

ÖVERTONER FRÅN UPS I TRANSFORMATOR

LOKALISERING OCH MÖJLIGA LÖSNINGAR

Högskoleingenjörsutbildning i Energiteknik
Elkraft

Adam Bratt
José Luis Jimenez Hernekoski



HÖGSKOLAN I BORÅS

Program: Energiingenjör – inriktning elkraft

Svensk titel: Övertoner från UPS i transformator – Lokalisering och möjliga lösningar

Engelsk titel: Harmonics from UPS in a transformer – Localization and possible solutions

Utgivningsår: 2020

Författare: Adam Bratt & José Luis Jimenez Hernekoski

Handledare: Lars Hermansson

Examinator: Leif Näslund

Nyckelord: Övertoner, elkvalité, transformator, UPS

Sammanfattning

Avsikten med rapporten är att kartlägga och analysera förekommande övertoner i anslutning till en utav AstraZenecas Uninterruptible Power Supply (UPS) anläggningar. Samt ge en generell inblick på övertoner och dess karaktäristik i form av konsekvenser och lösningar.

Analysen har skett genom mätningar med två olika instrument, en ultraljudsmikrofon och en nätanalysator. Ultraljudsmikrofonen mäter ljudfrekvenser i luften som kan kopplas till vibrationerna alstrade av övertonerna i transformatorerna. Nätanalysatorn användes i syfte att mäta övertonerna i direkt anslutning till ledningarna och ge en komplett bild av de tre fasernas vågform. Valet att använda ultraljudsmikrofonen och nätanalysatorn baserades på att ha en tvåfaldig bekräftelse av förekommande övertoner. Då två olika datainsamlingsmetoder ökar trovärdigheten i resultaten, ifall dessa överensstämmer.

Resultaten visade förekomsten av 2:a, 5:e, 7:e, 11:e och 13:e strömövertoner. Dessa uppmättes i en punkt emellan transformatorn före UPS:en och UPS:en i sig. Källan till strömövertonerna är 6-puls likriktaren ansluten inuti UPS:en. Spänningens vågform påvisade inga större övertoner utan föll inom normala gränsvärden, vilket är ett resultat av att mätningen utfördes på inkommande sida av UPS:en. Efter UPS uppmättes kraftigare övertoner än före. Dessa sträckte sig ifrån 2:a till 7:e ordningen och bestod av både jämna och udda övertoner. Orsaken anses vara växelriktarens hackande av batteriets likspänning, samt pulse width modulation (PWM)-tekniken.

Ultraljudsmikrofonens förmåga visade sig vara mindre anpassad för ändamålet i jämförelse med nätanalysatorn, då den inte påvisade utslag på de kraftigaste övertonerna uppmätta med nätanalysatorn. Nätanalysatorn var nyckelinstrumentet som bekräftade förekomsten av övertoner ifrån en 6-pulsbrygga före UPS och växelriktarens spår efter UPS.

Konsekvenser orsakade av övertonerna framgick som slitage på materiel, onödiga energiförluster och värmeutveckling i ledningar och komponenter. Lösningarna består utav diverse filter eller ombyggnationer. Dessa åtgärder ansågs inte vara ett självklart val ur ett ekonomiskt perspektiv då skadeverkan anses låg.

Abstract

The purpose of this report is to map and analyse the existing harmonics in connection with one of AstraZeneca's Uninterruptible Power Supply (UPS) stations. Additionally, give a general insight of the harmonic distortion's characteristics accompanied by their consequences and solutions.

The analysis was carried out using two different instruments, an ultrasound microphone and a network analyser. The ultrasound microphone measures sound frequencies in the air which can be associated with the vibrations produced by the harmonics in the transformer. The network analyser was used with the intent to measure the harmonic distortions directly on the powerline in order to give a complete picture of the three phase's waveform. The decision to use two different instruments was to achieve a twofold confirmation of the present harmonics. In the case of correlation between the two.

The results showed the presence of 2nd, 5th, 7th, 11th and 13th harmonics in the current's distortion. These were measured in a point between the transformer before the UPS and the UPS itself. The source of the harmonic distortion is the 6-pulse rectifier inside the UPS. The harmonic distortion found inside the voltage showed no sign of exceeding regular harmonic distortion levels, which is a result of the measurements taking place on the incoming line of the UPS. After the UPS, the measurements showed greater harmonics than the measurement before the UPS. These harmonics included both even and odd going from the 2nd to 7th order. The cause seems to be the inverter's switching of the batteries DC-voltage together with the pulse width modulation (PWM)-technology.

The ultrasound microphones ability proved to be less adapted for this purpose in comparison to the network analyser since it did not pick up the strongest harmonics showed by the network analyser. The network analyser proved to be the key instrument for measuring the harmonics associated with the 6-pulsebridge, which exclusively can be pointed out as belonging to the rectifier in the UPS station. The network analyser also traced the tracks left by the inverter after the UPS.

The consequences caused by the harmonic distortion spawns in the shape of excessive wear, unnecessary energy losses and heat increase in power lines and components. The solutions for this matter are various types of filters or reconstruction of components. These actions are not deemed as an obvious choice from economic standpoint due to the low estimated damage caused by the harmonics.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1	INLEDNING	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Syfte	1
1.3	Avgränsningar	1
2	TEORI	2
2.1	UPS	2
2.2	Övertoner	2
2.2.1	Ursprung	4
2.2.2	HD & THD	5
2.2.3	Karaktäristik	6
2.2.4	Fourierserie analys	9
2.2.5	Resonans	10
2.2.6	Vid flera olinjära laster	11
2.3	Transformatorer	12
2.3.1	Hysteresförluster	12
2.3.2	Virvelströmmar	13
2.3.3	K-faktor	14
2.3.4	Delta-koppling	14
2.4	Övertonsrelaterade konsekvenser	15
2.4.1	Överströmmar & Slitage	15
2.4.2	Kondensatorer	15
2.4.3	Vagabonderande strömmar	15
2.5	Övertonsreducerande lösningar	16
2.5.1	Lagar och standarder	16
2.5.2	Passiva filter	16
2.5.3	Aktiva filter	18
2.5.4	Faskompensering	18
3	MATERIAL OCH METOD	18
3.1	Metod ultraljudmikrofon	19
3.2	Metod nätanalysator	21
3.3	Metoddiskussion	21
4	RESULTAT	22
4.1	Ultraljudsmikrofon M500	22
4.2	Nätanalysator SPQfx	23
4.2.1	Mätning T18	23
4.2.2	Mätning T19	25
4.2.3	Referensmätning stadsnät	27

5	DISKUSSION	29
5.1	M500.....	29
5.2	SPQfx	29
6	SLUTSATS.....	30
	REFERENSER	33

Bil.1	Transformator testprotokoll del 1
Bil.2	Transformator testprotokoll del 2
Bil.3	Krettschema UPS anläggning

1 INLEDNING

I denna rapport beskrivs arbetet kring att kartlägga övertoner ifrån en reservkraftanläggning för en transformator på företaget AstraZeneca. Övertoner kan kort förklaras som spänningar och strömmar med en högre frekvens än grundtonen. Dessa övertoner är en oönskad effekt som skapas när en spänning passerar genom switchande komponenter såsom diverse strömriktare eller olinjära laster där den resulterande strömmens vågform skiljer sig ifrån spänningsvågen. Övertoner skadar känsliga komponenter eller bildar överströmmar i ledningar, samtidigt som det utgör en energiförlust. Målet blir att identifiera dessa övertoner och föreslå förslag att reducera dessa till en nivå som är ekonomisk försvarbart.

1.1 Bakgrund

Caverion är företaget med ansvar för drift och underhåll av AstraZenecas anläggningar. I en av AstraZenecas Uninterrupted Power Supply (UPS) reservkraftanläggningar så har ansvariga uppmärksammat övertoner vid transformatorerna T18 och T19. Detta ansågs vara ett ypperligt tillfälle att utarbeta omständigheterna till ett examensarbete. Detta beslut baserades på ämnets närliggande natur till utbildningen. Beroende på vilka övertoner som existerar och dess amplitud så har detta olika negativa effekter i systemet och medför då ett större teoretiskt innehåll som arbete. Studerande ifrån Högskolan i Borås har därför fått i uppgift ifrån Caverion att slutföra sin utbildning genom ett examensarbete som kartlägger övertonerna i transformatorerna i anslutning till UPS-reservkraftanläggningen.

1.2 Syfte

Syftet med arbetet är att analysera vilka övertoner som uppstår och lokalisera dess mest sannolika källa/källor. Arbetet ska också ge en inblick i övertoner som ämne med hjälp av ett brett teoriavsnitt. När det konstaterats vilken/vilka övertoner som uppstår, fundera och se över möjligheter för att minska dessa övertoner. Ifall det finns olika förslag för att åtgärda problemet, jämföra olika åtgärder och dess kostnader.

Frågeställningar:

- Vilka övertoner uppstår?
- Vart uppstår övertonerna?
- Vilka konsekvenser kan dessa övertoner ha för anläggningen?
- Hur kan de negativa följderna av övertoner i transformatorn reduceras?

1.3 Avgränsningar

Rapporten kommer inte genomföra en undersökning av hela AstraZenecas kraftförsörjningsystem eller de specifika konsekvenserna de nyfunna övertonerna har på alla enheter i systemet. Rapporten kommer endast ge rekommenderade handlingar utifrån ett generellt perspektiv och de närliggande komponenterna som UPS:en och transformatorn.

2 TEORI

Denna teoridel är sammansatt i syftet att utge den nödvändiga kunskapen som behövs för att förstå övertoner & reservkraftsystems funktionaliteter samt informera om de existerande lösningar som finns på marknaden idag.

2.1 UPS

I samhällsviktiga verksamheter så finns de ett behov av att säkerställa en fortsatt elkraftsförsörjning även vid ett strömbortfall. Här spelar reservkraft en stor roll, då viktiga system måste upprätthållas. Det finns olika typer av reservkraftaggregat, vilken typ som används beror på kraven som ställs på anläggningen. Kraven kan vara i form av vilken kapacitet som behövs för att driva anläggningen eller vilken uppstartstid aggregatet har tills den börjar producera elkraft efter ett strömbortfall.

UPS står för Uninterruptible Power Supply på engelska och betyder avbrottsfri kraft på svenska. Denna typ av reservkraft används i anläggningar som är extra känsliga för strömbortfall, exempelvis datorhallar. Tekniskt sett skulle en UPS kunna kallas för en momentan reservkraft.

I denna rapport beskrivs två typer av avbrottsfri reservkraft. UPS aggregat med batteribank som ackumulator och UPS aggregat med svänghjul som ackumulator.

Ett UPS aggregat med batteribank som ackumulator fungerar på följande sätt: Den ordinära växelströmmen passerar genom en likriktare som matar ackumulatören (batteribanken), sedan riktas strömmen om igen via en växelriktare och på det sättet så elimineras eventuella transienter och dippar som härstammar från det ordinära nätet. Beroende på ackumulatorns kapacitet så kan ett sådant här UPS aggregat ibland även stå emot strömbortfall. De är då oftast konstruerade för att ge tid åt en kontrollerad nedstängning av datorer eller serverhallar.

(Westlund 2007)

I ett UPS aggregat med svänghjul som ackumulator, håller en elmotor svänghjulet i rotation. Elmotorn försörjs av det ordinära elnätet. Vid strömbortfall så fortsätter svänghjulet att rotera och då utnyttjas utrullningen för att producera elektricitet genom en påkopplad generator. Dessa aggregat håller endast upp spänningen en kortare tid, därför används de oftast tillsammans med dieselektriska aggregat för att kompensera uppstartstiden för dieselmotorn.

(Schairer 2017)

2.2 Övertoner

En ideal växelspanning består av rena sinusvågor. När övertoner finns närvarande i systemet kommer spänningens vågform frångå den ideala sinusvågen. Därför är det av vikt att förstå hur sinusvågen är uppbyggd för att upptäcka övertoner. Höjden på kurvan är amplituden av sinusvågen. Effektivvärdet, även kallat "real mean square" (rms) för en växelspanning är det värde som motsvarar likspänningen som ger samma effektutveckling över en definierad last. Effektivvärdet för en sinusvåg är definierat enligt följande:

$$U_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int u^2(t) dt} = U_{rms} = \sqrt{0,5 \times \hat{U}^2} = 0,707\hat{U} \quad (2.2.1)$$

Medelvärde på en spänningsamplitud och medelvärdet för sinusvågen specifikt beskrivs i formel 2.2.2 nedanför. För att få ett positivt värde beräknas medelspänningen över en halv period, annars summeras den positiva och den negativa arean till 0.

$$U_{medel} = \frac{\int_0^{\pi} \hat{U} \cdot \sin(\omega t) d\omega t}{\pi} = -\hat{U} \cos(\omega t) = \int_0^{\pi} \frac{2}{\pi} \cdot \hat{U} = 0,637 \cdot \hat{U} \quad (2.2.2)$$

Formfaktor är ett mått på kurvans utseende och beräknas enligt formel 2.2.3.

$$Formfaktor = \frac{U_{rms}}{U_{medel}} = \frac{0,707 \cdot \hat{U}}{0,637 \cdot \hat{U}} = 1,11. \quad (2.2.3)$$

Om spänningen eller strömmen skulle uppvisa en annan formfaktor är detta bevis på att det finns en viss störning i systemet. Toppfaktor är ett likvärt användbart mått och beräknas enligt formel 2.2.4.

$$Toppfaktor = \frac{\hat{U}}{U_{rms}} = \frac{\hat{U}}{0,707 \cdot \hat{U}} = 1,414 \quad (2.2.4)$$

På samma sätt som formfaktorn kan det med hjälp av toppfaktorn upptäcka störningar om faktorerna avviker ifrån ovanstående värden.

(Cobben 2016)

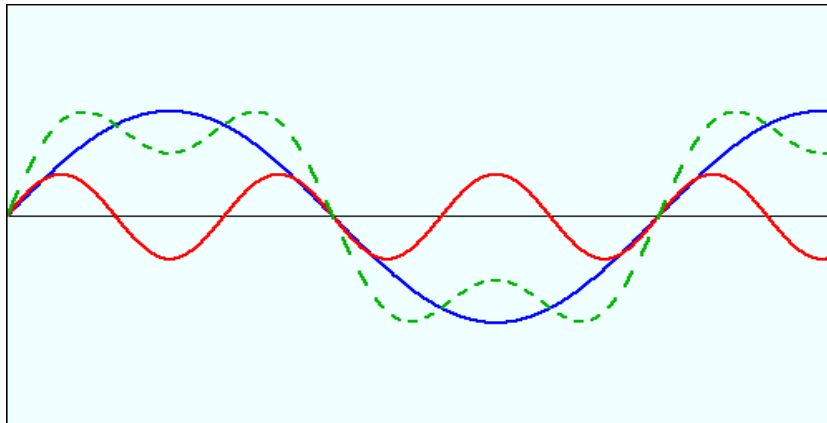
I det svenska elkraftnätet råder frekvensen 50 Hz. Detta är den så kallade grundfrekvensen/grundtonen. Övertoner definieras som strömmar och spänningar med frekvenser som är en positiv multipel av grundtonens frekvens. I normala fall faller övertonsamplituden ju högre ordning. I tabell 1 listas de udda övertonerna samt deras frekvens. Dessa övertoner samexisterar med varandra och grundtonen. Detta betyder att det kan uppstå flera strömmar och spänningar i samma ledning. Detta förklaras vidare i kapitel 2.2.4. Sammanfattningsvis förvrängs vågformen på signalen av övertoner bort från den ideella sinusvågen och orsakar diverse konsekvenser vilket vidare behandlas i kapitel 2.5.

