UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROJETO DE GRADUAÇÃO

RAMON TINTORI DOS SANTOS

MÉTODO DE CÁLCULO PARA DETERMINAR OS GANHOS DAS MALHAS DE CONTROLE DE UM FILTRO ATIVO PARALELO

VITÓRIA – ES
DEZEMBRO/2014

RAMON TINTORI DOS SANTOS

MÉTODO DE CÁLCULO PARA DETERMINAR OS GANHOS DAS MALHAS DE CONTROLE DE UM FILTRO ATIVO PARALELO

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Ramon Tintori dos Santos**, apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para aprovação na disciplina "ELE08553 – Projeto de Graduação 2" e para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Lucas Frizera Encarnação

VITÓRIA – ES
DEZEMBRO/2014

RAMON TINTORI DOS SANTOS

MÉTODO DE CÁLCULO PARA DETERMINAR OS GANHOS DAS MALHAS DE CONTROLE DE UM FILTRO ATIVO PARALELO

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Ramon Tintori dos Santos** apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Aprovada em 18 de dezembro de 2014.

COMISSÃO EXAMINADORA:

_____

Prof. Dr. Lucas Frizera Encarnação
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

_____

Prof. Dr. Paulo José Mello Menegaz
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador

_____

Prof. Msc. Tiara Rodrigues Smarssaro de Freitas
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinadora

Dedico este trabalho aos meus pais, **Sidineia** e **Jose**, por todo o apoio e por acreditarem na minha capacidade de vencer cada obstáculo que antecede o sucesso.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por cada oportunidade dada na minha vida, e por ter me concedido forças.

Aos meus pais, Sidineia e Jose, por todo apoio, incentivo, compreensão e ajuda em todos os momentos de aflição.

A minha namorada, Jéssica, pela paciência, amor, companheirismo, por ser minha fonte de confiança e por nunca ter me deixado desistir, mesmo quando tudo parecia perdido.

Ao Professor Lucas pela ajuda, orientação e força por cada preciosa sugestão e infinitos novos conhecimentos.

Aos professores e colegas do Curso de Engenharia Elétrica, por cada contribuição e ensinamento para a minha formação como Engenheiro e também como pessoa.

"Deus nos fez perfeitos e não escolhe os capacitados, mas capacita os escolhidos. Fazer ou não fazer algo, só depende de nossa vontade e perseverança."

- Eu sei como ele conseguiu.

Todos perguntaram: - Pode nos dizer como?

- É simples, respondeu.

- Não havia ninguém ao seu redor, para lhe dizer que não seria capaz.

Albert Einstein

RESUMO

Este trabalho apresenta uma metodologia para o cálculo dos ganhos do controlador PI das malhas de controle de corrente e de tensão do barramento CC do Filtro Ativo de Potência Paralelo (FAPP) trifásico a três fios tendo em vista que geralmente os valores dos controladores PI são determinados pelo método de tentativa e erro, o que não garante que realmente haja uma sintonia adequada do controlador PI das malhas. Assim, é apresentado o projeto destes controladores, de forma a obter um sistema compensado em malha aberta com margem de fase desejada na frequência de cruzamento especificada em projeto. Este método de projeto dos controladores PI das malhas de corrente e de tensão faz com que o equacionamento dos ganhos do controlador fique em função dos parâmetros físicos do filtro garantindo uma melhor sintonia do controlador PI. É demonstrada a utilidade de se calcular os ganhos do controlador PI das malhas de controle de corrente e de tensão do barramento CC e é apresentado também o estudo e implementação do FAPP trifásico a três fios aplicado a uma carga não-linear. O FAPP é utilizado com o intuito de melhorar a qualidade de energia da rede de distribuição, e este atua na supressão de correntes harmônicas e na compensação de reativos corrigindo o fator de potência. São abordados os conceitos fundamentais da Teoria pq que é o algoritmo adotado para obtenção das correntes de referência de compensação. São apresentados modelos matemáticos das malhas de controle de corrente e da malha de controle de tensão do FAPP. É abordado o projeto do Filtro LCL para acoplar o FAPP à rede que melhora a atenuação de harmônicos nas frequências de interesse e permiti menor circulação de energia reativa pelo sistema. Assim, o FAPP é acoplado a um sistema modelado a fim de se fazer simulações e estudos dos resultados. São apresentadas as simulações e resultados, assim como as análises do desempenho do FAPP para os casos diferentes onde utilizamos os ganhos projetados dos controladores PI das malhas e utilizamos os ganhos fora do valor de projeto dos controladores PI e verificamos os resultados.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sistema elétrico com tensões e correntes harmônicas. 16
Figura 2 – Sistema elétrico com tensões e correntes compensadas. 17
Figura 3 - Representação Gráfica. (a) Transformação de Clarke e (b) Transformação de Clarke Inversa 25
Figura 4 – Significado Físico das potências instantânea e imaginária 26
Figura 5 – Princípio Básico de Compensação Paralela de Corrente 27
Figura 6 – Método de Controle do Compensador Paralelo de Corrente Baseado na Teoria p-q 28
Figura 7 – Filtro Ativo Paralelo trifásico, três condutores 29
Figura 8 – Modulação PWM implementada com 2 níveis. 30
Figura 9 – Diagrama de blocos da estratégia para o controle de corrente senoidal 31
Figura 10 – Circuito detector de sequência positiva. 32
Figura 11 – Diagrama de blocos do circuito PLL baseado na teoria pq. 33
Figura 12 – Diagrama de bloco da malha de controle de corrente. 34
Figura 13 – Topologia do filtro LCL. 35
Figura 14 – Diagrama de bloco da malha de controle do barramento CC. 37
Figura 15 – Resposta em frequência das funções $G_p(s)$ (azul) e $G_{MApi}(s)$ (verde). 44
Figura 16 – Resposta em frequência (em malha fechada) da malha de corrente com controlador PI (em verde). 44
Figura 17 - Resposta em frequência das funções $G_{pcc}(s)$ (azul) e $G_{MApicc}(s)$ (verde). 46
Figura 18 - Resposta em frequência (em malha fechada) da malha de tensão do barramento CC com controlador PI (em verde). 47
Figura 19 – Esquema completo do sistema com Carga Não-Linear. 48
Figura 20 – Sistema simulado no PSCAD com Retificador Trifásico em Ponte Completa... 49
Figura 21 - Correntes da Carga Não-Linear. 49
Figura 22 - Corrente drenada na rede sem atuação do FAPP. 50
Figura 23 - Tensão da rede. 50
Figura 24 - Harmônicas na Corrente da rede sem atuação do FAPP. 51
Figura 25 - Corrente drenada pela rede compensada pela atuação do FAPP. 51
Figura 26 - Carregamento da tensão no Barramento CC. 52
Figura 27 - Harmônicas drenada da rede após a atuação do FAPP. 52

Figura 28 - Corrente drenada da rede x Corrente da Carga Não-Linear após a atuação do FAPP. 53
Figura 29 - Potência Reativa Compensada pelo FAPP. 54
Figura 30 - Malha de Corrente do FAPP. 55
Figura 31 - Malha de Tensão do Barramento CC. 55
Figura 32 - Erro da realimentação da Malha de Corrente. 56
Figura 33 - Zoom no Erro da realimentação da Malha de Corrente. 56
Figura 34 - Corrente drenada da rede após atuação do FAPP com PI da malha de corrente fora do valor de projeto. 57
Figura 35 - Porcentagem de Harmônicas drenadas da rede quando o PI está fora do valor de Projeto. 58
Figura 36 - Erro da realimentação da Malha de Corrente. 58
Figura 37 - Carregamento da Tensão no Barramento CC para o PI da malha de corrente fora do valor de projeto. 59
Figura 38 - Tensão de Carregamento do Barramento CC com PI da malha de tensão fora do valor de projeto. 59
Figura 39 - Corrente drenada da rede para valores de LCL fora dos valores de projeto. 60
Figura 40 - Tensão de carregamento do barramento CC para valore de LCL fora dos valores de projeto. 61
Figura 41 - Harmônicas na rede com Filtro LCL fora de valor de Projeto. 61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Limites de distorção da corrente para sistemas de distribuição (120V a 69kV)... 21
Tabela 2 – Limites de distorção da corrente para sistemas de subdistribuição (69001V a 161kV) 21
Tabela 3 – Limites de distorção de corrente para sistemas de alta tensão (>161kV) e sistemas de geração e cogeração isolados. 22
Tabela 4 – Limites de distorção de tensão 22
Tabela 5 – Valores de referência globais das disposições harmônicas totais expressos em porcentagem da tensão fundamental 23
Tabela 6 – Parâmetros do filtro LCL. 36
Tabela 7 – Parâmetros da malha de corrente. 42
Tabela 8 – Parâmetros da malha de tensão do barramento CC. 45
Tabela 9 - Dados de Projeto 53
Tabela 10 - Dados dos PI's fora do valor de Projeto. 57
Tabela 11 - Dados do Filtro LCL fora dos valores de Projeto 60

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
FAP	Filtro Ativo de Potência
FAPP	Filtro Ativo de Potência Paralelo
PWM	Pulse-Width Modulation
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo
PAC	Ponto de Acoplamento Comum
QEE	Qualidade de Energia Elétrica
FHP	Filtro Ativo de Potência Híbrido
FP	Fator de Potência
ANEEL	Agência Nacional de Emergia Elétrica
PRODIST	Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
EA	Energia Ativa
ER	Energia Reativa
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
IEC	International Electrotechnical Commission
rms	valor eficaz
TDD	Total Demand Distortion
THD	Total harmonic distortion
ONS	Operador Nacional do Sistema

LISTA DE SÍMBOLOS

C	Capacitância (F)
f	Frequência (Hz)
f_p	Fator de Potência
i	Corrente instantânea no elemento (A)
i_f	Corrente de monitoramento do indutor (A)
i_{cs}	Corrente de saída do filtro ativo (A)
i_{ca}	Corrente de saída do filtro ativo na fase A (A)
i_{cb}	Corrente de saída do filtro ativo na fase B (A)
i_{cc}	Corrente de saída do filtro ativo na fase C (A)
i_C^*	Corrente de referência de compensação (A)
I_s	Corrente da Fonte (ou rede) (A)
i_{sa}	Corrente da Fonte (ou rede) da fase A (A)
i_{sb}	Corrente da Fonte (ou rede) da fase B (A)
i_{sc}	Corrente da Fonte (ou rede) da fase C(A)
$i*$	Conjugado do vetor de corrente (A)
$i*_{ca}$	Corrente de referência de compensação da fase A (A)
$i*_{cb}$	Corrente de referência de compensação da fase B (A)
$i*_{cc}$	Corrente de referência de compensação da fase C (A)
i_L	Corrente da carga (A)
i_{La}	Corrente da carga na fase A (A)
i_{Lb}	Corrente da carga na fase B (A)
i_{Lc}	Corrente da carga na fase C (A)
I_{cc}	Corrente de curto circuito (A)
i_α	Corrente no eixo α (A)
i_β	Corrente no eixo β (A)
i_0	Corrente de sequência zero (A)
$i_\beta^{'}$	Corrente no eixo β de sequência positiva (A)

$i_\alpha^{'}$	Corrente no eixo α de sequência positiva (A)
L	Indutância (H)
$P_{3\phi}$	Potência ativa trifásica (W)
P	Potência Ativa (W)
p_0	Potência instantânea de sequência 0 (W)
p	Potência instantânea real(W)
$\bar{p}$	Componente constante da potência real (W)
$\tilde{p}$	Componente oscilante da potência real (W)
p_c^*	Potência real a ser compensada (W)
Q	Potência Reativa (var)
q	Potência instantânea imaginária (vai)
$\bar{q}$	Componente constante da potência imaginária (var)
$\tilde{q}$	Componente oscilante da potência imaginária (var)
q_c^*	Potência imaginária a ser compensada (var)
R	Resistência (Ω)
S	Potência aparente (VA)
V	Tensão instantânea (V)
V_s	Tensão da Fonte (ou rede) (V)
V_L	Tensão da Carga (V)
V_N	Tensão nominal (V)
V_h	Tensão harmônica (V)
v_α	Tensão no eixo α (V)
v_β	Tensão no eixo β (V)
v_0	Tensão de sequência zero (V)
ΔV	Variação da Tensão (V)
ω	frequência (rad/s)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 15
1.1 Motivação 15
1.2 Objetivos 17
1.2.1 Objetivo Geral 17
1.2.2 Objetivos Específicos 18
1.3 Organização do Texto 18
2 FATOR DE POTÊNCIA E DISTORÇÃO HARMÔNICA 20
2.1 Fator de potência 20
2.2 Recomendação IEEE para práticas e requisitos para controle de harmônicas no sistema elétrico de potência: IEEE-519 20
2.3 Regulamentação brasileira 22
3 APLICAÇÃO DA TEORIA P-Q PARA COMPENSAÇÃO 24
3.1 Base da teoria p-q 24
3.2 A teoria p-q em sistemas trifásicos com três condutores 25
3.3 Uso da Teoria p-q para compensação paralela 26
3.4 Filtro Ativo Paralelo para Compensação 28
3.4.1 Modulação PWM 29
3.4.2 Estratégia de Controle do Filtro Ativo Paralelo 30
3.4.3 Filtros Ativos para Controle de Corrente Senoidal 31
3.4.4 Detector de Sequencia Positiva 32
3.4.5 Princípio de Operação do Circuito PLL 33
3.4.6 Malha de controle de corrente do FAPP 33
3.4.6.1 Modelagem do Filtro LCL 34
3.4.7 Malha de controle da tensão do barramento CC do FAPP 37
4 PROJETO DOS CONTROLADORES PI 38
4.1 Metodologia de projeto do Controlador PI 38
4.1.1 Projeto do controlador PI da malha de corrente do FAPP 41
4.1.2 Projeto do controlador PI da malha de tensão do barramento CC do FAPP 45
5 SIMULAÇÕES DO FAPP 48
5.1 Simulações do Sistema proposto sem a Atuação do FAPP 49
5.2 Simulações do Sistema proposto após atuação do FAPP 51

5.3 Simulações do Sistema Proposto com os valores dos PI's da Malha De Corrente e da Malha De Tensão fora dos valores projetados 57
5.4 Simulações do Sistema Proposto com os valores do Filtro LCL fora dos valores projetados 60
6 CONCLUSÃO 63
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 65

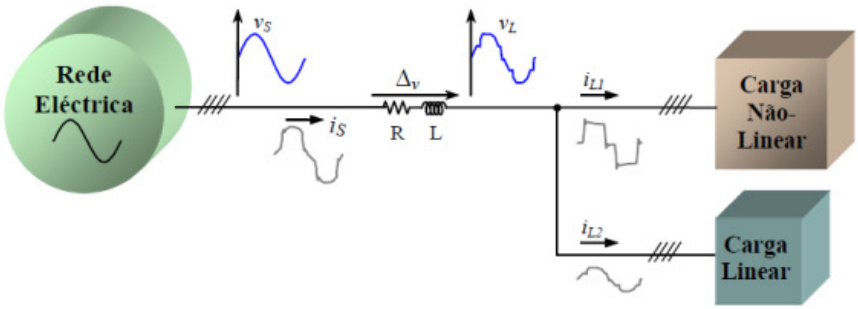
1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

A qualidade da energia elétrica entregue pelas empresas distribuidoras aos consumidores sempre foi objeto de interesse. Porém, até algum tempo atrás, a qualidade estava associada, especialmente, com a continuidade dos serviços, ou seja, a principal preocupação era que não houvesse interrupções de energia, e que as tensões e frequência fossem mantidas dentro de limites considerados aceitáveis. Durante décadas a grande maioria dos conversores ligados às redes de energia elétrica consistia em cargas lineares. Por essa razão, e uma vez que as tensões da alimentação são senoidais, as correntes consumidas também eram senoidais e de mesma frequência, podendo apenas encontrar-se defasadas relativamente à tensão.

A evolução da eletrônica de potência fez com que os equipamentos ligados aos sistemas elétricos melhorassem em rendimento, controlabilidade e custo. No entanto, esses equipamentos funcionam como cargas não-lineares, produzindo correntes distorcidas (não-senoidal), e dessa forma "poluindo" a rede elétrica com harmônicos, que por sua vez geram perdas relacionadas com o transporte e distribuição de energia elétrica, interferências com sistemas de comunicação e degradação do funcionamento da maior parte dos equipamentos ligados à rede (1). Como mostra a Figura 1, a circulação das correntes harmônicas no sistema de distribuição de energia pode refletir na distorção das formas de ondas das tensões de emissão da rede, mais especificamente no Ponto de Acoplamento Comum (PAC) do sistema elétrico. Tensões harmônicas são um dos principais problemas de Qualidade de Energia Elétrica (QEE) encontrados nos sistemas elétricos. Deste modo, outros consumidores, que não possuem cargas não-lineares, também podem ser afetados pelo recebimento de tensões distorcidas.

Figura 1 – Sistema elétrico com tensões e correntes harmônicas.



Fonte: AKAGI; WATANABE. AREDES, 2007.

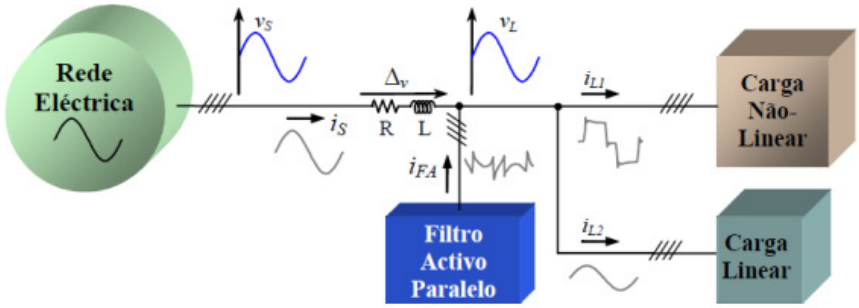
Com o aumento da utilização de cargas não-lineares em aplicações industriais, comerciais e residenciais, como por exemplo fontes chaveadas, ciclo conversores, inversores para o acionamento de máquinas CA, retificadores controlados e não controlados para o acionamento de máquinas CC, dentre outros, está sendo exigido uma maior atenção das concessionárias de energia elétrica em relação à qualidade de fornecimento de energia e redução das perdas técnicas, a fim de melhorar a eficiência dos seus sistemas elétricos.

Uma das soluções alternativas para os problemas gerados pelas harmônicas é a utilização de Filtros Ativos de Potência (FAP) e Filtros Híbridos de Potência (FHP). Os filtros ativos de potência têm a capacidade de, ao mesmo tempo, compensar harmônicas, desequilíbrios e a potência reativa excedente, conforme apresentado na Figura 2 (3). Dessa forma, os filtros ativos de potência tornam-se, do ponto de vista operacional, mais atrativos em relação aos bancos capacitivos para correção do fator de potência e aos filtros passivos para compensar os harmônicos das cargas não-lineares (4).

