

ESTUDO COMPARATIVO DE TEORIAS DE POTÊNCIAS INSTANTÂNEAS E
APLICAÇÕES EM FILTROS ATIVOS

Eumir Vergara Salgado

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS
EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Aprovado por:

Prof. Maurício Aredes, Dr.-Ing.

Prof. Edson Hirokazu Watanabe, D. Eng.

Prof. Luís Guilherme Barbosa Rolim, Dr.-Ing.

Prof. Pedro Gomes Barbosa, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
ABRIL DE 2005

SALGADO, EUMIR VERGARA

Estudo Comparativo de Teorias de Potências Instantâneas e Aplicações em Filtros Ativos [Rio de Janeiro] 2005

XII, 122 p. 29,7cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Elétrica, 2005)

Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE

1. Teorias de Potência Instantâneas
2. Filtros Ativos de Potência

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

Dedico esse trabalho à minha amada esposa Juliana. Sem seu constante apoio e compreensão não seria possível a realização deste trabalho.

Dedico também à Mariana, minha amada filha que acabou de chegar a este mundo.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por conceder-me sua luz e saúde. Agradeço aos meu pais, Odilon e Sonia, por estarem sempre ao meu lado, desde os meus primeiros momentos de vida, fornecendo toda a formação, apoio e carinho.

Aos todos os companheiros do Laboratório de Eletrônica de Potência que trilharam juntos este caminho, especialmente, aos amigos Robson, Rodrigo, Vinícius, Júlio e Fábio, sempre buscando o crescimento profissional, mantendo um excelente ambiente de trabalho. Agradeço também ao Luis Monteiro e ao João Moor pelas discussões e trocas de idéias. Agradeço ao amigo Guilherme Sotelo pelo seu suporte, em especial, ao uso do \LaTeX .

Aos professores Laboratório de Eletrônica de Potência que transmitiram seus conhecimentos e experiências.

Ao Instituto Militar de Engenharia que proporcionou condições para a realização desta tese. Em especial ao amigo Leandro Teixeira Dornelles, com quem sempre pude contar a todo momento.

A todos aqueles que direta ou indiretamente interagi ao longo deste trabalho e que não foram citados, mas que foram importantes no seu desenvolvimento.

Um agradecimento especial ao Professor Maurício Aredes, com quem sempre pude contar, fornecendo todo o apoio e orientação. Obrigado por ter confiando em meu trabalho.

O meu muito obrigado a todos.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

ESTUDO COMPARATIVO DE TEORIAS DE POTÊNCIAS INSTANTÂNEAS E APLICAÇÕES EM FILTROS ATIVOS

Eumir Vergara Salgado

Abril/2005

Orientador: Maurício Aredes

Programa: Engenharia Elétrica

O objetivo deste trabalho é realizar um estudo comparativo de teorias de potências instantâneas, com ênfase na aplicação em filtros ativos paralelos. Aspectos relacionados ao significado físico e aplicabilidade na compensação de sistemas trifásicos a quatro fios são analisados. Uma proposta para compensação das componentes de seqüência zero, baseada na teoria $p-q$, sem elementos armazenadores de energia é feita. Adicionalmente, são propostas modificações no algoritmo da compensação baseado na teoria $p-q-r$, especificamente no método de controle de referência de corrente, visando aperfeiçoar o desempenho do método em quaisquer condições de tensão do sistema.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

A COMPARATIVE STUDY AMONG INSTANTANEOUS POWER THEORIES
AND APPLICATIONS ON ACTIVE FILTERS

Eumir Vergara Salgado

April/2005

Advisor: Maurício Aredes

Department: Electrical Engineering

This work presents a comparative analysis among instantaneous power theories with emphasis in active filters. Some aspects like physical meaning and applications in compensation three-phase four-wire systems are covered. A control strategy based on $p-q$ theory is proposed to compensate neutral currents without storage elements. Moreover, a modification in the reference current method based in the $p-q-r$ theory is proposed to improve its performance in any circuit conditions.