(Cobben 2016)

Tabell 1. Övertoner med sina respektive frekvenser baserat på grundfrekvensen 50 Hz.

Överton:	Grundton	3:e	5:e	7:e	9:e	n
Frekvens:	50 Hz	150 Hz	250 Hz	350 Hz	450 Hz	n×50 Hz

I trefasssystem existerar inte jämna övertoner av symmetriska skäl.



Figur 2.1. Grundton (blått), tredje överton (rött) och slutgiltig signal (streckad grön).

I figur 2.1 illustreras grundtonen tillsammans med tredjetonen. Det uppenbarar sig att tredjetonen svänger tre gånger så fort jämfört med grundfrekvensen. Dessa två signaler kommer i ett oscilloskop framställas som den gröna streckade funktionen. D.v.s. summan av grundtonen tillsammans med den 3:e övertonen resulterar i den slutgiltiga förvrängda signalen.

(Cobben 2016)

2.2.1 Ursprung

För en enkel resistor med ett linjärt beteende kommer spänning och ström-vågformen vara oförändrad när den passerat resistorn. Det vill säga, en sinusformad spänning kommer resultera i en sinusformad ström. Övertoner härstammar från när en spänning passerar switchande komponenter eller laster med en olinjär karaktär där den resulterande strömmens vågform skiljer sig ifrån spänningens vågform. När den förändrade ström-vågformen utsätts för en elektromagnetisk komponent som en induktor eller transformator förvrängs även spänningens vågform. Den resulterande förvrängda signalen innehåller då övertoner och är sig olik från den originella sinussignalens vågform. Energisparande LED-lampor är ett vanligt exempel på en olinjär last. Olinjäriteten skapas p.g.a. hur LED opererar med hjälp av dioder som kontrollerar på och avslagningen av strömtillförseln hos lamporna. På och avslagningen skapar övertoner så att sammankopplingen av många LED lampor kan förvärra elkvalitén hos systemet så pass avsevärt att åtgärder kan behöva vidtas.

En annan vanligt förekommande källa till övertoner är likriktare då dessa endast drar ström när dess kondensator är urladdad. Vilket resulterar i en spänningsdipp och strömuttag vid spänningens topp.

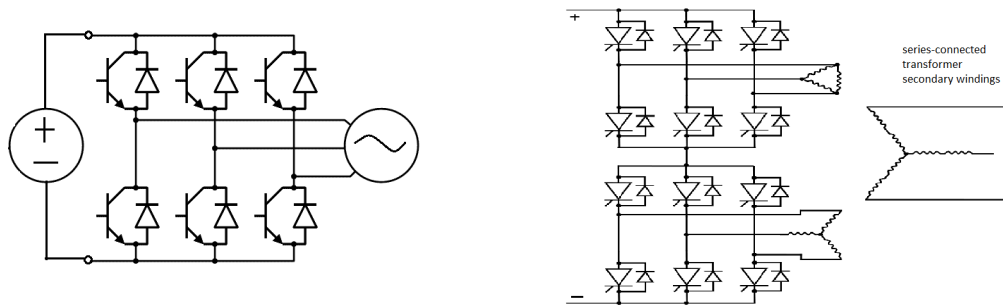
(Cobben 2016)

Växelriktare används som tidigare nämnt i UPS anläggningar med batteribank som ackumulator, dess uppgift är att växelrikta batteriernas likspänning till växelspänning. Detta utförs med transistorer av exempelvis typen insulated gate bipolar transistors (IGBT) vid spänningar <1000 V och med tyristorer vid spänningar >1000 V. IGBT:erna "hackar" upp likspänningen så att växelspänning erhålls i den andra ändan av växelriktaren. IGBT baserade växelriktare klarar av att tändas och släckas med hjälp av endast en drivkrets, detta medför

lägre kostnader än växelriktare baserade på tyristorer som kräver en drivkrets för både tändning och släckning. Därför används idag mestadels växelriktare med IGBT:er, förutom vid spänningar >1000 V.

(Alfredsson & Mårtensson 2011)

Växelriktare kan konstrueras med olika antal IGBT:er eller tyristorer (4, 6, 12, osv.), se figur 2.2. Ju fler switchande komponenter desto renare sinusvåg skapas.



Figur 2.2. Kretsschema för en 6-puls växelriktare (vänster)(C J Cowie 2005, förändrad från original), kretsschema för en 12-puls växelriktare (höger)(C J Cowie 2006).

Den upphackade växelspänningen till följd av IGBT:ernas tändning och släckning visar en fyrkantliktande sinusvåg. Beroende på vad det är för last som ska betjänas så kan det vara aktuellt att filtrera spänningen m.a.p. övertoner.

Pulse width modulation (PWM) används ofta vid upphackningen av likspänningen för att få en mindre distorderad sinusvåg. PWN anpassar längden på upphacknings-pulserna så att en renare sinusvåg på strömmarna skapas. Övertoner kommer fortfarande att alstras men de kommer att bestå av högre multiplar av grundfrekvensen i jämförelse med en växelriktare utan PWM, detta leder till mindre dimensioner på filtren vilket i sin tur är kostnadsbesparande.

(Hart 2011)

Vilka övertoner som produceras från en ostyrd pulsbygga kan beräknas enligt formel 2.2.5.

$$h = P \times K \pm 1 \quad (2.2.5)$$

Där:

H = överton

P = antal dioder

K = 1,2,3...

(Lindberg 2016)

2.2.2 HD & THD

För att få ett mått på övertonshalten i ett system kan relativa storlekar användas för att bestämma elkvaliteten. Dock är det inte alltid fallet att höga andelar övertoner är skadligt, i scenarion med låga ström eller spänningsamplituder kan övertonerna ignoreras. För att

bestämna den relativa storleken på en specifik överton (h) till grundtonen, även förkortat HD (Harmonic Distortion) på engelska, divideras den specifika övertonens U_h amplitud med grundtonens amplitud U_1 enligt $HD_1 = \frac{U_h}{U_1}$. Därefter är det möjligt att uppskatta den specifika övertonens påverkan gentemot grundtonens.

Det existerar alltid flertalet övertoner och för att istället överblicka dessa enskilt så används enheten THD (Total Harmonic Distortion) för att få en bättre uppskattning av den totala relativa storleken sett till grundtonen U_1 . För att beräkna THD baserat på amplitud används formel 2.2.6:

$$THD_1 = \frac{\sqrt{\sum_{h>1}^{\infty} (U_h)^2}}{U_1} \quad (2.2.6)$$

THD_1 är då baserad på grundtonen och övertonernas toppvärden. Ett annat mått är att beräkna THD med hjälp av effektivvärden. Då används THD_{rms} istället som beräknas på följande vis:

$$THD_{rms} = \frac{\sqrt{\sum_{h>1}^{\infty} (U_h)^2}}{U_{rms}} \quad (2.2.7)$$

$$\text{Där, } U_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt} = \sqrt{\sum_{h>0}^{\infty} (U_h)^2} \quad (2.2.8)$$

THD och HD är båda relativa enheter d.v.s. att dessa ej har någon storhet utan kan endast användas i jämförelsesyfte för att uppskatta den påverkande faktorn från övertoner i systemet i förhållande till grundtonen.

(Cobben 2016)

2.2.3 Karaktäristik

Övertoner kan delas upp i tre olika kategorier, beroende på vilken karaktäristik de har. Tabell 1 nedanför visar vilken karaktäristik de första udda övertonerna upp till 23 har inuti en elmotor.

Plusföljdskaraktär: Övertonsströmmen skapar ett medroterande magnetfält.

Nollföljdskaraktär: Dessa övertoner påverkar inte rotationen.

Minusföljdskaraktär: Ett magnetfält med motsatt riktning till grundtonen alstras.

Tabell 2. Karaktäristik för de första udda övertonerna upp till 23.

Plusföljd	Nollföljd	Minusföljd
1	3	5
7	9	11
13	15	17
19	21	23

(Cobben 2016)

Nollföljdskaraktär & Tredjetonsfenomenen

För en trefasig ledning arbetar alla faser med en fasförskjutning på 120° grader enligt följande formler.

$$i_1 = I_1 * \sin(\omega t + 0^\circ) \quad (2.2.9)$$

$$i_2 = I_2 * \sin(\omega t + 120^\circ) \quad (2.2.10)$$

$$i_3 = I_3 * \sin(\omega t - 120^\circ) \quad (2.2.11)$$

Fasförskjutningen mellan dessa faser uppehåller en konstant spänning och säkerställer att ingen effekt förloras till nolledaren genom att de tre faserna avlöser varandra så att $I_1 + I_2 + I_3 = 0$ i kopplingspunkten.

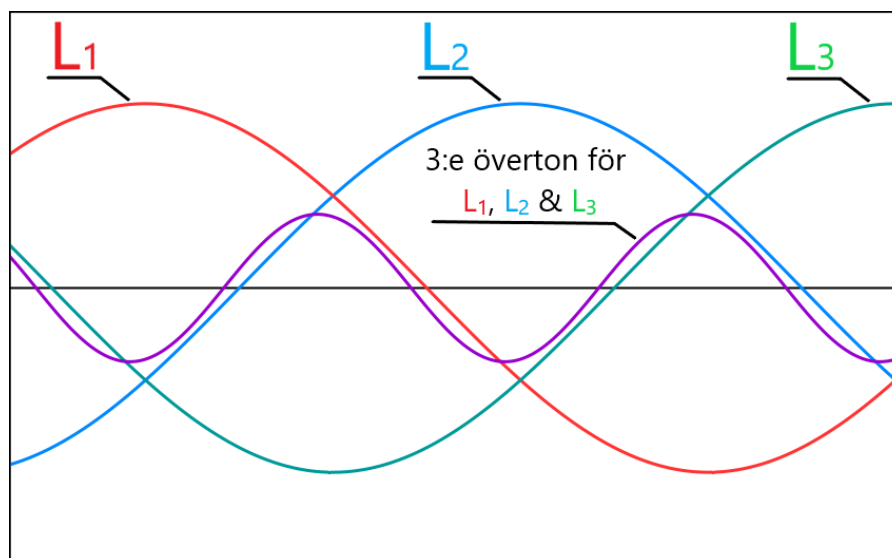
När en överton med multipeln tre av grundtonen existerar, d.v.s. 3:e, 6:e, 9:e, 12:e o.s.v. uppträder en viss karaktäristik som påverkar nolledaren. Den tredje övertonen är förstås den mest markanta då dess amplitud oftast långt överstiger de andra övertonernas amplitud. När exempelvis en tredje överton existerar i ett 3-fassystem fås ett fenomen som påverkar nolledaren. Detta fenomen är passande nog döpt till "tredjetonsfenomenet". Vad som sker i detta förlopp är att de tre tredjetonerna synkroniseras och summeras. Detta kan illustreras med hjälp av figur 2.3 samt följande formler:

$$i_1 = I_1 * \sin 3(\omega t + 0^\circ) \quad (2.2.12)$$

$$i_2 = I_2 * \sin 3(\omega t + 120^\circ) = I_2 * \sin(\omega t + 360^\circ) = I_2 * \sin 3(\omega t + 0^\circ) \quad (2.2.13)$$

$$i_3 = I_3 * \sin 3(\omega t - 120^\circ) = I_3 * \sin(\omega t - 360^\circ) = I_3 * \sin 3(\omega t + 0^\circ) \quad (2.2.14)$$

$$i_1 + i_2 + i_3 = 3i_1 \quad (2.2.15)$$



Figur 2.3. 3:e övertonerna (15° fasförskjutning på 3:e övertonerna för åskådlighet).

Eftersom det inte finns någon fasförskjutning mellan de tre faserna summeras strömmarna i nolledaren. Beroende på tredjeövertonernas sammanlagda strömamplitud kan det ske en avsevärd effektförlust och dessutom en överbelastning av nolledarkabeln. Det är viktigt att påpeka att tredjetonsfenomenet inte endast härstammar ifrån den tredje övertonen utan kan likväl uppstå ifrån till exempel nionde eller tolfte övertonen som båda är en tredje multipel av grundfrekvensen.

(Cobben 2016)

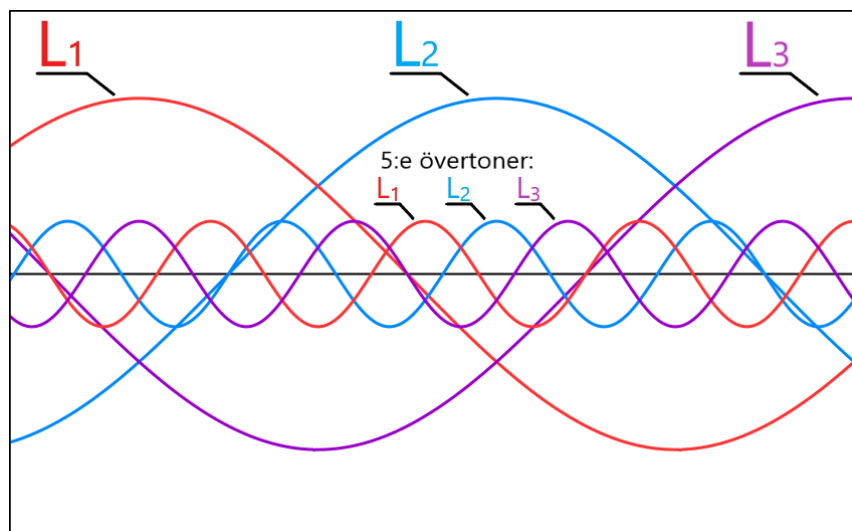
Minusföljdskaraktär

Övertoner med minusföljdskaraktär visar också symmetri med vårt 3-fassystem, alltså är faserna förskjutna med 120° . Skillnaden är att de har omvänd rotation jämfört med grundtonen, se figur 2.4. Detta leder till att övertonsströmmen vill rotera exempelvis en elmotor åt fel håll med en 5 ggr högre frekvens. Den låga amplituden på övertonerna i förhållande till grundtonen motverkar dock så att detta inte händer. Men konsekvenserna visar sig i form av överbelastning i elmotorn vilket förkortar livslängden. För att beräkna 5:e övertonens fasströmmar används följande formler:

$$i_1 = I_1 * \sin 5(\omega t) \quad (2.2.16)$$

$$i_2 = I_2 * \sin 5(\omega t - 120^\circ) = I_2 * \sin(5\omega t - 600^\circ) = I_2 * \sin(5\omega t - 240^\circ) \quad (2.2.17)$$

$$i_3 = I_3 * \sin 5(\omega t - 240^\circ) = I_3 * \sin(5\omega t - 1200^\circ) = I_3 * \sin(5\omega t - 120^\circ) \quad (2.2.18)$$

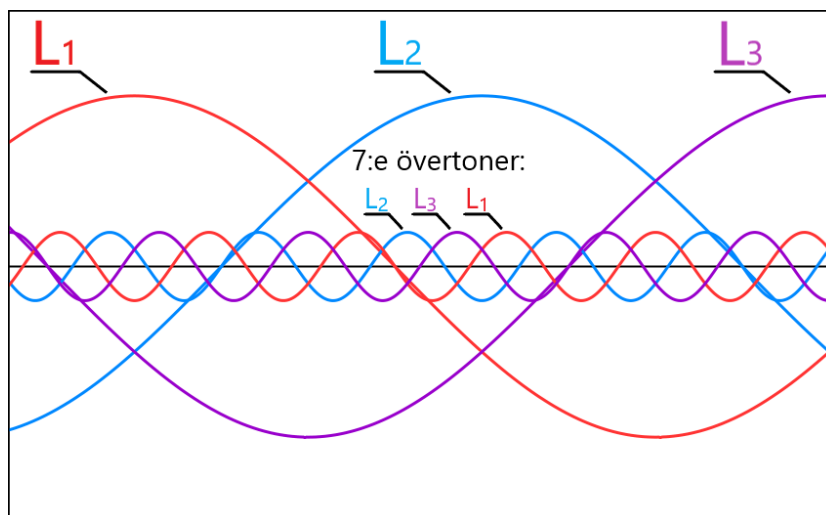


Figur 2.4. 5:e övertonerna.

