

Drivsystem med låg övertonshalt

- baserat på aktiva filter



Al Hassan Rhazi
Joel Borg

Division of Industrial Electrical Engineering and Automation
Faculty of Engineering, Lund University

Drivsystem med låg övertonshalt

- baserat på aktiva filter



**LUNDS
UNIVERSITET**

Lunds Tekniska Högskola

**LTH Ingenjörshögskolan vid Campus Helsingborg
Industriell Elektroteknik och Automation**

Examensarbete:
Al Hassan Rhazi
Joel Borg

© Copyright Al Hassan Rhazi, Joel Borg

LTH Ingenjörshögskolan vid Campus Helsingborg
Lunds universitet
Box 882
251 08 Helsingborg

LTH School of Engineering
Lund University
Box 882
SE-251 08 Helsingborg
Sweden

Tryckt i Sverige
Media-Tryck
Lund 2020

Sammanfattning

Detta examensarbete utfördes på CG Drives & Automation (Emotron). Företaget satsar på att utveckla produkter och lösningar för att styra och övervaka elektriska motorer. En av deras mer populära produkter är den effektiva och energisparande frekvensomriktaren. Dess positiva egenskaper kommer även med en negativ effekt, nämligen en ökning av THD nivån i systemet. Med denna ökning uppkommer skadliga övertoner som i sin tur leder till försämrad kvalité på nätströmmen.

Detta examensarbete undersöker två metoder av eliminering med hjälp av ett 2-nivå aktivt filter och har lagt grunden till framtida arbete för utveckling av ett 3-nivå aktivt filter.

Nyckelord: Aktivt filter, THD, Övertoner, Frekvensomriktare.

Abstract

This thesis was conducted on CG Drives & Automation (Emotron), a company that invests in developing products and solutions to control and monitor electrical motors. One of their more popular product is the effective and energy saving Variable Frequency Drive (VFD). However, the VFD lead to higher THD levels in the system, which creates harmful harmonics. The quality of the grid current will degrade due to the harmonics and therefore the harmonics should be eliminated.

This bachelor thesis examines the elimination of these harmonics through a 2-level active filter and built a foundation for future development of a 3-level active filter.

Keywords: Active filter, THD, Harmonics, variable-frequency drive.

Förord

Detta examensarbete avslutar författarnas högskoleingenjörsutbildning inom elektroteknik med automation. Arbetet omfattar 22.5 högskolepoäng och har genomförts på företaget CG Drives & Automation (Emotron).

Vi vill tacka CG för möjligheten att utföra arbetet hos dem. Detta examensarbete har varit lärorikt och intressant för oss. Stort tack till vår handledare Martin Bojrup för all sin hjälp och vägledning under arbetets gång.

Tack till vår handledare Bengt Simonsson och vår examinator Mats Lilja för allt stöd och hjälp som vi fick.

Innehållsförteckning

| | |
|---|-----------|
| 1 Inledning | 1 |
| 1.1 Bakgrund | 1 |
| 1.2 Syfte | 1 |
| 1.3 Målformulering | 1 |
| 1.4 Problemformulering | 1 |
| 1.5 Motivering av Examensarbetet | 2 |
| 1.6 Avgränsningar | 2 |
| 2 Teknisk bakgrund | 3 |
| 2.1 Aktivt filter | 3 |
| 2.2 VSC | 4 |
| 2.2.1 2-nivå VSC | 4 |
| 2.2.2 3-nivå VSC | 5 |
| 2.3 PQ-teorin | 6 |
| 2.3.1 Clarke V & I | 6 |
| 2.3.2 PQ uträkning..... | 7 |
| 2.3.3 PI regulator | 7 |
| 2.3.4 Kompensering | 7 |
| 2.4 HCC | 7 |
| 2.5 L-filter | 8 |
| 2.6 LP-filter | 8 |
| 2.7 Notch-filter | 9 |
| 2.8 Matlab | 10 |
| 2.9 THD | 10 |
| 3 Metod | 11 |
| 3.1 Implementering | 11 |
| 3.2 Analysmetod | 11 |
| 3.3 Källkritik | 11 |
| 4 Analys | 13 |
| 4.1 Kravspecifikation | 13 |
| 4.2 Simulering | 14 |
| 4.2.1 PQ | 14 |
| 4.2.2 Notch | 15 |
| 4.3 Simuleringsresultat | 16 |
| 4.3.1 PQ | 17 |
| 4.3.2 Notch | 18 |
| 4.4 Fördelar & nackdelar | 20 |
| 4.4.1 Switchfrekvens | 20 |
| 4.4.2 2-nivå & 3-nivå..... | 20 |
| 4.4.3 Hybrid AF | 21 |

| | |
|--|-----------|
| 5 Resultat | 23 |
| 6 Slutsats & Diskussion..... | 25 |
| 6.1 Reflektion över etiska aspekter..... | 26 |
| 6.1.1 Sekretess | 26 |
| 6.1.2 Hederskodex | 26 |
| 6.2 Framtida utvecklingsmöjligheter | 26 |
| 7 Terminologi..... | 27 |
| 8 Källförteckning | 28 |
| 9 Appendix | 30 |

1 Inledning

Sveriges industri konsumerar idag hälften av den el som produceras, varav minst 65% används för att driva elmotorer till diverse applikationer [7, 8]. För att driva dessa så effektivt som möjligt sker detta ofta med hjälp av en frekvensomriktare, även kallat Variable Frequency Drive (VFD).

Frekvensomriktare används flitigt i industrin då de kan spara upp till 50% i energi. Dock medför de otäcka övertoner när de ansluts till olinjära laster, detta resulterar i sämre prestanda samt att ansluten kringutrustning tar skada av det [5].

1.1 Bakgrund

Företaget som examensarbetet utförts på är ett internationellt industriföretag vid namnet CG Drives & Automation (Emotron). CG har specialiserat sig på produkter för att styra och övervaka elektriska motorer. En av deras främsta marknad är energibesparande produkter som bidrar till minskat underhåll och ökad livslängd.

Övertoner är en av de saker som kan ge en försämrad prestanda och livslängd. Därför är det väldigt avgörande att eliminera dessa. En möjlighet man har är att använda passiva filter, framför allt LCL-filter. Dessa är dessvärre statiska och filtrerar endast vissa övertoner. Medan ett aktivt filter kan filtrera alla eller enstaka.

Det långsiktiga målet är att ta fram en lösning som filtrerar ut alla övertoner för att få en perfekt nätström utan strömövertoner.

1.2 Syfte

Syftet med examensarbetet är att undersöka om man kan eliminera de övertoner som bidrar till försämrad kvalitet på nätströmmen. Men med ett mindre drivsystem än vad som finns tillgängligt idag.

1.3 Målformulering

- Designa en Shunt Active Filter (SAF)
- Analysera det högfrekventa spektrumet och uppnå låg THD halt

1.4 Problemformulering

Följande frågor ska vi försöka besvara under examensarbetets gång:

- Hur ska övertoner elimineras?
- Vilken påverkan har switchfrekvensen på VSC:n?
- Vilka prestandakrav finns det?

- Vad är det för skillnad på 2- eller 3-nivå AF?

1.5 Motivering av Examensarbetet

Examensarbetet valdes på grund av intresset för kraftelektronik och styrning av elmaskiner. Men även för att det är viktigt att tillämpa det man har fått lära sig under utbildningen och sätta sina kunskaper på prov. Att få vara med från grunden och utveckla en produkt som bidrar till bättre kvalitet i elnätet är både spännande och lärorikt.

1.6 Avgränsningar

I examensarbetet läggs fokus på de 40 första övertonerna. EMC-filter kommer inte undersökas i arbetet.

2 Teknisk bakgrund

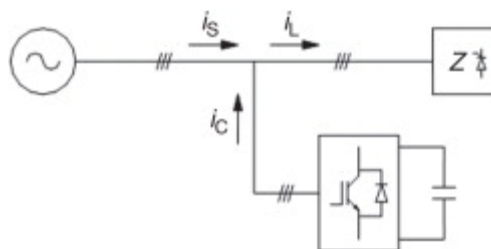
En frekvensomriktare installeras mellan nätet och en elektrisk motor för att möjliggöra reglering av varvtal och vridmoment på motorn. När nätspänningen först likriktas och sedan växelriktas uppstår det övertoner som reflekteras tillbaka i nätet. Övertoner är av högre frekvens än den fundamentala frekvensen som ursprungligen kommer från nätet. Problematiken som övertonerna medför är att de bland annat förstör ansluten kringutrustning, försämrar nätkvaliten samt överhettar transformatorer och motorer. Detta leder i sin tur till kortare livslängd.

Aktiva filter kan installeras för att undvika ovannämnda problem och på så sätt filtrera bort oönskade övertoner. Genom att neutralisera övertonerna förhindras utrustning att åldras i förtid.

Nedan kommer topologin för både 2-nivå och 3-nivå aktiva filter att presenteras och diskuteras.

