

Modellering av STATCOM för ljusbågsugn

Flimmerdämpning



Pierre Andersson

Daniel Persson

Dept. of Industrial Electrical Engineering and Automation
Lund University

Abstract

Light flicker in electrical lamps is seemed to be annoying for most people. Flicker usually leads to headache and can in some cases trigger epileptic seizure for those who suffer from this disease. Industries connected to a power grid can create voltage dips if they have unbalanced and non-linear characteristics. Voltage dips can spread over a large geographic area all the way down to distribution level. Customers connected to the same power grid as these industries will likely be exposed to flicker.

The main objective of this thesis is to mitigate the voltage dips created by an arc furnace. The arc furnace is a specific industry application that by consuming large and varying power creates voltage dips during melting of scrap metal. In this thesis a STATCOM (Static Synchronous Compensator) is used to mitigate the voltage dips. By injecting reactive power into the coupling point of the arc furnace the STATCOM compensate for the voltage dips. A couple of simulation cases where made on a model of an arc furnace and a STATCOM. As a verification of the model the flicker is measured in each of the simulation cases. It is shown that the flicker is lowered below the level that is considered annoying with this model.

Keywords: STATCOM (Static Synchronous Compensator), arc furnace, reactive power compensation, flicker

Sammanfattning

Ljusflimmer i lampor anses av de flesta människor vara väldigt störande. Flimret leder ofta till huvudvärk och kan för vissa utlösa epileptiska anfall. Industrier, som belastar ett kraftnät, kan skapa spänningsvariationer om dess karaktäristik är obalanserad och olinjär. Om kraftnätet är svagt kan spänningsvariationerna spridas över ett stort geografiskt område, ända ner på distributionsnivå. Kunder, som är inkopplade på samma kraftnät som dessa industrier, kan därför utsättas för ljusflimmer.

Detta arbete har som huvuduppgift att kompensera för spänningsvariationer, som skapats av en ljusbågsugn. En ljusbågsugn är en typisk industriapplikation, som då den smälter metall drar stor och varierande effekt, och på så sätt skapar spänningsvariationer. För att minska störningarna som ljusbågsugnen ger upphov till, används i detta arbete en STATCOM (Static Synchronous Compensator). STATCOM kompenserar för spänningsvariationerna genom att mata in reaktiv effekt i det nät ljusbågsugnen är kopplad mot. Ett antal simuleringsfall på en modell av en STATCOM och en ljusbågsugn utförs. Som verifikation att modellen fungerar tillfredställande mäts flimret i de olika simuleringsfallen. Det visar sig att modellen minskar flimret till nivåer som inte anses störande.

Nyckelord: STATCOM (Static Synchronous Compensator), ljusbågsugn, reaktiv effektkompensering, flimmer

Tillkännagivande

Vi skulle först vilja tacka våra handledare Olof Samuelsson på institutionen för Industriell Elektroteknik och Automation och Olof Karlén på SwedPower AB i Malmö. De har givit oss förtroende och hjälp i detta arbete och även inspirerat oss att göra ett bra jobb, detta är vi väldigt tacksamma för.

Dessutom vill vi tacka Jonas Ottosson och Per Karlsson på institutionen för Industriell Elektroteknik och Automation för deras hjälp under detta examensarbete. Deras svar på våra frågor har varit väldigt givande för detta arbete.

Övrig personal på institutionen för Industriell Elektroteknik och Automation, som vi kommit i kontakt med, vill vi också tacka för att de har skapat en trevlig arbetsatmosfär.

Vi riktar även ett stort tack till våra familjer, vänner och studiekamrater för stort stöd och inspiration under våra år på Lunds tekniska högskola.

Lund december 2005

Pierre Andersson & Daniel Persson

Förkortningar och definitioner

EAF	-	Electric Arc Furnace
EHV	-	Extra High Voltage
GTO-tyristor	-	Gate-Turn-Off-Tyristor
HV	-	High Voltage
IGBT	-	Insulated Gate Bipolar Transistor
LV	-	Low Voltage
MOSFET	-	Metal Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor
MV	-	Medium Voltage
P_{st}	-	Short Term Flicker Severity
P_{lt}	-	Long Term Flicker Severity
PWM	-	Pulse Width Modulation
SSSC	-	Static Synchronous Series Compensator
STATCOM	-	Static Synchronous Compensator
SVC	-	Static VAr Compensator
TCR	-	Thyristor-Control Reactor
TSC	-	Thyristor-Switched Capacitor
VSC	-	Voltage Source Converter

Innehållsförteckning

1	Inledning	3
1.1	Bakgrund	3
1.2	Syfte	3
1.2.1	Ljusbågsugnen	3
1.2.2	Kompensering	4
1.3	Frågeställningar	5
1.4	Mål	5
1.5	Avgränsningar	5
1.6	Disposition	6
2	Flimmer och spänningsvariationer	7
2.1	Uppkomst av flimmer från en ljusbågsugn	7
2.2	Flimmermätning	8
2.2.1	Flimmer	9
2.2.2	Flimmermätare	11
2.2.3	Flimmernivåer	11
3	Reaktiv effektkompensering	13
3.1	Effekt	13
3.1.1	Effektflöden	14
3.1.2	Produktion av reaktiv effekt	14
3.2	Kompensering med kraftelektronik	15
3.2.1	SVC – Static VAR Compensator	15
3.2.2	STATCOM – Static Synchronous Compensator	16
4	STATCOM	18
4.1	Omvandlaren - VSC	19
4.2	Modulation	21
4.2.1	PWM – Pulse Width Modulation	22
4.2.1.1	Skalning av bärvågsamplituden	23
5	Styrenhet	25
5.1	Styrning	25
5.1.1	Styrning av effektflöden	25
5.2	Regleringen	26
5.2.1	Reglering i det synkront roterande d, q -planet	27
5.2.2	Korskopplingstermer	28
5.2.3	Reglering av nätspänningen	30
5.2.4	Reglering av mellanledningsspänningen	30
6	Simulering	32
6.2	Simulering med ljusbågsugn	34
6.2.1	Sinusformade spänningsvariationer	34
6.2.1	Gaussfördelade spänningsvariationer	40
6.3	Simulering av symmetriskt fel på 20 kV-noden	45
6.4	Flimmermätning - simulering	49
6.4.1	Sinusvarierande spänningsvariationer	50
6.4.2	Gaussfördelade spänningsvariationer	51
7	Slutsatser	52

Referenser	53
Appendix A	55
A.1 Trefas till tvåfas transformation	55
A.2 Vektortransformation	56
A.3 Effektinvarians	57

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Många laster, anslutna till elektriska kraftsystem, orsakar kvalitetsproblem på alla spänningsnivåer på grund av dess obalanserade och olinjära karaktäristik. Typiska laster, som orsakar problem för närliggande kunder, är industrier som slukar mycket effekt. Industrier, som drar stora och mycket varierande aktiva och reaktiva effekter, kan ge upphov till snabba repetitiva spänningsvariationer med övertoner, obalans och tydlig distorsion. Kunder, som har sin elförsörjning från samma nät som dessa industrier, utsätts även de för spänningsvariationer som kan leda till t ex flimmar i lampor. Detta arbete har sitt fokus på en specifik industriapplikation, den så kallade ljusbågsugnen, som används vid metallsmältning.

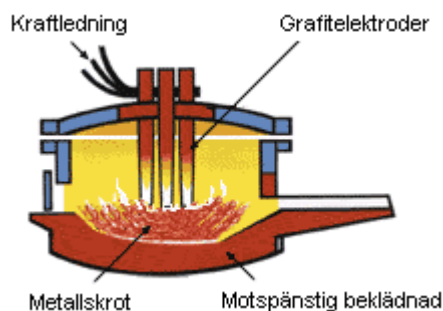
1.2 Syfte

För att motverka störningarna, som ljusbågsugnen ger upphov till i nätet, krävs någon form av reaktiv effektkompensering. Den vanligaste metoden för reaktiv effektkompensering är en så kallad SVC (Static VAR Compensator). En annan metod för reaktiv effektkompensering har tagits fram, en så kallad STATCOM (Static Synchronous Compensator). Detta arbete har för avsikt att implementera en STATCOM, med hjälp av PSCAD/EMTDC, för att sedan utvärdera kompenseringen av störningar som en ljusbågsugn ger upphov till, genom att jämföra hur mycket flimret har reducerats.

1.2.1 Ljusbågsugnen

Det finns ett antal olika sorters ljusbågsugnar som endast i detalj skiljer sig ifrån varandra. Framförallt används två sorters ljusbågsugnar, en för att hålla smält metall i flytande form och en för smältning av metall. Ljusbågsugnar, som används för att hålla metallen smält, kallas strålningsugnar [1]. Strålningsugnar ger inte upphov till lika mycket störningar i nätet som ljusbågsugnar, vilka används vid smältning av metall. Detta arbete har sitt fokus på att kompensera oönskade variationer i spänningen på nätet där ugnen är inkopplad, och därför studeras endast fallet där en ljusbågsugn för smältning av metall används. Vidare i detta arbete kommer ljusbågsugn för smältning av metall att benämnas som enbart ljusbågsugn.

Ljusbågsugnar, som används i stor utsträckning vid återvinning av metall, består av ett motspänstigt beklätt kärl, ofta vattenkyllt, med skjutbart tak där grafit Elektroder kan föras ner. I en växelströmsugn används tre grafit elektroder som är anslutna till ett trefas nät. En ljusbåge uppstår mellan grafit elektroder och metallskrotet, vilket både värms upp av strömmen som passerar igenom det och den utstrålade energin som utvecklas av ljusbågen. Därför behövs inga värmeelement eftersom metallen själv fungerar som element. Den typiska storleken på dagens ljusbågsugn är 140-200 MVA. En bild av en ljusbågsugn ses i figur 1.1 nedan.



Figur 1.1. Förenklad figur av en ljusbågsugn.

Problemen med oönskade spänningsvariationer i kraftnätet, vilka uppstår på grund av en ljusbågsugn, beror på två avgörande skeden. Då både fast och flytande metall finns i ugnskärlet och då ugnskärlet endast består av flytande metall. Båda dessa skeden karaktäriseras av kraftigt stokastiska variationer i den reaktiva effekt som ljusbågsugnen slukar av kraftnätet, dock är fasen med både fast och flytande metall mest kritisk.

1.2.2 Kompensering

För att begränsa störningar på kraftnätet, som skapas av en ljusbågsugn, installeras oftast någon form av reaktiv effektkompensering. Utan reaktiv effektkompensering kan störningar från en ljusbågsugn i drift leda till spänningsvariationer i nätet, vilket kan orsaka flimmer i ljuset från t ex glödlampor. Flimmer i ljuset från glödlampor kan i sin tur leda till irritation för ögonen och detta kan orsaka huvudvärk, migrän och epileptiska anfall för personer som lider av denna sjukdom. Flimmer i ljuskällor är mest påtagligt för det mänskliga ögat om frekvensen på repetitiva spänningsvariationer är 8-10 Hz. Det mest effektiva sättet att kontrollera spänningsvariationerna, och på så vis dämpa flimret, är att kompensera för variationer av reaktiv effekt i lasten, framförallt i medel- och högspänningsnivåerna.

1.3 Frågeställningar

Detta arbete kommer att behandla ett antal relevanta frågeställningar:

- Är det möjligt att kompensera spänningsvariationer som en ljusbågsugn ger upphov till med STATCOM?
- Kan flimmernivåerna sänkas under den gräns som anses vara störande för människor?
- Är det möjligt att injicera önskad reaktiv effekt genom att enbart använda en kondensator som energilager?
- Klarar en STATCOM att kompensera ett symmetriskt trefas-fel?

1.4 Mål

Det ena målet med detta examensarbete är att modellera en flimmerdämpande STATCOM ansluten till en ljusbågsugn med hjälp av simuleringsprogrammet PSCAD/EMTDC. För att uppnå ett önskat resultat implementeras modellen med:

- Likspänning-till-växelspänningsomvandlare
- 6-puls, 2-nivå IGBT brygga
- PWM modulering för till- och frånslag av IGBT
- Kaskadkopplade reglerkretsar för styrning av effektlöden

Delarna i modellen beskrivs mer ingående nedan i kapitel 4, STATCOM, och kapitel 5, Styrenhet. Det andra målet med arbetet är att få svar på frågeställningarna.

1.5 Avgränsningar

I detta arbete kommer det inte att tas någon hänsyn till övertoner, detta enligt arbetsbeskrivningen. Eftersom detta arbete handlar om principen att kompensera med STATCOM har storleken på strömmar genom och spänningar över transistorerna inte tagits hänsyn till i designen, dock är de inom realistiska nivåer.

1.6 Disposition

Kapitel 2 innehåller förklaring av vad flimmer är och hur det uppstår. Dessutom förklaras hur mätningar av flimmer kan utföras.

Kapitel 3 förklarar hur effekter skapas och används för kompensering. Några olika metoder för kompensering beskrivs även.

Kapitel 4 beskriver en STATCOMs uppbyggnad och dess beståndsdelar i detalj.

Kapitel 5 förklarar hur styrningen av effektlöden utförs och tanken bakom regleringen av dessa beskrivs.

Kapitel 6 visar resultaten av simuleringarna som utförts.

Kapitel 7 presenteras slutsatser och svar på frågeställningarna.

2 Flimmer och spänningsvariationer

Enligt [2] är flimmer ett problem som är relaterat till mänsklig syn och utstrålat ljus, från t ex en glödlampa. Det är inte en generell term för spänningsvariationer.

Spänningsavvikelse, som ger upphov till störande flimmer, är oftast så små att de inte påverkar elektrisk utrustning. Det är alltså hur spänningsavvikelsen påverkar människan som gör detta till ett problem. Som nämnts tidigare i inledningen, är det repetitiva spänningsvariationer med frekvensen 8-10 Hz som syns tydligast för mänskliga ögat. Är frekvensen på variationerna 8-10 Hz räcker det att amplitudförändringen är några få tiondelar av en procent för att flimret ska uppfattas som störande. Spänningsavvikelsen, som dock ej behöver vara repetitiv för att anses vara störande, uttrycks oftast som en förändring jämfört med spänningen i stationärt tillstånd. Spänningsvariationen uttrycks $\Delta U/U$.

I detta arbete kommer simuleringar utföras på en ljusbågsugn som ger upphov till variationer i nätspänningen. Dessa variationer kan förinställas att ha sinusformat och gaussfördelat utseende. Utseendet före och efter kompensering av dessa variationer kan ses i kapitel 6, Simulering.

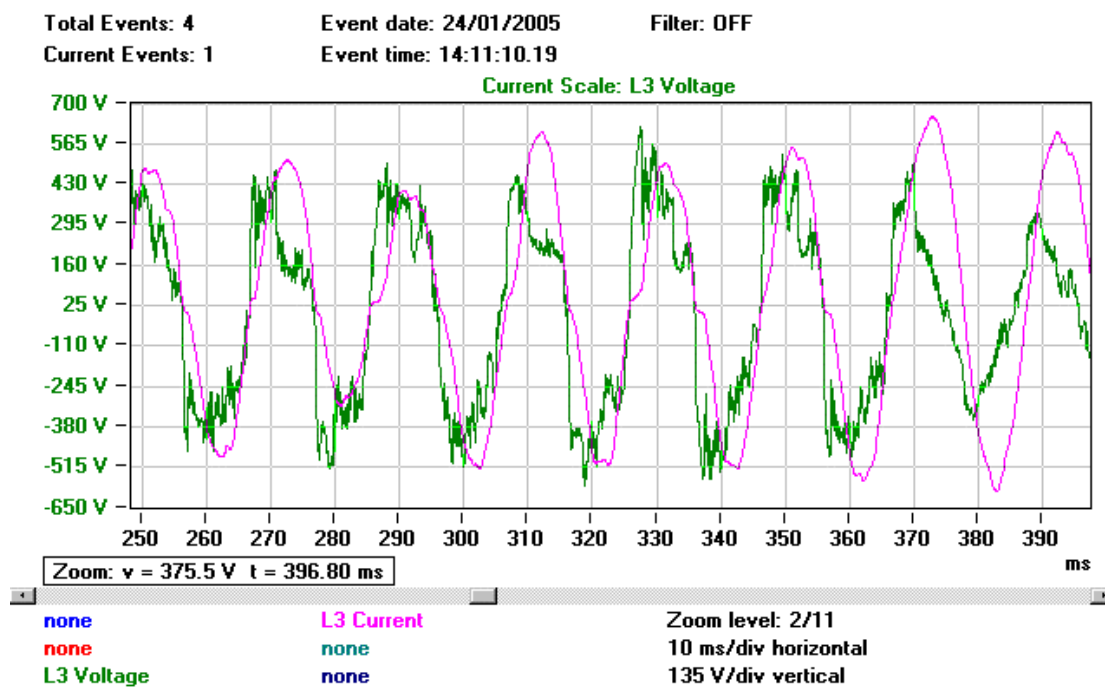
2.1 Uppkomst av flimmer från en ljusbågsugn

En ljusbåge är en elektrisk urladdning i gas mellan två elektroder. Elektroner som går mellan katoden och anoden joniserar gasen som då blir elektriskt ledande. Spänningen mellan elektroderna är låg men strömmen hög. Ljusbågens och elektrodernas temperatur är ca 6000° C, vilket är tillräckligt för att smälta metall [3].

I en ljusbågsugn uppstår en ljusbåge mellan en elektrod och det metallskrot som ska smältas. När det gäller distorsion är den mest kritiska fasen nedsmältningens inledningsskede. Då uppför sig ljusbågsugnen som en obalanserad och olinjär last med låg effektfaktor. Svängningar i lastströmmens reaktiva och aktiva komponenter, vilka uppkommer på grund av obalans, ger upphov till stora spänningsvariationer på distributionsnätet [4]. Kunder, som har sin elförsörjning från ett svagt nät där stora obalanserade laster är anslutna, kommer sannolikt att uppleva flimmer i sina lampor.

Att ljusbågsugnen uppför sig som en olinjär last beror på ljusbågens karaktäristik. Det krävs en viss tröskelspänning mellan elektroderna och metallskrotet innan urladdningsströmmen kan ge upphov till en ljusbåge. I figur 2.1 ses mätningar av ström och spänning utförda på ljusbågsugn i drift. Det är svårt att få en stabil ljusbåge

under hela nedsmältningen då förhållandena snabbt ändrar sig, metallskrotet kommer att förflyttas i ugnskärlet och ljusbågens längd förändras därmed. Ljusbågens stabilitet och längd kommer i stor utsträckning påverka hur mycket flimmer och övertoner som kommer att fortplanta sig ut på nätet.



Figur 2.1. Mätning av ström och spänning vid drift av ljusbågsugn i Halmstadsverken. Figuren har tillhandahållits av SwedPower AB i Malmö

Kurvan med mycket rippel representerar spänningen över ljusbågsugnen och den andra kurvan strömmen. Spänningen är graderad på y-axeln, med ett toppvärde på ungefär 430 V. Det som inte framgår i figuren är dock graderingen på strömmen. Strömmens toppvärde är ungefär 40 kA.

2.2 Flimmermätning

Som nämnts tidigare kan spänningsvariationer som en ljusbågsugn ger upphov till leda till flimmer i ljuset. Dessa spänningsvariationer kan spridas över stora områden om nätet är svagt. Människor kan vara känsliga för flimmer, vilket kan leda till bland annat irritation i ögonen och huvudvärk. Detta är ett av de starkaste skälen till att begränsa spänningsvariationer.

Vidare i detta kapitel används en del definitioner vilka benämns i [5]. Dessa förklaras nedan.

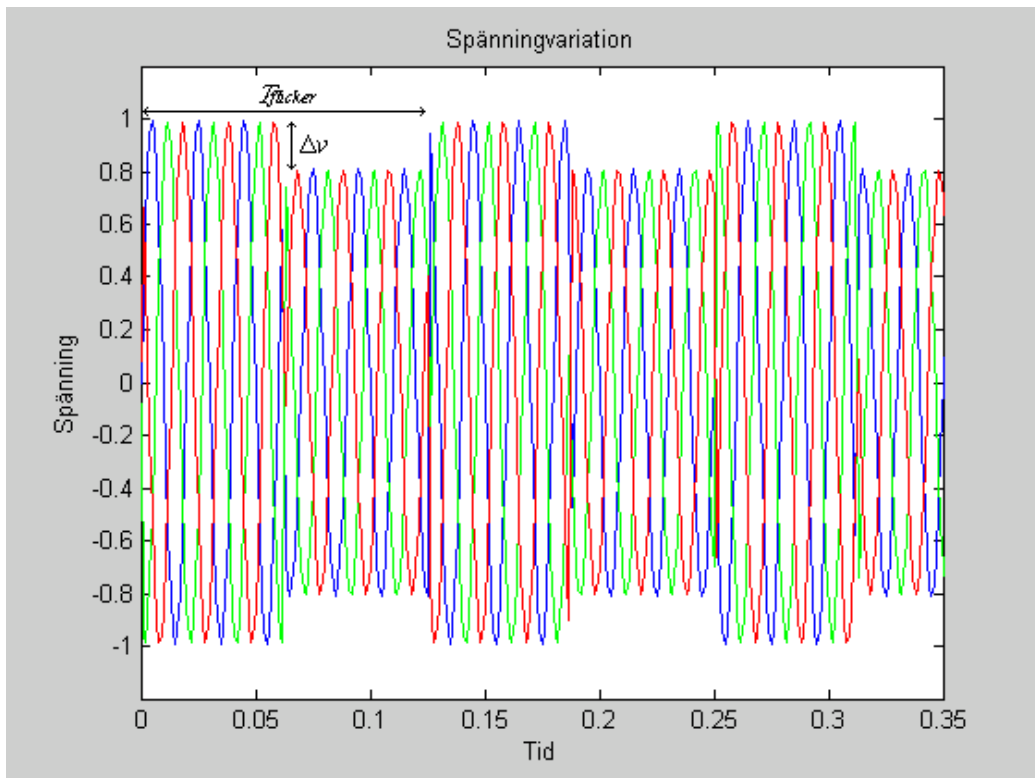
- **P_{st}** - är ett värde uppmätt under tio minuter som ett mått på att spänningsvariationerna kommer att resultera i störande synligt ljusflimmer.
- **P_{lt}** - är ett värde uppmätt under två timmar av tolv P_{st} värden.
- **EHV** – Spänningsnivåer över 230 kV
- **HV** – Spänningsnivåer över 35 kV men under 230 kV
- **MV** – Spänningsnivåer över 1 kV men under 35 kV
- **LV** – Spänningsnivåer under 1 kV
- **Planeringsnivå** – Nivån av en särskild störning i en särskild miljö vilken används som ett referensvärde för begränsningen av tunga lasters upphov till störningar. Vid planering används P_{st} eller P_{lt} som ett mått på den påverkan en viss varierande last får på det kraftnät, vilken den kopplats mot.