Filtros ativos paralelos são adequados para a compensação de cargas do tipo fonte de corrente e pouco adequados para compensação de cargas do tipo fonte de tensão. A outra topologia utilizada é o filtro híbrido de potência que é um filtro ativo em paralelo com um banco de capacitores que é adequado para compensação dos dois tipos de cargas (cargas do tipo fonte de corrente e do tipo fonte de tensão), sendo que o primeiro pode ser projetado para filtrar apenas as correntes harmônicas (o que reduz o tamanho e evita investimento iniciais altos) e o segundo para compensar a potência ativa excedente, mas é necessário utilizar-se de técnicas

de controle para realizar o amortecimento harmônico devido ao fenômeno de ressonância causada pelo banco de capacitores (5) e (6).

Figura 2 – Sistema elétrico com tensões e correntes compensadas.



Fonte: AKAGI; WATANABE. AREDES, 2007.

Tendo em vista a crescente necessidade de melhorar a qualidade de energia devido à "poluição" do sistema elétrico de potência causada pela presença de harmônicos geradas por cargas não-lineares, alguns estudos visam a utilização de filtros ativos paralelos para compensar as correntes harmônicas das cargas, não permitindo sua circulação na fonte (7) e (8).

Neste sentido, este trabalho vem com o objetivo de apresentar uma metodologia para o cálculo dos ganhos do controlador PI das malhas de controle de corrente e de tensão do barramento CC do Filtro Ativo de Potência Paralelo (FAPP) com intuito de obter-se uma filtragem das correntes harmônicas da rede mais eficiente, ou seja, vem a contribuir com a melhor escolha dos ganhos dos controladores a serem utilizados, tendo em vista que os valores dos controladores, na maioria das vezes, são obtidos através do método de tentativas e erros. Desta maneira diminuem-se perdas desnecessárias ou maximiza-se a eficiência do filtro.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é determinar os ganhos otimizados das malhas de controle de corrente e de controle de tensão de modo a obter-se uma filtragem mais eficiente de um filtro

ativo de potência para se uma filtragem de harmônica mais eficiente e se obter um controlador PI sintonizado para as faixas de frequência de interesse.

1.2.2 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral deste trabalho, será necessário seguir os seguintes objetivos específicos:

- Confirmar o uso da teoria p-q para compensação de harmônicos e reativos da rede;
- Determinar um modelo de um filtro ativo;
- Determinar uma estratégia de controle do filtro ativo;
- Determinar as funções de transferência das malhas de corrente e tensão do filtro ativo;
- Observar as curvas de resposta em frequência das funções de transferência das malhas de corrente e tensão do filtro ativo;
- Mostrar o desenvolvimento dos cálculos dos ganhos ideais das malhas de controle de corrente e de controle de tensão do barramento CC de modo a obter-se uma filtragem mais eficiente;
- Analisar os resultados;

1.3 Organização do Texto

O trabalho está estruturado em seis capítulos, neste capítulo é apresentada apenas uma introdução sobre a importância e a utilidade do filtro ativo bem como a motivação de se projeta-lo.

No Capítulo 2, são apresentadas as preocupações que as entidades estão tendo em relação a qualidade da energia elétrica no Brasil e no mundo, assim como os cuidados que estas entidades estão tomando cada vez mais com normas para reduzir o baixo fator de potência na rede e as harmônicas.

No Capítulo 3, são apresentados os conceitos da Teoria p-q que será o algoritmo utilizado para fazer o controle do filtro ativo. O filtro projetado utiliza um conversor PWM. Neste capítulo também é apresentado o detector de sequência positiva, assim como o projeto do

Filtro LCL, o modelo da malha de controle de corrente e o modelo da malha de controle de tensão do barramento CC do filtro ativo.

No Capítulo 4 é mostrado uma metodologia proposta na literatura de como se projetar os ganhos dos controladores PI da malha de corrente e da malha de tensão utilizando ferramentas de controle como a função de transferência do sistema em malha aberta além de um equacionamento matemático que determina os ganhos em função dos parâmetros físicos do filtro ativo, sendo que, na maioria dos projetos de filtros ativos, estes ganhos são obtidos por tentativa e erro.

No Capítulo 5 são apresentadas as simulações de funcionamento do Filtro Ativo de Potência Paralelo. Nas simulações são mostrados os efeitos da filtragem das correntes harmônicas da rede no caso onde utilizou-se os valores dos ganhos dos controladores PI projetados e o caso onde utilizou-se valores de ganhos dos controladores PI fora do valor de projeto para as malhas de controle.

No Capítulo 6 é apresentada a conclusão do trabalho, onde são analisados todos os resultados obtidos.

2 FATOR DE POTÊNCIA E DISTORÇÃO HARMÔNICA

2.1 Fator de potência

A atual regulamentação brasileira do fator de potência estabelece que o mínimo fator de potência (FP) das unidades consumidoras alimentadas em baixa tensão é de 0,92. A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), em seu documento "Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – Prodist módulo 8 – qualidade da energia elétrica", de 24 de agosto de 2005 traz o seguinte texto:

> A presença da energia e/ou potências reativas faz com que o transporte de potência ativa demande maior capacidade do sistema de transporte pelo qual ela flui. Por este motivo, a responsabilidade de um cliente marginal nos investimentos destinados à expansão da rede será tanto maior quanto mais elevada for sua potência reativa ou, de modo equivalente, quanto menor for seu fator de potência. Nos sistemas senoidais, tanto os monofásicos quanto os trifásicos equilibrados e simétricos, a noção do fator de potência é aceita consensualmente. Hoje em dia a proliferação de cargas não lineares e/ou não balanceadas, assim como de cargas com dispositivos chaveados de eletrônica de potência, determina um aprimoramento das disposições contidas nas regulamentações vigentes. Tal melhoria encontra sustentação na tecnologia de amostragem digital hoje disponível no mercado brasileiro, o qual dispõe de instrumentos de medição que permitem incorporar conceitos de potência e fatores de potência mais atuais (9).

O documento supracitado, ainda, estabelece para o cálculo do FP procedimentos que consideram formas de onda senoidais (Equação 1):

$$f_p = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad ou \quad \frac{EA}{\sqrt{EA^2 + ER^2}} \qquad \text{Equação 1}$$

sendo EA a energia ativa e ER a energia reativa.

2.2 Recomendação IEEE para práticas e requisitos para controle de harmônicas no sistema elétrico de potência: IEEE-519

Essa recomendação elaborada pelo IEEE (1991) delineia os principais fenômenos causadores de distorção harmônica, indica métodos de medição e limites de distorção. Em contrapartida, sua abordagem é contrária àquela da IEC 61000-3-2, uma vez que os limites estabelecidos referem-se aos valores medidos no ponto de acoplamento comum (PAC), e não em cada equipamento individual. A questão é que, para o sistema, o que ocorre dentro de uma instalação não é tão interessante quanto o que ela reflete para o exterior, ou seja, para os outros consumidores conectados à mesma alimentação.

Os limites se mostram diferentes de acordo com o nível de tensão e com o nível de curto-circuito do PAC. Obviamente, quanto maior for a corrente de curto-circuito (Icc) em relação à corrente de carga, maiores serão as distorções de corrente admissíveis, uma vez que elas distorcerão em menor intensidade a tensão no PAC. Conforme o limite da tensão é elevado, menores são os limites aceitáveis.

A grandeza TDD – Total Demand Distortion – é definida como a distorção harmônica da corrente, em porcentagem, da máxima demanda da corrente de carga (demanda de 15 ou 30 min). Portanto, a medição da TDD deve ser feita no pico de consumo. Harmônicas pares são limitadas a 25% dos valores acima, enquanto que as distorções de corrente que resultem em nível CC não são admissíveis. Os limites supracitados podem ser observados na Tabela 1, Tabela 2 e Tabela 3.

Tabela 1 – Limites de distorção da corrente para sistemas de distribuição (120V a 69kV)

Máxima corrente harmônica em % da corrente de carga (I_0 – valor da componente fundamental)						
Harmônicas ímpares:						
I_{cc}/I_0	< 11	11 ≤ n < 17	17 ≤ n < 23	23 ≤ n < 35	35 < n	TDD (%)
< 20	4	2	1,5	0,6	0,3	5
20 < 50	7	3,5	2,5	1	0,5	8
50 < 100	10	4,5	4	1,5	0,7	12
100 < 1000	12	5,5	5	2	1	15
> 1000	15	7	6	2,5	1,4	20

Fonte: POMÍLIO, 2006.

Tabela 2 – Limites de distorção da corrente para sistemas de subdistribuição (69001V a 161kV)

Limites para harmônicas de corrente de cargas não-lineares no PAC com outras cargas						
Harmônicas ímpares:						
Icc/Io	< 11	11 ≤ n < 17	17 ≤ n < 23	23 ≤ n < 35	35 < n	TDD (%)
< 20	2	1	0,75	0,3	0,15	2,5
20 < 50	3,5	1,75	1,25	0,5	0,25	4
50 < 100	5	2,25	2	0,75	0,35	6
100 < 1000	6	2,75	2,5	1	0,5	7,5
> 1000	4,5	3,5	3	1,25	0,7	10

Fonte: POMÍLIO, 2006.

Tabela 3 – Limites de distorção de corrente para sistemas de alta tensão (>161kV) e sistemas de geração e cogeração isolados.

Harmônicas ímpares:						
Icc/Io	< 11	11 ≤ n < 17	17 ≤ n < 23	23 ≤ n < 35	35 < n	TDD (%)
< 50	2	1	0,75	0,3	0,15	2,5
≥ 50	3	1,5	1,15	0,45	0,22	3,75

Fonte: POMÍLIO, 2006.

Para os limites de tensão, os valores mais severos são para as tensões menores (nível de distribuição). Estabelece-se um limite individual por componente e um limite para a distorção harmônica total (Tabela 4).

Tabela 4 – Limites de distorção de tensão

Distorção individual		THD
69kV e abaixo	3%	5%
69001V até 161kV	1,5%	2,5%
Acima de 161kV	1%	1,5%

Fonte: POMÍLIO, 2006.

2.3 Regulamentação brasileira

Com relação à rede básica de energia, o Operador Nacional do Sistema (ONS) estabelece desde 2002 parâmetros de qualidade para a tensão suprida. Porém, do ponto de vista do consumidor, as restrições a serem consideradas são, majoritariamente, as do sistema de distribuição, as quais ainda estão em discussão.

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), no já citado documento "Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – Prodist módulo 8 – qualidade da energia elétrica" (9), propõe valores para a distorção harmônica da tensão no sistema de distribuição (Tabela 5). Tal regulamentação ainda não está definida.

Tabela 5 – Valores de referência globais das disposições harmônicas totais expressos em porcentagem da tensão fundamental

Tensão nominal do Barramento	Distorção Harmônica Total de Tensão (DTT) [%]
$V_N \leq 1kV$	10
$1kV < V_N \leq 13,8kV$	8
$13,8kV < V_N \leq 69kV$	6
$69kV < V_N \leq 138kV$	3

Fonte: POMÍLIO, 2006.

$$DTT = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{Hmáx} V_h^{\,2}}}{V_1} \times 100 \qquad \text{Equação 2}$$

Portanto, o filtro ativo de potência paralelo tem de atender todas as normas que foram recomendadas pelas entidades nacionais e internacionais a fim de garantir a qualidade da energia elétrica. Assim, o mesmo deve obedecer aos limites de fator de potência, TDD, THD e DTT estabelecidas pelas normas para poder atender aos critérios.

3 APLICAÇÃO DA TEORIA P-Q PARA COMPENSAÇÃO

3.1 Base da teoria p-q

A Teoria p-q primeiro transforma tensões e correntes das coordenadas abc para as coordenadas αβ0, e depois define a potência instantânea sobre essas coordenadas. Por isso, esta teoria considera sempre o sistema de três fases como uma unidade, e não uma sobreposição ou soma de três circuitos monofásicos (3). A transformação de coordenadas de abc para αβ0 é na realidade uma transformação de eixo de um sistema de tensões e correntes trifásicas em um sistema de referência estacionário, como o sistema abc, porém com as coordenadas ortogonais entre si (e não a 120° como no caso do sistema abc). Esta transformação é também conhecida como Transformação de Clarke, em homenagem à sua propositora, Engenheira Edith Clarke, (1943) (10).

A transformação αβ0 ou a transformação de Clarke transforma as tensões trifásicas instantâneas nos eixos abc (v_a, v_b, e v_c), nas tensões instantâneas nos eixos αβ0 (v_α, v_β, e v_0) (3). Nenhuma corrente de sequência zero existe num sistema de corrente trifásica, de três fios, de modo que i_0 pode ser eliminado, resultando em uma simplificação. Se as tensões trifásicas são equilibradas em um sistema de quatro condutores, nenhuma tensão de sequência zero está presente, de forma que v_0 pode ser eliminada (3). A Transformação de Clarke e sua transformação inversa de tensões trifásicas genéricas são dadas pela Equação 3 e Equação 4:

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \qquad \text{Equação 3}$$

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} \qquad \text{Equação 4}$$

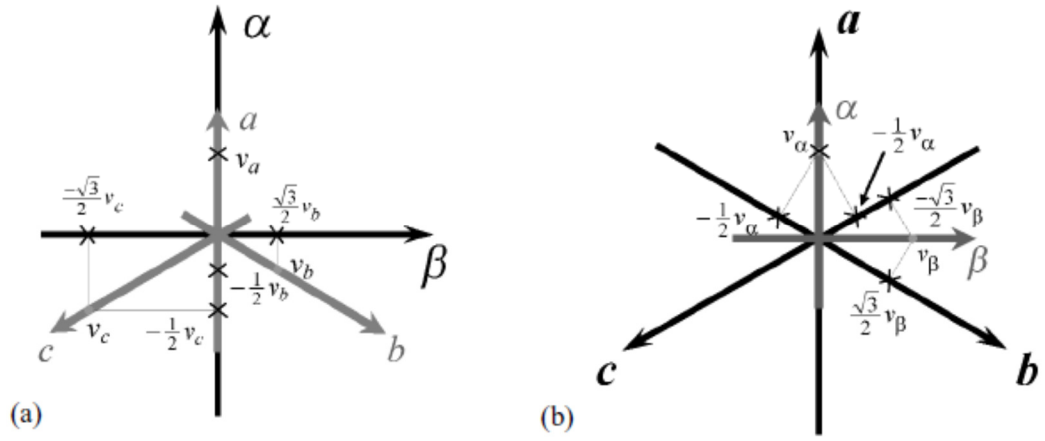
Do mesmo modo, pode-se transformar as correntes genéricas das coordenadas abc (i_a, i_b, e i_c) para as coordenadas αβ, Equação 5 e Equação 6:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \qquad \text{Equação 5}$$

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \qquad \text{Equação 6}$$

As matrizes reais na Equação 3 e Equação 4 sugerem uma transformação do eixo, como mostrado na Figura 3. Eles são eixos estacionários e não devem ser confundidos com o conceito de fasores de tensão ou corrente. Aqui, os valores instantâneos de tensões e correntes de fase e de linha que se referem aos eixos abc estacionários são transformados nos eixos αβ estacionários, ou vice-versa (3).

Figura 3 - Representação Gráfica. (a) Transformação de Clarke e (b) Transformação de Clarke Inversa



Fonte: AKAGI; WATANABE; AREDES, 2007.

3.2 A teoria p-q em sistemas trifásicos com três condutores

Uma forma de introduzir a Teoria p-q para sistemas trifásicos, três condutores, é a partir da utilização da tensão instantânea e vetores de corrente (3). A potência instantânea é complexa e definida como o produto do vetor da tensão e do conjugado do vetor de corrente de i^*, como mostra a Equação 7:

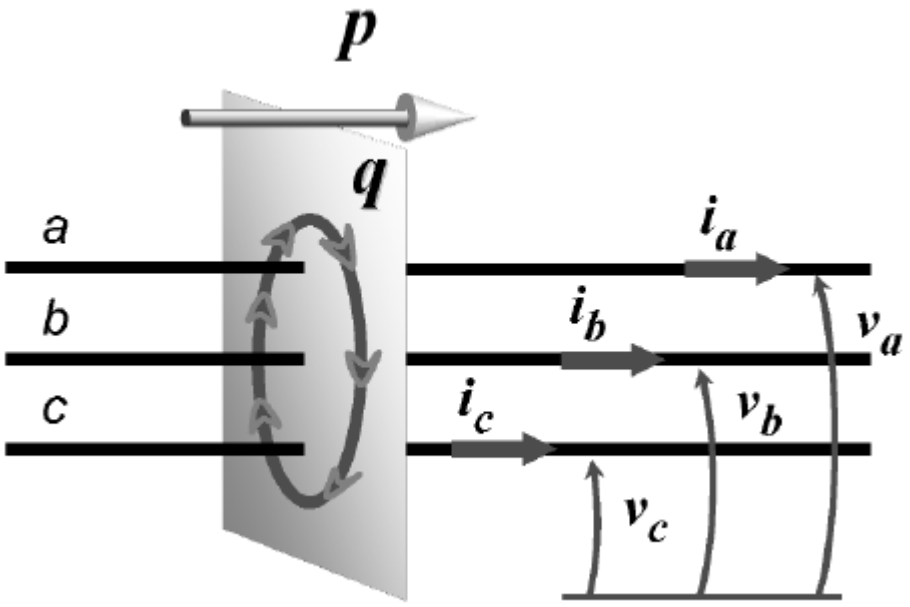
$$s = e.i^* = (v_\alpha + jv_\beta)(i_\alpha - ji_\beta) = \underbrace{(v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta)}_{p} + j\underbrace{(v_\beta i_\alpha + v_\alpha i_\beta)}_{q}$$ Equação 7

A definição original de p e q foi baseada na Equação 8:

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}$$ Equação 8

Note-se que q, no eixo de referência αβ, é definido como a soma dos produtos de tensões e correntes em eixos diferentes. Aqui, valores instantâneos de tensão e corrente são usadas. A potência imaginária q não contribui para o fluxo total de energia entre a fonte e a carga, e vice-versa, como mostra a Figura 4. A potência imaginária q é uma nova quantidade e precisa-se de um aparelho para distinguir esta energia da potência reativa tradicional (3).

Figura 4 – Significado Físico das potências instantânea e imaginária



Fonte: AKAGI; WATANABE; AREDES, 2007.