2.1 Aktivt filter

Den mest använda varianten av aktiva filter är den som baseras på en voltage source converter (VSC). Delvis på grund av att den är lätt att tillämpa och delvis för att topologin är välkänd. Den kallas för Shunt Active Filter (SAF), på grund av att den är kopplad parallellt med den olinjära lasten. SAF består generellt av en DC-länk kondensator, transistorer och filter induktanser, strukturen finns nedan i figur 2.1.



Figur 2.1: Systemstruktur för en VSC baserad SAF [15]

Driftprincipen för ett aktivt filter är att injicera övertonerna i_c i fas med lastströmmen i_L vilket leder till eliminering av övertonerna i nätströmmen i_s . Om vi antar att lastströmmen kan skrivas som summan av den fundamentala och högfrekventa strömmen så får vi att

$$i_L = i_{L,\text{fund}} + i_{L,\text{HF}} \quad (2.1)$$

och den del vi ska kompensera med blir

$$i_C = i_{L,HF} \quad (2.2)$$

som sedan resulterar i

$$i_S = i_L - i_C = i_{L,fund} \quad (2.3)$$

vilket medför att nätströmmen endast innehåller den fundamentala komponenten av lastströmmen. [4]

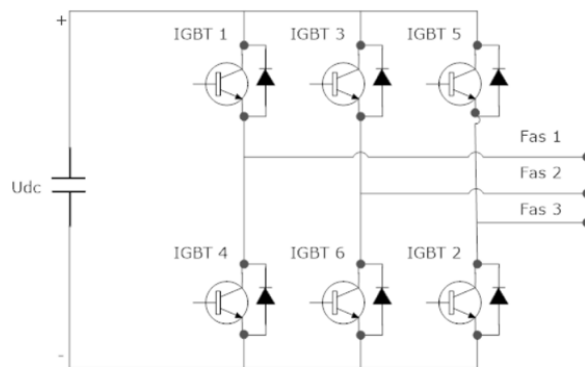
Aktiva filter kan användas i globalt eller selektivt läge. Globalt läge innebär att det aktiva filtret försöker eliminera alla övertoner oberoende av ordning. Selektivt läge innebär att användaren ges möjlighet att konfigurera vilka övertoner som ska kompenseras.

2.2 VSC

Växlariktare används för att konvertera likström till växelström.

2.2.1 2-nivå VSC

Topologin för en 2-nivå VSC visas i figur 2.2. Växlariktaren i det aktiva filtret består av sex stycken IGBT transistorer som arbetar på följande sätt: När strömmen transporteras in till VSC öppnas och stängs de sex olika transistorerna för att omvandla likström till växelström. Varje fas växlar mellan två spänningsnivåer, $\pm \frac{U_{dc}}{2}$. Se Tabell 2.1 för driftläget i ett ben.



Figur 2.2: Topologi 2-nivå VSC

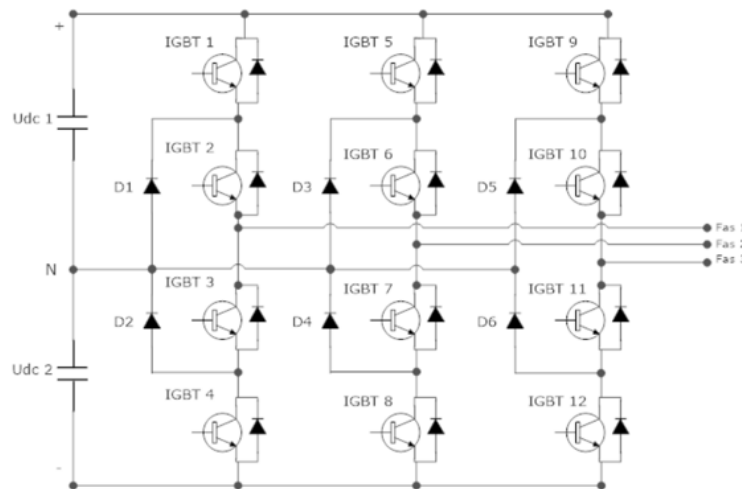
Tabell 2.1: Driftläge 2-nivå VSC

| Stängda Switchar Övre Halvan | Stängda Switchar Nedre Halvan | Från | Till |
|------------------------------|-------------------------------|-------|-------|
| S1 | S6 | Fas 1 | Fas 2 |
| S1 | S2 | Fas 1 | Fas 3 |
| S3 | S2 | Fas 2 | Fas 3 |
| S3 | S4 | Fas 2 | Fas 1 |
| S5 | S4 | Fas 3 | Fas 1 |
| S5 | S6 | Fas 3 | Fas 2 |

En 2-nivå VSC arbetar vanligtvis med en hög switchfrekvens för att åstadkomma den önskade spänningen, detta beror på att den arbetar med endast 6 stycken IGBT transistorer.

2.2.2 3-nivå VSC

Topologin för en 3-nivå VSC visas i figur 2.3. Strukturen för växelriktaren består av tolv stycken IGBT transistorer, dubbelt så många som en 2-nivå. Varje fas växlar därmed mellan tre spänningsnivåer, $\pm \frac{U_{dc}}{2}$ och 0. De tre faserna delar på DC-länken, varje fas är ansluten till den gemensamma nollpunkten för kondensatorerna.



Figur 2.3: Topologi 3-nivå VSC

Tabell 2.2 nedan beskriver vilka IGBT:er som växlar vid de olika spänningsnivåerna i ett ben.

Tabell 2.2: Driftläge för 3-nivå VSC

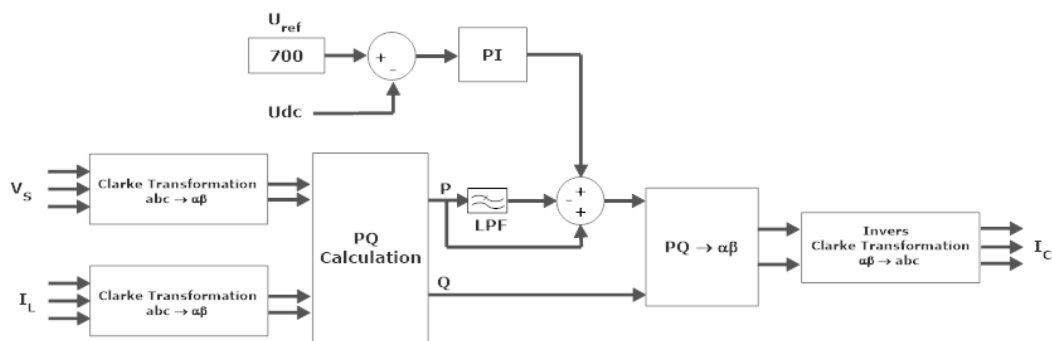
| Utpänning | IGBT 1 | IGBT 2 | IGBT 3 | IGBT 4 |
|---------------------|--------|--------|--------|--------|
| $+\frac{U_{dc}}{2}$ | ON | ON | OFF | OFF |
| 0 | OFF | ON | ON | OFF |
| $-\frac{U_{dc}}{2}$ | OFF | OFF | ON | ON |

2.3 PQ-teorin

Det fullständiga namnet för teorin är “Generalized Theory of the Instantaneous Reactive Power in Three-Phase Circuits” men kallas för enkelhetens skull PQ-teorin.

Då PQ-teorin är tidsdomän baserad går den att använda i steady-state och transienta tillstånd, vilket möjliggör styrning av AF i realtid. En annan fördel är att teorin endast består av algebraiska funktioner, vilket resulterar i en enklare implementering [2, 3].

Genom beräkningarna i kapitel 2.3.1, 2.3.2, 2.3.3 och 2.3.4 så åstadkommer man den önskade kompenseringströmmen i (2.2).



Figur 2.4: Blockschema för PQ-teorin

2.3.1 Clarke V & I

Clarke transformation av nätspänning och lastström sker enligt (2.4). $K = \frac{2}{3}$ då amplitudinvariant används.

$$\begin{bmatrix} S_\alpha \\ S_\beta \end{bmatrix} = K \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

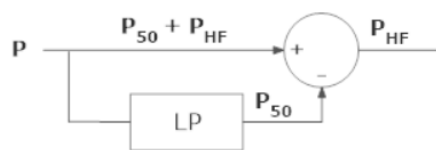
2.3.2 PQ uträkning

Genom de beräknade $\alpha\beta$ för nätspänning och lastström tas den aktiva effekten P och reaktiva effekten Q via (2.5).

$$\begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_\alpha \cdot I_\alpha + V_\beta \cdot I_\beta \\ V_\beta \cdot I_\alpha - V_\alpha \cdot I_\beta \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

P filtreras sedan enligt (2.6) för att få ut den högfrekventa delen av P. Illustration i Figur 2.5.

$$P_{HF} = P - P_{fund} \quad (2.6)$$



Figur 2.5: Filtrering av P

2.3.3 PI regulator

För att VSC ska fungera behöver vi ett stabilt mellanled. En PI regulator implementeras för att ta hänsyn till fluktuationer i mellanledet, se Figur 2.4.

2.3.4 Kompensering

Invers Clarke transformation för att få fram kompenseringströmmen i abc koordinaterna. Detta sker i två steg, enligt (2.7) och (2.8) nedan.