Plusföljdskaraktär

Övertoner med plusföljdskaraktär alstrar ett magnetfält med samma fasriktning som grundtonen. Därmed blir konsekvenserna inte lika stora som för övertoner med minusföljdskaraktär. För att tydligare se fasrotationen för övertoner med plusföljdskaraktär, se figur 2.5, där 7:e övertonerna åskådliggörs.

(Cobben 2016)



Figur 2.5. 7:e övertoner.

2.2.4 Fourierserie analys

Jean-Baptiste Joseph Fourier (1768–1830) var en fransk matematiker som upptäckte att alla periodiska förlopp kan brytas ner och skrivas om som en oändlig summa av periodiska förlopp med specifik frekvens, amplitud och fasläge. Denna upptäckt kallas för fourierserie. Med en fourieranalis delas ett periodiskt förlopp upp i de olika frekvenser den är uppbyggd av.

Med hjälp av fourierserie transformen går det sedan att överföra den periodiska signalen ifrån ett tidsplan till ett frekvensspektrum. Då åskådliggörs vilka heltalsmultiplar av grundtonens frekvens som signalen innehåller. Elnätsanalytatorer använder sig av detta matematiska verktyg för att analysera övertoner.

Följande formel uttrycker en periodisk signal i amplitud-fasvinkelform:

$$f(t) = X_0 + \sum_{k=1}^{\infty} X_k \sin(k\omega_1 t + \varphi_k) \quad (2.2.19)$$

Den är i sin tur en matematisk omskrivning av följande formel:

$$f(t) = A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cos(k\omega_1 t) + B_k \sin(k\omega_1 t) \quad (2.2.20)$$

Där A_0 och X_0 är signalens likströmskomponent (signalens medelvärde) och beräknas enligt följande formel:

$$A_0 = X_0 = \frac{1}{T} \int_{\alpha}^{\alpha+T} f(t) dt \quad (2.2.21)$$

A_k samt B_k termerna är amplituden på cosinus- respektive sinus-komponenterna i signalen och beräknas med följande formler:

$$A_k = \frac{2}{T} \int_{\alpha}^{\alpha+T} f(t) \cos((k\omega_1 t) dt \quad (2.2.22)$$

$$B_k = \frac{2}{T} \int_{\alpha}^{\alpha+T} f(t) \sin((k\omega_1 t) dt \quad (2.2.23)$$

Vid analys av fourierserier så utnyttjas en signals symmetriegenskaper för att förenkla analysen. Här nedan listas dessa förenklingar:

- En periodisk signal som visar symmetri med tidsaxeln har ett medelvärde som är lika med 0, ($A_0 = X_0 = 0$) alltså blir signalens likströmskomponent 0.
- En udda funktion ($f(t) = -f(-t)$) innehåller endast B_k -termer, alltså är alla A_k -termer lika med 0.
- En jämn funktion ($f(t) = f(-t)$) innehåller endast A_k -termer, alltså är alla B_k -termer lika med 0.
- En periodisk signal med halvvågssymmetri ($f(t \pm T/2) = -f(t)$) består endast av udda signalvinkelfrekvenser ($k\omega_1$ där $k = 1, 3, 5, \text{ osv.}$).

(Arrillaga & Watson 2003)

2.2.5 Resonans

Resonans uppstår när den induktiva reaktansen är lika stor som den kapacitiva reaktansen, vilket betyder att den sammanlagda impedansen är försumbar, se figur 2.6. Utan en impedans kan det leda till att strömmen rusar utan motstånd och överbelastar ledningen. I fall där en induktans och kapacitans befinner sig i en parallellkoppling kan motståndet istället öka vid resonans. Detta kan istället skapa höga övertonsspänningar om övertonsströmmen är konstant. Passiva filter använder sig av detta fenomen för att antingen blockera eller leda undan övertoner (se kapitel passiva filter 2.6.3). Formel 2.2.24 beskriver uppfyllelsevillkoret för att resonans ska uppstå. Med hjälp av formel 2.2.25 kan resonansfrekvensen i en seriekoppling beräknas.

$$2\pi fC = \frac{1}{2\pi fL} \quad (2.2.24)$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.2.25)$$

Där:

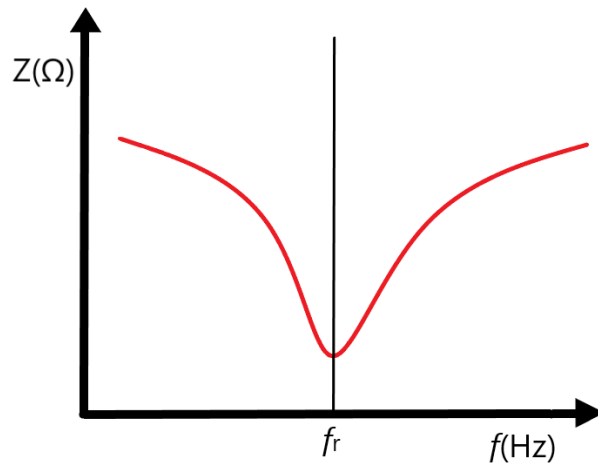
L = Induktansen [H]

C = Kapacitansen [F]

f = Frekvens [Hz]

f_r = Resonansfrekvensen [Hz]

(Cobben 2016)

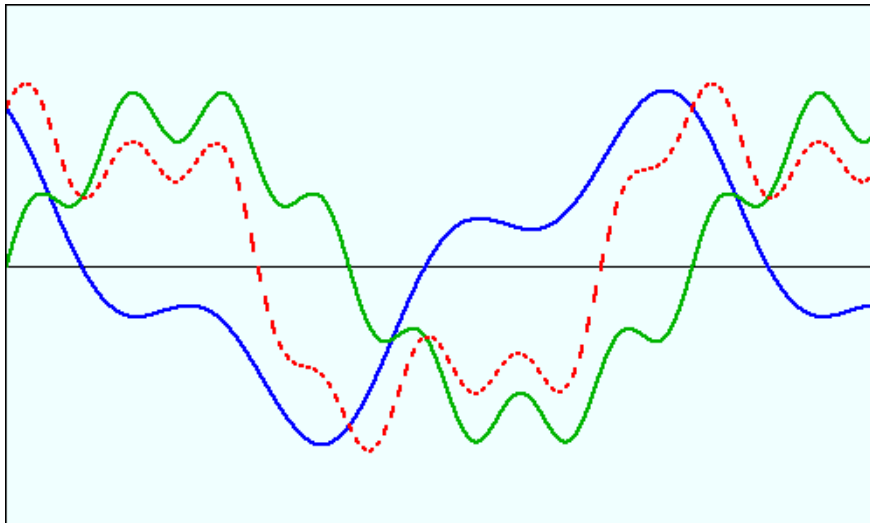


Figur 2.6. Impedansreducering vid resonans.

2.2.6 Vid flera olinjära laster

I de fall där flera olinjära laster finns i samma system så skapar dessa ett antal olika övertoner. Beroende på övertonernas riktning, amplitud och frekvens så adderas eller subtraheras spänningen och strömmen från de olika lasterna till en slutgiltig vågformad signal. Detta betyder att två liknande övertonssignaler kan adderas och skapa en signal med dubbel amplitud vilket kan överbelasta ledningar. Det betyder också att två liknande övertonssignaler fast med 180° fasvridning från varandra kan subtraheras och alltså elimineras från ledningen. Även icke-symmetriska signaler sammanslås och skapar en förändrad slutgiltig vågformadsignal. Figur 2.7 visar ett exempel på resultatet ifrån två distorderade signaler sammanslagna till en slutgiltig vågform.

(Cobben 2016)



Figur 2.7. Distorderad signal 1 (grön), distorderad signal 2 (blå) och slutgiltig signal (streckad röd).

2.3 Transformatorer

En transformator omvandlar en spänningsnivå till en annan med hjälp av induktans ifrån en spole som producerar ett magnetfält. Magnetfältet kopplas via en järnkärna från primärsidan till sekundärsidan där en andra spole överför en spänning till sekundärsidan. Den överförda spänningen beror på antalet lindningar på vardera sida där kvoten mellan dessa lindningsvarv är lika med omsättningstalet.

Den idealt överförda spänningen beräknas $U_2 = \frac{N_1}{N_2} \cdot U_1$ och eftersom $U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2$ kan det även konstateras att den överförda strömmen beräknas enligt $I_2 = \frac{N_2}{N_1} \cdot I_1$. Det ska förtydligas att även eventuella övertoner kan transformeras över från primärsidan till sekundärsidan och vice versa på samma vis som grundtonen. Med dessa observationer underförstås det att en acceptabel överton-strömmamplitud kan transformeras upp till en överbelastande ampere-nivå.

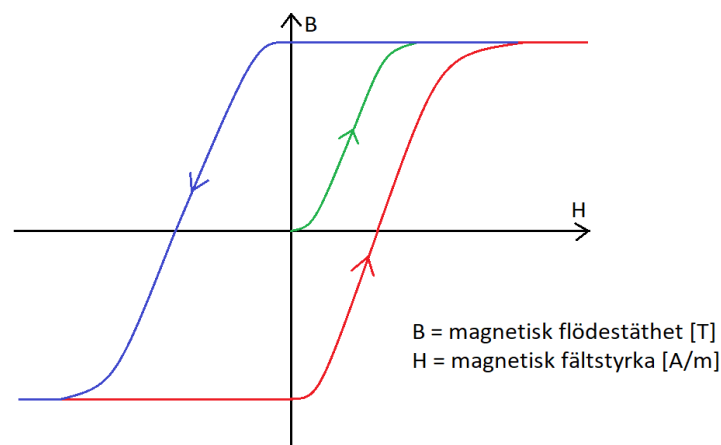
(Bergström & Nordlund 2012)

2.3.1 Hystereseförluster

Hysteres är ett fenomen som uppstår i ferromagnetiska material då de påverkas av ett externt magnetfält. Ett material har en maximal gräns på hur magnetiskt det kan bli och det beror på materialets egenskaper. När ett material inte kan bli mer magnetiskt kallas det att materialet är mättat. När det externa magnetfältet upphör så fortsätter materialet att vara magnetiskt, med samma riktning som inducerats. För att sedan avmagnetisera materialet måste ett magnetfält med motsatt riktning induceras.

(Young 2012)

Vid växelström alstras magnetfält med växlande riktning, alltså blir det påverkade ferromagnetiska materialet växelvis magnetiserat och avmagnetiserat. Detta förlopp kan visualiseras i en hystereskurva, se figur 2.8.



Figur 2.8. Visualisering av en hystereskurva.

Den gröna kurvan kallas för "jungfrukurva" och visar materialets magnetisering från att vara helt omagnetiskt (startar i origo). Den röda kurvan visar materialets väg mot att bli mättat av

magnetisering, slutligen visar den blåa kurvan materialets väg mot att bli avmagnetiserat. Arealen som bildas i grafen motsvarar energiförlusterna som går åt för att ändra den magnetiska riktningen på atomerna i det ferromagnetiska materialet. Detta fenomen där ett material tar upp energi för att ändra magnetisk fältriktning kallas för hysteres och det brukar räknas som en energiförlust i elektriska sammanhang.

(Young 2012)

Det ovannämnda externa magnetfältet kan uppstå vid oönskade strömmar i materialet, såsom övertonsströmmar. I en transformator kan detta ske i järnkärnan.

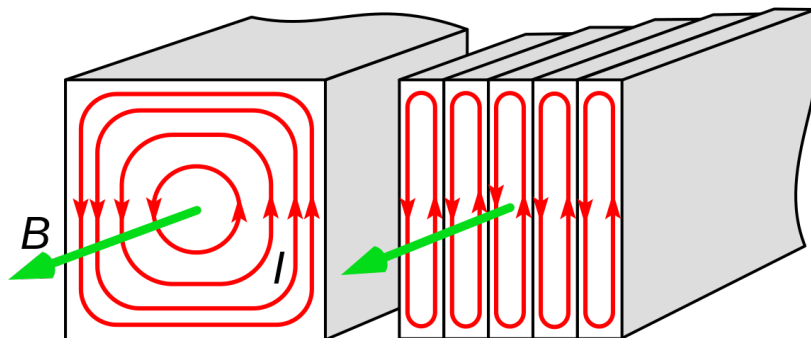
Vid tillverkning av en ny transformator utförs alltid ett tomgångsprov för att beräkna bland annat transformatorns egna hysteresförluster. Resultatet från tomgångsprovet redovisas sedan i ett testprotokoll (se bil. 1 & 2 för aktuella testprotokoll). Detta görs för att bestämma transformatorns specifikationer.

När övertonsströmmar induceras i en transformator förändras dessa förbestämda specifikationer och en ny beräkning av transformatorns specifikationer måste göras.

(Alfredsson & Jacobsson 2016)

2.3.2 Virvelströmmar

I en transformators järnkärna alstras magnetiskflöde i takt med den strömgenomgång spolen utsätts för. Allt magnetiskt flöde som ej verkar i gynnsam riktning kan klassificeras som virvelströmmar. En strömtilförsel med övertoner genererar delvis magnetiskt flöde som arbetar emot den avsedda riktningen, detta skapar istället magnetiska virvlar i transformatorns järnkärna, se figur 2.9. Detta resulterar i en försämrad överföringsförmåga där mer värme alstras ifrån den icke nyttiga virvelströmmen samtidigt som det magnetiska flödet från virvelströmmarna arbetar emot den ursprungliga riktningen. Existerar det övertoner bör transformatorns märkta maxkapacitet reduceras. Den nya maxkapaciteten beräknas med hjälp av k-faktorn (se 2.2.3).



Figur 2.9. Virvelströms visualisering med och utan skiljande plåtlameller (Chetvorno 2015).

För att förminska verkan ifrån virvelströmmas tillverkas transformatorer med isolerande plåtlameller i täta skikt. Detta för att förminska storleken på tvärsnittsytan som virvelströmmarna kan bredda ut sig på och på så sett "tvinga" flödet i framåtgående eller bakåtgående riktning.

(Young 2012)

2.3.3 K-faktor

För att beräkna en ny maxkapacitet för en transformator beräknas K-faktor med hjälp av följande formel:

$$K = \left[1 + \frac{e}{e+1} \left(\frac{I_1}{I} \right)^2 \sum_{h=2}^{h_{max}} \left(h^q \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.3.1)$$

e = Förhållandet mellan grundfrekvensens virvelströmmar och det resistiva förlusterna i referenstemperatur

h = Övertonstalet

I = Strömmens effektivvärde

I_h = Den specifika övertonegens strömamplitud

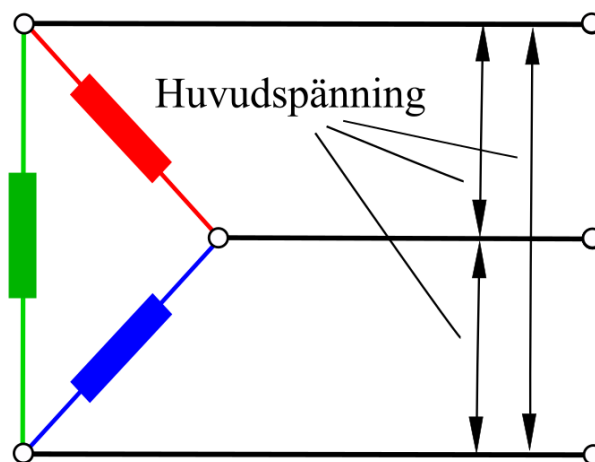
I_1 = Strömamplituden i grundtonen

q = Materialkonstant beroende på typ och konstruktion av lindningarna.