2.2.1 Flimmer

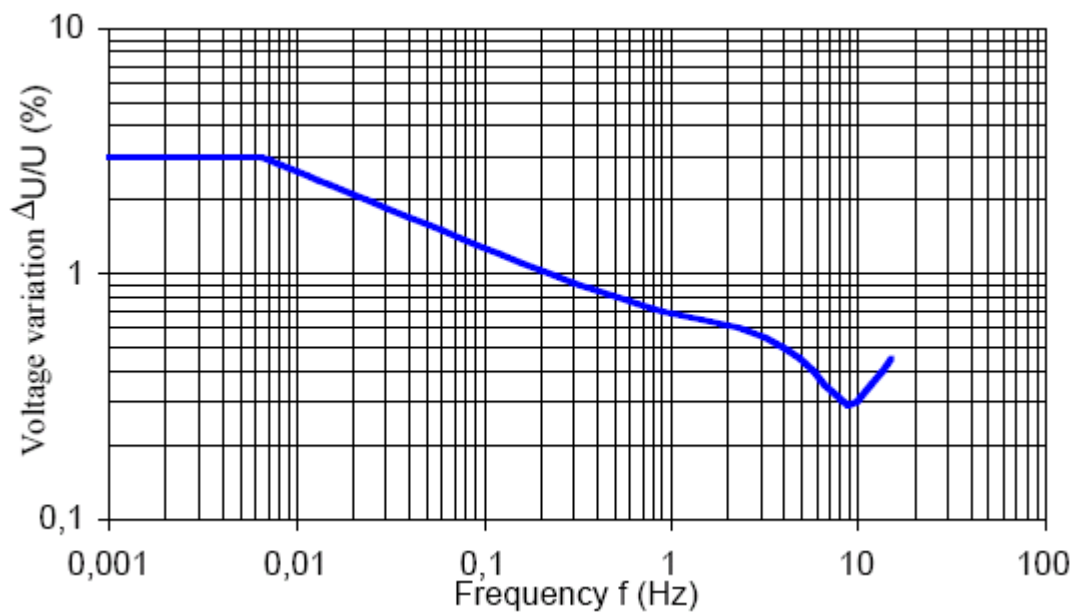
IEC har härlett P_{st} och P_{lt} från studier på 230V, 50Hz, 60W glödlampor. Dessa värden används framförallt i Europa där sådana spänningar och lampor används.

Ett exempel på utseendet av en trefas-signal, med 8 Hz fyrkantsformad spänningsvariation, illustreras i figur 2.2

I [6] finns resultaten av mätningar där människors känslighet för flimmer undersökts. $P_{st} = 1$ anses vara lägsta nivån för vad som verkar störande för människor. Testen är utförda med spänningsvariationer som i figur 2.2 nedan, där den procentuella spänningsavvikelsen $\Delta U/U$ ger $P_{st} = 1$ vid en viss frekvens. $P_{st} = 1$ -kurvan ses nedan i figur 2.3. Då $P_{st} > 1$ sägs 50 % av befolkningen störas av flimret [5].



Figur 2.2. Spänning med fyrkantformad variation.



Figur 2.3. Traditionella flimmerkurvan för $P_{st} = 1$ vid fyrkantsformad spänningsvariation.

2.2.2 Flimmermätare

Då spänningsvariationens utseende inte är känd, måste P_{st} mätas med en flimmermätare [7]. Mätaren omvandlar spänningsvariationer till variation i ljusstyrka, vilken används för att bestämma synintrycket av variationen i ljusstyrka. Därefter simuleras en hjärnas gensvar av ljusflimmer, hela processen kallas ofta "lamp-eye-brain response" [8]. Signalen som fås från denna process samplas och området den rör sig i delas in i 64 klasser [8]. Tiden som signalen spenderar i varje klass summeras. Av de 64 summorna skapas en kumulativ sannolikhetsfunktion där ett antal utjämnade percentiler¹ beräknas enligt ekvation (2.1) – (2.4) nedan.

$$P_{50s} = \frac{(P_{30} + P_{50} + P_{80})}{3} \quad (2.1)$$

$$P_{10s} = \frac{(P_6 + P_8 + P_{10} + P_{13} + P_{17})}{5} \quad (2.2)$$

$$P_{3s} = \frac{(P_{2.2} + P_3 + P_4)}{3} \quad (2.3)$$

$$P_{1s} = \frac{(P_{0.7} + P_1 + P_{1.5})}{3} \quad (2.4)$$

$P_{0.1}$ utjämnas ej på grund av att mätarens tidskonstant oftast är större än 0.1 s. De utjämnade percentilerna används sedan för att beräkna P_{st} enligt ekvation (2.5).

$$P_{st} = \sqrt{0.0314P_{0.1} + 0.0525P_{1s} + 0.0657P_{3s} + 0.28P_{10s} + 0.08P_{50s}} \quad (2.5)$$

Flimmer under en längre tidsperiod är mer störande än under en kort, därför har P_{lt} ett lägre värde än P_{st} . Värdet på P_{lt} beräknas enligt ekvation (2.6) nedan.

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{12} \frac{P_{sti}^3}{12}} \quad (2.6)$$

2.2.3 Flimmernivåer

I [4] och [5] visas de nivåer på P_{st} och P_{lt} som är framtagna för att flimret, som blivit utsänt av en enskild källa, inte ska vara störande för ett mänskligt öga. Dessa gränser används på ett planeringsstadium för motverkan av flimmer. Gränserna ses nedan i tabell 2.1.

¹ Ett värde som i en statistisk fördelning avgränsar en viss procentandel av sannolikheten eller observationerna [14].

Tabell 2.1. Nivåer för P_{st} och P_{lt}

Planeringsnivåer		
	MV	HV-EHV
P_{st}	0.9	0.8
P_{lt}	0.7	0.6

Enligt [4] och [5] finns det även nivåer på P_{st} och P_{lt} för spänningsnivåer under 1 kV. Detta behandlas dock inte i detta arbete då systemet, som simulationer utförs på här, innefattar nätspänningar i området 22 kV – 135 kV.

3 Reaktiv effektkompensering

För att minska spänningsvariationer i elnätet, vilka kan ge upphov till flimmer, behövs någon form av kompensering. Spänningen i elnätet kan regleras genom att reglera flödet av reaktiv effekt som levereras till nätet. Detta kapitel behandlar hur flödet av reaktiv effekt kan kontrolleras och vilka metoder som kan användas för reaktiv effektkompensering.

3.1 Effekt

Reaktiv effekt, Q , kan till skillnad från aktiv effekt, P , inte omvandlas till mekaniskt arbete. Reaktiv effekt kan istället ses som en oscillation av energi mellan last och generator. Den reaktiva effekten är imaginärdelen av den komplexa effekten \bar{S} , ekvation (3.1).

$$\bar{S} = \bar{U} \cdot \bar{I}^* = P + jQ \quad (3.1)$$

För ett enfasigt system kan den komplexa effekten \bar{S} delas upp i aktiv och reaktiv effekt, ekvation (3.2) och (3.3).

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (3.2)$$

$$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi \quad (3.3)$$

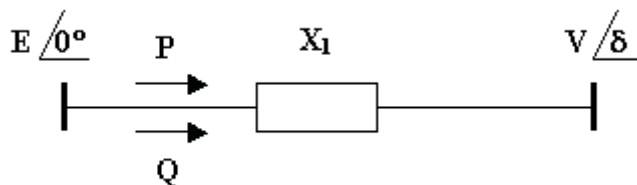
φ är vinkeln mellan spänningen \bar{U} och strömmen \bar{I} . $\cos \varphi$ kallas för effektfaktor och anger hur stor andel av den skenbara effekten S som är aktiv effekt P . Aktiv, reaktiv och skenbar effekt har alla olika enheter, fast de alla är produkter av spänning och ström, tabell 3.1.

Tabell 3.1 Effekttorheter och dess enheter.

Storhet	Enhet	Förkortning
Skenbar effekt, S	Voltampere	VA
Aktiv effekt, P	Watt	W
Reaktiv effekt, Q	Voltampere reaktiv	var

3.1.1 Effektflöden

Effektflödet i en förlustfri distributionsledning illustreras med hjälp av figur 3.1. Ledningen med en reaktans X_l kopplar ihop en referensnod med en lastnod.



Figur 3.1. Effektflöden i en distributionsledning.

Flödet av reaktiv och aktiv effekt, från referensnoden, över ledningen ges av ekvation (3.4) och (3.5).

$$P = \frac{E \cdot V}{X_l} \cdot \sin \delta \quad (3.4)$$

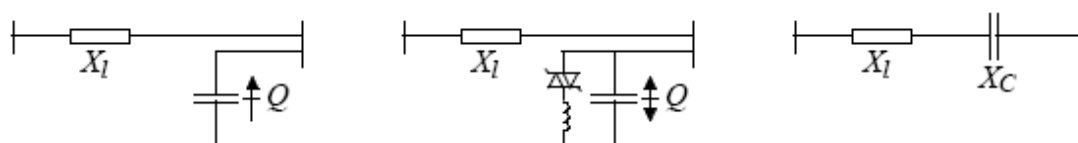
$$Q = \frac{E}{X_l} \cdot (E - V \cdot \cos \delta) \quad (3.5)$$

E är referensspänningen vid den styva noden, V är spänningen vid lastnoden och δ vinkelskillnaden mellan spänningarna [9].

Från (3.5) kan det ses att ett stort flöde av reaktiv effekt motsvarar ett stort spenningsfall över ledningen och att en svag ledning, dvs. stor reaktans X_l , minskar förmågan att överföra både aktiv och reaktiv effekt. Om spänningen V varieras kan effektflödena regleras genom att ändra spänningens amplitud och fas.

3.1.2 Produktion av reaktiv effekt

Spänningen vid lastnoden kan hållas vid sitt nominella värde genom att styra tillförseln av reaktiv effekt. Ett enkelt sätt för att höja spänningen är att koppla in en kondensator parallellt med lasten. I en kondensator, som matas med växelspanning, är spänningen 90° efter strömmen. Det leder till att en reaktiv ström kommer att injiceras i lastnoden. Parallellkopplade kondensatorer är vanliga i distributionsnätet, där de kopplas in och ur för att hålla spenningsamplituden vid sitt nominella värde när lasten varierar under dagen. Ett par sätt, som reaktiv effektkompensering kan åstadkommas på, kan ses i figur 3.2 [9].



Figur 3.2. Reaktiv kompensering; parallell (vänster), TCR (mitten) och serie(höger).

En parallellkopplad kondensator kan kompletteras med en tyristorstyrd reaktor, TCR, för att få en flexiblarare kompensering. En sådan koppling kan absorbera effekt under lätt belastning och leverera effekt vid hög belastning. Denna kombinationen kan ses som en parallellkopplad kondensator med variabel och med negativ kapacitans.

En kondensator i serie med ledningen kan också fungera som en form av reaktiv effektkompensering. Kondensatorn minskar ledningens impedans sett från källan och minskar på så sätt spänningsfallet på ledningen och ökar förmågan att belasta ledningen mer.

På senare år har mer avancerade kompenseringmetoder utarbetats, vars struktur bygger på kraftelektronik.

3.2 Kompensering med kraftelektronik

De flesta tidigare metoderna för att kompensera för de negativa effekterna som en ljusbågsugn har på det närliggande elnätet, bygger på tyristorstyrda komponenter som är inkopplade parallellt med ljusbågsugnen. SVC är den vanligaste kompenseringmetoden, vilken använder denna teknik. Det senaste årtiondet har stora framsteg gjorts i användandet av kraftelektronik för att förbättra elkvalitén. Tillgången på GTO-tyristorer, som klarar hög effekt, har möjliggjort att bättre kompenseringmetoder har kunnat tas fram. STATCOM är en sådan metod. Den bygger på antingen GTO-tyristorer eller IGBT.

3.2.1 SVC – Static VAR Compensator

SVC är den vanligaste metoden för att reducera spänningsvariationer i elnätet. En typisk SVC består av en tyristorstyrd reaktor, TCR, kombinerat med ett passivt filter, se figur 3.3. Det finns även mer avancerade SVC som både innehåller en TCR och tyristorstyrd kapacitans, TSC.

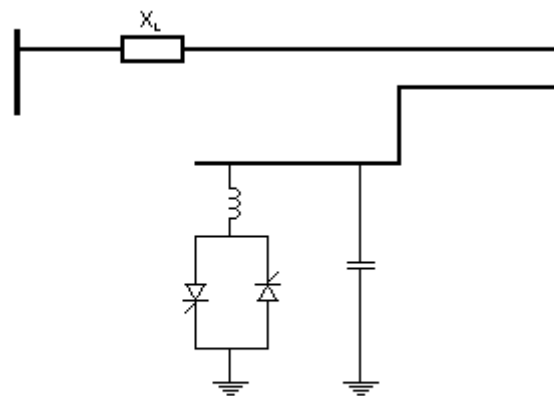
En SVC kan absorbera reaktiv effekt från nätet vid lätt belastning och leverera reaktiv effekt vid hög belastning. Med hjälp av styrning av tyristorerna kan spänningsvariationer i nätet minskas genom att antingen dra eller leverera reaktiv effekt.

SVC har dock en del begränsningar när det gäller dämpning av de spänningsvariationer i nätet, som ljusbågsugn i drift ger upphov till. En SVC kan inte reglera flödet av reaktiv effekt så snabbt att den reducerar tillräckligt stor del av spänningsvariationerna. När en tyristor väl är satt i ledtillstånd, så går den inte över i blocktillstånd förrän spänningen över den har gått under en viss nivå. Det leder till att

tyristorn bara kan styras med stora tidssteg [15]. En annan nackdel med SVC är att den skapar övertoner som injiceras i nätet, ofta krävs det att SVC:n kompletteras med filter för att ta bort övertonerna.

En SVC kan endast reducera flimmer med en faktor 2 [4]. En begränsning med SVC:n är att den inte kan leverera någon aktiv effekt alls. Den aktiva effekt, som ljusbågsugnen drar, är inte konstant, utan varierar en del och svängningarna av denna kommer att skapa skillnader i fasvinkeln vid den kritiska noden, som på så sätt kan medverka till att skapa flimmer.

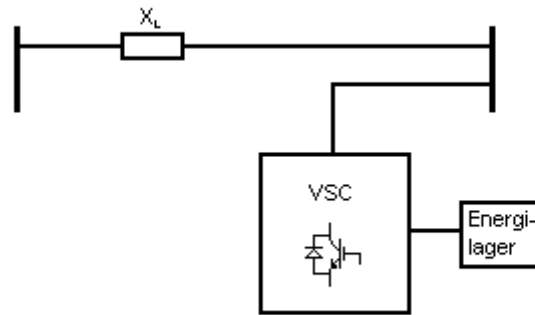
Med GTO-tyristorer, MOSFET eller IGBT, vilka klarar hög effekt, kan en SVC där kontrollsystemet bygger på PWM implementeras. Flödet av reaktiv effekt blir då lättare att styra och övertonerna minskar. STATCOM är dock ändå ett bättre alternativ för att dämpa spänningsvariationer i nätet på grund av högre dynamik.



Figur 3.3. SVC med TCR och kondensator.

3.2.2 STATCOM – Static Synchronous Compensator

Kärnan i en STATCOM är en spänningsomvandlare, VSC (Voltage Source Converter). Den omvandlar en spänning till en annan med hjälp av switchning. VSC:n kopplas i en STATCOM parallellt med lasten, figur 3.4., men kan även kopplas in i serie med lasten och då fås en SSSC. VSC:n behandlas mer i kapitel 4 och styrningen av switchningen behandlas i kapitel 5.



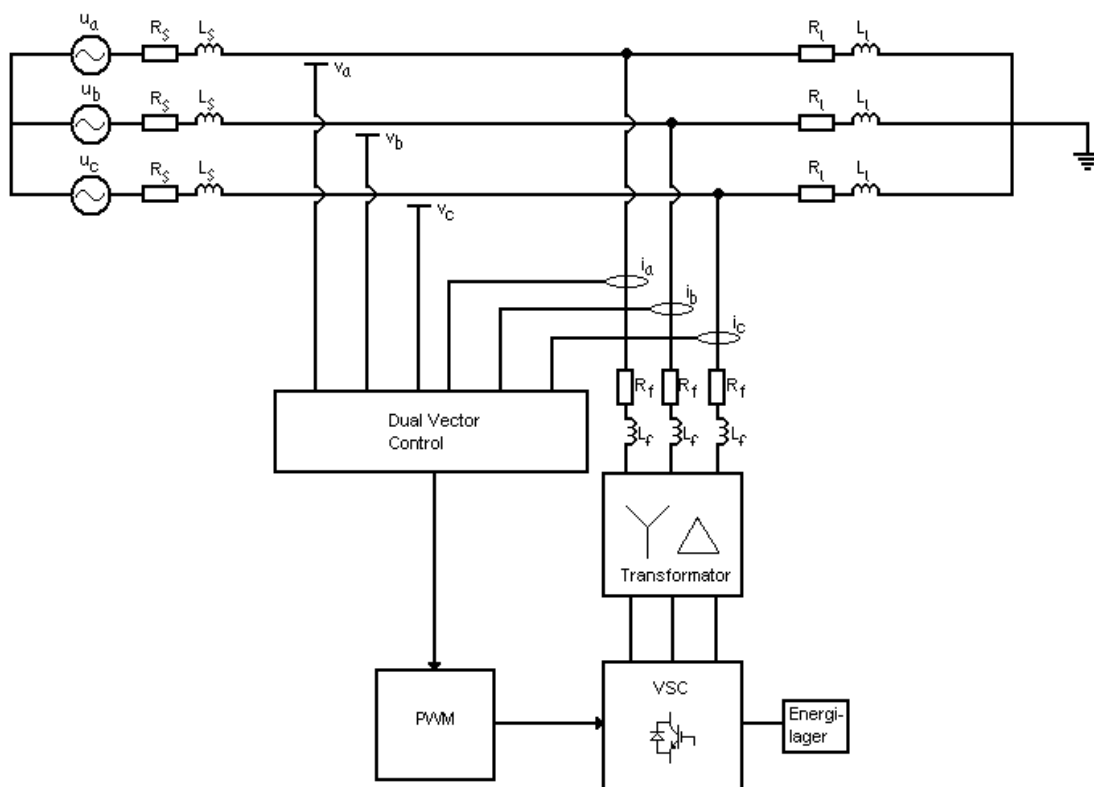
Figur 3.4. STATCOM inkopplad parallellt med last.

En STATCOM kan leverera både aktiv och reaktiv effekt till nätet där den är inkopplad. Reaktiv effekt kan levereras till nätet kontinuerligt, medan aktiv effekt bara kan levereras under korta intervaller. Vanligtvis används inte någon fast spänningskälla för att hålla dc-nivån över transistorbryggan, utan en kondensator används istället för att lagra energi och hålla spänningsnivån över transistorbryggan konstant. Aktiv effekt kan inte dras kontinuerligt eftersom kondensatorn då urladdas och spänningsnivån över bryggan sjunker.

Som nämnts tidigare, kan en SVC med en effektklassning som är i samma storleksordning som ljusbågsugnen, reducera flimmer med en faktor 2. En STATCOM med samma effektklassning kan reducera flimmer med en faktor 4. Till skillnad från en SVC, kan en STATCOM dessutom förbättra reduktionen av flimmer genom en högre effektklassning. En annan fördel med STATCOM är att lite övertoner genereras och behovet av filter är inte så stort jämfört med när en SVC används. Amplituden och fasen på utspänningen från transistorbryggan kan styras väldigt snabbt, vilket leder till att en snabb respons kan fås på ändringar i nätspänningen. Uppbyggnaden av en STATCOM beskrivs mer ingående i kapitel 4.

4 STATCOM

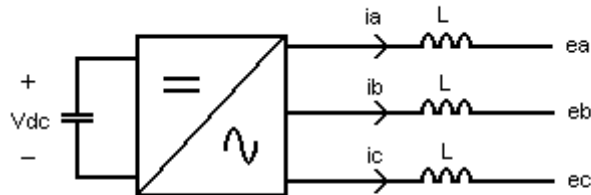
I det här kapitlet kommer uppbyggnaden av en STATCOM och dess olika byggblock att studeras närmare. Kärnan i en STATCOM är en spänningsomvandlare, VSC. En snabb styrning av spänningen ut från omvandlaren åstadkoms genom att pulserna som styr switchningen skapas med PWM (Pulse Width Modulation). För att på ett effektivt sätt dämpa spänningsvariationer, som en ljusbågsugn ger upphov till, från att fortplanta sig i elnätet, bör kompensering kopplas in så nära ljusbågsugnen som möjligt [10]. Nätet ljusbågsugnen är kopplad till, kan på ett förenklat sätt representeras av en spänningskälla i serie med en impedans. En schematisk bild över nätet med en STATCOM inkopplad blir då som i figur 4.1.



Figur 4.1. Schematisk bild över STATCOM där R_1 och L_1 representerar ljusbågsugnen.

4.1 Omvandlaren - VSC

Omvandlaren, VSC, används för att konvertera en dc-spänning till en trefasig ac-spänning, figur 4.2, med en amplitud och fas som gör att rätt mängd aktiv och framförallt reaktiv effekt injiceras i nätet så att nätspänningen hålls konstant. Pulserna som styr switchningen av transistorerna, och då även utsignalen från omvandlaren, skapas med PWM. Spänningen över kondensatorn, V_{dc} , kallas mellanledningsspänningen.