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

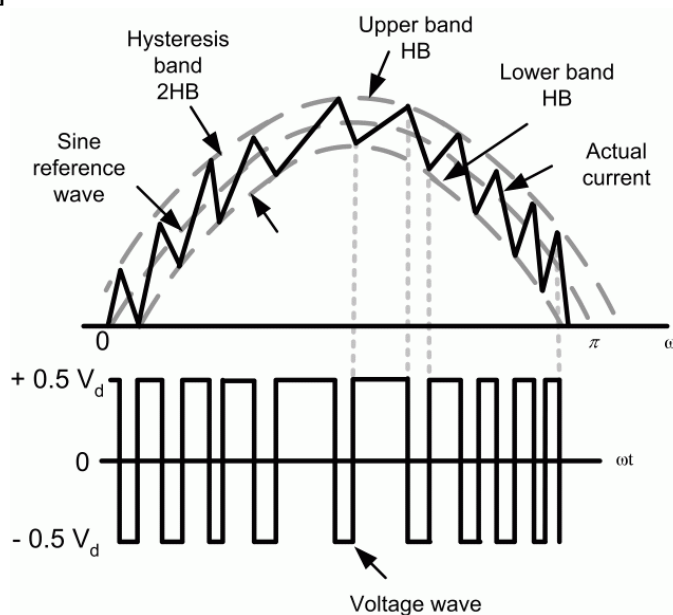
Kompenseringströmmen som fås ut skickas tillsammans med lastströmmen till HCC där gatesignaler genereras.

2.4 HCC

Hysteresis Current Control är en metod som används för att generera gatesignaler som styr VSC:n i det aktiva filtret. Teorin bakom tekniken är att utgångströmmen från det aktiva filtret ska efterlikna den beräknade kompenseringströmmen.

HCC metoden använder sig av aktiva filtrets utgångsström (I_{AF}) och kompenseringströmmen (I_C). Strömmarna delas upp i a-b-c koordinater och jämförs i en schmitttrigger.

Pulssignalerna genereras då börvärdet, I_{AF}^* skär antingen de övre eller nedre gränserna av dödbandet. När I_{AF}^* blir ekvivalent med värdet på den övre gränsen av dödbandet genereras pulssignaler till växelriktaren och en negativ spänning appliceras, detta får strömmen att minska. När I_{AF}^* istället blir ekvivalent med värdet av den nedre gränsen av dödbandet så blir det tvärtom, se Figur 2.6 [12].



Figur 2.6: Driftprincip för HCC [12]

2.5 L-filter

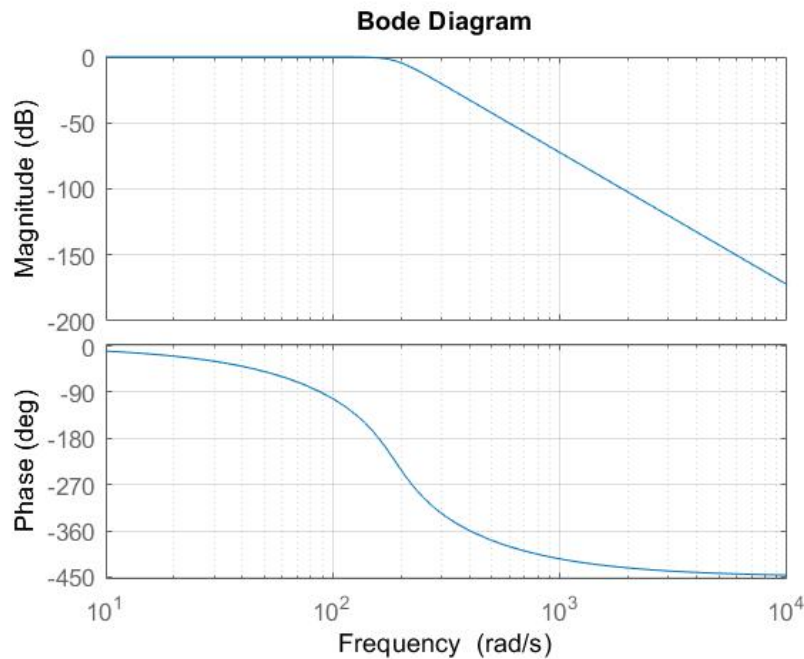
Spänningen som matas ut från det aktiva filtret åker igenom ett passivt filter innan den fortsätter vidare mot PCC. Det passiva filtret är en induktans och kallas även för L-filter. En induktans är en elektrisk komponent som skapar ett magnetiskt fält när ström går genom den. Induktansen sparar energi i sitt magnetiska fält och kan släppa ut det nästan momentant ifall det skulle behövas [9]. L-filtret filtrerar utgångsströmmen från det aktiva filtret, det förhindrar strömspikar och strömdippar genom sin höga impedans.

2.6 LP-filter

Ett lågpasfilter används för att dämpa frekvenser av högre ordning. I lågfrekventa applikationer (upp till 100 kHz) är filtret konstruerad med komponenter som resistorer och kondensatorer [17].

Lågpasfiltret fungerar på följande sätt: när en signal kommer in till filtret så kommer endast den delen av signalen som ligger mellan 0 Hz och dess

brytfrekvens att passera medan de högre frekvenser av signalen kommer att filtreras bort [11]. Figur 2.7 visar ett LP-filter med brytfrekvens 50 Hz.

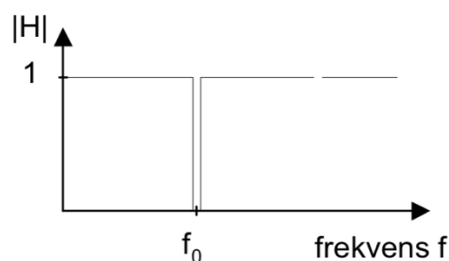


Figur 2.7: Bodediagram LP-filter med brytfrekvens 50 Hz

2.7 Notch-filter

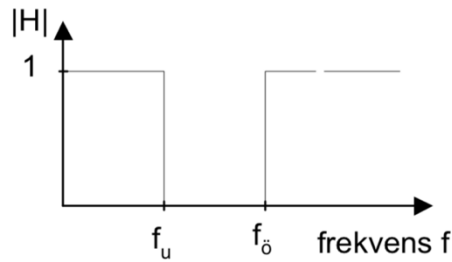
Bandspärrfilter med en smal bandbredd brukar kallas för notch-filter. Ett notch-filter kan användas för att dämpa signaler i ett litet specifikt frekvensområde och passerar igenom signaler som är under och ovan det specificerade området. I detta arbete används notch-filter för att selektivt plocka ut specifika frekvenser där THD nivån är för hög.

Figur 2.8 visar ett exempel där frekvensen för den femte övertonen är en av de övertoner man vill filtrera bort, f_0 är då $50\text{Hz} \cdot 5 = 250\text{Hz}$.



Figur 2.8: Idealt notch-filter [6]

Generellt sätt får man ha större spärrband för att eliminera övertonen, till exempel $f_u = 245\text{Hz}$ och $f_ö = 255\text{Hz}$, se Figur 2.9.



Figur 2.9: Notch-filter [6]

Förutom de undre och övre frekvenserna definieras filtret av sin ordning, där filtrets ordning betyder hur många reaktiva komponenter den består av [16]. Vid olika ordningar så skiljer sig djupet och bredden på övergångsbandet.

2.8 Matlab

I detta arbete genomförs simuleringar av systemet med programvaran Simulink som är en del av programmet Matlab. Matlab används för tekniska och matematiska beräkningar på universitet och stora företag. Programmet är utvecklat av företaget Mathworks och släpptes först december 1984 [14].

Efter varje simulering beräknas THD procentandelen för systemet genom Fast Fourier transformation (FFT). Matlab tillhandahåller FFT Analysis Tool som utför THD beräkningen för systemet.

2.9 THD

Total Harmonic Distortion (THD) av en signal är ett mått på hur mycket övertoner det finns i ström eller spänning. Det är definierat som summan av alla övertoner relativt till grundton (2.4)

$$\text{THD}_I = \sqrt{\frac{\sum I_n^2}{I_1}} \cdot 100\% \quad (n=2,3,4,5\dots\infty) \quad (2.4)$$

Där I_1 är den fundamentala komponenten av strömmen och I_n är den totala strömmen. All mätning av THD sker på PCC.

3 Metod

I början av examensarbetet delades arbetet upp i tre olika faser: förstudier, implementering och analys.

Första fasen innebar inhämtning av information för att skapa en grund och djupare förståelse. Den bestod främst av litteratur men även verbal kommunikation mellan student och handledare.

I förstudien anträffades en rad olika tillvägagångssätt att kompensera övertoner. Två olika metoder valdes ut och testades, en i globalt läge med PQ-teorin och det andra i selektivt läge med hjälp av notch-filer. Dessa metoder valdes delvis ut för att se hur en mer komplex metod (PQ-teorin) presterade jämfört med en simplare variant (notch-filer).