Maximala kapaciteten för transformatorn divideras sedan med K-faktorn för att bestämma transformatorns nya maxkapacitet. Vad som kan påvisas är att övertoner sänker transformatorns förmåga att transformera effekt avsevärt genom att nå maxtemperatur redan i lägre effektbelastning.

(Cobben 2016)

2.3.4 Delta-koppling



Figur 2.10. Delta-koppling (Svjo 2015).

I transformatorer med delta-koppling (se figur 2.10) kan ett fenomen som påminner om tredjetonsfenomenet uppstå. Detta fenomen uppstår av övertoner med multipel av tre som skapar en nollföljdskaraktär. Detta resulterar i att strömmen från nollföljden fastnar i delta-kopplingen och roterar. Likt virvelströmmar alstrar detta också värme och riskerar att överbelasta delta-kopplingen.

(Westlund 2007)

2.4 Övertonsrelaterade konsekvenser

Övertoner är en hörnsten i ämnet dålig elkvalité. För att motivera och förstå hur övertonsåtgärder skall implementeras är det viktigt att vara underförstådd med övertoners påverkan i ett system. Nedan presenteras det konsekvenser till följd utav kraftiga övertoner.

2.4.1 Överströmmar & Slitage

Övertoners närvaro i ett system orsakar påfrestningar på systemets komponenter. Detta sker till största del utav värmeutvecklingen som övertonerna genererar. I värsta fall kan värmeutvecklingen leda till brand eller överslag och kortslutning mellan två ledningar. I ett sådant fall är det lätt att se vad för konsekvenser detta kan leda till. Ett utslag i ett kraftförsörjningsystem kan förhindra ett helt produktionsband och dess bemanning att utföra arbete under en längre tid. Ett annat exempel är i äldre installationer där det även är vanligt med en neutralledare med en mindre tvärsnittsyta än fasledarna. Vid starka nollföljdsövertoner kan ett tredjetoens fenomen orsaka en överbelastning av neutralledaren.

Även i mildare fall av övertoner kan det räknas med en förminskning av livslängden för komponenterna som upplever en ökad stress med övertoner närvarande. Detta sker dels genom femtetoensfenomenet som arbetar emot elektriska motorer och den höjda arbetstemperaturen som påverkar materialet. Naturligtvis är även den onödiga energiförbrukning som sker i samband med övertoner nämnvärd ihop med de negativa effekterna den upptäckande skyddsutrustningen upplever av spänningsdippar. (Cobben 2016)

2.4.2 Kondensatorer

När strömmar med högre frekvens än grundtonen passerar igenom kondensatorer så sjunker impedansen, vilket leder till att strömmen ökar. Detta kan överbelasta och förstöra kondensatorer. Kondensatorer är därför särskilt utsatta för övertoner och utgör en kostsam risk för systemet i sin helhet ifall dessa slås ut. Kondensatorernas roll i systemet är att minska den reaktiva effekten för att effektivisera energiförbrukningen. Skulle kondensatorernas kapacitiva effekt upphöra kan systemet utsättas för en stor skenbar effekt som kan vara förödande för andra ihoplänkade komponenter.

(Cobben 2016)

2.4.3 Vagabonderande strömmar

Övertoner av högre frekvens kan komma att medföljas av höga impedanser enligt

$$Z_L = 2\pi fL \quad (2.4.1)$$

Där:

Z_L = impedans av induktiv natur

f = frekvens

L = induktansen i henry [H]

Frekvenser är då en överlägset bidragande faktor till det utvecklade motståndet för övertoner. Eftersom ström alltid följer den väg med minst motstånd kan detta leda till att strömmar inte följer den avsedda returvägen genom nolledaren. Istället kan dessa höga övertoner ledas en oavsedd väg till jord. Då talas det om vagabonderande strömmar. Dessa kan ta oförutsedda riktningar såsom kabelstegar, höljesplåtar eller vattenrör och medför en fara för liv. (Westlund 2007)

2.5 Övertonsreducerande lösningar

Det finns ett antal olika lösningar till hands för att hantera övertoner. Lösningar som att dimensionera kablage efter 3:e övertonens excessiva strömgenomgång för att undvika överbelastning är en av de enklaste lösningarna. Denna specifika lösningen omhändertar ej det grundläggande problemet, övertonerna. För att faktiskt förminska vidare transitering av övertonerna finns det tre huvudkategorier som presenteras nedanför ihop med lagar och standarder.

2.5.1 Lagar och standarder

I Sverige styr Svensk Elstandard för regelverket över el kvaliteten i nätet och här ingår bestämmelser över övertoner. På följande vis definierar Svensk Elstandard riktlinjerna för övertoner i det svenska nätet.

Under normala driftförhållanden ska, under varje period av en vecka, 95% av antalet 10-minuters medelvärden för effektivvärdet för varje enskild överton i spänningen vara mindre än eller lika med värdena i tabell 1. Resonanser kan orsaka högre spänningar hos en enskild överton.

Dessutom ska den totala övertonshalten (THD) hos matningsspänningen (inklusive alla övertoner upp till den 40:e) vara mindre än eller lika med 8 %.

(EN 50160:2010, s. 12)

Tabell 3 (hänvisas till tabell 1 i citat). Värdet av enskilda övertoner i anslutningspunkten för övertoner av ordningen upp till 25, angivna i procent av U_1 (EN 50160:2010, s. 13).

Udda övertoner				Jämna övertoner	
Ickemultipler av 3		Multipler av 3		Ordning h	Relativ spänning (U_h)
Ordning h	Relativ spänning (U_h)	Ordning 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	0,75 %		
17	2,0 %				
19	1,5 %				
23	1,5 %				
25	1,5 %				

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.

2.5.2 Passiva filter

Passiva filter är reaktiva komponenter som utnyttjar frekvens skillnaden mellan grundfrekvensen och andra övertoner för att skapa övergångar som innehar antingen hög eller låg impedans.

Ifall övertoner förekommer i systemet och övertonens frekvens är densamma som resonansfrekvensen för filtret, då kan två olika scenarion uppstå beroende på filtrets

konfiguration. Följande formel används för att beräkna impedanserna i filtret för att påverka en viss frekvens i systemet:

$$2\pi fC = \frac{1}{2\pi fL} \quad (2.5.1)$$

Där:

f = Specifika övertonsfrekvensen [Hz]

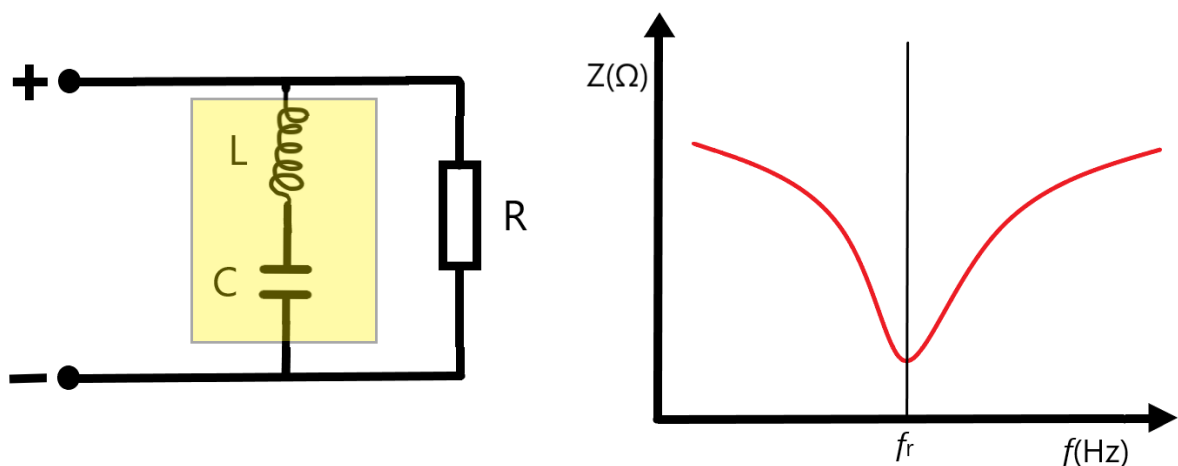
L = Induktansen [H]

C = Kapacitans [F]

Dämpande filter är en seriekoppling där övertoner leds förbi den känsliga lasten genom en separat koppling parallellt med lasten. Filtret som har en låg impedans för en specifik frekvens (se figur 2.11). Detta kan kompletteras med flera filter för att leda bort ett antal olika frekvenser. Dessa filter kallas för dämpningsfilter.

En nackdel med dämpningsfilter är att övertoner från andra externa källor också kan ledas genom filtret och orsaka överströmmar.

(Cobben 2016)

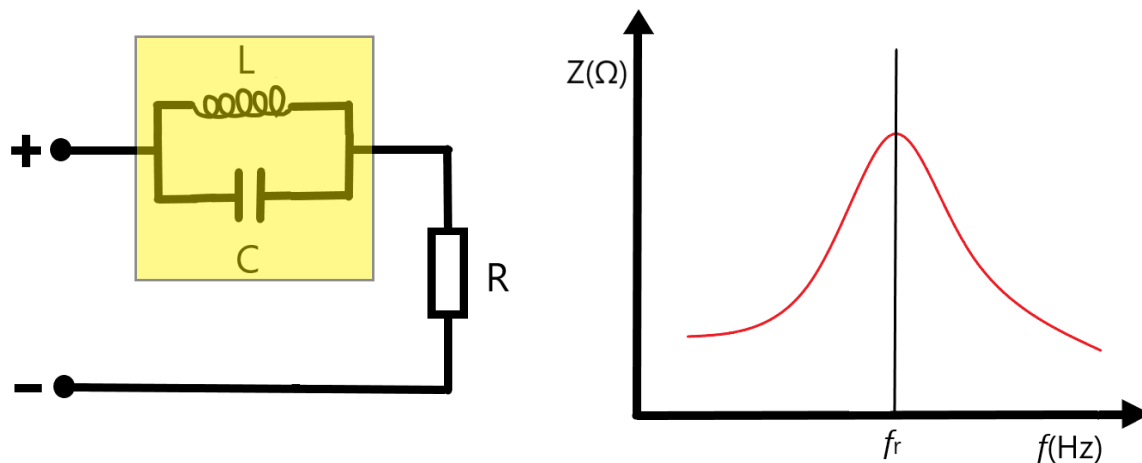


Figur 2.11. Dämpningsfilter/parallellfilter kretsbyggnad (vänster) med tillhörande resonanskurva (höger).

Blockerande filter placeras i seriekoppling med lasten och består av en induktans och kapacitans i parallellkoppling (se figur 2.12). Det blockerande filtret skapar en hög impedans för en specifik frekvens vilket eliminerar en specifik frekvens från att passera filtret. Detta kan också kompletteras med ett antal filter för att blockera flera olika frekvenser.

En nackdel med seriefilter är att den kan skapa höga övertonsspänningar för frekvensen som blockeras p.g.a. den höjda impedansen om strömtillförseln är konstant.

(Cobben 2016)



Figur 2.12. Blockeringsfilter/seriefilter kretsbyggnad (vänster) med tillhörande resonanskurva (höger).

2.5.3 Aktiva filter

Aktiva filter agerar dynamiskt genom att konstant inducera en inverterad signal, d.v.s. 180° fasvriden mot störningens signal. Efter en summation av dessa två signaler elimineras övertonerna så att endast grundfrekvensen kvarstår. Då dessa filter först måste räkna ut en inverterad signal av störningen så kommer den alltid arbeta lite bakom störningen i en tidsaspekt. Det finns några nackdelar med dessa filter. De är dyrare än passiva filter och inkluderar dessutom driftkostnader då dessa kräver kraftförsörjning för att fungera.

(Cobben 2016)

2.5.4 Faskompensering

Faskompensering av ett system med närvarande övertoner sker med samma principer som för ett system utan. Målet är att reducera reaktiv effekt för att få en så effektiv energitransport som möjligt. Skillnaden ligger i att ta hänsyn till THD_h och faskompensera efter den totala reaktiva effekten. Detta kan innebära att faskompenseringen inte sker helt i riktlinje med grundfrekvensens mest effektiva fasvridning, utan att fasvridningen ligger någorlunda ”snett” för att ta alla övertonernas fasvridning i beaktning.

(Cobben 2016)

3 MATERIAL OCH METOD

I mätningarna som genomförts har två olika mätinstrument använts för att upptäcka och analysera övertoner. Det första instrumentet är en ultraljudsmikrofon från företaget *Pettersson* (se ”1” i figur 3.1) som mäter ljudvågsfrekvenser med en bandbredd på 10–210 kHz. Med hjälp av mikrofonen avlyssnas frekvensen på vibrationerna i luften som kommer ifrån transformatorn. Sedan illustreras den insamlade data grafiskt i mikrofonens medkomna programvara ”batsound”.

Det andra mätinstrumentet är en elnätsanalysator från företaget *metrum* (se ”2” i figur 3.1). Den mäter diverse parametrar ur ett elkvalité perspektiv direkt på ledningen. Den samlar informationen genom strömtänger kopplade runt vardera fasledare inklusive neutralledaren. Elnätsanalysatorn är också inkopplad med spänning på minst en fas och jord för att använda som referens gentemot strömkurvorna. Ur elnätsanalysatorn kan sedan parametrar som

övertonernas ström- och spänningsamplitud, fasläge och frekvens avläsas via metrums programvara "PQ controller".



Figur 3.1. Petterssons ultraljudsmikrofon M500 (1) och metrums nätanalysator SPQfx (2).

3.1 Metod ultraljudmikrofon

Nätets frekvens definieras som antal sinusperioder per sekund. En sinusperiod består utav två strömgenomgångar vilket producerar vibrationer i form av ljud. Därför kan det med hjälp av formel 3.1 beräknas att en ljudfrekvens på 100 Hz motsvarar 50 Hz nätfrekvens i transformatorn, d.v.s. grundtonen.

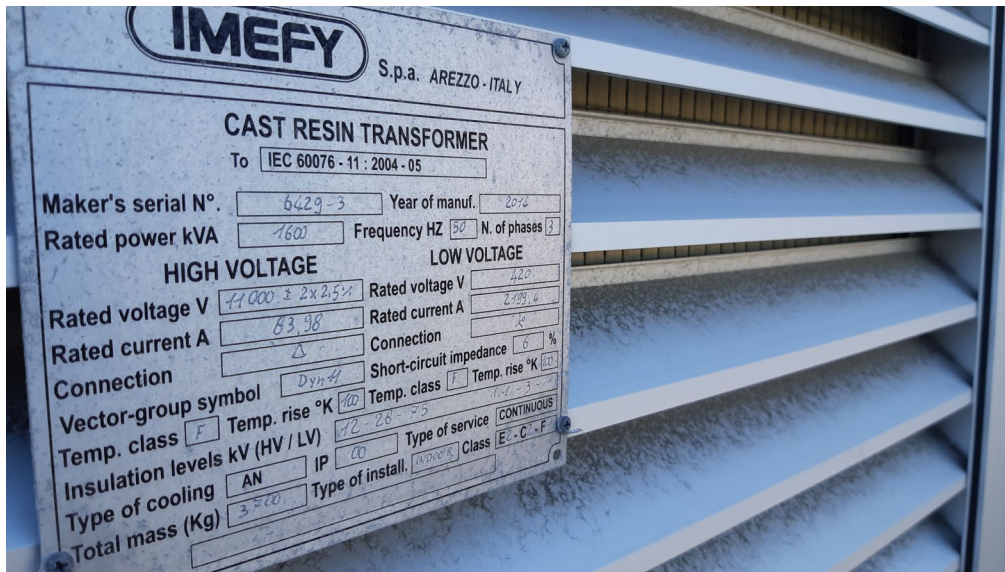
$$\frac{f_L}{2} = f \quad (3.1)$$

Där:

f_L = Ljudvågfrekvens

f = Nätverksfrekvensen i transformatorn.