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Considerações Iniciais	1
1.1.1	Introdução	1
1.1.2	Filtros Ativos de Potência	3
1.1.3	Princípio da Compensação Paralela e Série	5
1.1.4	Estratégias de Controle de Filtros Ativos	7
1.2	Motivação do Trabalho	9
1.3	Objetivos	10
1.4	Estrutura do Trabalho	11
2	Teoria $p-q$	12
2.1	Introdução	13
2.2	Potências instantâneas definidas nas coordenadas $\alpha - \beta - 0$	14
2.2.1	Significado físico das potências real, imaginária e de seqüência zero	18
2.3	Compensação de sistemas trifásicos a quatro fios	20
2.3.1	Introdução	20
2.3.2	Compensação de cargas não lineares	20
2.4	Compensação da componente de seqüência zero sem elementos armazenadores de energia	31
2.5	Teoria de potência reativa instantânea generalizada	37
2.5.1	Compensação de sistemas trifásicos a quatro fios empregando-se a teoria $p-q$ modificada	42
2.6	Conclusões	49
3	Teoria $p-q-r$	51
3.1	Introdução	52
3.2	Potências instantâneas definidas nas referências girantes $p-q-r$	52
3.3	Compensação de sistemas trifásicos a 4 fios	57
3.3.1	Método de controle de referência de potência	58
3.3.2	Método de controle de referência de corrente	65
3.4	Comparação entre as teorias $p-q$, $p-q$ modificada e $p-q-r$	77

3.4.1	Elementos armazenadores de energia	77
3.4.2	Processamento das tensões da rede	79
3.4.3	Significado físico	79
4	Filtro Ativo Paralelo	82
4.1	Introdução	83
4.2	Circuito de potência do filtro ativo paralelo	84
4.2.1	Controlador por banda de histerese e controlador de tensão	85
	Controlador por banda de histerese	85
	Regulador de tensão CC	86
4.3	Estratégias de controle baseadas na teoria $p-q$	88
4.3.1	Detector de seqüência positiva baseado na teoria $p-q$	88
	Circuito PLL	89
	Circuito detector de seqüência positiva	90
4.3.2	Estratégia de controle de correntes senoidais da fonte	90
4.3.3	Estratégia de controle de compensação de corrente de neutro sem elementos armazenadores de energia	91
4.3.4	Resultados de simulação empregando a teoria $p-q$	93
4.4	Estratégias de controle baseadas na teoria $p-q-r$	100
	Método de controle de referência de potência	101
	Método de controle de referência de corrente	102
	Emprego do circuito de sincronismo PLL no método de referência de corrente	104
4.4.1	Resultados de simulação empregando a teoria $p-q-r$	105
4.4.2	Análise comparativa do desempenho do filtro ativo paralelo baseado nas teorias $p-q$ e $p-q-r$	112
5	Conclusões Gerais	114
5.1	Trabalhos Futuros	116
	Referências Bibliográficas	118

Lista de Figuras

1.1	Princípio da compensação paralela.	5
1.2	Princípio da compensação série.	6
2.1	Teoria $p-q$ - correntes e tensões caso 1.	24
2.2	Teoria $p-q$ - sistema compensado caso 1.	25
2.3	Teoria $p-q$ - correntes e tensões caso 2.	26
2.4	Teoria $p-q$ - sistema compensado caso 2.	26
2.5	Teoria $p-q$ - correntes e tensões caso 3.	28
2.6	Teoria $p-q$ - sistema compensado caso 3.	28
2.7	Teoria $p-q$ - correntes e tensões caso 4.	29
2.8	Teoria $p-q$ - sistema compensado caso 4, onde é fornecida somente a tensão fundamental e de seqüência positiva.	30
2.9	Compensação da corrente de neutro sem elementos armazenadores de energia baseada na teoria $p-q$ - Tensões e correntes do sistema no primeiro caso.	34
2.10	Compensação da corrente de neutro sem elementos armazenadores de energia baseada na teoria $p-q$ - Correntes e potências do sistema compensado no primeiro caso.	35
2.11	Compensação da corrente de neutro sem elementos armazenadores de energia baseada na teoria $p-q$ - correntes e tensões do sistema compensando \tilde{p}	36
2.12	Compensação da corrente de neutro sem elementos armazenadores de energia baseada na teoria $p-q$ - correntes e potências do sistema compensando \tilde{p}	36
2.13	Teoria modificada: tensões e correntes do sistema caso 1.	44
2.14	Teoria modificada: correntes compensadas e potências do caso 1.	45
2.15	Teoria modificada: tensões e correntes do caso 2.	45
2.16	Teoria modificada: correntes compensadas e potências do caso 2.	46
2.17	Teoria modificada: correntes compensadas e potências do caso 2 com $q_0^* = 0$	47
2.18	Teoria modificada: tensões e correntes do caso 3.	48
2.19	Teoria modificada: correntes compensadas e potências do caso 3.	48