Det var även i förstudien beslutet om vilken programvara som skulle användas togs. Valet blev Matlab med paketet Simscape Electrical då det har alla de verktyg som behövs och har många färdiga block vilket underlättar vid ihop-sättningen av modeller.

CG:s labb data presenterades för att få en realistisk simulering samt för att kunna implementera regleringen på deras produkt. Då labb data är sekretessbelagt kommer det inte presenteras i examensarbetet.

3.1 Implementering

Efter att ha valt ut två olika metoder användes Matlab/Simulink för att kunna bygga ihop en gemensam simuleringsmodell med samma förutsättningar, så att resultaten skulle kunna vara jämförbara och rättvisa. När en tillräckligt bra reglering av AF uppnås kommer den implementeras på en av CG:s produkter.

3.2 Analysmetod

För att kunna analysera resultatet användes FFT för att se om THD halten låg under eller över kraven från IEEE 519-2014. I kapitel fem och sex kommer detta diskuteras och analyseras vidare.

3.3 Källkritik

[1], [2] och [3] är publikationer som beskriver och diskuterar PQ-teorin. De anses vara pålitliga då de bland annat är skrivna av professorn som introducerad PQ-teorin.

[4] Boken anses vara pålitlig eftersom den är skriven av Martin Bojrup, handledaren för oss på CG Drives & Automation AB.

[5] Hemsidan anses vara trovärdig då det är den officiella hemsidan för CG Drives & Automation AB.

[6] Källan anses vara pålitlig eftersom den är publicerad av Chalmers universitet.

[7] och [8] anses vara pålitliga källor eftersom Energimyndigheten är en svensk statlig myndighet.

[9] Källan anses vara pålitlig eftersom det finns bild och namn på författaren, samt att man kan kontakta författaren genom hemsidan.

[10] Publikation är tagen från forsknings databasen IEEE Xplore som vi har tillgång till genom Lunds universitet. Den anses därför vara pålitlig.

[11] Källan är publicerad av Lunds universitet och anses därför vara pålitlig.

[12] och [15] Publikationerna är tagen från forskning databasen ScienceDirect som vi har tillgång till genom Lunds universitet. Den anses därför vara pålitlig.

[13] Boken anses vara pålitlig eftersom författaren är en professor på Ghent University och är expert i sitt område.

[14] Artikeln är publicerad på den officiella hemsidan av Mathworks och anses därför vara trovärdig.

[16], [17] och [18] Källorna är tagna från en säker och väletablerad hemsida. Den anses därför vara pålitlig.

[19] Källan anses vara pålitlig eftersom Sveriges Ingenjörer är ett stort svenskt fackförbund med ca 155 000 medlemmar.

4 Analys

4.1 Kravspecifikation

Arbetets krav är att designa och implementera ett AF som följer IEEE standardens THD krav [10]. Tabell 4.1 och 4.2 visar de rekommenderade gränserna att hålla sig inom. Då spänningen på PCC är mindre än 1 kV kommer första raden i Tabell 4.1 att följas. Rad ett av Tabell 4.2 kommer att följas för nätströmmen.

Tabell 4.1: Gränser för spänningsdistortion

| Spänning V på PCC | Individuell överton (%) | THD (%) |
|---|-------------------------|------------------|
| $V \leq 1.0 \text{ kV}$ | 5,0 | 8,0 |
| $1 \text{ kV} < V \leq 69 \text{ kV}$ | 3,0 | 5,0 |
| $69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$ | 1,5 | 2,5 |
| $161 \text{ kV} < V$ | 1,0 | 1,5 ^a |

^aHVDC system kan ha upp till 2% THD

Tabell 4.2: Gränser för strömdistortion (120 V-69 kV)

| Maximal strömdistortion i förhållande till I_L (%) | | | | | | |
|--|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----|
| Individuella udda övertoner | | | | | | |
| I_{sc}/I_L | $3 \leq h < 11$ | $11 \leq h < 17$ | $17 \leq h < 23$ | $23 \leq h < 35$ | $35 \leq h < 50$ | TDD |
| $< 20^a$ | 4,0 | 2,0 | 1,5 | 0,6 | 0,3 | 5,0 |
| $20 < 50$ | 7,0 | 3,5 | 2,5 | 1,0 | 0,5 | 8,0 |

^aAll utrustning som genererar effekt är begränsade till dessa värden

Under arbetets testfas gjordes flera simuleringar av systemet för att identifiera befintliga och potentiella problem. Ett problem som stod ut var vid användning av de passiva filtren mellan det aktiva filtret och PCC.

Adderingen av LCL filtret resulterade i övermodulation av systemet. Vid närmre titt på problemet så identifierades att värdena för kondensatorn ej var passande och behövde modifieras. Efter flera försök och tester visade det sig att det även krävdes ändring av värden för induktanserna. Beslut togs därefter om att använda ett L-filter istället för ett LCL-filter och grundades på två faktorer. Första var att mycket tid skulle gå åt beräkningen av passande parametrar för LCL-filtret och att detta skulle istället göras vid mån av tid. Andra faktorn var att ändringen av parametrarna skulle medföra ett större LCL-filter och det i sin tur betyder högre kostnad vid verklig implementering av det aktiva filtret.

4.2 Simulering

Systemet simuleras med en 2-nivå AF där mellanledet ersattes med ett batteri för bättre simuleringar. För beräkning av kompenseringströmmen används två metoder, se Tabell 4.3. Första metoden är PQ-teorin, den metoden eliminerar övertonerna i globalt läge. Den andra är genom användning av notch-filer, den metoden eliminerar övertonerna i selektivt läge.

Examensarbetet är uppdelat i två delar, en teoretisk del och en praktisk del. Den teoretiska delen beskriver och diskuterar topologin för 2- och 3-nivå AF, metoderna som används för beräkning av kompenseringström, olika sätt man kan eliminera övertoner på och olika tekniker för strömregulatorer. Den praktiska delen består av uppbyggnad av simuleringsmodell som försöker efterlikna CG:s eget laboratorium. Parametrarna för simuleringsmodellen är tagna från labbet på CG och även värdena för de passiva filtren. Som det nämndes tidigare så togs beslutet om att försöka anpassa sig efter verkliga labbet så mycket som möjligt och undvika att modifiera något som potentiellt kan öka kostnaden i det verkliga fallet.

Simuleringen som utförs i examensarbetet består av endast 2-nivå aktiva filter. En beskrivning av 3-nivå aktiva filter presenteras däremot i den teoretiska delen, då arbetet även lägger grunden till framtida utvecklingsmöjligheter. Mer om det diskuteras i Kapitel 6.

Tabell 4.3: Simulerings metoder

| Kompenseringströmmens beräkningsmetod | Ström kontroll |
|---------------------------------------|----------------|
| PQ-teori | HCC |
| Notch-filer | HCC |

4.2.1 PQ

PQ-teorin är en av de mest använda metoderna för beräkning av kompenseringströmmen. Genom att använda denna metod så försöker man eliminera alla övertoner, alltså används AF i globalt läge. En fördel vid användning av PQ-teorin är att den kontinuerligt definierar de aktiva och reaktiva effekterna så att variationer i nätet kan hanteras i realtid.

Sedan den introducerades så har det uppkommit flera varianter av PQ-teorin med viss modifikation. Vissa väljer att använda amplitudinvariant av Clarke transformation medan andra använder effektinvariant. Reaktiva effekten Q , kan kompenseras helt som det gjordes då PQ-teorin först introducerades eller så filtreras den först genom ett LP filter [2, 1]. I detta examensarbete används amplitudinvarianten av Clarke transformation och reaktiva effekten

kompenseras helt. Ekvationerna (2.4) och (2.8) visar denna variant, där konstanten $K = \frac{2}{3}$. Effektivvariant har istället konstanten $\sqrt{\frac{2}{3}}$ före matrisen.

Amplitudinvarianten ger oftast bättre resultat än effektivvariant. Den bevarar amplituden på ström och spänning, däremot inte för effekten. Generellt sätt så används den mest utav de två varianterna [13]. Den reaktiva effekten är en biprodukt av system som arbetar med växelström, den representerar fasförskjutning mellan spänningen och strömmen och gör inget användbart arbete i systemet [18]. Därför kompenseras den helt, alternativt kompenseras bara den höga frekvens komponenten av Q då man fortfarande vill ha en viss mängd kvar i systemet.

4.2.2 Notch

För att selektivt plocka ut de önskade frekvenserna användes notch-filer, i första testet plockades fyra övertoner ut [6]. Det var de följande ordningarna fem, sju, elva och 13. I FFT kunde man se att övertonerna för de ordningar som valdes hade reducerats till den rekommenderade THD halten, men den totala THD halten för systemet var dessvärre inte tillräckligt låg. De frekvenser som bidrog till den höga THD halten identifierades och kunde därefter plockas ut.

För varje frekvens som skulle plockas ut behövdes en specifik ordning på filtret, i Tabell 4.4 anges filtrets ordning för respektive överton. Ordningstal och spärrband valdes olika för varje notch-filer, för att få erforderligt djup och bredd på notchen för respektive filter. Med hjälp av bodediagram och simuleringar kunde passande parametrar för varje notch-filer identifieras. För att undvika eventuella störningar som kan påverka nätströmmen begränsades antalet filter till sju stycken. De sju övertoner med högst THD halt och minst störningar vid selektering valdes.