Detta förhållande togs i beaktande vid mätningarna med ultraljudsmikrofonen. Två mätningar utfördes i 10 sekunder, ett utanför och ett innanför transformatorns skyddsdörr se figur 3.2 och figur 3.3. Detta för att jämföra och förhoppningsvis möjliggöra uteslutandet av ljud som inte tillhör transformatorns drift.



Figur 3.2. Bild utanför transformatorrummet av transformatorns plakett samt transformatorns skyddsörr i bakgrunden.



Figur 3.3. Bild på transformator T29 innanför skyddsörr.

Uppkoppling av ultraljudmikrofonen sker enkelt via en USB koppling till en dator. Utförandet av mätningen sker genom att rikta mikrofonen mot ljudkällan och trycka ”Starta inspelning” i programvaran Batsound. Under denna period är det till fördel att inte orsaka onödiga ljud som tal eller rörelse för att uppnå bästa oförorenat resultat. Efter inspelningen har stoppats analyseras resultatet i samma programvara. För att redovisa aktuella data bör grafen justeras genom att förstora och zooma in så att så låga ljud som möjligt åskådliggörs.

3.2 Metod nätanalysator

I första mätningen kopplas nätanalysatorn SPQfx in bakom en strömtransformator ansluten i ett ställverk matat på lågspänningssidan mellan transformator T18 och UPS (se röd markering i bil. 3). Uppkopplingen sker via fyra strömtänger kopplad på respektive fasledare samt neutralledaren, se figur 3.4. Mätningarna utfördes över de tre spänningsfaserna tillsammans med jord. Den andra mätningen utförs efter UPS och före transformator T19 (se blå markering i bil. 3). Uppkopplingen sker på samma vis som vid första mätningen. I den tredje mätningen sker uppkopplingen på ett liknande vis, skillnaden är att uppkopplingen görs i ett apparatskåp matat ifrån inkommande servis från stadsnätet. Mätningen utförs endast över en spänningsfas U_1 tillsammans med jord då de tre spänningsfaserna antas vara lika.



Figur 3.4. Uppkoppling av SPQfx genom strömtänger.

Nätanalysatorn kopplas in i datorns USB uttag via en RS-232 kabel och en RS-232 USB adapter. Därefter konfigureras rätt COM-port, bushastighet och diverse parametrar tillhörande svensk standard och aktuellt uppkopplingsformat i PQ-controller. Respektive mätning utförs över 30 min och därefter redovisas resultaten i form av grafer efter överföring till programmet PQ-viewer.

De relevanta mätningarna består av:

- Spänningarna U_1 , U_2 , U_3 och dess faslägen
- Fasströmmarna I_1 , I_2 , I_3 och dess faslägen
- Övertoners existens och amplitud
- Strömläckage till neutralledare I_4

3.3 Metoddiskussion

Ultraljudsmikrofonen valdes p.g.a. dess förmåga att uppmäta frekvenser i luften som härstammar ifrån transformatorns möjliga övertoner. Nätanalysatorns förmåga att avläsa relativa elkvalitets parametrar såsom övertoner lade grunden till valet av detta instrument.

Valet att använda ultraljudsmikrofonen och nätanalysatorn baserades på att ha en tvåfaldig bekräftelse av förekommande övertoner. Då två olika datainsamlingsmetoder ökar trovärdigheten i resultaten, ifall dessa överensstämmer.

Vid mätningar med ultraljudsmikrofonen M500 misstänks det en del brus ifrån omgivningen ingå i mätresultatet. Därför är det viktigt att ha i åtanke att se efter andra ljudkällor i omgivningen. Det kommer att vara nödvändigt att analysera resultatet och se efter signaler som kan uteslutas från att tillhöra transformatorn. Efter utförd riskanalys så kan det

konstateras att det kan ske flera olikartade mätfel/konfigurationsfel med elnätsanalysatorn. Exempel på dessa är omvända mätklämmor och felinställda konstanter i mjukvaran.

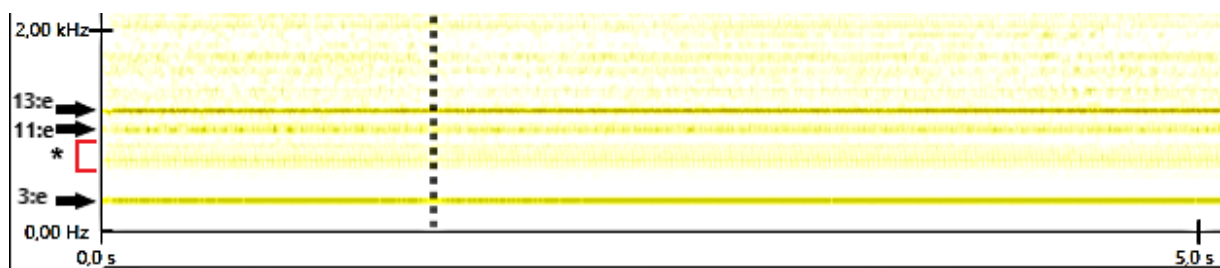
Nätanalysatorns strömtänger hade ett omfång på 600 V och 10 A. Detta omfång omöjliggjorde de planerade mätningarna på transformatorernas högspänningssida. Detta resulterade i ändring av den initiala planen att mäta både före och efter transformatorerna.

4 RESULTAT

I detta kapitel redovisas de framtagna resultaten från ultraljudsmikrofonen M500 tillsammans med elnätsanalysator SPQfx. De insamlade mätvärdena fastställer övertonernas amplituder och plats i frekvensspektrumet som framträder i transformatorerna T18 & T19. Detta presenteras tillsammans med en jämförelsedata från ett uttag direkt kopplat till det inkommande stadsnätet.

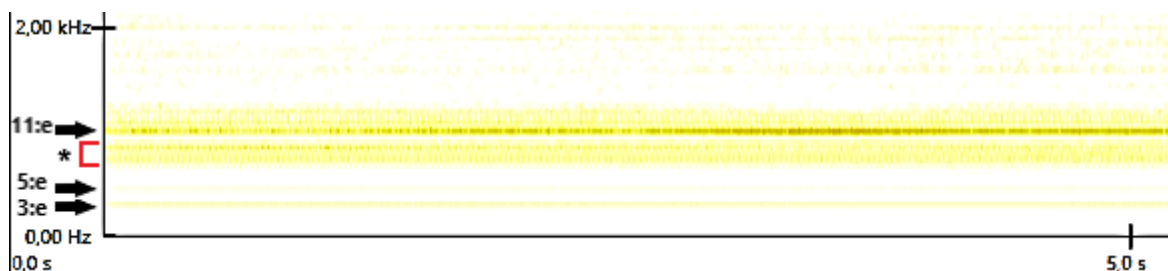
4.1 Ultraljudsmikrofon M500

Resultatdel ifrån mätningar utförda med hjälp av ultraljudsmikrofon M500.



Figur 4.1. Mätningar utförda ifrån utsidan av transformatorns skyddsörr.

Figur 4.1 visar förekomsten av 3:e, 11:e och 13:e övertonernas frekvens i luften. I figuren framgår även svaga utslag av frekvenser i området 7:e till 9:e övertonen, detta är markerat med * i figuren.



Figur 4.2. Mätningar utförda ifrån insidan av transformatorns skyddsörr.

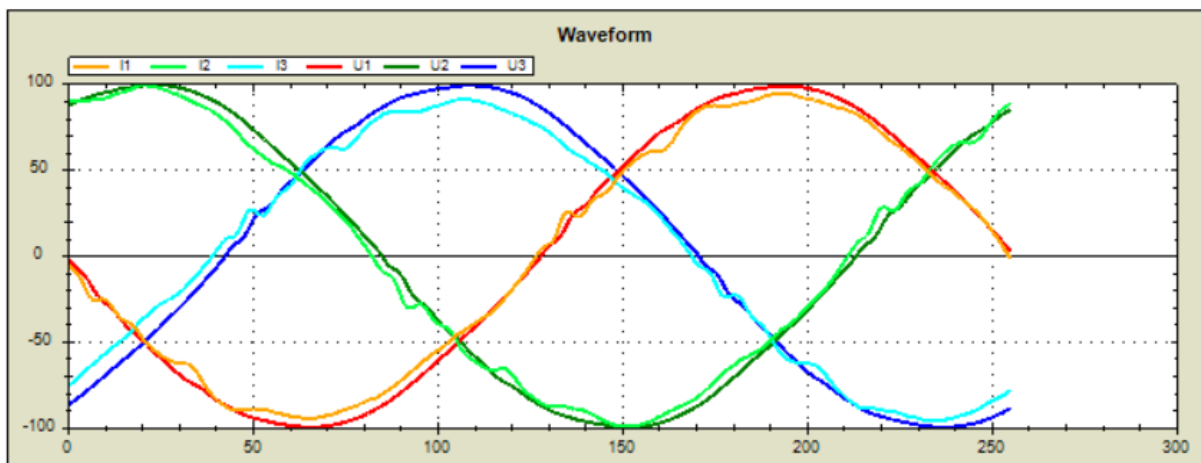
Figur 4.2 åskådliggörs det vibrationer i luften som tyder på förekomsten av 3:e, 5:e, 11:e övertonen. I figuren framgår även svaga utslag av frekvenser i området 7:e till 9:e övertonen, detta är markerat med * i figuren.

4.2 Nätanalysator SPQfx

Det utfördes mätningar på två separata elförsörjningsnät i AstraZeneca. Den första mätningen gjordes i en punkt mellan UPS och transformatorerna T19 & T29 som betjänar den avbrottsfria kraften. Här förväntades övertoner existera. Den andra mätningen gjordes i ett apparatskåp som betjänas av det ordinarie stadsnätet. Resultatet ifrån den andra mätningen gjordes i syfte för att ha en referens gentemot den första mätningen.

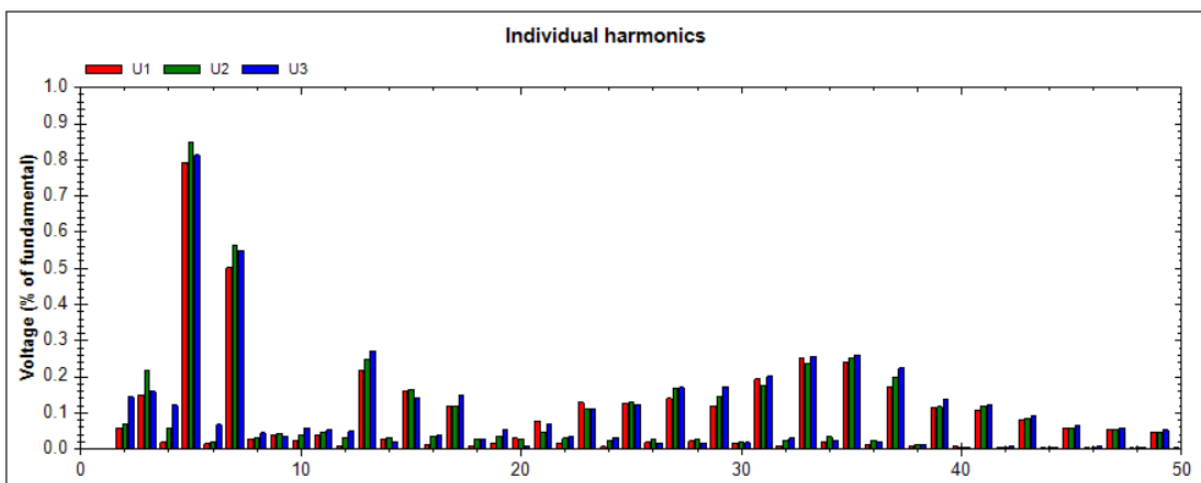
4.2.1 Mätning T18

Resultatet från mätningarna ifrån transformator T18s lågspänningssida presenteras här nedan.



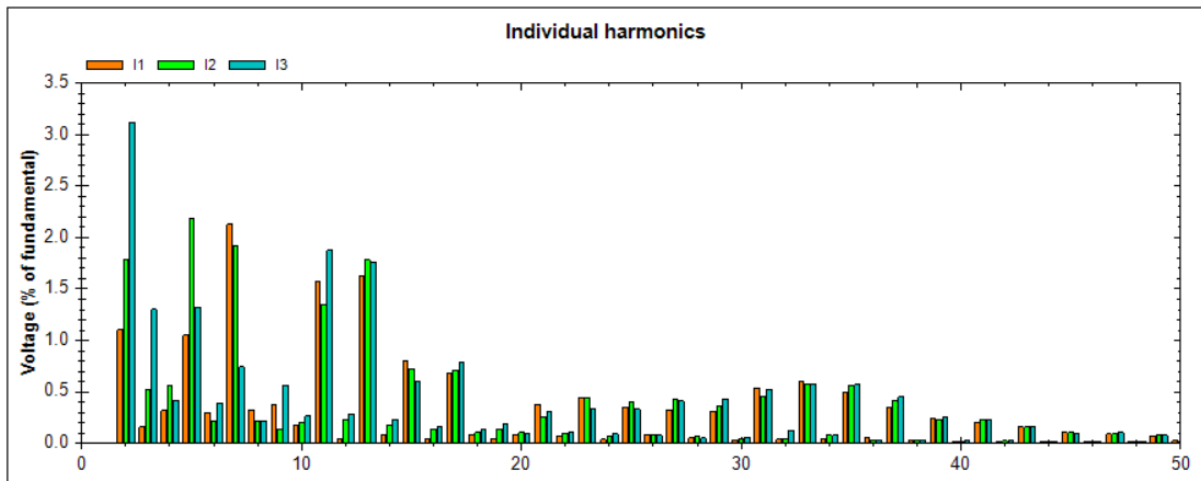
Figur 4.3. De tre fasernas spännings- samt strömvågform.

Figur 4.3 visar de tre fasernas vågform för spänning och dess respektive ström. En svag distorsion i strömmarna syns.



