertonen	20
2.6.7	Varför kompensera?	20
2.6.8	Allmänna principer	21
2.6.9	Kompensering minskar förluster	21
2.6.10	Pris på reaktiv effekt.....	21
2.6.11	Dimensionering och val av utrustning.....	23
3	Elkvalitetsstandarder och rekommendationer	24
3.1	Mätning av övertoner	25
3.1.1	Harmoniska övertonsspänningar.....	25
3.1.2	Harmoniska övertonsströmmar	26
4	Analysator Fluke 345 II.....	28
4.1	PowerWave-Funktion.....	29
4.2	Invertrars verkningsgrad.....	29
4.3	Unified Power Measurement	30
4.4	AutoTrend - Automatisk ritfunktion.....	31

4.5	SystemMonitor	32
5	Praktisk del	33
5.1	Problembeskrivning.....	33
5.2	Analys.....	33
5.3	Tillvägagångssätt.....	34
5.4	Mätresultat.....	38
5.5	Resultat	40
5.5.1	Kalkyl för återbetalningstid.....	40
6	Slutsats	42
7	Källförteckning.....	43

1 Inledning

Arbetet behandlar elkvalitet och vad det innebär. Elkvalitet är ett brett begrepp som påverkas av många olika faktorer. I detta arbete behandlas elkvaliteten främst i kundens nät, d.v.s. efter anslutningspunkten. Den teoretiska delen behandlar faktorer som påverkar elkvaliteten och hur man förbättrar den. I den praktiska delen utförs ett praktiskt arbete för att förbättra elkvaliteten hos en kund. Arbetet har gjorts åt JAP-Sähkö Oy.

1.1 Syfte och problembeskrivning

Syftet med arbetet är att fördjupa sig i frågan om vad elkvalitet är och hur den förbättras. Inom företaget har man tidigare utfört kompenseringensarbeten, och installerat övertonsfilter till olika förbrukare. Då har man som mätinstrument använt sig av Dranetz Power Platform, den börjar vara föråldrad, så man har bestämt sig för att köpa en ny analysator; Fluke 435 II.

Min uppgift är att lära mig använda den på rätt sätt och kunna analysera dess mätdata. Jag har i detta arbete utfört en mätning hos en kund och utifrån mätdata bestämt vad som bör göras för att förbättra kundens elkvalitet.

1.2 Arbetsgivare JAP-Sähkö Oy

JAP-Sähkö Oy är ett företag inom elbranschen. JAP-Sähkö är grundat år 1997 i Vasa. För tillfället arbetar 10 personer inom företaget, antalet varierar beroende på arbetssituation.

Företaget har sitt kontor i Sunnanvik. Tjänster som företaget erbjuder är el- och datainstallationer, felsökningar, övertonsmätningar, kompenseringmätningar, elkvalitetsmätningar och underhåll av centraler och transformatorstationer.

2 Elkvalitet

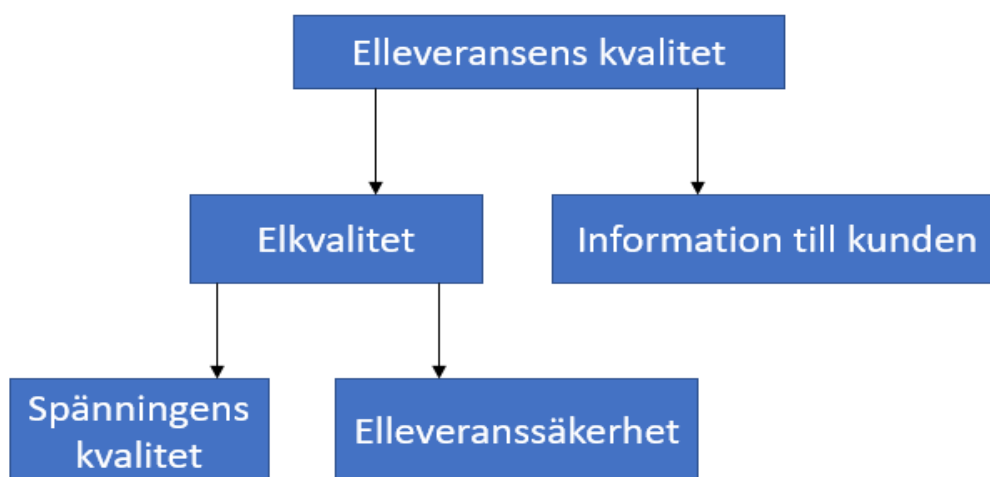
Elkvalitet är ett samlingsbegrepp för störningsfri el. Det är särskilt viktigt för industrier, där dålig elkvalitet kan ge skador på anläggningar eller avbrott i produktionen. Desto känsligare utrustning som kopplas in på elnätet, desto högre krav ställs på elkvaliteten och en störningsfri miljö. (Elovaara & Haarla, 2011)

2.1 Vad är bra elkvalitet?

Med en god elkvalitet menas i stort sätt att den betalande kunden får till sin anslutningspunkt, spänning av bra kvalitet utan avbrott och att kundbetjäningen fungerar bra.

The Council of European Energy Regulators (CEER) har definierat tre delområden som avgör kvaliteten: kundbetjäning (customer service), kontinuitet (continuity of supply) och spänningens kvalitet (voltage quality).

Man började uppmärksamma elens kvalitet, då mängden elektroniska apparater i nätet ökade på 1970-talet. Tidigare hade man endast apparater som t.ex. tvättmaskiner, kylskåp, dammsugare och glödlampor som inte orsakar försämrad elkvalitet, på grund av att de tar sinusformad ström från nätet. De var inte heller känsliga för brister i elkvaliteten, så som dagens elektronikutrustning. I början menade man med elkvalitet endast det att hur bra spänningens och strömmens momentanvärde följde sinuskurvan. Senare har även tagit i beaktan spänningens och frekvensens jämnhet samt strömmens leveranssäkerhet. Då man år 1995 enligt den finska elmarknadslagen beslöt att det skulle finnas två olika affärsverksamheter, elnätsverksamhet och elförsäljning, började man granska kvaliteten från två olika synvinklar. Nuförtiden pratar man om elleveransens kvalitet och elnätets kvalitet. Elleveransen är en helhet, som innehåller distribution och elförsäljning. Se figur 1 för elleveransens kvalitet och dess delområden. (Elovaara & Haarla, 2011)



Figur 1. Elleveransens kvalitet och dess delområden.

2.2 Elektromagnetisk kompatibilitet

IEC 61000-seriens standarder behandlar apparaters elektromagnetiska kompatibilitet (EMC, electromagnetic compatibility). Det kan uttryckas som apparaters förmåga att arbeta tillsammans utan att störa varandra. (Olsson, n.d.)

Till apparatens elektromagnetiska störningar hör apparatens störningar som inte är menat att förbättra apparatens förmåga. Störningarna sprids från apparat till apparat via kablar eller strålning. Störningarna kan bland annat synas som ränder i teven, brus i radion eller att datorer fallerar. (Elovaara & Haarla, 2011)

I Finland bär Kommunikationsverket och Säkerhets- och kemikalieverket (Tukes) huvudansvaret för förhandlingar och problemsituationer som uppstår på grund av störningar. Kommunikationsverket övervakar att radio- och teleapparater följer kraven. För övervakning av övriga apparater står Tukes.

2.3 Störningstyper

Det finns flera olika typer av störningar som försämrar elkvaliteten, men de vanligaste är spänningsdippar, transienter, övertoner och flimmer.

2.3.1 Spänningsdippar

Spänningsdippar innebär att spänningen plötsligt sjunker för att sedan komma tillbaka till ursprunglig nivå. Det kan vara allt från en sänkning till fullständigt bortfall som oftast varar bråkdelen av en sekund. Med dippar avses spänningssänkningar som är större än 10 % av nominell spänningsnivå och som varar längre än 10 ms och kortare än 90 s. (Olsson, n.d.)

Spänningsdippar orsakas av fel i någon anläggningsdel hos kunden eller i det matande kraftnätet. Åska och andra väderförhållanden orsakar en stor del av spänningsdipparna i luftledningarna. Andra orsaker kan vara skador på kablar i mark vid grävning och inkoppling av stora transformatorer och motorer. Andra vanliga störningskällor som ger upphov till spänningsdippar är jordfel, kortslutningar, motorstarter, pumpar och svetsmaskiner. (Unipower, n.d.)

Av alla elkvalitetsfel är det spänningsdippar som de flesta upplever som mest bekymmersamma. Såväl spänningsdippar som kortvariga avbrott kan slå ut hela industrier. Varvtalsstyrda drivsystem för elektriska maskiner är kanske mest känsliga för kortvariga spänningsdippar. Annan utrustning som kan påverkas är reglerutrustningar, datorer, urladdningslampor som slocknar och kontaktorer som slås ifrån. (Berglund & Åkerlund, 2007)

Ett sätt att minska på spänningsdippar ur kundens perspektiv är att i anläggningen tänka på placeringen av störningskänslig utrustning. Man kan som kund ställa större krav på apparattillverkaren, och se över underspänningsskydd i olika maskiner. (Unipower, u.d.) (Berglund & Åkerlund, 2007)

2.3.2 Transienter

Transienter är snabba, positiva eller negativa spänningsspikar som har en varaktighet mindre än 20 ms. Transienter med andra ord är en snabbare spänningsförändring än spänningsdippar. (Unipower, n.d.)

Transienter kan komma från överliggande elnät genom åsknedslag eller genom till- och frånkopplingar ute i elnäten. I lokala elnät, t.ex. industrinät kan skadliga transienter uppkomma vid till- och frånslag av tyngre elutrustningar. I lågspänningsnät kan transienter uppstå vid brytning av induktiva laster, exempelvis motorer. (Berglund & Åkerlund, 2007)

Elektronik är känslig för transienter. Inom industri, sjukvård och handel finns datorer, teleutrustning och olika typer av styrsystem som kan skadas och därmed orsaka allvarliga störningar i verksamheten. Avgörande för om en transient kan orsaka skada är amplitudens storlek, energiinnehållet och den utsatta apparatens isolationshållfasthet. (Berglund & Åkerlund, 2007)

Transienter åtgärdas olika beroende på vad som orsakar transienterna och typ av anläggning. I en industri kan en billig åtgärd vara att styra inkoppling av t.ex. kondensatorbatterier så att detta sker innan man slår till känslig utrustning. (Berglund & Åkerlund, 2007) (Unipower, u.d.)

2.3.3 Övertoner

Övertoner utgörs av spänning och ström med annan frekvens än grundtonen (50 Hz). Genom att övertoner förekommer i elnätet förvrängs spänningens och strömmens vågform från den ursprungliga sinusformen. I våra elnät uppträder framför allt övertoner av udda ordningstal. Övertoner av jämna ordningstal uppkommer endast om spänningens positiva och negativa del deformeras olika. Individuella övertoner anges normalt i procent av grundtonen, men anges ibland som absolutvärde i volt.

$$\frac{U_n}{U_1} * 100 \% \text{ för spänning och}$$

$$\frac{I_n}{I_1} * 100 \% \text{ för ström}$$

Ett annat begrepp som är av intresse är THD-värdet, den totala harmoniska distorsionen.

$$THD = 100 \sqrt{\sum_2^{\infty} \left(\frac{U_n}{U_1}\right)^2} \% \quad \text{THD i spänningen}$$

$$THD = 100 \sqrt{\sum_2^{\infty} \left(\frac{I_n}{I_1}\right)^2} \% \quad \text{THD i strömmen}$$

n anger övertonsnummret t.ex. 5:e överton är $n=5$.

U_1 resp. I_1 anger grundtonens del i spänningen respektive strömmen. THD är ett mått på avvikelser från sinusformen.