3.3 Uso da Teoria p-q para compensação paralela

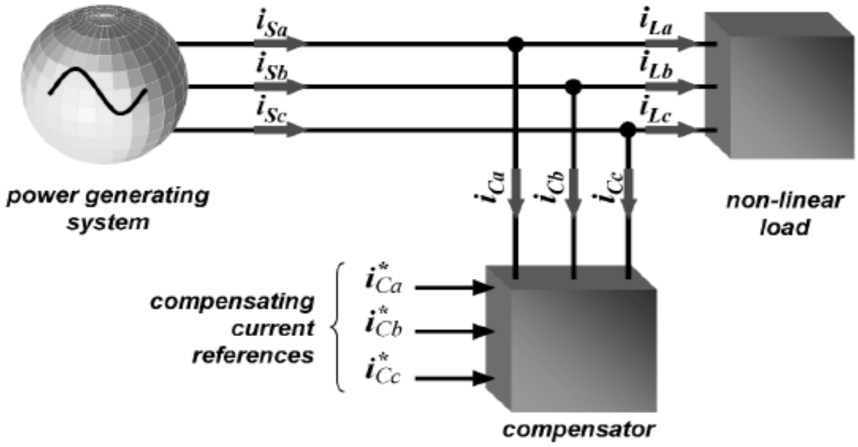
Uma aplicação importante da Teoria p-q é a compensação de correntes indesejáveis. A Figura 5 ilustra a ideia básica de compensação paralela. Ela mostra uma fonte (no sistema de geração de energia), fornecendo energia a uma carga não linear que está sendo compensada por um compensador paralelo (3).

A convenção de corrente adotada na Figura 5 é tal que a corrente compensada, ou seja, a fonte de corrente, é a soma da corrente de carga e da corrente de compensação. Em seguida, a transformação inversa de αβ para abc é aplicada para calcular os valores instantâneos das correntes de referência trifásicas de compensação i_{Ca}^{*}, i_{Cb}^{*} e i_{Cc}^{*}.

Dessa forma, o filtro fornece as correntes harmônicas e reativas à carga, de forma que o sistema de geração de energia forneça somente potência ativa à carga (3).

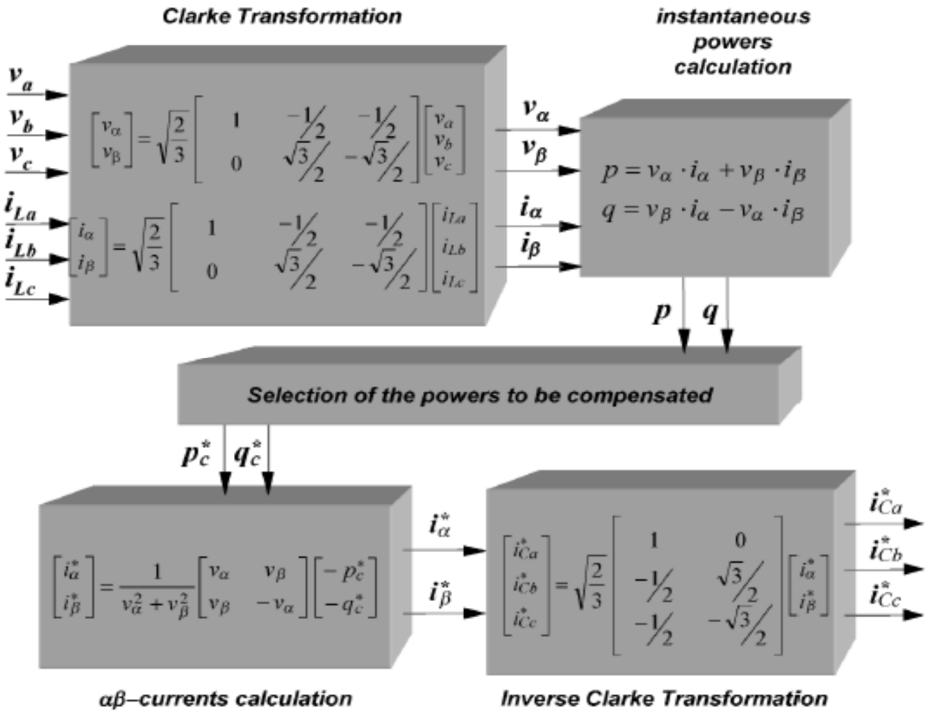
A Figura 6 ilustra o método de controle genérico utilizado no controlador de um compensador em paralelo. As potências real e imaginária podem ser separadas em componentes constantes ($\bar{p}$ e $\bar{q}$, respectivamente) e oscilantes ($\tilde{p}$ e $\tilde{q}$, respectivamente). A compensação da potência imaginária constante garante uma melhoria no fator de potência da rede à qual o filtro está conectado. As compensações das potências oscilantes garantem, respectivamente, uma diminuição das oscilações de potência ativa e uma redução dos harmônicos presentes na rede (3).

Figura 5 – Princípio Básico de Compensação Paralela de Corrente



Fonte: AKAGI; WATANABE; AREDES, 2007.

Figura 6 – Método de Controle do Compensador Paralelo de Corrente Baseado na Teoria p-q



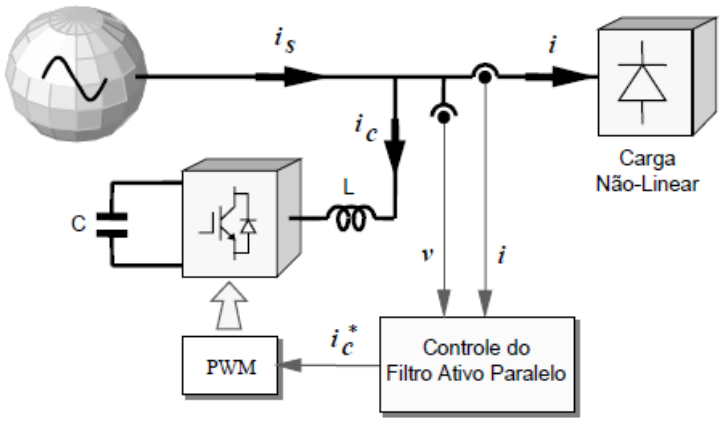
Fonte: AKAGI; WATANABE; AREDES, 2007.

Assim, as componentes indesejadas das potências real e imaginária a serem compensadas são selecionadas. As potências a serem compensadas são representadas como $-p_c^*$ e $-q_c^*$, no controlador mostrado na Figura 6 (3). O compensador gera uma corrente que produza exatamente o inverso da corrente indesejável solicitada pela carga não linear, por esse motivo a potência a ser compensada possui um sinal negativo.

3.4 Filtro Ativo Paralelo para Compensação

A estrutura básica de um Filtro Ativo de Potência Paralelo (FAPP) trifásico está representada através do diagrama de blocos mostrado na Figura 7. Verifica-se que a estrutura do FAPP pode ser dividida em quatro importantes partes, sendo elas: circuito de potência do conversor utilizado para a implementação do FAPP; modulador PWM; algoritmos de geração das correntes de compensação e controladores das malhas de corrente e tensão do barramento CC; e elementos passivos de filtragem (11).

Figura 7 – Filtro Ativo Paralelo trifásico, três condutores



Fonte: WATANABE; AREDES, 2007.

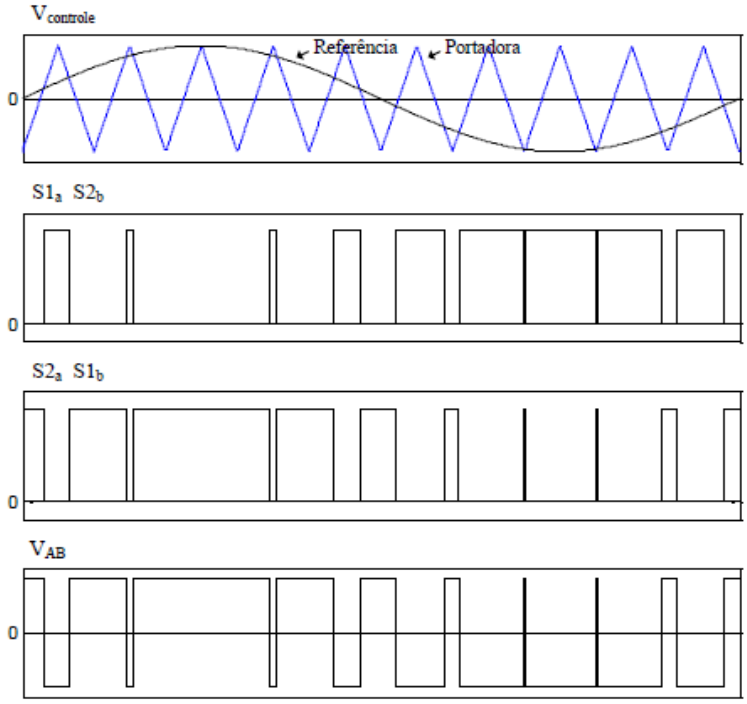
3.4.1 Modulação PWM

A modulação por largura de pulso (PWM - Pulse-Width Modulation) é uma forma de controle de tensão onde os transistores de potência são ligados ou bloqueados de modo a obter na saída o valor de tensão desejada. Está técnica de modulação compara o sinal de referência (tensão) e a portadora (triangular), a fim de se obter o sinal de controle das chaves do conversor, com frequência fixa e largura de pulso variável (11) e (12).

Os conversores PWM têm como função converter um sinal de tensão de entrada em uma tensão de saída de amplitude e frequência variáveis. Para que isso seja alcançado, o sinal de controle referência senoidal, com frequência fundamental, é comparado à forma de onda triangular portadora, que determina a frequência de chaveamento (f_s) do conversor e, geralmente, é mantida constante. Na Figura 8 podem ser vistas as formas de onda referência e portadora e a saída do conversor (3).

A modulação PWM foi implementada com dois níveis como é mostrado na Figura 8. Esta técnica tem como resultado uma tensão de saída, nos terminais do inversor, formada por uma sucessão de ondas retangulares com dois níveis de tensão (positivo e negativo), com amplitude igual a tensão do barramento CC (11).

Figura 8 – Modulação PWM implementada com 2 níveis.



Fonte: CAMPANHOL, 2012.

3.4.2 Estratégia de Controle do Filtro Ativo Paralelo

O algoritmo de controle implementado no controlador do filtro ativo paralelo determina as características de compensação do filtro ativo paralelo. Existem muitas maneiras de projetar um algoritmo de controle para a filtragem ativa. Certamente, a Teoria p-q constitui uma base muito eficiente para projetar controladores de filtros ativos.

O projeto do controlador é particularmente difícil se o filtro ativo paralelo é aplicado em sistemas de energia em que a própria tensão de alimentação já foi distorcida e/ou desequilibrado (3). As expressões gerais da teoria p-q mostram que é impossível compensar a corrente de carga e forçar a corrente compensada da fonte a satisfazer simultaneamente as três características ótimas de compensação, que são:

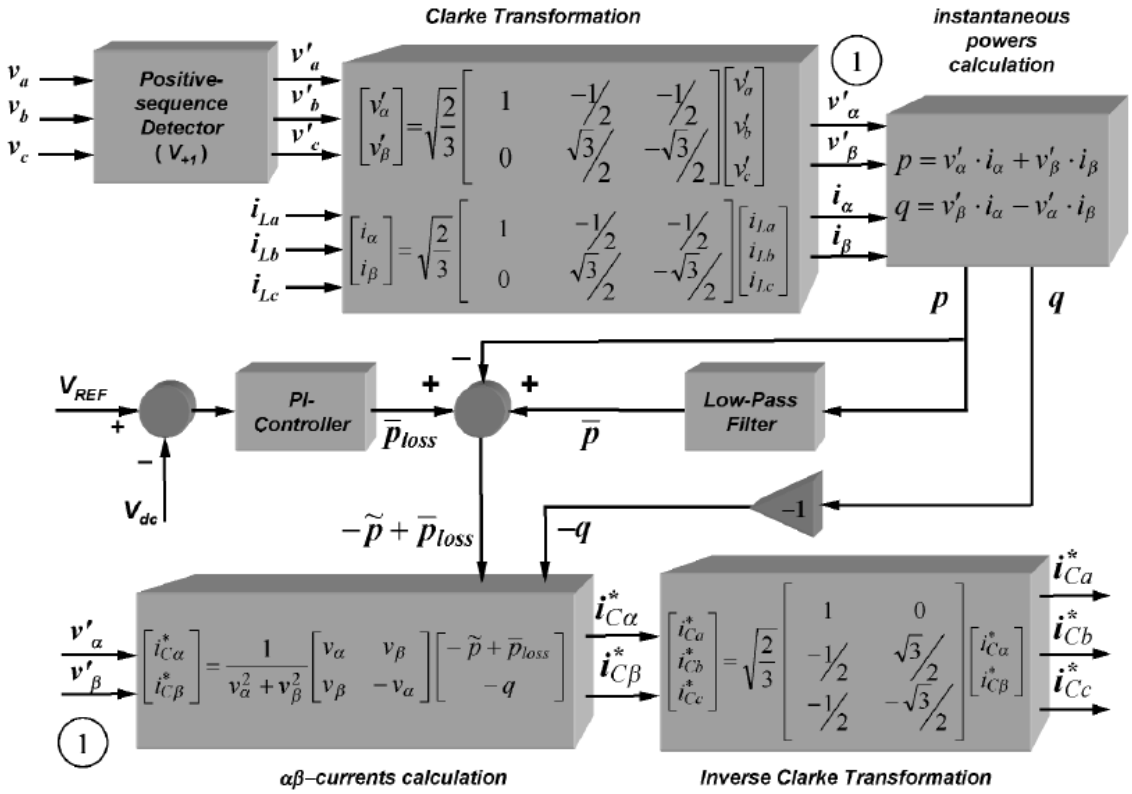
- Obter uma potência ativa instantânea constante a partir da fonte;
- Obter uma corrente senoidal a partir da fonte;

- Fazer a fonte fornecer corrente com o menor valor rms que transporte a mesma energia para a carga com o mínimo de perdas ao longo da linha de transmissão.

3.4.3 Filtros Ativos para Controle de Corrente Senoidal

Para que a corrente se torne compensada, senoidal e equilibrada, o filtro ativo deve compensar todas as componentes harmônicas e fundamentais que diferenciam da corrente fundamental de sequência positiva I_{+1}, que deve ser a única corrente a ser fornecida pela fonte. Para que seja possível detectar a componente fundamental de sequência-positiva da corrente de carga, é necessário que seja implementado um circuito detector de sequência-positiva, o qual extrai a sequência positiva das tensões fundamentais v_a, v_b e v_c, que correspondem ao fasor V_{+1} das tensões v_a, v_b e v_c. Assim, o restante do controlador do filtro ativo determina as correntes de compensação de referência como se a tensão da rede tivesse somente a componente fundamental de sequência-positiva (3). O diagrama de blocos para o controle de corrente senoidal é mostrado na Figura 9:

Figura 9 – Diagrama de blocos da estratégia para o controle de corrente senoidal.

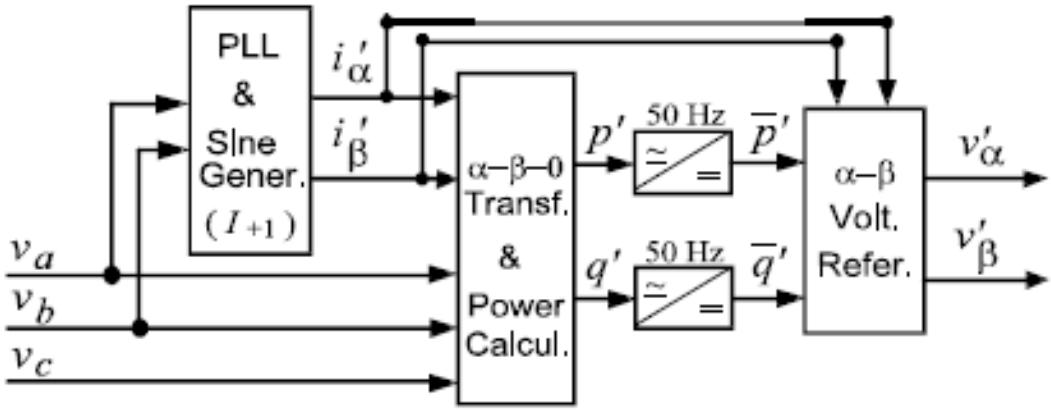


Fonte: AKAGI; WATANABE; AREDES, 2007.

3.4.4 Detector de Sequencia Positiva

Na Figura 10 é mostrado o esquema de controle do detector de sequência positiva. Sua função é extrair os valores instantâneos das componentes de sequência positiva V_{+1} das tensões v_a, v_b e v_c respectivamente, tudo isto em tempo real. Para isso, é necessário utilizar um circuito PLL ("phase-locked-loop") que é capaz de operar satisfatoriamente com tensões distorcidas e desequilibradas, permitindo-se assim trabalhar apenas com o valor correto da frequência fundamental (ω_1) da rede. A partir de ω_1 gera-se dois sinais senoidais: $i_\alpha^{'}$ e $i_\beta^{'}$. Estes sinais senoidais são as correntes auxiliares de sequência positiva na frequência fundamental da rede, já transformada para os eixos α- β (10). Na Figura 10 as tensões de saída $v_\alpha^{'}$ e $v_\beta^{'}$ são as tensões de sequência positiva na frequência fundamental da rede já transformada para os eixos α- β.

Figura 10 – Circuito detector de sequência positiva.



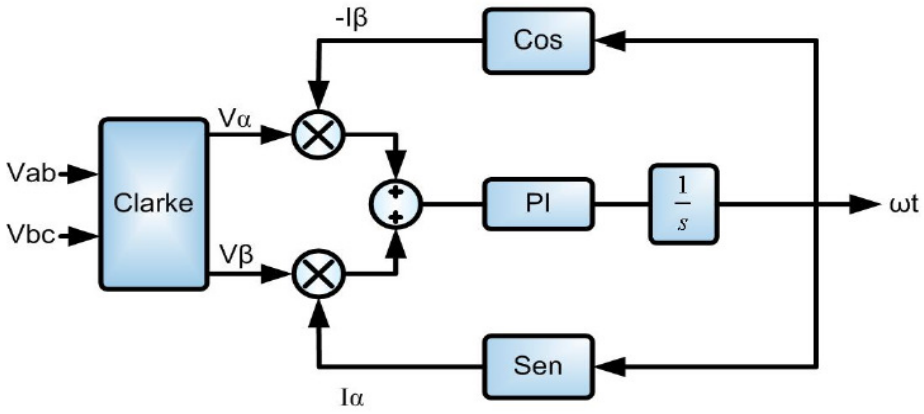
Fonte: WATANABE; AREDES, 2007.

O produto das correntes auxiliares ($i_\alpha^{'}$ e $i_\beta^{'}$) com as tensões medidas fornecem potências reais e imaginárias sem sentido físico. Assim se obtém em tempo real a componente fundamental de sequência positiva das tensões, livre de erro de fase ou amplitude. As componentes médias das potências reais $\bar{p}'$ e imaginárias $\bar{q}'$ contêm apenas a componente V_{+1} das tensões, que se deseja extrair, uma vez que, através do PLL, produziram-se correntes auxiliares na frequência fundamental e de sequência positiva.