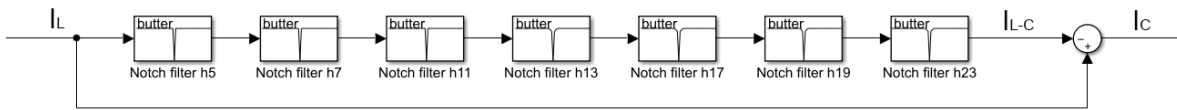
Tabell 4.4: Filter ordning

| Ordning | Överton |
|---------|----------------|
| 10 | 5, 7 |
| 6 | 11 |
| 2 | 13, 17, 19, 23 |

De utplockade frekvenserna användes i implementeringen av metoden på följande sätt (4.1): Först delas signalen i två delar, ena delen appliceras notch-filer på och sedan subtraheras av andra delen som består av lastströmmen, enligt (4.2). Figur 4.1 visar strukturen för notch-filer i Matlab.

$$I_L - I_{LH5} - I_{LH7} - I_{LH11} - I_{LH13} - I_{LH17} - I_{LH19} - I_{LH23} = I_{L-C} \quad (4.1)$$

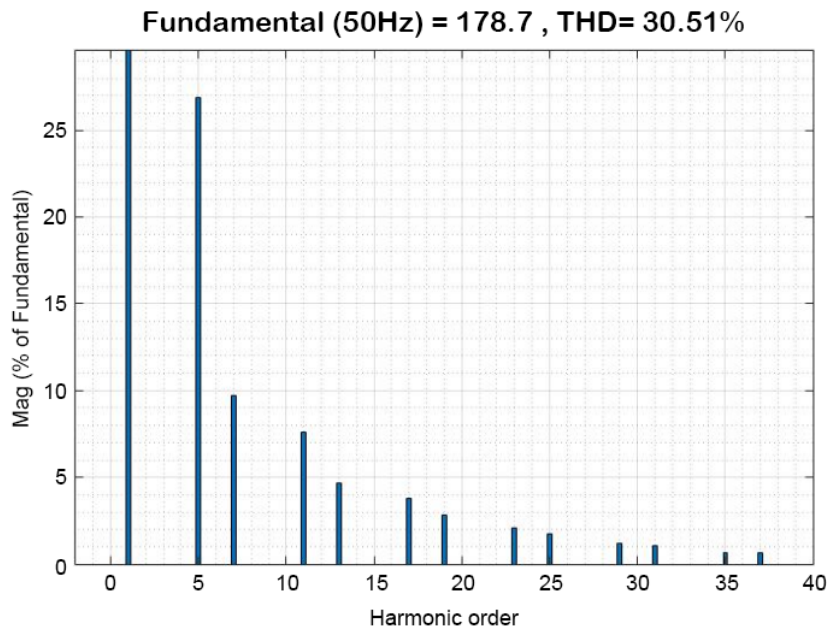
$$I_L - I_{L-C} = I_C \quad (4.2)$$



Figur 4.1: Notch-filter i Matlab

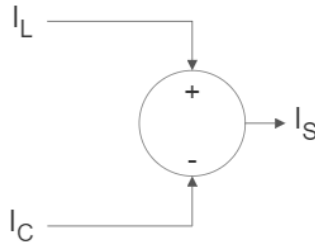
4.3 Simuleringsresultat

Första simuleringen för systemet sker utan någon sorts strömkompensering som visas i Figur 4.2. Detta gjordes för att se THD nivån för systemet. Efter det påbörjades implementeringen av strömkompenserings metoderna och simuleringen av systemet vid användning av PQ-teorin och notch-filter. I följande figurer anges ström och spänning med toppvärde.



Figur 4.2: THD_I före kompensering

För att erhålla den optimala THD nivån sker THD mätning på den teoretiska nätströmmen (2.3) enligt Figur 4.3. Detta genomförs för att se hur THD nivån varierar mellan optimalt och verkligt resultat. Således anses HCC ha en förstärkning ekvivalent med ett.

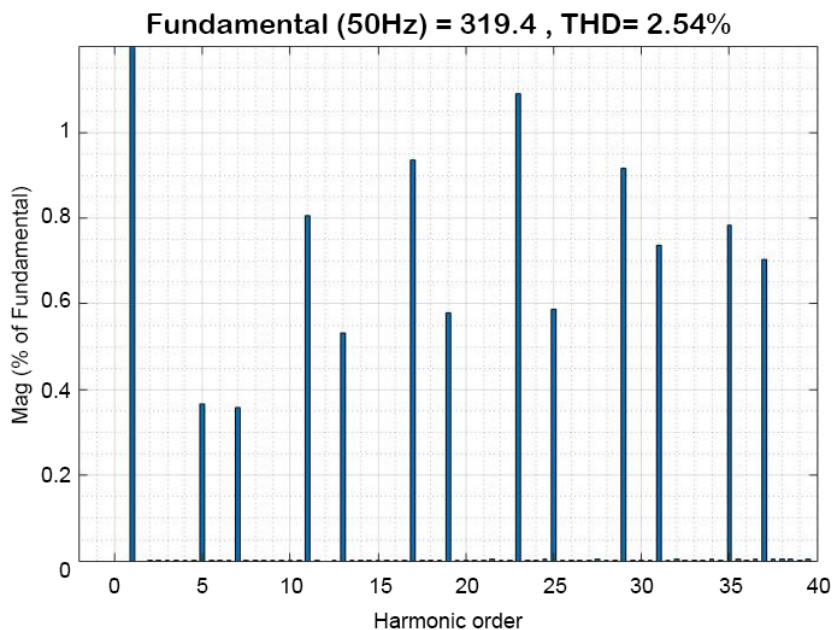


Figur 4.3: Blockschema för optimal THD beräkning

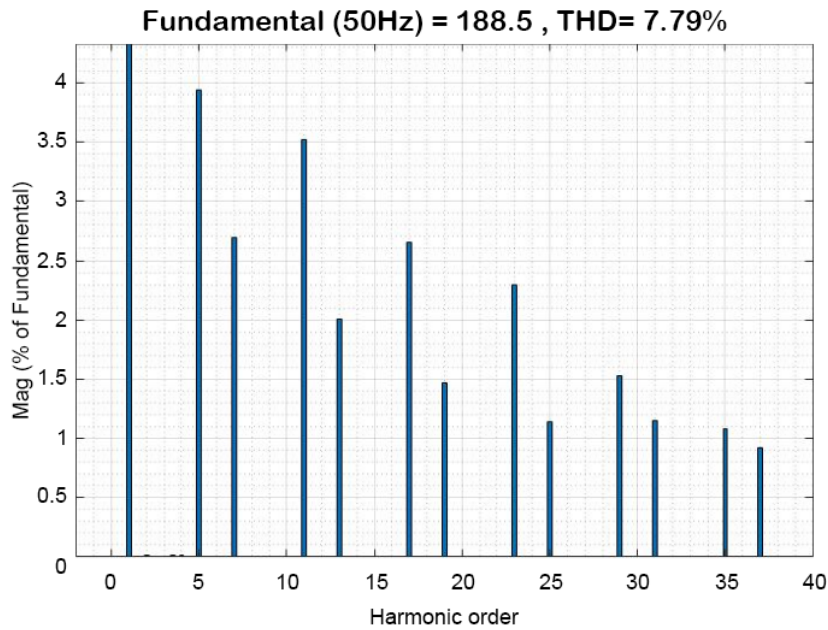
4.3.1 PQ

THD nivån för alla individuella övertoner förutom 23:de och 35:te är inom den rekommenderande gränsen när PQ-teorin användes. 23:de överstiger den rekommenderande gränsen med 0,15% och 35:te med 0,09%. Trots att det är små procentandelar leder detta till att THD_I överskrids med 2,79%.

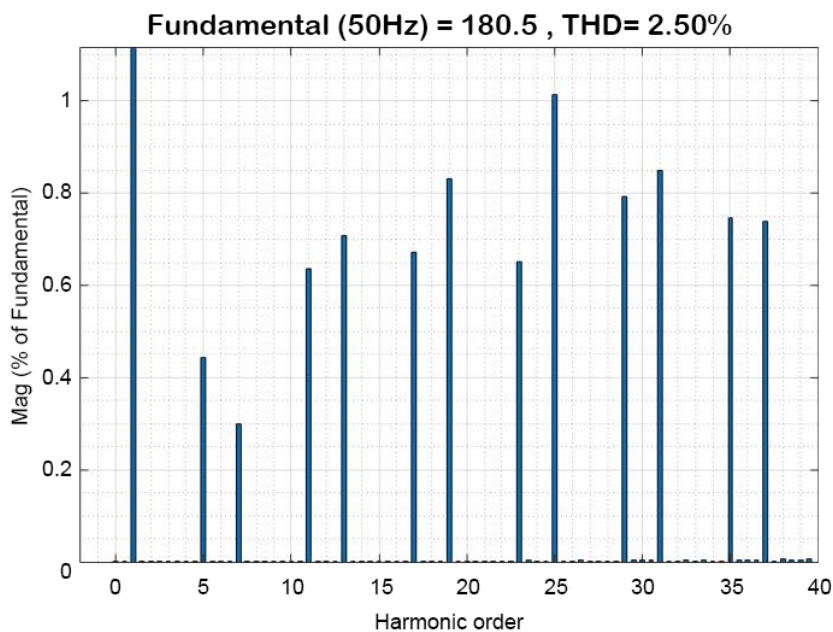
I Figurerna 4.4 och 4.5 presenteras spänningens THD nivå för hela systemet som blev 2,54% och strömmens THD nivå blev 7,79%. I det optimala utfallet skulle THD_I nivån blivit 2,50%, se Figur 4.6.