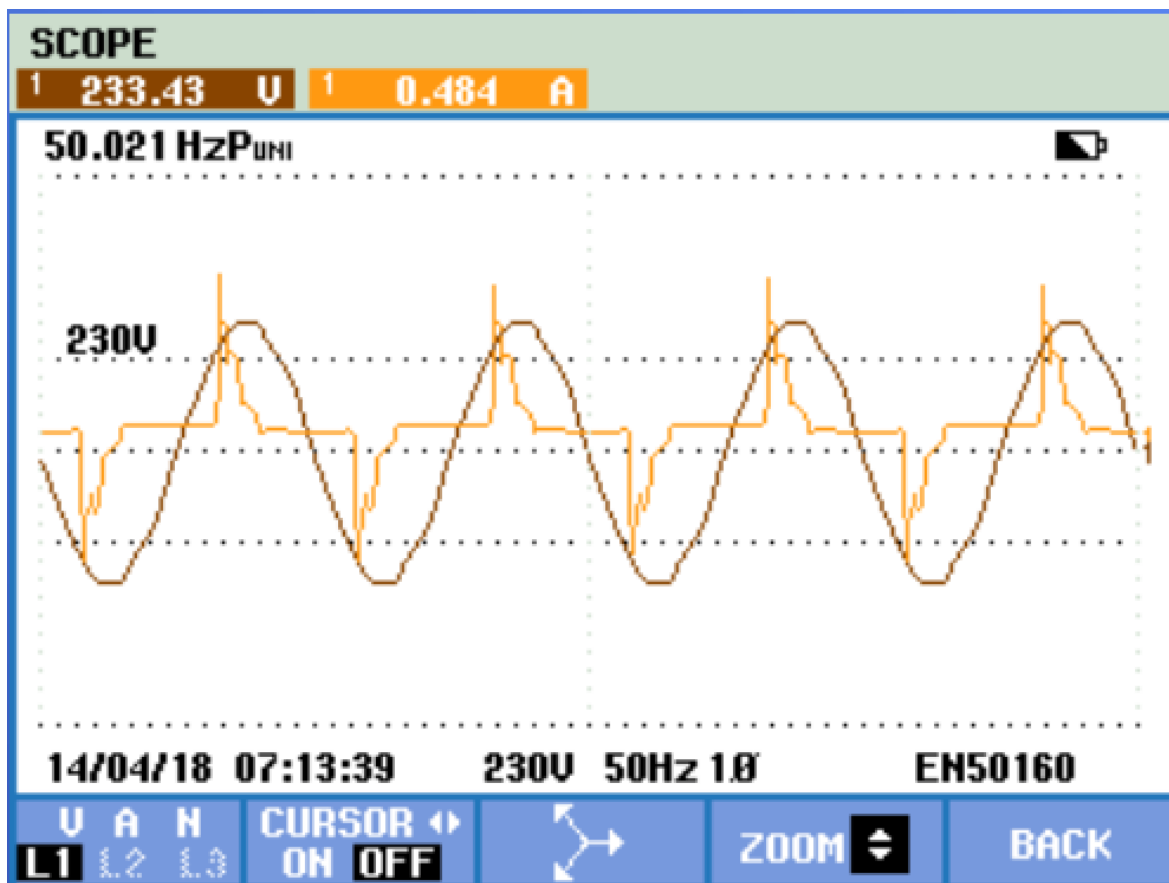
Olinjära laster ger upphov till övertoner genom att förhållandet mellan ström och spänning inte är konstant under en period.

Om man ansluter en olinjär belastning till elnätet kommer den att dra en ström som avviker från sinusformen, vilket ger upphov till övertoner. Strömmen kommer att orsaka motsvarande spänningsfall vilket förvränger spänningskurvans sinusform, och ger motsvarande övertoner i spänningen.

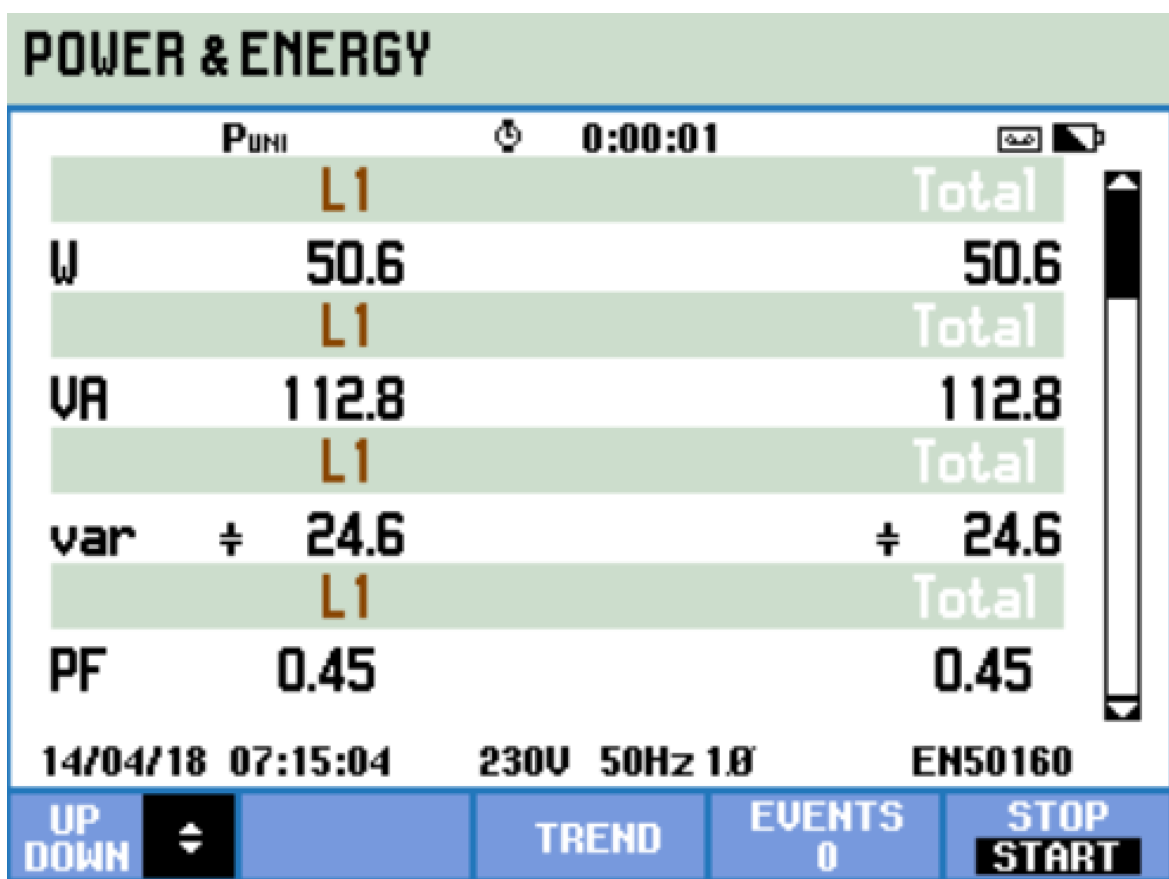
Storleken på spänningsfallet beror på nätets impedans, eller med andra ord, kortslutningseffekten. Förenklat kan man säga att högre kortslutningseffekt ger lägre amplituder på spänningsövertonerna. Övertonerna kan förstärkas kraftigt bl.a. på grund av resonans mellan elnätets induktanser och de kapacitanser som finns i kabelnätet samt i de kondensatorer för faskompensering som förekommer. (Berglund & Åkerlund, 2007)

Exempel på laster inom industrin som ger övertoner är statiska omriktare och ljusbågsugnar. Även i hemmen och på kontor finns övertonskällor i form av lågenergilampor, lysrörsarmaturer, datorer och annan hemelektronikutrustning.

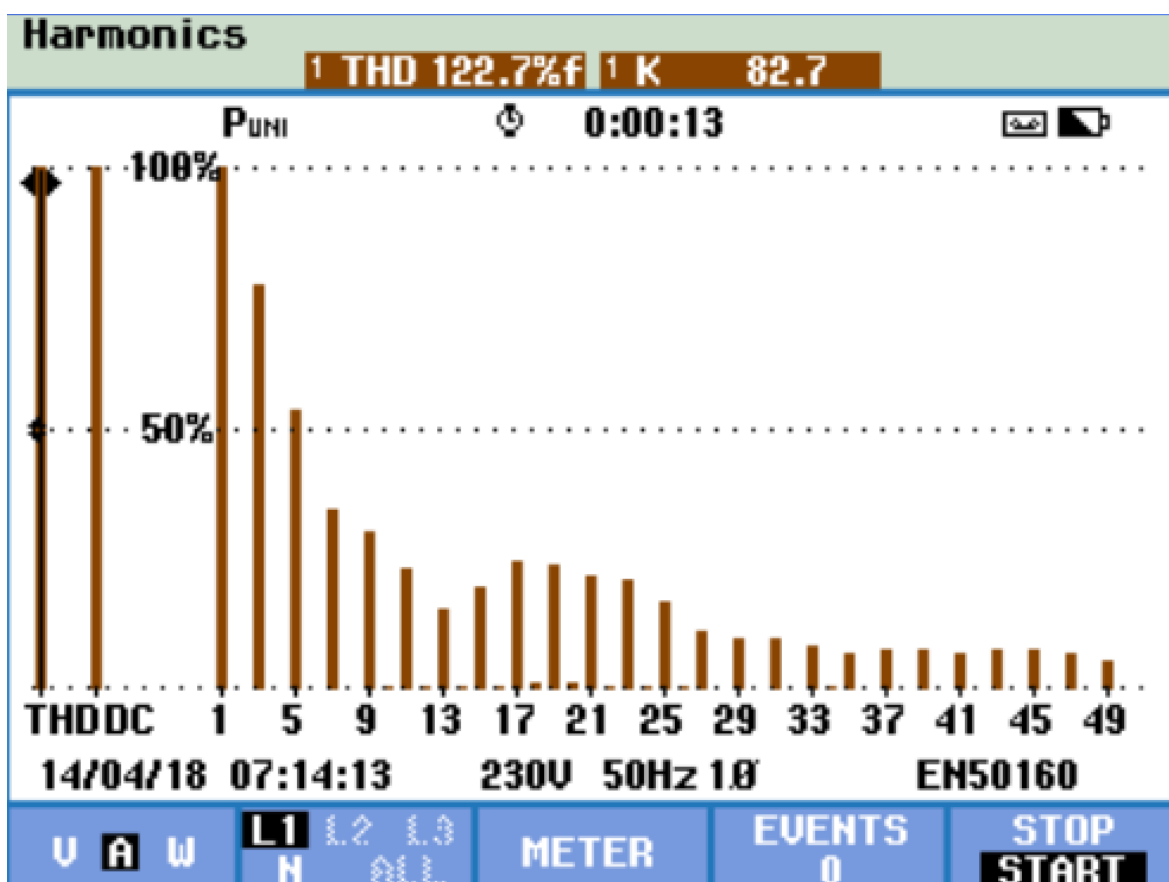
Exempel på hur ojämn strömmens sinuskurva är då fem stycken 9W Airam LED-lampor är kopplade till samma grupp, uppmätt med Fluke 345 II. I detta fall påverkas inte spänningens kurva, men man kan tänka sig ifall det är fler lampor inkopplade så kan spänningen förvrängas. Se figur 2, 3 och 4.



Figur 2. Strömkurvan orsakad av fem 9W Airam LED-lampor.



Figur 3. Lampornas effekt.



Figur 4. Övertoner som skapas av lamporna.

Mängden övertoner i elnät anges med storheten THD. För THD i spänning används ibland indexet u , THD_u . Den vanligaste enheten är procent.

SFS-EN 50 160 anger 8 % som maxvärde för THD_u i elnät för allmän distribution.

2.3.4 Harmoniska övertoner

Harmonisk övertonsspänning är en spänning, vars frekvens är en heltalsmultipel av grundfrekvensen. Mellan harmoniska övertoner och symmetriska komponenter råder likvärdighet, men detta gäller endast om övertonerna är lika i alla faser. Den tredje övertonens frekvens är 150 Hz. Alla övertoner som är delbara med tre motsvarar nollföljdskomponenten. De adderas i nolledaren och belastar den, men skapar inga problem för motorer. (Elovaara & Haarla, 2011)

De harmoniska övertoner vars ordningsnummer är $3k+1$ ($k=1,2,3\dots$), motsvarar plussföljdskomponenten. De skapar värme i apparater, för att i strömmen finns förutom grundfrekvenskomponenten dessutom övertonens ström. Deras frekvenser är 200 Hz, 350 Hz, 500 Hz osv. (Elovaara & Haarla, 2011)

De harmoniska övertoner vars ordningsnummer är $3k+2$ ($k=0,1,2,3\dots$) motsvarar minusföljdskomponenten. Den andra övertonen 100 Hz hör till denna grupp. Den andra övertonen skapar värme i apparater och motsatt flödesriktning i motorer. Effekten är den samma som minusföljdskomponenten. Deras frekvenser är 100 Hz, 250 Hz, 400 Hz, 550 Hz osv. (Elovaara & Haarla, 2011)

Den andra övertonen (100 Hz) finns det lite av i elnätet. I nätet finns det mest av tredje, femte och sjunde övertonen d.v.s. 150 Hz, 250 Hz och 350 Hz. Olinjära enfasbelastningar (svetsar, tv:n, datorer, lysrörsarmaturer och energisparlampor) producerar mest av tredje övertonen men även andra övertoner. En olinjär lasts ström är inte sinusformad. I ett lågspänningsnät finns det ofta mycket 1-fasbelastningar, och då finns det mycket av tredje övertonen. Då kan nolledaren belastas mer än fasledaren. I nolledaren summeras alla fasernas tredje övertonen, för att de i alla faser är i samma läge. I värsta fall kan detta orsaka överbelastning i nolledaren, som i sin tur kan orsaka brand, för det finns överlag inget överbelastningsskydd i nollan. (Elovaara & Haarla, 2011)

Trefas olinjära belastningar och switchande nätaggregat (switching-mode power supply) skapar även andra övertoner än den tredje övertonen. Den femte och sjunde övertonen kan filtreras bort med en filterkrets. (Berglund & Åkerlund, 2007)