3.4.5 Princípio de Operação do Circuito PLL

Na Figura 11 é mostrado o esquema do circuito PLL ("phase-locked-loop"). O sinal de controle deste circuito PLL é a potência imaginária instantânea, enquanto as tensões v_α e v_β contém componentes de sequência positiva e negativa (13). Os sinais de correntes auxiliares gerados pelo PLL contêm apenas a componente fundamental de sequência positiva. Com isso, a potência imaginária média em regime permanente será nula, sendo que a presença de sequência negativa e/ou componentes harmônicas nas tensões da rede irão resultar em sinais oscilantes na potência imaginária. Assim, o circuito PLL consegue rastrear continuamente a componente fundamental das tensões do sistema elétrico.

Figura 11 – Diagrama de blocos do circuito PLL baseado na teoria pq.



Fonte: ORTMANN, 2008.

3.4.6 Malha de controle de corrente do FAPP

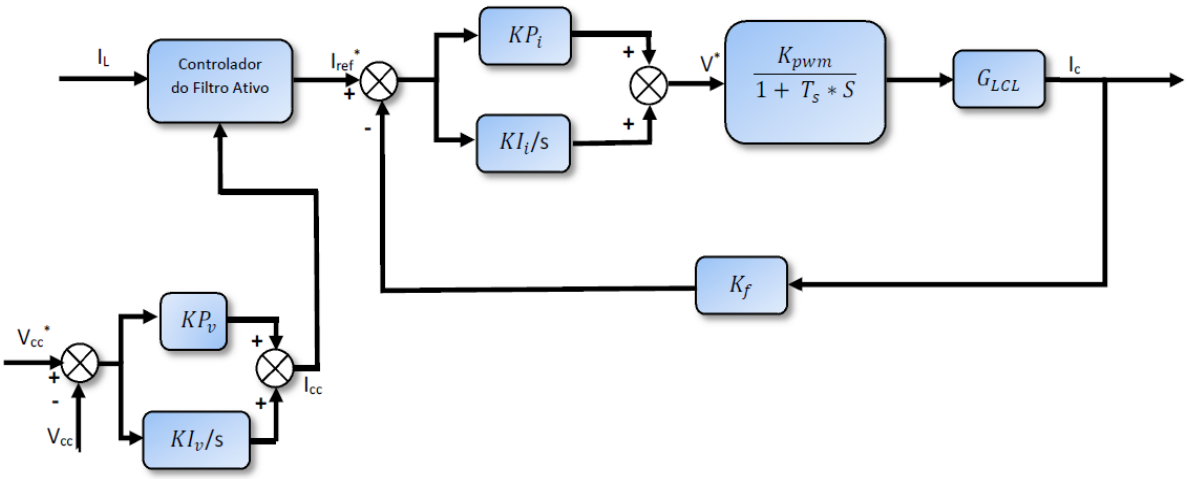
A Figura 12 mostra o diagrama de blocos da malha de controle de corrente do Filtro Ativo de Potência Paralelo. Esta malha deve garantir que a corrente a ser injetada na rede pelo Filtro Ativo de Potência Paralelo seja a mais próxima possível das correntes de referência obtidas pelo algoritmo da Teoria p-q obtida pelo controlador do Filtro Ativo (3).

O Controlador do Filtro Ativo atua detectando as correntes harmônicas da rede, para facilitar a modelagem do sistema, foi considerado que ele é um detector perfeito que detecta todas harmônicas da rede, assim pode se considerar seu valor igual à 1.

O controlador Proporcional-Integrativo (G_{pi}) é o coeficiente da parte de controle de rastreamento atual e K_f é o coeficiente de feedback que possui valor igual a 1.

O filtro LCL (G_{LCL}) é utilizado para conectar o filtro ativo à rede elétrica. O conversor PWM é modelado como um atraso e para isso utiliza-se T_s que é o período de comutação que é igual ao inverso da frequência de chaveamento do filtro e para facilitar na modelagem do sistema considera-se o ganho do inversor modulado em largura de pulsos K_{pwm} =1.

Figura 12 – Diagrama de bloco da malha de controle de corrente.



Fonte: Autoria própria.

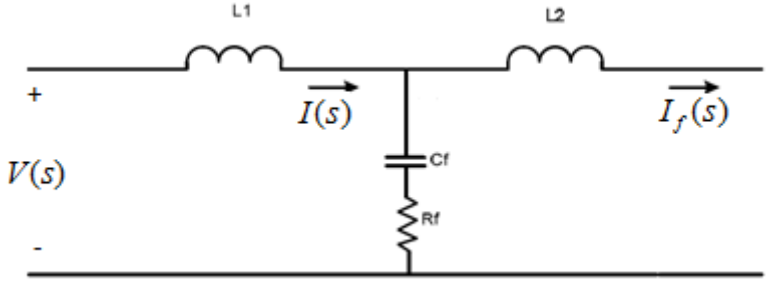
3.4.6.1 Modelagem do Filtro LCL

O filtro LCL é um filtro de terceira ordem, a partir do qual pode-se obter maiores atenuações para os harmônicos de maior ordem quando comparados com o filtro L e LC.

Como principais vantagens do filtro LCL, em comparação ao filtro L e LC, podem-se citar três características:

- Maior atenuação de harmônicos nas frequências de interesse;
- Menor circulação de energia reativa pelo sistema;
- Melhor resposta dinâmica.

Figura 13 – Topologia do filtro LCL.



Fonte: ARAÚJO, 2012.

Calculam-se as funções de transferência do filtro LCL para a faixa de frequências harmônicas da frequência de chaveamento (14, 15):

a) Função de transferência entre a corrente na rede (I_f) e a tensão no conversor(V):

$$G_{LCL}(s) = \frac{I_f(s)}{V(s)} = \frac{s.R_f.C_f + 1}{s^3.C_f.L_2.L_1 + s^2.R_f.C_f.(L_2 + L_1) + s.(L_2 + L_1)}$$ Equação 9

b) Função de transferência entre a corrente na rede (I_f) e a corrente no conversor (I).

$$\frac{I_f(s)}{I(s)} = \frac{s.R_f.C_f + 1}{s^2.C_f.L_2 + s.R_f.C_f + 1}$$ Equação 10

Em (14) encontra-se a metodologia do projeto de um filtro LCL. Para o projeto do filtro LCL, precisa-se conhecer a potência do conversor (P), a tensão nominal eficaz do filtro (e), a frequência da rede (f_{rede}), a frequência de chaveamento do conversor (f_s), o fator r (fator de atenuação, usualmente de 20%) e a corrente de ripple (adotada 5,5 %).

A capacitância do filtro LCL, não pode exceder o valor representado por:

$$C_f \leq \frac{0{,}05P}{120.\pi.f_{rede}.e^2}$$ Equação 11

O indutor L_1 foi calculado através da Equação 12:

$$L_1 = \frac{e}{2.\sqrt{6}.f_s.i_{ripple}}$$ Equação 12

No passo seguinte encontramos L_2 usando:

$$L_2 = r.L_1$$ Equação 13

Recomenda-se que a frequência de ressonância, f_{res}, mantenha-se num intervalo de frequências dada pela Equação 14:

$$10\omega_{rede} \leq \omega_{res} \leq 0.5\omega_s$$ Equação 14

Determina-se a frequência de ressonância pela Equação 15, e em seguida verifica-se se ela atende aos limites estabelecidos.

$$\omega_{res} = \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1.L_2.C_f}}$$ Equação 15

Localizando ω_{res} neste intervalo se torna mais difícil a excitação dos modos oscilatórios do filtro pela interação com os harmônicos de alta frequência gerados pelo inversor ou com os harmônicos de baixa ordem possivelmente presentes na rede (14). Na Tabela 6 obtemos os valores dos indutores e da capacitância do filtro LCL.

Tabela 6 – Parâmetros do filtro LCL.

Frequência de chaveamento (f_s)	*10000 Hz*
Frequência da rede (f_{rede})	*60 Hz*
Frequência de ressonância (f_{res})	*1702.3 Hz*
Potência ativa do conversor (P)	*2.2 KW*
Indutância L_1 do filtro LCL	*8.2 [mH]*
Indutância L_2 do filtro LCL	*1.98 [mH]*
Capacitância C_f do filtro LCL	*5.48[μF]*
Resistência R_f do filtro LCL	*200Ω*

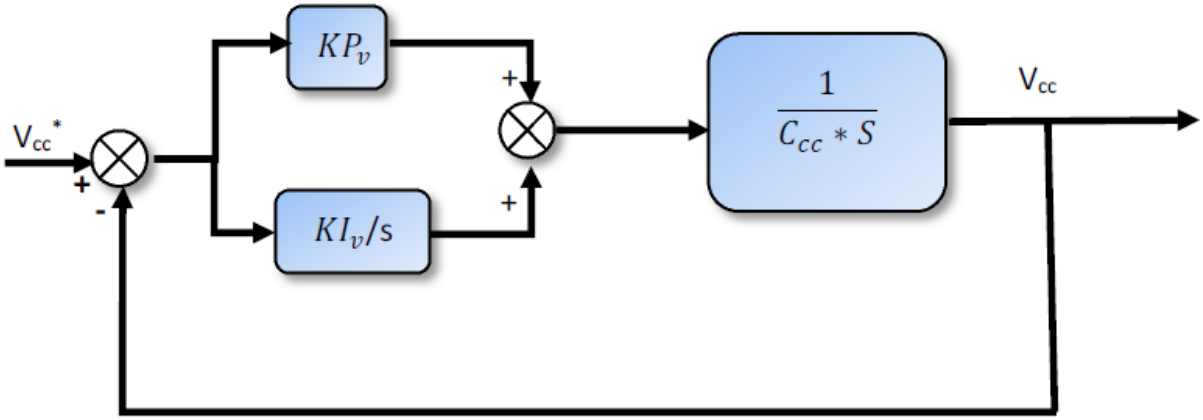
Fonte: Autoria própria.

3.4.7 Malha de controle da tensão do barramento CC do FAPP

A malha de controle de tensão atua no sentido de manter constante, e no valor de referência especificado, a tensão no barramento CC. Para que esta malha não distorça a corrente de referência da malha de corrente, a mesma deve atuar lenta e, somente, na amplitude da corrente de referência, a fim de que o FAPP seja o controlador do fluxo de potência ativa entre a rede e o barramento CC, de forma a compensar as perdas nos conversores e, por conseguinte, manter constante a tensão no barramento (11).

Assim a Figura 14 mostra o diagrama em blocos que representa a malha de tensão do barramento CC do FAPP.

Figura 14 – Diagrama de bloco da malha de controle do barramento CC.



Fonte: Autoria própria.

Considerando que a malha de corrente é rápida quando comparada com a malha de tensão, e para facilitar o modelamento, adotou-se o ganho da malha de corrente igual a 1 para o projeto da malha de tensão.

4 PROJETO DOS CONTROLADORES PI

Neste capítulo, é apresentada a metodologia utilizada para projetar os controladores PI (Proporcional-Integral). Também é apresentado o dimensionamento dos controladores que poderão ser utilizados nas malhas de corrente e tensão do Filtro Ativo de Potência Paralelo.

A metodologia empregada no projeto dos controladores citados pode ser dividida em três etapas, as quais são apresentadas a seguir:

- 1ª etapa – Calcular o ângulo de fase desejado para a frequência de cruzamento pré-determinada usando a função de transferência da planta sem considerar o PI;
- 2ª etapa – Colocar um compensador de fase em série com a planta, para ajustar o ângulo de fase do sistema compensado, em malha aberta, para uma margem de fase desejada que obedeça aos limites pré-estabelecidos;
- 3ª etapa – Colocar um ganho em série com o sistema já compensado, de modo que o módulo do sistema compensado em malha aberta cruze 0dB na frequência de cruzamento especificada.

Assim, serão determinados os possíveis controladores PI, a serem utilizados nas malhas de corrente e de tensão do Filtro Ativo de Potência Paralelo (11).

4.1 Metodologia de projeto do Controlador PI

Na primeira etapa para projetar o controlador PI, considera-se a função de transferência do sistema $G_p(s)$ da malha de corrente, como sendo o ganho do modulador PWM (G_{pwm}) em série com a função do sistema físico (G_{LCL}), como mostra a Equação 16.

$$G_p(s) = \left(\frac{1}{T_s.s+1}\right) * \left(\frac{s.R_f.C_f + 1}{s^3.C_f.L_2.L_1 + s^2.R_f.C_f.(L_2+L_1) + s.(L_2+L_1)}\right) \qquad \text{Equação 16}$$

O ângulo de fase desta planta (φ_p) mostrado na Equação 17, pode ser obtida em uma dada frequência de cruzamento ω_c pré-determinada.

$$\varphi_p = \angle G_p(j\omega)\Big|_{\omega=\omega_c}$$ Equação 17

Depois, deve-se substituir s por $j\omega_c$ e podemos escrever a Equação 18.

$$G_p(j\omega_c) = \left(\frac{1}{T_s.j\omega_c + 1}\right) * \left(\frac{j\omega_c.R_f.C_f + 1}{(j\omega_c)^3.C_f.L_2.L_1 + (j\omega_c)^2.R_f.C_f.(L_2 + L_1) + j\omega_c.(L_2 + L_1)}\right)$$ Equação 18

A equação Equação 18 pode ser separada em parte real e parte imaginária, sendo assim é possível escrever a Equação 19:

$$tg(\varphi_p) = \frac{imag(G_p(j\omega_c))}{real(G_p(j\omega_c))}$$ Equação 19

Manipulando a equação Equação 19 obtém-se a equação de cálculo do ângulo de fase da planta (φ_p) na frequência de cruzamento pré-determinada (ω_c), sendo esta dada pela Equação 20:

$$\varphi_p = tg^{-1}\left(\frac{imag(G_p(j\omega_c))}{real(G_p(j\omega_c))}\right)$$ Equação 20

Encontrado o ângulo de fase da planta φ_p inicia-se a Segunda Etapa. Coloca-se um compensador de fase em série com a planta, para que o sistema compensado apresente, em malha aberta, ângulo de fase em ω_c de acordo com a margem de fase desejada (MF_d). Para isto, considera-se a função de transferência $C(s)$ dada pela Equação 21:

$$C(s) = \left(\frac{D.s + 1}{s}\right)$$ Equação 21

Assim, substituindo s por $j\omega_c$, Equação 22:

$$C(j\omega_c) = \left(\frac{D.j\omega_c + 1}{j\omega_c}\right)$$ Equação 22

Fazendo algumas manipulações matemáticas, obtemos a Equação 23:

$$C(j\omega_c) = D - \frac{j}{\omega_c} \qquad \text{Equação 23}$$

E pela Equação 24 podemos determinar a constante D.

$$D = \frac{-1}{tg(\varphi_c)\,\omega_c} \qquad \text{Equação 24}$$

Onde:

$$\varphi_c = MF_d - (\varphi_p + 180^{\circ}) \qquad \text{Equação 25}$$

A Estabilidade, quanto o amortecimento do sistema, está relacionada com a margem de fase MF_d; ou seja, maior MF_d, mais amortecido será o sistema. Para sistemas chaveados, a margem de fase deve ficar entre 45º e 90º (16, 17).

O tempo de resposta do sistema é dependente da frequência de cruzamento ω_c. Para que o tempo de resposta seja menor, maior será ω_c. A limitação de ω_c está justamente na frequência de chaveamento para que as ondulações introduzidas pelo chaveamento não interfiram no controle, portanto é recomendado que ω_c fique entre um quarto e um dezesseis avos da frequência de chaveamento (18).

Quando coloca-se a função de transferência $C(s)$ em série com a função de transferência da planta $G_p(s)$, obtém-se a função de transferência em malha aberta do sistema compensado ($G_{MAC}(s)$), conforme mostra a Equação 26:

$$G_{MAC}(s) = \left(\left(\frac{1}{T_s.s+1}\right) * \left(\frac{s.R_f.C_f + 1}{s^3.C_f.L_2.L_1 + s^2.R_f.C_f.(L_2+L_1) + s.(L_2+L_1)}\right)\right) * \left(\frac{D.s+1}{s}\right) \qquad \text{Equação 26}$$

Após obter a função de transferência ($G_{MAC}(s)$), inicia-se a Terceira Etapa da metodologia de projeto do controlador PI.

Para manter a margem de fase desejada MF_d, deve-se encontrar o valor do ganho a ser aplicado no sistema compensado, para que a curva de magnitude deste cruze a linha 0dB na frequência ω_c. Assim, substitui-se s por $j\omega_c$ na Equação 26 e calculou-se o módulo desta função.

$$\left|G_{MAC}(j\omega_c)\right| = \left|\left(\left(\frac{1}{T_s.j\omega_c+1}\right)*\left(\frac{j\omega_c.R_f.C_f+1}{(j\omega_c)^3.C_f.L_2.L_1+(j\omega_c)^2.R_f.C_f.(L_2+L_1)+j\omega_c.(L_2+L_1)}\right)\right)*\left(\frac{D.j\omega_c+1}{j\omega_c}\right)\right| \qquad \text{Equação 27}$$

Após cálculo do módulo de G_{MAC}, podemos obter o valor do ganho a ser aplicado neste sistema (K_c), através da Equação 28:

$$K_c = 10\left(\frac{K_{cdB}}{20}\right) = \frac{1}{\left|G_{MAC}\right|} \qquad \text{Equação 28}$$

Assim, a função de transferência do controlador PI ($G_{pI}(s)$) é dada pela Equação 29:

$$G_{pI}(s) = \left(\frac{Kc.D.s+Kc}{s}\right) = \left(\frac{KP.s+KI}{s}\right) \qquad \text{Equação 29}$$

Portanto, os ganhos KP e KI são dados pela Equação 30:

$$KP = Kc.D \qquad\qquad KI = Kc \qquad \text{Equação 30}$$

4.1.1 Projeto do controlador PI da malha de corrente do FAPP

A Tabela 7 mostra as especificações adotadas para projeto do controlador PI, utilizado no controle da malha de corrente.

Tabela 7 – Parâmetros da malha de corrente.

Frequência de chaveamento (f_s)	*10000 Hz*
Período de chaveamento (T_s)	*0.0001 s*
Margem de fase desejada (MF_d)	*65º*
Frequência de cruzamento desejada (ω_c)	$\omega_c = (2 * \pi * f_s)/16$
Indutância L_1 do filtro LCL	*8.2 [mH]*
Indutância L_2 do filtro LCL	*1.98 [mH]*
Capacitância C_f do filtro LCL	*5.48[μF]*
Resistência R_f do filtro LCL	*200Ω*
Ganho do modulador PWM (K_{pwm})	*1*
Tensão no Barramento CC (V_{CC}^*)	*500 V*
Capacitância Ccc do Barramento CC (C_{cc})	*615[μF]*

Fonte: Autoria própria.

