UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E APLICADAS ENGENHARIA ELÉTRICA

GEOVANE ALVES DE OLIVEIRA

DESENVOLVIMENTO DE UM STATIC VAR COMPENSATOR (SVC) PARA CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA.

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

JOÃO MONLEVADE 2018

GEOVANE ALVES DE OLIVEIRA

DESENVOLVIMENTO DE UM STATIC VAR COMPENSATOR (SVC) PARA CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA.

Monografia apresentada como requisito à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica, do Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas, da Universidade Federal de Ouro Preto.

Orientador: Prof. Dr. Renan Fernandes Bastos

JOÃO MONLEVADE 2018

O482d Oliveira, Geovane Alves.

Desenvolvimento de um Static Var Compensator (SVC) para correção de fator do potência. [manuscrito] / Geovane Alves Oliveira. - 2018.

65f.: il.: color; grafs; tabs.

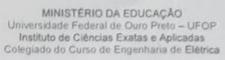
Orientador: Prof. Dr. Renan Fernandes Bastos.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas. Departamento de Engenharia Elétrica.

Engenharia Elétrica.
 Fator de Potência.
 Controladores elétricos.
 Bastos, Renan Fernandes.
 Universidade Federal de Ouro Preto.
 Titulo.

CDU: 621.3







ATA DE DEFESA

Aos 18 dias do mês de Dezembro de instituto, foi realizada a defesa de Geovane Alves de Oliveira sene	monografia pelo	(a) formando (a)
pelos professores Renan Fernandes Bastot	s, Gabriel A. Fogli e Ig	or Dias Neto
O (a) candidato (a) intitulada Desenvolvimento de um STATI de fator de potência		
unanimidade, pela Apovocao de C.S., de acordo com a tabela 1. Na for que é assinada pelos membros da comissão	io (a) candidato(a), ma regulamentar foi l	avrada a presente ata
Tabela 1 – Notas de avaliaç		
Banca Examin	nadora	Nota
Renan Fernandes Bastos		6.5
Gabriel A. Fogli		63
Igor Dias Neto Média		6-2
João Montes	evade, 18 de Dez	zembro de 2018
Professor(a) Orientador(a)	Professor(a) C	Coorientador(a)
George Aber de Chievra	Gobsiel Aza	vedo fagli
Aluno(a)	Professor(a)	Convidado(a)
Professor(a) Convidado(a)		



AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais Geraldo e Maria, aos quais não terei nunca em vida condições de retribuir tudo o que fizeram por mim. Desde criança o incentivo aos estudos, a cobrança por boas notas, a educação rígida, o ensinamento do respeito para com todos, e durante esses longos anos os sacrifícios feitos para que eu pudesse alcançar meus objetivos. Longos dias na loja, muito trabalho, uma jornada cansativa, mas que por mais de cinco anos foi a rotina dele, meu pai, que foi mais que um braço direito, mas meu ponto de apoio por esses longos anos, para não falar por toda minha vida. Minha mãe, que sempre me deu forças, ajudando quando o trabalho apertava, mesmo tendo mil coisas para fazer, e sempre tentando me animar, e me fazendo acreditar que no fim tudo iria dar certo. Pai e mãe, obrigado por serem os melhores pais que eu poderia ter na vida, Deus foi maravilhoso me concedendo a oportunidade de ser filho de vocês.

As minhas irmãs, Franciele e Márcia e seu marido Arnone por todo apoio ao longo dessa jornada, pelo incentivo, auxílio, carinho, conselhos e os momentos de descanso, lazer e boas conversas e brincadeiras que me ajudaram na minha vida toda, não só durante esses anos de faculdade, muito obrigado.

Aos meus sobrinhos, Giovanna, Jhonatan, Jeniffer e Rafaela por fazerem parte desta família maravilhosa que Deus me concedeu, e por me ajudarem sempre que precisei.

A minha esposa Luana, que desde a época que nos conhecemos, começamos o namoro sempre me incentivou a estudar, a querer sempre ser melhor, como pessoa, como profissional como ser humano. São 10 anos das nossas vidas juntos, e todos os anos de faculdade você esteve presente, como namorada, como noiva, agora esposa e sempre que precisei como amiga, como parte da minha vida. Você sabe como foi difícil chegar até aqui, por muitas vezes pensei em desistir, fiquei desanimando, mas você sempre me ajudou, me incentivando, me dando carinho nos momentos de tristeza, me consolando quando as coisas não iam como eu esperava, e me dando amor todos esses anos. Amor, minha linda, muito obrigado por fazer parte da minha vida.

RESUMO

Neste trabalho será desenvolvida a modelagem, controle e simulação do Static Var Compensator (SVC), ou em português Compensador Estático de Reativos (CER), para o caso monofásico e posteriormente para o caso trifásico, o qual tem por finalidade controlar de forma automática o Fator de Potência. O princípio de funcionamento se baseia em que uma capacitância fixa gere uma potência reativa capacitiva fixa, maior que a potência reativa da carga em questão, considerada predominantemente indutiva, e o acionamento de dois tiristores em anti-paralelo no caso monofásico e uma combinação de dois tiristores por fase para o caso trifásico chaveando uma indutância, sendo disparados através do controle desenvolvido via software PSIM através de um controlador PI. Dessa forma corrigindo o FP para a unidade ou para o mais próximo dela.

Palavras-chave: Fator de Potência (FP). SVC. Potência Reativa. Controlador.

ABSTRACT

In this work the modeling, control and simulation of the Static Var Compensator (SVC) will be developed, or in Portuguese Static Compensator of Reactive (CER), for the single-phase case and later for the three-phase case, whose purpose is to automatically control the Power factor. The principle of operation is based on the fact that a fixed capacitance generates a fixed capacitive reactive power, greater than the reactive power of the load in question, considered predominantly inductive, and the activation of two anti-parallel thyristors in the single-phase case and a combination of two phase thyristors for the three-phase case by switching an inductance, being triggered through the control developed via PSIM software through a PI controller. That way correcting the FP for the unit or to the nearest one.

Key words: Power Factor (PF). SVC. Reactive power. Controller.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Triângulo das potências.	4
Figura 2: Carga RL por onde circula uma corrente IL.	5
Figura 3: Conexão do banco de capacitor com a carga	6
Figura 4: Diagrama de um sistema elétrico com um FAP.	7
Figura 5: Diagrama elétrico do Static Var Compensator (SVC)	8
Figura 6: Potência reativa x Potência ativa da carga	10
Figura 7: Fator de potência variando com o nível de reativo inserido	11
Figura 8: Estrutura do circuito do SVC completo que será utilizado na simulação, a direita dos pontos A e B o SVC propriamente dito, e a esquerda a fonte e a carga.	12
Figura 9: Circuito utilizado como referência para o desenvolvimento das equações	
Figura 10: Ângulo de disparo α=90° e ângulo de extinção β da corrente	
Figura 11: Ângulo de disparo α=120° e ângulo de extinção β da corrente	
Figura 12: Ângulo de disparo α=150° e ângulo de extinção β da corrente	
Figura 13: Representação do tiristor ideal	
Figura 14: Representação das três junções pn	
Figura 15: Curva característica v-i	
Figura 16: Circuito inicial de controle do ângulo de disparo alfa	
Figura 17: Diagrama de controle em malha aberta.	
Figura 18: Diagrama de controle em malha fechada	
Figura 19: Circuito simulado via software PSIM	
Figura 20: Circuito inicial simplificado.	
Figura 21: Forma de onda para α = 90°, onde em vermelho está representada a tensão da fonte e em azul a corrente	23
Figura 22: Forma de onda para α = 120°, onde em vermelho está representada a tensão da fonte e em azul a corrente	23
Figura 23: Forma de onda para α = 150°, onde em vermelho está representada a tensão da fonte e em azul a corrente	
Figura 24: Potência Reativa x Ângulo Alfa para indutâncias de 50, 100 e 200 mH.	26
Figura 25: Circuito Final em malha aberta.	27
Figura 26: Forma de onda resultante para α =90° e FP=0,859 atrasado	27
Figura 27: Forma de onda resultante para α =120° e FP = 0,984 atrasado	28
Figura 28: Forma de onda resultante para α =150° e FP = 0,878 adiantado	28
Figura 29: Forma de onda resultante para α =180° e FP = 0,858 adiantado	
Figura 30: Harmônicas e THD para α=90°	
Figura 31: Harmônicas e THD para α=100°	31
Figura 32: Harmônicas e THD para α=110°.	31

Figura 33: Harmônicas e THD para α=120°	32
Figura 34: Harmônicas e THD para α=130°	32
Figura 35: THD (%) em função do ângulo α	34
Figura 36: Diagrama de controle em malha fechada	35
Figura 37: Circuito de controle em malha fechada	37
Figura 38: Circuito de controle em malha fechada final	38
Figura 39: Circuito com variação de reativo capacitivo	39
Figura 40: Forma de onda resultante, a qual o controlador gerou um α =106,05°.	39
Figura 41: Circuito de controle para correção com inserção de elemento capacitivo	
	40
Figura 42: Circuito de controle para correção com inserção de elemento capacitivindutivo	⁄о е 41
Figura 43: Forma de onda resultante, a qual o controlador gerou um α =108,79°	41
Figura 44: Circuito de controle para correção com inserção de elemento capacitivindutivo	/о е 42
Figura 45: Harmônicas e THD para inserção de elemento capacitivo	43
Figura 46: Harmônicas e THD para inserção de elemento capacitivo e indutivo	43
Figura 47: Circuito com adição de elementos reativos a serem chaveados	44
Figura 48: Resultado temporal do sistema controlado em malha fechada após a	
inserção de elementos reativos chaveados em 0.5, 1.0 e 1.5 segundos	
Figura 49: Estrutura básica do SVC trifásico	
Figura 50: Estrutura do bloco de conversão ABC para αβ do PSIM	
Figura 51: Estrutura de controle para gerar o ângulo α	
Figura 52: Estrutura de disparo dos tiristores	
Figura 53: Resultado em regime permanente para fase A	
Figura 54: Resultado em regime permanente para fase B	
Figura 55: Resultado em regime permanente para fase C	
Figura 56: Estrutura das cargas trifásicas a serem conectadas	
Figura 57: Resposta temporal para a potência reativa total	
Figura 58: Resposta temporal para o Fator de Potência	
Figura 59: Resposta temporal para o Ângulo α	
Figura 60: Harmônicas e THD para α=140°	
Figura 61: Harmônicas e THD para α=150°	
Figura 62: Harmônicas e THD para α=160°	
Figura 63: Harmônicas e THD para α=170°	
Figura 64: Harmônicas e THD para α=180°	63

LISTA DE SIGLAS

BC Banco de Capacitor

CA Corrente Alternada

CC Corrente Contínua

CER Compensador Estático de Reativos

FAP Filtro Ativo Paralelo

FP Fator de Potência

MV Variável Manipulada - Manipulated Variable

PI Proporcional Integral

SCR Retificador Controlado a Silício

SVC Static Var Control

THD Distorção Harmônica Total - Total Harmonic Distortion

VA Volt Ampere

VAK Tensão Anodo Catodo

VAR Volt Ampere Reativo

VBO Tensão de Bloqueio Direto - Forward Breakdown Voltage

VGK Tensão Gate Catodo

Re Real

LISTA DE SÍMBOLOS

- **C** Capacitor
- **IL** Load Current
- f Frequência da rede
- I Corrente Fasorial
- if Resposta de Corrente Forçada
- Im Imaginário
- in Resposta de Corrente Natural
- L Indutor
- P Potência Ativa
- **Q** Potência Reativa
- **QC** Reativo Capacitivo
- **QT** Reativo Total
- Qcarga Potência reativa gerada pela carga
- **QL** Reativo indutivo
- Qmed Potência reativa gerada pelo SVC
- R Resistência
- S Potência Aparente
- V Tensão Fasorial
- Vm Tensão máxima
- X Reatância
- XC Reatância Capacitiva
- XL Reatância Indutiva
- **Z** Impedância
- 6 Ângulo da fase da tensão
- ω Frequência
- dldt Derivada em relação ao tempo
- α Ângulo de disparo do tiristor
- β Ângulo de extinção da corrente no SVC
- ϕ Ângulo de fase da corrente