2.3.5 Skador som uppkommer av övertoner

Övertoner ökar förluster i apparater och kablar. Kondensatorer avsedda för faskompensering kan bli överbelastade och haverera eller få en förkortad livslängd. (Berglund & Åkerlund, 2007)

Den tredje övertonen i strömmen adderar sig i nolledaren som kan bli överbelastad och ge upphov till vagabonderande dvs vandrande strömmar. Övertoner av höga ordningsnummer t.ex. den 23:e och 25:e orsakar missljud i olika apparater. Övertoner ger upphov till pulserande moment i roterande maskiner och kan orsaka lagerskador. (Berglund & Åkerlund, 2007)

Övertoner av höga ordningsnummer kan också uppfattas som brum i analoga telefonsystem. Andra effekter av höga övertonsamplituder som kan uppstå vid lokal resonans, kan få klockor att skena, ge missljud och fel i olika apparater. Amplituden kan bli så stor att falska nollgenomgångar kan uppstå, vilket orsakar att apparater kan registrera en annan frekvens än 50 Hz. (Berglund & Åkerlund, 2007)

2.3.6 Åtgärder

Övertonsproblem åtgärdas på olika sätt beroende på orsak och verkan. I kontorsfastigheter med många datorer, där stora övertonströmmar kan orsaka överbelastning i nolledaren, kan en lösning vara att öka arean i nolledaren. Är problemet överhettade kondensatorbatterier i nätet kan övertonfilter installeras. (Berglund & Åkerlund, 2007)

2.4 Reaktiv effekt

I elnät och elledningar transporteras el i två former, aktiv effekt och reaktiv effekt. Den aktiva effekten är den önskvärda effekten som kan uträtta arbete medan den reaktiva effekten är nödvändig bara på vissa ställen i elnätet. Reaktiv effekt behövs för att magnetisera elmotorer så att de kan starta, den behövs då bara i elledningen nära motorn. Ute på elnät är den reaktiva effekten som skummet i ett ölglas, det är visserligen också ”öl” liksom den aktiva effektens ”rinnande öl” men det stjälar onödigt utrymme. (Olsson, u.d.)

Överföring av reaktiv effekt minskar aktiva effektens överföringsförmåga och ökar ledningars och transformatorers spännings-, effekt- och energiförluster i normala användningsförhållanden. Överföring av reaktiv effekt i elnätet leder till att nätet måste förstärkas eller till nya investeringar. Överföring av reaktiv effekt är onödigt och tar utrymme av aktiv effekt och orsakar extra uppvärmning av kablar. Enligt det påstående skulle det vara bäst att producera reaktiv effekt så nära användningsområdet som möjligt.

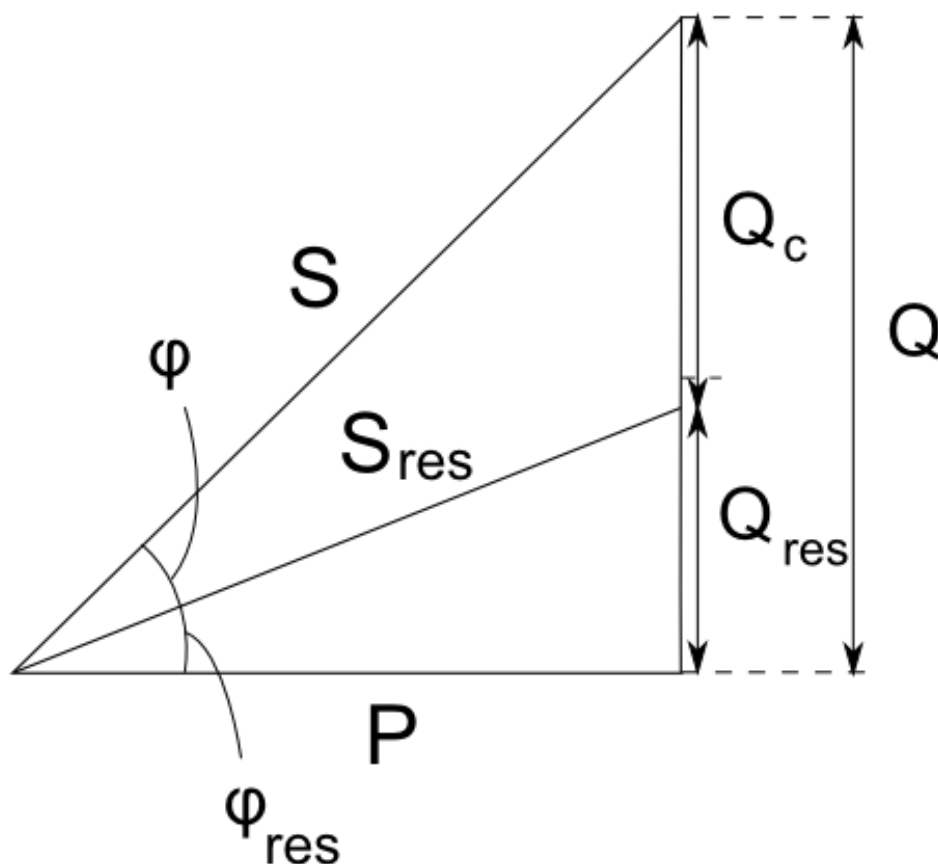
Ur elanvändarens synpunkt kompenseras främst reaktiv effekt baserat på eldistributörens prissättning. Dessutom påverkas det lokala elnätet för elanvändaren på samma sätt som i distributionsnätet, d.v.s. ökade förluster och behov av större tvärsnittsarea på kablar jämfört med om man endast förflyttar aktiv effekt. Uttag av reaktiv effekt kan även öka elanvändarens huvudsäkringsstorlek vid anslutningspunkten som i sin tur ökar anslutningskostnaden samt grundavgiften för överföring. (Männistö, Hietalahti, Seesvuori, Seesvuori, & Wilen, 2006)

2.5 Faskompensering

Faskompensering innebär att en belastnings effektfaktor ökar, vilket innebär att fasvinkeln minskas. Hur det utförs beror på vilken typ av reaktiv last som skall kompenseras. En induktiv last kompenseras med en kapacitans och en kapacitiv last med en induktans. (Alfredsson, Gustavsson, & Elfving, n.d.)

Reaktiv effekt kan genereras med hjälp av roterande faskompensatorer eller med kondensatorer. Genom att generera reaktiv effekt nära lasten som kräver reaktiv effekt, så

minskar man vägen mellan generering och förbrukning och ger mer utrymme åt överföring av aktiv effekt.



Figur 5. Faskompensering ger upphov till att den reaktiva lasten Q minskar.

Man kopplar ofta in faskompensering i direkt anslutning till förbrukaren, exempelvis i lysrörsarmaturer där en kompensator sitter inbyggd i armaturen. Denna typ kallas för direktkompensering. Vid större kretsar som exempelvis belysning i en fabrik kan det vara ekonomiskt med gruppkompensering. Detta innebär att man kopplar in en kondensator som kompenserar åt alla lysrörsarmaturer som tänds samtidigt.

Många mindre bruksföremål, motorer, och lysrörsarmaturer, är inte direktkompenserade och inte heller gruppkompenserade. Då kan man använda sig av centralkompensering för att minska den reaktiva effekten. Detta innebär att kondensatorbatterier kopplas in och från allteftersom belastningen varierar. Fabriker som förbrukar mycket reaktiv effekt använder sig av centralkompensering. (Alfredsson, Gustavsson, & Elfving, n.d.)

2.6 Kompensering av reaktiv effekt och filtrering av övertoner

Olika lösningar för kompensering varierar beroende på mängden apparater som skall kompenseras eller mängden övertoner. Lösningarna kan man gruppera enligt följande:

- Enskild, eller gruppkompensering
- Låg-, mellan- eller högspänningsnätets kompensering
- Kompensering av induktiv eller kapacitiv effekt
- Endast kompensering eller både kompensering och filtrering av övertoner
- Serie- eller parallellkopplade batterier
- Passiv eller aktiv kompensering och filtrering

2.6.1 Kondensatorenheter

Kondensatorelement för lågspänning framställs nuförtiden av polypropylen. Elementen är torra d.v.s. de innehåller inga vätskor. Oftast är varje element utrustat med inbyggt skydd för överströmmar, temperatur och tryck. Elementen är självutlösande d.v.s. ett genomslag i elementet orsakar att metallagret förångas och då kortsluts elementet.

En lågspänningseenhet består av många parallellkopplade kondensatorelement. Lågspänningseenheterna är oftast 3-fasiga, stjärn- eller triangelkopplade. Enhetsstorlekarna varierar från 2,5 till 100 kVA. Nominell spänning är oftast 400 V, 525 V eller 690 V.

I lågspänningsekondensatorenheter använder man oftast ett utomstående urladdningsmotsånd. Tidigare krävdes att kondensatorn skulle urladdas då den kopplades ifrån nätet. En kondensator för högst 660 V nominell spänning skulle urladdas inom 1 minut till 50 V. Den innevarande standarden SFS 6000 tar inte ställning om kondensatorerna måste urladdas. (Männistö, Hietalahti, Seesvuori, Seesvuori, & Wilen, 2006)



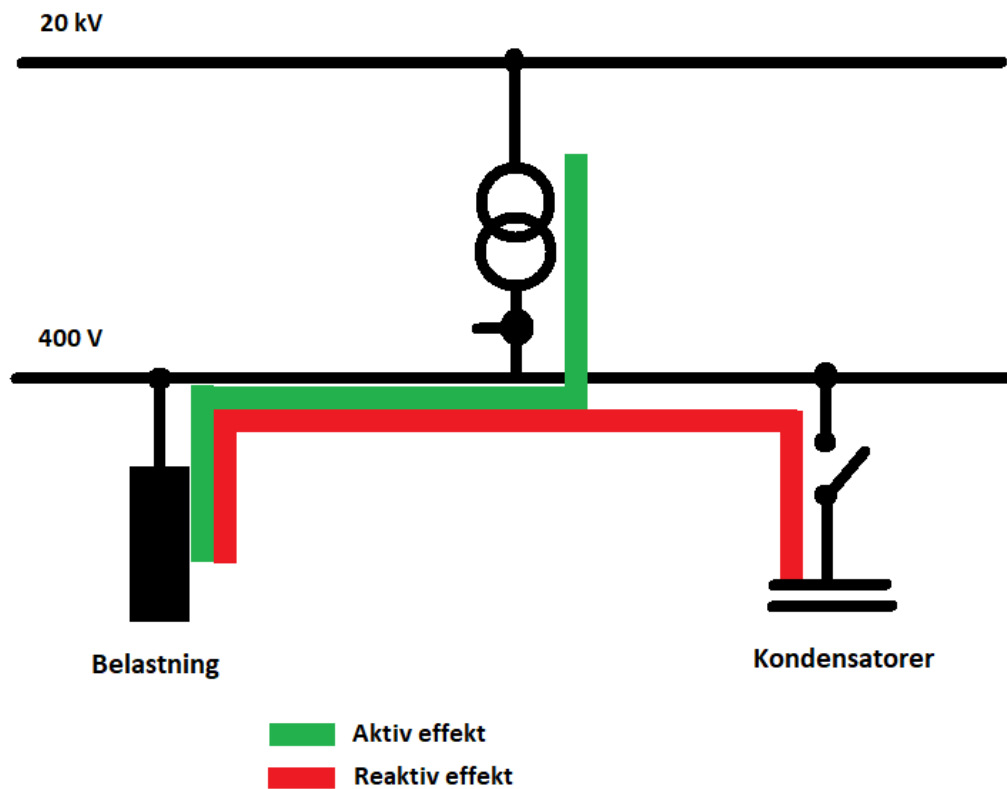
Figur 6. Lågspänningskondensatorer. (Männistö, Hietalahti, Seesvuori, Seesvuori & Wilen, 2006)

2.6.2 Parallellkopplade kondensatorbatterier

Parallellkopplade kondensatorbatterier d.v.s. parallellt kopplade med belastningen kan delas upp i två grupper, reglerbara och icke reglerbara. Ett icke reglerbart är kopplat till nätet och kan inte ställas in. Med att det inte är reglerbart menas att effekten inte kan ställas in. Ett reglerbart kondensatorbatteri kopplar in och ur olika trappsteg med högre eller lägre effekt beroende på mängden reaktiv effekt som finns i nätet. De reglerbara kondensatorernas kompenseringseffekt ställs in stegvis. Parallellkopplade kondensatorbatterier består av behövlig mängd kondensatorenheter och skyddsutrustning.