3.1	Relação entre as coordenadas $\alpha - \beta - 0$ e $\alpha' - \beta' - 0$	54
3.2	Relação entre as coordenadas $\alpha' - \beta' - 0$ e $p-q-r$	54
3.3	Vetores no espaço $\alpha\beta 0$ e as rotações θ_1 e θ_2	55
3.4	Relação entre a corrente i_0 e i_r	59
3.5	Método de referência de potência: tensões e correntes caso 1.	62
3.6	Método de referência de potência: sistema compensado caso 1.	62
3.7	Método de referência de potência: tensões e correntes caso 2.	63
3.8	Método de referência de potência: sistema compensado caso 2.	63
3.9	Método de referência de potência: tensões e correntes caso 3.	64
3.10	Método de referência de potência: sistema compensado caso 3.	64
3.11	Método de corrente de referência: tensões e correntes caso 1.	70
3.12	Método de corrente de referência: sistema compensado caso 1.	71
3.13	Método de corrente de referência: tensões e correntes caso 2.	72
3.14	Método de corrente de referência: sistema compensado caso 2.	72
3.15	Método de corrente de referência: correntes de compensação do caso 2.	73
3.16	Método de corrente de referência: correntes de neutro do caso 2.	73
3.17	Diferença entre as potências p_0 e p_{0c} caso 2.	74
3.18	Método de corrente de referência: tensões e correntes caso 3.	75
3.19	Método de corrente de referência: sistema compensado caso 3.	76
3.20	Método de corrente de referência: sistema compensado caso 3 com pré-processamento das tensões.	76
3.21	Significado físico das potências na teoria $p-q$	80
3.22	Significado físico das potências imaginárias na teoria $p-q$ modificada.	80
4.1	Configuração básica de um filtro ativo paralelo.	83
4.2	Circuito de potência um filtro ativo paralelo.	84
4.3	Regulador de tensão CC na configuração de capacitores divididos.	87
4.4	Circuito PLL.	89
4.5	Detector de seqüência positiva baseado na teoria $p-q$	91
4.6	Bloco de controle do filtro ativo paralelo baseado na teoria $p-q$ com correntes senoidais da fonte.	92
4.7	Bloco de controle do filtro ativo paralelo baseado na teoria $p-q$ com potência constante da fonte.	92
4.8	Tensões nos terminais da carga - estratégia de controle de correntes senoidais da fonte.	94
4.9	Tensões geradas pelo detector de seqüência positiva - estratégia de controle de correntes senoidais da fonte.	95
4.10	Correntes da fonte antes e após a conexão do filtro paralelo - estratégia de controle de correntes senoidais da fonte.	96

4.11	Correntes de compensação geradas pela estratégia de controle e pelo controle por banda de histerese - estratégia de controle de correntes senoidais da fonte.	96
4.12	Correntes de seqüência zero da fonte e da carga - estratégia de controle de correntes senoidais da fonte.	97
4.13	Tensão nos capacitores do inversor VSI - estratégia de controle de correntes senoidais da fonte.	98
4.14	Tensões terminais da carga antes e após a conexão do filtro ativo - estratégia de controle de eliminação da corrente de neutro sem elementos armazenadores de energia.	99
4.15	Corrente de neutro da fonte antes e depois da conexão do filtro ativo - estratégia de controle de eliminação da corrente de neutro sem elementos armazenadores de energia.	99
4.16	Potências trifásicas do filtro ativo e da fonte - estratégia de controle de eliminação da corrente de neutro sem elementos armazenadores de energia.	100
4.17	Correntes drenadas da fonte - estratégia de controle de eliminação da corrente de neutro sem elementos armazenadores de energia.	101
4.18	Diagrama de blocos do método de referência de potência - teoria $p-q-r$.	102
4.19	Diagrama de blocos do método de referência de corrente - teoria $p-q-r$.	103
4.20	Diagrama de blocos do método de referência de corrente com pré-processamento das tensões - teoria $p-q-r$	105
4.21	Corrente de neutro antes e depois da conexão do filtro ativo - método de referência de potência.	106
4.22	Potências trifásicas do filtro ativo e da fonte - método de referência de potência.	107
4.23	Correntes da fonte antes e depois da conexão do filtro ativo - método de referência de potência.	107
4.24	Tensões terminais da carga na primeira condição - método de referência de corrente.	108
4.25	Correntes da fonte antes e depois da conexão do filtro ativo na primeira condição - método de referência de corrente.	109
4.26	Corrente de neutro antes e depois da conexão do filtro ativo na primeira condição - método de referência de corrente.	109
4.27	Tensões terminais da carga na segunda condição - método de referência de corrente.	110
4.28	Correntes da fonte antes e depois da conexão do filtro ativo na segunda condição - método de referência de corrente.	111