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 CONTEXTUALIZAÇÃO	3
2.1 BANCO DE CAPACITORES	5
2.2 FILTRO ATIVO	7
2.3 STATIC VAR COMPENSATOR	8
2.4 CONSIDERAÇÕES	9
3 DESENVOLVIMENTO DO STATIC VAR COMPENSATOR (SVC)	10
3.1 CIRCUITO	11
3.2 DESENVOLVIMENTO DAS EQUAÇÕES	12
3.3 SCR	
3.4 CONTROLE	19
3.5 CONTROLADOR PI	
4 SIMULAÇÕES	
4.1 CIRCUITO INICIAL SIMPLIFICADO E RESULTADOS	21
4.2 CIRCUITO FINAL EM MALHA ABERTA E RESULTADOS	26
4.3 CIRCUITO DE CONTROLE EM MALHA FECHADA	34
5 SIMULAÇÃO DO SVC TRIFÁSICO	46
5.1 CÁLCULO DOS PARÂMETROS UTILIZADOS	
5.2 MÉTODO UTILIZADO PARA CÁLCULO DAS POTÊNCIAS	47
5.3 ESTRUTURAÇÃO DO SVC TRIFÁSICO VIA SIMULAÇÃO	49
5.4 RESULTADOS EM REGIME PERMANENTE	51
5.5 RESULTADOS NO TRANSITÓRIO	
6 CONCLUSÃO	
7 REFERÊNCIAS	
APÊNDICE A - EXEMPLO DE CORREÇÃO POR BANCO DE CAPACITOR	59
APÊNDICE B - HARMÔNICAS E THD PAR AO CASO MONOFÁSICO	61

1 INTRODUÇÃO

No ramo da indústria atualmente as máquinas elétricas tem cadeira cativa na grande maioria dos processos, e como consequência, aparecem os desafios que a energia elétrica, seu consumo, distribuição e a qualidade da energia trazem consigo.

O aumento da produtividade nos grandes centros de produção industrial com o uso de máquinas elétricas em geral, traz também o problema das grandes demandas que essas indústrias necessitam, e os problemas decorrentes da transmissão e distribuição de energia elétrica. (Boustead,1979)

O consumo de energia tem algumas variações quanto ao seu âmbito de consumo, ou seja uma escala para consumo residencial, comercial e industrial. E as especificações das legislações vigentes sobre as industriais são muito mais severas se comparadas a escala residencial por exemplo, pois tratam de parâmetros do consumo a serem seguidos estritamente pelos consumidores sob a aplicação de multas e taxas pelo descumprimento dos padrões exigidos.

Um dos parâmetros mais importantes definidos pelas concessionárias de energia e que devem ser seguidos pelos consumidores industriais sob a pena de multa é o fator de potência (FP), que deve permanecer acima de um valor definido pela legislação da concessionária. Corrigir o fator de potência é fundamental em qualquer instalação industrial. Quedas de tensão, perdas, sobrecargas são algumas das conseqüências de um fator de potência baixo numa instalação. (MME, 2012).

A legislação brasileira determina a manutenção do fator de potência o mais próximo possível de 1, tanto pelas concessionárias como pelos consumidores.

A legislação determina a forma de avaliação e o critério de faturamento da energia reativa que exceder os limites. Esses limites são de 0,92, dependendo do horário. Assim, para os períodos entre 6 e 24 h o fator deve ser no mínimo 0,92 para a energia e demanda de potência reativa indutiva fornecida. Entre 24 e 6 h, o mínimo estabelecido é 0,92 para energia e demanda de potência reativa capacitiva recebida. (Silva, 2009).

O presente estudo terá como tema o Static Var Compensator (SVC), ou em português, compensador estático de reativos (CER), onde será abordado o seu princípio de funcionamento através de simulações utilizando o software PSIM, para controlar o FP de uma carga conectada a um sistema elétrico monofásico.

Na próxima seção será feita uma contextualização, abordando o problema do fator de potência, alguns tipos de correção utilizados, bem como uma comparação das vantagens e desvantagens dos mesmos e uma consideração sobre o tema escolhido como objeto de estudo, o Static Var Compensator (SVC). Na seção 3, será detalhado o funcionamento do SVC utilizado, o equacionamento e o propósito final do trabalho. Na seção 4 serão apresentadas as simulações realizadas para o caso monofásico, bem como algumas relações utilizadas para definição do controle a ser utilizado. Na seção 5 será apresentada a simulação, discussão e os resultados para o caso trifásico, e na seção 6 será apresentada a conclusão acerca deste trabalho.

2 CONTEXTUALIZAÇÃO

O baixo fator de potência é um dos problemas mais comuns principalmente no meio industrial, onde devido as grandes cadeias produtivas o uso de máquinas elétricas em geral é necessário, sejam elas rotativas ou não.

A partir da relação do fator de potência, podemos considerar o problema do mesmo como sendo um valor abaixo de um mínimo especificado pela legislação das concessionárias de energia elétrica, ou seja para um dado consumo de potência ativa ou potência média, uma potência intitulada aparente é requerida. Porém quando uma carga tem presente em sua composição uma componente indutiva ou capacitiva muito alta em relação a componente resistiva, o valor do fator de potência é baixo, pois a potência média é muito baixa em relação a potência aparente.

O objetivo de qualquer sistema elétrico, é manter o fator de potência o mais próximo possível da unidade, ou seja, que predomine em sua totalidade ou maior parte dela a componente resistiva, ou que se de alguma forma as componentes indutivas e capacitivas estiverem presentes no sistema, que as mesmas tendam a se anular, tornando o fator de potência o melhor possível,ou seja próximo da unidade, e para isso existem alguns tipos de correção de fator de potência utilizados atualmente.

Para qualquer sistema elétrico em geral, a corrente total que nele circula, seja num sistema simples, ou em um linha de transmissão tem uma grande importância. Se o foco for a transmissão de energia, que envolve uma idéia macro, a corrente total que circula é ainda de maior importância, pois afeta a capacidade que uma tal linha pode transmitir.

Quanto maior for a corrente que circula em uma linha, mais dimensionado tem que ser o condutor que a conduz e maior são as perdas na transmissão da potência, pois a perdas aumentam quadraticamente, de acordo com $P = RI^2$. (BOYLESTAD, 2004).

Assim o melhor desempenho de uma linha é transportar o menor nível de corrente possível, e como a tensão é mantida constante, a potência aparente é diretamente proporcional a intensidade da corrente, e tal corrente é a menor possível

quando S = P e QT = 0, onde QT representa a potência reativa total do sistema. . (BOYLESTAD, 2004).

De acordo com a análise do triângulo de potências, quanto menor for o valor de QT, menor será o ângulo θ e por consequência a potência aparente. Desse modo, o fator de potência se aproxima da unidade, o que torna a corrente a menor possível, e o funcionamento do sistema elétrico se torna mais eficiente. (BOYLESTAD, 2004).

A figura 1 mostra o triângulo das potências, onde mostramos que quanto menor o ângulo θ , menor a potência aparente e por consequência maior o FP.

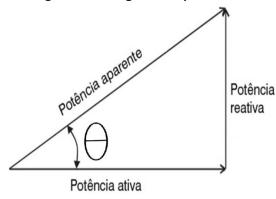


Figura 1: Triângulo das potências.

Fonte: Do autor.

O processo de introduzir elementos reativos em um sistema para melhorar o fator de potência é chamado de correção de fator de potência.

2.1 BANCO DE CAPACITORES

Considerando que nas indústrias as cargas tem comportamento predominantemente indutivo, os bancos de capacitores (BC) serão inseridos no sistema a fim de se corrigir o fator de potência, levando para o valor mais próximo possível da unidade.

A figura 2 mostra uma carga com a característica indutiva, onde a corrente que circula na mesma é denominada por IL, e onde a sigla R representa o resistor e a sigla L representa o indutor, onde a corrente IL possui uma componente real e uma imaginária.

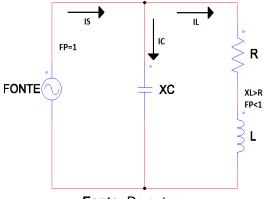
FONTE XL>R
FP<1

Figura 2: Carga RL por onde circula uma corrente IL.

Fonte: Do autor.

A correção por banco de capacitores consiste em alocar em paralelo com a carga um capacitor ou um conjunto de capacitores com o intuito de melhorar o FP do conjunto, onde IS é a corrente da fonte, IC é a corrente no ramo do capacitor e IL a corrente da carga, sendo XC a reatância capacitiva do dado capacitor inserido no sistema como mostra a figura 3.

Figura 3: Conexão do banco de capacitor com a carga.



Podemos observar que como os elementos serão conectados em paralelo, a tensão aplicada é igual para ambos, e assim sendo a corrente IL permanece inalterada, e altera-se apenas a corrente da fonte, que pode ser escrita como mostram a equação (1), a equação (2) e a equação (3). (BOYLESTAD, 2004).

$$Is = IC + IL \tag{1}$$

$$Is = Im(IC) + (Re)IL + Im(IL)$$
 (2)

$$Is = Re(IL) + Im(IL + IC)$$
(3)

Se a reatância capacitiva XC for escolhida de modo que (Im)IL = (Im)IC, o resultado é mostrado na equação (4).

$$Is = (Re)IL + j(0) \tag{4}$$

Se as componentes indutiva e capacitiva se anulam, o fator de potência nesse caso se iguala a unidade, pois se a parte reativa é igual a zero, somente se manifesta no circuito a componente resistiva, que é a parte real da carga, o que

representa uma condição de melhor funcionamento, ou seja, o mais eficiente possível dado o comportamento do mesmo. (BOYLESTAD, 2004).

2.2 FILTRO ATIVO

Os filtros ativos são dispositivos com conversores de potência que possuem como característica principal regular ou compensar tensões ou correntes, de forma a garantir componentes senoidais para a carga ou para a rede. (GONÇALVES, 2014).

Existem duas topologias principais dessa categoria de filtros, porém para nosso objetivo, apenas o filtro ativo paralelo será objeto de interesse.

O filtro ativo paralelo (FAP) é amplamente utilizado para eliminar as harmônicas da corrente, compensar correntes desequilibradas e compensar potência reativa. (GONÇALVES, 2014).

A figura 4 apresenta o diagrama de um sistema elétrico com um FAP, que é composto pelo conversor a, a rede elétrica e uma carga não linear, podendo o sistema ser monofásico ou trifásico. (GONÇALVES, 2014).

Rede i_C Carga não linear Filtro ativo

Figura 4: Diagrama de um sistema elétrico com um FAP.

FONTE: GONÇALVES, 2014.

A principal função do controle é sintetizar as correntes que através do barramento CC (geralmente um capacitor de grande porte) serão drenadas,

injetadas na rede ou utilizadas para compensar as distorções produzidas pela carga. (GONÇALVES, 2014).