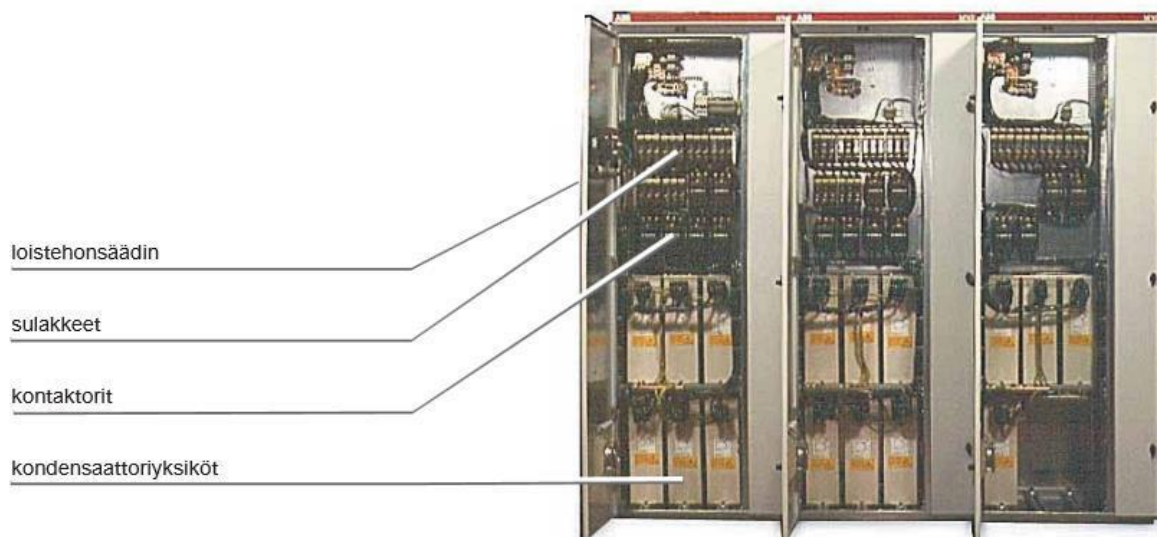
I lågspänningsnät styrs automatiken med en regulator, som har ställts in enligt bestämda gränsvärden både på den induktiva och kapacitiva sidan. Man mäter den reaktiva effekten från matningen via strömtransformatorer, regulatorn kopplar sedan in eller ur kondensatorer enligt behov. Automatikbatterier används i huvud- och gruppcentraler.

Parallellkopplade kondensatorbatterier passar i sådana objekt där det inte finns mycket övertoner. Figur 7 beskriver funktionen för ett parallellkopplat kondensatorbatteri. (Männistö, Hietalahti, Seesvuori, Seesvuori, & Wilen, 2006)



Figur 7. Parallellkompensering.

I skåpmodellerna är komponenterna (kondensatorerna, kontaktorer, säkringar) installerade i ett stålskåp. Då man behöver mera än 100 kVAr effekt används skåpmodellerna. Dessa kan utvidgas vid behov. Se figur 8 för hur en skåpmodell ser ut.



Figur 8. Automatiskstyrd skåpmodell. (Männistö, Hietalahti, Seesvuori, Seesvuori & Wilen, 2006)

2.6.3 Seriekopplade kondensatorer

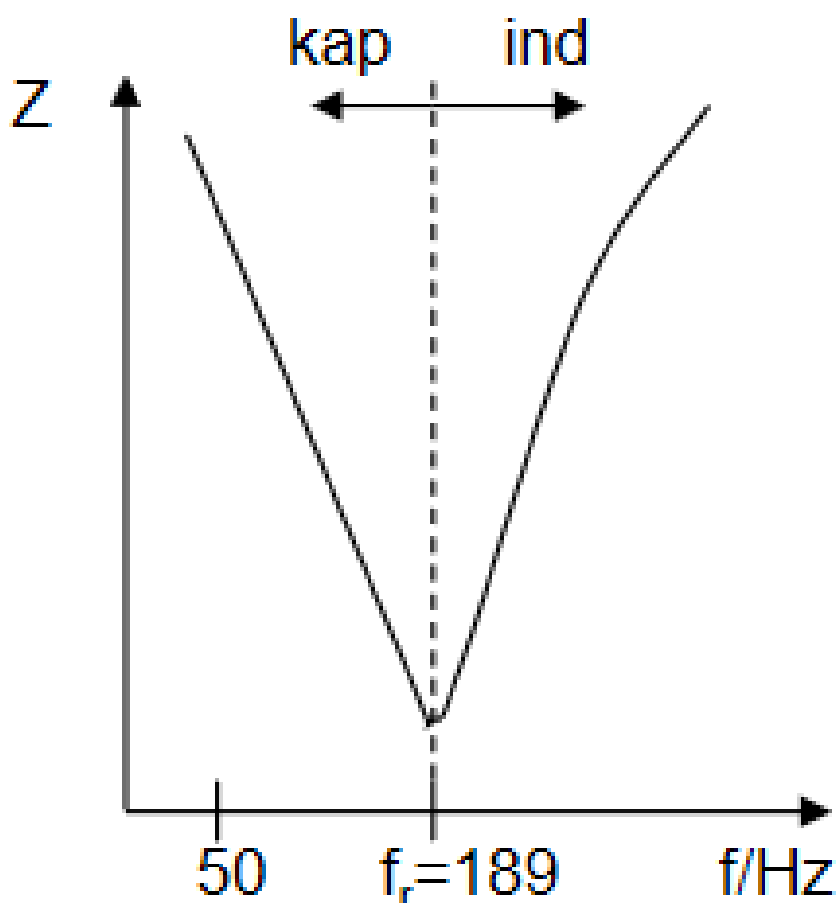
Vid långa transportsträckor (stamnätet) ökar vinkeln mellan ström och spänning p.g.a. induktans i kablarna. Det minskar aktiva effektens förflyttningsskapacitet. Vinkeln mellan strömmen och spänningen minskas med hjälp av seriekopplade kondensatorer, som förbättrar kabelns effektförflyttningsskapacitet med 30–50 %. Seriekopplade kondensatorer används främst för att förbättra kablarnas distributionsförmåga och inte för att kompensera för reaktiv effekt. (Männistö, Hietalahti, Seesvuori, Seesvuori & Wilen, 2006)

2.6.4 Statiskt batteri

Statiska batteriets olika steg består av en seriekopplad kondensator och en reaktor. De skapar en serieresonanskrets, vars frekvens är inställd på en lägre frekvens än den lägsta harmoniska övertonens frekvens. Nedanför inställningsfrekvensen är batteriet kapacitivt d.v.s. producerar reaktiv effekt, ovanför inställningsfrekvensen är batteriet induktivt och förstärker inte övertoner. (Männistö, Hietalahti, Seesvuori, Seesvuori & Wilen, 2006)

I elnät där det förekommer mycket övertoner gäller det att granska ifall det löns att installera ett statiskt batteri utrustat med kondensatorer eller ett övertonfilter istället för parallellkopplade kondensatorer. Med ett statiskt batteri utrustat med kondensatorer

undviker man att skadlig resonans uppkommer mellan kondensatorernas kapacitans och det matande nätets induktans. Kompenseringskondensatorernas kapacitans och nätets induktans kan skapa en resonanskrets. Om resonanskretsens inställningsfrekvensen råkar träffa någon övertonsfrekvens kan strömmar med den frekvensen förstärkas upp till 20 gånger. Resonansen orsakar ökning av strömförvrängningen som i sin tur ökar förvrängning av spänningen. På grund av detta kan man inte med parallellkopplade kondensatorer kompensera reaktiv effekt i elnät där det förekommer övertoner. Ett statiskt batteri med kondensatorer rekommenderas då spänningens totala harmoniska distorsion överstiger 3 %. (Männistö, Hietalahti, Seesvuori, Seesvuori & Wilen, 2006)



Figur 9. Statiska batteriets impedans som en funktion av frekvensen. (Männistö, Hietalahti, Seesvuori, Seesvuori & Wilen, 2006)

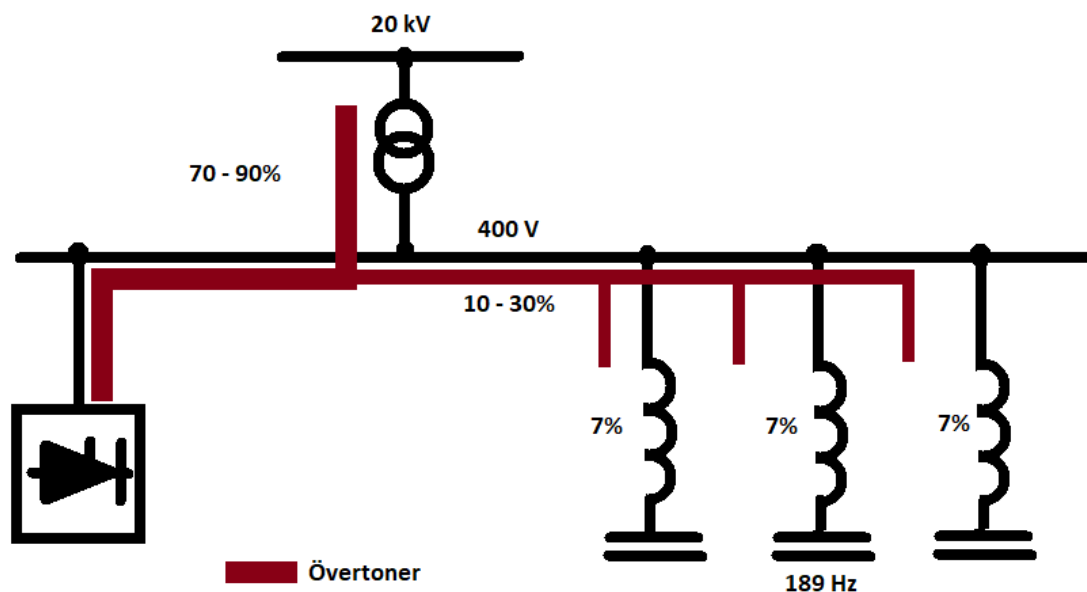
Ett statiskt batteri filtrerar även bort övertoner, som man kan påverka genom att välja inställningsfrekvens beroende på vilken överton som förekommer mest. Typisk

filtreringseffekt är 10–30 % av den femte övertonsströmmen, då man använder 189 Hz som inställningsfrekvens. Filtreringseffekten beror på kompenseringens effekt och inställningsfrekvensen, och försämras om inställningsfrekvensen avviker från den mest förekommande övertonsfrekvensen. Inställningsfrekvensen bör väljas enligt den mest förekommande övertonens frekvens.

Statiska batterier används i elnät för kompensering där övertoner förekommer i både låg- och mellanspänningsnätverk. Se figur 10 för ett statiskt batteri. Se figur 11 för filtreringseffekten av ett statiskt batteri. (Männistö, Hietalahti, Seesvuori, Seesvuori, & Wilen, 2006)



Figur 10. Statiskt batteri, skåpmodell. (Männistö, Hietalahti, Seesvuori, Seesvuori & Wilen, 2006)

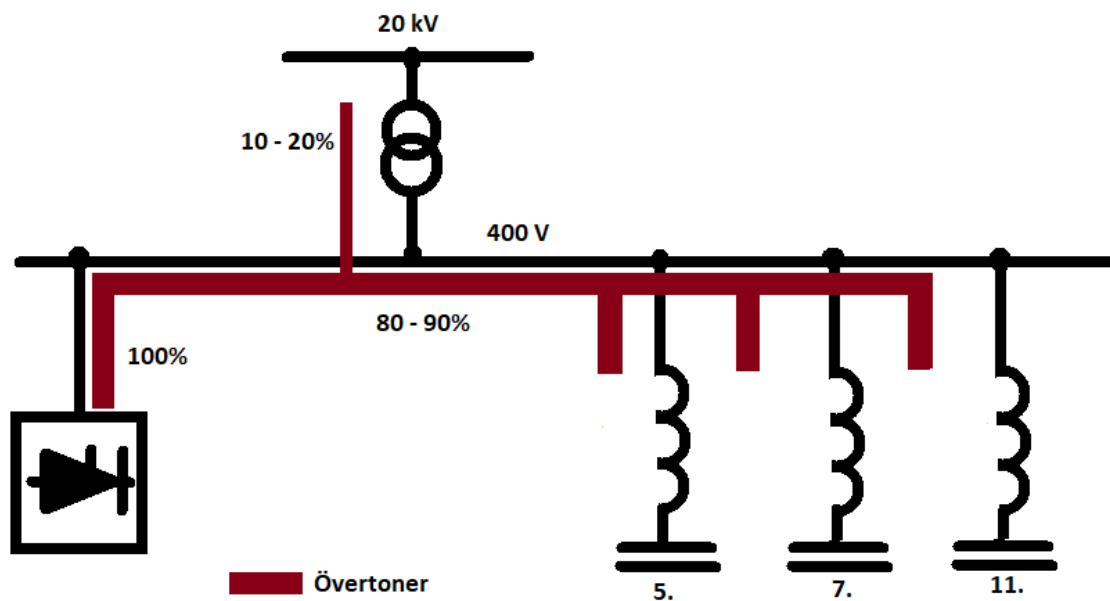


Figur 11. Statiska batteriets filtrering av övertoner.