4.29 Correntes da fonte antes e depois da conexão do filtro ativo com o emprego do PLL na segunda condição - método de referência de corrente.	111
--	-----

Capítulo 1

Introdução

1.1 Considerações Iniciais

1.1.1 Introdução

A qualidade do fornecimento da energia elétrica é uma preocupação crescente na atualidade. Processos automatizados na indústria e centros de processamento de dados são exemplos de cargas que necessitam de um padrão mínimo de fornecimento. Problemas relacionados à qualidade de energia podem implicar em grandes prejuízos a estes consumidores com características especiais. Uma linha de produção pode parar caso hajam distúrbios, mesmo que ocorram em frações de segundo [1].

Arrilaga, Bollen e Watson [2] apresentam um exemplo de interpretação para a qualidade de energia:

“É a habilidade de um sistema de potência em atender as cargas sem distúrbios e sem danificá-las, associada principalmente com a qualidade da tensão no ponto de acoplamento comum.”

Esta questão tornou-se especialmente importante em países desenvolvidos, onde a questão da continuidade do fornecimento já foi resolvida há muitos anos. A disponibilidade da energia é praticamente contínua e o foco da discussão está concentrado na

qualidade desta energia. Nos países em desenvolvimento, por outro lado, a frequência e a duração de interrupções ainda são problemas presentes nos sistemas elétricos. Mesmo assim, em centros mais desenvolvidos, onde concentram-se grandes consumidores industriais e comerciais, os problemas relativos à qualidade da energia também são alvos de preocupações.

Vários são os fenômenos associados à qualidade de energia. O afundamento de tensão é um dos problemas mais frequentes, causado principalmente por curtos-circuitos em linhas de transmissão e distribuição, além da partida de grandes motores e pela energização de transformadores [3]. A presença de distorção harmônica de tensão e corrente, desbalanço de tensão e transitórios também são motivos de preocupações. Urge, portanto, a criação de uma regulamentação que estabeleça limites para os diversos indicadores de qualidade de energia, de forma a estabelecer regras tanto para os consumidores, quanto para os agentes do sistema elétrico brasileiro. Internacionalmente, existem diversas normas que estabelecem limites e procedimentos, como por exemplo, o *IEEE Std 519-1992 - IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems* [4], onde são descritos os principais equipamentos geradores de harmônicos, os efeitos no sistema, procedimentos para medição, limites de distorção harmônica total (THD) no sistema, dentre outros aspectos.

Mais recentemente, a desregulamentação do setor elétrico também tem influído na qualidade do fornecimento. Com a tendência da descentralização da geração, o sistema estará mais sujeito à condição da geração dos agentes envolvidos [2]. Problemas de *flicker* associados a fazendas eólicas e harmônicos de tensão de alguns sistemas fotovoltaicos são exemplos de problemas relacionados ao novo cenário de geração distribuída.

O efeito do crescimento de cargas não lineares é um importante fator que também tem sido estudado com bastante intensidade. O significativo avanço da eletrônica de potência permitiu a disseminação de cargas desta natureza, representadas principalmente pelos conversores CA/CC, acionamentos CA de motores e os cicloconversores. A presença destes equipamentos degrada a forma de onda da tensão, justamente pela característica não senoidal das correntes de carga. Interessante notar que, ao mesmo tempo que alguns consumidores impõem ao sistema correntes não senoidais,

eles também necessitam de tensão com qualidade para seu funcionamento.

Os harmônicos de tensão gerados por correntes não senoidais são nocivos ao sistema elétrico, principalmente por causar problemas de ressonâncias, sobreaquecimento de motores elétricos, aumento da corrente de neutro, dentre outros. Um bom exemplo do efeito da presença de harmônicos de tensão pode ser encontrado em [5], onde foram observadas falhas na operação de equipamentos baseados em dispositivos de sincronismo com detecção de zero.