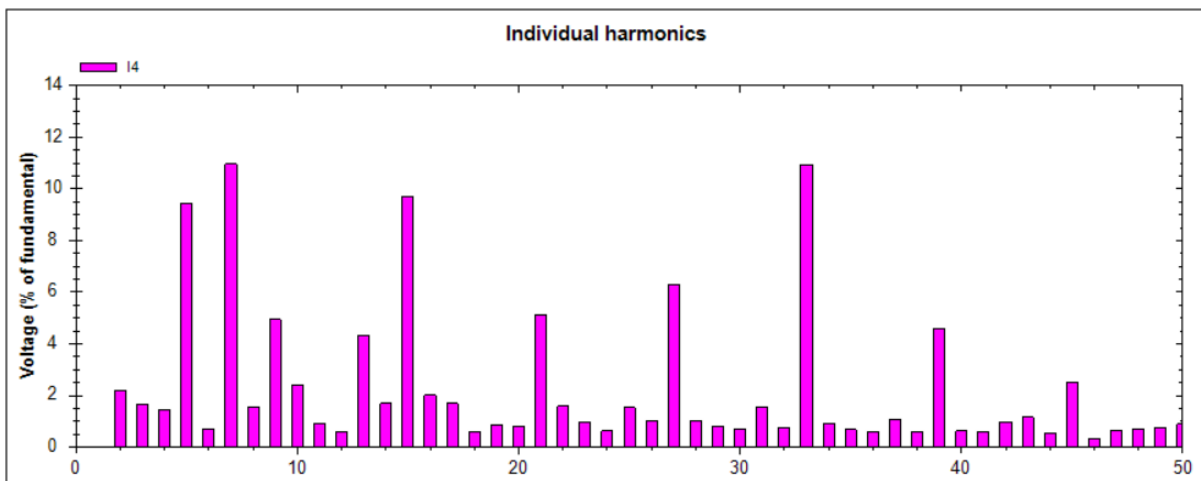
Figur 4.4. Spänningsövertoner på T18 i ett amplitud-frekvensspektrum i förhållande till grundtonen.

I figur 4.4 bör extra tillsyn ges till grafens y-axel som visar spänningsövertonernas amplitud, den största övertonen visar sig vara 5:e och 7:e. Dess värde uppmättes till ca 0,8 % av grundtonens amplitud.



Figur 4.5. Strömövertonerna före UPS på T18s tre faser i ett amplitud-frekvensspektrum i förhållande till grundtonen.

I figur 4.5 åskådliggörs existensen av 2:a (1,1 – 3,1 %), 5:e (1,0 – 2,2 %), 7:e (0,7 – 2,2 %), 11:e (1,4 – 1,9 %) och 13:e (1,6 – 1,8 %) övertonerna.



Figur 4.6. Strömövertonerna i T18s neutralledare, visat i ett frekvensspektrum.

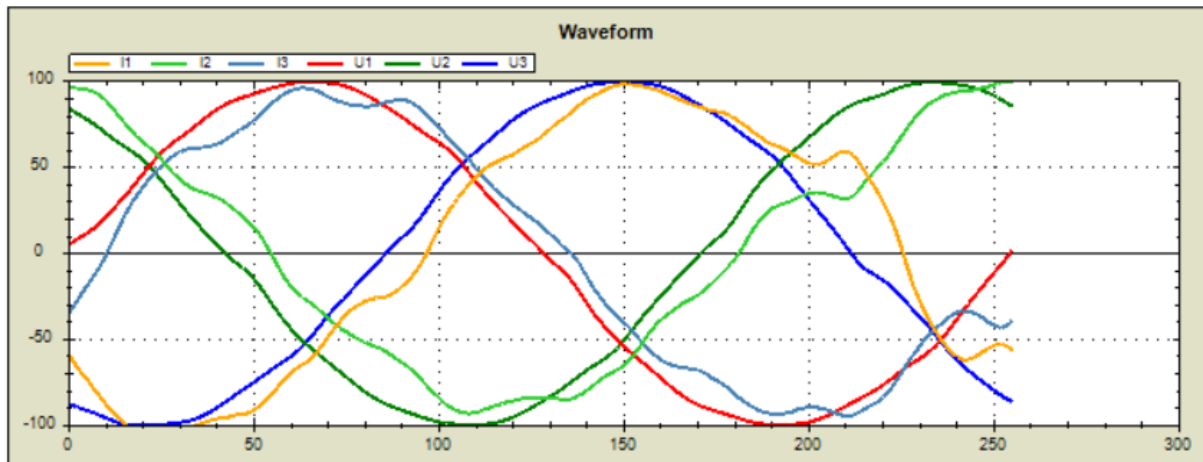
Figur 4.6 visar att det även förekommer övertoner i neutralledaren. Förutom 3:e övertonen kan udda tredjemultiplar av grundtonen påvisas i figuren.

	Voltage	Phase		Current	Phase	Power				
U1:	237.19	V 0.00	*	I1:	0.81	A 0.59	°	Active	0.57	kW
U2:	237.44	V -119.92	*	I2:	0.83	A -117.25	°	Reactive	-0.02	kVAr
U3:	237.49	V 119.80	*	I3:	0.78	A 123.34	°	Apparent	0.57	kVA
U4:	0.00	V NaN	*	I4:	0.02	A 151.27	°			

Figur 4.7. Momentanvärden för T18 efter strömtransformator.

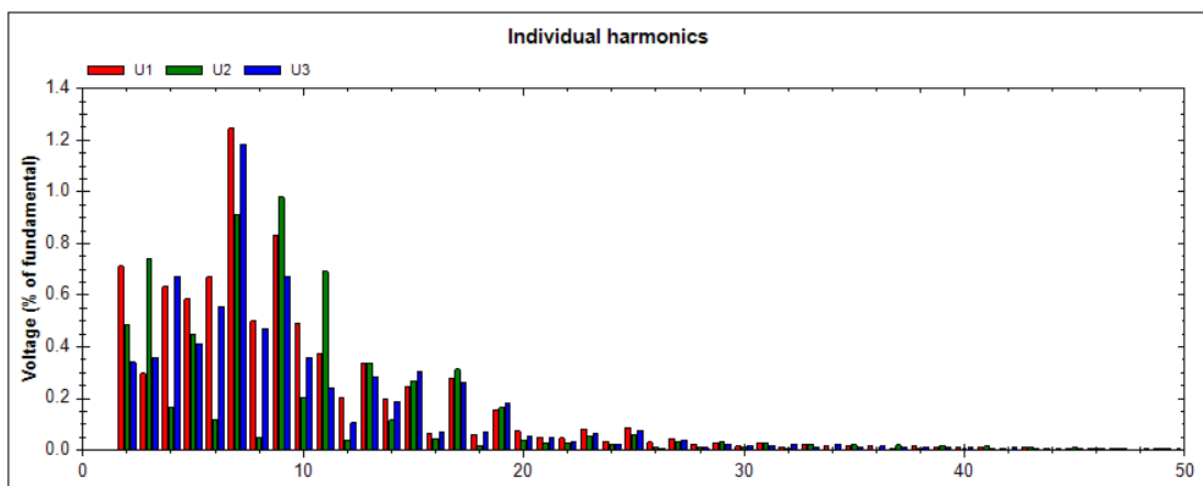
I figur 4.7 visas momentana mätvärden för de olika faserna. Notera att dessa mätningar sker i anslutning efter en strömtransformator med förhållandet 1:500, vilket betyder att strömamplituden är förminskad med faktorn 500.

4.2.2 Mätning T19



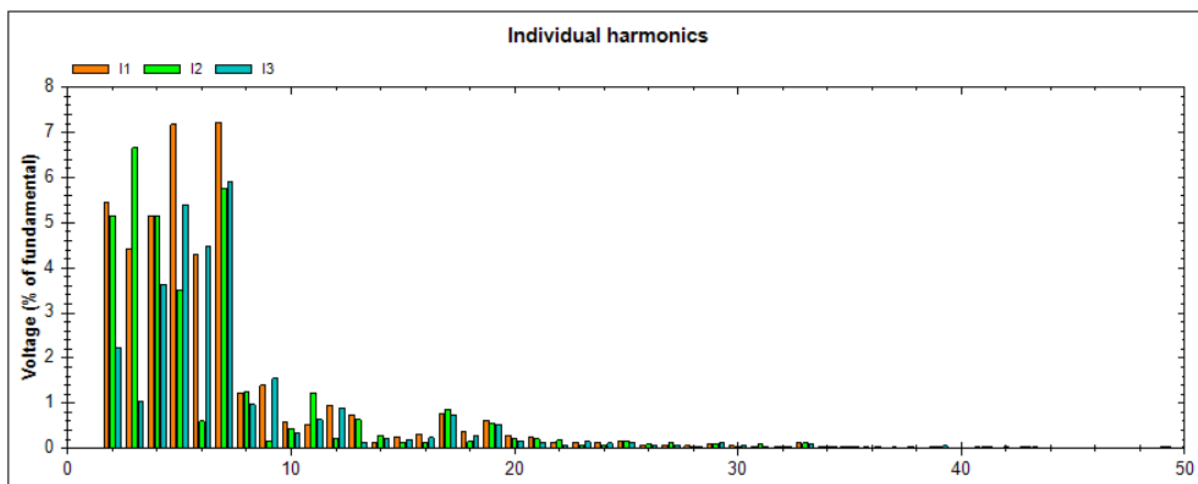
Figur 4.8. De tre fasernas spännings- samt strömvågform.

Figur 4.8 visar de tre fasernas vågform för spänning och dess respektive ström. Notera den kraftigare distorsionen på strömfaserna i jämförelse med figur 4.3.



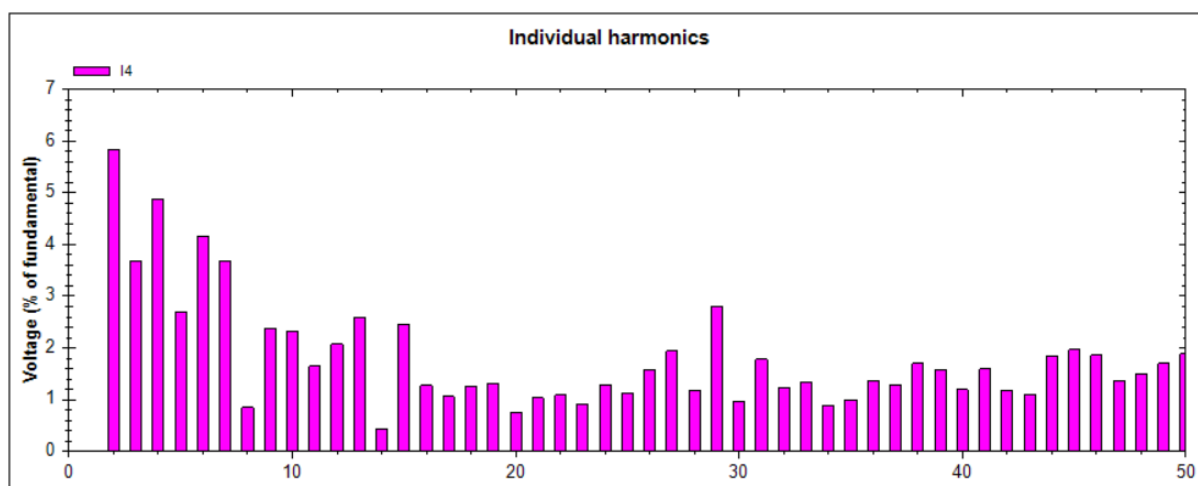
Figur 4.9. Spänningsövertoner på T19 i ett amplitud-frekvensspektrum i förhållande till grundtonen.

I figur 4.9 illustreras de uppmätta spänningsövertonerna efter UPS, i jämförelse med tabell 3 i kapitel 2.5.1 kan dessa övertoner anses vara inom riktlinjerna.



Figur 4.10. Strömövertonerna efter UPS på T19s tre faser i ett amplitud-frekvensspektrum i förhållande till grundtonen.

Figur 4.10 visar förekomsten av övertonerna 2:a till 7:e ordningen, med varierande skillnad i de enskilda fasernas amplitud.



Figur 4.11. Strömövertonerna i T19s neutralledare, visat i ett frekvensspektrum.

Figur 4.11 konstaterar att ingen enskild övertons amplitud överstiger 6 % av grundtonens amplitud som läckage till neutralledaren.

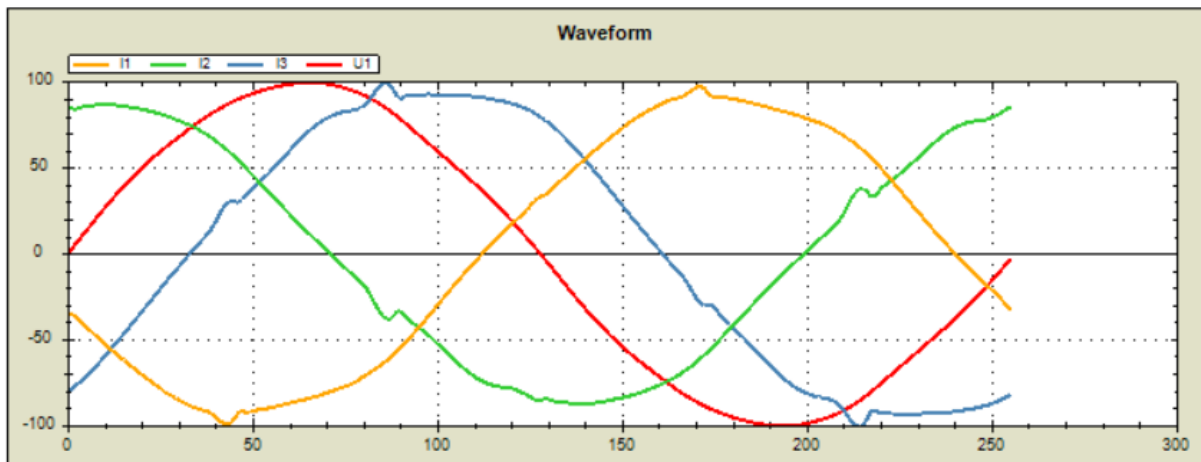
Voltage		Phase		Current		Phase		Power		
U1:	229.93	V	0.00	°	I1:	0.86	A	-133.58	°	Active -0.03 kW Reactive 0.02 kVAr Apparent 0.57 kVA
U2:	230.15	V	120.10	°	I2:	0.79	A	103.24	°	
U3:	230.95	V	-120.07	°	I3:	0.82	A	-9.23	°	
U4:	0.00	V	NaN	°	I4:	0.01	A	-28.76	°	

Figur 4.12. Momentanvärden för T19 efter strömtransformator.

I figur 4.12 visas momentana mätvärden för de olika faserna. Notera att dessa mätningar sker i anslutning efter en strömtransformator med förhållandet 1:500, vilket betyder att strömamplituden är förminskad med faktorn 500.

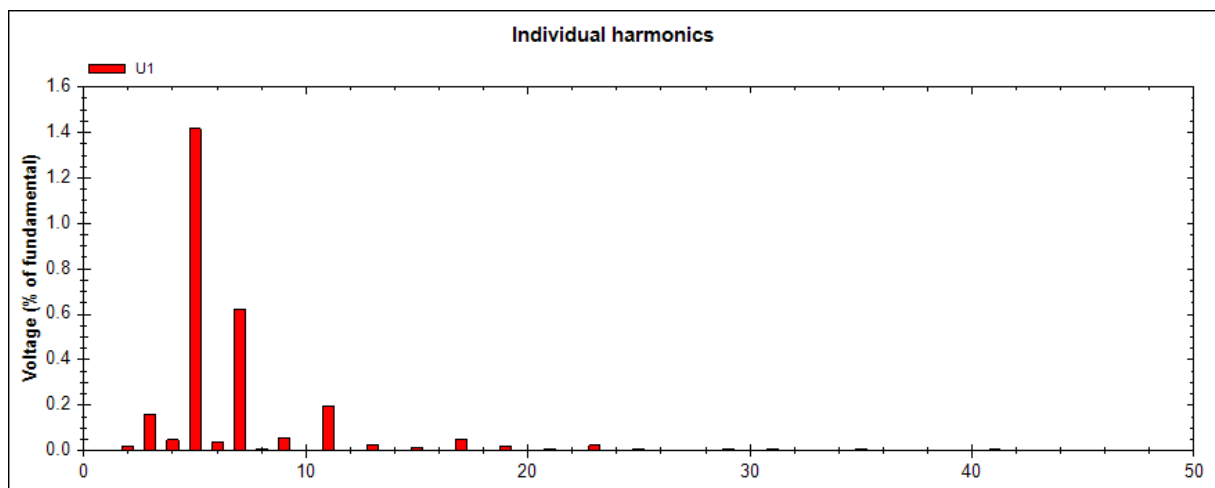
4.2.3 Referensmätning stadsnät

Resultatet av referensmätningen på det inkommande stadsnätet presenteras här nedan.