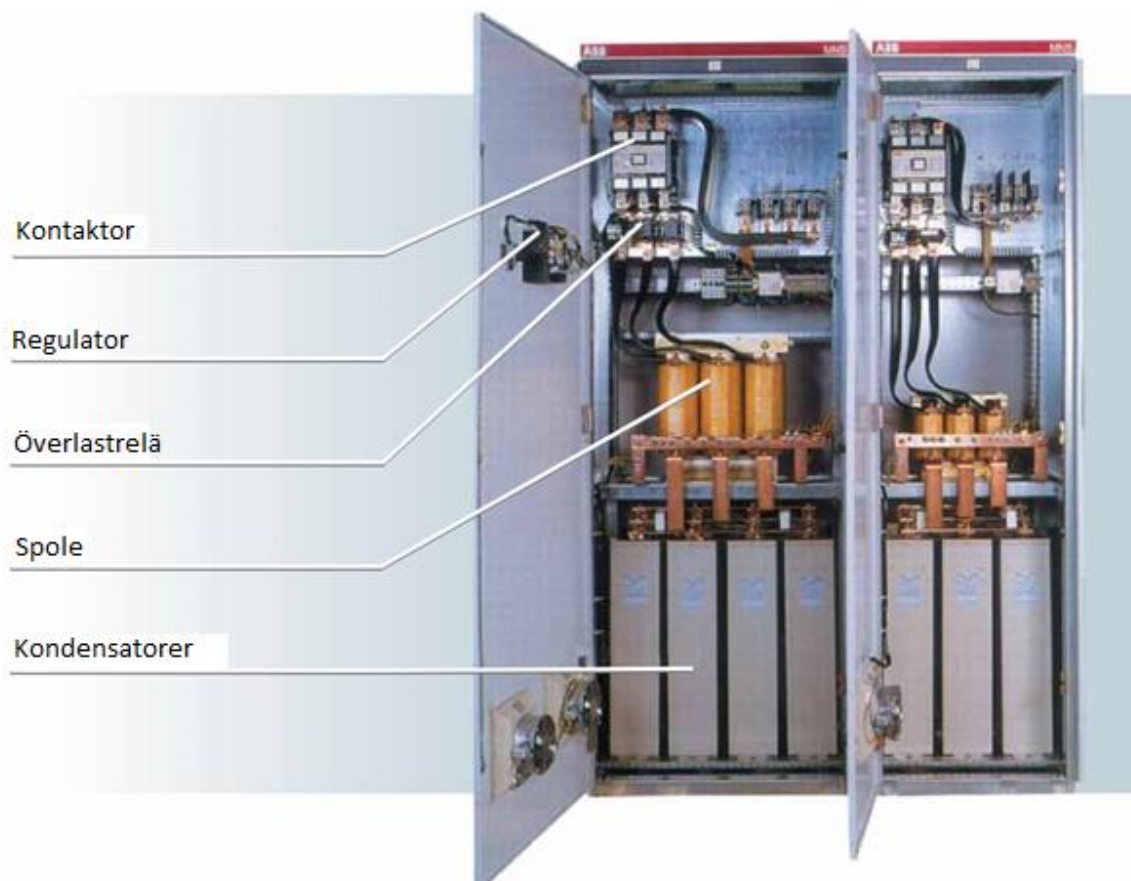
2.6.5 Övertonsfilter

Övertonsfilter används som ett statiskt batteri, i elnät där det förekommer mycket övertoner. Övertonsfilter producerar reaktiv effekt och tar bort övertonsströmmar från nätet, och på så sätt förbättrar elkvaliteten.

Ett övertonsfilter består av kondensatorer och med dem seriekopplade reaktorer. Kondensatorernas reaktiva effekt dimensioneras så man uppnår önskvärt kompenseringsvärde. Reaktorns induktans väljs så att den tillsammans med kondensatorerna skapar en övertonsfrekvens som filtrerar bort största delen av övertonerna. En typisk övertonsfiltrerare består av tre serieresonanskretsar, som är inställd på de vanligaste övertonerna (5,7 och 11 övertonen). I varje inkapslat filter finns det en kontaktor, termiskt överströmsrelä, reaktor och kondensator. Se figur 12 för funktionen av ett övertonsfilter. (Männistö, Hietalahti, Seesvuori, Seesvuori, & Wilen, 2006)



Figur 12. Övertonsfiltrets funktion.



Figur 13 .Övertonsfilter (passivt).

2.6.6 Filtrering av tredje övertonen

I trefassystem med symmetrisk last är övertonerna som är delbara med 3 (3,9, o.s.v.) lika stora i samma fas. För att de är likfasiga så summeras de i nolledaren. Då är den tredje övertonsströmmen som summeras i nolledaren tre gånger större jämfört med fasernas tredje övertonsström.

Enfasiga, olinjära belastningar kopplade mellan fas och nolla producerar den tredje övertonen och dess strömmar. Tredje övertonen produceras främst av enfasiga likriktare och urladdningslampors elektroniska kopplingsdon.

2.6.7 Varför kompensera?

Elanvändaren bestämmer sig för att kompensera oftast p.g.a. följande orsaker:

- Eldistributionsbolaget kräver en avgift av elförbrukaren på grund av förbrukning av reaktiv effekt. Vissa distributionsbolags gräns går vid att den reaktiva effekten får vara max 16 % av den aktiva effekten. Med sådana krav strävar distributionsbolaget till att förbrukarna skall skaffa kompenseringsutrustning.
- Förbrukaren vill minska på kablarnas dimensioner, säkringarna eller motorernas startströmmar.
- Minskning av förluster och kostnader orsakade av dem.
- Filtrering av övertoner orsakade av elektronisk utrustning och därmed minskad störningspåverkan.

2.6.8 Allmänna principer

Vad som krävs av kompensering utrustningen hör till elplaneraren. Allmänt då man skall kompensera för reaktiv effekt, gäller det att reaktiv effekt skall kompenseras där den uppkommer. Men oftast blir det för dyrt och komplicerat att kompensera på det sättet. Oftast kompenserar man i huvudcentralen med en stor kompenseringseenhet.

I dagens läge då man har mycket elektronik som producerar övertoner, så måste man nästan alltid kompensera med statiskt batteri eller med ett övertonsfiler. (Männistö, Hietalahti, Seesvuori, Seesvuori, & Wilen, 2006)

Med kompensering ökar man nätets överföringskapacitet. Belastningens strömförbrukning räknas från skenbara effekten, och totalströmmen påverkas då av reaktiva effekten.

Totala strömmen fås från skenbara effekten:

$$I = \frac{S}{\sqrt{3} * U}$$

Och skenbara effekten påverkas av reaktiva effekten:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

S = Skenbar effekt

P = Aktiv effekt

Q = Reaktiv effekt

2.6.9 Kompensering minskar förluster

Kompensering minskar totala strömförbrukningen som i sin tur minskar aktiva effektförluster (RI^2) d.v.s. centralernas, kablarnas och transformatorernas temperatur minskar.

2.6.10 Pris på reaktiv effekt

Elbolag fakturerar kunden i samband med elöverföringen för uttag av reaktiv effekt och även för överföring av reaktiv effekt. Faktureringsgrunderna väljs helt fritt av elbolaget. Reaktiva

effektens gratisdel (x % fakturerad aktiv effekt) och pris per kVAr varierar kraftigt beroende på elbolag. (Hämeen Sähkö, 2017)

Elbolaget Vasa Elektriska prissätter reaktiv effekt på följande sätt:

Den reaktiva effekten faktureras månatligen enligt 1-timmes uppmätta värde till den del som överskrider 20 % av motsvarande månads 1-timmes toppeffekt.

Effektavgiften faktureras respektive månad bestämt av de 12 senaste månadernas uppmätta högsta 1-timmes toppeffekt. Se tabell 1 för effektpriser. (Elektriska, 2018)

Tabell 1 Vasa Elektriska tariff

Grundavgift	moms 0 %	moms 24 %
Mätaravgift	16,82 €/mån.	20,86 €/mån.
Effektavgift *1	2,20 €/kW, mån.	2,73 €/kW, mån.
Reaktiv effektavgift *2	2,76 €/kVAr, mån.	3,42 €/kVAr, mån.

Exempel:

Ett industriföretag har som toppeffekt 4000 kW. De betalar även för reaktiv effekt och efter mätningar visar det sig att i januari hade de reaktiv effekt på 1000 kVAr och en toppeffekt på 3500 kW.

Priset för grundavgiften för januari blir då:

$$4000 \text{ kW} * 2,20 \text{ €/kW} = 8800 \text{ €}$$

$$1000 \text{ kVAr} - (3500 \text{ kW} * 0,2) = 300 \text{ kVAr}$$

$$300 \text{ kVAr} * 2,76 \text{ €/kVAr} = 828 \text{ €}$$

$$\text{Totalt } 8800 \text{ €} + 828 \text{ €} = 9628 \text{ €}$$

Varav 828 € är en helt onödig avgift, för att den går att kompensera bort. Se tabell 2 för exempel för hur olika elbolag fakturerar för reaktiv effekt. (Elektriska, 2018)

Tabell 2 Exempel på eltariffer (Hämeen Sähkö, 2017)

Elbolag	Gratisdel av aktiv effekt	Gratisdel av aktiv effekt	[€/kVAr/mån]	
	Uttag av reaktiv effekt	Överföring av reaktiv effekt	Uttag av reaktiv effekt	Överföring av reaktiv effekt
Helen Sähköverkko Oy	40%	10%	1,99	1,99
Caruna Espoo Oy	20%	20%	4,05	4,05
Caruna Oy	20%	-	6,14	0
Vantaa Energia Sähköverkot	20%	10%	2,02	2,02
Elenia	16%	-	4,77	0
Tampereen Sähkölaitos	20%	-	1,25	0
Vasa Elektriska Ab	20%	-	2,76	0

2.6.11 Dimensionering och val av utrustning

Då man dimensionerar kompensering rekommenderas det att man skall vara i kontakt med elnätsbolaget. Man behöver information om elnätet och om spänningsnivåer. Den viktigaste informationen anges av elnätsbolaget.

Information som behövs är följande:

- Elnätets nominella- och bruksspänning
- Den behövliga reaktiva effekten enligt grundfrekvensen (Q/kvar)
- Omgivningsförhållanden
- Installationsutrymme (t.ex. IP-klass, nuvarande kablar)
- Existerande kompenseringsutrustning
- Övertoneernas mängd (THD, så man kan bestämma om det behövs statiskt batteri)

För dimensionering av övertonsfilter och statiskt batteri behövs följande information:

- Övertonsströmmar (A) från centralens matning vid full belastning utan existerande kompensering påkopplat
- Filtreringskrav (maximala övertonsströmmar)
- Nätets kortslutningseffekt

För kompensering behövs följande information:

- Största tillåtna enhetsstorlek (t.ex. <50 kVAr i varje enhet)
- Största tillåtna kopplingssteg
- Minsta tillåtna kopplingssteg d.v.s. reglerings noggrannhets krav

Av minsta steget behövs minst två stycken, för att det lägsta steget inte skall nötas för snabbt

Många elnätbolag har en låg gratisgräns för reaktiv effekt, 16 % av den aktiva effekten är en allmän gräns. Vissa elnätbolag har även en kapacitiv gräns på -4 %. Det orsakar att man måste utrusta stora batterier (300–500 kVAr) med små (12,5 kVAr) kopplingssteg, så att man uppnår tillräcklig noggrannhet med olika belastningar. En tillräcklig noggrannhet för användaren är att man inte får en utgift på reaktiv effekt.

3 Elkvalitetsstandarder och rekommendationer

Standarden SFS-EN 50160 definierar elkvaliteten vid kundens anslutningspunkt vid normala förhållanden, och standarden IEC 61000-4-30 definierar tillvägagångssätt för att mäta elkvalitet. Samma begrepp behandlas även i Adato Energia OY:s publicering Jakeluverkon sähköön laadun arviointi (Adato 2001).

SFS-EN 50160 är en europeisk standard, som behandlar spänningen, frekvensen, harmoniska och oharmoniska övertoner och flimmer. Standarden anger gränsvärden för spänningens kvalitet baserat på procent av tiden. Till exempel flimmer skall enligt standarden mätas i en vecka, vartefter standarden anpassas på 95 procent av tiden.

Standarden SFS-EN 50160 definieras inom normala omständigheter i allmänna låg- och mellanspänningsnät i den punkten, där nätets användare ansluts till nätet. Till normala

omständigheter hör inte sådana situationer som eldistributören inte kan påverka. (Elovaara & Haarla, 2011)

Omständigheter som eldistributören inte kan påverka är följande:

- Väderförhållande och andra naturkatastrofer
- Skador orsakade av utomstående
- Avvikelse orsakade av myndigheter
- Arbetsmarknadsstrider
- Något oövervinnerligt hinder

3.1 Mätning av övertoner

Metoden för mätning av övertoner skall motsvara av standarden SFS-EN 50160 framförda krav för spänningen. Mätningstiden väljs så att man får reda på hela objektets felstorlek d.v.s. största felströmmens 10 minuters medelvärde. Övervakningstiden kan vara en vecka, dygn, timme eller några minuter. (Männistö, Hietalahti, Seesvuori, Seesvuori & Wilen, 2006)

Mätningen kan utföras på en fas var för sig eller alla faser samtidigt. Mätningen kan utföras att man samplar ett värde varje minut eller tätare, och sedan sparar det i minnet. Utifrån informationen man sparar kan man sedan räkna ut medelvärdet, som skall vara från minst 10 mätresultat. Redan om en 10 minuters period överstiger den tillåtna gränsen anses det som bristfälligt och skall åtgärdas. (Männistö, Hietalahti, Seesvuori, Seesvuori & Wilen, 2006)

3.1.1 Harmoniska övertonsspänningar

Krav på harmoniska övertonsspänningar enligt standarden SFS-EN 50160 . Totala THD (summan av alla harmoniska övertoner upp till ordningsnummer 40) borde vara mindre eller lika stor som 8 %. Se tabell 3 och 4 för krav på övertonsspänningar.