O prévio conhecimento da natureza das cargas é importante no planejamento de uma instalação. Muitos problemas associados à qualidade de energia podem ser reduzidos com medidas relativamente simples, como por exemplo, a separação de cargas sensíveis daquelas geradoras de distúrbios. Estas, por sua vez, podem ser classificadas como sendo de dois tipos: as identificadas e as não identificadas [6]. As primeiras são caracterizadas pelos grandes consumidores, como por exemplo, usinas siderúrgicas com acionamentos de motores na ordem de alguns MVA, ou grandes fornos a arco. Um exemplo de cargas não identificadas são as fontes de computadores. Estes equipamentos considerados de forma isolada não causam danos ao sistema elétrico. Contudo, quando for considerado um grande edifício de escritórios, os efeitos de vários computadores em conjunto podem degradar a qualidade da energia. Um estudo detalhado sobre o efeito de cargas não identificadas pode ser encontrado em [7].

1.1.2 Filtros Ativos de Potência

Ao passo que os problemas relacionados com a qualidade de energia tornaram-se mais comuns, pesquisas foram sendo desenvolvidas no sentido de mitigá-los. Uma das soluções relativas à presença de harmônicos é o emprego de filtros passivos sintonizados nas frequências de interesse. A grande vantagem destes equipamentos é o baixo investimento necessário para sua aplicação, quando comparados aos filtros ativos, além do bom desempenho sob certas condições [8]. Contudo, seu projeto é difícil devido à constante alteração na impedância equivalente do sistema, além de ter seu desempenho deteriorado caso haja variações de frequência na rede [9]. Também são relatados problemas relativos a ressonâncias entre o filtro e a fonte,

aumentando significativamente a circulação de correntes harmônicas, tanto na rede, quanto no próprio filtro.

Por outro lado, avanços nas pesquisas em semicondutores permitiram o desenvolvimento de dispositivos capazes de suportar tensões e correntes cada vez mais elevadas, além de funcionarem em altas frequências de chaveamento. A possibilidade da realização da comutação forçada das chaves nestas frequências introduz harmônicos também de alta frequência, tornando sua filtragem mais fácil. Paralelamente, o custo de produção destes dispositivos tem diminuído, enquanto que seu desempenho e confiabilidade melhoram continuamente [10], ampliando o universo de aplicações baseadas em Eletrônica de Potência. Um dos focos deste trabalho, os filtros ativos são exemplos destes equipamentos, capazes de realizar compensações no sistema elétrico, tendo como característica principal a operação em condições variáveis da rede, diferentemente da solução baseada em filtros passivos.

Conforme relatado por Watanabe, Aredes e Akagi [11], entre o final da década de 60 e o início de 70, foram publicados trabalhos que podem ser considerados como princípio básico de compensação controlada de potência reativa. No entanto, o termo *Filtro Ativo de Potência*, denominado atualmente simplesmente por “Filtro Ativo”, foi introduzido em 1976 por Gyugyi e Strycula [12]. Nesta época, as aplicações foram restringidas pela ausência de circuitos disponíveis para a implementação das estratégias de controle em aplicações práticas, além do alto custo envolvido dos dispositivos semicondutores de potência.

Somente em 1983/1984, com o desenvolvimento da teoria $p-q$, apresentada por Akagi, Kanazawa e Nabae [13, 14], foi dado um grande impulso no desenvolvimento dos filtros ativos. Para que fosse possível a implementação prática destes condicionadores de energia era necessário o entendimento das grandezas envolvidas. Isto foi possível com o surgimento desta teoria.

A utilização de conversores PWM também contribuiu para o desenvolvimento dos filtros ativos. A utilização desta estratégia para o chaveamento dos dispositivos semicondutores de potência faz com que, em condições ideais, os conversores funcionem como fontes de tensão ou correntes controladas. Esta é a característica fundamental do princípio de funcionamento dos filtros ativos [9].

De maneira geral, os harmônicos de tensão são causados por correntes de carga não lineares ou pela própria fonte. Desta forma, a escolha de qual filtro utilizar dependerá da origem dos distúrbios e do objetivo que se deseja atingir. A seguir, na Seção 1.1.3, são apresentados dois princípios básicos de compensação através de filtros ativos de potência.

1.1.3 Princípio da Compensação Paralela e Série

De uma forma geral, os filtros podem ser divididos em duas categorias: o filtro ativo paralelo e o série. A Figura 1.1 apresenta o princípio da compensação paralela. Neste caso, o sistema alimenta uma carga não linear, onde suas correntes apresentam uma componente fundamental (I_F) e outra harmônica (I_{hl}). A fundamental não causa problemas em relação à tensão no ponto de acoplamento comum (neste momento não estão sendo considerados problemas de controle de tensão devido ao balanço de potência reativa). Poderia considerá-la como sendo a “componente linear da carga”. A segunda é responsável por introduzir distúrbios no sistema, causando uma queda de tensão não senoidal na reatância equivalente da fonte. O filtro ativo, por sua vez, comporta-se como uma fonte de corrente controlada, injetando no sistema uma corrente de compensação que somada com a componente harmônica da corrente de carga faz com que o sistema perceba o conjunto filtro + carga como sendo uma carga linear, resistiva e equilibrada. De fato, as estratégias de controle empregadas atualmente permitem a compensação tanto da potência reativa, quanto a eliminação dos harmônicos e da corrente de neutro.