Figur 4.4: THD_V efter PQ-teorin



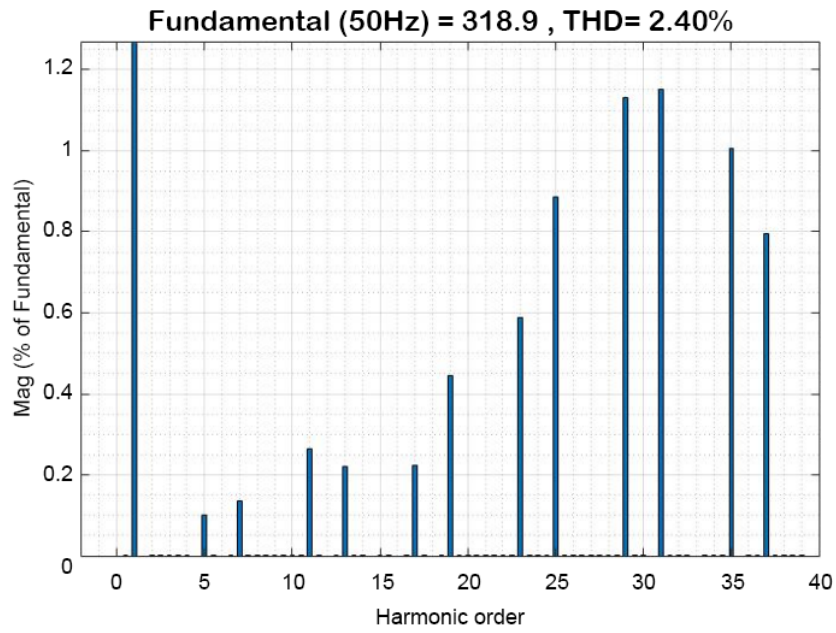
Figur 4.5: THD_I efter PQ-teorin



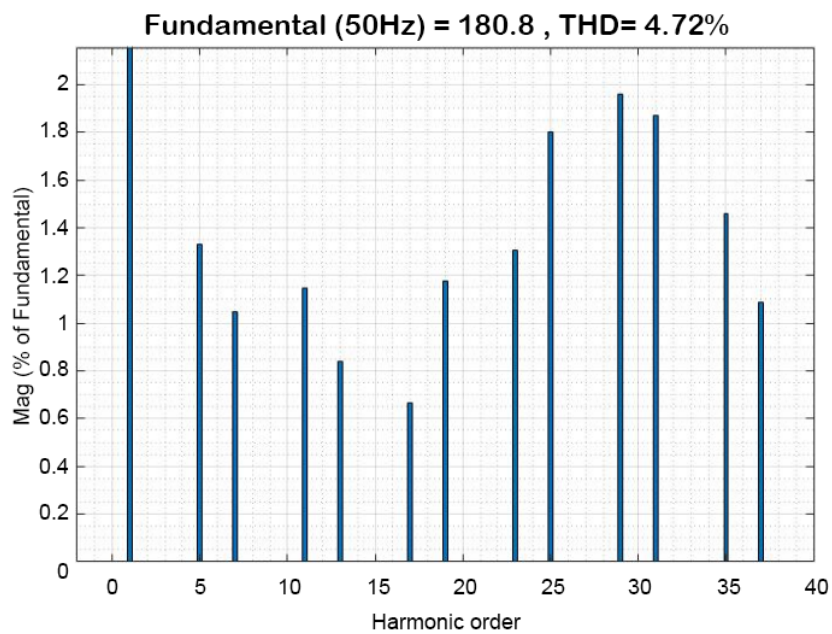
Figur 4.6: Optimal THD_I efter PQ-teorin

4.3.2 Notch

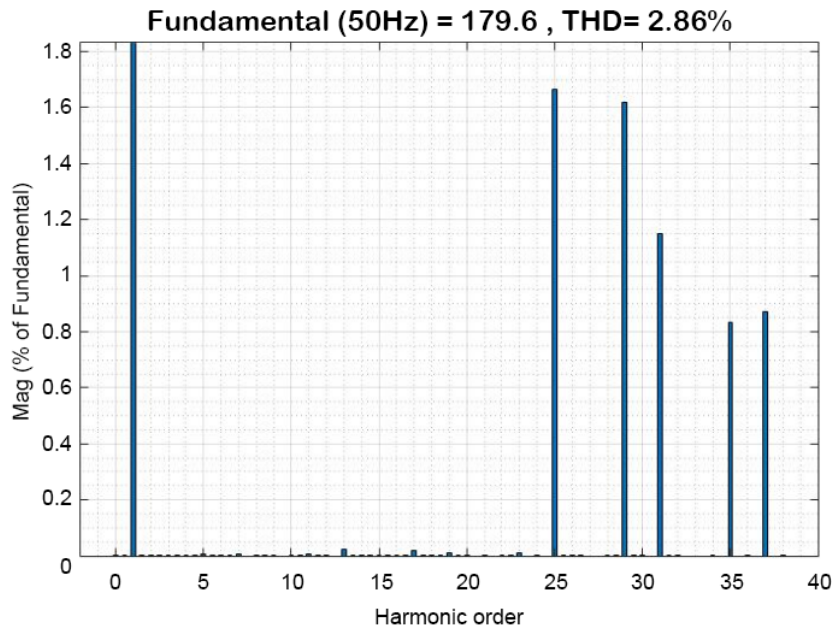
I Figurerna 4.7 och 4.8 presenteras resultatet när notch-filter används. Resultatet är visserligen bättre med användning av notch-filter, där spänningens THD nivå för hela systemet är 2,4% och strömmens THD nivå är 4,72%. Den optimala THD nivå för strömmen med användning av notch-filter är 2,86%, se Figur 4.9.



Figur 4.7: THD_V efter notch-filter



Figur 4.8: THD_I efter notch-filter



Figur 4.9: Optimal THD_I efter notch-filter

4.4 Fördelar & nackdelar

4.4.1 Switchfrekvens

Med en hög switchfrekvens minskar toppströmmen genom induktansen och således både induktansens storlek och kostnad. Eftersom det aktiva filtret endast behöver hantera storleken på störningen, dvs. övertonerna, som är en bråkdel av amplituden på strömmen, är det möjligt att använda en högre switchfrekvens. Detta gör det möjligt för det aktiva filtret att kompensera övertoner av högre ordning.

Men när switchfrekvenserna ökar så ökar även förlusterna, det vill säga att förlusterna är proportionella mot switchfrekvensen. Problemet är att när man går från t_{on} till t_{off} eller vice versa så är omkopplaren i övergången under en kort stund på och relativt hög effekt förloras under övergången. Förlusterna blir höga eftersom övergångstiden blir en högre procentandel av duty cyclen desto högre switchfrekvensen är.

4.4.2 2-nivå & 3-nivå

En fördel med en 3-nivå jämfört med en 2-nivå är att spänningsnivån 0 finns, det tillsammans med att det är dubbelt så många IGBT:er medför till mindre förluster och minskar spänningen över dem. Den maximala spänningen över transistorerna är begränsad till hälften av den maximala mellanledningsspänningen, detta är på grund av att transistorerna är anslutna till neutralpunkten av två dioder som kallas för neutrala klämdioder.