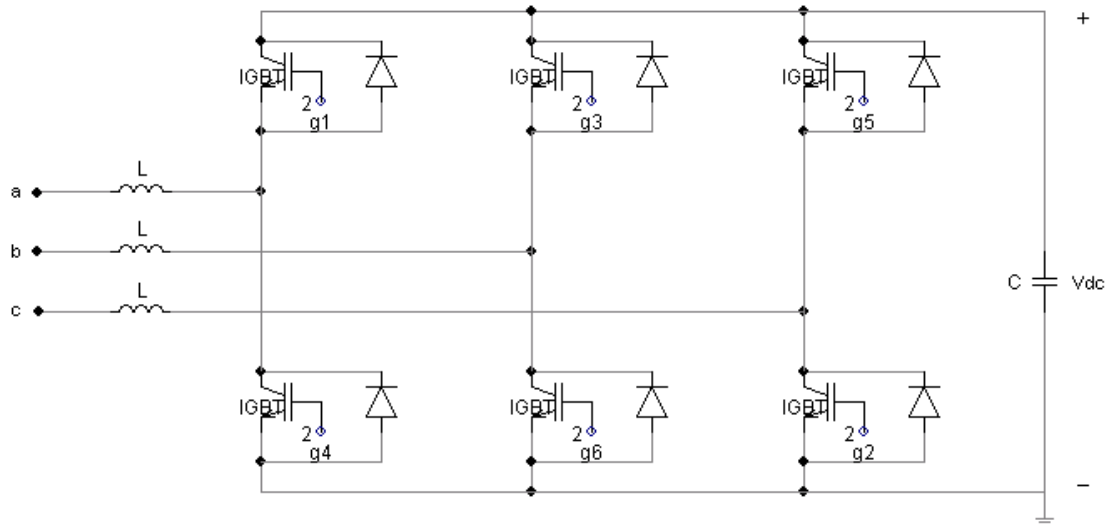


Figur 4.2. DC till AC omvandlare med en kapacitiv och en induktiv sida.

Eftersom en STATCOM överför stora effekter används krafthalvledare som switchventiler. Switchventilerna, i detta arbete IGBT:er, styrs att antingen vara helt ledande eller helt strypta, det vill säga de är antingen kortslutna eller avbrott. På grund av att spänningsfallet över transistoren, då den leder, är 1-3 volt och att switchperioderna är korta, är förlusterna relativt den omvandlade effekten små [9]. Detta innebär att verkningsgraden ofta ligger över 95% [11].

För att inte stora ström- och spänningstransienter ska rusa genom de switchande transistorerna krävs det att omvandlaren kopplas mot en spänningsstyv krets på ena sidan och en strömstyv krets på andra. Oftast kopplas omvandlaren mot en kapacitiv och en induktiv sida, figur 4.2. Krafterelektroniska omvandlare modulerar typiskt spänningen på den induktiva sidan. Spänningsmodulation innebär att momentanvärdet för utspänningen alternerar mellan två nivåer, t ex två dc nivåer. Det är dock inte möjligt att reglera spänningens momentanvärde, men eftersom utspänningen moduleras periodiskt kan medelvärde och spänningstidsytan regleras för varje modulationsperiod.

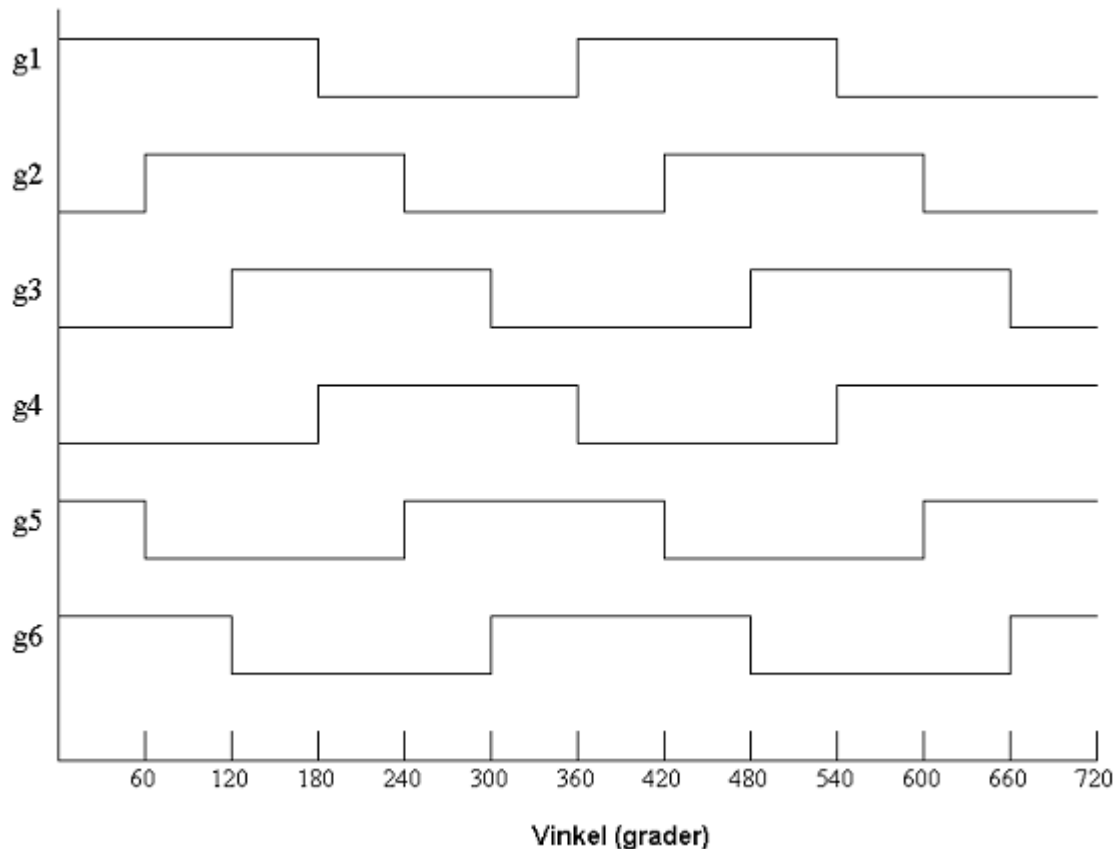
Omvandlaren som används i kapitel 6, Simulering, är en 2-nivå 6-pulsomvandlare, figur 4.3. Spänningen ut från var och ett av omvandlarens fasben kan vara antingen V_{dc} eller 0 V. Dioderna bildar en likriktarbrygga som gör att ac-spänningen från de tre faserna bildar en dc-spänning över kondensatorn. För att få en sinusformad utspänning istället för pulsförmad, så används en induktans som filter på utgången.



Figur 4.3. 2-nivås 6-puls omvandlare.

Som switchventiler i omvandlaren används IGBT:er. IGBT:n har MOSFET:ens och bipolär-transistorns bästa egenskaper, som t ex hög genombrottsspänning, korta omslagstider och låga switchförluster i en och samma krets. Detta gör att IGBT:n har den överlägset bästa prestandan som switchventil. En annan fördel med IGBT, jämfört mot t ex en GTO-tyristor, är att en högre moduleringsfrekvens kan användas. För en GTO-tyristor är det möjligt att ha en modulationsfrekvens på ungefär 1 kHz, jämfört med 10 - 100 kHz hos en IGBT, vilket leder till att de låga övertonerna inte blir lika påtagliga.

För att kunna styra de sex IGBT:erna i omvandlaren, figur 4.3, behövs var och en av transistorerna matas med en gate-signal. Pulsmönstret för de 6 gate-signalerna g1, g2, g3, g4, g5, g6 blir som i figur 4.4. Varje gate-signal kan ha antingen värdet 0 eller 1, vilket motsvarar att transistoren är strypt respektive helt ledande. I figuren kan det ses att fasskillnaden mellan pulserna för de sex transistorerna är 60° . Vidare kan ses att fasskillnaden för de gate-signaler, t ex g1 och g4, som styr transistorerna, vilka sitter på samma fasben, är 180° . Detta beror på att transistorerna inte kan vara helt ledande samtidigt, för då kortsluts fasbenet. Detta leder till att en stor ström rusar genom transistorerna, och kondensatorn, som ska hålla spänningen över transistorerna, töms på sin energi.



Figur 4.4. Pulsmönster för switchning av omvandlaren.

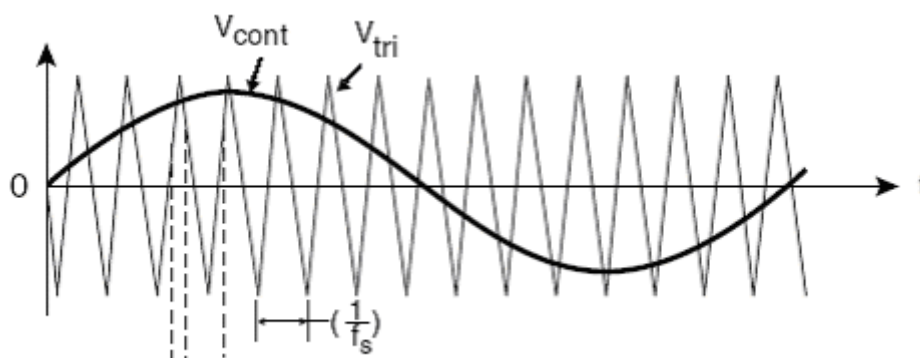
4.2 Modulation

Då en dc-signal ska omvandlas till en ac-signal, krävs det att switchventilerna är öppna eller stängda efter ett visst mönster. Detta mönster skapas genom att börvärdet på spänning eller spänningstidsyta omvandlas till ett pulsmönster med hjälp av en modulator. Pulsmönstret används sedan som styrsignal till en enskild transistor eller ett helt fasben. Modulatorn kan sägas vara ett gränssnitt mellan reglerelektroniken och kraftelektroniken, där de önskade förändringarna från regulatorn omvandlas till signaler för att styra kraftelektroniken. Från reglerelektroniken ges ett kontinuerligt börvärde som sedan omvandlas till diskreta nivåer, till och från, i modulatorn.

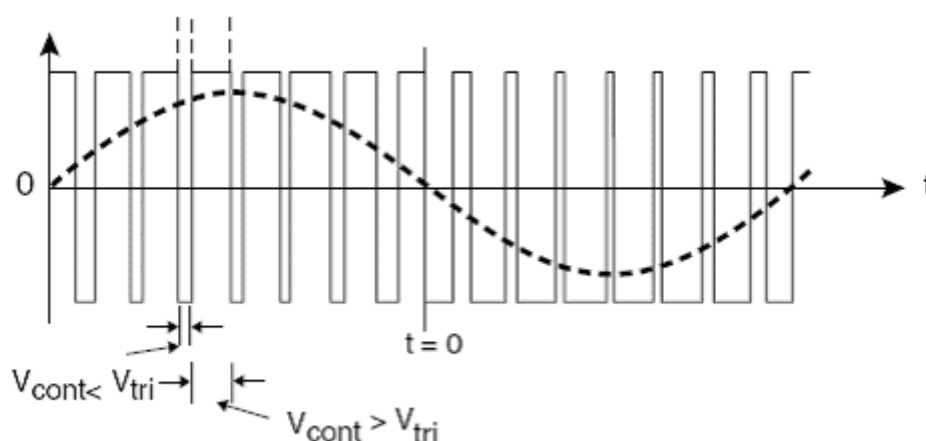
För att skapa pulserna, som styr transistorernas till och frånslag, används PWM med fördel. Vid PWM används en triangelformad bärvåg vars värde jämförs med börvärdet i spänning eller spänningstidsyta och på så sätt skapas ett sinusformat pulsmönster.

4.2.1 PWM – Pulse Width Modulation

För att skapa ett pulsmönster för styrning av transistorerna jämförs styrsignalen, som är en sinusformad våg, med en triangelvåg, figur 4.5. För att resultatet av switchningen ska bli en sinusformad signal med en önskad frekvens på utgången, krävs det att styrsignalen har just denna frekvens. Bredden av pulserna ut från PWM följer ett mönster som är sinusformat, figur 4.6.



Figur 4.5. Styrsignal och triangelvåg.



Figur 4.6. Pulsmönstret ut från PWM och styrsignalen.

Switchfrekvensen beror på triangelvågens frekvens, vilken oftast hålls konstant. Triangelvågens frekvens, f_s , kallas bärvågsfrekvens och switchfrekvensen får samma värde. Styrsignalen v_{cont} används för att modulera hur länge transistorn är i ledtillstånd och dess frekvens benämns f_m . Signalen på utgången kommer inte att vara en perfekt sinusvåg, då signalen kommer att innehålla övertoner. Modulationsindex för amplituden m_a definieras som

$$m_a = \frac{\hat{V}_{cont}}{\hat{V}_{tri}} \quad (4.1)$$

där \hat{V}_{cont} är toppvärdet av styrsignalen och \hat{V}_{tri} är toppvärdet av triangelvågen [12].

Modulationsindex för frekvensen, m_f , definieras som kvoten mellan bärvågsfrekvensen och modulationsfrekvensen [12].

$$m_f = \frac{f_s}{f_m} \quad (4.2)$$

Valet av switchfrekvensen f_s och modulationsindex m_f beror på flera faktorer. Då det inte är något större problem att filtrera bort övertoner vid höga frekvenser, väljs helst en så hög switchfrekvens som möjligt. Dock finns negativa sidor med detta, t ex att switchförluster i omvandlarens switchar växer proportionellt med switchfrekvensen f_s [13]. Den önskvärda relationen mellan bärvågsfrekvensen och styrsignalfrekvensen beror, som nämnts tidigare, på hur stort m_f är, enligt [12] är $m_f = 21$ gränsen mellan stort och litet. Storleken på m_f kommer att innebära ett par olika saker om modulationsindex för amplituden m_a är mindre än 1, nämligen om

m_f är liten ska triangelvågen och styrsignalen vara synkroniserade med varandra. Är de inte synkroniserade kommer detta att resultera i undertoner. Fördelaktigt är det om m_f är ett heltal, helst ojämnt, då endast de ojämna övertonerna kommer att existera och de jämna övertonerna kommer att elimineras.

eller om

m_f är stor behöver inte triangelvågen och styrsignalen vara synkroniserade med varandra då undertonerna som skapas får låg amplitud. Detta kan användas då triangelvågens frekvens hålls konstant och styrsignalens frekvens varierar, vilket leder till att m_f inte är ett heltal. Enligt (Mohan 1995 s. 208) är det dock inte önskvärt att m_f är annat än ett heltal, detta på grund av att även om amplituden på undertonerna är liten kommer det att skapas stora strömmar.

Då $m_a \leq 1$ kommer amplituden på spänningens grundton att variera linjärt med m_a , vilket gör att moduleringen blir förhållandevis enkel att reglera. Om amplituden på styrsignalen ökas så mycket att $m_a > 1$, blir resultatet övermodulation, detta inträffar då styrsignalens amplitud blir större än bärvågens. Amplituden på styrsignalens grundton kommer då inte att variera linjärt med m_a . Övermodulation medför även att utspänningen kommer att innehålla fler övertoner i sidbanden, och att de dominanta övertonerna i det linjära området inte behöver vara dominanta längre, det blir alltså svårt att veta vilka frekvenser som behövs filtreras bort. Om m_a är mycket större än 1, kommer den önskade pulssignalen att övergå till att vara en fyrkantsvåg med samma frekvens som styrsignalen.

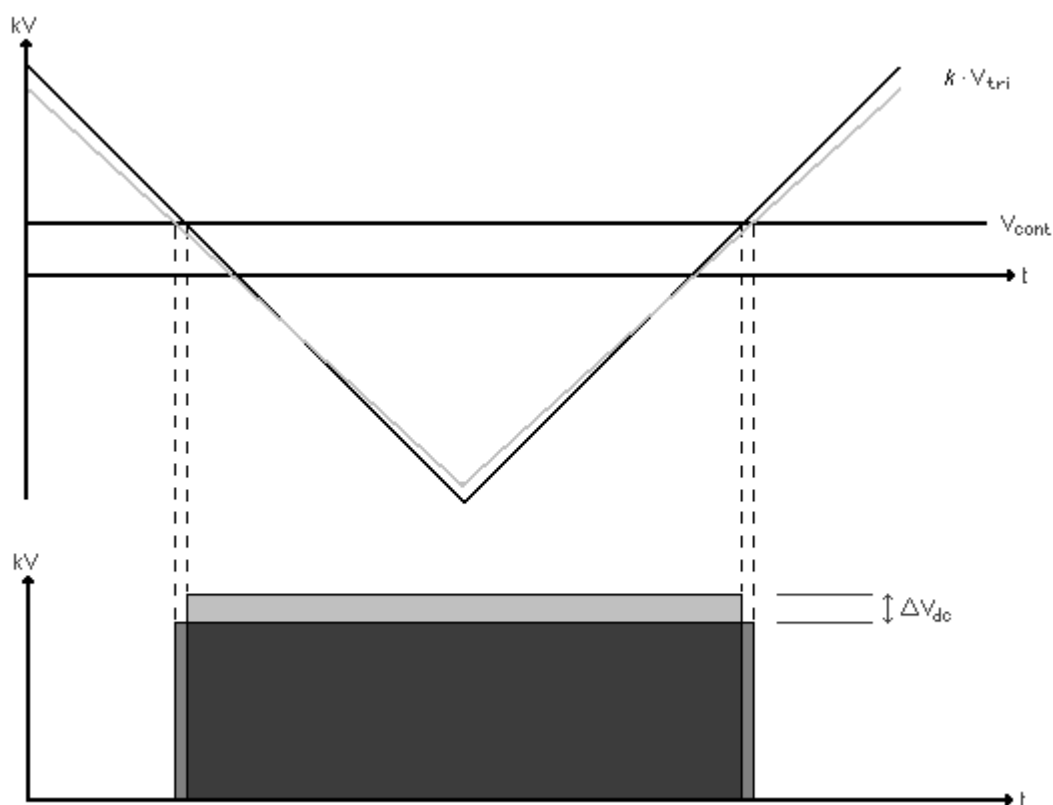
4.2.1.1 Skalning av bärvågsamplituden

Om mellanledningsspänningen sjunker, kan inte önskad mängd reaktiv effekt levereras. Detta känner inte modulern av. För att garantera att flödet av reaktiv effekt inte

ändras till följd av att mellanledningsspänningen sjunker, skalas amplituden på bärvågen, V_{tri} . Skalningen av V_{tri} kan ses i ekvation (4.3) nedan.

$$V_{tri,skalad} = \frac{V_{dc}}{V_{dc,nominell}} \cdot V_{tri} = k \cdot V_{tri} \quad (4.3)$$

Då bärvågen skalas kan spänningstidsytan hållas konstant, vilket är ett krav om flödet av reaktiv effekt ska styras korrekt. Sambandet mellan skalningen av triangelvågen och spänningstidsytan kan ses i figur 4.7. Ändringen i mellanledningsspänningen kommer inte att ändra amplituden på styrsignalen V_{cont} nämnvärt.



Figur 4.7. Skalning av bärvågsamplitud

Eftersom frekvensen på styrsignalen är mycket lägre än bärvågens, kan V_{cont} ses som en dc-nivå under en period av V_{tri} . Då mellanledningsspänningen sjunker, får skalfaktorn k ett mindre värde, vilket medför att bärvågens amplitud minskar. Då amplituden på bärvågen minskar, kommer pulssignalen ut från modulatorens att vara hög under en längre tid, dock med lägre amplitud än innan ändringen i V_{dc} . Detta medför att spänningstidsytan kan hållas konstant så länge övermodulation inte inträffar.

5 Styrenhet

Styrenheten har som uppgift att styra mängden aktiv och reaktiv effekt, som ska matas ut i nätet för att hålla nätspänningen konstant. Det är viktigt att styrenheten för en STATCOM är utformad med hög dynamik. Detta är ett krav, då svarstiden för feldetektering och spänningskompensering måste vara kort [10]. För att klara kraven som ställts används i detta arbete dubbel vektorreglering (Dual Vector Control). Dubbel vektorreglering innebär att både spännings- och strömvektorer regleras. Vektorerna, som ska regleras, fås genom att transformera fasstorheterna till det stationära talplanet $[\alpha, \beta]$ och därefter till det synkront roterande talplanet $[d, q]$. Mer om vektortransformationen i Appendix A.

5.1 Styrning

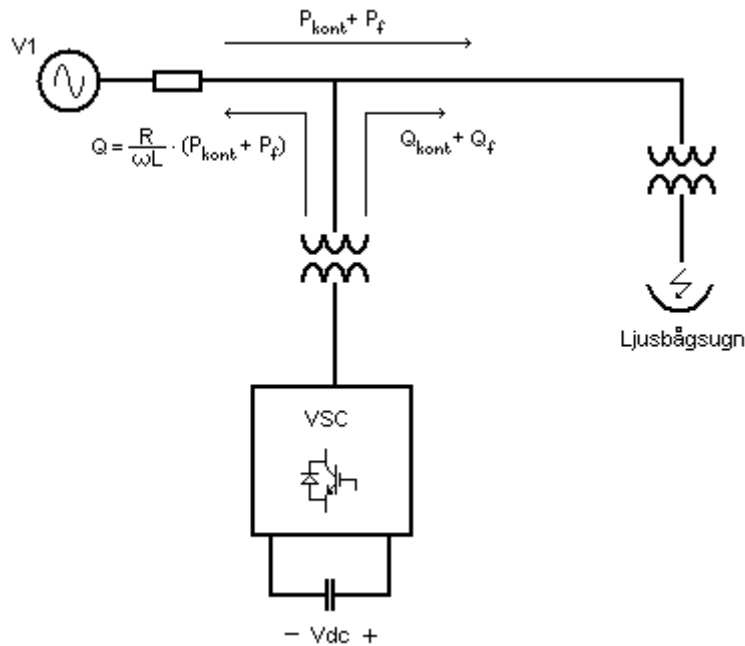
Styrning av effektflöden är styrenhetens huvuduppgift i en STATCOM. För att eliminera spänningsvariationer styrs det reaktiva effektflödet från omvandlaren och för att hålla mellanledningsspänningen konstant styrs det aktiva effektflödet. Styrningen av aktiv och reaktiv effekt utförs i två individuella reglerkretsar med korskoppling.

5.1.1 Styrning av effektflöden

Enligt [4] kan den aktiva och reaktiva effekten som en ljusbågsugn drar från det nät där den är inkopplad beskrivas på följande vis

- $P_{kont} + P_f$ (kontinuerlig aktiv effekt och varierande aktiv effekt)
- $Q_{kont} + Q_f$ (kontinuerlig reaktiv effekt och varierande reaktiv effekt)

En STATCOM kompenserar för all den reaktiva effekt som en ljusbågsugn konsumerar, Q_{kont} , dessutom matar den ut reaktiv effekt, Q_f , för att ta bort oönskade spänningsvariationer. Med en STATCOM matas även den reaktiva effekt nätet absorberar, på grund av att nätet är induktivt, ut. Källan V1 levererar sålunda ingen reaktiv effekt utan enbart aktiv effekt, $P_{kont} + P_f$. Nedan i figur 5.1 ses effektflödena i nätet när en STATCOM är inkopplad.