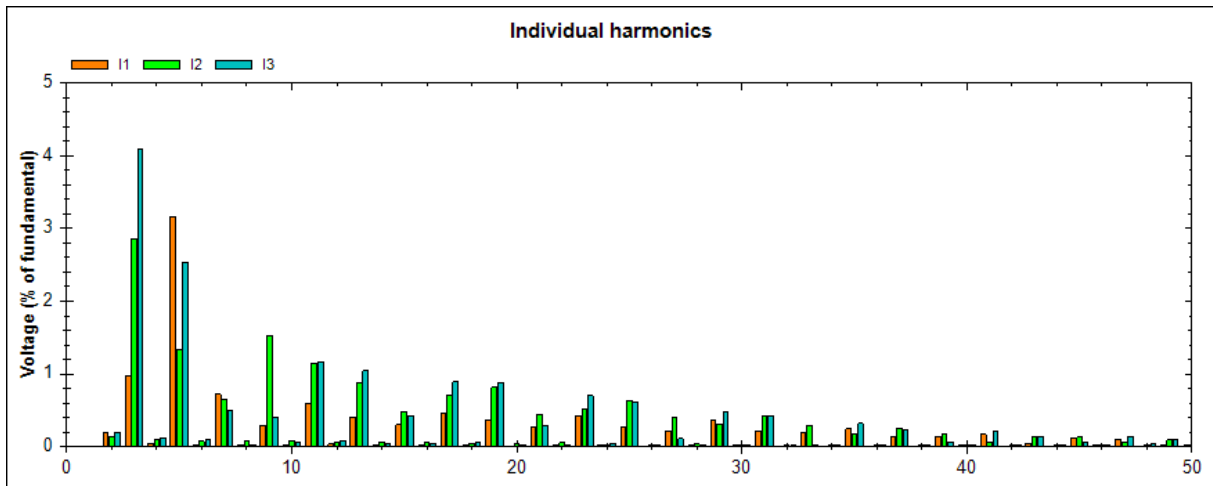
Figur 4.13. U_1 , I_1 , I_2 samt I_3 vågform.

Figur 4.13 visar de tre fasernas vågform i förhållande till spänningen U_1 . Vågformerna visar ingen större distorsion ifrån den ideella sinusvågformen. Men en mindre märkbar distorsion kan finnas bland de tre fasernas strömvågformer.



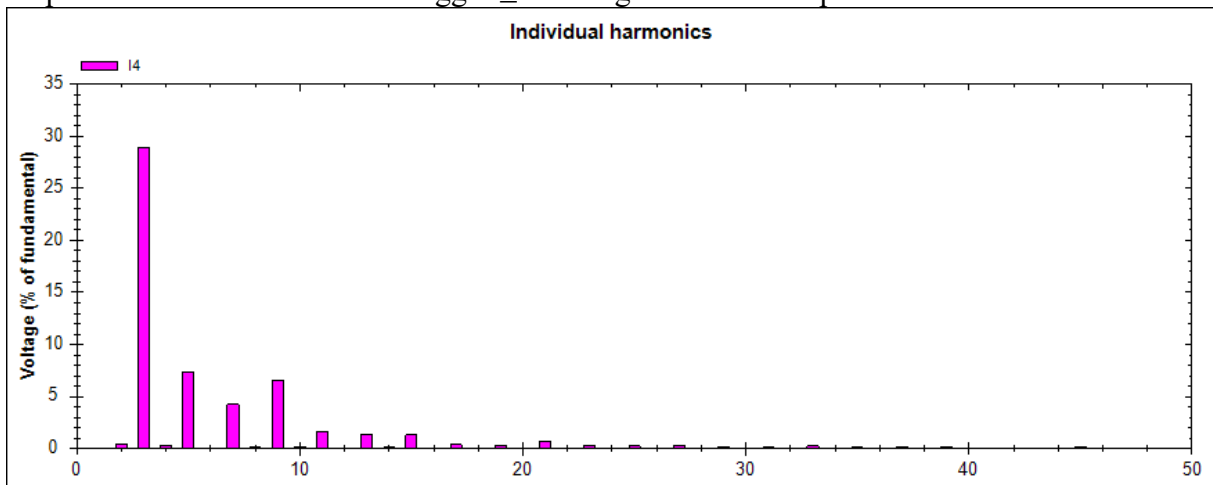
Figur 4.14. Spänningsövertoner på stadsnätet.

Figur 4.14 visar ytterst låga spänningsövertoner i förhållande till grundtonen, endast den 5:e övertonen överstiger 1 % av grundtonens amplitud.



Figur 4.15. Strömövertonerna på stadsnätets tre faser.

Figur 4.15 visar att 3:e övertonsströmmen uppgår till ca 4 % av grundtonen, 5:e övertonen uppgår till ca 3,1 %. 9:e, 11:e och 13:e övertonerna ligger strax över 1 % av grundtonens amplitud. Resterande övertoner ligger ≤ 1 % av grundtonens amplitud.



Figur 4.16. Strömövertonerna på den vita kraftens neutralledare.

Figur 4.16 visar att det förekommer övertoner även i neutralledaren.

	Voltage	Phase		Current	Phase		Power	
U1:	234.33	V 0.00	*	I1:	8.77	A -160.08	*	Active -1.93 kW
U2:	2.51	V 83.96	*	I2:	8.21	A 77.87	*	Reactive 0.70 kVAr
U3:	2.52	V 111.84	*	I3:	9.29	A -48.45	*	Apparent 2.10 kVA
U4:	0.00	V NaN	*	I4:	2.04	A 84.70	*	

Figur 4.17. Momentanvärden på stadsnätet.

I figur 4.17 redovisas en momentan mätning på U_1 , I_1 , I_2 , I_3 samt neutralledare I_4 . I figuren visas amplituden och fasläget för diverse spänningar, strömmar samt de sammanhörande effekterna. Notera att U_2 , U_3 och U_4 är falska värden då dessa ej varit inkopplade under mätningen.

5 DISKUSSION

I kapitel 5 diskuteras resultatet från de två mätmetoderna. Vi går också igenom härkomsten, specifika konsekvenser och lösningar till problematiken.

5.1 M500

Precis som vi misstänkte så spelade ultraljudsmikrofonen förmodligen in brus från omgivningen vid mätningen. Både i figur 4.1 och 4.2 syns breda oskarpa frekvensband som är svåra att ange som någon specifik överton då dessa breder sig över flera frekvenser.

Ultraljudsmikrofonen M500 är marknadsförd att arbeta inom frekvensbandet 10 - 210 kHz. Våra mätningar skedde i frekvensområdet 100 – 2000 Hz vilket är utanför instrumentets dedikerade bandbredd. Detta tillsammans med programvarans bristande upplösning vid låga frekvenser gör resultatet svårtolkat med en ingiven osäkerhet i mätdata.

Vi lyckades utläsa några specifika övertoner med hjälp av ultraljudsmikrofonen. Dock skiljde resultatet sig något vid mätningarna på utsidan respektive insidan av transformatorns skyddsörr. Båda mätningarna identifierade tre övertoner. Två av de tre övertonerna överensstämde i de båda mätningarna, dessa var 3:e och 11:e. Det intressanta visade sig vara förekomsten av en tydlig 13:e överton vid mätningen utanför skyddsörren som inte var närvarande på insidan. Detta kan vi endast spekulera i att ha att göra med mekaniska krafter i örren i form av vibrationer. I mätningen på insidan utan förhinder fanns en svag men än skarp 5:e överton. Vi gör antagandet att dess svaga utslag gör det omöjligt att uppfatta frekvensen på utsidan. Vad som också kan tilläggas som underligt är frånvaron av en grundton i resultatet. Vi spekulerar att ultraljudsmikrofonen helt saknar förmågan att uppmäta frekvenser i luften under 300 Hz som 3:e övertonen visar.

Vid jämförelse av våra mätresultat från de två olika instrumenten upptäcktes att ultraljudsmikrofonen endast kunde upptäcka ett svagt brus i frekvensområdet runt 5:e och 7:e övertonerna till skillnad från vad nätanalysatorn påvisade. Frånvaron av kraftiga 5:e och 7:e övertonen får oss att ifrågasätta om vi lyssnade på rätt ljudkälla då dessa övertoner borde ge kraftiga utslag med HD-värde på 49 - 78 % alternativt om mätinstrumentet är inkapabelt till att upptäcka dessa.

5.2 SPQfx

Vid analys av figur 4.3 och 4.8 så syns det att spänningens vågform både före och efter UPS erhåller en likartad sinusvågform som referensmätningen i figur 4.13. Alltså är spänningsvågformerna både före och efter UPS rena från excessiva övertoner. Vilket är förvånande i resultatet efter UPS-anläggningen då både batteriet som borde skapa ett högfrekvent hackande tillsammans med växelriktaren. Två anledningar skulle kunna existera som förklarar den övertonsfria spänning svågen. Antingen finns inbyggda filter på plats eller så är elnätanalysatorns sampling-frekvens lägre än upphackningsfrekvensen.

Strömvågformerna för de tre faserna i figur 4.3 visar en svagare distorsion i kontrast med strömmarna i figur 4.8, där dessa är av något kraftigare natur vilket kan härledas till

växelriktaren efter UPS:en. Båda dessa strömfasgrupper visar annorlunda värden som kraftigt avviker ifrån referensmätningen.

Vid analys av figur 4.5 framgår förekomsten av 5:e, 7:e, 11:e och 13:e övertonerna, vilket är ett praktexemplar på en 6-pulsbrygga. Eftersom endast strömmarna påvisar övertoner kan det antas att källan till elkvalité problematiken inte kommer ifrån transformators högspänningssida eftersom då hade vi även sett lika kraftig distorsion på spänningens vågform. Alltså tror vi att problematiken härstammar från andra hållet på ledningen där vi finner vår UPS-anläggning. I denna anläggning är den första komponenten en likriktare vilket tros vara källan som alstrar dessa strömövertoner. Figur 4.5 visar även en anmärkningsvärd halt av 2:a övertonen, eftersom detta är en jämn överton kan det med hjälp av kapitel 2.2.4 konstateras att denna signal inte uppvisar halvvågssymmetri. Vi tror detta härstammar utav likriktarens interventioner med sinusvågen men kan ej säga detta med säkerhet.

Figur 4.10 visar förekomsten av både jämna och udda strömövertoner upp till 7:e ordningen. Detta tros vara kombinationen av växelriktare matad av en UPS, eftersom UPS:ens batteri endast kan befinna sig i två lägen (av och på) betyder detta att likspänningen innan växelriktaren är en fyrkantsvåg med hög frekvens. Detta tillsammans med PWM-teknik i växelriktaren tros orsaka att signalen frångår halvvågssymmetri. Att övertonerna av högre ordning än 7:e avtar så pass mycket har vi inte kunnat fastställa orsaken till.

Figur 4.6 påvisar tredjetonsfenomen samt läckage av de starkaste övertonerna ifrån ledningen, tillsammans kan dessa anses vara en avsevärd energiförlust. Om inte detta tagits i beaktande vid projektering så kan överbelastning av neutralledaren ske. Neutralledaren efter UPS visar mindre effektförlust vilket kan ses i figur 4.11.

6 SLUTSATS

I tabell 6.1 redovisas mätresultaten för strömövertoner vid mätpunkten före UPS och efter transformator T18.

Tabell 6.1. Uppmätta övertoner i anslutning till transformator T18.

Övertton	2:a	5:e	7:e	11:e	13:e
HD [%]	1,1 – 3,1	1,0 – 2,2	0,7 – 2,2	1,4 – 1,9	1,6 – 1,8

Dessa övertoner uppstår av 6-pulslikriktaren i samband med UPS. Beviset för detta är den förvrängda strömmen ihop med en nära ideal spänning som är densamma som för referensmätningen ifrån stadsnätet. Dessa två faktorer signalerar att källan till övertonerna inte härstammar bortom transformator T18 då även spänningen hade varit förvrängd i det fallet. Övertonerna stämmer också överens med en 6-pulsbrygga enligt formel (2.2.5). Därför kan dessa övertonernas härkomst antydast till att härstamma ifrån likriktaren i koppling till UPS-batteriet. Den största övertonen konstateras vara den 2:a övertonen vars ursprung är okänt.

I tabell 6.2 redovisas mätresultaten för strömövertoner vid mätpunkten efter UPS och före transformator T19.

Tabell 6.2. Uppmätta övertoner i anslutning till transformator T19.

Övertton	2:a	3:e	4:e	5:e	6:e	7:e
HD[%]	2,2 – 5,5	1,0 – 6,7	3,6 – 5,1	3,5 – 7,2	0,6 – 4,5	5,3 – 7,3

Dessa övertoner anses troligen härstamma ifrån kombinationen av växelriktare matad av en UPS, eftersom UPS:ens batteri endast kan befinna sig i två lägen (av och på) betyder detta att likspänningen innan växelriktaren är en fyrkantsvåg med hög frekvens. Detta tillsammans med PWM-teknik i växelriktaren orsakar att signalen frångår halvvågssymmetri och bildar jämna övertoner.

Tabell 6.3. Övertonskaraktäristik för T18 värden.

Minusföljd:	2:a	5:e	11:e
Plusföljd:	7:e	13:e	

Tabell 6.4. Övertonskaraktäristik för T19 värden.

Minusföljd:	2:a	5:e
Plusföljd:	4:e	7:e
Nollföljd:	3:e	6:e

Karaktäristiken ifrån övertonerna i tabell 6.3 och 6.4 leder till konsekvenserna:

- Minusföljd som arbetar emot grundtonens rotation.
- Plusföljd som arbetar med grundtonens rotation.

Dessa två fenomen kommer att arbeta emot varandra och skapar en förhöjd värmeutveckling och elektromagnetisk påfrestning. Detta resulterar i en försämrad livslängd för utsatta komponenter såsom elmotorer och transformatorer.

Tillsammans med de andra funna övertonerna kan följande konsekvenser förekomma, se tabell 6.4.

Tabell 6.4. Konsekvenser.

Konsekvenser	T18	T19
Tredjetonsfenomen i delta-koppling	Ja	Nej
Tredjetonsfenomen i neutralledaren	Ja	Nej
Ökat effektuttag	Minimal	Ja
Nedsatt maxkapacitet	Minimal	Ja
Ökad värmeutveckling	Delvis	Ja
Förkortad livslängd	Delvis	Ja

Följande lösningar kan reducera konsekvenserna för transformator T18 ifrån tabell 6.4:

- Utbyte av 6-pulslikriktaren mot en 12-pulslikriktare skulle eliminera 5:e och 7:e övertonerna enligt formel 2.2.5.
- Installation av dämpningsfilter riktade emot 2:a 5:e, 7:e, 11:e och 13:e övertonernas frekvenser, då dessa är de kraftigaste övertonerna i systemet. Att leda dessa ner mot jord förlänger livslängden för transformatorn men minskar inte effektuttaget.
- Installation av ett aktivt filter i systemet, detta skulle minimera samtliga övertoner till tillfredsställande nivåer, dock är detta en mycket kostsam lösning i jämförelse med de två tidigare lösningarna.

Det kan dock konstateras att övertonerna i samband med transformator T18 inte överstiger några märkvärdiga nivåer och det är förmodligen ej lönsamt att reducera effekten av dessa.