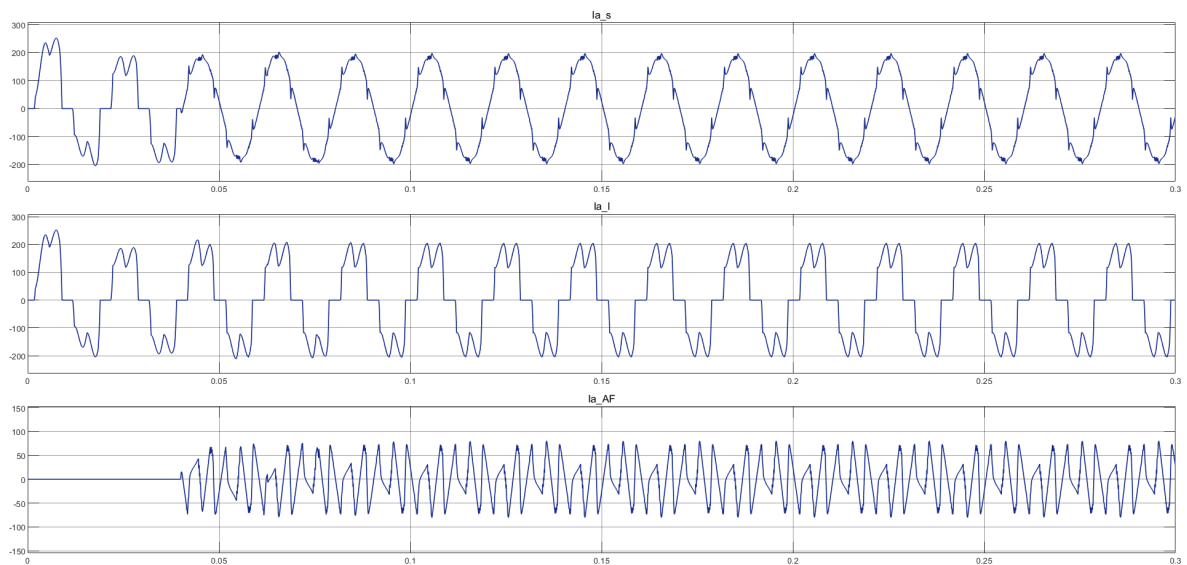
4.4.3 Hybrid AF

Vid användning av L-filtret tillsammans med ett aktivt filter så är storleken och kostnaden mindre jämfört med endast användning av ett passivt filter. Nackdelen med endast passiva filter är att storleken och kostnaden ökar, även risken för överhettning samt instabilitetsproblem som följd av överspänning förhöjs.

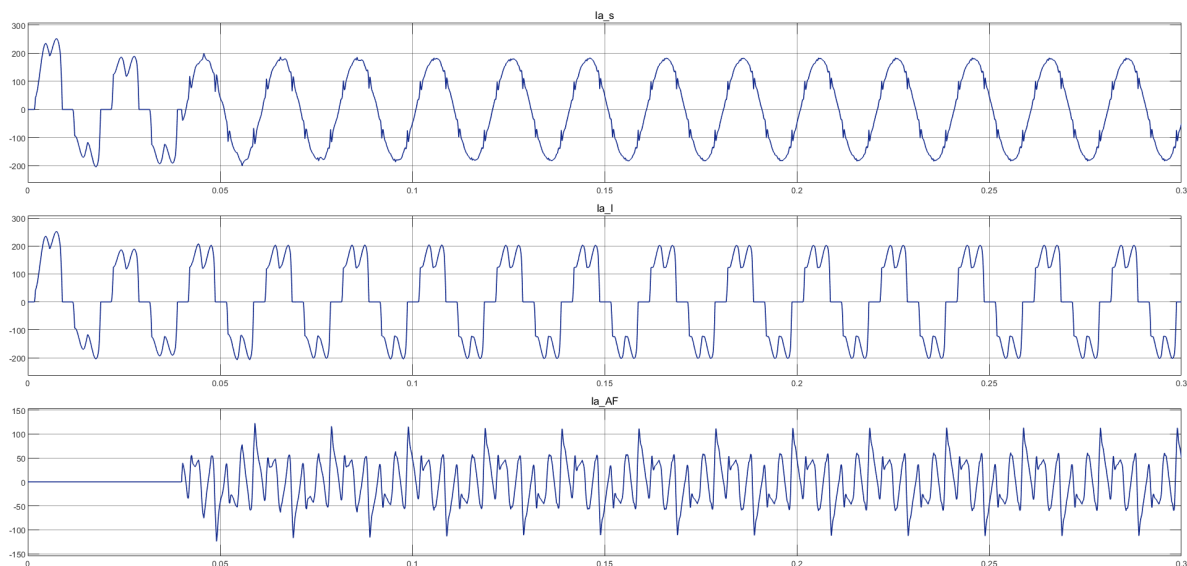
Väljer man istället att kombinera ett passivt filter med ett aktivt filter försvinner de flesta nackdelarna eftersom ett aktivt filter kontrollerar mängden ström som ska injiceras. På så sätt kan man vara säker på att filtret inte överhettas.

5 Resultat

Med båda valda metoderna kunde THD halten sänkas avsevärt från de initiala 30,51% till en rimlig och godtagbar nivå, men det finns åtgärder som kan implementeras för att förbättra systemet. Som vi ser i Figur 4.5, 4.6, 4.7 och 4.8 syns det tydligt att det finns förbättringspotential i båda filtreringsmetoderna. I Figur 5.1 och 5.2 illustreras fasströmmen a för de två metoderna. Som nämnt ovan så syns det även här att Notch är bättre än PQ då nätströmmen är mer linjär. Dessvärre lider båda av kommuteringshack men detta är oundvikligt.



Figur 5.1: Fasström a, för nät-, last- och kompenseringström med PQ-teorin



Figur 5.2: Fasström a, för nät-, last- och kompenseringström med notch-filter

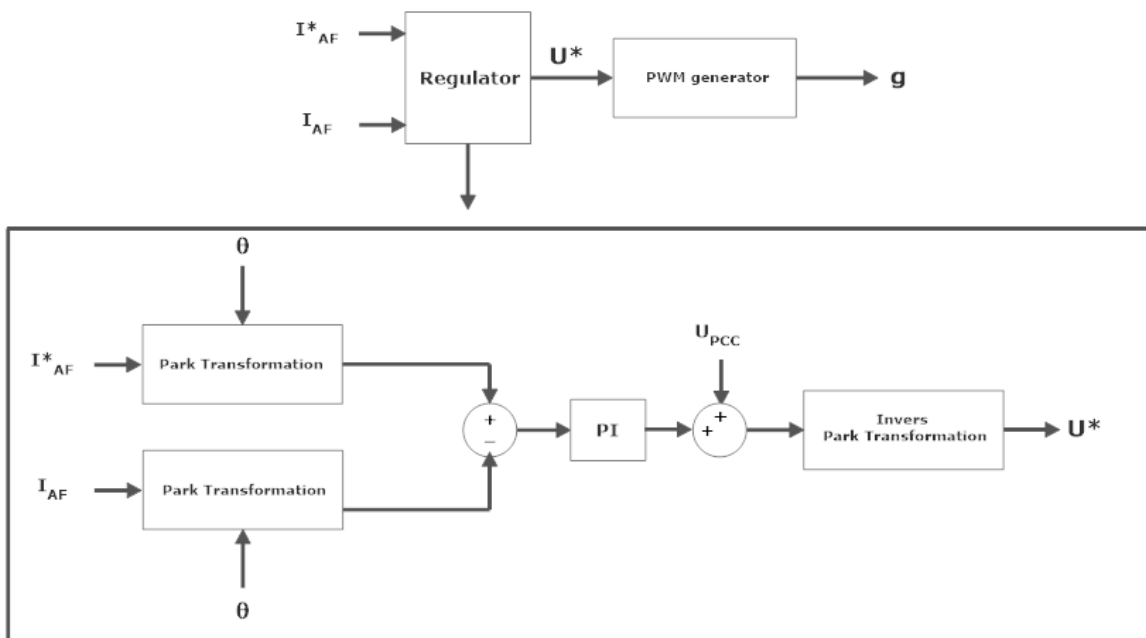
I Tabell 5.1 ser vi tydligt förbättringspotentialen hos de olika metoderna. PQ-teorin har sämst resultat och det beror främst på att metoden kräver att

strömregulatorn kan ge en tillräckligt snabb respons, vilket den inte gör. Generellt sätt så kan man bara öka switch frekvensen för att lösa det problemet. Men det leder dessvärre till hög bandbredd och höga switchförluster.

Tabell 5.1: THD differens

| Metod | Verklig THD (%) | Optimal THD (%) | Differens (%) |
|-------|-----------------|-----------------|---------------|
| PQ | 7,79 | 2,5 | 5,29 |
| Notch | 4,72 | 2,86 | 1,86 |

Ett sätt att komma närmre den optimala THD nivån för båda metoderna är att använda sig av en bättre strömregulator än HCC. I Figur 5.3 presenteras en eventuell struktur på en digital strömregulator. Park transformation enligt Appendix A.1 och invers park transformation enligt Appendix A.2.



Figur 5.3: Alternativ strömregulator

6 Slutsats & Diskussion

Examensarbetets mål var att ta fram en lösning som reducerar övertoner och lägga grunden för framtida utvecklingsmöjligheter. Med detta arbete läggs en grund för när utveckling från 2-nivå till 3-nivå aktivt filter vill genomföras, då kan detta arbete användas som en del i förstudien.

För att säkerställa att arbetets syfte uppfyllts presenteras frågeställningarna med svar nedan.

- Hur ska övertoner elimineras?
- Vilken påverkan har switchfrekvensen på VSC:n?
- Vilka prestandakrav finns det?
- Vad är det för skillnad på 2- och 3-nivå AF?

Det aktiva filtret injicerar övertoner i fas med lastströmmens övertoner för att eliminera dem från nätströmmen och reducerar således THD-halten. Aktivt filter kan användas i globalt eller selektivt läge. I globalt läge elimineras alla övertoner oberoende av ordning och i selektivt endast de övertoner användaren väljer. I arbetet används PQ-teorin för globalt läge och notch-filter för selektivt.