Figur 5.1. Effektflödena i nätet

En mer effektiv metod för kompensering är att STATCOM även levererar den varierande aktiva effekten som ljusbågsugnen konsumerar. Detta är en av de stora skillnaderna mellan en STATCOM och en SVC, då SVC:n inte kan leverera aktiv effekt. Dock är det väldigt svårt att åstadkomma detta med en STATCOM, som enbart har en kondensator inkopplad på likspänningssidan av omvandlaren, då denna urladdas omgående om en stor mängd aktiv effekt levereras till nätet. För att kunna leverera den varierande aktiva effekten krävs därför ett större energilagring [4].

5.2 Regleringen

Komponenterna i d,q -planet ses som två DC-nivåer i stationärt tillstånd. DC-nivåerna blir enkla att reglera, och felen i stationärt tillstånd kan undertryckas med PI-regulatorer. Reglerkretsarna för reglering av nätspänningen och mellanledningsspänningen består bägge av en regulator för spänningsreglering, där ett referensvärde för en inre regulator för strömreglering skapas. Reglerkretsarna är alltså kaskadkopplade. Regleringen av nätspänningen kommer att styra det reaktiva effektflödet, och regleringen av mellanledningsspänningen kommer att styra det aktiva effektflödet.

För att nätspänningen och mellanledningsspänningen ska hållas vid specifika nivåer skapas ett pulsmönster med PWM, som styr transistorerna i omvandlaren. Beroende på pulsmönstrets utseende, kan flödet av aktiv och reaktiv effekt styras. Styrsignalen i modulationen skapas av utsignalerna från reglerkretsarna.

5.2.1 Reglering i det synkront roterande d,q -planet

Eftersom regleringen ska vara dynamisk och snabb regleras strömmarna i det synkront roterande d,q -planet. För att styra aktiv effekt regleras strömmens q -komponent, i_q och för att styra reaktiv effekt regleras strömmens d -komponent, i_d . Används ekvation (3.1) kan effekternas beroende av strömmarna visas, ekvation (5.1).

$$S = (u_{d,nät} + j \cdot u_{q,nät})(i_d - j \cdot i_q) = u_{d,nät}i_d - j \cdot u_{d,nät}i_q + j \cdot u_{q,nät}i_d + u_{q,nät}i_q \quad (5.1)$$

Nätets spänningsvektor är i detta arbete definierad att i det synkront roterande d,q -planet enbart röra sig i q -led. Används detta i ekvation (5.1) fås

$$S = [u_{d,nät} = 0] = u_{q,nät}i_q + j \cdot u_{q,nät}i_d = P + j \cdot Q \Rightarrow \quad (5.2)$$

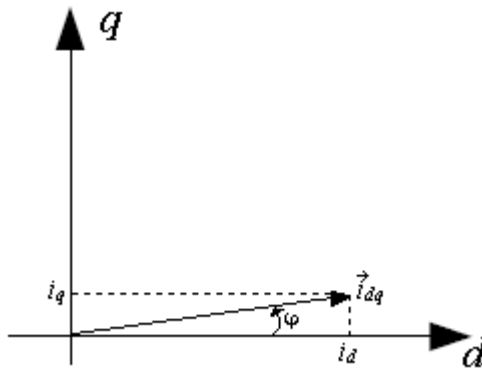
$$\begin{cases} P = u_{q,nät}i_q \\ Q = u_{q,nät}i_d \end{cases}$$

I förhållande till i_q är det önskvärt att i_d regleras till ett stort värde. Detta på grund av att värdet på i_d ska bestämma längden på den resulterande vektorn i det synkront roterande d,q -planet. Längden på den resulterande vektorn i d,q -planet bestämmer amplituden på styrsignalen i modulationen. Pulsmönstrets utseende, vilket styr switchningen av transistorerna, är direkt relaterat till amplituden på styrsignalen i modulationen. Värdet på spänningens q -komponent, u_q , ut från omvandlaren förändras med pulsmönstrets utseende. Storleken på u_q jämfört med nätspänningens q -komponent, $u_{q,nät}$, avgör riktningen på det reaktiva effektlödet.

$$\begin{aligned} u_q > u_{q,nät} &\Rightarrow \text{reaktiv effekt flödar ut i nätet} \\ u_q < u_{q,nät} &\Rightarrow \text{reaktiv effekt flödar in till omvandlaren} \\ u_q = u_{q,nät} &\Rightarrow \text{inget reaktivt effektlöde} \end{aligned}$$

Mängden levererad reaktiv effekt är alltså beroende på vektorns längd.

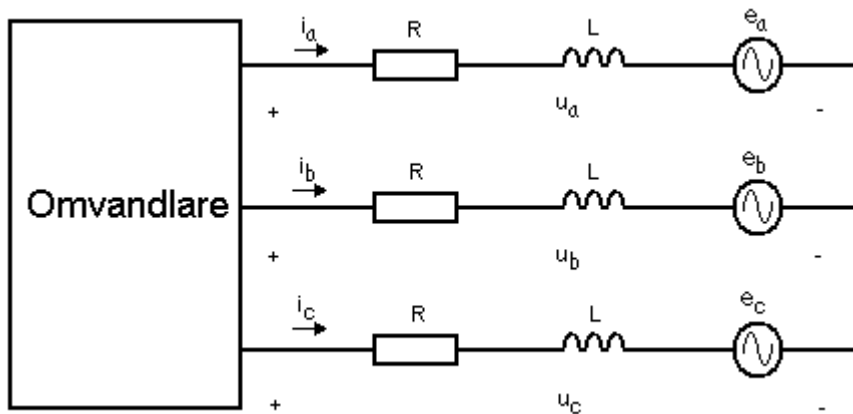
Strömmens q -komponent, i_q , kommer att styra argumentet φ för den resulterande vektorn. Förändringar i argumentet kommer att resultera i aktiv effektlöde. På grund av att energilagret i detta arbete består av en kondensator, är det fördelaktigt att värdet på i_q är litet. Får i_q till exempel ett för stort negativt värde, urladdas kondensatorn nästan omedelbart, vilket medför att snabb reglering inte blir möjlig. Detta beror på att kondensatorn är spänningströg, vilket gör att uppladdning inte kan ske omedelbart, vilket i sin tur kan innebära att önskad reaktiv effekt inte kan levereras. Nedan i figur 5.2 ses den resulterande vektorn och dess argument i det synkront roterande d,q -planet.



Figur 5.2. Resulterande vektorn i det synkront roterande d,q -planet.

5.2.2 Korskopplingstermer

Om en förenklad modell, se figur 5.3, av en omvandlare inkopplad på ett nät utan last används, kan man få fram ett beroende mellan komponenterna i det roterande talplanet $[d,q]$.



Figur 5.3. Förenklad modell av omvandlare kopplad till ett nät.

Nätspänningen betecknas e och strömmarna i nätet betecknas i . R och L är de resistiva och induktiva förlusterna på nätet.

Ekvationerna för spänningsfallet u kan härledas genom att använda Kirchhoffs lag.

$$\begin{aligned}
u_a &= R \cdot i_a + L \cdot \frac{di_a}{dt} + e_a \\
u_b &= R \cdot i_b + L \cdot \frac{di_b}{dt} + e_b \\
u_c &= R \cdot i_c + L \cdot \frac{di_c}{dt} + e_c
\end{aligned} \tag{5.3}$$

De symmetriska nätspänningarna är

$$\begin{aligned}
e_a &= \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot V \cdot \cos(\omega \cdot t) \\
e_b &= \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot V \cdot \cos(\omega \cdot t - \frac{2\pi}{3}) \\
e_c &= \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot V \cdot \cos(\omega \cdot t - \frac{4\pi}{3})
\end{aligned} \tag{5.4}$$

där V är rms-värdet av fas till fas spänningen och ω är nätets vinkelfrekvens. I α, β -planet blir trefas-spänningarna i ekvation (5.3)

$$\begin{aligned}
u_\alpha &= R \cdot i_\alpha + L \cdot \frac{di_\alpha}{dt} + e_\alpha \\
u_\beta &= R \cdot i_\beta + L \cdot \frac{di_\beta}{dt} + e_\beta
\end{aligned} \tag{5.5}$$

som kan skrivas om i vektornotation

$$\bar{u}^{(\alpha, \beta)} = R \cdot \bar{i}^{(\alpha, \beta)} + L \cdot \frac{d}{dt} \cdot \bar{i}^{(\alpha, \beta)} + \bar{e}^{(\alpha, \beta)} \tag{5.6}$$

där

$$\begin{aligned}
\bar{u}^{(\alpha, \beta)} &= u_\alpha + ju_\beta \\
\bar{e}^{(\alpha, \beta)} &= e_\alpha + je_\beta \\
\bar{i}^{(\alpha, \beta)} &= i_\alpha + ji_\beta
\end{aligned} \tag{5.7}$$

Alla vektorer i α, β -planet roterar med vinkelhastigheten ω . α - och β -komponenterna är därmed sinusstorheter med vinkelfrekvensen ω . Ekvation (5.6) kan skrivas om till det synkront roterande d, q -planet i vektornotation

$$\bar{u}^{(d, q)} = R \cdot \bar{i}^{(d, q)} + L \cdot \frac{d}{dt} \cdot \bar{i}^{(d, q)} + j \cdot \omega \cdot L \cdot \bar{i}^{(d, q)} + \bar{e}^{(d, q)} \tag{5.8}$$

där

$$\begin{aligned}\bar{u}^{(d,q)} &= u_d + ju_q \\ \bar{e}^{(d,q)} &= e_d + je_q \\ \bar{i}^{(d,q)} &= i_d + ji_q\end{aligned}\tag{5.9}$$

d, q -planet roterar med vinkelfrekvensen ω relativt α, β -planet, d - och q -komponenterna är därför konstanta i stationaritetsplanet. Ekvation (5.8) kan delas upp i en reell och en imaginär ekvation

$$\begin{cases} u_d = R \cdot i_d + L \cdot \frac{d}{dt} \cdot i_d - \omega \cdot L \cdot i_q + e_d \\ u_q = R \cdot i_q + L \cdot \frac{d}{dt} \cdot i_q + \omega \cdot L \cdot i_d + e_q \end{cases}\tag{5.10}$$

I ekvationerna (5.10) ses korskopplingstermer, vilka visar att d - och q -komponenterna inte är oberoende.

5.2.3 Reglering av nätspänningen

Nätspänningen, som ska regleras, benämns $V_{nät}$. Medelvärden av de tre fasspänningarna $V_{abc,rms}$ bildar nätspänningens ärvärde V_{rms} , som är i per unit med den nominella nätspänningen som bas. Den önskade nätspänningen benämns V_{ref} , som även den är i per unit med den nominella spänningen som bas. Skillnaden mellan V_{rms} och V_{ref} bildar felet, som regulatorn ska minimera, genom att skapa en signalen, V_d , som ser till att rätt mängd reaktiv effekt injiceras i nätet så att $V_{rms} = V_{ref}$.

Reglerkretsen består av två kaskadkopplade PI-regulatorer, vilka bildar en inre och en yttre reglerkrets. PI-regulatorn i den yttre reglerloopen bildar en referensström, $i_{d,ref}$, till den inre PI-regulatorn, som i sin tur har till uppgift att bilda d -komponenten, V_d , av styrsignalen i modulationen.

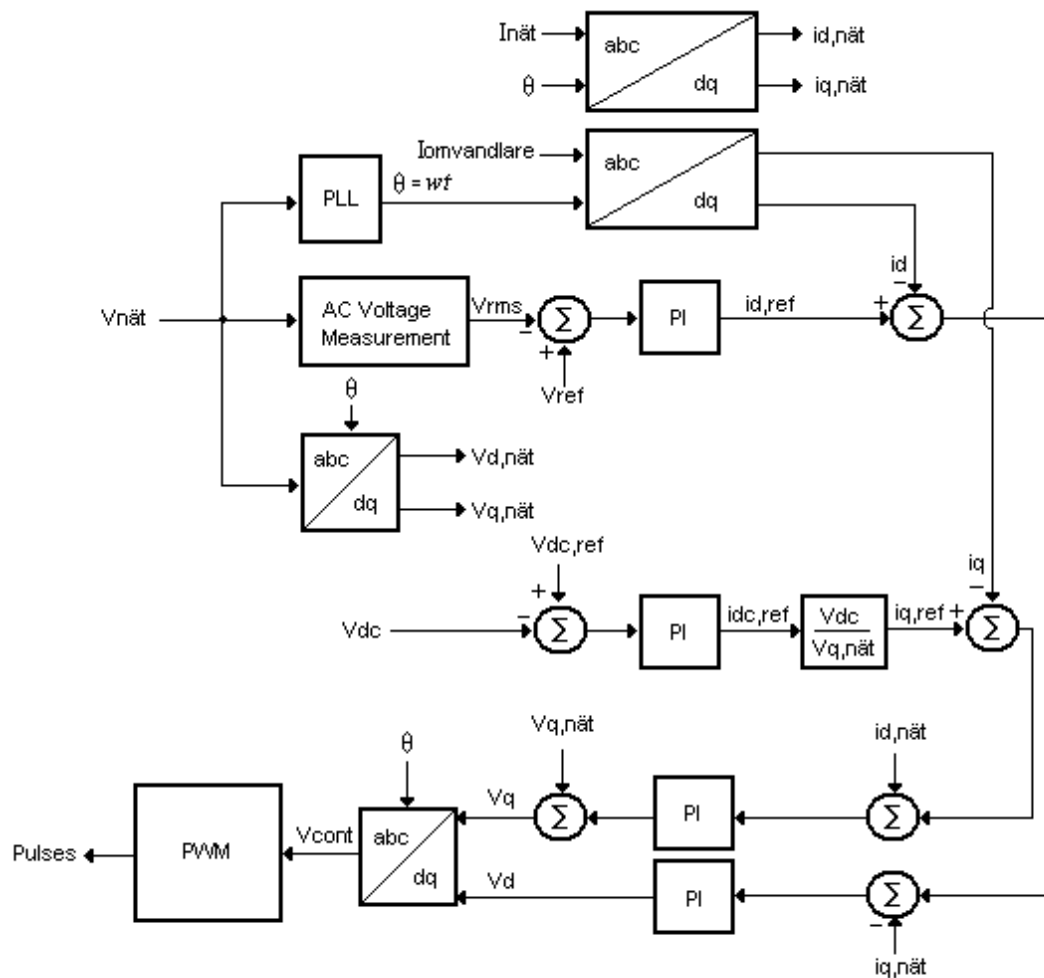
Den fullständiga reglerkretsen ses i figur 5.4, där återkoppling och korskoppling finns med. Framkoppling är inte möjlig i regleringen av nätspänningen ty $V_{d,nät} = 0$.

5.2.4 Reglering av mellanledningsspänningen

Då spänningen över mellanledet ska regleras görs i detta arbete kontinuerlig mätning av likspänningen över kondensatorn, V_{dc} . Skillnaden mellan mellanledningsspänningens ärvärde, V_{dc} , och den önskade mellanledningsspänningen, $V_{dc,ref}$, är den avvikelse som skapar referensvärdet för strömmens q -komponent, $i_{q,ref}$.

Precis som i reglerkretsen för nätspänningen, består reglerkretsen för mellanledningsspänningen av två PI-regulatorer, vilka är kaskadkopplade. Samma metodik används för att ta fram d -komponenten av styrsignalen som används för att skapa q -komponenten av styrsignalen. För att få en snabbare reglering framkopplas nätspänningen $V_{q,nät}$.

I figur 5.4 kan reglerkretsen ses där återkoppling, korskoppling och framkoppling finns med.



Figur 5.4. Kompletta styrenheten

Spänningskomponenterna V_d och V_q transformeras till det stationära α, β -planet och vidare till tre-fasspänningar. Dessa tre spänningar är styrsignalerna i modulationen.

6 Simulering

Två olika simuleringssmodeller används i detta arbete för att simulera några olika fall där STATCOM används för att dämpa spänningsvariationer. Först undersöks hur STATCOM klarar av att dämpa de spänningsvariationer som en ljusbågsugn ger upphov till, och sedan hur STATCOM klarar av att förhindra ett momentant symmetriskt spänningsfall i form av ett steg. Med hjälp av en flimmermätare kan ett mått på hur bra STATCOM dämpar de spänningsvariationer, som orsakar flimmer, fås. I simuleringarna kopplas STATCOM in på en 20 kV-nod parallellt med ljusbågsugnen. Strukturen av simuleringssmodellen blir som i figur 6.1, där spänningsnivåer och referensriktningar för effektflödena anges. Hädanefter i detta arbete kommer ljusbågsugnen att skrivas som EAF (Electric Arc Furnace).

Simuleringarna är utförda i simuleringssverktyget PSCAD/EMTDC, vilket används för att analysera kraftelektroniska system. PSCAD är det grafiska användargränssnittet och EMTDC är simuleringssmotorn. PSCAD/EMTDC är utrustad med ett bibliotek innehållande standardkomponenter, men det går även att programmera egna komponenter. Simuleringssmodellen byggs upp schematisk och därefter utförs simuleringar i tidsdomän och resultatet analyseras med hjälp av grafer.

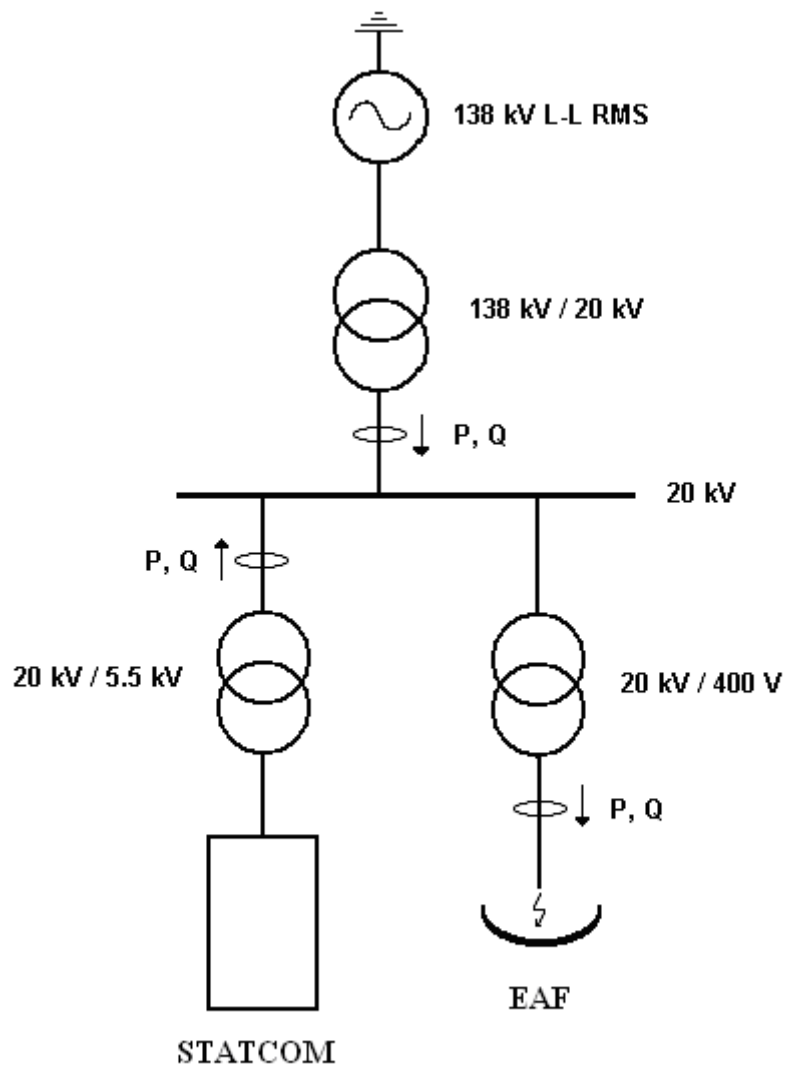
Regulatorparametrarna för de två reglerkretsarna är anpassade för att modellen av STATCOM ska klara av att dämpa de spänningsvariationer, som EAF ger upphov till, så bra som möjligt. Samma parametrar används sedan vid simuleringen av ett symmetriskt trefas-fel på 20kV-noden. Parametrarna som används för att reglera nätspänningen på 20kV-noden och mellanledningsspänningen kan ses i tabell 6.1 respektive tabell 6.2.

Tabell 6.1. Parametervärden för regleringen av nätspänningen

Regulatorparametrar för reglering av nätspänning		
	Strömreglering	Spänningsreglering
Proportionell förstärkning (Kp)	14	9
Integraltid (Ti)	Inf	0.5 s

Tabell 6.2. Parametervärden för reglering av mellanledningsspänningen

Regulatorparametrar för reglering av dc-spänningen		
	Strömreglering	Spänningsreglering
Proportionell förstärkning (Kp)	0.35	0.15
Integraltid (Ti)	1 s	1 s



Figur 6.1. Förenklad bild av simuleringsmodellen.

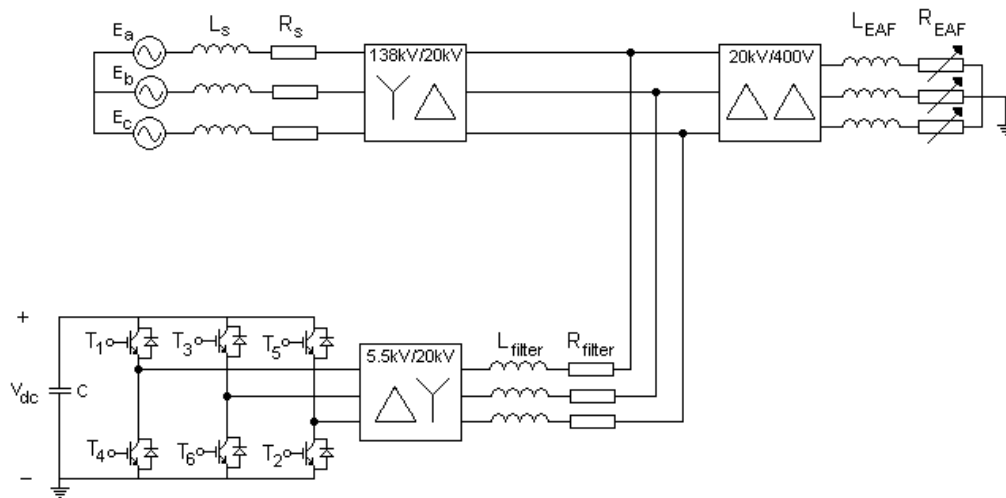
Systemparametrarna som används kan ses i tabell 6.3.