Será seguido os três passos descritos anteriormente para projetar o ganho proporcional e integral para que o sistema mais o controlador atenda aos parâmetros especificados para projeto do controlador.

$$G_p(j\omega_c) = -0.0092 - j0.0216 \qquad \text{Equação 31}$$

Para a planta do sistema da malha de corrente sem o controlador PI têm-se o ângulo de fase da planta (φ_p) na frequência ω_c, conforme Equação 32:

$$\varphi_p = tg^{-1}\left(\frac{-0.0216}{-0.0092}\right) = 66.88º \qquad \text{Equação 32}$$

Conhecido φ_p e especificado a MF_d, determina-se o ângulo de fase da função $C(s)$, e a constante D, conforme está mostrado pela Equação 33 e pela Equação 34:

$$\varphi_c = 65º - (66.88º + 180º) = -181.88º \qquad \text{Equação 33}$$

$$D = \frac{-1}{tg(\varphi_c) * \omega_c} = 0.0078 \qquad \text{Equação 34}$$

A partir do valor da constante D, são obtidas as funções $C(s)$ e $G_{MAC}(s)$. Após obtermos $G_{MAC}(s)$, deve-se calcular seu respectivo valor de módulo e com este valor de módulo, determina-se o ganho K_c, conforme mostra na Equação 35 e Equação 36.

$$|G_{MAC}(j\omega_c)| = 1.8216 * 10^{-4} \qquad \text{Equação 35}$$

$$K_c = \frac{1}{|G_{MAC}(j\omega_c)|} = 5.5 * 10^3 \qquad \text{Equação 36}$$

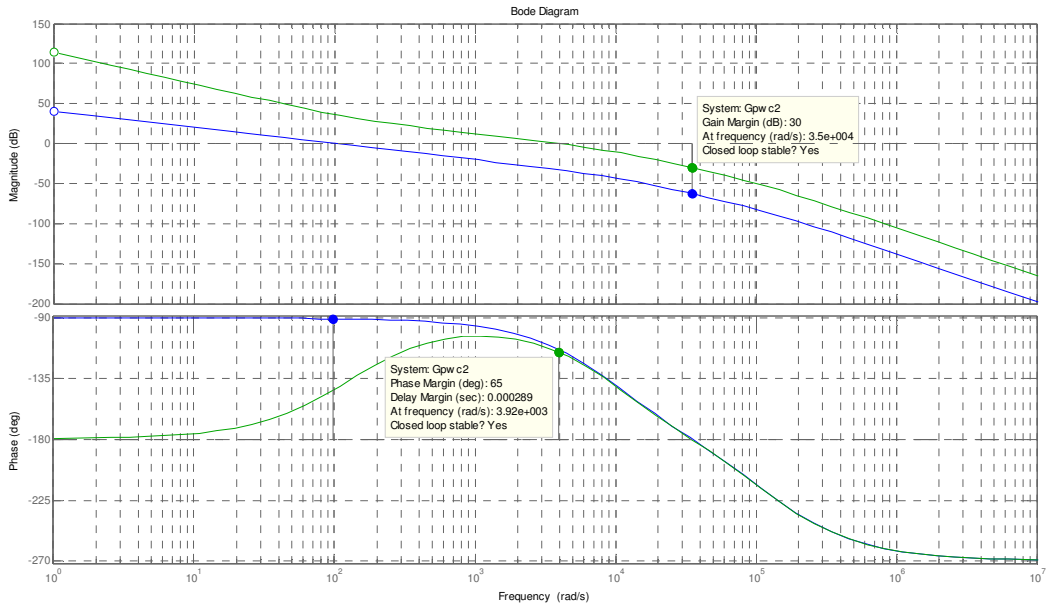
Com o valor de K_c e da constante D, obtêm-se os valores de KP_i e KI_i conforme mostrado nas Equação 37 e Equação 38:

$$KP_i = K_C * D = 42.6\Omega \qquad \text{Equação 37}$$

$$KI_i = K_C = 5.5 * 10^3 \Omega / s \qquad \text{Equação 38}$$

A Figura 15 mostra a resposta em frequência de $G_p(s)$ e $G_{MApi}(s)$ para o sistema compensado pelo controlador PI projetado. Portanto, o sistema compensado $G_{MApi}(s)$ apresenta 65º de margem de fase na frequência de 3920 rad/s, comprovando que o controlador PI projetado atende as especificações desejadas.

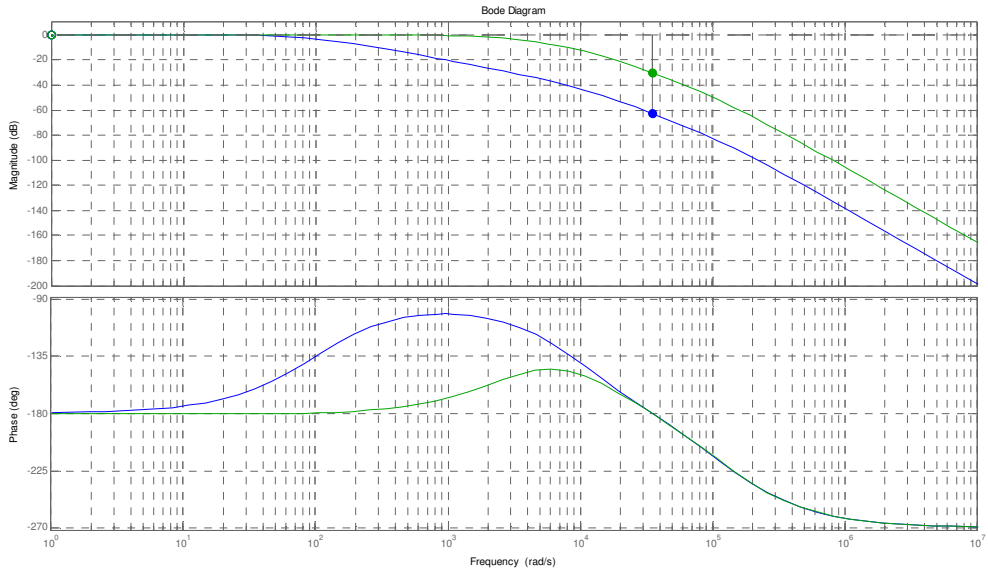
Figura 15 – Resposta em frequência das funções $G_p(s)$ (azul) e $G_{MApi}(s)$ (verde).



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 16 está a resposta em frequência do sistema em malha fechada, pode ser observado que o ganho se mantem em 0 dB. Verifica-se também que a faixa de passagem deste sistema é de aproximadamente 1900 Hz.

Figura 16 – Resposta em frequência (em malha fechada) da malha de corrente com controlador PI (em verde).



Fonte: Autoria própria.

4.1.2 Projeto do controlador PI da malha de tensão do barramento CC do FAPP

O procedimento adotado para o projeto do controlador PI, utilizado na malha de tensão do barramento CC, é o mesmo utilizado no projeto do PI da malha de corrente. O que difere é a função de transferência da planta do barramento CC.

A Tabela 8 mostra as especificações adotadas para projeto deste controlador. Verifica-se que a frequência de ondulação da tensão do barramento CC (f_0) é especificada em 120 Hz (11).

Tabela 8 – Parâmetros da malha de tensão do barramento CC.

Frequência de ondulação do barramento CC (f_0)	*120 Hz*
Margem de fase desejada (MF_d)	*75º*
Frequência de cruzamento desejada (ω_c)	$\omega_c = (2 * \pi * f_0)/4$
Capacitância do Barramento CC (C_{cc})	*615[μF]*
Tensão no Barramento CC (V_{CC}^*)	*500 V*

Fonte: Autoria própria.

Utilizando as especificações de projeto apresentadas na Tabela 8, para a função de transferência da planta de tensão do barramento CC ($G_{pcc}(s)$) obtêm-se o ângulo de fase desta planta na frequência ω_c, sendo:

$$\varphi_{pcc} = -90º \qquad \text{Equação 39}$$

Conhecido φ_{pcc} e especificado a MF_d, determina-se o ângulo de fase da função $C_{cc}(s)$, e a constante D, conforme a Equação 40 e Equação 41:

$$\varphi_{Ccc} = MF_d - (\varphi_{pcc} + 180º) = -15º \qquad \text{Equação 40}$$

$$D = \frac{-1}{tg(\varphi_{Ccc}) * \omega_c} = 0.0198 \qquad \text{Equação 41}$$

A partir do valor da constante D, são obtidas as funções $C_{cc}(s)$ e $G_{MAC}(s)$. Após obtermos $G_{MAC}(s)$, deve-se calcular seu respectivo valor de módulo e com este valor de módulo, determina-se o ganho K_c.

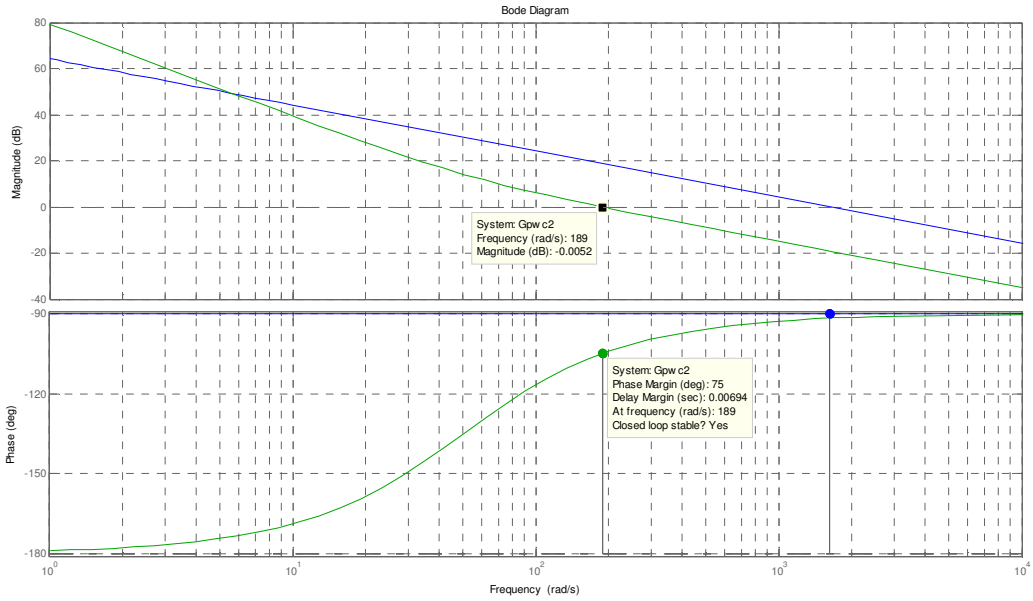
Com o valor de K_c e da constante D, obtêm-se os valores de KP_v e KI_v conforme mostrado abaixo:

$$KP_v = 11.20\Omega \qquad \text{Equação 42}$$

$$KI_v = 565.5\Omega / s \qquad \text{Equação 41}$$

A Figura 17 mostra a resposta em frequência de $G_{pcc}(s)$ e $G_{MApicc}(s)$ para o sistema compensado pelo controlador PI projetado. Pode-se observar que o sistema compensado $G_{MApicc}(s)$ apresenta 75º de margem de fase na frequência de 188 rad/s, comprovando que controlador PI projetado atende as especificações desejadas.

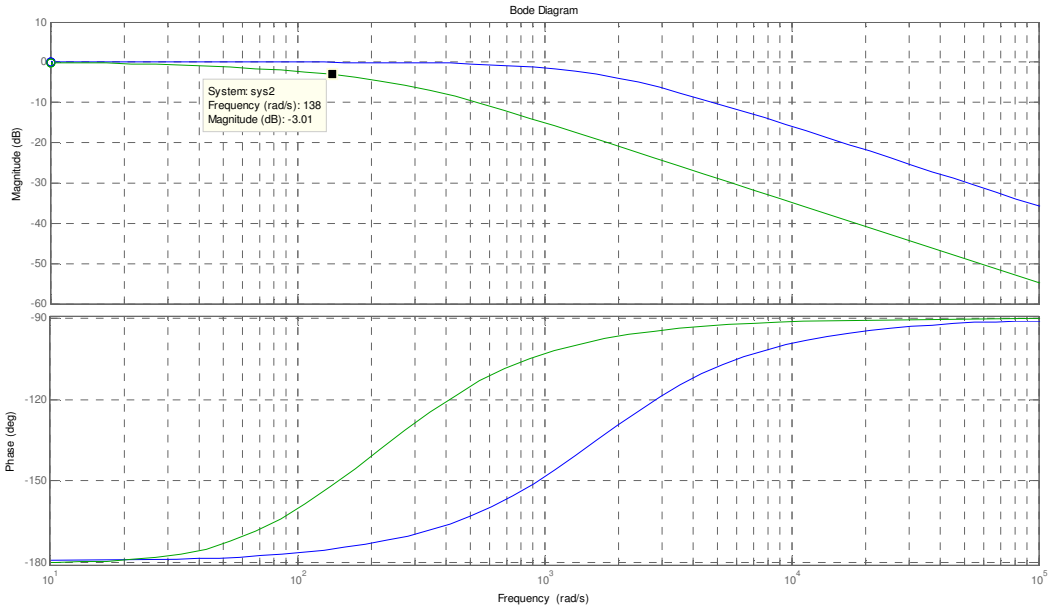
Figura 17 - Resposta em frequência das funções $G_{pcc}(s)$ (azul) e $G_{MApicc}(s)$ (verde).



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 18 está a resposta em frequência do sistema em malha fechada, pode ser observado que o ganho se mantem em 0 dB e verifica-se que a faixa de passagem deste sistema é de aproximadamente 22 Hz.

Figura 18 - Resposta em frequência (em malha fechada) da malha de tensão do barramento CC com controlador PI (em verde).

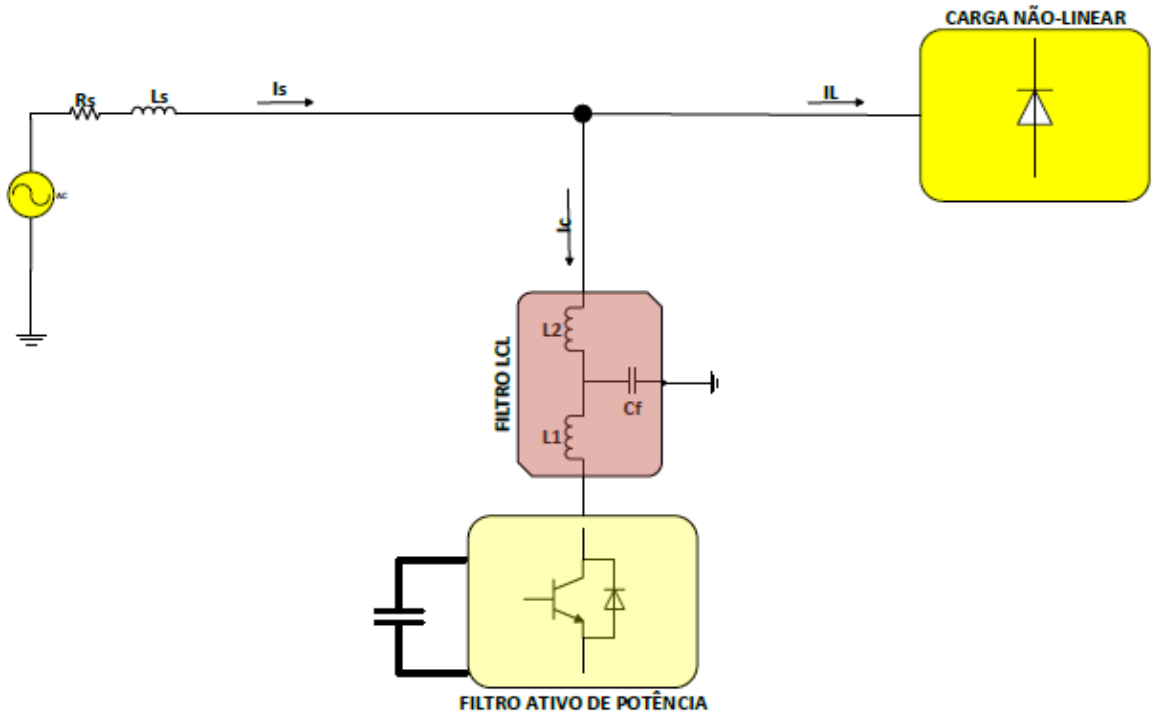


Fonte: Autoria própria.

5 SIMULAÇÕES DO FAPP

As simulações que serão apresentadas na sequência foram feitas através do programa de simulação de circuitos eletrônicos PSCAD/EMTDC. Nelas, o filtro ativo de potência paralelo trifásico a três fios atua na compensação de harmônicos e reativos gerados por cargas não lineares como mostrado no sistema da Figura 19.

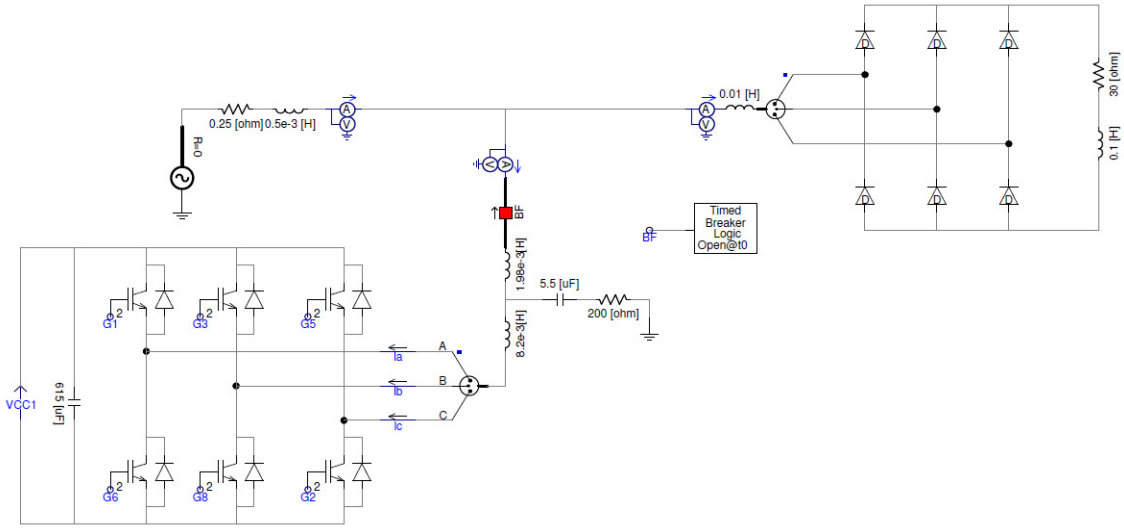
Figura 19 – Esquema completo do sistema com Carga Não-Linear.



Fonte: Autoria própria.

Em uma primeira análise em regime permanente, foi considerado como carga não linear um retificador trifásico em ponte completa alimentando uma carga RL com fator de potência próximo à 0.90. A Figura 20 apresenta o sistema simulado e modelado no programa de simulação de circuitos eletrônicos PSCAD/EMTDC para se comprovar o uso da teoria p-q e demonstrar a utilidade e a eficiência de se projetar os controladores PI's das malhas de corrente e malha de tensão do FAPP, sendo que estes geralmente são encontrados pelo método de tentativa e erro.

Figura 20 – Sistema simulado no PSCAD com Retificador Trifásico em Ponte Completa.