Tabell 3. Harmoniska övertonsspänningarnas värde vid anslutningspunkten.

Udda övertoner				Jämna övertoner	
Odelbar med tre		Delbar med tre			
Ordningsnummer h	Relativ spänning (U_h)	Ordningsnummer h	Relativ spänning (U_h)	Ordningsnummer h	Relativ spänning (U_h)
5	6,0 %	3	5,0 %	2	2,0 %
7	5,0 %	9	1,5 %	4	1,0 %
11	3,5 %	15	0,5 %	6...24	0,5 %
13	3,0 %	21	0,5 %		
17	2,0 %				
19	1,5 %				
23	1,5 %				
25	1,5 %				

Tabell 4. Harmoniska övertonsspänningars kvalitetskrav.

Bra kvalitet:	THD \leq 3 %
Normal kvalitet:	THD \leq 3 %
Standard kvalitet:	THD \leq 6 %
Mätning:	Effektivvärdet U_{nsh} mäts i 1 eller 5 min perioder, som sedan räknas om till en vecka
Beräkning:	$THD = \sqrt{\sum_{h=2}^{40} (U_h)^2}$ <p>THD = harmoniska felstorleken h = harmonisk ordningsnummer U_h = Enskild harmonisk amplitud jämfört med grundfrekvensspänningen u_1</p>

3.1.2 Harmoniska övertonsströmmar

I standarden IEEE 519 definieras felstorleken på övertonsströmmar i allmänna distributionssystem från 120 V till 69 kV. I denna standard ansvarar kunden för apparater

som producerar övertonsströmmar och distributören ansvarar för spänningens kvalitet. Se tabell 5 för rekommendationer för övertonsströmmar.(Männistö, Hietalahti, Seesvuori, Seesvuori & Wilen, 2006)

Tabell 5. Strömövertoneernas gränser för system från 120 V till 69 kV enligt IEEE 519.

Maxvärdet på felstorleken på harmoniska strömmar uttryckt i % av belastningsströmmen I_L					
Enskild udda harmonisk ordningsnummer					
Kortslutning sförhållande I_{scb}	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	Totala harmoniska felstorleken
<20*)	4.0	2.0	1.5	0.6	5.0
20-49.9	7.0	3.5	2.5	1.0	8.0
50-99.9	10.0	4.5	4.0	1.5	12.0
100-999	12.0	5.5	5.0	2.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	20.0

Obs.
De jämna harmonernas gräns är 25 % av de udda.
***) Alla apparater som producerar effekt begränsas enligt dessa värden oberoende av den verkliga I_{scb} värdet.**

4 Analysator Fluke 345 II

Fluke 435 II är en trefas elkvalitets- och energianalysator. Detta är en mycket mångsidig analysator och här tas upp några av dess funktioner. Denna mätare används i diverse mätningar som utförts i detta examensarbete.



Figur 14. Fluke 435 II och dess ström- och spänningsmätningsskylar.

4.1 PowerWave-Funktion

Påkoppling av belastningar kan i vissa fall orsaka elkvalitetsproblem. Då belastningarna tas i bruk, kan spänningen sjunka p.g.a. strömförbrukningen till en sådan nivå att det orsakar problem hos andra apparater. I denna modell kan man med hjälp av PowerWave-funktionen spara spännings-, ström- och frekvenssignaler samtidigt och utreda vad som orsakar problemen. (Fluke, 2018)

Funktionen sparar spänningens och strömmens kurvformer inom ett visst tidsintervall, och visar dem detaljerat på skärmen. Effektens kurvform definieras enligt denna information. Dessutom sparas även spänningens, strömmens, effektens och frekvensens RMS-värden från en halv period. Denna funktion är användbar vid testning av reservgenerator- och UPS-system, för att i dem är en pålitlig påkoppling ytterst viktigt. (Fluke, 2018)

4.2 Invertrars verkningsgrad

Invertrar ändrar DC-ström till AC-ström. I solpanelssystem används ofta invertrar, som ändrar solpanelernas DC- energi till användbar AC- effekt. Invertrarna måste testas, för att deras verkningsgrad försämras med tiden. Systemets verkningsgrad kan bestämmas med att man jämför effekt in med effekt ut. (Fluke, 2018)

4.3 Unified Power Measurement

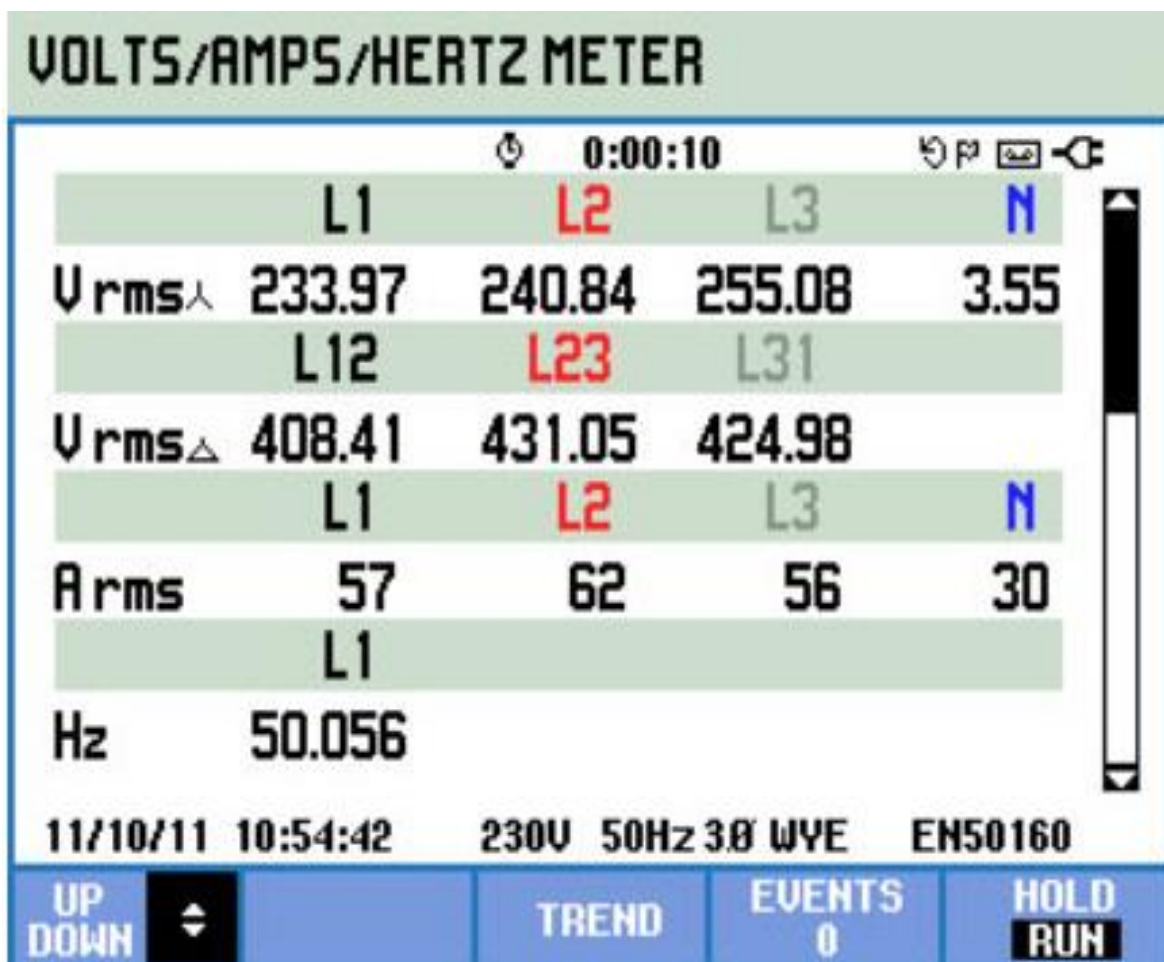
Tidigare kunde endast sakkunniga räkna ut hur stor energiförlust som orsakas av elkvalitetsproblem. Elbolag kunde räkna ut kostnaderna, men mätprocessen var för krävande för en vanlig elmontör. Men med den patenterade Unified Power-funktionen kan man bestämma energiförluster och räkna ut dess orsakade kostnader. (Fluke, 2018)

ENERGY LOSS CALCULATOR						
0:04:25						
		Total	Loss		Cost	
Effective	kW	16.3	W	44	\$	0.00 /hr
Reactive	kvar	- 4.7	W	4	\$	0.00 /hr
Unbalance	kVA	15.5	W	92	\$	0.01 /hr
Distortion	kVA	29.2	W	422	\$	0.04 /hr
Neutral	A	118	W	539	\$	0.05 /hr
Total					\$	964 /y
05/17/12	13:59:42	277V 60Hz 3Ø WYE			EN50160	
LENGTH 100 ft	DIAMETER 4 AWG	METER	RATE 0.10 /kWh	HOLD RUN		

Figur 15. Bild på UPM- funktionen. (Fluke, 2018)

4.4 AutoTrend - Automatisk ritfunktion

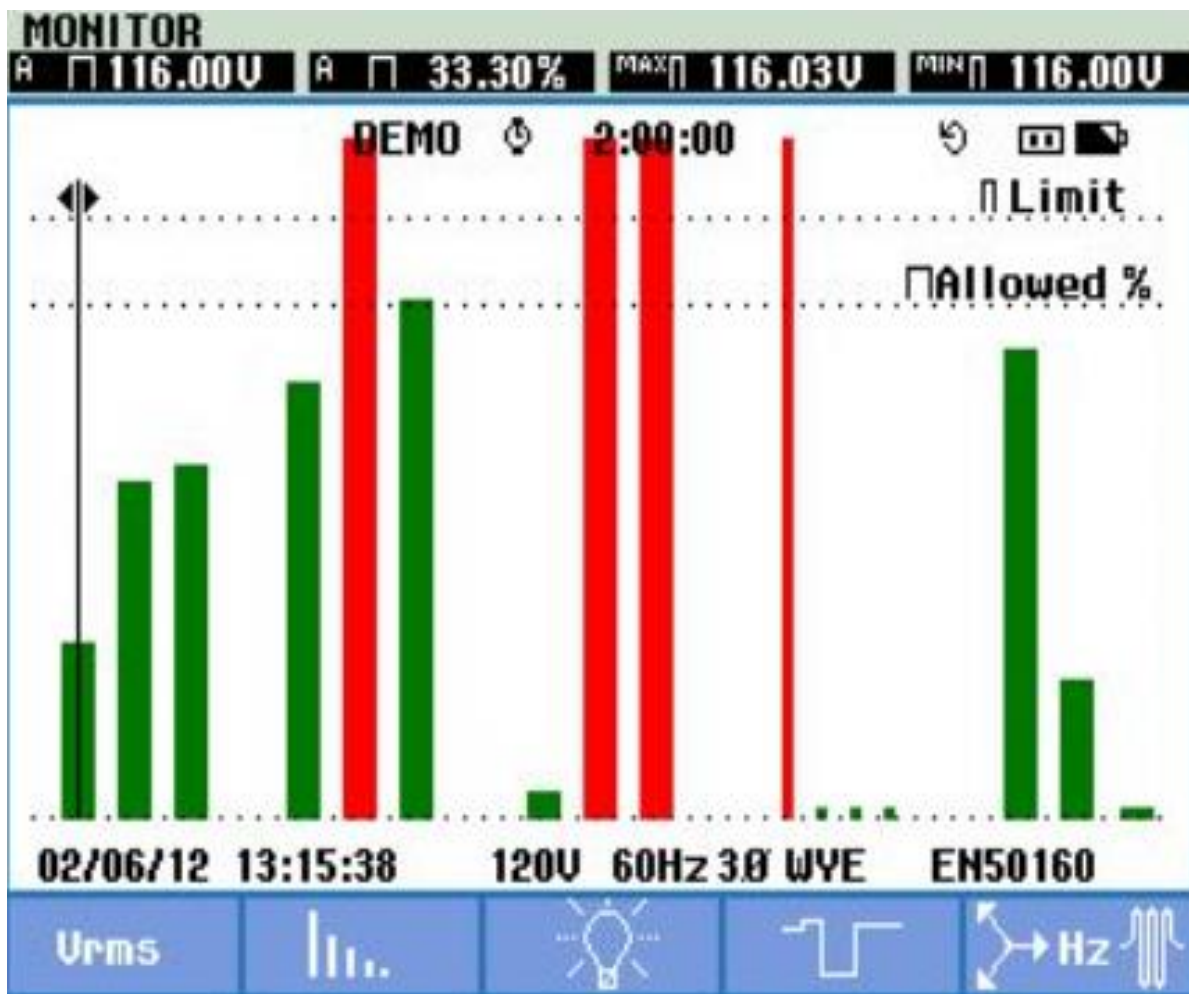
AutoTrend-funktionen ritar upp alla förändringar. All data sparas i minnet, det finns inga gränsvärden och man måste inte skilt starta processen. Du kan snabbt granska spänningens, strömmens, frekvensens, effektens, övertonernas eller flimrets trend i alla tre faser och i nollledaren. (Fluke, 2018)



Figur 16. Några värden som ritas upp av AutoTrend-funktionen i bakgrunden. (Fluke, 2018)

4.5 SystemMonitor

Med SystemMonitor-funktionen kan man granska om ens system är enligt standarden EN50160. Man kan även sätta in egna konfigurerade gränsvärden. Helhetsbilden visas på skärmen. De röda pelarna visar vilka parametrar som är utanför gränsvärdet. Parametrarna som testas är spänningen, harmoniska övertoner, flimmer, frekvensen och spänningsdippar och pikar. (Fluke, 2018)



Figur 17. SystemMonitor visar om man är inom de tillåtna gränsvärdena enligt standarden EN50160. (Fluke, 2018)

5 Praktisk del

I denna del beskrivs hur en mätning av reaktiv effekt och övertoner går till i praktiken. Efter det analyseras mätdata och behövliga åtgärder vidtas utifrån det.