Tabell 6.3. Systemparametrar som används vid simulering

Switchfrekvens	$f_{sw} = 1950 \text{ Hz}$	
Filter STATCOM	$R_{filter} = 0.5 \Omega$	$L_{filter} = 14 \text{ mH}$
Mellanledningsspänning	$V_{dc} = 15 \text{ kV}$	
Likspänningskapacitans	$C = 6 \text{ mF}$	
Shuntfel på 20 kV	$R_{fault} = 3.3 \Omega$	$L_{fault} = 34 \text{ mH}$

6.2 Simulering med ljusbågsugn

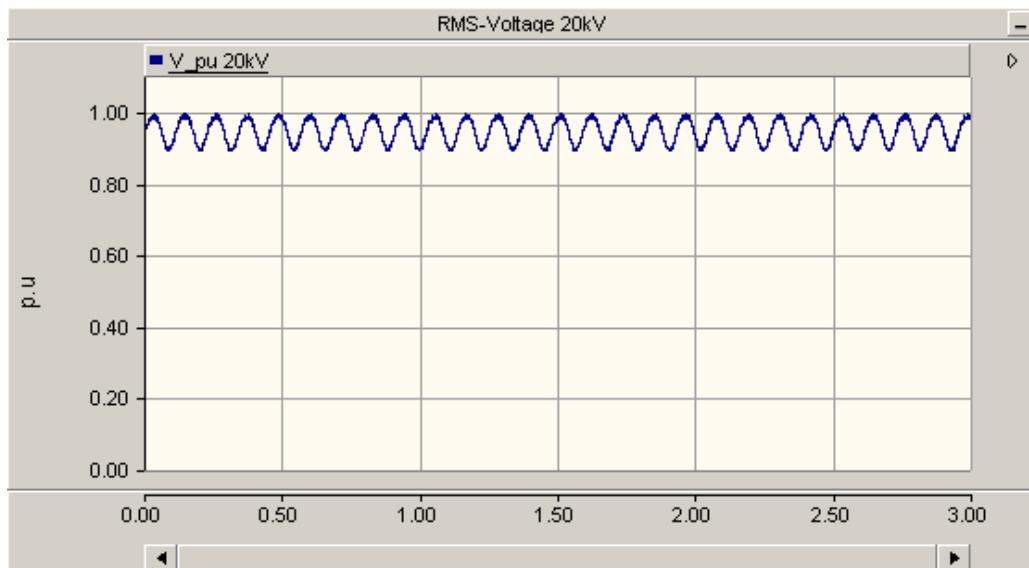
Modellen av ljusbågsugnen är implementerad av SwedPower AB i Malmö. Ljusbågsugnen kan ställas in så att den ger upphov till spänningsvariationer som är sinusformiga eller gaussfördelade. Detta åstadkoms genom att lastresistansen ändras och på så sätt varierar mängden konsumerad effekt. De gaussfördelade spänningsvariationerna, som EAF ger upphov till, är stokastiska, vilket stämmer bra med verkligheten. Att undersöka sinusformade spänningsvariationer är ändå önskvärt, för att verifiera att styrsystemet arbetar korrekt och att rätt mängd effekt matas ut i nätet. Det är nämligen betydligt enklare att inse kompenseringen av ett kontinuerligt mönster. En schematisk bild över simuleringsmodellen ses i figur 6.2.



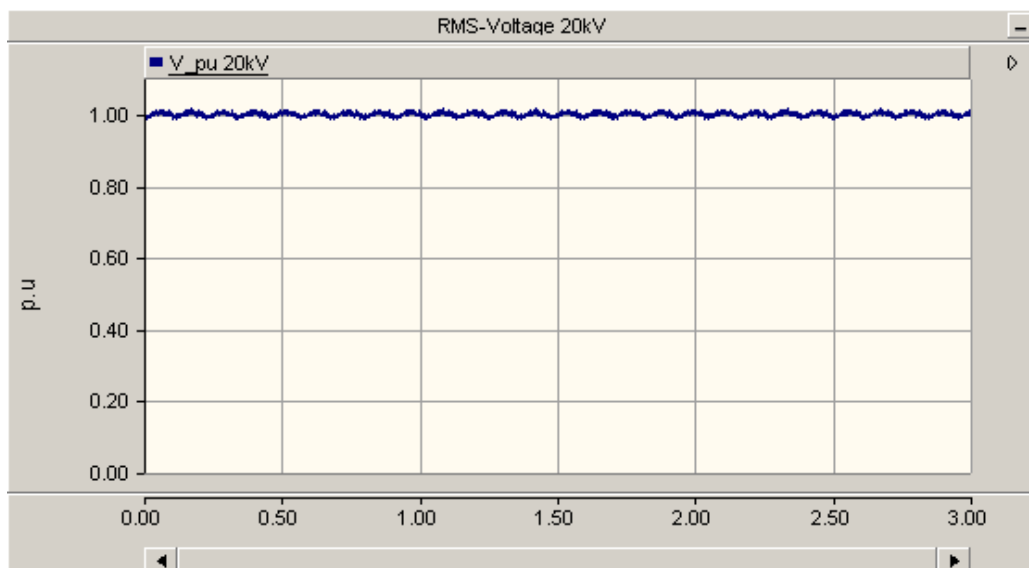
Figur 6.2. Simuleringsmodellen.

6.2.1 Sinusformade spänningsvariationer

Ljusbågsugnens resistans förändras så att spänningen på 400 V-noden varierar sinusformigt med en frekvens på 8.8 Hz, vilket ligger i frekvensintervallet för vad som uppfattas störande. Spänningsvariationerna på 400 V-noden kommer att ge upphov till sinusformig spänningsvariation på 20 kV-noden, figur 6.3. Med STATCOM inkopplad kommer spänningsvariationerna på 20 kV-noden att minska, figur 6.4, genom att reaktiv effekt levereras till nätet då spänningen sjunker.



Figur 6.3. Spänningen på 20kV-noden utan kompensering.



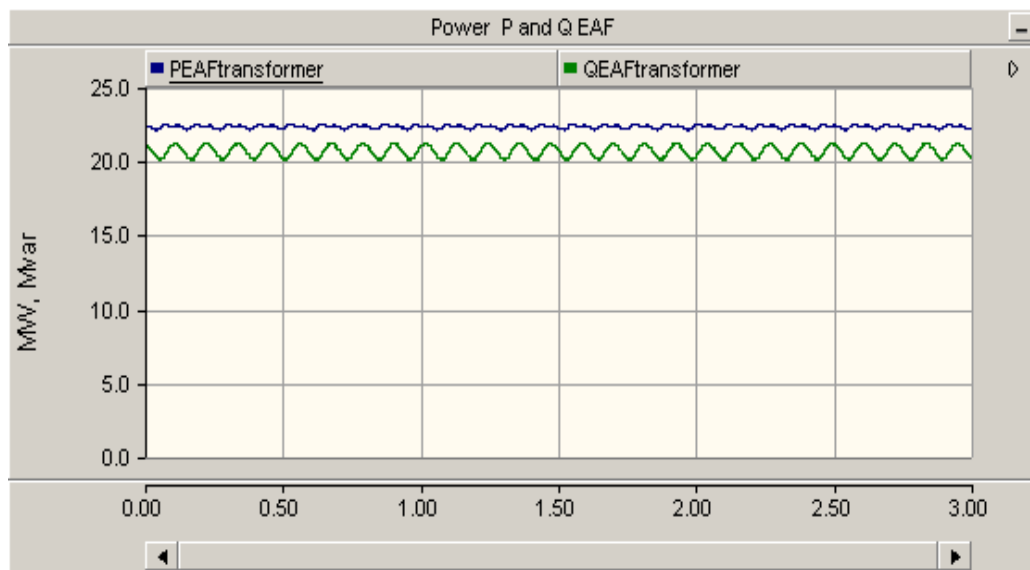
Figur 6.4. Spänningen på 20 kV-noden med kompensering.

EAF konsumerar både aktiv och reaktiv effekt, figur 6.5. Det är önskvärt att EAF bara drar aktiv effekt från regionnätet². Lågt reaktivt effektlöde från regionnätet gör att de reaktiva strömmarna blir mindre, vilket leder till att överföringen av aktiv effekt blir effektivare.

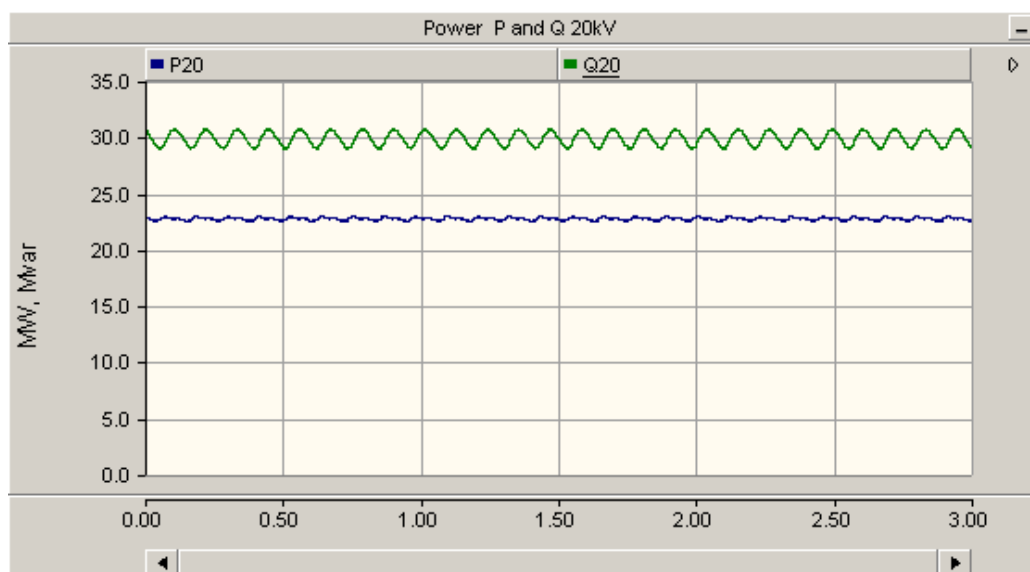
När STATCOM inte är inkopplad, så kommer effektlödet från regionnätet att se ut som i figur 6.6. Den reaktiva effekten, som EAF drar, är mindre än den reaktiva effekten, som levereras från regionnätet. Detta beror på att transformatorn innan ljusbågsugnen är induktiv och konsumerar reaktiv effekt. Med STATCOM:en inkopplad är spänningen stabilare och högre varvid EAF drar mer aktiv effekt, vilket

² Regionnätet, även kallat subtransmissionsnätet, innefattar spänningsnivåer mellan 50 – 130 kV i kraftnätet.

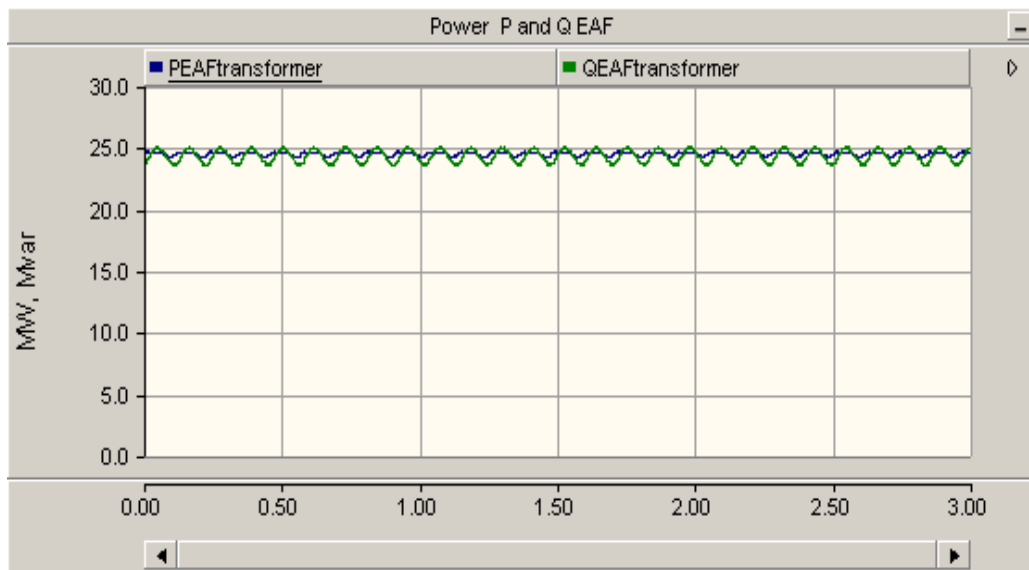
kan ses i figur 6.7. Detta leder till att smältningsprocessen effektiviseras. Den reaktiva effekt som EAF drar från regionnätet minskar när STATCOM är inkopplad, vilket kan ses i figur 6.8.



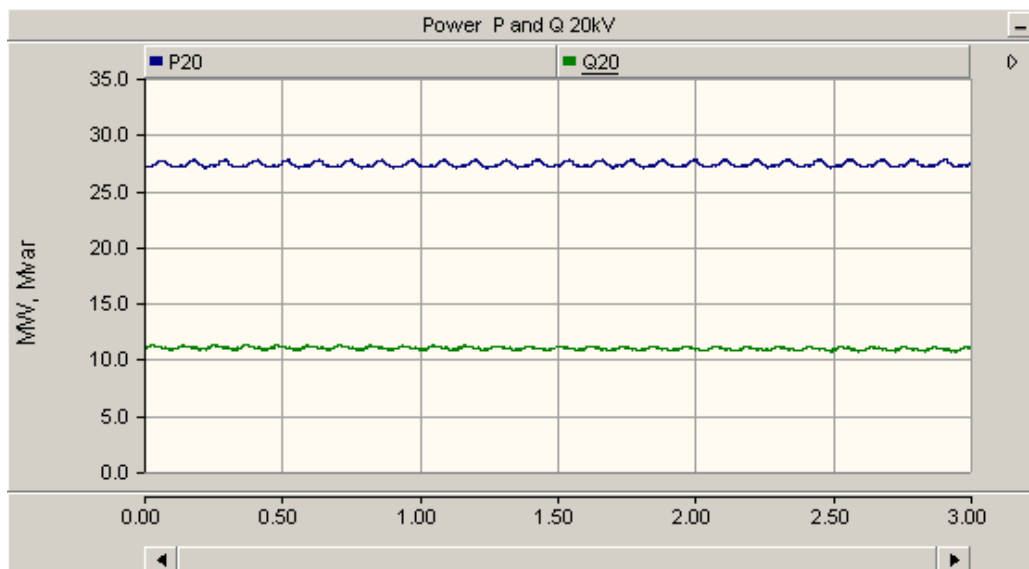
Figur 6.5. Effekten som EAF drar utan kompensering.



Figur 6.6. Effektflödet från regionnätet utan kompensering.

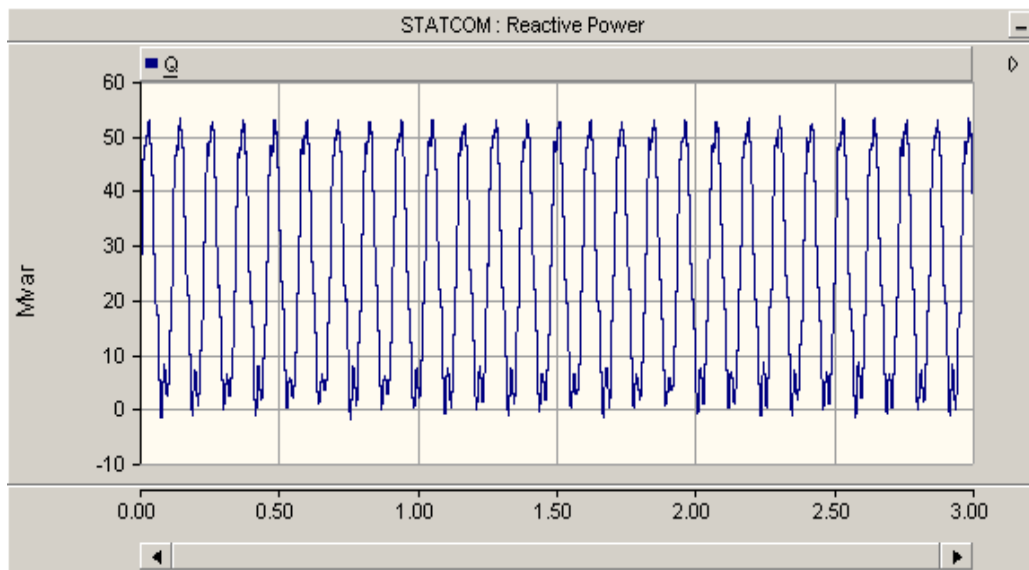


Figur 6.7. Effekten som EAF drar med kompensering.

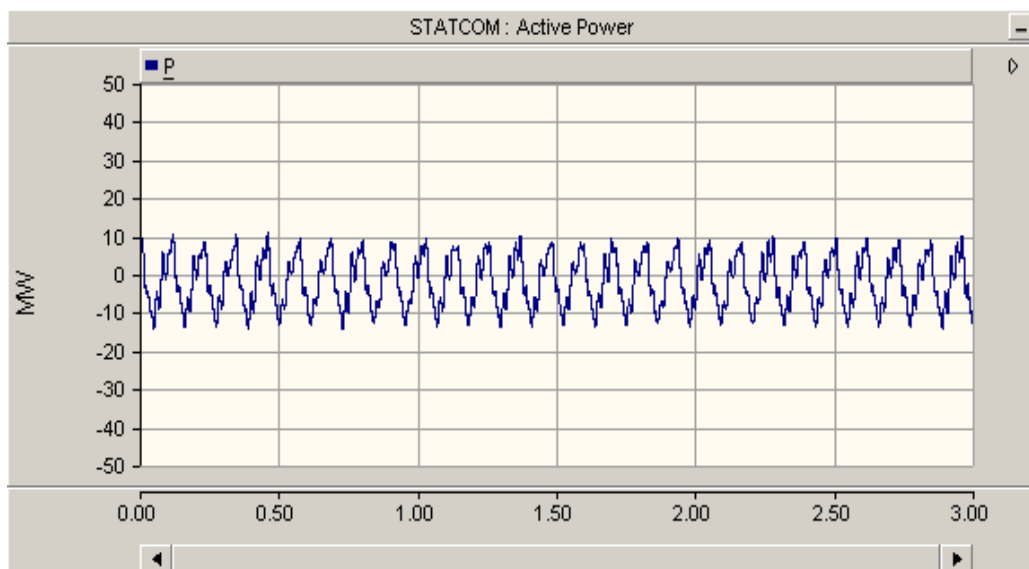


Figur 6.8. Effektflödet från regionnätet med kompensering.

När nätspänningen sjunker, ska STATCOM leverera reaktiv effekt till nätet för att höja spänningen. Den sinusformade spänningsvariationen, som EAF ger upphov till, gör att STATCOM kommer att leverera reaktiv effekt med samma sinusform men fasvriden 180° . Då nätspänningen sjunker ökar alltså det reaktiva effektflödet, detta ses i figur 6.9. Det aktiva effektflödet från STATCOM in i nätet ser ut som i figur 6.10.

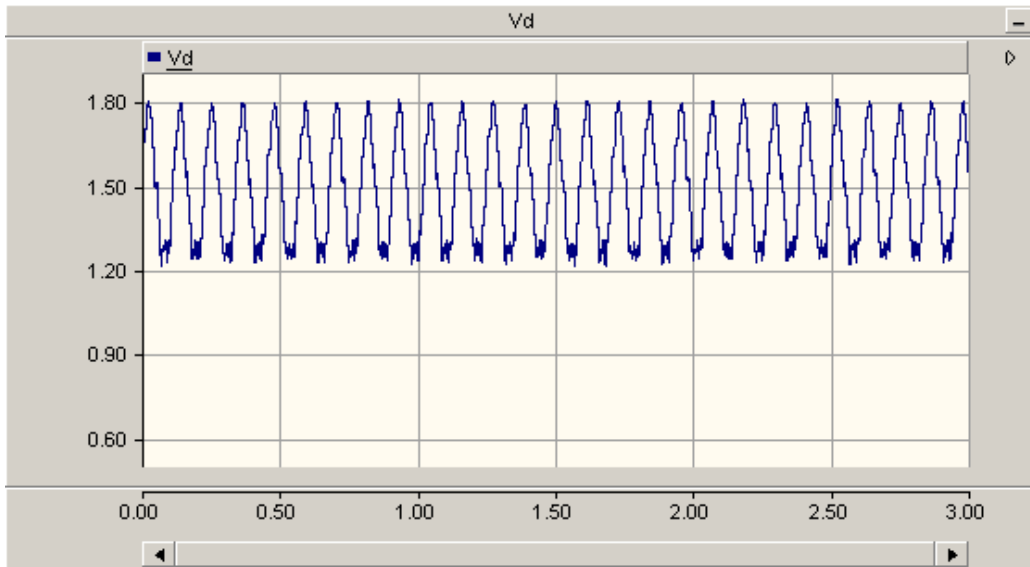


Figur 6.9. Reaktiva effektflödet från STATCOM in i nätet.

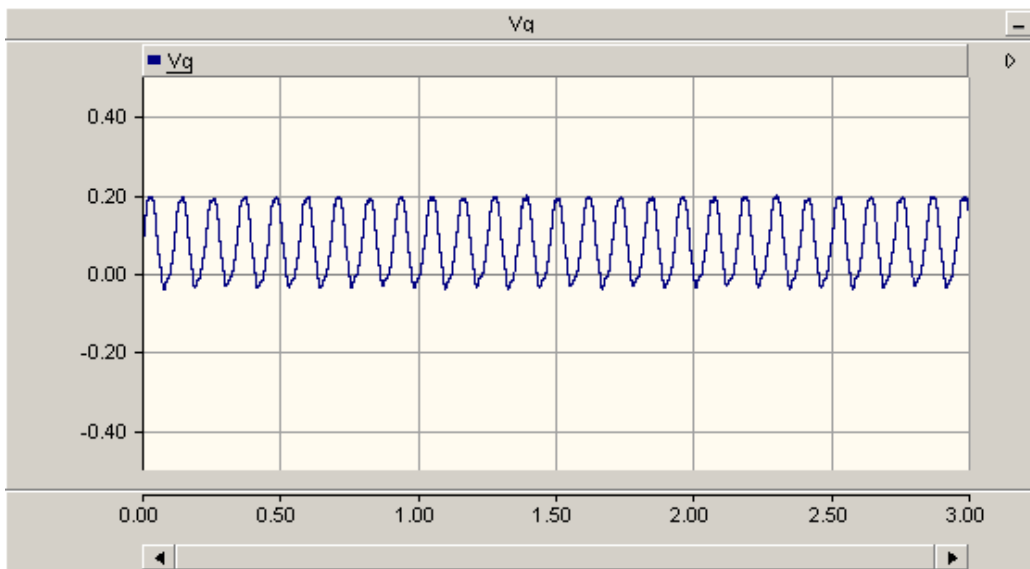


Figur 6.10. Aktiva effektflödet från STATCOM in i nätet.