Följande lösningar kan reducera påverkan av övertoner i samband med transformator T19 ifrån tabell 6.4:

- Installation av dämpningsfilter riktade emot 2:a, 3:e, 4:e, 5:e, 6:e och 7:e övertonernas frekvenser, då dessa är de kraftigaste övertonerna i systemet. Att leda dessa ner mot jord förlänger livslängden för transformatorn men minskar inte effektuttaget.
- Installation av ett aktivt filter i systemet, detta skulle minimera samtliga övertoner till tillfredsställande nivåer, dock är detta en mycket kostsam lösning i jämförelse med den tidigare lösningen.

Vid anslutningspunkten mellan UPS och T19 bör övertons reducering milt övervägas då dess effekter kan bidra till förminskad livslängd på komponenter i anslutning.

Framtiden

Det vore av intresse att utföra fler mätningar i en punkt efter transformering av spänningen för att se ifall övertonerna förändrar spänningens vågform. Nästa naturliga handling borde vara att utföra en kostnads kalkyl där de olika alternativen jämförs emot följderna av att inte åtgärda övertonerna.

REFERENSER

Alfredsson, A. & Jacobsson, K.A. (2016) *Elkraftshandboken. Elmaskiner och elektriska drivsystem*. 3. Uppl., Stockholm: Liber AB.

Alfredsson, A. & Mårtensson, L. (2011). *Elteknik*. 4. uppl., Stockholm: Liber AB.

Arrillaga, J. & Watson N.R. (2003). *Power systems harmonics*. 2. uppl., Chichester, Storbritannien: John Wiley & sons Ltd.

Bergström, L. Nordlund, L. (2012). *Ellära krets- och fältteori*. 3. uppl., Stockholm: Repro 8 AB.

Chetvorno (2015). *Laminated core, eddy currents.svg*.
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Laminated_core_eddy_currents.svg[2020-05-07]

C J Cowie (2005). *PWM VFD Diagram*.
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:PWM_VFD_Diagram.png [2020-05-18]
Tillhörande licens: <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/deed.en>

C J Cowie (2006). *12-pulse inverter cjc.svg*.
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:12-pulse_inverter_cjc.svg [2020-05-18]
Tillhörande licens: <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/deed.en>

Prof. dr. ir. Cobben, J.F.G. (2016). *Power quality – About the problems and solutions*. Arnhem, The Netherlands: CO-Education.

Hart, D.W. (2011). *Power electronics*. New York, USA: McGraw-Hill Education.

Lindberg, M (2016). *Elkvalitet och störningar i samband med laddning av kommunens elbussar på laddningsplatserna Röbbäck och Carlshöjd*. Masteruppsats, Civilingenjör-energiteknik. Umeå: Umeå Universitet. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:932580/FULLTEXT01.pdf>

Schairer, K. (2017) *Intro to the Flywheel UPS: Powered by Motion*
<https://www.qpsolutions.net/2017/06/intro-to-the-flywheel-ups-powered-by-motion/>
[2020-04-23]

SS EN 50160:2010. *Spänningens egenskapen i elnät för allmän distribution*. Stockholm: SEK Svensk Elstandard.

Svjo (2015). *Trefaskoppling, D-koppling*. <https://sv.m.wikipedia.org/wiki/Fil:3fas-d-koppling.png> [2020-05-11]
Tillhörande licens: <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.sv>

Westlund, L. (2007). *Elmiljö i praktiken*. Malmö: Gleerups Utbildning AB.

Young, H.D. (2012). *Sears and Zemansky's university physics, with modern physics*. 13. uppl., San Francisco, USA: Pearson Education, Inc.

Transformator testprotokoll del 1

Bilaga 1(2)



IMEFY spa
Zona Ind.le Rigutino Ovest, 259
52100 - Arezzo - Italia
PI / CF 01514050515 - CCIAA 110372 - Cap. Soc. € 500.000 I.v.
Tel. +39 0575 680701 - Fax +39 0575 657855
www.imefy.it



Certified : CESI E3-E2-C2-F1 - ISO 9001 - ISO 14001

N° C2012-01192

CAST RESIN TRANSFORMER - TEST REPORT

Registration N°	6429-2	Year of making	2014	Test perform according with	IEC 60076-11
-----------------	--------	----------------	------	-----------------------------	--------------

STANDARD SETTINGS

Cooling AN	Vector Group Dyn11	Frequency 50 Hz	Insulating class HV.-LV. F - F	Temperature rise (°K) HV.-LV.-Core 100 - 100 - 100	Conductor HV.-LV. AL - AL	Environmental, climatic and fire behaviour class E2 - C2 - F1
Winding	Power (KVA)	Voltage (V)	Regulation	Current (A)	Connection	Insulation level (KV)
High voltage Primary	1.600	11.000	± 2 X 2,5 %	83,98	Delta	12 - 28 - 75
Low voltage Secondary		420		2199,4		

TECHNICAL WARRANTY

Referred to ratio	11.000/420	V1/V2	Temperature of reference 120 °C		
Guarantee	6	Short-circuit impedance (%)	Load loss (W)	No-load loss (W)	Total losses (W)
Result	6,519		11.700	1.900	13.600
Variation	8,65%		12.424	2.034	14.458
Tolerance	±10%		6,18%	7,05%	8,31%
			+15%	+15%	+10%
					No-load current (%)
					0,7
					0,200
					-71,48%
					+30%

NO-LOAD TEST

Voltage	I _L (A)	I _V (A)	I _W (A)	I ₀ (A)	I ₀ (%)	No-load loss (W)
Low voltage = 420 V	4,639	3,984	4,550	4,391	0,200	2,034

INSULATION TESTS

Separate-source AC withstand voltage test (50Hz)		Induced AC withstand voltage test	
High voltage	28 KV for 60 seconds	Frequency	100 Hz
Low voltage	3 KV for 60 seconds	Low voltage	840 V for 60 seconds

SHORT-CIRCUIT TEST

Referred to ratio	Testing voltage (V)	Testing current (A)	Testing power (W)	K current	Voltage (U _{sc}) (V)	Power (P _{sc}) (W)
11.000/420	715,17	83,983	9.788,5	1,000	715	9.767

MEASUREMENT OF WINDING RESISTANCE

High voltage (V)	U-V (Ω)	V-W (Ω)	W-U (Ω)	Testing temperature (°C)	Low voltage (V)	U-V (Ω)	V-W (Ω)	W-U (Ω)
11.000	0,3909	0,3848	0,3899	19	420	0,0005063	0,0005059	0,0005153

MEASUREMENT OF VOLTAGE RATIO

Rated ratio	11.000/420		V1/V2	Tolerance ± 0,5 %	U		V		W	
	Voltages				Measure	Δ%	Measure	Δ%	Measure	Δ%
Tapping range	High voltage	Low voltage	Ratio							
+++										
++	5%	11.550	420	47,63	47,547	-0,177%	47,548	-0,175%	47,548	-0,175%
+	2,5%	11.275	420	46,50	46,415	-0,177%	46,416	-0,175%	46,415	-0,177%
0	0	11.000	420	45,36	45,282	-0,179%	45,283	-0,177%	45,283	-0,177%
-	2,5%	10.725	420	44,23	44,150	-0,179%	44,151	-0,177%	44,150	-0,179%
--	5%	10.450	420	43,10	43,018	-0,179%	43,018	-0,179%	43,018	-0,179%

CALCULATION OF LOAD LOSS AND SHORT-CIRCUIT IMPEDANCE

Temperature (°C)	19		120	
K temperature	(H.V.) AL	1,414	(L.V.) AL	1,414
H.V. loss (W)		4.110		5.812
L.V. loss (W)		3.695		5.224
Additional loss (W)		1.963		1.388
Load loss (W)		9.767		12.424
ΔV _{resistance} (%)		0,610		0,778
ΔV _{resistance} (%)		6,472		6,472
Short-circuit impedance (%)		6,501		6,519

- Dimensional test:
- The results of all the tests are:
- Tolerances according with norma:
- Note:

Positive
Positive
IEC 60076-1
WITH THERMOMETER

Date 25/02/2014

Inspector

IMEFY
IMEFY SpA
I.L. Rigutino Ovest, 259
52100 - Arezzo - Italia
CF / PI 01514050515

Transformator testprotokoll del 2

Bilaga 2(2)



IMEFY spa
Zona Ind.le Rigutino Ovest, 259
52100 - Arezzo - Italia
PI / CF 01514050515 - CCIAA 110372 - Cap. Soc. € 500.000 i.v.
Tel. +39 0575 680701 - Fax +39 0575 667856
www.imefy.it



Certified : CEI E3-E2-C2-F1 - ISO 9001 - ISO 14001

CAST RESIN TRANSFORMER - TEST REPORT

Registration N°	6429-2	Year of making	2014	Test perform according with	IEC 60076-11
-----------------	--------	----------------	------	-----------------------------	--------------

PARTIAL DISCHARGES MEASUREMENT

MODE TEST			
Stress voltage 1,8 Vn		Measuring voltage 1,3 Vn	
Low Voltage	756 V for 30 seconds at frequency of 200 Hz	Low Voltage	546 V for 3 minutes at frequency of 200 Hz

ELECTRICAL OUTLINE

MEASURED VALUES			
Guarantee ≤ 10 pC @ 1,3 Vn	U	V	W
Result (pC)	<10	<10	<10

EFFICIENCIES

COS ϕ	LOAD	100%	75%	50%	25%
1		99,10%	99,25%	99,36%	99,30%
0,95		99,06%	99,21%	99,32%	99,26%
0,9		99,01%	99,16%	99,29%	99,22%
0,8		98,89%	99,06%	99,20%	99,12%

VOLTAGE DROPS

COS ϕ	LOAD	100%	75%	50%	25%
1		0,78%	0,56%	0,39%	0,19%
0,95		2,76%	2,07%	1,38%	0,69%
0,9		3,52%	2,64%	1,76%	0,88%
0,8		4,50%	3,38%	2,25%	1,13%

USED INSTRUMENTATION FOR THE TEST

N° reg	MARK	MODEL	SERIAL N°	DESCRIPTION
003	LEM NORMA	NORMA 4005 PPS4	SD85187BA	POWER ANALYZER
006	RISATTI	E2IA	94964	RIGIDIMETER
007	PRESKO AG	PD-4 PD-1MP-0201	100738 100675	MEASURE INSTRUMENT COUPLING DEVICE
008	PRESKO AG	CC-001N-0501	100737	CAPACITOR
009	PRESKO AG	AG/PO-CLSB-CD00	100721	CALIBRATOR
012	NUOVA SACCARDO	NC132 150/22	10 02	FREQUENCY CONVERTER AT 100 Hz
013	NUOVA SACCARDO	ASC 225 16H 091	10216	FREQUENCY CONVERTER AT 200 Hz
014	TRASFORMATORI S.B.C		1514IA	VOLTAGE VARIATOR
015	TRASFORMATORI S.B.C		1006	VOLTAGE VARIATOR
016	IMEFY s.p.a.		0103	ADAPTER TRANSFORMER
018	IMEFY s.p.a.		0101	ADAPTER TRANSFORMER
019	TRASFORMATORI S.B.C		1514D	ELEVATOR
045	DV-POWER	RMO50T	29Q585	WINDING OHMMETER
046	DV-POWER	TRT30A	29X583	TURNS RATIO TESTER

Date: 25/02/2014

Inspector:

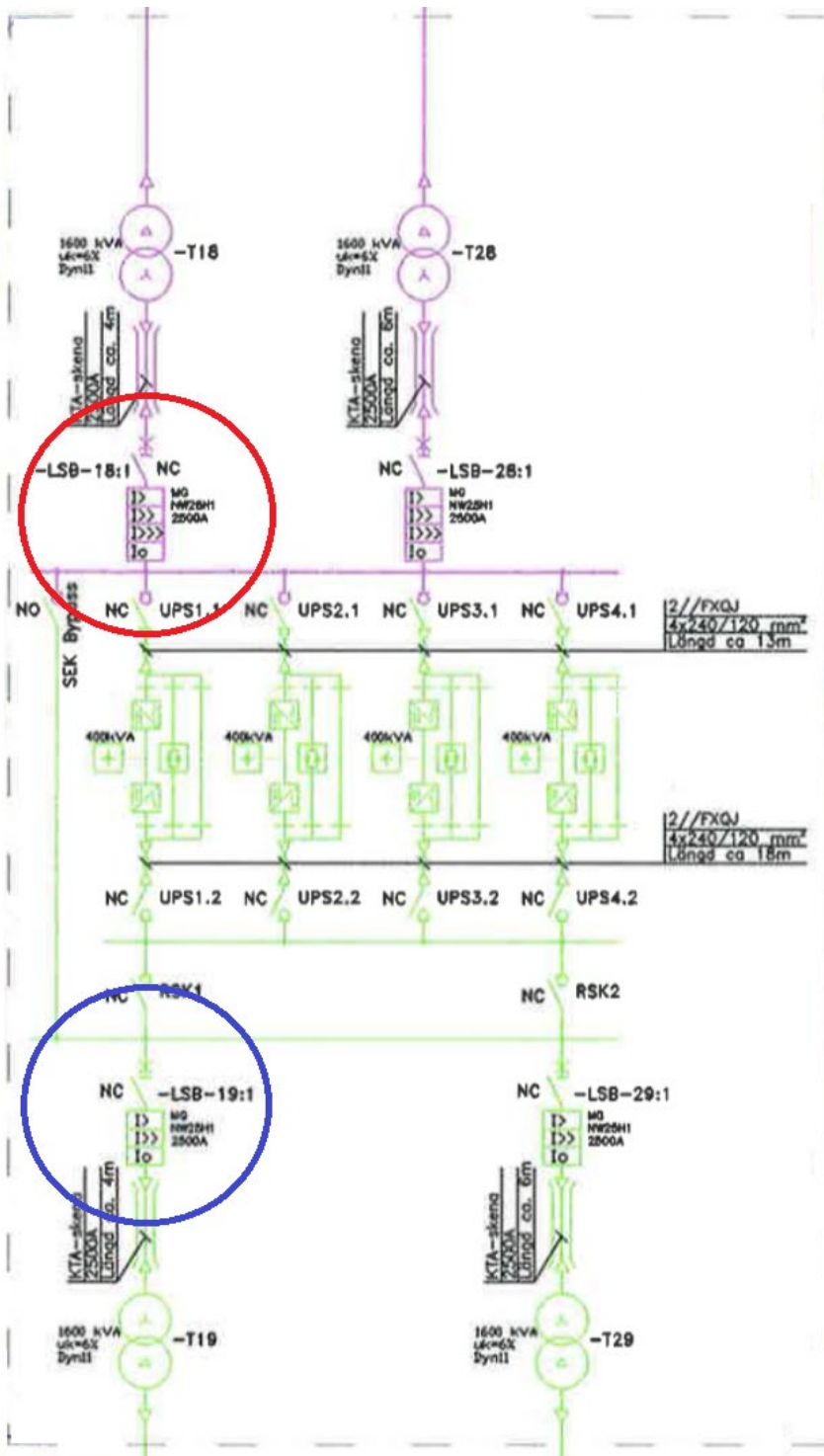
doc. n° 1084rev3

IMEFY
IMEFY SpA
Zona Ind.le Rigutino Ovest, 259
52100 - Arezzo - Italia
CF / PI 01514050515

pag. 3/2

Krettschema UPS anläggning

Bilaga 3





HÖGSKOLAN I BORÅS

Besöksadress: Allégatan 1 · Postadress: 501 90 Borås · Tfn: 033-435 40 00 · E-post: registrator@hb.se · Webb: www.hb.se