2.3 STATIC VAR COMPENSATOR

Para cargas com potência reativa fixa capacitores são rotineiramente colocados em paralelo com as cargas, normalmente mais indutivas para a correção do fator de potência. Se uma carga tiver um valor de potência reativa constante, um capacitor fixo pode ser selecionado para corrigir o fator de potência para a unidade. No entanto, se uma carga tiver uma potência reativa variável, o arranjo do capacitor fixo resulta em um fator de potência variante. (HART, 2011).

O circuito da Figura 5 representa uma aplicação de um controlador para manter o fator de potência de unitário, variando a potência reativa da carga com inserção de uma parcela indutiva, a qual é controlada pelo ângulo de disparo dos tiristores em anti paralelo. (HART, 2011).

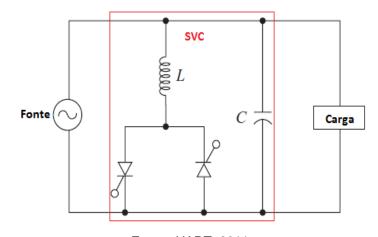


Figura 5: Diagrama elétrico do Static Var Compensator (SVC).

Fonte: HART, 2011.

A figura 5 evidencia em vermelho o SVC, onde a esquerda do mesmo está a fonte de alimentação do circuito e a direita a carga.

2.4 CONSIDERAÇÕES

Neste capítulo foram abordados alguns dos tipos de técnicas utilizadas para correção do fator de potência de um sistema elétrico genérico.

O BC é uma das técnicas mais utilizadas, e também uma das mais antigas, porém tem em sua simplicidade e custo reduzido uma larga aplicação, porém para cargas com potência reativa variável precisa ser sempre variado, adicionando ou retirando capacitores do banco para correção.

O FAP é uma técnica eficiente no que diz respeito a correção do desequilíbrio, pois pode eliminar componentes harmônicas, compensar correntes desequilibradas e ainda compensar a potência reativa, assim controlando o FP. O filtro ativo seria uma excelente técnica e muito eficiente, porém apresenta uma grande complexidade, um custo elevado, além de não ser muito viável para sistemas de altíssima potência.

Considerando todos os tipos de correção apresentados, o objeto de estudo escolhido para este trabalho o SVC, pois existem poucos estudos e bibliografias sobre o tema principalmente no Brasil, e também pela facilidade da simulação, além por ser um sistema com alta robustez para aplicações industriais de altíssima potência. Também em função das vantagens e desvantagens de cada tipo de correção, o SVC seria um método intermediário entre o BC e o FAP.

3 DESENVOLVIMENTO DO STATIC VAR COMPENSATOR (SVC)

A capacitância C da figura 5 é capaz de fornecer uma quantidade fixa de potência reativa, geralmente maior do que o requerido pela carga. A indutância paralela absorve uma quantidade variável de potência reativa, podendo alcançar o valor de duas vezes a fornecida pelo capacitor C, dependendo do ângulo de disparo dos SCRs. A potência reativa líquida fornecida pela combinação indutor-capacitor é controlada para coincidir com a parcela absorvida pela carga. Este tipo de correção do fator de potência é conhecido como Static Var Compensator (SVC). (HART, 2011).

QL Pcarga

Figura 6: Potência reativa x Potência ativa da carga.

Fonte: Do autor.

A partir da figura 6 podemos observar que a parcela reativa pode variar, sendo totalmente capacitiva, zero ou totalmente indutiva. Na figura 11 será apresentado o comportamento dessa variação, que para este trabalho foi estipulado que o FP variasse de 0,85 atrasado á 0,85 adiantado, e para tal fim o nível de reativo indutivo QL tem que variar de 0 a 2QC. Em azul será mostrado a parcela correspondente de potência aparente S para o caso em que a parcela

reativa é totalmente capacitiva,ou seja, o caso em que nenhuma parcela indutiva foi inserida no circuito deixando apenas a parcela reativa correspondente ao capacitor C da figura 5, onde o FP para este caso é capacitivo, em vermelho será mostrado o caso em que a parcela indutiva é duas vezes a parcela capacitiva, ou seja, quando QL = 2QC, onde o FP é indutivo para este caso, e quando a parcela QL é igual a parcela QC, a potência aparente S é igual a parcela de potência ativa P da carga e o FP é igual a unidade, sendo o ângulo do FP igual a zero.

Pcarga

OC

S=Pcarga e QL=QC

QL

Pcarga

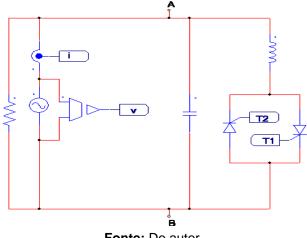
Fonte: Do autor.

Figura 7: Fator de potência variando com o nível de reativo inserido.

3.1 CIRCUITO

A estrutura do SVC que será utilizada é idêntica a apresentada na seção anterior, mas será apresentado na forma como será utilizado na simulação na figura 8, onde a direita dos pontos A e B está o SVC propriamente dito, formado pelo Capacitor e pelo ramo em paralelo conectado a ele, formado pelos dois tiristores e pelo indutor.

Figura 8: Estrutura do circuito do SVC completo que será utilizado na simulação, a direita dos pontos A e B o SVC propriamente dito, e a esquerda a fonte e a carga.

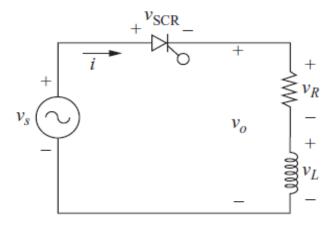


O SVC tem uma vantagem de adaptação rápida a mudança da potência reativa da carga. Ao invés de ter níveis discretos como com os bancos de capacitores, o SVC controla o nível de potência reativa através do controle utilizado. (HART, 2011).

3.2 DESENVOLVIMENTO DAS EQUAÇÕES

A figura 9 mostra um circuito retificador monofásico controlado por SCR de meia onda, onde o princípio de funcionamento pode ser usado para desenvolver o equacionamento do SVC a menos do que o circuito funciona para meio ciclo apenas. Deste modo podemos modelar o circuito do SVC a partir de um circuito mais simples, pois como o capacitor do SVC é fixo, somente o indutor causará variação de potência reativa no circuito.

Figura 9: Circuito utilizado como referência para o desenvolvimento das equações.



Fonte: Hart, 2011.

Partimos da solução temporal da corrente para o circuito simplificado acima, que ainda é similar a um retificador não controlado, de onde partimos das definições dadas pela equação (5) e pela equação (6). (HART, 2011).

$$i(\omega t) = if(\omega t) + in(\omega t) \tag{5}$$

$$i(\omega t) = \frac{Vm}{Z} sen(\omega t - \theta) + Ae_{\omega \tau}^{-\omega t}$$
 (6)

Onde a constante A é definida pela condição inicial $i(\alpha) = 0$, ou seja, $\omega t = \alpha$, sendo α o ângulo de disparo do tiristor em relação ao zero da onda.

Assim mostramos o resultado na equação (7) e na equação (8).

$$i(\alpha) = 0 = \frac{Vm}{Z} sen(\alpha - \theta) + Ae_{\omega\tau}^{-\alpha}$$
 (7)

$$A = -\frac{Vm}{Z}sen(\alpha - \theta)e^{\alpha}_{\omega\tau} = -\frac{Vm}{Z}sen(\alpha - \theta)$$
 (8)

Usando as aproximações cabíveis, supondo $\tau = \frac{L}{R}$, $R \to 0$, temos que $\tau = \to \infty$, e ainda que $Z \cong \omega L$ e que $\theta \cong \frac{\pi}{2}$, então chegamos a equação (9).

$$A = -\frac{Vm}{Z}sen\left(\alpha - \frac{\pi}{2}\right) \tag{9}$$

Reescrevendo a corrente e substituindo temos a equação (10) e a equação (11).

$$i(\omega t) = \frac{Vm}{\omega L} sen(\omega t - \theta) - \frac{Vm}{\omega L} sen(\alpha - \theta)$$
 (10)

$$i(\omega t) = \frac{Vm}{\omega L} \left[sen\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) - sen\left(\alpha - \frac{\pi}{2}\right) \right]$$
 (11)

O ângulo de extinção β é definido como o ângulo de extinção da corrente, ou seja, o ângulo no qual a corrente retorna a zero.

Então para $\omega t = \beta$ temos a equação (12).

$$i(\beta) = 0 = \frac{Vm}{\omega L} \left[sen\left(\beta - \frac{\pi}{2}\right) - sen\left(\alpha - \frac{\pi}{2}\right) \right]$$
 (12)

As figuras 10, 11 e 12 irão apresentar o comportamento da forma de onda da corrente variando de um ângulo de disparo α até a extinção da mesma no ângulo β .

Figura 10: Ângulo de disparo α=90° e ângulo de extinção β da corrente.

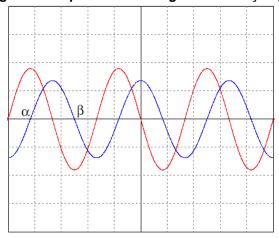
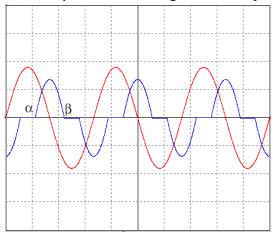
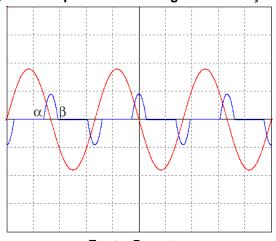


Figura 11: Ângulo de disparo $\alpha\text{=}120^\circ$ e ângulo de extinção β da corrente.



Fonte: Do autor.

Figura 12: Ângulo de disparo α =150° e ângulo de extinção β da corrente.



Fonte: Do autor.

A partir da equação 12 ou das figuras 10, 11 e 12 podemos observar que o ângulo β é igual a 2π - α , e ainda que a corrente é simétrica ao eixo que corresponde á 180° ou π .

Dada a equação 12 apresentada acima, e fazendo $\beta=2\pi-\alpha$, temos:

$$i(\beta) = 0 = \frac{Vm}{\omega L} \left[sen\left(\frac{3\pi}{2} - \alpha\right) - sen\left(\alpha - \frac{\pi}{2}\right) \right]$$
$$i(\beta) = 0 = \frac{Vm}{\omega L} \left[(-1) - (-1) \right]$$
$$i(\beta) = 0$$

Então para o cálculo da corrente temos por definição a equação (13).

$$Irms = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\beta} i^2(\omega t) d(\omega t)}$$
 (13)

Onde $i(\omega t)=\frac{Vm}{\omega L}[sen\left(\omega t-\frac{\pi}{2}\right)-sen\left(\alpha-\frac{\pi}{2}\right)]$ como já demonstrado na equação (11).

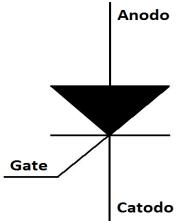
3.3 **SCR**

O dispositivo utilizado para controle da potência inserida no circuito do SVC será o SCR, um dos componentes da família de tiristores.

O tiristor é um dos tipos de dispositivos semicondutores de potência mais importantes, eles são utilizados em fontes de tensão regulada, controle de velocidade de motores, conversores de frequência, inversores, dentre outros. Os tiristores permitem não só retificar uma corrente alternada, mas também controlar a corrente que passa por ele e pela carga conectada em série com ele. Eles são operados de modo que mudam do estado de não-condução para condução.

A figura 13 apresentará a simbologia típica de um tiristor.

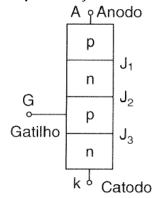
Figura 13: Representação do tiristor ideal.