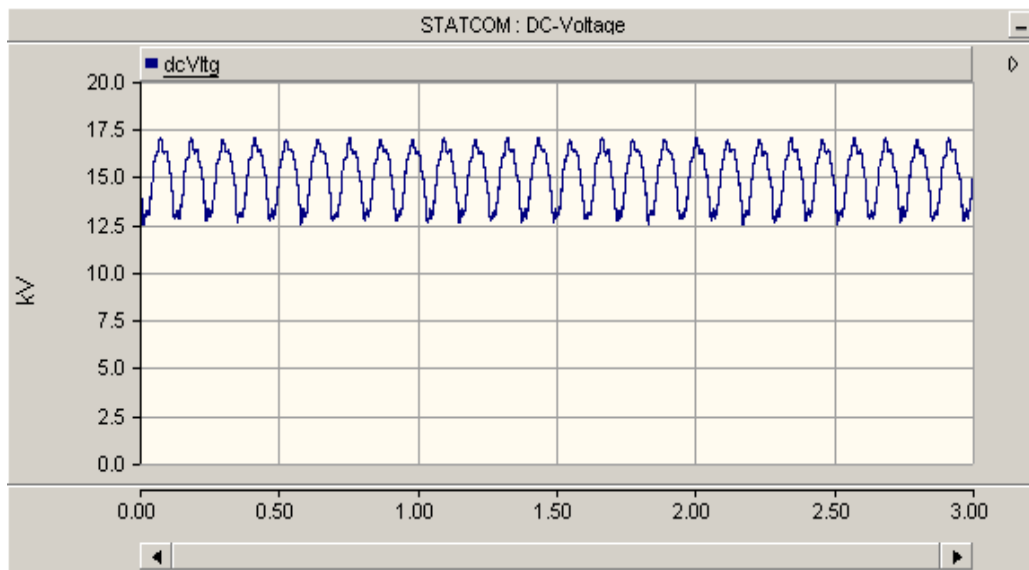
Signalerna V_d och V_q , som skapar styrsignalen till modulationen, används för att reglera flödet av reaktiv respektive aktiv effekt. Det svaga beroendet mellan d-komponenten och q-komponenten i styrningen av effektflödena, gör att d-komponenten styr flödet av reaktiv effekt ut från STATCOM nästan helt oberoende av q-komponenten. Beroendet mellan Q och V_d kan ses om graferna i figur 6.9 och 6.11 jämförs. Utseendet på V_q kommer att avgöra det aktiva effektflödet och därmed upp- och urladdning av kondensatorn. I figur 6.10 och 6.13 ses ett tydligt beroende mellan aktiva effekten ut ur STATCOM jämfört med mellanledningsspänningen. När aktiv effekt flödar ut från STATCOM kommer kondensatorn laddas ur och mellanledningsspänningen sjunker. Då mellanledningsspänningen sjunker, vill regulatören åstadkomma aktivt effektflödet in i STATCOM och därmed ladda upp kondensatorn till den nominella spänningen 15 kV. Om graferna i figur 6.12 och 6.13 jämförs, syns det att då mellanledningsspänningen är låg, är V_q hög.



Figur 6.11. d -komponenten (V_d) av styrsignalen.



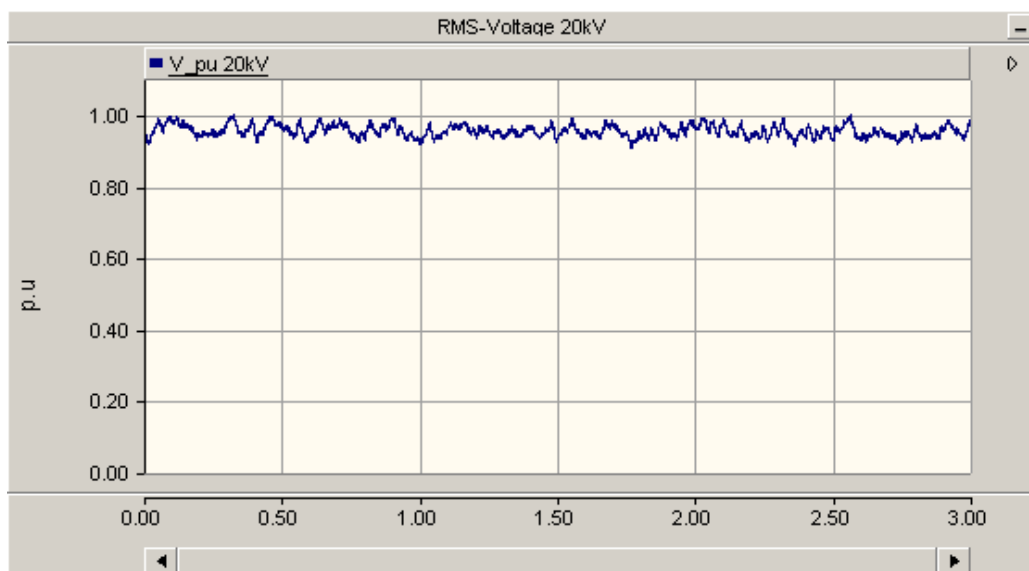
Figur 6.12. q -komponenten (V_q) av styrsignalen.



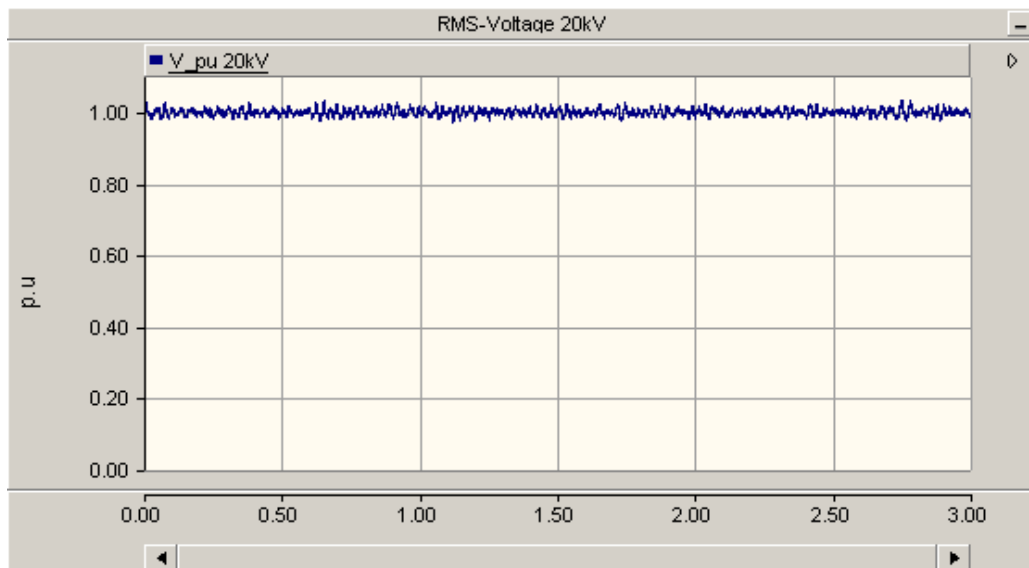
Figur 6.13. Mellanledsspänningen.

6.2.1 Gaussfördelade spänningsvariationer

Resistansen i EAF ändras så att spänningens amplitud på 400 V-noden varierar gaussfördelat med en standardavvikelse på 0.7. Spänningens amplitud på 20 kV-noden varierar då också gaussfördelat, figur 6.14. Med STATCOM inkopplad minskar spänningsvariationer på 20 kV-noden markant, figur 6.15.

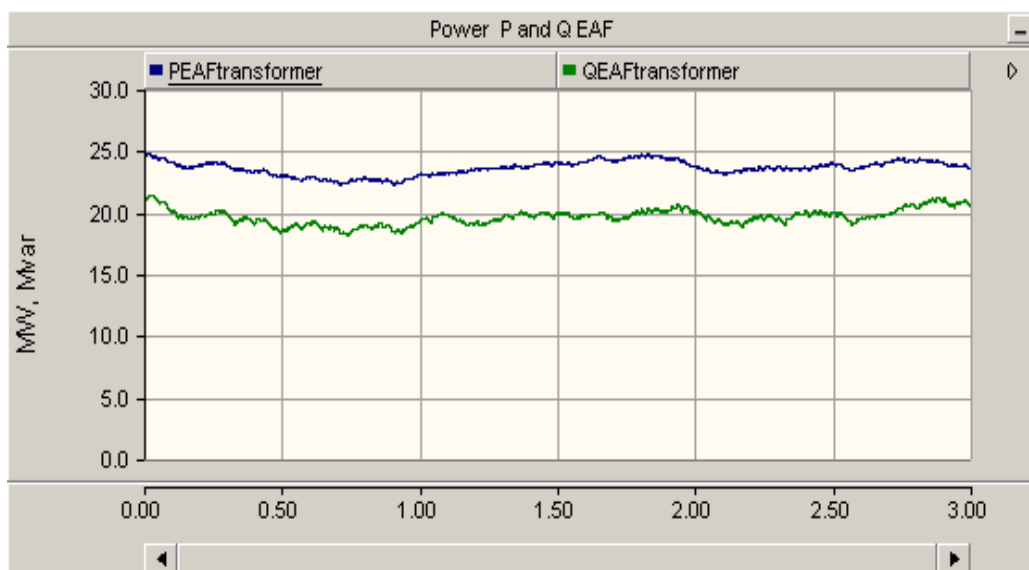


Figur 6.14. Spänningen på 20 kV-noden utan kompensering.

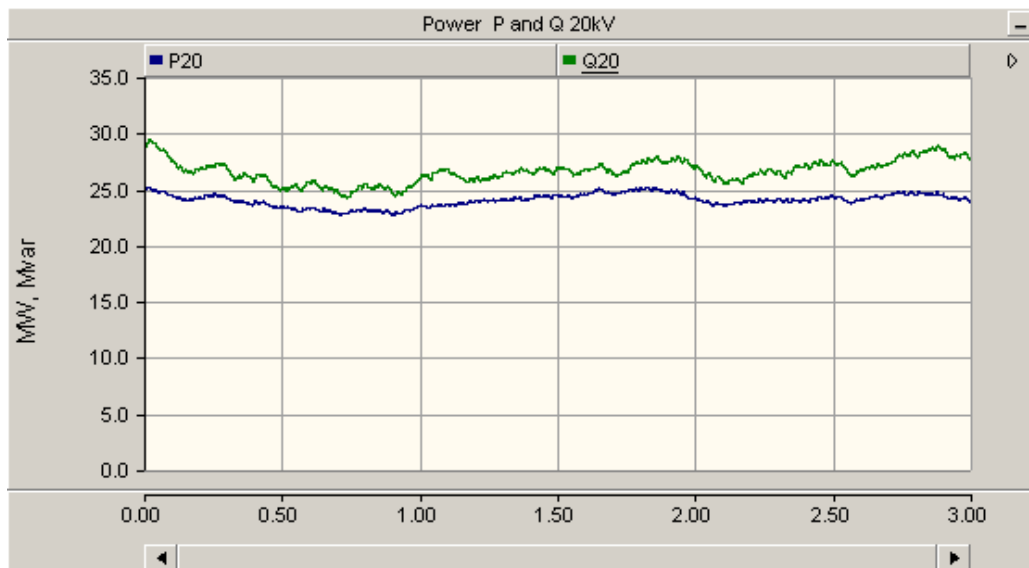


Figur 6.15. Spänningen på 20 kV-noden med kompensering.

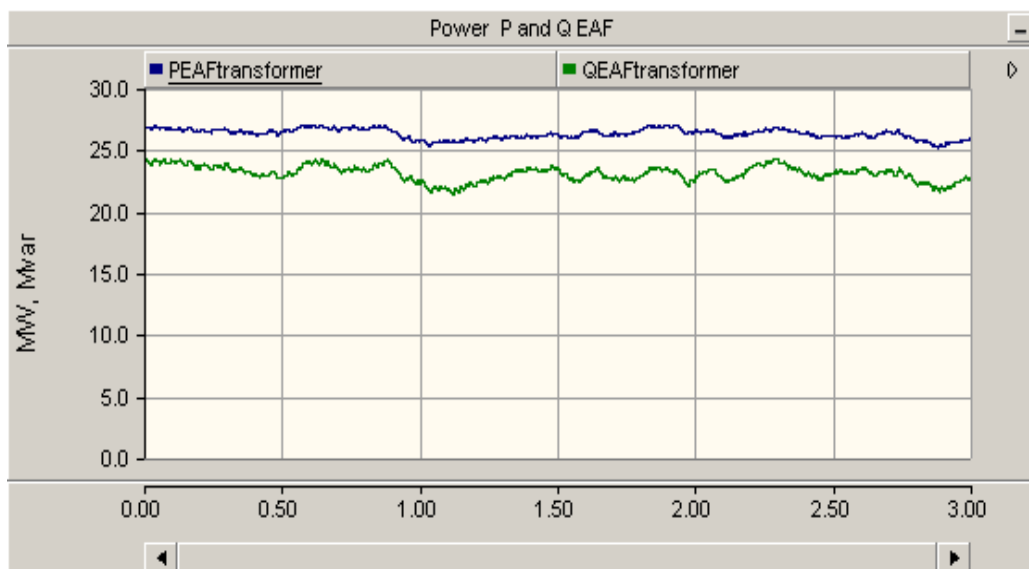
Effektflödet från regionnätet och effekten, som EAF konsumerar när spänningens amplitud är gaussfördelad, kan ses i figur 6.16 respektive figur 6.17. Effektflödena med STATCOM inkopplad, kan ses i figur 6.18 och 6.19.



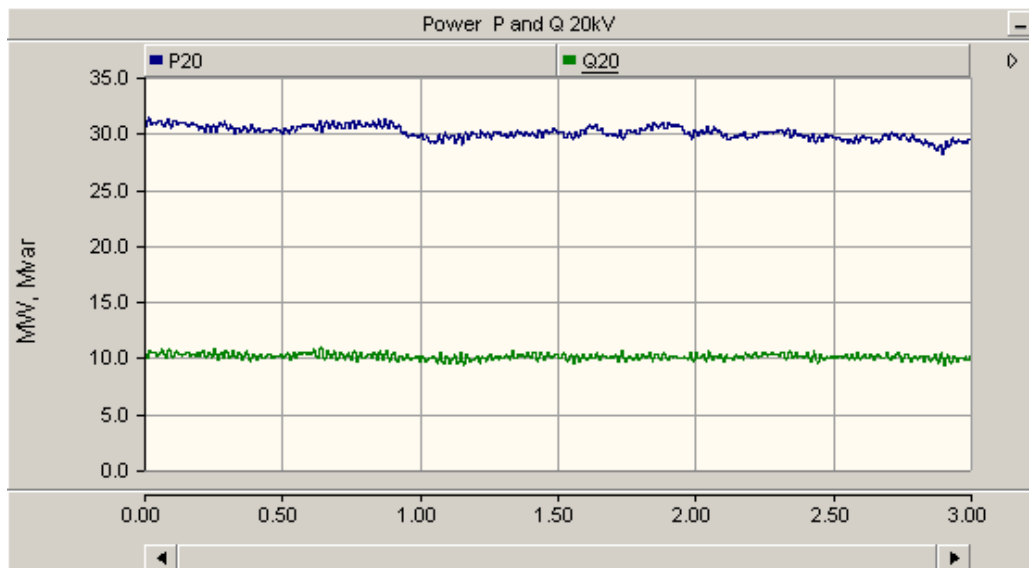
Figur 6.16. Effekten som EAF konsumerar utan kompensering.



Figur 6.17. Effektflödet från regionnätet utan kompensering.

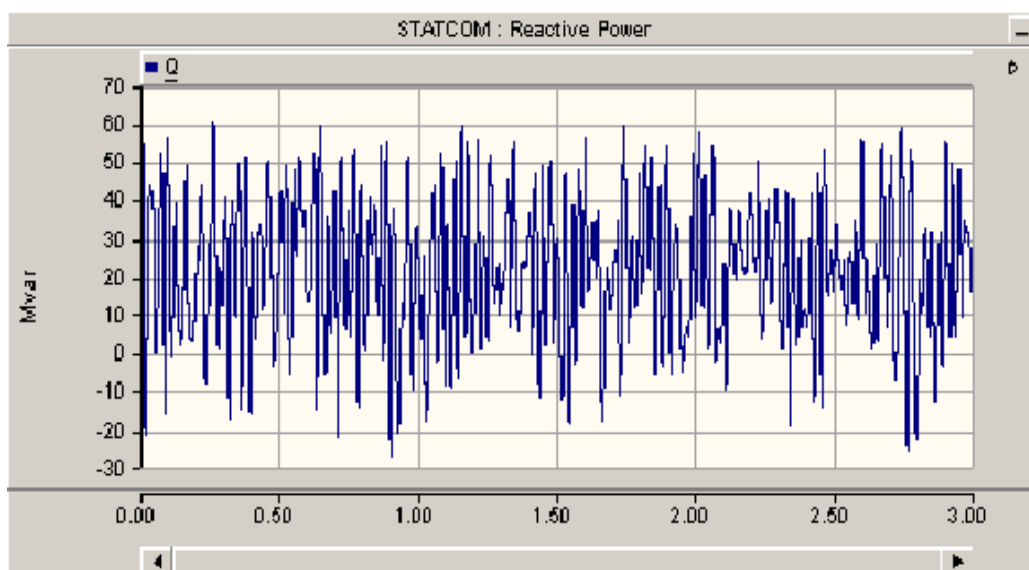


Figur 6.18. Effekten som EAF konsumerar med kompensering.

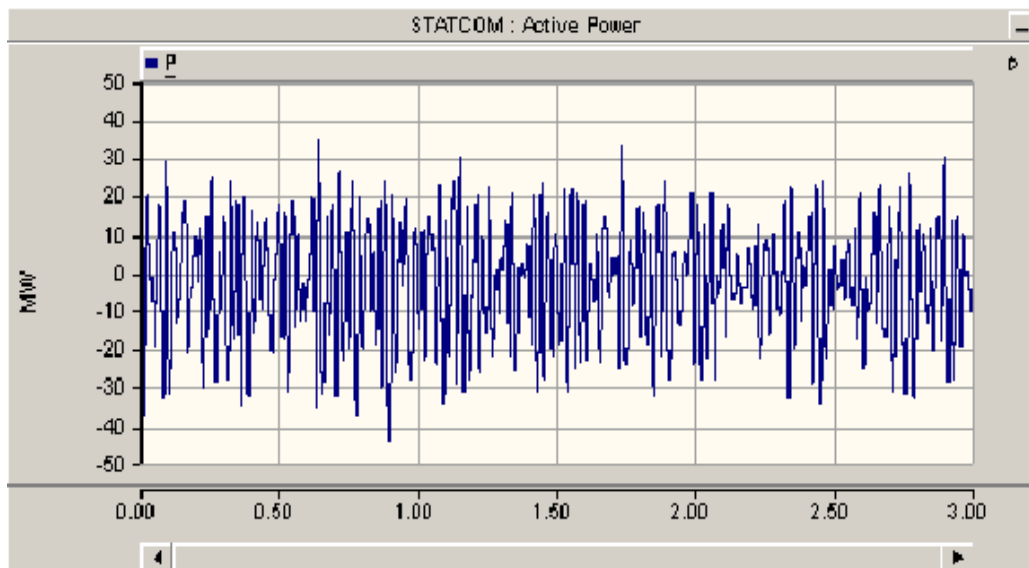


Figur 6.19. Effektflödet från regionnätet med kompensering.

Det reaktiva effektflödet från STATCOM ses i figur 6.20 och det aktiva effektflödet ses i figur 6.21. De gaussfördelade spänningsvariationerna är snabba, men medelvärden tenderar att variera med en frekvens i intervallet för vad som anses bli störande flimrar. För att undertrycka variationerna krävs det att kompenseringen är dynamisk och snabb, vilket visar sig tydligt i att effektflödena ut ur STATCOM varierar med hög frekvens. Detta ses i figur 6.20 och 6.21.

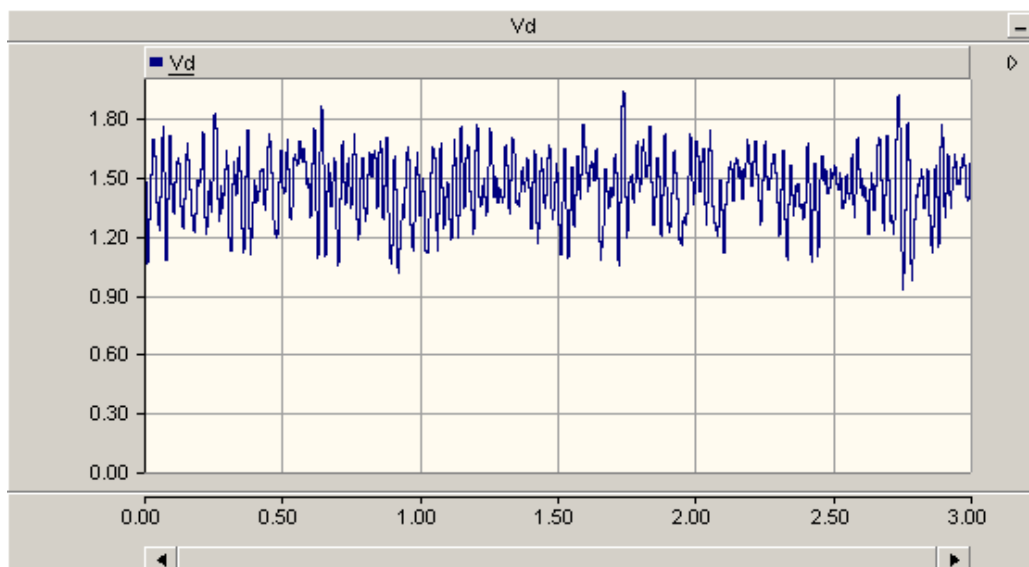


Figur 6.20. Reaktiva effektflödet från STATCOM in i nätet.