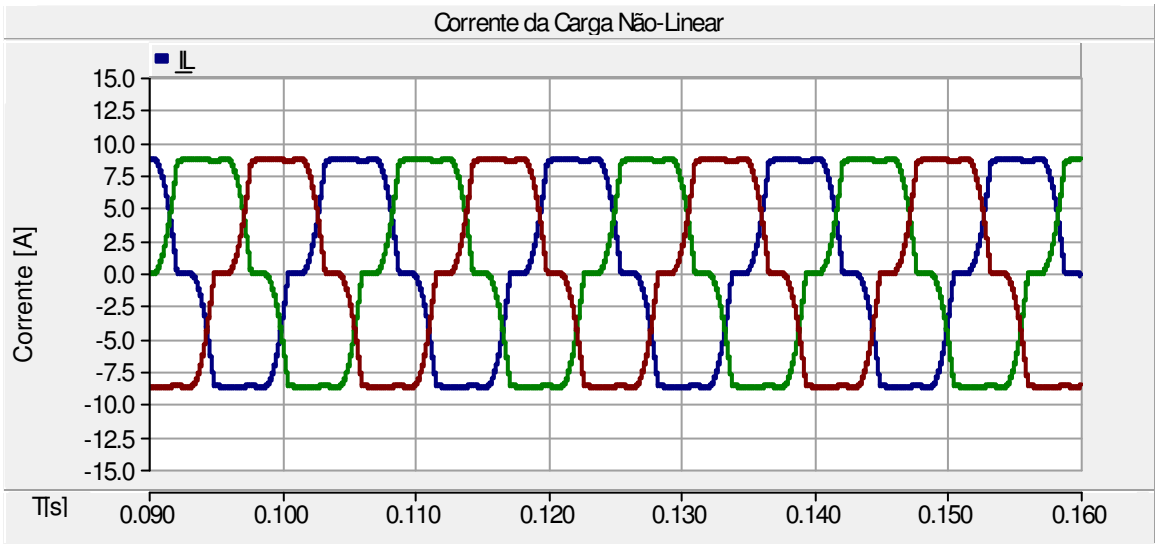


Fonte: Autoria própria.

5.1 Simulações do Sistema proposto sem a Atuação do FAPP

Primeiramente foram feitas simulações onde o FAPP não atua sobre o sistema. A corrente da carga I_L é apresentada na Figura 21 e a corrente drenada da rede I_S é mostrada na Figura 22. A a tensão da rede V_S que está apresentada na Figura 23 e as harmônicas na corrente da rede são mostradas na Figura 24. A Figura 21 mostra a corrente da carga bem distorcida ficando evidente a presença de harmônicas.

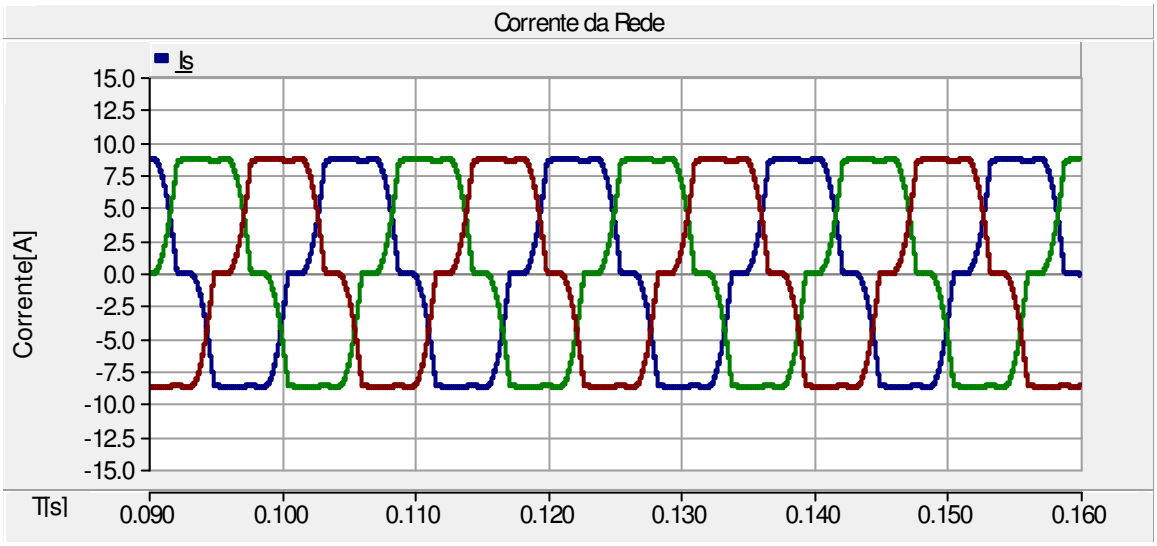
Figura 21 - Correntes da Carga Não-Linear.



Fonte: Autoria própria.

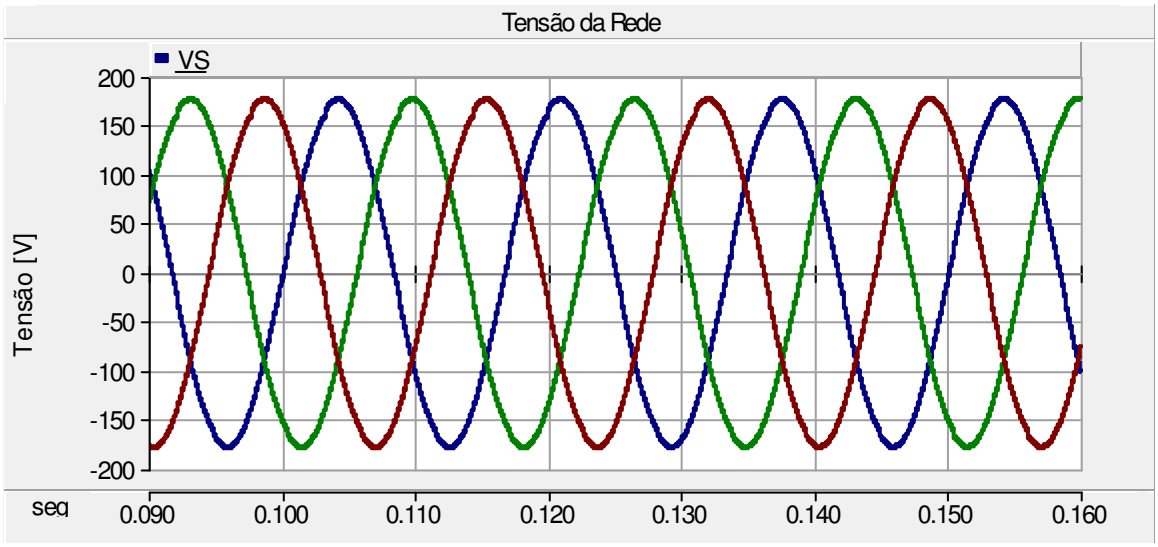
A Figura 22 mostra a corrente drenada da rede, sua forma de onda é idêntica a dá corrente de carga. Assim, conclui-se que a corrente de carga está injetando harmônicas na rede.

Figura 22 - Corrente drenada na rede sem atuação do FAPP.



Fonte: Autoria própria.

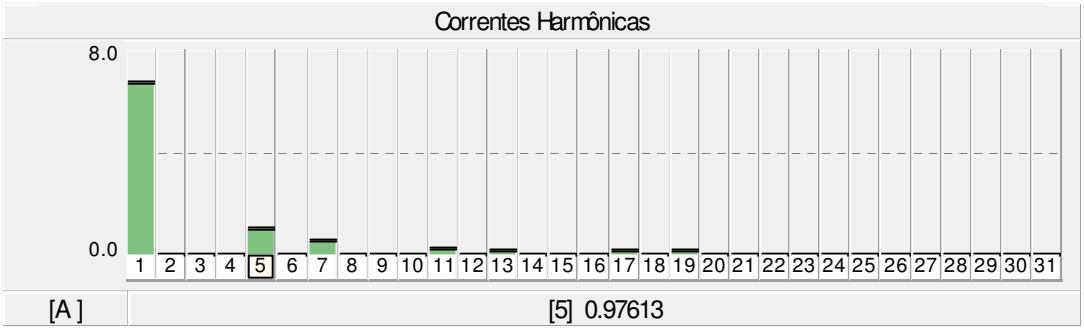
Figura 23 - Tensão da rede.



Fonte: Autoria própria.

Com o resultado obtido na Figura 24 percebe-se então a influência sobre a corrente da rede das harmônicas de 5º, 7º, 11º, 13º, 17º e 19º ordem.

Figura 24 - Harmônicas na Corrente da rede sem atuação do FAPP.

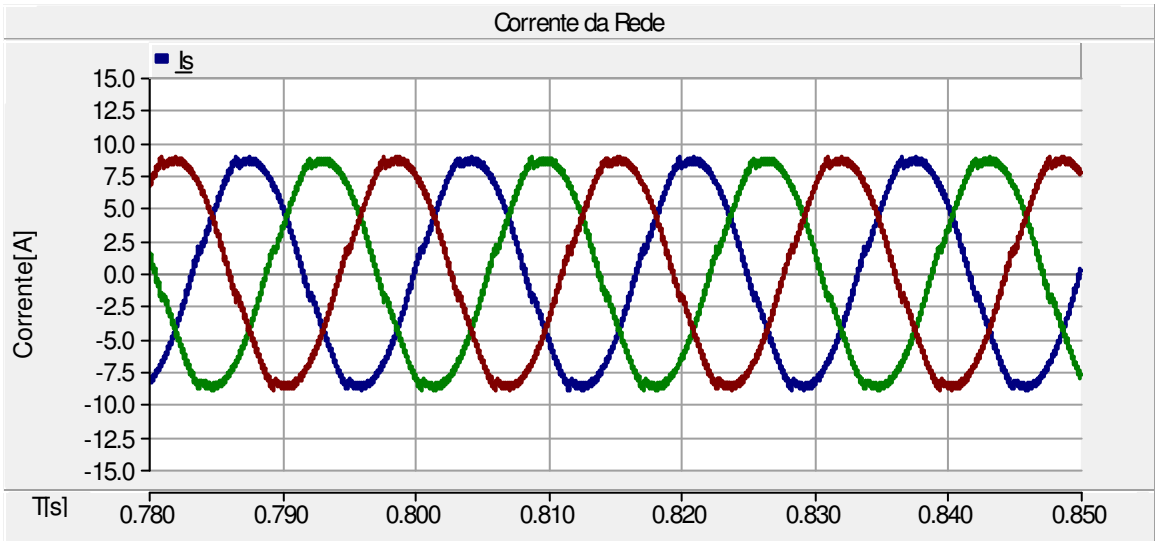


Fonte: Autoria própria.

5.2 Simulações do Sistema proposto após atuação do FAPP

A corrente da rede I_S após a atuação do filtro ativo é mostrada na Figura 25, e percebe-se que a corrente é quase senoidal, isto devido ao algum resquício de harmônicas circulando na corrente da rede mesmo após a atuação do filtro ativo.

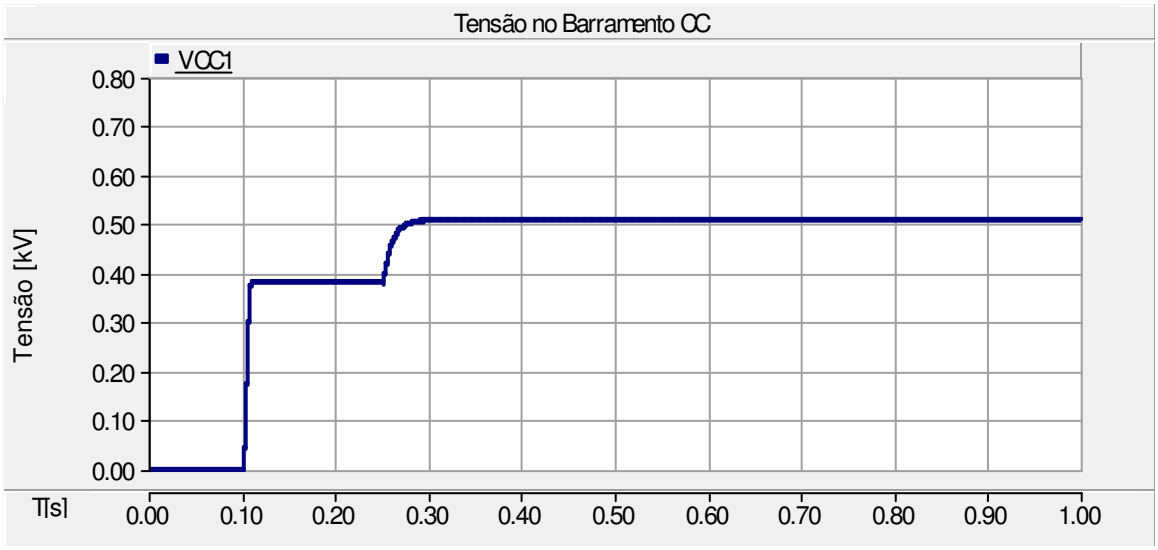
Figura 25 - Corrente drenada pela rede compensada pela atuação do FAPP.



Fonte: Autoria própria.

A tensão de carregamento do barramento CC (V_{cc}) é mantida em 500V na Figura 26, funcionando da maneira para que foi projetada. Assim, percebe-se que o capacitor do barramento CC é pré-carregado até 0.25 segundos, ou seja, antes da atuação do filtro e após 0.25 segundos que é quando o filtro ativo começa a atuar o mesmo se estabiliza próximo à 500V, fazendo com que ele se comporte como mostrado na Figura 26.

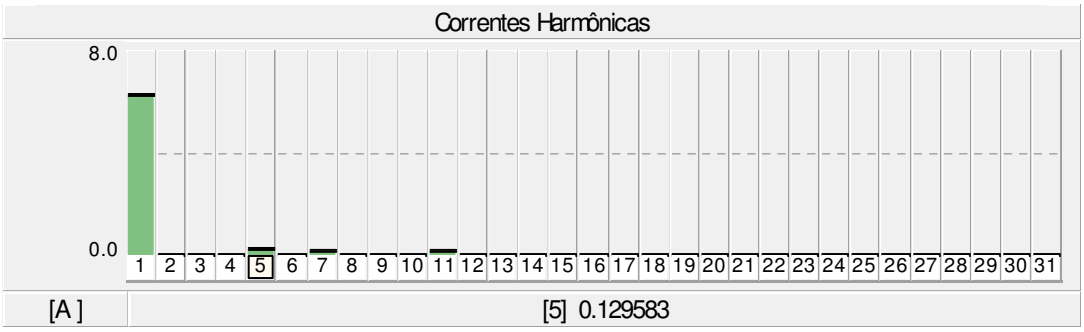
Figura 26 - Carregamento da tensão no Barramento CC.



Fonte: Autoria própria.

As harmônicas na corrente da rede após a atuação do filtro ativo de potência são mostradas na Figura 27, percebe-se que existe apenas uma pequena influência das harmônicas de 5º, 7º e 11º ordem sobre a corrente da rede. Assim, conclui-se que o projeto do filtro ativo de potência consegue reduzir a harmônicas da rede satisfatoriamente.

Figura 27 - Harmônicas drenada da rede após a atuação do FAPP.



Fonte: Autoria própria.

O filtro ativo, bem como sua malha de corrente e a malha de tensão do barramento CC foram projetados como mostrado no capítulo 4. Os ganhos dos controladores PI's mostrados na Tabela 9, foram projetados em função dos elementos do filtro ativo para podermos obter um equacionamento das malhas. e a Figura 29 mostra a compensação de reativos da rede.

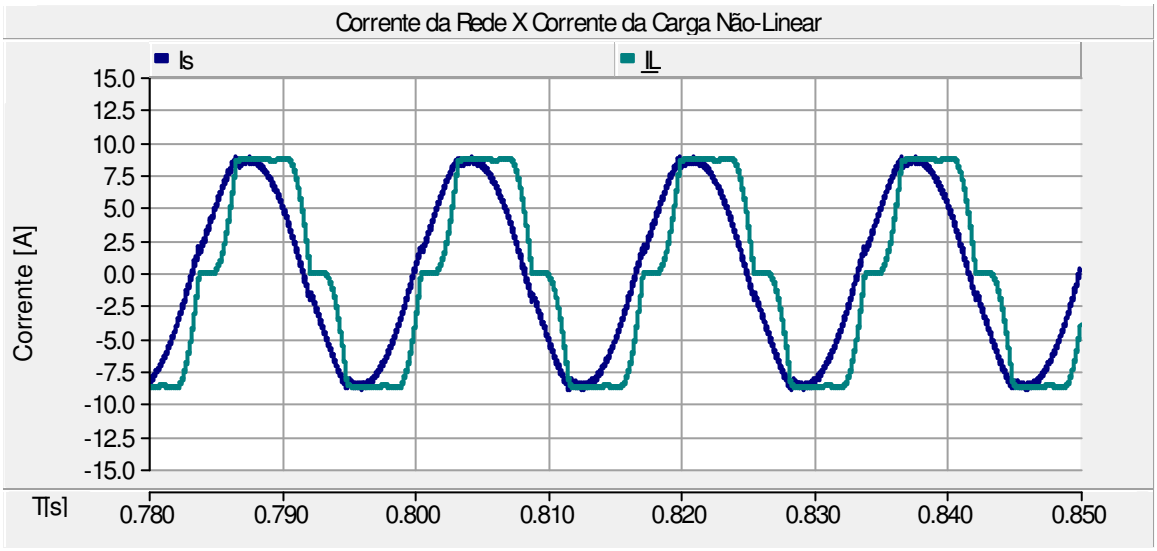
Tabela 9 - Dados de Projeto.

KP_i *da malha de corrente*	*42.6*
KI_i *da malha de corrente*	$5.5*10^3$
KP_v *da malha de tensão*	*11.20*
KI_v *da malha de tensão*	*565.55*
Indutância L_1 *do filtro LCL*	*8.2 [mH]*
Indutância L_2 *do filtro LCL*	*1.98 [mH]*
Capacitância C_f *do filtro LCL*	*5.48[μF]*

Fonte: Autoria própria.

A Figura 28 mostra como a corrente da rede se comporta quando o filtro ativo está atuando em relação a corrente da carga não-linear. Assim, pode-se ver que a corrente da rede se torna completamente senoidal enquanto a corrente da carga continua sob a influência de harmônicas. Desta maneira, o filtro ativo atua evitando que as harmônicas da corrente da carga influência a corrente da rede.