O tiristor tem quatro camadas, de estrutura pnpn, com três junções pn. Os três terminais acessíveis do dispositivo são: anodo, catodo e gatilho (gate).

O princípio de funcionamento do mesmo se baseia que quando a tensão de anodo é positiva em relação á tensão de catodo ele se encontra na condição de bloqueio direto, ou seja, desligado. Porém se a tensão anodo-catodo VAK for aumentada a junção J2 reversamente polarizada romperá e circulará uma corrente direta, pois as junções J1 e J3 estarão polarizadas diretamente, e o dispositivo entrará em condução. Este fenômeno é conhecido como efeito avalanche, e a tensão aplicada suficiente para tal é chamada de tensão de ruptura direta. A corrente circulante tem que estar acima de um nível conhecido como corrente de travamento, pois do contrário o dispositivo voltará á condição de bloqueio direto. (RASHID, 1999).

Figura 14: Representação das três junções pn.



Fonte: RASHID, 1999.

O tiristor quando em condução se comporta como um diodo, e com uma queda de tensão típica de 1V e não há controle sobre o mesmo, porém se a corrente de anodo diminuir e chegar abaixo de um nível chamado de corrente de manutenção que é menor que a corrente de travamento, o tiristor volta ao estado de bloqueio. (RASHID, 1999).

A figura 15 mostra a curva característica v-i do tiristor, demonstrando o comportamento do mesmo, em relação as corrente de manutenção e travamento, tensão de ruptura e queda de tensão.

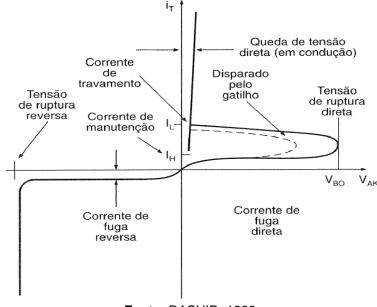


Figura 15: Curva característica v-i.

Fonte: RASHID, 1999.

Quando a tensão de catodo é positiva em relação á tensão de anodo, o tiristor estará em bloqueio reverso. O acionamento de um tiristor pode ser feito com o aumento da tensão VAK, porém tal forma de ligá-lo pode ser destrutiva, na prática a tensão VAK é mantida abaixo da tensão de ruptura direta VBO e uma tensão positiva entre o gate e o catodo VGK é aplicada, e a partir dessa técnica, e se a corrente de anodo for maior que a corrente de manutenção o dispositivo continua a conduzir mesmo que a tensão VGK seja retirada. (RASHID, 1999).

3.4 CONTROLE

O circuito de controle utilizado na simulação inicial em malha aberta será apresentado na figura 16, onde o ângulo alfa é variado manualmente através de uma fonte.

alfa T2

Figura 16: Circuito inicial de controle do ângulo de disparo alfa.

Fonte: Do autor.

São utilizados dois comparadores, que detectam o cruzamento por zero, ascendente e descendente, e os elementos que recebem essa saída do comparador e transmitem o ângulo de disparo para os dois tiristores através das tags T1 e T2.

Na figura 17, será apresentada o diagrama de controle utilizado em malha aberta, e na figura 18, o diagrama em malha fechada que será o objetivo final destas simulações, ou seja, estipular um valor de FP padrão de entrada e o controle ser realizado automaticamente, mantendo na saída o FP desejado para o circuito.

Figura 17: Diagrama de controle em malha aberta.

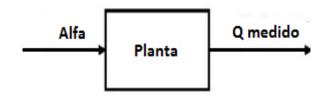
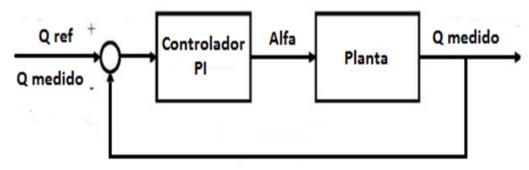


Figura 18: Diagrama de controle em malha fechada.



Fonte: Do autor.

3.5 CONTROLADOR PI

Neste tipo de controlador tem-se a ação conjunta de duas ações de controle. Onde P representa a ação de controle proporcional e I representa a ação de controle integral. A ação integral ocasiona uma correção tal que sua velocidade é proporcional à amplitude do desvio. Pode-se dizer que a intervalos regulares, a ação integral corrige o valor da variável manipulada (MV), e soma a mesma com o valor do desvio (erro). (CAMPOS, 2010).

O controlador PI tem por sua simplicidade e robustez, um dos mais clássicos controladores utilizados na indústria, sendo assim utilizaremos o mesmo neste trabalho.

Utilizando-se da máxima potência reativa gerada pelo indutor e de uma margem de fase padrão de 70°, os parâmetros do controlador começaram a ser mensurados através do Matlab, utilizando-se da biblioteca Sisotool, bem como

algumas manipulações matemáticas e ajustes de acordo com o comportamento do sistema que viabilizaram o projeto do controlador.

4 SIMULAÇÕES

As simulações apresentarão os resultados do estudo do SVC, desde um primeiro circuito simplificado, até o objetivo final que será seu controle em malha fechada do fator de potência de um circuito monofásico.

4.1 CIRCUITO INICIAL SIMPLIFICADO E RESULTADOS

A figura 19 apresentará o circuito inicial a ser simulado no software PSIM, onde somente colocaremos o indutor e uma resistência de valor muito pequeno só para fim de estipular a potência reativa máxima que o indutor pode gerar no circuito.

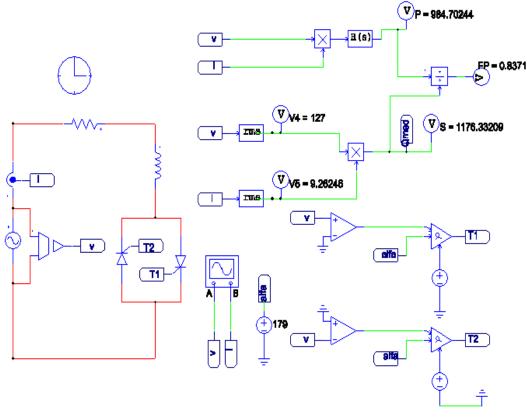


Figura 19: Circuito simulado via software PSIM.

A simulação inicial a qual será apresentada o primeiro resultado apresentará um circuito sem a presença do capacitor, pois o elemento representa uma potência reativa fixa, e o intuito inicial da simulação será apresentar um comparativo entre a potência reativa gerada pelo indutor dado um ângulo de disparo α.

São utilizados dois comparadores que detectam o cruzamento por zero ascendente e descendente, e os elementos que recebem essa saída do comparador e transmitem o ângulo de disparo para os dois tiristores através das tags T1 e T2.

Considerando um $R \to 0$, ou seja, muito pequeno e variando o valor da indutância para faixas de 50, 100 e 200 mH e uma tensão senoidal $v = 127 \ V \ rms$.

A figura 20 apresentará o circuito simplificado, e as figuras 21, 22 e 23 apresentarão as formas de onda para os ângulos de disparo para 90, 120 e 150º respectivamente.

Figura 20: Circuito inicial simplificado.

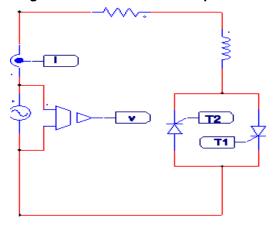
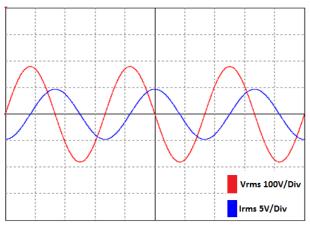
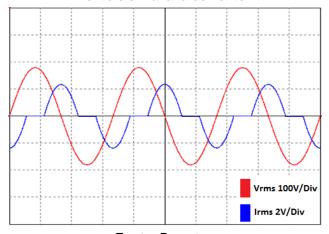


Figura 21: Forma de onda para α = 90°, onde em vermelho está representada a tensão da fonte e em azul a corrente.



Fonte: Do autor.

Figura 22: Forma de onda para α = 120°, onde em vermelho está representada a tensão da fonte e em azul a corrente.



Fonte: Do autor.

Vrms 100V/Div

Figura 23: Forma de onda para α = 150°, onde em vermelho está representada a tensão da fonte e em azul a corrente.

As figuras 21 a 23 mostraram a variação da forma de onda do circuito simplificado, ou seja, representaram a porção de potência reativa inserida no circuito através da indutância de acordo com o ângulo de disparo α . Através dessas comparações podemos observar que a parcela é máxima para um $\alpha=90$ e zero para um $\alpha=180$. E utilizando o software PSIM foram coletados dados para comparação da potência reativa com a variação do ângulo disparo α . Foram geradas tabelas para as indutâncias de 50, 100 e 200 mH, e utilizando o software Matlab R 2016 foram gerados gráficos de potência reativa x ângulo alfa.

Abaixo será apresentada a tabela 1 contendo os dados coletados para as indutâncias escolhidas para teste. A indutância escolhida como padrão será a de 100 mH, pois é um valor mais exato e comercialmente mais possível de ser encontrado um valor bem aproximado. As indutâncias de 50 mH e 200 mH foram escolhidas para simular um caso teste de metade da indutância e dobro da indutância padrão escolhida para o circuito e o que essa mudança representaria para o circuito em termos de potência reativa.

Tabela 1: Ângulo Alfa e Potência Reativa para indutâncias de 50, 100 e 200 mH.

Alfa (Graus)	QL(VAR) L =100mH	QL(VAR) L =50mH	QL(VAR) L =200mH
90	423.34	845.01	211.68
95	377.37	752.34	188.65
100	332.28	661.81	166.15
105	289.00	577.38	144.70
110	248.89	496.20	124.37
115	210.47	419.90	105.51
120	175.65	350.75	87.79
125	143.72	286.13	71.75
130	114.79	229.16	57.50
135	89.14	178.35	44.74
140	67.32	133.98	33.69
145	48.44	96.76	24.23
150	33.14	66.42	16.63
155	21.18	42.33	10.53
160	12.04	24.23	6.23
165	5.85	11.62	2.92
170	2.09	4.18	1.04
175	0.35	0.69	0.17
180	0	0	0

A figura 24 apresentará a variação da potência reativa gerada pelo indutor em função da variação do ângulo alfa utilizado para disparo dos tiristores, com três indutâncias diferentes, onde em azul a indutância utilizada foi de 50mH, em vermelho a indutância utilizada foi de 100mH e em amarelo a indutância utilizada foi de 200mH.

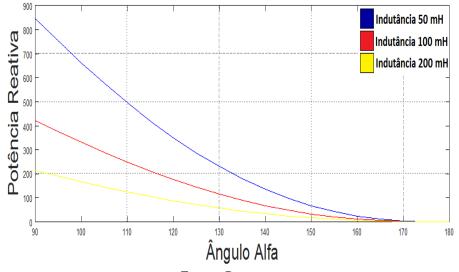


Figura 24: Potência Reativa x Ângulo Alfa para indutâncias de 50, 100 e 200 mH.

Podemos observar de acordo com a tabela 1 e com a figura 24 que a potência reativa é máxima para um ângulo $\alpha=90$ e zero para um $\alpha=180$. O sistema será linearizado para que as ferramentas de sintonia do Matlab possam ser utilizadas. Através do gráfico podemos observar que quanto menor o valor da indutância do indutor maior o valor da potência reativa gerada.

4.2 CIRCUITO FINAL EM MALHA ABERTA E RESULTADOS

A figura 25 apresentará o circuito final com a presença do capacitor e de uma carga R a princípio. Foi estipulado para fim de simulação deste trabalho uma potência ativa de 1KW, e a partir daí foram realizados os cálculos para um valor de capacitância e indutância a fim de variar o FP de 0,85 atrasado a 0,85 adiantado, onde os parâmetros calculados serão apresentados abaixo.