5.1 Problembeskrivning

Vi fick som uppgift att mäta den reaktiva effekten hos Lapuan Jätevesi, eftersom de hade blivit tvungna att betala för reaktiv effekt.

Efter att vi utfört våra mätningar upptäckte vi att de förbrukade 50–80 kVAr reaktiv effekt i normala driftförhållanden.

5.2 Analys

Vi analyserade våra mätvärden och beslöt att kompensera bort den reaktiva effekten med ett statiskt batteri och centralkompensering d.v.s. man kompenserar vid gruppcentralen. Vi beslöt oss för ett statiskt batteri för att den inte förstärker övertoner som det finns en del av i elnätet på grund av frekvensomriktare och annan elektronik.

Modellen vi bestämde oss för var Estokelaparisto D112,5/12+25+2x37-400-50/189-0618E, där den totala effekten är 112,5 kVAr och inställningsfrekvensen är 189 Hz och den nominella strömmen 190 A. Stegen är 12, 25 och 2x37. Det är en golvmodell och behövs inte fästas skilt. Se figur 19 för hur statiska batteriet ser ut.



Figur 18. Det statiska batteriet som installerades. (Nokian Capacitors)

5.3 Tillvägagångssätt

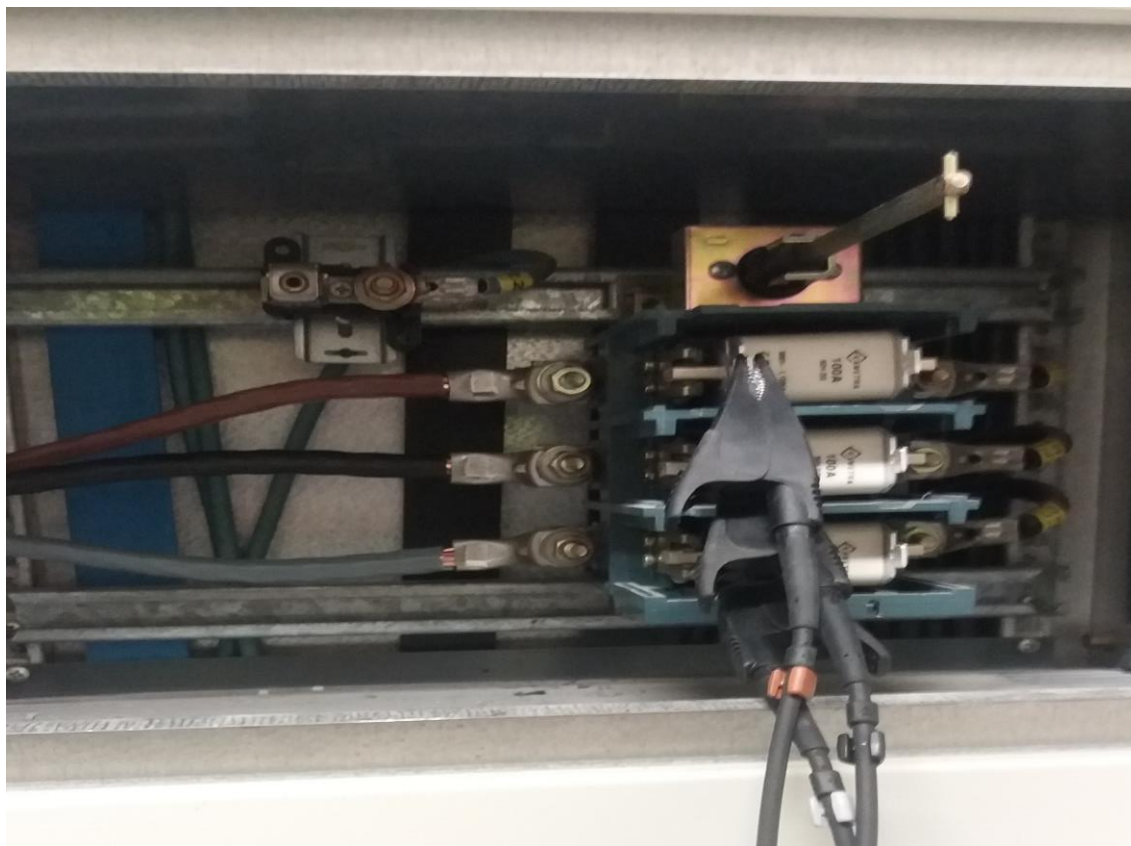
I samband med att vi var och mätte tidigare hade vi lokaliserat platsen för skåpet och mätt ut kabellängder och andra behövliga mått.

Då vi anlände till platsen placerade vi skåpet på rätt plats och började dra matningen. Matningen vi drog var MCMK 3x35+16 och vi drog den dubbelt från två olika utgångar med 100 A säkringar.

Andra kablar som drogs var MMJ 3x2,5S som är strömmätning till statiska batteriet. Vi var tvungna att installera en strömtransformator för strömmätningen och därifrån drogs kabeln. Den sista kabeln var MMJ 3x1,5S och den är till för styrspänningen. Den drogs från en 10 A säkring.

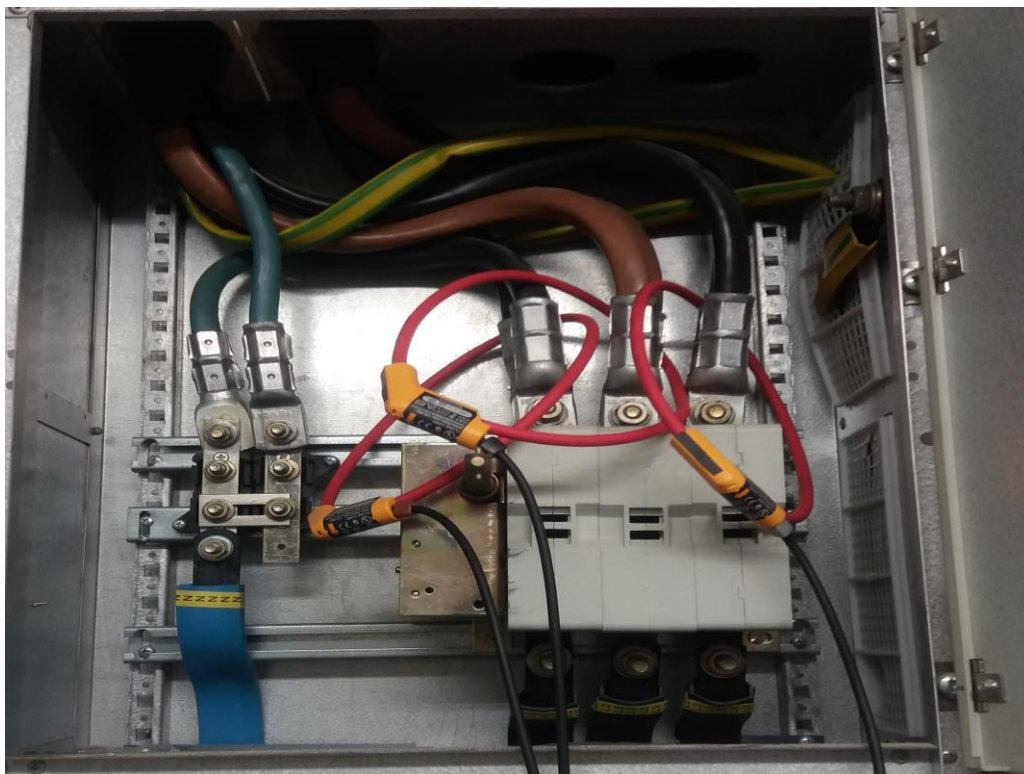
Efter att vi kopplat alla kablar var det bara att slå på batteriet och ställa in det. Efter det så utförde vi mätningar med batteriet inkopplat och urkopplat. Vi konstaterade att allting fungerade.

Det är relativt okomplicerat att utföra en mätning med Fluke 435. Man börjar med att koppla in spänningsmätningen. Dessa kopplingar sker oftast med spänningen påkopplad så det gäller att vara försiktig och välja en punkt som är så tillgänglig som möjligt. Se figur 19 för spänningsmätning.



Figur 19. Spänningsmätning med Fluke 435 II.

Efter man kopplat in spänningsmätningen kan man koppla strömmätningen. Strömmen mäter man med Flukes Iflex strömtänger. Då man kopplar in dem gäller det att veta strömriktningen, det finns en pil på tångerna som visar vilken väg de skall kopplas. Se figur 20 för strömmätning



Figur 20. Strömmätning.

Då man gjort dessa kopplingar kan man slå på mätaren och ställa in eventuella mätförhållanden. Man kan enkelt granska att man kopplat rätt med funktionen ”scope” som är ett oscilloskopverktyg.



Figur 21. Statiska batteriet som installerades.



Figur 22. Statiska batteriet från insidan.

5.4 Mätresultat

Efter att alla kopplingar är gjorda och man granskat att strömmarnas riktning är rätt kan man börja mäta. I detta kapitel finns figurer som beskriver hur effekten och övertonerna påverkas av då man har på eller av kompenseringstrustningen.

Date	Function	AN(V) / A(A) Avg	BN(V) / B(A) Avg	CN(V) / C(A) Avg	Total Avg
05-Jun-18 02:58:11 PM 995msec	Active Power	42,01 kW	41,61 kW	42,18 kW	125,79 kW
05-Jun-18 02:58:11 PM 995msec	Apparent Power	45,89 kVA	44,97 kVA	47,2 kVA	138,09 kVA
05-Jun-18 02:58:11 PM 995msec	Reactive Power	17,57 kvar	16,27 kvar	20,61 kvar	54,42 kvar
05-Jun-18 02:58:11 PM 995msec	Power Factor	0,92	0,93	0,89	0,91
05-Jun-18 02:58:11 PM 995msec	Harmonic Power	6,8 kVA	6,02 kVA	6,32 kVA	19,17 kVA
05-Jun-18 02:58:11 PM 995msec	Unbalance Power				5,58 kVA
05-Jun-18 02:58:11 PM 995msec	W Fund	41,85 kW	41,49 kW	41,99 kW	125,31 kW
05-Jun-18 02:58:11 PM 995msec	VA Fund	45,39 kVA	44,56 kVA	46,77 kVA	136,62 kVA
05-Jun-18 02:58:11 PM 995msec	Cos Phi	0,92	0,93	0,9	0,92
05-Jun-18 02:58:11 PM 995msec	Vrms ph-n	232,3 V	233,43 V	235,23 V	
05-Jun-18 02:58:11 PM 995msec	Arms	197,6 A	192,6 A	200,6 A	

Figur 23. Power and Energy från Fluke, kompenseringen av.

Date	Function	AN(V) / A(A) Avg	BN(V) / B(A) Avg	CN(V) / C(A) Avg	NG(V) / N(A) Avg
05-Jun-18 02:59:08 PM 160msec	Vrms ph-n	231,88 V	233,25 V	234,99 V	0,1 V
05-Jun-18 02:59:08 PM 160msec	Vrms ph-ph	402,38 V	406,25 V	404,01 V	
05-Jun-18 02:59:08 PM 160msec	Arms	200,2 A	196,1 A	202,7 A	1,5 A
05-Jun-18 02:59:08 PM 160msec	Frequency	49,999 Hz			
05-Jun-18 02:59:08 PM 160msec	Peak Voltage	342,1 V	346,1 V	345,2 V	0,3 V
05-Jun-18 02:59:08 PM 160msec	Peak Current	293,8 A	285 A	312 A	2,6 A
05-Jun-18 02:59:08 PM 160msec	Crest Factor Voltage	1,48	1,48	1,47	3,04
05-Jun-18 02:59:08 PM 160msec	Crest Factor Current	1,47	1,45	1,54	1,76

Figur 24. Volts and Amps från Fluke, kompenseringen av.