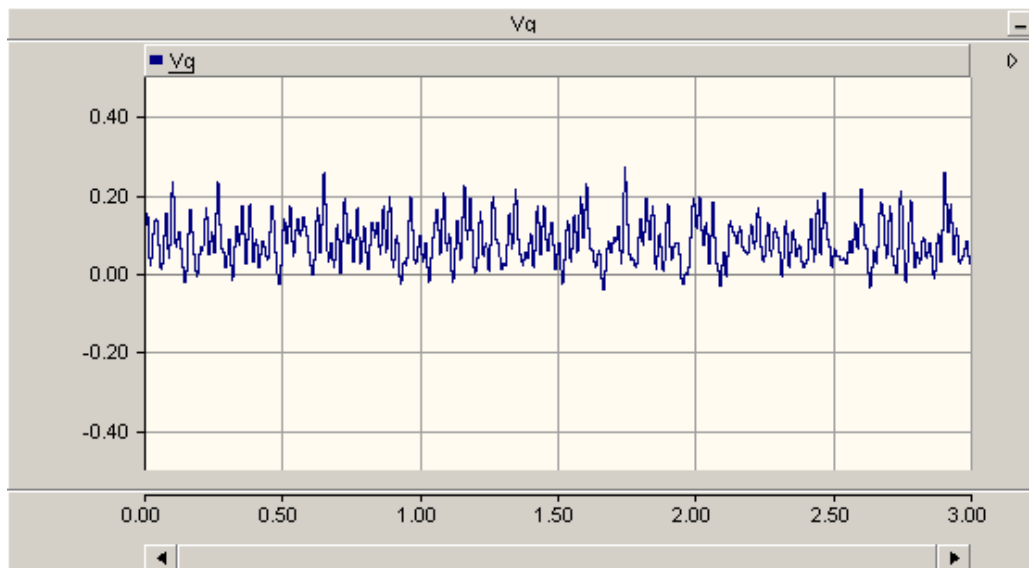


Figur 6.21. Aktiva effektlödet från STATCOM in i nätet.

Eftersom effektlödena ut ur STATCOM ska kunna förändras snabbt, krävs det att moduleringen reagerar snabbt. I figur 6.22 och 6.23 ses V_d respektive V_q , vilka skapar styrsignalen i moduleringen. Som i simuleringsfallet ovan, existerar fortfarande beroendet mellan V_d och det reaktiva effektlödet och mellan V_q och det aktiva effektlödet.

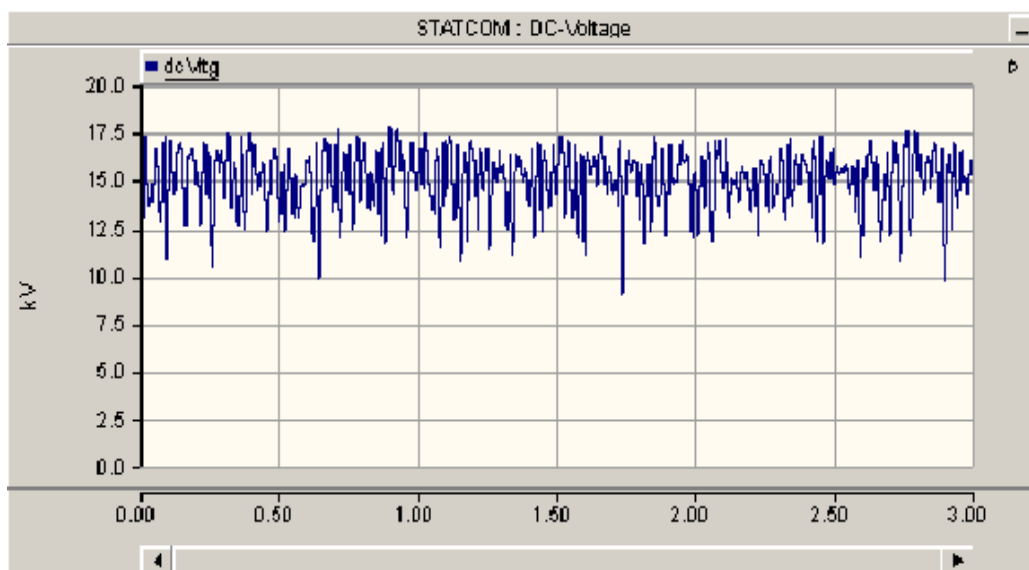


Figur 6.22. d -komponenten (V_d) av styrsignalen.



Figur 6.23. q -komponenten (V_q) av styrsignalen.

I figur 6.24 nedan ses mellanledningsspänningen, vilken ändrar sig snabbt. Trots detta styrs spänningsnivån i medeltal till att ligga runt 15 kV. Skalningen av bärvågen i moduleringen leder till att mängden levererad reaktiv effekt inte påverkas nämnvärt av spänningsdipparna i mellanledet.

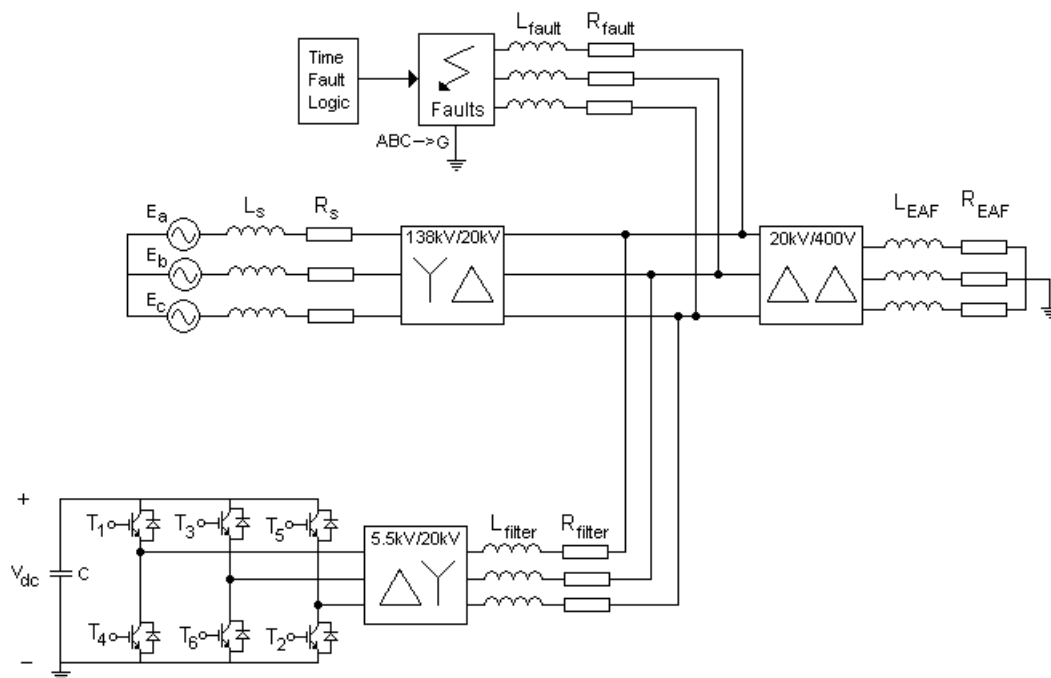


Figur 6.24. Mellanledningsspänningen.

6.3 Simulering av symmetriskt fel på 20 kV-noden

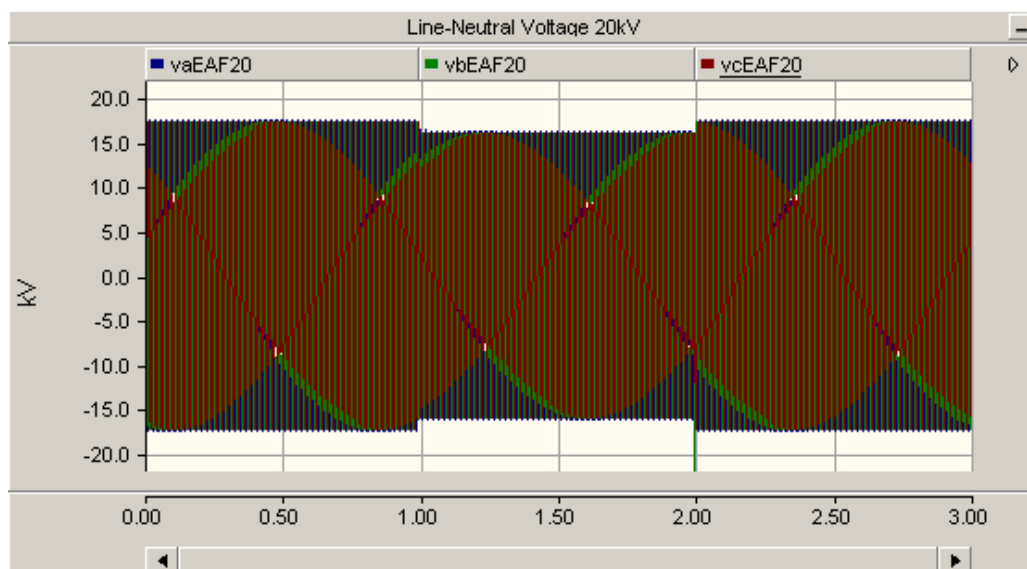
För att undersöka hur STATCOM klarar ett momentant spänningsfall i form av ett steg, kortsluts det tre faserna på 20 kV-noden. Konfigurationen som används för att simulera ett trefas-fel kan ses i figur 6.25. Spänningsnivån på 20 kV-noden, när felet inträffar, beror på vilken impedans felet har. Systemparametrarna är samma som i de

övriga simuleringarna, tabell 6.3. EAF är inställd så att dess impedans hålls konstant under simuleringen. EAF ger alltså inte upphov till några spänningsvariationer.

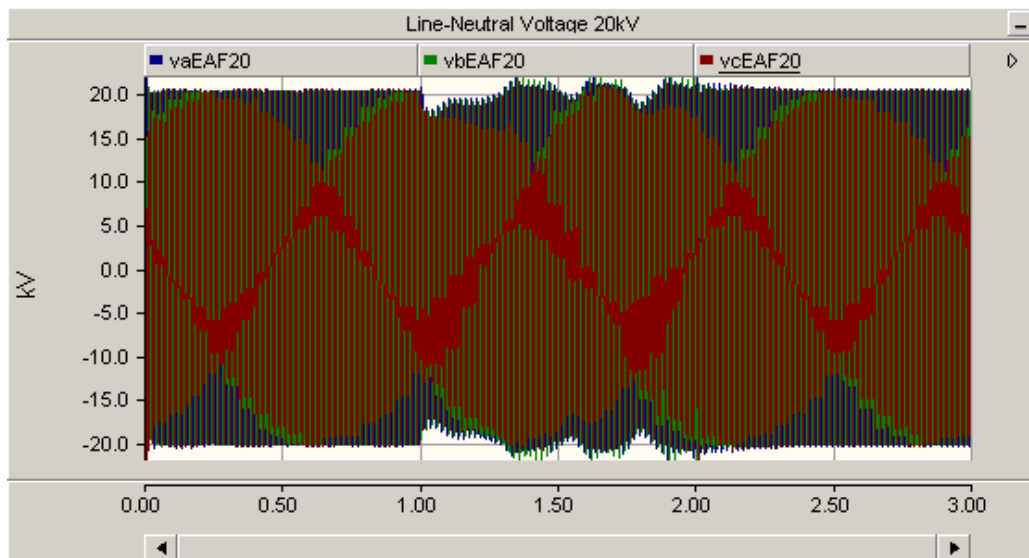


Figur 6.25. Simuleringsmodellen för symmetriskt fel.

Fasspänningarna på 20 kV-noden sjunker momentant när de tre faserna kortsluts och kopplas till jord, figur 6.26. Med STATCOM inkopplad för att kompensera för spänningsfallet, ökar fasspänningarna men blir något instabila, figur 6.27.

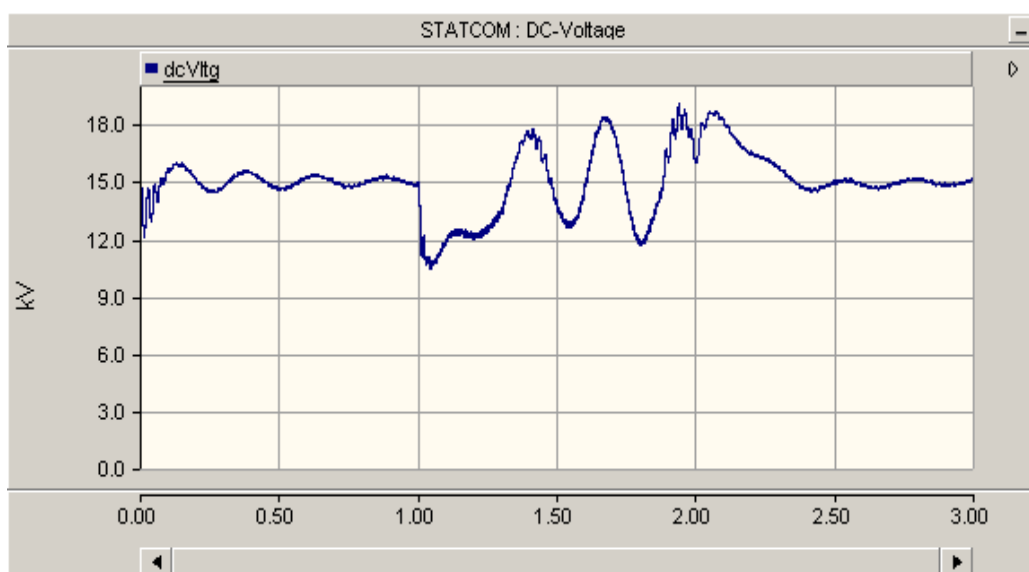


Figur 6.26. Fasspänningarna på 20 kV-noden vid trefas-fel.

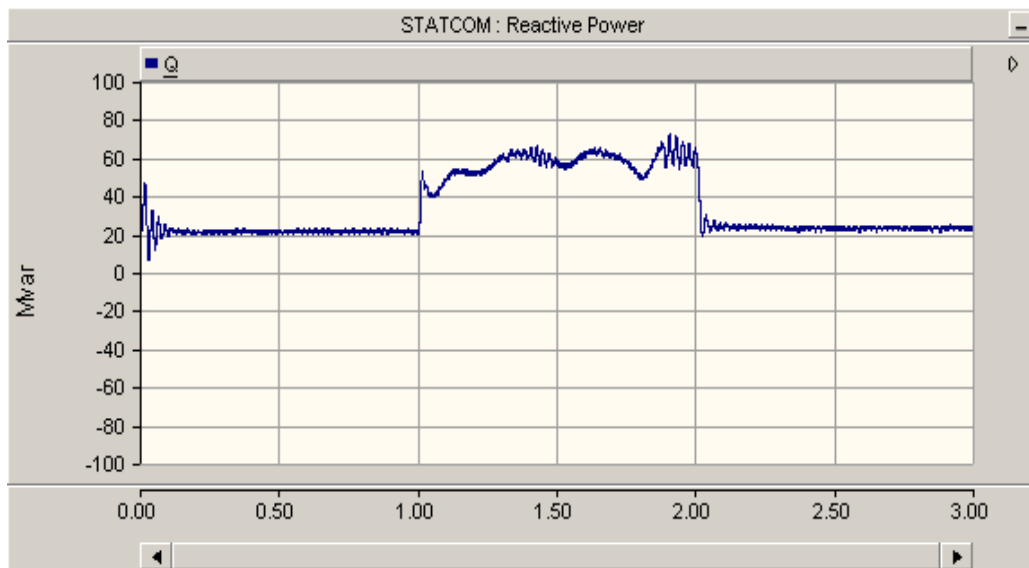


Figur 6.27. Fasspänningarna på 20 kV-noden vid trefas-fel med STATCOM inkopplad.

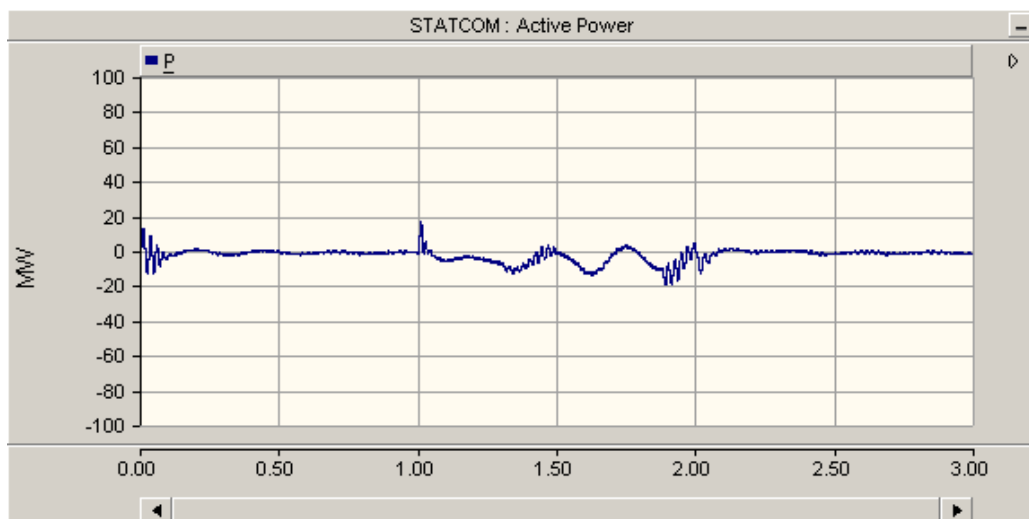
Kondensatorn, som ska hålla spänningen över mellanledet konstant, laddas ur på grund av att aktiv effekt flyter från STATCOM in till 20 kV-noden beroende på fasskillnaden mellan omvandlarens utgång och noden. Reglerkretsen hinner inte reglera flödet av aktiv effekt tillräckligt snabbt när ett momentant spänningsfall inträffar, vilket leder till att mellanledningsspänningen sjunker, figur 6.28. Det reaktiva effektlödet ska ha formen av ett steg, för att kompensera för det symmetriska spänningsfallet på 20 kV-noden, men i simuleringen blir det inte så, se figur 6.29. Mellanledningsspänningen sjunker så mycket att önskad reaktiv effekt inte kan levereras, vilket leder till att spänningen på 20 kV-noden inte hålls konstant. Det aktiva effektlödet ökar momentant när felet inträffar och kondensatorn töms därför på sin energi. Därefter flödar aktiv effekt in till omvandlaren för att ladda upp kondensatorn igen, figur 6.30.



Figur 6.28. Mellanledningsspänningen.

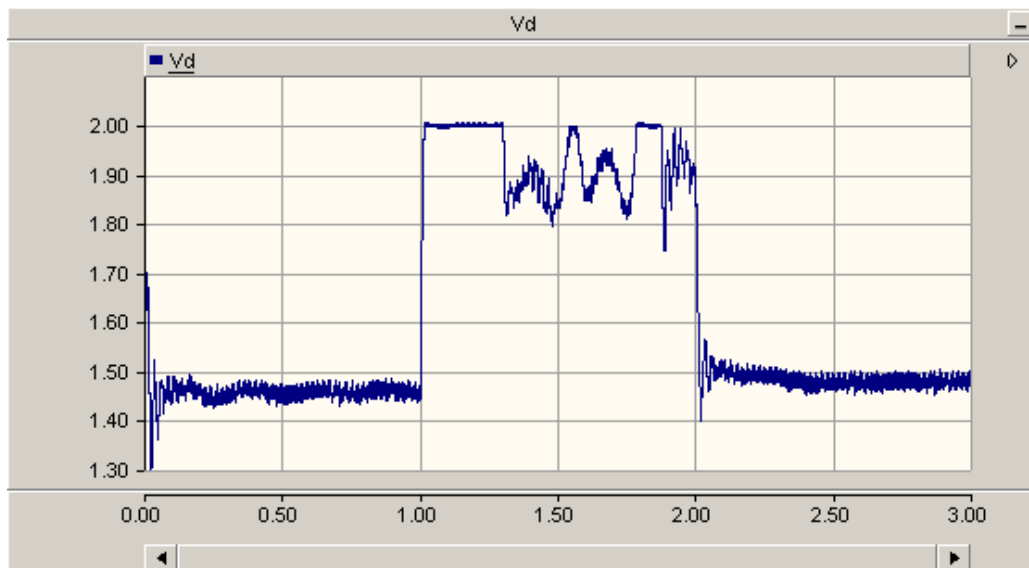


Figur 6.29. Reaktiva effektlödet från STATCOM in i nätet.

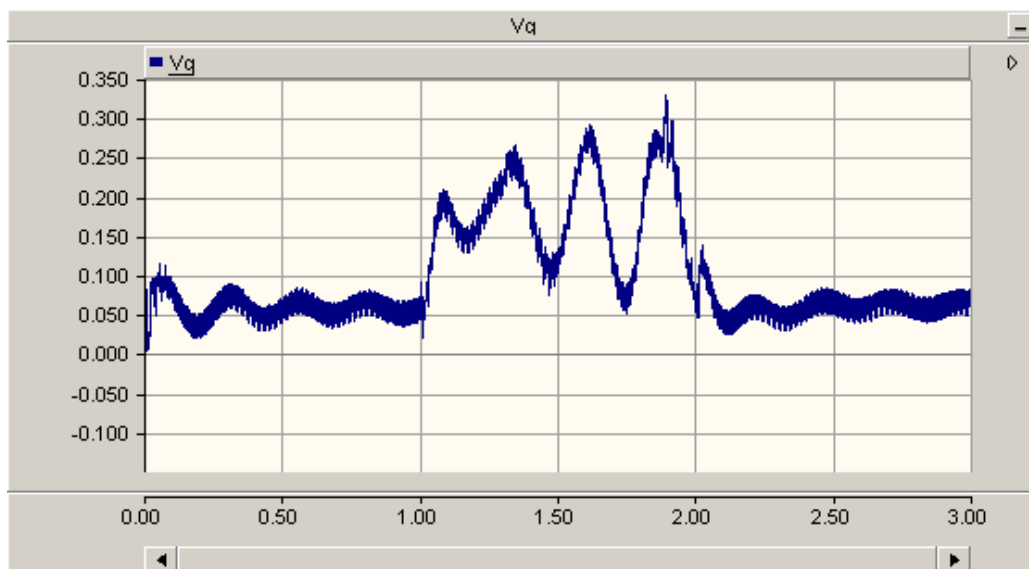


Figur 6.30. Aktiva effektlödet från STATCOM in i nätet.