R = 16.129Ω , C = 101.92μ F, L = 34.518 mH.

Figura 25: Circuito Final em malha aberta.

As figuras 26 a 29 irão apresentar as formas de onda obtidas para os ângulos de disparo de 90 a 180° respectivamente, onde será evidenciado a variação do FP de 0,85 atrasado a 0,85 adiantado.

Dadas as formulações matemáticas descritas nas referências utilizadas podemos definir o FP como sendo:

$$FP = \frac{P}{VrmsIrms} = \frac{P}{S} = \cos\theta$$

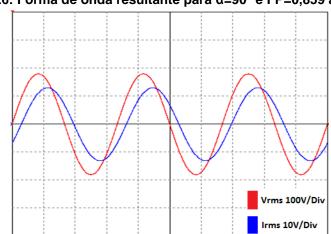


Figura 26: Forma de onda resultante para α =90° e FP=0,859 atrasado.

Figura 27: Forma de onda resultante para α =120° e FP = 0,984 atrasado.

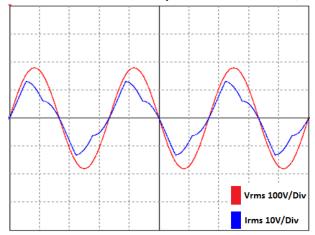
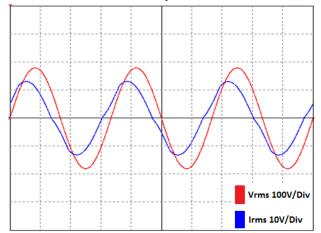
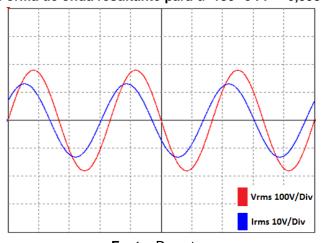


Figura 28: Forma de onda resultante para α =150° e FP = 0,878 adiantado.



Fonte: Do autor.

Figura 29: Forma de onda resultante para α =180° e FP = 0,858 adiantado.



As figuras 26 a 29 apresentaram o comportamento do circuito ao ser variado o ângulo de disparo alfa, ou seja, através desse ângulo de disparo os tiristores chaveiam uma porção maior ou menor de indutância ao circuito, á medida que, para o ângulo de 90° toda parcela de indutância é inserida ao circuito, onde pode se ver tanto pela forma de onda apresentada na figura 26 que o circuito tem um fator de potência indutivo, pois a corrente está atrasada em relação a tensão. Á medida que aumentamos o ângulo de disparo, pode ser observado que o fator de potência aumenta, ou seja, se aproxima da unidade. Isso acontece pois, a parcela indutiva inserida ao circuito através dos tiristores diminui com o aumento do ângulo, e essa parcela tende a medida que o ângulo aumenta cancelar a parcela capacitiva, a qual é inserida através do capacitor fixo. As formas de onda subsequentes a da figura 27 mostram que a forma de onda da corrente se aproxima de estar em fase com a forma de onda da tensão, ou seja, o fator de potência se aproxima da unidade. Podemos observar também a partir da figura 27, a forma de onda da corrente começa a sofrer uma distorção, que se deve ao fato da correção do fator de potência pelo SVC, devido as correntes que são drenadas por ele, e que quanto mais o fator de potência se aproxima da unidade para este caso, maior a distorção apresentada pela corrente.

Essa distorção é chamada de distorção harmônica, a qual é um problema de qualidade de energia elétrica, pois o interessante é que as componentes de tensão e corrente sejam as mais senoidais possíveis. A distorção harmônica é representada por uma taxa, definida como taxa de distorção harmônica total (THD), do inglês *Total Harmonic Distortion*, a qual pode ser representada pela equação (14).

$$I_{THD} = 100 * \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} Ih_rms^2}}{If_rms}$$
 (14)

A THD é um dos indicadores mais importantes da qualidade de energia elétrica, e é dada em porcentagem como já evidenciado na equação 14. As componentes harmônicas podem ter amplitudes consideráveis, e fazer com que a corrente total que circula no sistema não seja somente a corrente proveniente da frequência fundamental do mesmo. A partir de certo ângulo de disparo podemos

observar que o fator de potência muda de atrasado para adiantado, ou seja, a corrente começa a ficar adiantada a tensão. Isso ocorre, pois a parcela indutiva começa a ficar menor do que a parcela capacitiva, e a predominância do circuito passam a ser capacitiva. E esse resultado coincide com o esperado que era variar o fator de potência de 0,85 atrasado a 0,85 adiantado, o que ocorre com valor bem aproximado.

As figuras a seguir apresentarão o comportamento dos harmônicos presentes na corrente, bem como a THD corrente. Serão mostradas as três primeiras componentes de frequência, sendo a fundamental em 60 Hz, a terceira em 180 Hz e a quinta harmônica em 300 Hz, as quais tiveram amplitudes mais significativas, a seguir a figura 30 apresentará os resultados para α =90°.

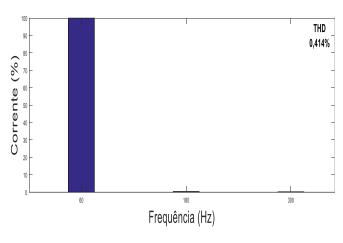


Figura 30: Harmônicas e THD para α =90°.

Fonte: Do autor.

Podemos observar na figura 30, que a terceira e quinta harmônica não representaram valores significativos em relação á componente fundamental, e que a THD teve um valor muito pequeno, o que representa uma pequena distorção da corrente.

A figura 31 apresentará os resultados para um α =100°.

Figura 31: Harmônicas e THD para α=100°.

A figura 31 representa o aparecimento já com um valor significativo em torno de 8,5% para a terceira e 4,6% para a quinta harmônica, e uma THD de 10,405%, o que representa de forma clara o início da distorção causada pela correção do fator de potência, onde para um ângulo alfa de 100° a componente indutiva começa a decair e a componente capacitiva começa a ter mais efeito.

A figura 32 apresentará os resultados para α=110°.

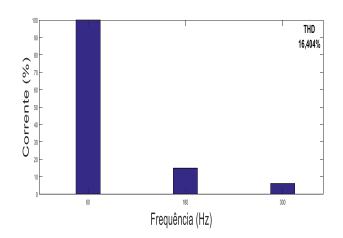


Figura 32: Harmônicas e THD para α=110°.

Fonte: Do autor.

A figura 32 evidencia ainda mais o comportamento do circuito em relação á correção do fator de potência e a distorção harmônica da corrente. A terceira

harmônica já representa quase 15% da fundamental e a quinta aproximadamente 6%, sendo que a THD ficou em 16,404%.

A figura 33 apresentará os resultados para α =120°.

Figura 33: Harmônicas e THD para α=120°.

Fonte: Do autor.

A figura 33 apresentou um comportamento semelhante a figura 32, a menos de que a quinta harmônica diminuiu pela metade sua amplitude e a terceira apresentou um ligeiro aumento, assim como a THD que subiu para 17,386%.

A figura 34 apresentará os resultados para α=130°.

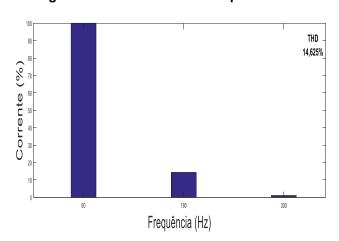


Figura 34: Harmônicas e THD para α=130°.

Podemos observar que a amplitude da terceira harmônica diminuiu em relação a figura 33, o qual para o ângulo alfa de 120º apresentou a maior distorção e a maior amplitude da terceira harmônica. A THD também apresentou uma diminuição em relação a figura anterior. O comportamento do circuito a partir dos 120º apresenta a situação onde o efeito capacitivo começa a predominar no circuito, deixando o fator de potência adiantado, ou seja, a corrente adiantada em relação á tensão. O esperado a partir do aumento do ângulo alfa a partir de certo valor é que o circuito apresente um fator de potência mais adiantando, e que a distorção diminua relativamente com esse aspecto, visto que a correção do fator de potência vai diminuindo, pois á medida que o ângulo alfa aumenta, menos indutância é inserida no circuito.

As figuras 60 a 64, apresentarão os resultados para os ângulos de 140, 150, 160, 170 e 180º respectivamente, e serão apresentados no apêndice B. Abaixo será apresentada a tabela 2 que mostrará a relação do ângulo de disparo alfa com a terceira e quinta harmônica, juntamente com a THD.

Tabela 2: Harmônicas e THD x Ângulo Alfa

Ângulo α (Graus)	3° harmônica (%)	5º harmônica (%)	THD (%)
140°	9.477	3.311	10,238
150°	4.837	2.934	5,840
160°	1.610	1.317	2,414
170°	0.206	0.205	0,489
180°	0.000201	0.000155	0,144

Fonte: Do Autor.

A figura 35 apresentará uma relação da THD de acordo com o ângulo de disparo alfa inserido no circuito.

(%) OHL (%) 100 110 120 130 140 150 160 170 180 Ângulo alfa (Graus)

Figura 35: THD (%) em função do ângulo α.

Como pode ser observado o SVC gera mais conteúdo harmônico próximo ao ângulo de disparo alfa de 120°.

Como esperado, podemos observar que as amplitudes das harmônicas diminuíram á medida que o ângulo alfa foi aumentado de 120°, ou seja, menos componente indutiva presente até a mesma não ser inserida, no ângulo α=180°. A THD diminuiu até praticamente ser também zerada a esse mesmo ângulo. Comparando com as figuras que apresentaram as formas de onda, bem como o fator de potência para cada ângulo de disparo, podemos observar que á medida que o fator de potência vai sendo corrigido até a unidade, a distorção da corrente aumenta, evidenciada principalmente pela terceira harmônica e a THD segue o mesmo caminho, aumentando até um valor máximo que nessa simulação apresentou um pico de 17,386%, e a partir do momento que a correção, começa a diminuir da unidade e vai se aproximando até o FP ficar adiantado a amplitude da terceira harmônica vai caindo, bem como a THD, até apresentar o mínimo valor para o caso em que nenhuma indutância é inserida no circuito.

4.3 CIRCUITO DE CONTROLE EM MALHA FECHADA

O controle em malha fechada foi realizado a partir da aproximação da figura 24 por uma reta, devido ao comportamento do mesmo. A partir desta aproximação

podemos definir uma função de transferência, a qual foi calculada utilizando o software Matlab, na qual a máxima potência reativa gerada pelo indutor, dada pela equação (15).

$$Qmax = \frac{V^2}{XL} \tag{15}$$

calculado para simulação foi inserida no numerador, e o atraso de transporte com fator de $T=\frac{1}{T_{S+1}}$ foi também considerado para cálculo.

A figura 36 apresentará o diagrama de controle final em malha fechada após ter sido realizado todas as etapas e testes e o desenvolvimento do controle automático de correção do FP, onde o Qref é a potência reativa da carga (Qcarga), o Qmedido é a potência reativa gerada pelo SVC (Qmed).

Qref + Controlador Planta Planta Qmedido

Qmedido - Pl

Figura 36: Diagrama de controle em malha fechada.

Fonte: Do autor.