Date	Function	AN(V) / A(A) Avg	BN(V) / B(A) Avg	CN(V) / C(A) Avg	NG(V) / N(A) Avg
05-Jun-18 03:00:04 PM 65msec	Vrms ph-n	231,99 V	233,29 V	235,07 V	0,1 V
05-Jun-18 03:00:04 PM 65msec	Fundamental Voltage	231,8 V	233,1 V	234,9 V	0,1 V
05-Jun-18 03:00:04 PM 65msec	Fundamental Current	195,8 A	191 A	198,6 A	1,4 A
05-Jun-18 03:00:04 PM 65msec	Voltage Phi	0 °	-119,8 °	-240,14 °	-152,56 °
05-Jun-18 03:00:04 PM 65msec	Current Phi	-22,7 °	-141,32 °	-266,28 °	-239,6 °
05-Jun-18 03:00:04 PM 65msec	Arms	197,7 A	192,5 A	200,1 A	1,5 A
05-Jun-18 03:00:04 PM 65msec	THD V	4,3 %	4,06 %	4,16 %	39,71 %
05-Jun-18 03:00:04 PM 65msec	THD A	14,03 %	12,55 %	12,61 %	4,36 %
05-Jun-18 03:00:04 PM 65msec	K-Factor A	2,36	1,86	1,85	1,23
05-Jun-18 03:00:04 PM 65msec	THD W	0,36 %	0,35 %	0,35 %	
05-Jun-18 03:00:04 PM 65msec	K-Factor W	0,83	0,74	0,79	
05-Jun-18 03:00:04 PM 65msec	Frequency	50,001 Hz			

Figur 25. Harmonics från Fluke, kompensering av.

Date	Function	AN(V) / A(A) Avg	BN(V) / B(A) Avg	CN(V) / C(A) Avg	Total Avg
05-Jun-18 02:53:10 PM 640msec	Active Power	39,38 kW	38,71 kW	39,78 kW	117,87 kW
05-Jun-18 02:53:10 PM 640msec	Apparent Power	39,91 kVA	39,5 kVA	40,1 kVA	119,52 kVA
05-Jun-18 02:53:10 PM 640msec	Reactive Power	-4,48 kvar	-6,05 kvar	-1,98 kvar	-12,54 kvar
05-Jun-18 02:53:10 PM 640msec	Power Factor	0,99	0,98	0,99	0,99
05-Jun-18 02:53:10 PM 640msec	Harmonic Power	3,74 kVA	3,67 kVA	3,73 kVA	11,13 kVA
05-Jun-18 02:53:10 PM 640msec	Unbalance Power				5,46 kVA
05-Jun-18 02:53:10 PM 640msec	W Fund	39,49 kW	38,86 kW	39,87 kW	118,2 kW
05-Jun-18 02:53:10 PM 640msec	VA Fund	39,74 kVA	39,33 kVA	39,92 kVA	118,86 kVA
05-Jun-18 02:53:10 PM 640msec	Cos Phi	0,99	0,99	1	0,99
05-Jun-18 02:53:10 PM 640msec	Vrms ph-n	233,81 V	235,2 V	237,18 V	
05-Jun-18 02:53:10 PM 640msec	Arms	170,7 A	167,9 A	169,1 A	

Figur 26. Power and Energy, kompensering på.

Date	Function	AN(V) / A(A) Avg	BN(V) / B(A) Avg	CN(V) / C(A) Avg	NG(V) / N(A) Avg
05-Jun-18 02:55:27 PM 786msec	Vrms ph-n	233,88 V	235,28 V	236,73 V	0,11 V
05-Jun-18 02:55:27 PM 786msec	Vrms ph-ph	405,77 V	409,31 V	407,55 V	
05-Jun-18 02:55:27 PM 786msec	Arms	176,6 A	173,6 A	175,3 A	1,4 A
05-Jun-18 02:55:27 PM 786msec	Frequency	49,982 Hz			
05-Jun-18 02:55:27 PM 786msec	Peak Voltage	344,3 V	348 V	346,9 V	0,3 V
05-Jun-18 02:55:27 PM 786msec	Peak Current	254,6 A	255,4 A	252 A	2,4 A
05-Jun-18 02:55:27 PM 786msec	Crest Factor Voltage	1,47	1,48	1,47	3,15
05-Jun-18 02:55:27 PM 786msec	Crest Factor Current	1,44	1,47	1,44	1,76

Figur 27. Volts and Amps, kompensering på.

Date	Function	AN(V) / A(A) Avg	BN(V) / B(A) Avg	CN(V) / C(A) Avg	NG(V) / N(A) Avg
05-Jun-18 02:56:43 PM 846msec	Vrms ph-n	233,8 V	235,1 V	236,76 V	0,1 V
05-Jun-18 02:56:43 PM 846msec	Fundamental Voltage	233,6 V	234,9 V	236,6 V	0,1 V
05-Jun-18 02:56:43 PM 846msec	Fundamental Current	183 A	182,6 A	182,6 A	1,4 A
05-Jun-18 02:56:43 PM 846msec	Voltage Phi	0 °	-119,68 °	-240,08 °	-151,2 °
05-Jun-18 02:56:43 PM 846msec	Current Phi	-355,4 °	-113,42 °	-239,58 °	-236,34 °
05-Jun-18 02:56:43 PM 846msec	Arms	183,7 A	183,2 A	183,2 A	1,4 A
05-Jun-18 02:56:43 PM 846msec	THD V	3,85 %	3,66 %	3,69 %	38,95 %
05-Jun-18 02:56:43 PM 846msec	THD A	8,67 %	8,24 %	8,24 %	3,89 %
05-Jun-18 02:56:43 PM 846msec	K-Factor A	2,08	1,6	1,62	1,22
05-Jun-18 02:56:43 PM 846msec	THD W	0,23 %	0,23 %	0,22 %	
05-Jun-18 02:56:43 PM 846msec	K-Factor W	0,88	0,77	0,83	
05-Jun-18 02:56:43 PM 846msec	Frequency	50,015 Hz			

Figur 28. Harmonics, kompensering på.

5.5 Resultat

Det var en lyckad installation och inga problem uppstod under monteringen. Vi hade planerat arbetet och packat allt material som vi behövde dagen före. Totalt tog jobbet en dag.

Som man ser i figur 25 och 28 så sjönk den totala reaktiva effekten (Reactive Power) från 54,42 kVAr till -12,54 kVAr, d.v.s. vi överkompenserade lite. Det skadar inte att överkompensera lite, men man skall undvika att överkompensera för mycket. Vissa elbolag kan även fakturera för överkompensering.

Power Factor d.v.s. förhållandet mellan aktiva effekten och skenbara effekten förbättrades från 0,91 till 0,99. Skillnaden mellan Power Factor och Cos Phi är att Power Factor tar även i beaktan övertonernas inverkan medan Cos Phi endast ser på grundfrekvensen.

Den skenbara effekten (Apparent Power) sjönk från 139 kVA till 120 kVA som man ser i figur 25 och 28. Vilket betyder att totala förbrukningen minskade med 19 kVA.

Belastningsströmmarna (Arms) sjönk från ca 200 A till 175 A som man ser i figur 26 och figur 29. Det ger en total minskning på strömförbrukningen med 25 A.

Den totala harmoniska distorsionen (THD) d.v.s mängden övertoner i % jämfört med grundfrekvensen 50 Hz sjönk från 4,16 % till 3,69 % för spänningen (THD V), och 12,61 % till 8,24 % för strömmen (THD A). Se figur 27 och figur 30.

I Finland strävar man efter att Power Factor skall vara 0,995 vilket betyder att vi ligger nära det värdet.

Enligt standarden SFS-EN 50160 får THD (V) få vara högst 8 %, 95 % av tiden för en veckan d.v.s den får vara över det värdet 8 timmar i veckan. Det värdet uppnås med god marginal då vi har THD (V) 3,69 %.

5.5.1 Kalkyl för återbetalningstid

Här görs en kalkyl för återbetalningstiden för ett statiskt batteri utgående ifrån de uppmätta mätvärdena. Priserna tas från Vasa Elektiskas tariffer.

Tabell 6 Vasa Elektriskas tariff

Grundavgift	moms 0 %	moms 24 %
Mätaravgift	16,82 €/mån.	20,86 €/mån.
Effektavgift *1	2,20 €/kW, mån.	2,73 €/kW, mån.
Reaktiv effektavgift *2	2,76 €/kVAr, mån.	3,42 €/kVAr, mån.

Toppeffekt: 125,79 kW

Reaktiv Effekt: 54,42 kVAr

Reaktiv effektavgift:

$$54,42 \text{ kVAr} - (125,79 \text{ kW} * 0,2) = 29,26 \text{ kVAr}$$

$$29,26 \text{ kVAr} * 2,76\text{€/kVAr} = 80,76 \text{ € i månaden}$$

Priset för statiska batteriet: 2250 €

$$\frac{2250\text{€}}{80,76\text{€ i månaden}} = 27 - 28 \text{ månader eller } 2 \text{ år och } 4 \text{ månader}$$

Slutsats: Detta är en simpel kalkyl och den tar inte i beaktan alla kostnader som ingår i arbetet samt inte heller alla kostnader i elräkningen. Men den är riktgivande på ungefär hur lång tid den betalar sig tillbaka.

6 Slutsats

Resultatet från den praktiska delen blev lyckat. Vi hade som målsättning att lyckas kompensera bort den reaktiva effekten utan att förstärka övertoner i nätet och det lyckades vi med. Vi kompenserade bort all reaktiv effekt och mängden övertoner i nätet sjönk med 0,47 procentenheter för spänningen, och 4,37 procentenheter för strömmen. Som man ser utifrån mätresultatet så sjönk övertonerna i nätet även med ett statiskt batteri. Om man vill få bort alla övertoner skulle man måsta installera ett övertonsfilter men det krävs inte i detta fall.

Detta examensarbete gjordes åt JAP-Sähkö Oy. Detta arbete gjordes för att jag skulle bekanta mig och lära mig att använda Fluke 345 II. Min egna åsikt är att jag har fått en god uppfattning om hur man använder den.

Då jag reflekterar över detta examensarbete så märker jag att jag har lärt mig mycket. Jag har fått en god uppfattning av hur övertoner och reaktiv effekt påverkar elnätet, både teoretiskt och praktiskt.

Några kommentarer om standarderna är att de är svåra att få någon uppfattning om och att de endast är riktgivande, med andra ord det är endast rekommendationer. De skulle kunna förbättras och anges striktare gränser.

Analystorn Fluke 435 II är en bra och lättanvänd mätare, men själva programmet som man analyserar mätdata med skulle kunna vara bättre och mera användarvänligt.

Det var ganska mycket nytt att lära sig och mycket information att behandla, men jag känner att jag har fått en god uppfattning om hur elnätet påverkas av olika störningar.

Det var ett bra examensarbete och mycket lärorikt.

7 Källförteckning

Alfredsson, A., Gustavsson, A., & Elfving, G. (u.d.). *Wikipedia*. Hämtat från <https://sv.wikipedia.org/w/index.php?oldid=10397274>

Berglund, S.-E., & Åkerlund, J. (2007). Hämtat från <https://energiforskmedia.blob.core.windows.net/media/19568/emc-elkvalitet-och-elmiljo-guide-for-elanvandare-och-allmant-sakkunniga-inom-elområdet-ny-version-januari-2007-elforskrapport-2007-40.pdf>

Elektriska, V. (2018). *Vasa Elektriska*. Hämtat från https://www.vaasansahkoverkko.fi/wp-content/uploads/sites/2/2018/01/VSV_Tehosahkohinnasto_SVE.pdf

Elovaara, J., & Haarla, L. (2011). *Sähköverkot 1*. Helsingfors: Gaudeamus.

Fluke. (2018). *Fluke*. Hämtat från <http://www.fluke.com/fluke/fifi/sahkonlaatutyokalut/kolmivaiheinen/fluke-435-series-ii.htm?pid=73939> den 14 Maj 2018

Hämeen Sähkö. (2017). *Hämeen Sähköön kotisivu*. Hämtat från <http://hameensahko.fi/loistehomaksut/> den 11 Maj 2018

Männistö, M., Hietalahti, L., Seesvuori, R., Seesvuori, V., & Wilen, T. (2006). *Yliaalltor ja kompensointi*. Espoo: Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL ry.

Nokian Capacitors. (u.d.).

Olsson, H. (u.d.). *Elsäkerhetsverket*. Hämtat från <https://www.elsakerhetsverket.se/privatpersoner/EMC/EMC-och-elkvalitet/>

Unipower. (u.d.). Hämtat från <http://unipower.se/sv/om-elkvalitet/#transienter>