Vid framställning av kompenseringström behöver switchfrekvensen för det aktiva filtrets vara minst tio gånger större än den högsta övertonen. En ökning av switchfrekvens över det nödvändiga har både sina för- och nackdelar. Mest nämnvärt är att övertonerna minskar, vilket är syftet med ett aktivt filter. Till följd minskar dessutom storleken och kostnaden av L-filtret.

Något att ha i åtanke är att switchförlusterna också ökar då switchfrekvensen är proportionell mot switchförluster. Ännu en nackdel som uppstår vid högre switchfrekvens är att spänningen över transistorerna ökar och detta kan leda till permanent skada av transistorerna i växelriktaren.

Prestandakraven för systemets THD halt sätts av IEEE standarden 519–2014 [10]. Kraven för systemet som simuleras i detta examensarbete är att $THD_V < 8\%$ och $THD_I < 5\%$.

Den största fysiska skillnaden är att ett 3-nivå aktivt filter har dubbelt så många kondensatorer och transistorer som ett 2-nivå aktivt filter. Då ett 3-nivå aktivt filter växlar mellan tre spänningsnivåer istället för två, leder detta till mindre förluster och mindre spänning över transistorerna.

På grund av att 3-nivå aktivt filter har dubbelt så många transistorer, går det inte att koppla till den strömregulatorn som använts i simuleringen. Eftersom ett 3-nivå aktivt filter behöver tolv gatesignaler medan HCC kan endast leverera sex pulssignaler. En modern pulsgenerator kan däremot producera både sex och tolv pulssignaler, den kan därför användas i ett 2- och 3-nivå aktivt filter.

Dessvärre gick det inte att eliminera övertonerna mer än vad som gjorts med de förutsättningar och tid som fanns. Notch ger godtyckligt resultat enligt kravspecifikationen men är inte optimalt då den analoga tekniken i HCC inte tillåter lägre THD nivåer.

6.1 Reflektion över etiska aspekter

6.1.1 Sekretess

Parametrarna som användes i simuleringarna var givna av CG Drives & Automation och är tagna från deras laboratorium, på grund av sekretesskäl togs dem inte med i rapporten.

6.1.2 Hederskodex

Ingenjörer har ett ansvar att alltid se till att människans och samhällets bästa prioriteras vid teknikens utveckling. Ingenjörens hederskodex består av tio punkter som ska följas för att se till att ingenjörerna tar sitt ansvar. Alla tio punkter har varit viktiga att följa under examensarbetet men speciellt de följande punkterna [19]:

- Ingenjören bör sträva efter att förbättra tekniken och det tekniska kunnandet i riktning mot ett effektivare resursutnyttjande utan skadeverkningar.
- Ingenjören bör visa full lojalitet mot arbetsgivare och arbetskamrater. Svårigheter härvidlag bör tas upp till öppen diskussion, i första hand på arbetsplatsen.

6.2 Framtida utvecklingsmöjligheter

Arbetet som har utförts i detta examensarbete har lagt grunden till en framtida utvecklingsmöjlighet för att uppnå ännu lägre THD nivå. Som det nämndes tidigare så kan man uppnå den optimala THD nivån genom att byta ut strömregulatorn mot en modernare regulator teknik än den som användes i detta arbete. Detta hade även lett till andra möjligheter, nämligen användning av 3-nivå AF som eventuellt hade förbättrat THD nivån med några procent jämfört med 2-nivå AF.

7 Terminologi

AF – Aktivt Filter

FFT – Fast Fourier Transformation

f_u – Undre gränshfrekvens

$f_ö$ – Övre gränshfrekvens

HCC – Hysteresis Current Control

I_{AF} – AF ström

I_{AF}^* – AF strömbörsvärde

I_C – Kompenseringsström

I_L – Lastström

I_S – Nätström

I_{SC} – Kortslutningsström

PCC – Point of Common Coupling

PWM – Pulse Width Modulation

SAF – Shunt Aktivt Filter

TDD – Total Current Demand Distortion

THD – Total Harmonic Distortion

VFD – Variable Frequency Drive

VSC – Voltage Source Converter

8 Källförteckning

- [1] H. Akagi, M. Aredes & E. Watanabe, *THE P-Q THEORY FOR ACTIVE FILTER CONTROL: SOME PROBLEMS AND SOLUTIONS*. 2004-03. https://www.researchgate.net/publication/250987461_The_p-q_theory_for_active_filter_control_some_problems_and_solutions (Hämtad 2020-05-12)
- [2] H. Akagi, Y. Kanazawa & A. Nabae, *Generalized Theory of the Instantaneous Reactive Power in Three-Phase Circuits*. IPEC'83 – Int. Power Electronics Conference, Japan, Tokyo, 1983.
- [3] H. Akagi, Y. Kanazawa & A. Nabae, *Instantaneous Reactive Power Compensator Comprising Switching Devices without Energy Storage Components*. IEEE Trans. Industry Application, 1984.
- [4] M. Bojrup, *Advanced Control of Active Filters in a Battery Charger Application*. Lic.-avh., Lund University, 1999.
- [5] CG Drives & Automation AB. *Säkra flödet och spara energi*. 2015. https://www.emotron.se/globalassets/downloads/products/ac-drives/emotron-fdu/emotron-fdu-2.0-product-brochure/cg_fdu_01-3829-00-se_-2015.sv.pdf (Hämtad 2020-05-03)
- [6] Chalmers. *Filterbegrepp och filterstrukturer*. http://www.cse.chalmers.se/~svenk/dig_sign.tl/kompendium/grundbok/kap7.pdf (Hämtad 2020-05-06)
- [7] Energimyndigheten. *Elmotorer 15 kW*. 2015-09-17. <http://www.energimyndigheten.se/tester/tester-a-o/elmotorer-15-kw/> (Hämtad 2020-05-03)
- [8] Energimyndigheten. *Energiläget 2019*. 2019 <https://energimyndigheten.a-w2m.se/FolderContents.mvc/Download?ResourceId=145396> (Hämtad 2020-05-03)
- [9] P. Evans, The Engineering Mindset, *Inductors Explained*. 2019-10-27. <https://theengineeringmindset.com/inductors-explained/> (Hämtad 2020-05-15)
- [10] IEEE Power and Energy Society. *IEEE Recommended Practice and Requirement for Harmonic Control in Electric Power Systems*. USA, New York. 2014-03-27. <https://ieeexplore-ieee>

org.ludwig.lub.lu.se/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6826459&tag=1
(Hämtad 2020-02-13)

[11] Lunds Universitet. *Frekvensplanet och Bode-diagram*.
https://www.eit.lth.se/fileadmin/eit/courses/etia01/1011/Forelasning_12_Frekvensplanet.pdf (Hämtad 2020-05-10)

[12] S. Manias, *Power Electronics and Motor Drive Systems*. Academic Press Inc, 2017.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128117989000068>
(Hämtad 2020-05-15)

[13] J. Melkebeek, *Electrical Machines and Drives: Fundamentals and Advanced Modelling*. Springer International Publishing, 2018.

[14] C. Moler, Mathworks, *A Brief History of MATLAB*. 2018.
<https://www.mathworks.com/company/newsletters/articles/a-brief-history-of-matlab.html> (Hämtad 2020-04-28)

[15] P. Revuelta, S. Litrán & J. Thomas, *Active Power Line Conditioners* [Figur]. 2016.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128032169000079>
(Hämtad 2020-05-10)

[16] W. Storr, ElectronicsTutorials, *Band Stop Filter*. 2014-04-26
<https://www.electronics-tutorials.ws/filter/band-stop-filter.html> (Hämtad 2020-05-03)

[17] W. Storr, ElectronicsTutorials, *Passive Low Pass Filter*. 2014-04-26.
https://www.electronics-tutorials.ws/filter/filter_2.html?utm_referrer=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F (Hämtad 2020-05-03)

[18] W. Storr, ElectronicsTutorials, *Reactive Power*. 2014-04-26
<https://www.electronics-tutorials.ws/filter/band-stop-filter.html> (Hämtad 2020-05-15)

[19] Sveriges Ingenjörer. *Hederskodex*. 2019-09-13.
<https://www.sverigesingenjorer.se/om-forbundet/sveriges-ingenjorer/hederskodex/> (Hämtad 2020-05-05)

9 Appendix

Park Transformation där fas a ligger i linje med q axeln.

$$\begin{bmatrix} S_d \\ S_q \end{bmatrix} = K \cdot \begin{bmatrix} \sin(\theta) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{A.1})$$

Invers Park Transformation där fas a ligger i linje med q axeln.

$$\begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\theta) & \cos(\theta) \\ \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_d \\ S_q \end{bmatrix} \quad (\text{A.2})$$

Där:

- S_a , S_b och S_c är a-b-c koordinater i trefassystem.
- S_d och S_q är de två axlarna i det roterande koordinatsystemet.
- $K = \frac{2}{3}$ för amplitudinvariant eller $K = \sqrt{\frac{2}{3}}$ för effektinvariant.