O atraso de transporte se dá pelo fato de se poder disparar os tiristores uma vez a cada meio ciclo apenas, e o valor de T pode ser definido na equação (16).

$$T = \frac{1}{2\pi 120} \tag{16}$$

E a partir dessa definição podemos associar esse atraso e inserirmos o mesmo na função de transferência, que foi modelada pela função de reta encontrada e inserida no Matlab para cálculo do controlador. Foi utilizado o comando sisotool, e a partir da função de transferência gerada, a função de transferência do controlador

foi calculada através do Matlab, a partir de uma frequência de corte estipulada como sendo 10 vezes menor que a velocidade do atraso, de forma a garantir o tempo necessário para atuação do controlador, e de uma margem de fase padrão de 70°, e seus parâmetros utilizados para projetar o controlador utilizado via software PSIM, o que nos trouxe resultados bem satisfatórios.

O controle em malha aberta foi realizado variando manualmente o ângulo de disparo de alfa, e assim variando o nível de potência reativa inserida pelo indutor através do chaveamento dos tiristores.

O controle em malha fechada foi desenvolvido a partir da aproximação do gráfico de Potência Reativa x Ângulo Alfa por uma reta, e posteriormente de uma manipulação matemática, que possibilitou associar a saída do controlador PI a um nível de controle muito simplificado, numa escala de 0 a 1, onde a equação que utilizada foi modelada de acordo com o funcionamento do circuito, ou seja, para um ângulo de disparo de 90º a potência reativa gerada pelo indutor é máxima e para um ângulo de 180º a potência reativa inserida pelo indutor é zero. Desse modo chegamos a equação (17).

$$\alpha = 180 - 90. \, pi \tag{17}$$

A partir de uma referência de potência reativa inserida no set point do controlador, a estrutura de controle tem na saída do controlador PI um valor limitado de zero a um, a qual foi modelado de acordo com o comportamento da variação da potência reativa gerada pelo indutor, e após essa ser multiplicada pela equação (17), o ângulo de disparo alfa é calculado, e é inserido na planta. Dessa forma é medida a potência reativa do SVC (Qmed) como é mostrado na equação (18), e essa potência medida é realimentada no circuito para se obter um controle mais fino na correção do FP.

$$Qmed = Vrms ILrms$$
 (18)

A figura 37 apresenta o circuito de controle em malha fechada.

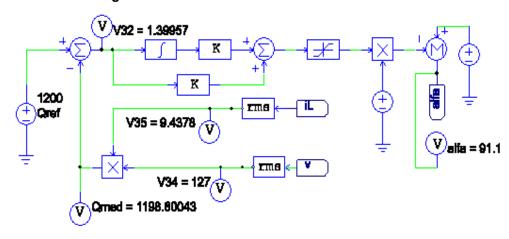


Figura 37: Circuito de controle em malha fechada.

A figura 37 apresentou os resultados para uma potência reativa de referência escolhida para teste. Dada uma entrada de potência reativa de referência o circuito de controle apresentou como saída o ângulo alfa de 91,1°, o qual foi inserido na planta para correção do FP.

Após a utilização de uma potência reativa qualquer como referência de set point do controlador, o objetivo final do trabalho seria estipular a potência reativa da carga, calculada como mostra a equação (19), e utilizar este valor como referência do set point do controlador, para que de forma automática qualquer variação de carga que proporcione mudança no nível de potência, o controlador automaticamente corrija o fator de potência para a unidade ou para o mais próximo possível.

Qcarga = Scarga sen(
$$\theta$$
carga) (19)

A figura 38 apresentará o circuito de controle completo.

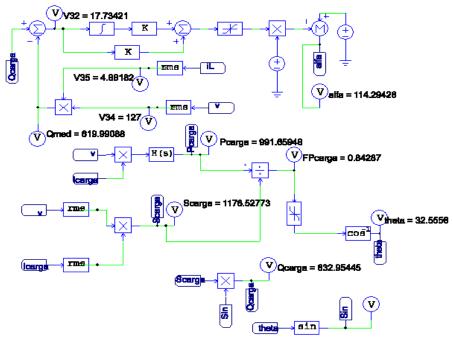


Figura 38: Circuito de controle em malha fechada final.

A figura 38 mostrou o circuito final de controle em malha fechada, onde a potência reativa da carga é medida através da equação (19), onde o ângulo θ neste caso representa o ângulo do fator de potência da carga.

O SVC foi escolhido como objeto de estudo por viabilizar o controle do FP para cargas que variam o nível de reativo ao longo do tempo, e para mostrar essa que é a mais importante vantagem do SVC, foram simuladas as adições de cargas reativas para visualizar a atuação do controlador no ângulo de disparo alfa para correção do FP para o mais próximo possível da unidade.

A figura 39 mostrará a inserção através de uma chave a presença de um capacitor com capacitância de $30.92\mu F$, mantendo os valores de R=16.129 Ω , e o valor da indutância em 34.518mH, para simplesmente variar o nível de reativo do sistema, afim de que o controlador atue para corrigir o fator de potência.

Fonte: Do autor.

Figura 39: Circuito com variação de reativo capacitivo.

Podemos observar que a chave que coloca o capacitor no circuito está na posição on (ligado). A figura 40 apresentarão os resultado da forma de onda e do circuito de controle em malha fechada.

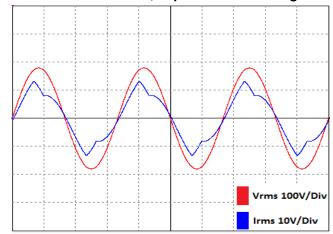


Figura 40: Forma de onda resultante, a qual o controlador gerou um α =106,05°.

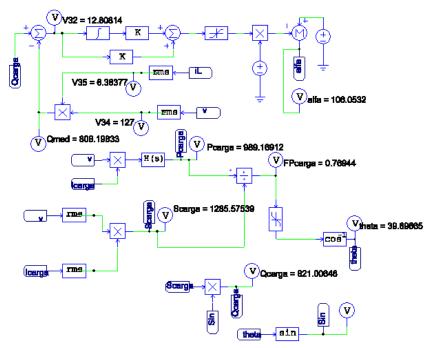


Figura 41: Circuito de controle para correção com inserção de elemento capacitivo.

Como observado a partir dos resultados, na figura 41, sem a presença do capacitor que foi chaveado simulando uma mudança de reativo do sistema, a potência reativa da carga apresentou 632,95 VAR, a qual o controlador ajustou o ângulo alfa para aproximadamente 114,2° e fator de potência de 0,995. Após a inserção do elemento capacitivo a potência reativa da carga apresentou 821,00648 VAR, a qual o controlador ajustou o ângulo alfa para aproximadamente 106,05° e FP bem próximo a unidade.

As figuras 42 a 44 apresentarão a inserção agora de um elemento indutivo com indutância de 600mH no sistema, porém mantendo o capacitor já inserido e os demais elementos com os mesmos valores, simulando mais uma variação no nível de potência reativa da carga e seus respectivos resultados.

Figura 42: Circuito de controle para correção com inserção de elemento capacitivo e indutivo.

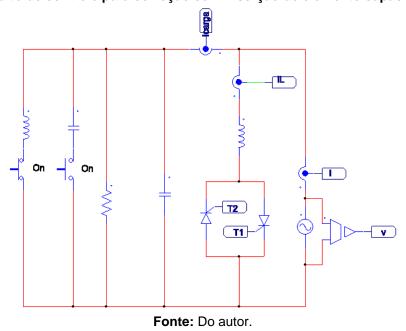
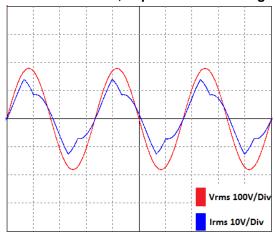


Figura 43: Forma de onda resultante, a qual o controlador gerou um α =108,79°.



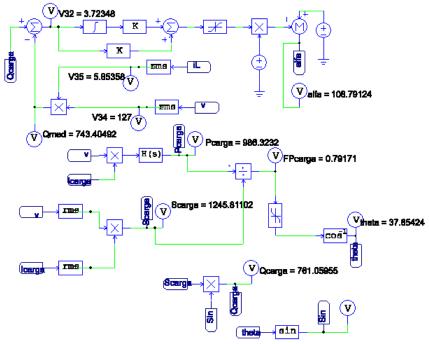


Figura 44: Circuito de controle para correção com inserção de elemento capacitivo e indutivo.

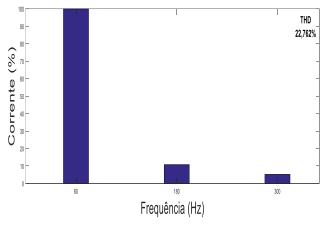
A figura 44 apresentou os resultados para o circuito de controle em malha fechada, o qual recebeu como set point a potência reativa da carga (Qcarga), e a partir desse dado o controlador gerou o ângulo de disparo alfa de 108,79° que ao ser inserido na planta do sistema, o SVC gerou uma potência reativa (Qmed), que foi realimentada na malha de controle, e o ângulo alfa gerado ao ser inserido na planta corrigiu o FP para 0,985.

As figuras 45 e 46 apresentarão os resultados para as harmônicas e a THD para os circuitos das figuras 39 e 42 respectivamente.

THD 12,165% 90 - 1

Figura 45: Harmônicas e THD para inserção de elemento capacitivo.

Figura 46: Harmônicas e THD para inserção de elemento capacitivo e indutivo.



Fonte: Do autor.

As figuras 45 e 46 apresentaram a THD para as formas de onda apresentadas nas figuras 39 e 42 respectivamente, podemos observar que com a inserção apenas do reativo capacitivo a THD foi de 12,165% e que ao inserir dois elementos reativos, um capacitivo e um indutivo a THD aumentou para 22,762%. Então por esses resultados, podemos avaliar que a THD aumenta quando o SVC precisa compensar o FP na presença de mais elementos reativos no sistema a ser controlado.

A figura 47 apresentará a adição de elementos reativos chaveados após alguns instantes de tempo, bem como a resposta do sistema controlado após as

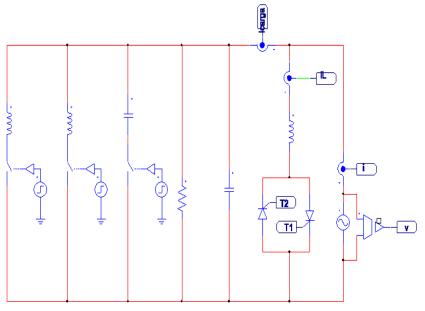
perturbações causadas por essas inserções. Os elementos inseridos na ordem de chaveamento como segue abaixo na tabela 3.

Tabela 3: Elementos chaveados no sistema

Elemento reativo	Valor de referência	Tempo a ser chaveado
Indutor 1	600 mH	0.5s
Indutor 2	600 mH	1.0s
Capacitor	30.92 uF	1.5s

Fonte: Do autor.

Figura 47: Circuito com adição de elementos reativos a serem chaveados.



Fonte: Do autor.

A figura 48 apresentará o resultado temporal com a adição dos elementos reativos, sendo eles dois indutores e um capacitor respectivamente, os quais simulam a inserção de novas cargas, para visualizarmos a ação do controlador na correção do FP.

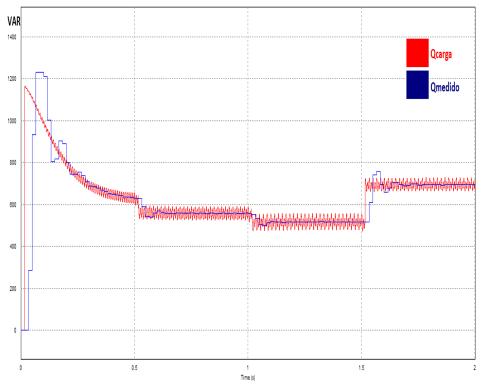


Figura 48: Resultado temporal do sistema controlado em malha fechada após a inserção de elementos reativos chaveados em 0.5, 1.0 e 1.5 segundos.