Regulatorn, som har till uppgift att styra flödet av reaktiv effekt och därmed också nätspänningen, är relativt snabb, vilket kan leda till övermodulation, om inte signalen V_d begränsas. Detta inträffar då regulatorn försöker öka det reaktiva effektlödet mer än vad den kan. Eftersom signalen V_d är begränsad, kommer denna att nå sin övre gräns, se figur 6.31. Då V_d når sin övre gräns fortsätter integral-delen av PI-regulatorn att växa i ett försök att minimera felet, vilket leder till wind-up. Detta är anledningen till att systemet börjar självsvänga. Signalen V_q , figur 6.32, är något instabil, vilket leder till att mellanledningsspänningen inte kan regleras till 15 kV.



Figur 6.31. d -komponenten (V_d) av styrsignalen.



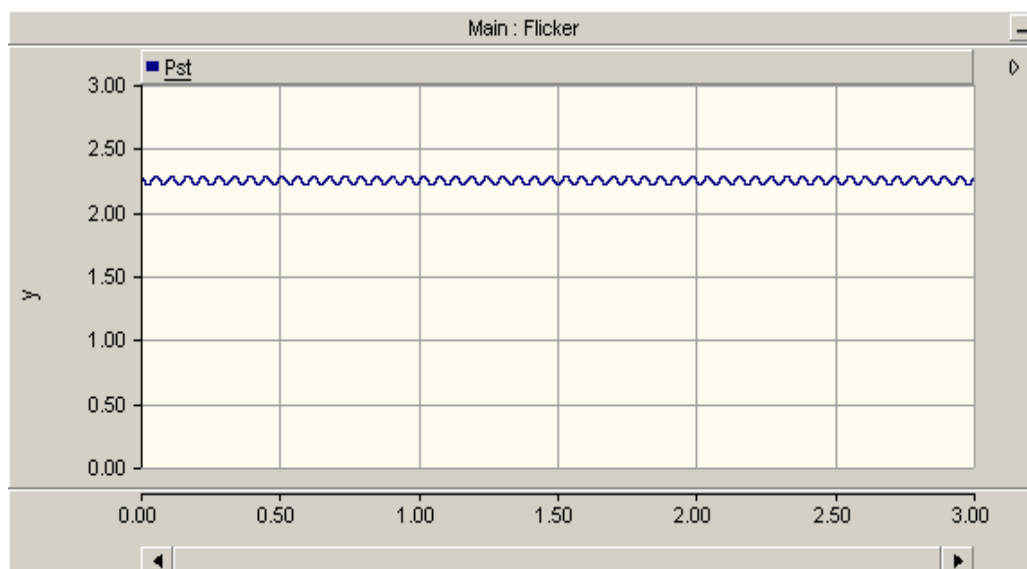
Figur 6.32. q -komponenten (V_q) av styrsignalen.

6.4 Flimmermätning - simulering

Då simuleringar utförts med ljusbågsugnen, har flimmermätning gjorts enligt [7]. Flimmermätaren har tillhandahållits av SwedPower AB i Malmö. Den implementerade flimmermätaren ger ett kontinuerligt värde på flimmer, vilket använts för att titta på dess omfattning. Det korrekta är att få ett värde som uppmätts under tio minuter, detta skulle dock innebära en simulering som varar i åtta timmar. Som nämnts i kapitel 2, Flimmer och spänningsvariationer, ska $P_{st} \leq 1.0$ för att flimret inte ska uppfattas som störande.

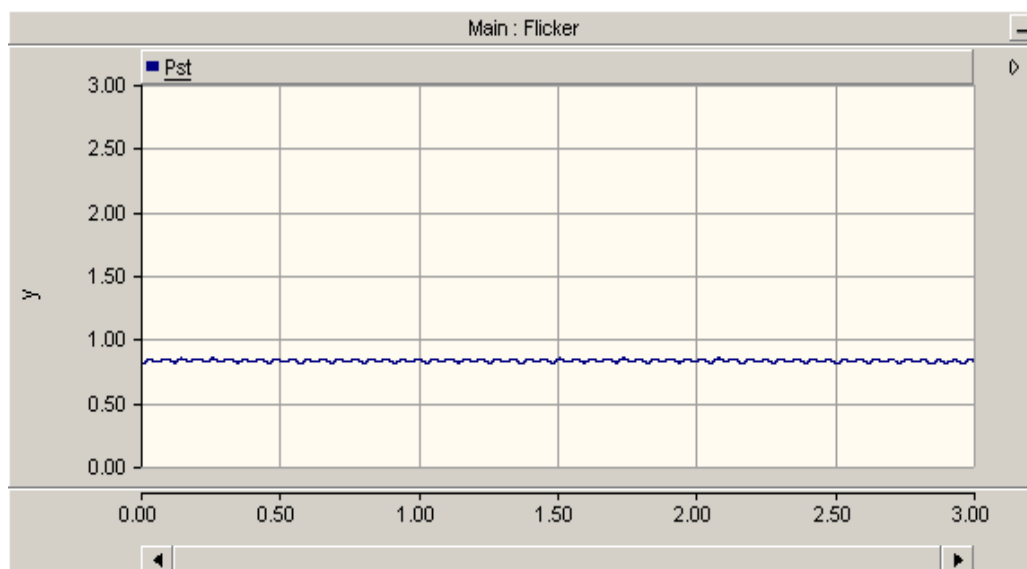
6.4.1 Sinusvarierande spänningsvariationer

Då simulering utförts på systemet utan kompensering fås ett $P_{st} \approx 2.25$, se figur 6.33, vilket innebär att flimrar kommer att skapas.



Figur 6.33. P_{st} utan kompensering

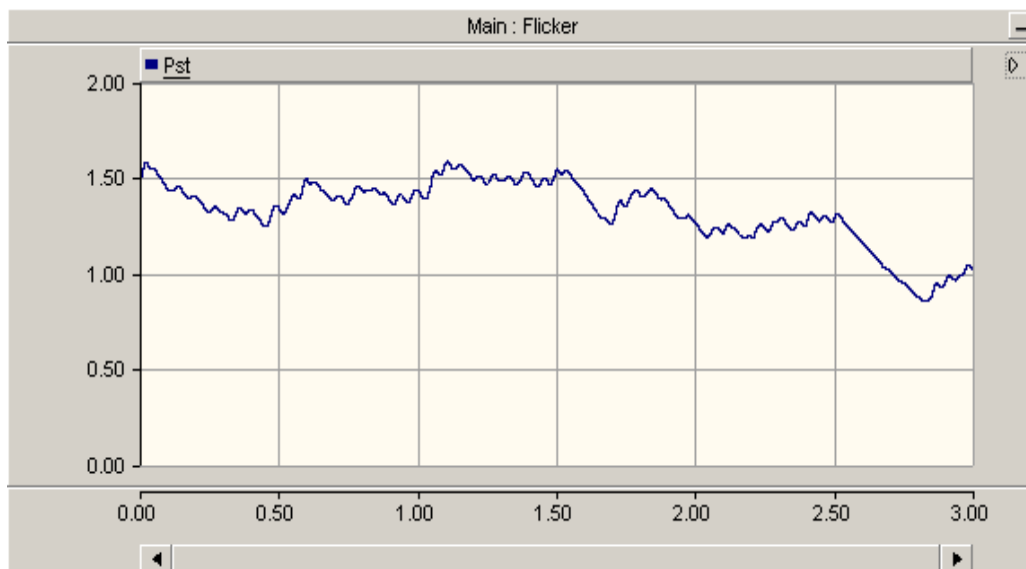
Då reaktiv effektkompensering används för att minska spänningsvariationerna är $P_{st} \approx 0,80$, se figur 6.34. Den STATCOM, som implementerats i detta arbete, minskar sålunda flimret med en faktor 2.8 när ljusbågsugnen ger upphov till sinusvarierande spänningsvariationer.



Figur 6.34. P_{st} med kompensering

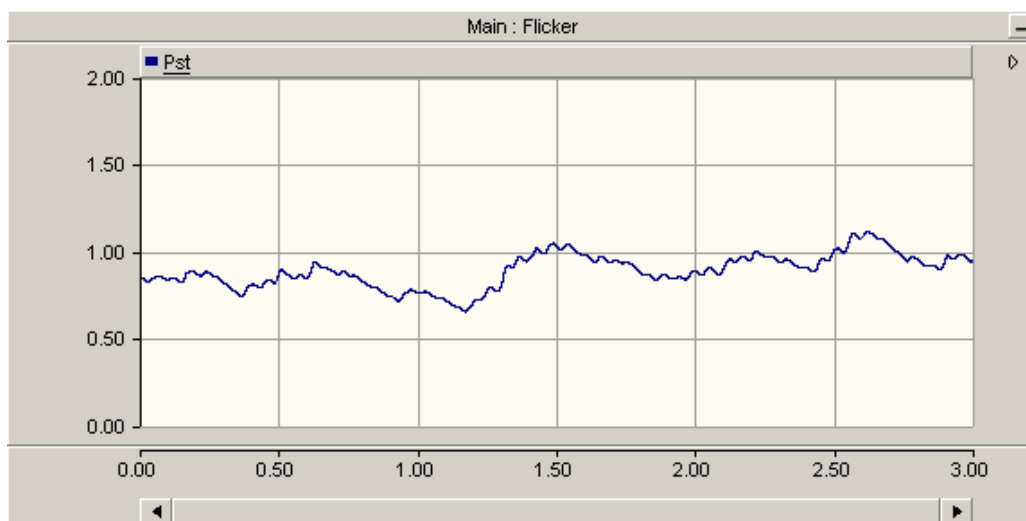
6.4.2 Gaussfördelade spänningsvariationer

Då simulering utförts på systemet utan kompensering fås en graf där flimmernivån varierar en del, i medeltal är $P_{st} \approx 1.30$, se figur 6.35.



Figur 6.35. P_{st} utan kompensering

Med STATCOM inkopplad minskar spänningsvariationerna till $P_{st} \approx 0,90$, se figur 6.36. Sålunda minskar flimret med en faktor 1.4 när ljusbågsugnen ger upphov till gaussfördelade spänningsvariationer.



Figur 6.36. P_{st} med kompensering

7 Slutsatser

Utifrån simuleringarna kan en del slutsatser dras angående hur bra STATCOM, som implementerats i arbetet, är. De spänningsvariationer, som ljusbågsugnen ger upphov till, dämpas på ett bra sätt, medan kompenseringen av ett trefas-fel blir något ostabil.

Vid flimmermätningarna konstateras att flimmernivåerna dämpas så pass mycket att det inte ska vara störande för människor. Vid gaussfördelade spänningsvariationer dämpas flimret till att vara precis under nivån för vad som anses vara acceptabelt. Detta kan möjligtvis förbättras genom att använda andra regulatorparametrar. I detta arbete har dock parametrarna valts för att båda simuleringsfallen med ljusbågsugnen ska fungera tillfredsställande. Trimmas parametrarna bättre för det ena simuleringsfallet blir det andra sämre. I detta arbete används samma regulatorparametrar till alla simuleringsfallen.

Vidare kan konstateras att STATCOM inte klarar av att kompensera för ett trefas-fel lika bra som för varierande spänningsvariationer. Detta beror dels på att regulatorparametrarna inte är anpassade för detta simuleringsfall, dels på att kondensatorn, som ska hålla mellanledningsspänningen vid sitt nominella värde, laddas ur för snabbt när trefas-felet inträffar. En större kondensator kan förhindra detta, men till priset av att det tar längre tid att ladda upp kondensatorn igen, när mellanledningsspänningen av någon anledning sjunkit. En högre mellanledningsspänning minskar också följderna av att mellanledningsspänningen sjunker, då tillräckligt med reaktiv effekt ändå kan levereras. Högre effektklassning av STATCOM innebär också att flimmer kan dämpas effektivare.

STATCOM finns redan att köpa på marknaden, bland annat säljer ABB en STATCOM under namnet SVC Light, så konceptet är redan väl utarbetat. Simuleringsmodellen, som används i detta arbete, kan vidareutvecklas för att få en bättre koppling till verkligheten, genom att ta hänsyn till hur mycket ström och spänning som verkliga komponenter tål.

Referenser

- [1] National Encyclopedin (2005-12-01), *Ljusbågsugn*
http://www.ne.se/jsp/search/article.jsp?i_art_id=243636&i_word=ljusb%e5gsugn
- [2] Power Standards Lab (2005-11-25), *Flicker*
<http://powerstandards.com/tutorials%5CFlicker.htm>
- [3] National Encyclopedin (2005-12-01), *Ljusbåge*
http://www.ne.se/jsp/search/article.jsp?i_art_id=243633&i_word=ljusb%e5ge
- [4] CIGRE Study Committee B4 - Working Group B4.19 (2003), *Static Synchronous Compensator (STATCOM) for Arc Furnace and Flicker Compensation*, CIGRE, Paris.
- [5] Institute of Electrical and Electronics Engineers – Transmission and Distribution Committee (2004), *IEEE Recommended Practice for Measurement and Limits of Voltage Fluctuations and Associated Light Flicker on AC Power Systems*, IEEE, New York.
- [6] International Electrotechnical Commission (1990), *IEC 868 Amendment 1 (1990), Flickermeter, Functional and design specifications*, IEC, Geneva.
- [7] Institute of Electrical and Electronics Engineers – Flicker Task Force – P1453 (2005-12-13), *Voltage and Lamp Flicker Issues: Should the IEEE Adopt the IEC Approach?*
<http://grouper.ieee.org/groups/1453/drpaper.html#IEEE%20Flicker%20Standards>
- [8] University of Wollongong, (2005-12-07), *Voltage Fluctuations in the Supply System*
<http://www.elec.uow.edu.au/iepqrc/files/technote7.pdf>
- [9] Alaküla, Mats (2003), *Power electronic control*, KFS, Lund.
- [10] Rong, Cai (2004), *Analysis of STATCOM for Voltage Dip Mitigation*, Masters Thesis, Department of Electric Power Engineering, Chalmers University of Technology, Gothenborg.

- [11] Alaküla, Mats – Gertmar, Lars – Samuelsson, Olof (2003), *Elenergiteknik*, KFS, Lund.
- [12] Mohan, Ned – Undeland, Tore M. – Robbins, William P. (1995), *Power Electronics Converters, Applications and Design*, John Wiley & Sons, New York.
- [13] Holtz, Joachim (1994), *Pulsewidth Modulation for Electronic Power Conversion*, Proceedings of the IEEE, vol. 82, No.8, August 1994, Wuppertal University, Wuppertal.
- [14] National Encyclopedin (2005-12-01), *Percentil*
http://www.ne.se/jsp/search/article.jsp?i_art_id=281718&i_word=percentil
- [15] Schrauder, Colin (1999), *STATCOM for Compensation of Large Electric Arc Furnace Installations*, Proc. IEEE Power Eng. Soc. Summer Meeting, Edmonton. pp. 1109-1112.

Appendix A

A.1 Trefas till tvåfas transformation

Genom att använda Clarke-transformation kan trefasstorheterna x_a , x_b och x_c transformeras till tvåfasig vektorrepresentation i det stationära α, β -talplanet.

$$\vec{x}^{\alpha\beta} = x_\alpha + jx_\beta = K \left(x_a + x_b \cdot e^{j\frac{2\pi}{3}} + x_c \cdot e^{j\frac{4\pi}{3}} \right) \quad (\text{A.1})$$

För att systemet ska vara effektinvariant sätts

$$K = \sqrt{\frac{2}{3}} \quad (\text{A.2})$$

Mer om effektinvarians i delkapitel A.3 nedan.

Ställs vektorerna x_α och x_β upp i reell och imaginär notation fås

$$\begin{cases} x_\alpha = \sqrt{\frac{3}{2}} \left(x_a - \frac{1}{2}(x_b + x_c) \right) \\ x_\beta = \sqrt{\frac{1}{2}}(x_b - x_c) \end{cases} \quad (\text{A.3})$$

Då systemet är balanserat är

$$x_a + x_b + x_c = 0. \quad (\text{A.4})$$

Detta ger i matrisform

$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{3}{2}} & 0 & 0 \\ 0 & \sqrt{\frac{1}{2}} & -\sqrt{\frac{1}{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (\text{A.5})$$

där inversen i matrisform blir

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{2}{3}} & 0 \\ -\sqrt{\frac{1}{6}} & \sqrt{\frac{1}{2}} \\ -\sqrt{\frac{1}{6}} & -\sqrt{\frac{1}{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{A.6})$$

A.2 Vektortransformation

Vektorn i det stationära α, β -planet kan vidare transformeras till vektorrepresentation i det synkront roterande d, q -planet,

$$\vec{x}^{dq} = \vec{x}^{\alpha\beta} \cdot e^{-j\theta} \quad (\text{A.7})$$

vilket följer integralen av nätspänningen med vinkelskillnaden θ jämfört med α, β -planet, vilken fås enligt

$$\vec{e}^{\alpha\beta} = E \cdot e^{j\omega t} \quad (\text{A.8})$$

$$\vec{\psi}^{\alpha\beta} = \int \vec{e}^{\alpha\beta} dt = \Psi \cdot e^{j\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)} \Rightarrow \theta = \omega t - \frac{\pi}{2} \quad (\text{A.9})$$

där ωt är nätspänningens vinkelhastighet. Detta kan ses i figur A.1 nedan.

Skrivs vektorn i det synkront roterande d, q -talplanet om fås

$$\begin{aligned} x_d + jx_q &= (x_\alpha + jx_\beta)(\cos \theta - j \sin \theta) = \\ &= (x_\alpha \cos \theta + x_\beta \sin \theta) + j(x_\beta \cos \theta - x_\alpha \sin \theta) \end{aligned} \quad (\text{A.10})$$

vilket i reell och imaginär notation blir

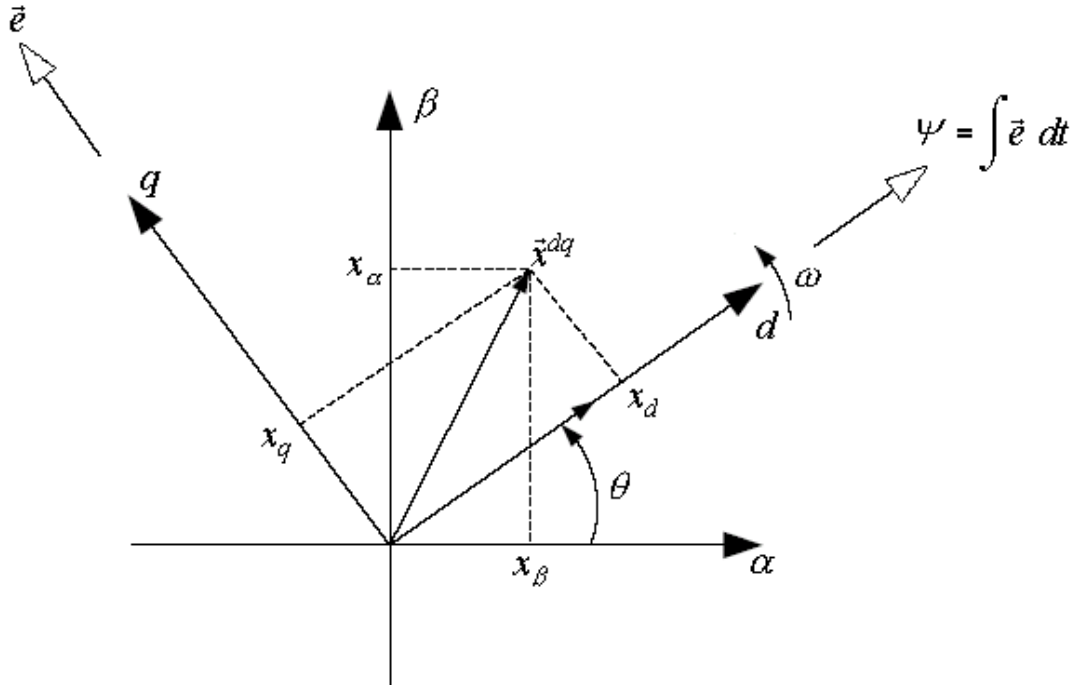
$$\begin{cases} x_d = x_\alpha \cos \theta + x_\beta \sin \theta \\ x_q = x_\beta \cos \theta - x_\alpha \sin \theta \end{cases} \quad (\text{A.11})$$

vilket kan ställas upp i matrisform

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{A.12})$$

där inversen på matrisform ställs upp

$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} \quad (\text{A.13})$$



Figur A.1. Relationen mellan det stationära α, β -planet och det synkront roterande d, q -planet

A.3 Effektinvariants

Om effekten i det två-fasiga systemet ska kunna uttryckas på samma sätt som i det tre-fasiga systemet ställs följande ekvation upp

$$p(t) = u_\alpha(t)i_\alpha(t) + u_\beta(t)i_\beta(t) = u_a(t)i_a(t) + u_b(t)i_b(t) + u_c(t)i_c(t) \quad (\text{A.14})$$

Ur ekvation (A.1) inses att de två-fasiga storheterna kan uttryckas i de tre-fasiga

$$\begin{aligned} u_\alpha &= K \frac{3}{2} u_a & i_\alpha &= K \frac{3}{2} i_a \\ u_\beta &= K \frac{\sqrt{3}}{2} (u_b - u_c) & i_\beta &= K \frac{\sqrt{3}}{2} (i_b - i_c) \end{aligned}$$

Är systemet balanserat antas det att

$$u_a(t) + u_b(t) + u_c(t) = 0 \quad (\text{A.15})$$

$$i_a(t) + i_b(t) + i_c(t) = 0 \quad (\text{A.16})$$

och då kan effekten i det tre-fasiga systemet tecknas som

$$p(t) = K^2 \frac{3}{2} (u_a(t)i_a(t) + u_b(t)i_b(t) + u_c(t)i_c(t)) \quad (\text{A.17})$$

där det tydligt framgår att koefficienten K ska ha följande värde för att systemet ska vara effektinvariant

$$K = \sqrt{\frac{2}{3}} \quad (\text{A.18})$$