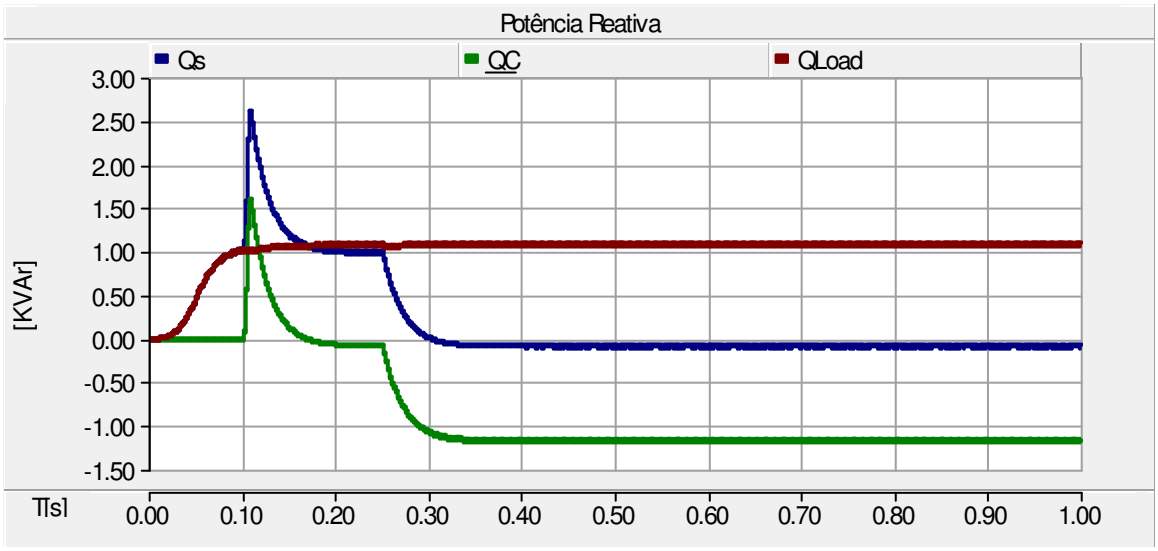
Figura 28 - Corrente drenada da rede x Corrente da Carga Não-Linear após a atuação do FAPP.



Fonte: Autoria própria.

Após a atuação do filtro ativo no sistema foi compensado a potência reativa excedente da rede como mostrado na Figura 29, e o fator de potência da rede foi melhorado obtendo valor próximo à 0.999.

Figura 29 - Potência Reativa Compensada pelo FAPP.

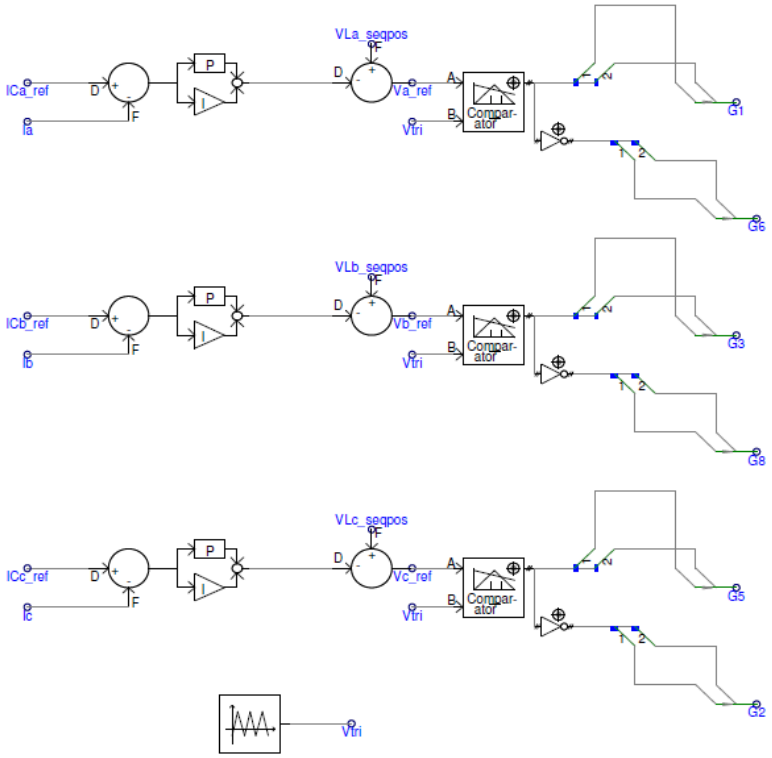


Fonte: Autoria própria.

O filtro ativo de potência projetado neste trabalho começa a atuar após 0.25 segundos e percebe-se que os resultados são satisfatórios, pois a maior parte das correntes harmônicas drenadas da rede foi minimizada.

A Figura 30 mostra o sistema da malha de controle de corrente de frequência fixa modelado no programa de simulação de circuitos eletrônicos PSCAD/EMTDC.

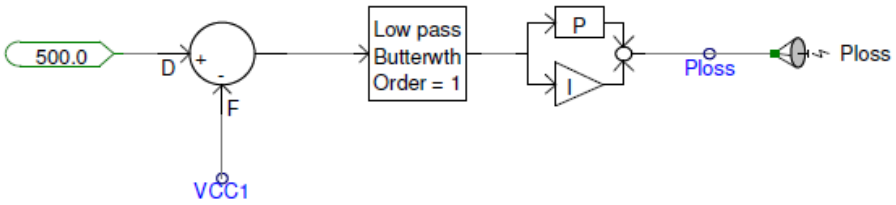
Figura 30 - Malha de Corrente do FAPP.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 31 mostra como foi modelada no programa de simulação de circuitos eletrônicos PSCAD/EMTDC a malha de controle de tensão no barramento CC. A malha de controle de tensão atua no sentido de manter constante, e no valor de referência de 500V, a tensão no barramento CC.

Figura 31 - Malha de Tensão do Barramento CC.

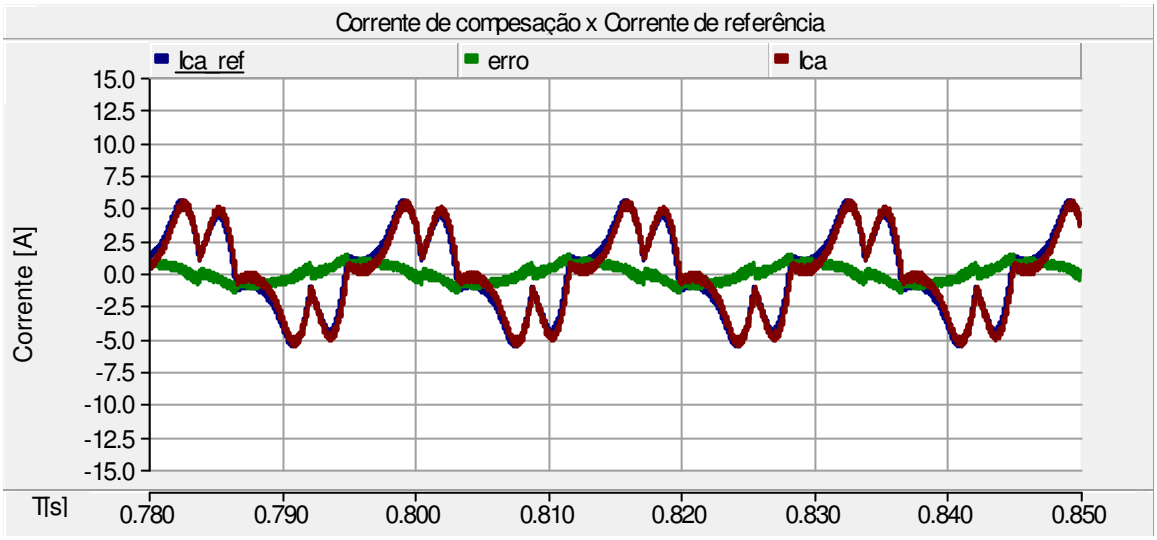


Fonte: Autoria própria.

O erro entre a corrente de compensação de referência (calculada pela teoria p-q) e a corrente de compensação na saída do filtro é mostrado na Figura 32, pode-se observar que o filtro está

chaveando a corrente de forma adequada. A tensão obtida no detector de sequência positiva é somada ao sinal de saída, então, o resultado é comparado com a onda triangular de frequência fixa V_{tri}. O sinal de *feed-forward* será a tensão da carga não-linear da saída do detector de sequência positiva.

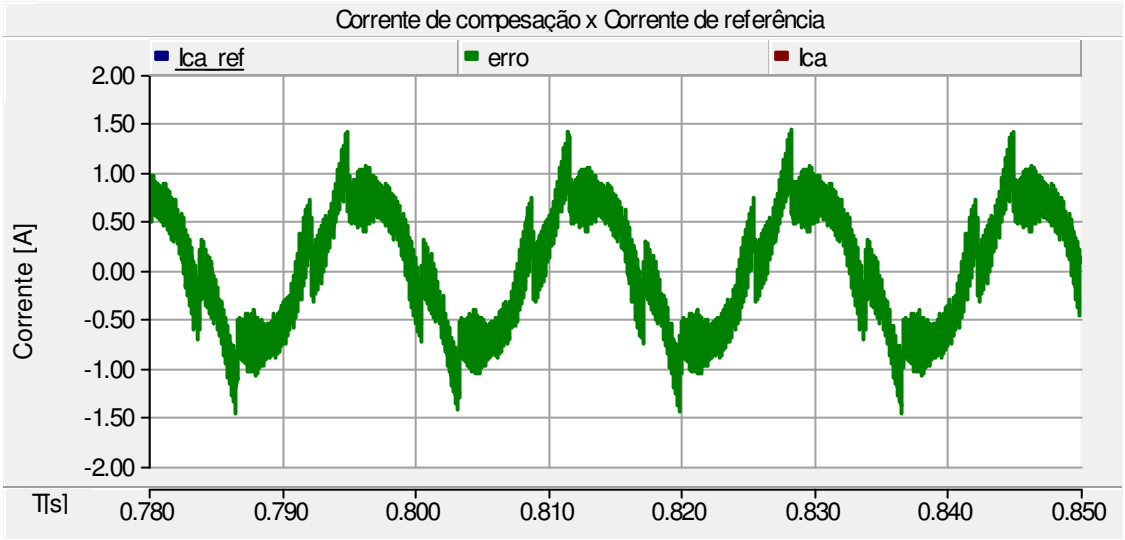
Figura 32 - Erro da realimentação da Malha de Corrente.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 33 mostra um zoom do erro entre a corrente de compensação de referência (calculada pela teoria p-q) e a corrente de compensação na saída do filtro.

Figura 33 - Zoom no Erro da realimentação da Malha de Corrente.



Fonte: Autoria própria.

5.3 Simulações do Sistema Proposto com os valores dos PI's da Malha De Corrente e da Malha De Tensão fora dos valores projetados

Para mostrar que o projeto dos ganhos dos controladores PI das malhas tem grande influência no comportamento do filtro ativo, foi modificado o valor dos ganhos dos controladores PI de acordo com a Tabela 10 e verificou-se o comportamento do filtro ativo.

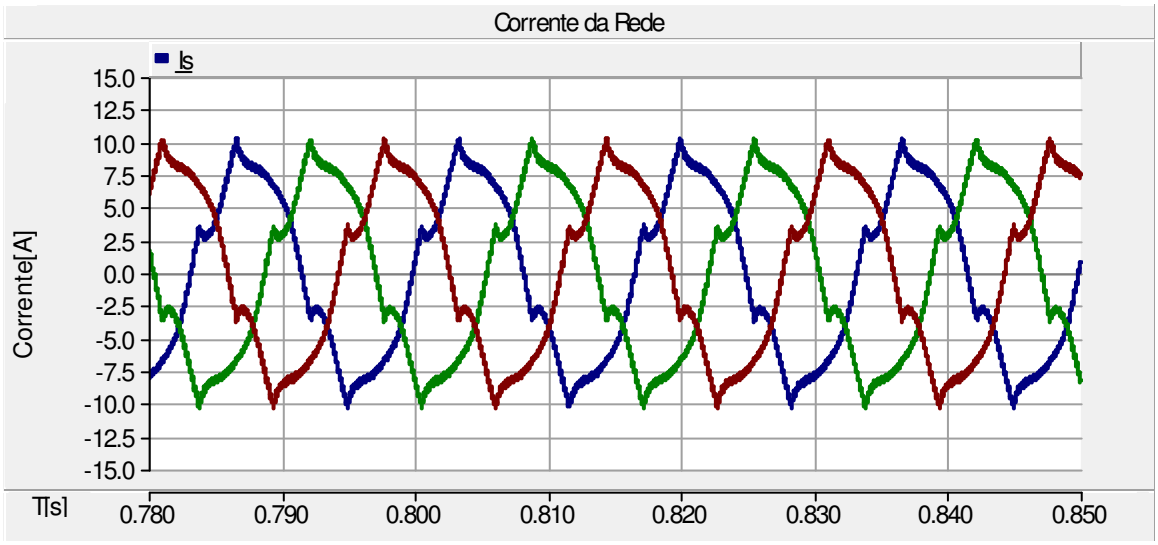
Tabela 10 - Dados dos PI's fora do valor de Projeto.

KP_i *da malha de corrente*	*4.26*
KI_i *da malha de corrente*	$5.5*10^4$
KP_v *da malha de tensão*	*1.120*
KI_v *da malha de tensão*	*56.555*

Fonte: Autoria própria.

A Figura 34 mostra o comportamento da corrente da rede com o filtro ativo atuando com o valor do controlador PI da malha de corrente fora do valor de projeto, ou seja, percebe-se que a malha de corrente não atua com eficiência, sendo que a corrente da rede não se torna senoidal com a atuação do filtro ativo.

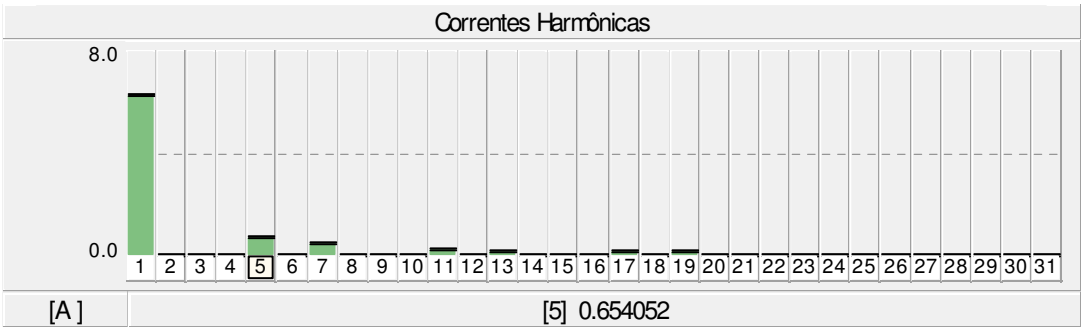
Figura 34 - Corrente drenada da rede após atuação do FAPP com PI da malha de corrente fora do valor de projeto.



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 35, pode-se observar que o filtro não consegue compensar corretamente as correntes harmônicas da rede.

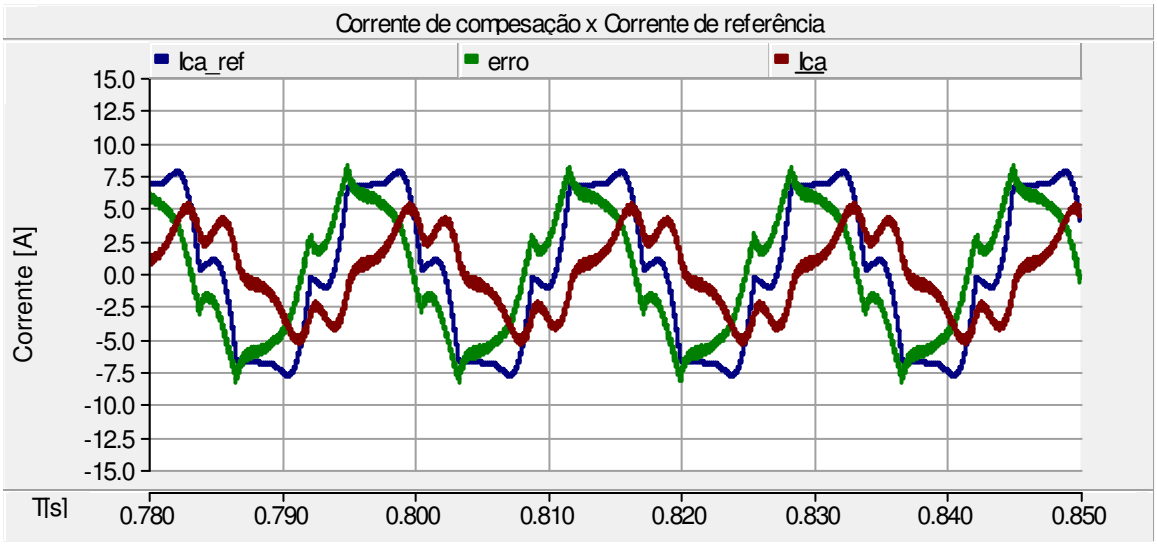
Figura 35 - Porcentagem de Harmônicas drenadas da rede quando o PI está fora do valor de Projeto.



Fonte: Autoria própria.

Para este caso o erro entre a corrente de compensação de referência (calculada pela teoria p-q) e a corrente de compensação na saída do filtro é mostrado na Figura 36 e pode-se observar que o filtro não consegue chavear a corrente de forma adequada quando o controlador PI está fora dos valores de projeto, possuindo um erro de 7.5 A. Assim afirma-se que o controlador PI não está sintonizado para as frequências de interesse.

Figura 36 - Erro da realimentação da Malha de Corrente.

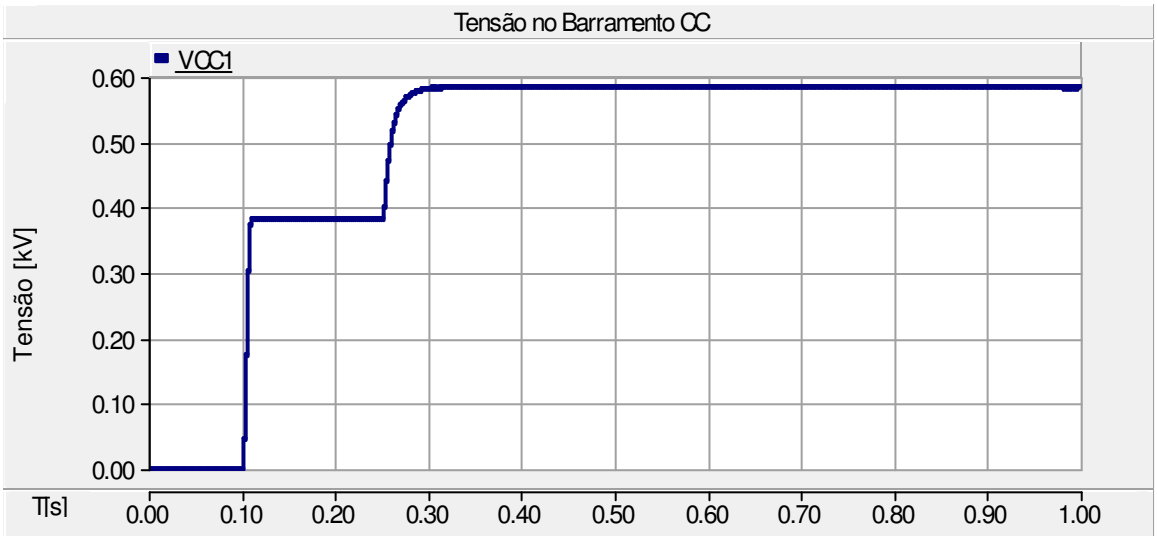


Fonte: Autoria própria.