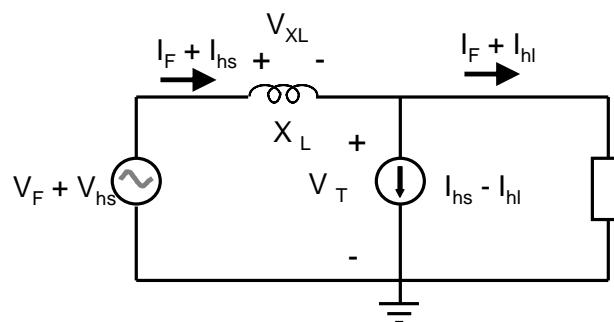


Figura 1.1: Princípio da compensação paralela.

O princípio da compensação série pode ser entendido com o auxílio da Figura

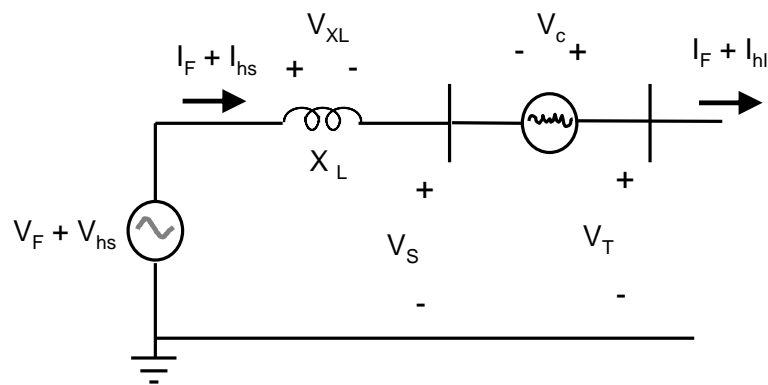


Figura 1.2: Princípio da compensação série.

1.2. Neste esquema, a tensão no terminal da carga contém harmônicos, oriundos da própria fonte ou devido à queda de tensão de correntes não lineares. O filtro série, comportando-se como uma fonte de tensão controlada, introduz uma tensão de compensação V_c que, somada à tensão V_s , torna a tensão na carga (V_t) senoidal e equilibrada.

A análise feita anteriormente, leva em consideração a aplicação do filtro série apenas para compensação de tensão. Este equipamento, contudo, possui outras características, como o isolamento de correntes harmônicas e o amortecimento de oscilações do sistema elétrico.

Analisando os dois princípios básicos de compensação, surge a pergunta: quem seria o responsável por sua realização? A princípio, a compensação paralela ficaria a cargo do próprio consumidor que, no caso, seria o gerador dos distúrbios da rede. Esta poderia ser uma exigência da própria distribuidora de energia, uma vez que a qualidade de seu produto poderia estar sendo degradada. Ao mesmo tempo, o próprio consumidor pode estar sendo vítima de suas próprias cargas, uma vez que correntes com elevado conteúdo harmônico podem afetar a sua tensão de fornecimento.

A responsabilidade da compensação série ficaria a cargo da concessionária de energia, sendo esta quem deve oferecer um produto com uma qualidade mínima aceitável (ou a máxima possível). Tudo irá depender da regulamentação do setor elétrico juntamente com o desenvolvimento e a comercialização de filtros ativos. Neste cenário, é possível imaginar a prática de tarifas diferenciadas quando a energia

entregue pudesse ser distinguida por níveis de qualidade.

1.1.4 Estratégias de Controle de Filtros Ativos

Diversos aspectos devem ser considerados no emprego de filtros ativos de potência na compensação de sistemas elétricos. Dentre eles, a determinação de qual estratégia de controle utilizar pode ser considerado como um dos mais importantes.