A figura 48 apresentou o resultado no tempo da ação do controlador na correção do FP após a inserção de três cargas reativas em sequência. Em vermelho a potência reativa da carga que é inserida como set point do controlador e em azul a potência reativa do SVC após a injeção do ângulo α gerado pelo próprio controlador. Considerando um step a cada meio segundo, podemos observar as perturbações causadas no sistema após a inserção de cada carga reativa e foi observado que o controlador respondeu muito satisfatoriamente as perturbações inseridas no sistema simulado, pois a reposta do mesmo foi consideravelmente rápida após as perturbações serem inseridas no sistema controlado.

5 SIMULAÇÃO DO SVC TRIFÁSICO

A segunda parte deste trabalho consistiu em realizar a simulação do SVC para um sistema trifásico, ou seja, uma fonte trifásica equilibrada, alimentando uma carga trifásica equilibrada, e o controle automático do FP através do disparo dos tiristores em anti-paralelo, porém agora um par de tiristores em cada fase.

Os princípios teóricos básicos mostrados na primeira parte, bem como as relações para determinar o FP, e as ações de controle, podem ser considerados na sua maioria para a segunda etapa deste trabalho, reiterando que todos os parâmetros, cálculos nesta etapa foram feitos considerando um sistema trifásico.

5.1 CÁLCULO DOS PARÂMETROS UTILIZADOS

As equações 20 a 24 mostram os parâmetros estipulados para esta simulação, os valores utilizados para cálculos dos valores dos componentes que formarão a carga padrão, o SVC e os elementos a serem inseridos no sistema para a correção automática do FP, partindo da potência ativa da carga, a qual foi escolhida um valor simbólico de 3 KW, e também da tensão de fase a qual foi fixada em 127 volts, bem como a relação das potências ativa, reativa e aparente trifásicas.

Como na primeira parte deste trabalho, os parâmetros foram calculados com base em um FP variando de 0,85 adiantado á 0,85 atrasado.

$$P3\phi = \sqrt{3} \text{ VL IL } \cos\theta \tag{20}$$

$$P3\phi = 3Kw$$

$$S_3\phi = \sqrt{3} \text{ VL IL} \tag{21}$$

$$S_3\phi = \frac{P_3\phi}{\cos\theta} \tag{22}$$

$$S3\phi = 3,529 \, KVA$$

$$Qc3\phi = S3\phi \, sen\theta \qquad (23)$$

$$Qc3\phi = 1,859 \, KVar$$

$$Ql3\phi = 2Qc3\phi \qquad (24)$$

A partir das definições e cálculos apresentados foram calculados os valores individuais das capacitâncias e indutâncias utilizados e da resistência de carga, apresentados na tabela 4.

 $Ql3\phi = 3,718 \, KVar$

Tabela 4: Parâmetros calculados.

Elemento	Valor de referência
Resistor	16.129 Ω
Indutor	34.51mH
Capacitor	101.946 uf

Fonte: Do autor.

5.2 MÉTODO UTILIZADO PARA CÁLCULO DAS POTÊNCIAS

A Transformada de Clarke é utilizada a fim de diminuir o número de variáveis envolvidas para o cálculo da potência e conseguir de forma mais clara evidenciar seus parâmetros físicos. (AKAGI; KANAZAWA; NABAE,1984).

Em geral a mesma é utilizada para circuitos desequilibrados, tendo em vista a facilidade de mensurar as potências, no caso específico deste trabalho utilizaremos um sistema equilibrado, com as fontes e cargas balanceadas, e o propósito de utilizar o modelo da transformada de Clarke é trabalhar apenas com

duas variáveis, α e β , afim de simplificar os cálculos das potências ativa e reativa.

Abaixo nas equações 25 e 26, serão apresentadas as formas matriciais da transformada de Clarke, e também de sua transformada inversa, ou seja, dado um sistema ABC convencional, podemos transformar os parâmetros para o sistema $\alpha\beta0$, ou dado um sistema elétrico com os parâmetros $\alpha\beta0$ informados, podemos utilizar da transformada inversa para retornar ou mensurar o mesmo nas coordenadas ABC. (AKAGI; KANAZAWA; NABAE,1984).

$$\begin{bmatrix} v0 \\ v\alpha \\ v\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} va \\ vb \\ vc \end{bmatrix}$$
 (25)

$$\begin{bmatrix} va \\ vb \\ vc \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & 1 & 0 \\ \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v0 \\ v\alpha \\ v\beta \end{bmatrix}$$
(26)

De maneira análoga o cálculo paras as correntes pode ser realizado seguindo os mesmos passos.

Após a utilização de artifícios matemáticos a equação para as potências ativa e reativa podem ser descritas pelas equações 27 e 28.

$$p = v\alpha i\alpha + v\beta i\beta \tag{27}$$

$$q = v\beta i\alpha + v\alpha i\beta \tag{28}$$

5.3 ESTRUTURAÇÃO DO SVC TRIFÁSICO VIA SIMULAÇÃO

A estrutura básica do SVC trifásico feita através do software PSIM será mostrada na figura 49, onde a semelhança com a simulação monofásica fica evidente, visto que a mudança é que o controle agora é realizado num sistema com as três fases, ou seja, bem parecido com três sistemas monofásicos conectados, o que é apenas representa a estrutura, pois seu funcionamento e controle é ditado a partir das premissas de um sistema trifásico.

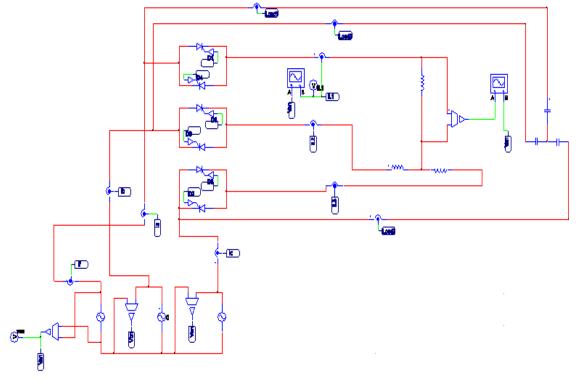


Figura 49: Estrutura básica do SVC trifásico.

Fonte: Do autor.

Cada par de tiristores em anti-paralelo chaveia uma indutância em uma fase do sistema, e a combinação desse chaveamento controla a potência reativa total que o SVC injeta no sistema a fim de compensar o FP, visto que a potência reativa gerada pelos capacitores é fixa, assim como foi detalhado na primeira parte do trabalho, a diferir que nesse sistema o defasamento entre um disparo e outro é de 120º elétricos.

O software PSIM já disponibiliza em sua biblioteca um bloco que realiza a conversão do sistema ABC em um sistema $\alpha\beta0$, onde nesse trabalho trataremos apenas como $\alpha\beta$, pois por se tratar de um sistema balanceado não teremos a componente de sequência zero. A figura 50 apresentará esse bloco utilizado na simulação.

Valfa = -218.5378 al Van a Valfa Vbn b Vbeta = -160.89362 Vcn C be Vbeta lalfa = 1.10164 la a al lalfa ib b Ibeta = -11.50558 С be ic

Figura 50: Estrutura do bloco de conversão ABC para αβ do PSIM.

Fonte: Do autor.

A estratégia de controle utilizada será a mesma da primeira parte do trabalho, ou seja, o controlador PI. A metodologia de controle automático do FP apenas se difere do set point utilizado na entrada do controlador. Nesta etapa, utilizamos como set point o nível de potência reativa do sistema como zero, ou seja, a intenção do controle automático é zerar a potência reativa do sistema, fazendo com que o controle faça as potências reativas capacitiva e indutiva se anularem ou ficarem bem próximas desse propósito. A figura 51 apresenta a estrutura de controle utilizada.

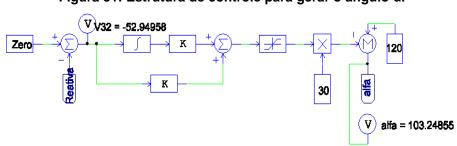


Figura 51: Estrutura de controle para gerar o ângulo α.

Como podemos observar, a saída do controlador fornece o ângulo α inserido na planta, onde uma estrutura de controle dos disparos recebe essa informação e faz o chaveamento dos pares de tiristores nas três fases, desse modo corrigindo o FP para a unidade ou bem próximo dela.

A figura 52 apresenta a estrutura de disparo dos tiristores de acordo com o ângulo α recebido do controlador PI.

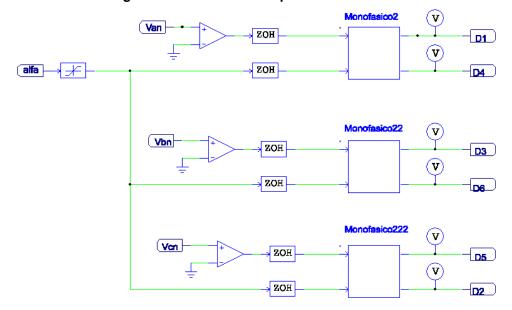


Figura 52: Estrutura de disparo dos tiristores.

Fonte: Do autor.

5.4 RESULTADOS EM REGIME PERMANENTE

As figuras 53 a 55 apresentarão os resultados em regime permanente para o controle automático do FP do caso trifásico, sendo que cada figura mostrará o comportamento de uma fase, começando pela fase A, e terminando na fase C.

Figura 53: Resultado em regime permanente para fase A.

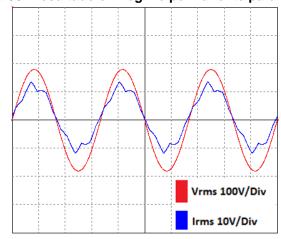
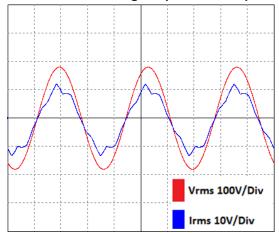
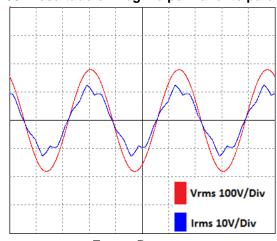


Figura 54: Resultado em regime permanente para fase B.



Fonte: Do autor.

Figura 55: Resultado em regime permanente para fase C.



Podemos observar nessas três figuras que o comportamento das fases é o mesmo, a menos da defasagem entre as mesmas, o que mostra que se todas as fases fossem geradas no mesmo gráfico, uma seria a continuação da outra para completar o ciclo e que o fator de potência foi corrigido, podendo ser visualizado pelo cruzamento por zero da onda da tensão em vermelho e da corrente em azul.

Após a inserção das cargas e atuação do sistema de controle, o FP foi corrigido para 0.998, com um ângulo α de referência médio de 103º e uma THD em torno de 15,78%.

5.5 RESULTADOS NO TRANSITÓRIO

As figuras 56 á 59 apresentarão o resultado temporal, ou seja, o transitório que ocorre ao se energizar o sistema, e as variações da potência reativa, ângulo alfa, FP e a relação entre FP e o ângulo após três cargas trifásicas balanceadas serem chaveadas nos instantes de 0,5s, 1,0s e 1,5s respectivamente.

A tabela 5 apresentará os elementos chaveados no sistema a ser controlado, e a figura 56 apresenta a estrutura das cargas a serem chaveadas no sistema.

Tabela 5: Elementos chaveados no sistema.