Na Figura 37 pode-se observar o comportamento da tensão no barramento CC quando o PI da malha de corrente está fora do valor de projeto, percebe-se que a malha de tensão não

consegue manter a tensão do barramento em 500V, ou seja, ela não funciona da maneira para qual foi projetada.

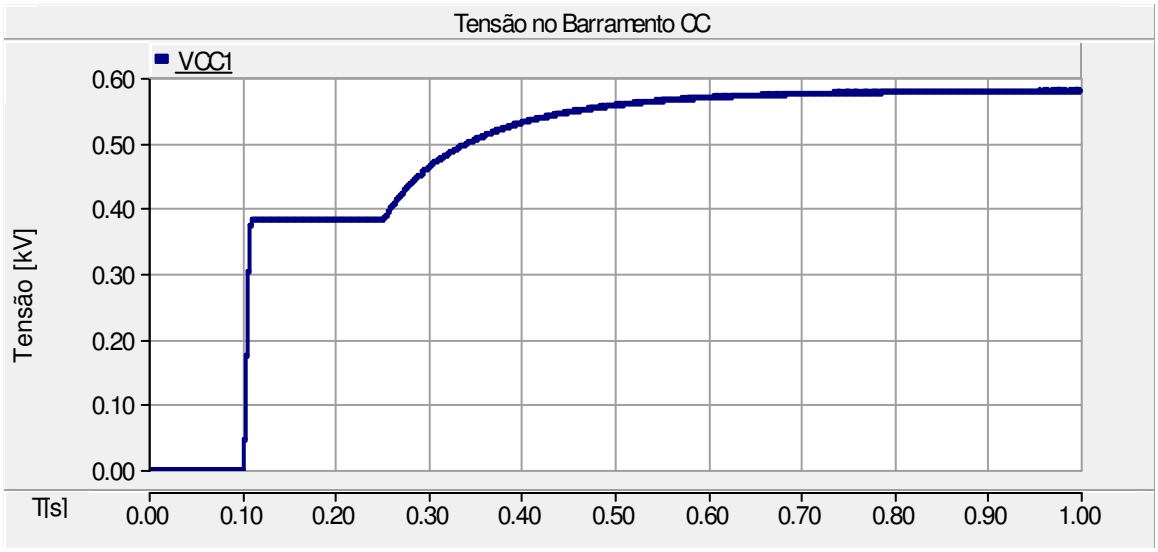
Figura 37 - Carregamento da Tensão no Barramento CC para o PI da malha de corrente fora do valor de projeto.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 38 mostra o comportamento da tensão de carregamento do barramento CC para quando o valor do PI da malha de tensão está fora do valor de projeto como mostrado na Tabela 10. Assim, percebe-se que o mesmo não consegue manter a tensão do barramento em 500V, fazendo com que o barramento CC não atue da maneira para qual foi projetado.

Figura 38 - Tensão de Carregamento do Barramento CC com PI da malha de tensão fora do valor de projeto.



Fonte: Autoria própria.

5.4 Simulações do Sistema Proposto com os valores do Filtro LCL fora dos valores projetados

Agora foram modificados os valores dos parâmetros do filtro LCL, como mostrado na Tabela 11, para verificar-se o comportamento do filtro ativo.

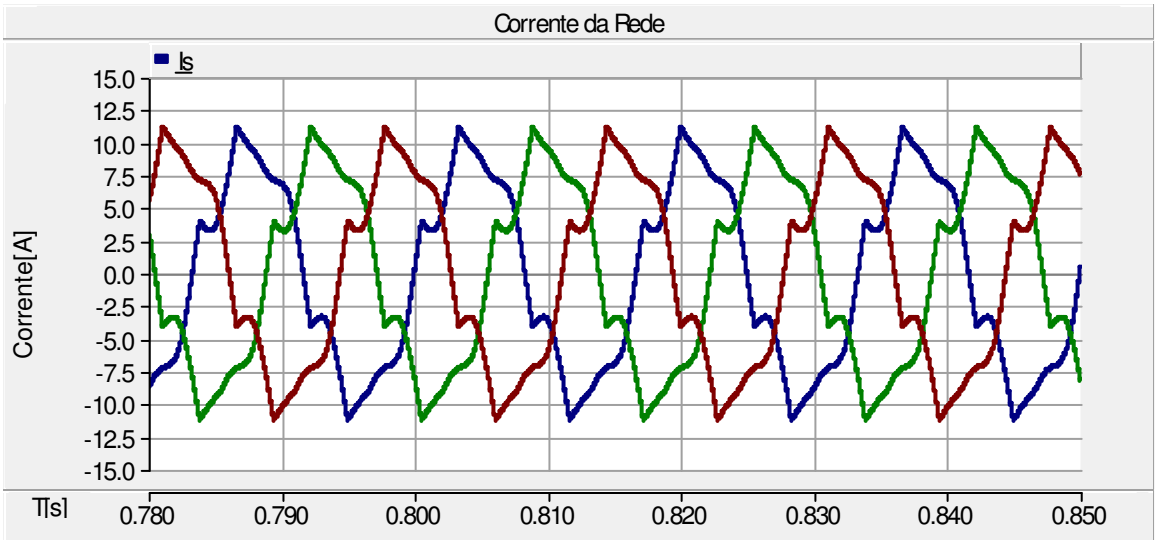
Tabela 11 - Dados do Filtro LCL fora dos valores de Projeto

Indutância L_1 do filtro LCL	*82 [mH]*
Indutância L_2 do filtro LCL	*19.8 [mH]*
Capacitância C_f do filtro LCL	*54.8[μF]*

Fonte: Autoria própria.

Na Figura 39 observamos as formas de onda da corrente da rede, percebe-se que quando se altera os valores dos parâmetros do filtro LCL, o filtro não consegue atuar com eficiência e a corrente da rede não se torna senoidal.

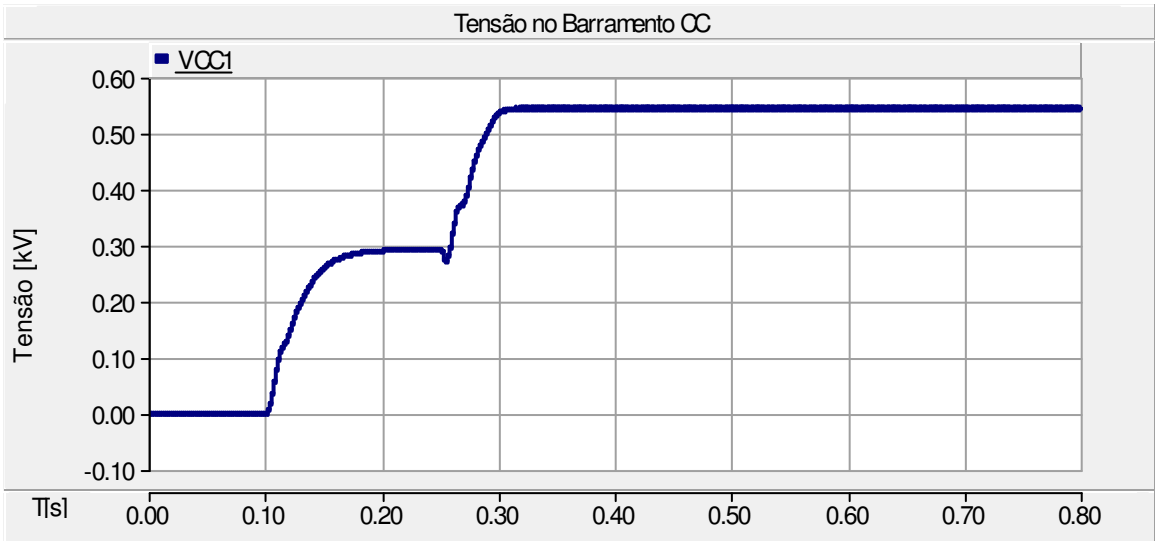
Figura 39 - Corrente drenada da rede para valores de LCL fora dos valores de projeto.



Fonte: Autoria própria.

Isto acaba tendo impacto também sobre a malha de tensão como pode ser visto na Figura 40 onde o barramento CC está mantendo sua tensão um pouco acima dos 500V do projeto inicial.

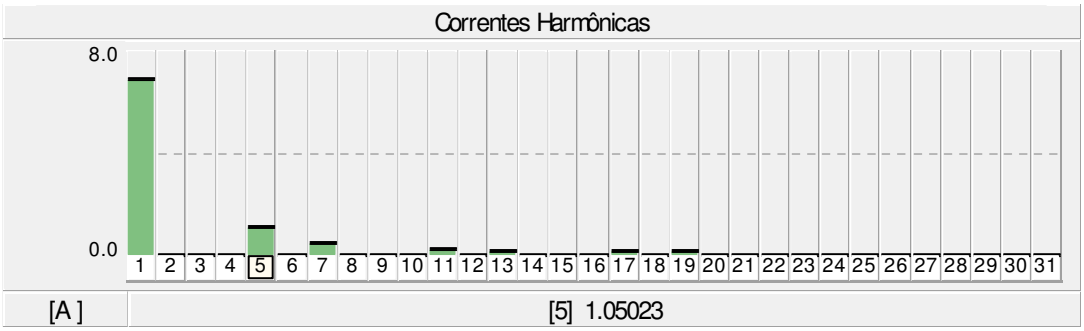
Figura 40 - Tensão de carregamento do barramento CC para valore de LCL fora dos valores de projeto.



Fonte: Autoria própria.

Assim, é possível perceber que a malha de corrente não consegue atuar com eficiência e o filtro não consegue filtrar as correntes harmônicas da rede, como pode ser observado na Figura 41, pois o ganho PI da malha de corrente foi projetado inicialmente para os valores de projeto do filtro LCL.

Figura 41 - Harmônicas na rede com Filtro LCL fora de valor de Projeto.



Fonte: Autoria própria.

Analisando os resultados obtidos no capítulo 5, percebe-se que o projeto do filtro ativo atuou de maneira consistente compensando as harmônicas da rede, a potência reativa excedente e concertando o fator de potência da rede.

Ao modificar os valores de projeto do filtro ativo, observou-se o seu comportamento para dois casos diferentes. No primeiro caso, alterou-se os valores dos ganhos dos controladores PI e no

segundo caso, alterou-se os valores dos parâmetros do filtro LCL. Analisando-se os dois casos, percebe-se que quando altera-se o valor do filtro LCL o filtro ativo atua com menos eficiência, causando um aumento das harmônicas na corrente da rede.

6 CONCLUSÃO

Neste trabalho foram apresentados o estudo, projeto e simulação de um filtro ativo de potência paralelo. Este foi aplicado à um sistema trifásico a três-fios para supressão de harmônicos de corrente, compensação de reativos e fator de potência da rede. Utilizou-se o algoritmo baseado na Teoria de potência ativa e reativa instantânea destinados à geração das correntes de referência de compensação do Filtro Ativo de Potência Paralelo. Com a criação de um sistema trifásico fictício, este pôde ser empregado em um sistema trifásico a três-fios.

A topologia do Filtro Ativo de Potência Paralelo abordada neste trabalho foi apresentada, sendo descrita a modulação utilizada, os algoritmos utilizados para geração das correntes de referência de compensação do filtro ativo de potência paralelo e o sistema de sincronismo e detecção do ângulo de fase (PLL). Também foi descrita a modelagem matemática do Filtro LCL implementado bem como sua função de transferência. Foi apresentada também a modelagem matemática das malhas de controle de corrente e de tensão do barramento CC.

Como ideia principal deste trabalho apresentou-se uma metodologia para o cálculo dos ganhos do controlador PI das malhas de controle de corrente e de tensão do barramento CC tendo em vista que geralmente os valores dos controladores PI são achados pelo método de tentativa e erro. Assim, pôde-se projetar estes controladores de forma a obter um sistema compensado em malha aberta com margem de fase desejada na frequência de cruzamento especificada em projeto.

O método de projeto do controlador PI da malha de corrente fez com que os valores dos ganhos do controlador fossem determinados principalmente em função dos parâmetros físico do filtro, no caso em questão, foi determinado em função dos parâmetros do filtro LCL (L_1, L_2 e C_f). Assim, caso seja necessário alterar algum parâmetro do filtro LCL então deve ser feito um novo projeto de controlador PI para que o filtro ativo de potência paralelo possa continuar filtrando as harmônicas da rede com eficiência. Como foi visto no capítulo 5, através de simulações o pensamento contrário também se aplica, ou seja, se modificar o valor de um controlador PI que não atende ao valor de projeto, então, o Filtro Ativo de Potência Paralelo perde eficiência na filtragem das correntes harmônicas da rede. A mesma situação aplica-se ao PI do controlador do barramento CC que, neste caso, depende do capacitor do

barramento CC e também dos parâmetros da malha de corrente, já que as duas controlam a corrente de referência da malha do filtro ativo. Mas, alterando o valor de projeto do filtro LCL o filtro ativo atua com muito menos eficiência do que se alterado o valor de projeto do controlador PI. Assim, deve-se tomar maior cuidado ao sintonizar o filtro LCL ao sistema.

Com os resultados obtidos no capítulo anterior, ficou visível que o projeto e implementação da técnica de compensação harmônica utilizando um Filtro Ativo de Potência Paralelo foi feito de maneira correta, pois a partir destes resultados, foi observado que o filtro atenuou a maior parte da corrente harmônica da rede, além de ter compensado a potência reativa da rede e aumentado o fator de potência da rede para 0,999. Ficou evidente também que o projeto dos controladores PI's das malhas de corrente e de tensão do Filtro Ativo de Potência Paralelo em função dos parâmetros do filtro foi feita de maneira eficiente, pois encontrar os valores dos ganhos PI's é mais fácil desta forma do que tentar achar o seu valor através de tentativas consecutivas de erros de acertos. Ficou claro também que, desta maneira, é possível calcular o valor dos ganhos PI's das malhas independentemente do tipo de acoplamento feito entre o Filtro Ativo de Potência Paralelo e a rede, ou seja, se o tipo de acoplamento for feito com um filtro L, LC ou LCL, a maneira de calcular os ganhos do controlador PI continua a mesma.

Assim, a metodologia utilizada para o calculo dos ganhos do controlador PI não irá se alterar mesmo que os parâmetros do filtro ativo sejam alterados. O que irá alterar neste caso é apenas o valor do ganho do controlador PI.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) LEÃO, R. P. S. **Harmônicos em Sistemas elétricos de Potência.** Grupo de Processamento de energia e controle. Universidade Federal do Ceará. 2010.

(2) SINUS, 2003, Disponível em: <http://www.sinus-pq.dei.uminho.pt/includes/qee.html>. Acesso em: 14/11/2014.

(3) AKAGI, H., WATANABE, E. H., AREDES, M., Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning, Wiley Inter-Science A Jhon Willey & Sons Inc., **IEEE Press Series on Power Engineering**, New Jersey, 2007.

(4) ENCARNAÇÃO, L. F.; MOOR NETO, J. A.; REIS, M. S.; AREDES, M. **Redução de Perdas e Melhoria da Qualidade de Energia na Rede de Distribuição BT Utilizando Filtros Ativos de Potência.** In: IX CBQEE - Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica, 2011, Cuiabá - MT. CBQEE - IX Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica, 2011. v. 9. p. 56-61.

(5) SILVA, N.; POMÍLIO, J. A.; VENDRUSCULO, E. A. **Estratégia De Controle E Análise Do Filtro Híbrido Utilizando Um Inversor De Potência Reduzida.** In: XVIII Congresso Brasileiro de Automática / 12 a 16-setembro-2010, Bonito-MS.

(6) SILVA, C. H.; PEREIRA, R. R.; SILVA, L. E. B.; LAMBERT-TORRES, G.; GONZATTI, R. B.; FERREIRA, S. C.; SE UN AHN, J. O. P.; PINTO, E. B.; BOSE, K. **"Smart Impedance: Expanding the Hybrid Active Series Power Filter Concept"**. In: 38th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON 2012, Montréal.

(7) PENELLO, L. F.; WATANABE, E. H. Filtro Ativo De Potência Tipo "Shunt" Com Seleção Da Potência A Ser Compensada. **SBA: Controle &Automação**; Vol. 4 nQ 1/ agosto-setembro 1993.

(8) ASIMINOAEI, L.; WIECHOWSKI, W.; BLAABJERG, F.; KRZESZOWIAK, T.AND KEDRA, B. "A New Control Structure for Hybrid Power Filter to Reduce the Inverter Power Rating," **IEEE Industrial Electronics**, 32nd Annual Conference on, pp. 2712-2717, Nov. 2006.

(9) POMILIO, J. A. Normas relativas a fator de potência e distorção harmônica. **Revista o Setor Elétrico**, Fascículo Harmônicos, Capítulo 2, p. 18 – 23, abril de 2006.

(10) WATANABE, E. H.; AREDES, M. **Teoria de Potência Ativa e Reativa Instantânea e Aplicações –Filtros Ativos e FACTS.** Laboratório de Eletrônica de Potência, UFRJ, Rio de Janeiro, 2007.

(11) CAMPANHOL, L. B. C. **Filtro ativo de potência paralelo utilizando inversores monofásicos full-bridge aplicado em sistemas trifásicos a quarto-fios.** 2012. Dissertação (Pós-graduação em Engenharia Elétrica). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, 2012.

(12) SENSORS, 2009, **Creating a PWM output sensor using a field-programmable analog array**. Disponível em: <http://archives.sensorsmag.com/articles/0598/pwm0598/> Acesso em: 14/11/2014.

(13) ORTMANN, M. S. **Filtro ativo trifásico com controle vetorial utilizando DSP: Projeto e implementação.** 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

(14) ARAÚJO, R. D. **Projeto e simulação de filtros L e LCL para interconexão de inversor NPC trifásico à rede.** 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.

(15) BHAGWAT, P. M. and STEFANOVIC, V. R. Generalized Structure of a Multilevel PWM Inverter, Industry Applications, **IEEE Transactions** on, vol. IA-19, pp.1057-1069, 1983.

(16) BARBI, I. **Projetos de Fontes Chaveadas**. Universidade Federal de Santa Catarina, INEP, 2002.

(17) BARBI, I. **Projetos de fontes chaveadas**. Florianópolis: Edição do Autor, 2001.

(18) SILVA, S. A. O., DONOSO-GARCIA, P. F., CORTIZO, P. C. and SEIXAS, P. F., "**A Line- Interactive Ups System Implementation With Series-Parallel Active Power-Line Conditioning For Three-Phase, Four-Wire Systems**," XIV CBA, 2002.