Pela própria natureza do emprego dos filtros ativos, isto é, em sistemas elétricos em condições não senoidais, é necessário que os algoritmos utilizados para o controle destes equipamentos sejam capazes de processar tensões e correntes desequilibradas e com harmônicos. Para isto, o emprego de estratégias de controle que utilizem definições de potência em situações mais gerais é essencial. Existe, portanto, uma relação estreita entre as teorias de potências e as estratégias de controle.

Estudos sobre teorias de potência de sistemas elétricos são realizados desde o início do século passado. Antes disso, em 1888, foi feita a primeira referência sobre oscilações de potência entre a fonte e a carga em função de defasagens entre a tensão e a corrente [15]. No início século XX, foi percebida a necessidade de um conjunto de definições que descrevesse o comportamento do sistema sob condições não senoidais. Já havia ferramentas que resolviam, de forma bastante satisfatória, problemas relacionados à operação do sistema em regime permanente, com tensões e correntes equilibradas alimentando cargas lineares. Estas ferramentas ainda são largamente utilizadas pelos engenheiros até hoje, já que ainda resolvem boa parte dos problemas atuais.

Ainda neste período, contribuições importantes foram feitas, como as de Budeanu [16] e Fryze [17], que acabaram por dividir as escolas de pensamento sobre teorias de potências em duas principais: a primeira no domínio da frequência e a segunda no domínio do tempo, respectivamente. A idéia de Budeanu baseou-se na generalização do conceito de potências para o caso linear em circuitos com formas de onda não senoidais e periódicas. Caracteriza-se, principalmente, pela decomposição harmônica das tensões e correntes para o cálculo da potência reativa [18]. Já Fryze, subdividiu a denominada potência aparente em duas componentes, uma ativa e outra reativa. A potência reativa está relacionada com a parcela das tensões e correntes que não

contribuem para a potência ativa. A transferência da potência média entre a fonte e a carga está associada à parcela de corrente, denominada corrente ativa. Quando é feita uma primeira comparação entre as duas teorias, verifica-se que a de Fryze não requeria a obtenção do espectro das tensões e correntes, aspecto interessante para a época [9]. Mais tarde, com o aumento dos distúrbios no sistema, relacionados principalmente às cargas não lineares e desequilíbrios de tensão e corrente, intensificaram-se as discussões sobre qual teoria que melhor descreveria estes fenômenos.

Muitos anos depois, somente entre o final da década de 60 e o início da década de 70, quando as primeiras pesquisas na área de filtros ativos de potência foram realizadas, conforme relatado na seção anterior, é que começaram a surgir contribuições mais relevantes no estudo de teorias de potência.

Takahashi e Nabae (1980) [19] apresentaram o que seria um subconjunto da teoria $p-q$, contudo, não havia significado físico para as variáveis envolvidas [11]. Logo depois, em 1983 e 1984, com a apresentação da teoria $p-q$ por Akagi, Kanazawa e Nabae [13, 14], aplicável a sistemas trifásicos a três fios, é que chegou-se a uma teoria válida para sistemas em condições não senoidais. Na década de 90, a maior parte dos filtros ativos comissionados no Japão em grandes consumidores empregaram a teoria $p-q$ nas estratégias de controle [6].

Neste contexto, muitas discussões têm ocorrido em torno da determinação de qual estratégia deveria ser empregada, girando em torno de alguns aspectos, como por exemplo: eliminação da componente de seqüência zero e a natureza desta potência, necessidade de elementos armazenadores de energia nos filtros ativos, necessidade do pré-processamento das tensões, dentre outros.

Vários trabalhos foram apresentados realizando comparações entre as várias estratégias existentes, onde são destacados o que poderia ser chamado de “vantagens” e “problemas” em cada uma delas.

Nesta discussão, apesar do sucesso da teoria $p-q$, ela tem sido questionada em alguns pontos, tais como a injeção de correntes harmônicas na rede não presentes originalmente, natureza da potência reativa instantânea, necessidade do emprego de detectores de seqüência, dentre outros.

Com este cenário, em 1999 H. Kim e H. Akagi propuseram a teoria de potência instantânea baseada na referência girante $p-q-r$, denominada *teoria $p-q-r$* [20], com a promessa de solucionar vários problemas, como o emprego direto das tensões do sistema no algoritmo e não necessitar empregar elementos armazenadores de energia no filtro ativo na compensação da corrente de neutro.

Ainda não há uma teoria que seja universalmente aceita. Os debates continuam em busca de um consenso, sem perder de vista o entendimento físico das grandezas envolvidas.