Cargas reativas	Valor individual	Tempo a ser chaveado
1º Conjunto de indutores	1000 mH	0,5s
Conjunto de capacitores	30.92 uF	1,0s
2º Conjunto de indutores	1000 mH	1,5s

Figura 56: Estrutura das cargas trifásicas a serem conectadas.

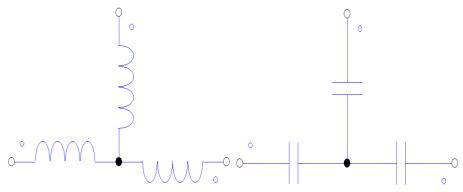
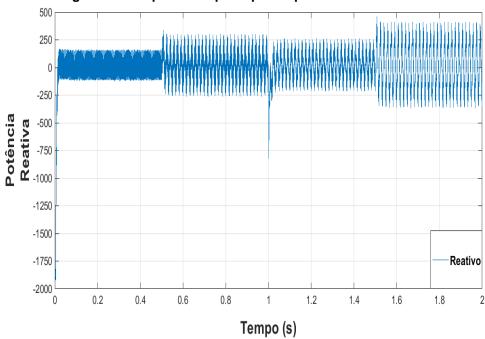


Figura 57: Resposta temporal para a potência reativa total.



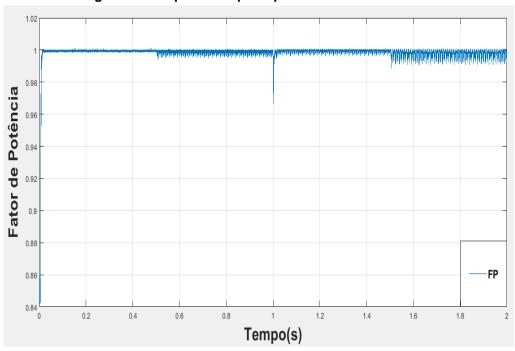


Figura 58: Resposta temporal para o Fator de Potência.

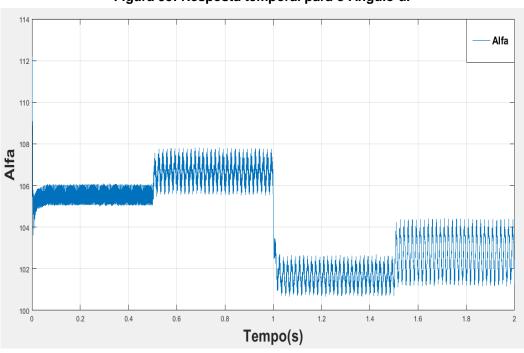


Figura 59: Resposta temporal para o Ângulo α.

Fonte: Do autor.

Podemos analisar que o propósito de correção automática do FP foi atingido com êxito, e que o sistema de controle funcionou de maneira a corrigir o mesmo, ou seja, mesmo com a oscilação da potência reativa, pelo nível da mesma e pelo índice

de correção podemos verificar que o sistema respondeu com a robustez esperada, tendo no máximo a variação da potência reativa em torno dos 500VAR positivos ou negativos, um ângulo alfa de referência oscilando em torno de 103º, e dessa forma o FP sendo corrigido praticamente para a unidade.

6 CONCLUSÃO

O baixo de fator de potência é um dos problemas mais pertinentes no ramo industrial, onde as cadeias produtivas utilizam de grande demanda de energia elétrica para seu processo produtivo.

A simulação final do caso monofásico apresentou o sistema trabalhando em malha fechada, onde a potência reativa apresentada pela carga foi calculada e inserida como set point da malha de controle, que realimentada pela potência reativa medida no sistema apresentou resultados bem satisfatórios, corrigindo o FP para bem próximo da unidade.

A correção do FP pode introduzir distorção na forma de onda de corrente, conhecida como distorção harmônica, e os resultados apresentaram as primeiras componentes de distorção e um indicador conhecido como taxa de distorção harmônica (THD), a qual é um parâmetro muito importante quando se trata de qualidade de energia elétrica. A presença de componentes harmônicas provoca um aumento da corrente total que circula no circuito fora da frequência fundamental, o que pode ocasionar efeitos indesejados em equipamentos e na rede.

A presença das componentes harmônicas se mostrou mais evidenciada quando o fator de potência era corrigido para a unidade ou para o mais próximo possível.

Um sistema trifásico representa mais de perto os sistemas industriais de altíssima potência, onde o SVC foi evidenciado como uma boa técnica de correção do FP, por se tratar de uma técnica robusta e indicada para altos níveis de potência.

Podemos concluir que o caso trifásico acompanhou a robustez do monofásico, apresentando até melhores respostas, como uma menor THD, o FP sendo corrigido mais facilmente para a unidade ou bem próximo dela, e com uma estrutura de controle até mais simplificada, pois utilizamos de uma técnica de medir somente a potência reativa total do sistema para realimentar o controlador PI, comparando a mesma com o nível zero, que seria o ideal para termos a melhor correção.

7 REFERÊNCIAS

AKAGI, H.; KANAZAWA, Y.; NABAE, A. Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices without Energy Storage Components. *IEEE Transactions on Industry Applications*, IA-20, n. 3, p. 625–630, 1984. ISSN 19399367.10,20

Boustead, I., Hancock, G.F.; **Handbook of Industrial Energy Analysis**, Ellis Horwood, Chichester, 1979

Boylestad, Robert L. Introdução a Análise de Circuitos - 10º Ed. 2004.

Campos, Mario Cesar M. Massa de; Teixeira, Herbert C. G. Controles típicos de equipamento e processos 2. ed. São Paulo: Blucher, 2010.

Gonçalves, Amilcar Flamarion Querubini. Sistemas de Geração Distribuída controlado em tensão e potência e utilizado de forma isolada ou conectada a rede de distribuição. 2014.

Hart, Daniel W. Power Eletronics. 2011.

Johnson, David E. Fundamentos de Análise de Circuitos Elétricos. 1994.

Silva, Marcos César Isoni. **CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA DE CARGAS INDUSTRIAIS COM DINÂMICA RÁPIDA.** 2009.

MME, **Balanço Energético Nacional**, Ministério de Minas e Energia/Empresa de Pesquisa Energética, Brasília, 2012

N. Mohan, T. M. Undeland, and W. P. Robbins, **Power Electronics: Converters, Applications, and Design**, 3d ed., Wiley, New York, 2003.

Rashid, Muhammad H. Eletrônica de Potência, Circuitos, dispositivos e Aplicações. 1999.

APÊNDICE A - EXEMPLO DE CORREÇÃO POR BANCO DE CAPACITOR

Para exemplificar dado um motor, que tem um comportamento indutivo, que trabalha com um fator de potência atrasado que pode ser especificado, podemos a partir dos dados da tensão de alimentação, do fator de potência, determinar qual capacitor pode ser conectado ao sistema para corrigir o fator de potência de acordo com o que é especificado.

Por exemplo, para um fator de potência de 0,6 atrasado, eficiência de 92%, uma potência de saída de 3730W e uma tensão aplicada de 208V com uma frequência de 60hz, podemos extrair as seguintes informações.

Primeiro calculamos a potência reativa do sistema, a partir de:

$$Pin = \frac{Pout}{0.92}$$

$$Pin = \frac{3730}{0.92} = 4054,35W$$

$$\theta = a\cos(fp) = 53,13^{\circ}$$

$$QL = Pin \tan(\theta)$$

$$QL = 4054,35 \tan(53,13) = 5405,8 \, VAR$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = 6757,25 \text{VA}$$

$$S = VI$$

$$Itotal = 32,49A$$

Para corrigir o fator de potência para a unidade, devemos inserir uma reatância capacitiva no circuito no valor de 5405,8VAR, que é o mesmo valor de reatância indutiva QL encontrado.

Para calcular o valor do capacitor partimos de:

$$QC = \frac{V^{2}}{XC}$$

$$XC = \frac{V^{2}}{QC} = \frac{(208^{2})}{5405,8} = 8\Omega$$

$$C = \frac{1}{2\pi f XC}$$

$$C = \frac{1}{2\pi (60)(8)} = 331,6\mu F$$

Agora para um fator de potência já corrigido para a unidade a nova potência aparente e a nova corrente da fonte podem ser calculadas como:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{4054,35^2 + 0^2} = 4054,35VA$$

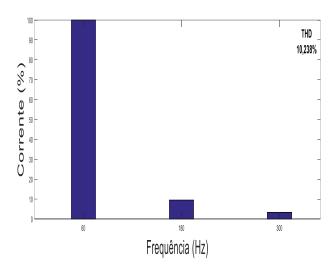
$$S = VI$$

$$Itotal = 19.49A$$

Como podemos observar a utilização do banco de capacitor para correção do fator de potência, diminui a corrente total, ou seja, a corrente que circula pela fonte consideravelmente.

APÊNDICE B - Harmônicas e THD par ao caso monofásico

Figura 60: Harmônicas e THD para α =140°.



Fonte: Do autor.

Figura 61: Harmônicas e THD para α =150°.

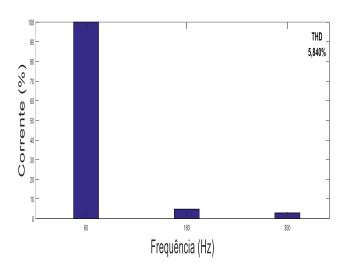


Figura 62: Harmônicas e THD para α =160°.

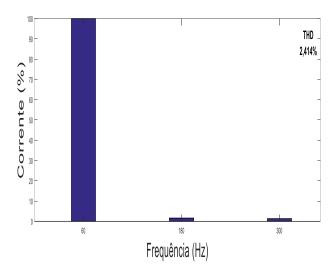


Figura 63: Harmônicas e THD para α =170°.

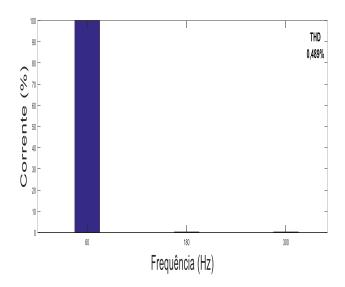


Figura 64: Harmônicas e THD para α =180°.



MINISTERIO DA EDUCAÇÃO Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP Instituto de Ciências Exelas e Aplicadas Collégiado de Curso de Engamenta de Elétrica



TERMO DE RESPONSABILIDADE

O texto do trabalho de conousão de ourso initulado 'Desenvolvimento de um Static Var Compensator (SVC) para correção do Fator de Potência" é de minha intera responsabilidade. Declaro que não há utilização indevida de texto, material fotográfico ou qualquer outro material portencente a terceiros sem a devida ottação ou consentimento dos referidos autores.

João Montevade 22 de Janeiro de 2019

Georgia Alus de Oluzina



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas Colegiado do Ourso de Engenharia de Elétrica



DECLARAÇÃO DE CONFERÊNCIA DA VERSÃO FINAL

Declaro	dne	conferi	a	versão	final	a	ser	entregue	pelo	aluno	
GEOVANE ALVES DE OLIVEIRA					, autor do trabalho de conclusão de curso						
intitu l ado	DESEN	OLVIMENTO	DE U	M STATIC VA	R COMPS	NSAT	OR (9VC	PARA CORRE	ção po r	ATOR DE PO	TÉNCIA
quanto à	confor	midade no	s seç	quintes iter	15:						

- A monografia corresponde a versão final, estando de acordo com as sugestões e correções sugeridas pela banca e seguindo as normas ABNT;
- A versão final da monografia inclui a ata de defesa (ANEXO IV apenas verso), a ficha catalográfica e o termo de responsabilidade (ANEXO X -) devidamente assinados.

João Morlevade, 22 de Janeiro de 2019 .

Nome do(a) Professor(a)