1.2 Motivação do Trabalho

Problemas relacionados à qualidade da energia elétrica são crescentes nos sistemas elétricos atuais. Paralelamente, um número cada vez maior de pesquisadores tem se dedicado ao estudo destes fenômenos, bem como proposto soluções para análise, identificação e minimização das causas e, conseqüentemente, de seus efeitos.

Os condicionadores de potência, equipamentos baseados na eletrônica de potência, são uma realidade nos sistemas elétricos atuais, proporcionando soluções para as mais diversas situações onde, até há relativamente pouco tempo, ainda poderiam ser considerados como uma promessa. Dentro deste grande conjunto, os filtros ativos paralelos têm ganhado cada vez mais espaço, indicando ser uma boa alternativa na compensação dos sistemas elétricos de potência, principalmente pela sua versatilidade e multifuncionalidade.

Intimamente relacionadas com o estudo de filtros ativos, as teorias de potência são os elementos principais dos algoritmos de controle destes equipamentos. Mais do que isto, a compreensão dos fenômenos associados aos sistemas elétricos depende fundamentalmente da teoria de potência utilizada, permitindo que o entendimento físico seja atingido.

Em função das muitas discussões em torno deste tema, alimentadas recentemente pela proposição da teoria de potências instantâneas baseadas nas referências girantes $p-q-r$, a teoria $p-q-r$, vislumbrou-se a possibilidade de verificar as contribuições desta teoria à compensação de sistemas trifásicos a quatro fios. Adicionalmente, uma

comparação com a teoria $p-q$ veio como uma idéia imediata, uma vez que foram identificadas divergências significativas, associadas, por exemplo, à eliminação da corrente de neutro sem elementos armazenadores de energia pelo filtro ativo, bem como a forma pela qual são empregadas as tensões do sistema nos algoritmos de compensação.

Portanto, a principal motivação está relacionada à tentativa de trazer alguma contribuição adicional ao tema que, por sua vez, tem despertado muito interesse de pesquisadores e engenheiros que atuam nas mais diversas áreas, não somente relacionadas com qualidade de energia.

1.3 Objetivos

Dentre os principais objetivos do trabalho, destacam-se:

- i. Propor uma estratégia de compensação da componente de seqüência zero baseada na teoria $p-q$ sem o emprego de elementos armazenadores de energia.
- ii. Realizar uma comparação entre três das principais teorias de potências instantâneas: a teoria $p-q$, a teoria de potência reativa instantânea generalizada e a teoria $p-q-r$.
- iii. Realizar uma investigação sobre a teoria $p-q-r$, verificando sua aplicação em algoritmos de compensação de filtros ativos.
- iv. Trazer um entendimento físico das potências na referência girante $p-q-r$.
- v. Descrever o circuito de potência do filtro ativo paralelo.
- vi. Descrever os blocos do circuito de controle do filtro ativo paralelo baseado nas teorias $p-q$ e $p-q-r$.
- vii. Propor o emprego de circuito de sincronismo (PLL) no método de controle de referência de corrente da teoria $p-q-r$.
- viii. Realizar simulações digitais de um filtro ativo paralelo empregando as teorias $p-q$ e $p-q-r$, comparando o desempenho de ambas.

1.4 Estrutura do Trabalho

O texto está dividido em cinco capítulos. No primeiro, é fornecida uma breve introdução sobre a evolução das teorias de potência, bem como dos filtros ativos. No segundo, são apresentadas a teoria $p-q$ e a teoria da potência reativa instantânea generalizada, destacando suas diferenças e apresentando alguns resultados de simulação considerando a fonte e o filtro ideais.

O terceiro capítulo é dedicado ao estudo da teoria $p-q-r$, onde procurou-se verificar suas vantagens e desvantagens em relação às teorias estudadas no capítulo 2, bem como verificar se seu desempenho está de acordo com o que seus proponentes apregoam.

No quarto capítulo são descritos os circuitos de potência e de controle do filtro ativo paralelo baseado nas teorias $p-q$ e $p-q-r$. Adicionalmente, são apresentados alguns resultados de simulações digitais deste equipamento baseado nas duas teorias. O texto é finalizado com algumas conclusões e considerações finais.

Capítulo 2

Teoria $p-q$

Neste capítulo a Teoria de Potência Real e Imaginária Instantânea - teoria $p-q$ é descrita. São apresentados os motivos pelos quais esta teoria tem sido largamente utilizada no controle de filtros de potência. É enfatizada a questão de seu significado físico, principalmente relacionado à potência de seqüência zero. É proposta uma nova estratégia para eliminação da corrente de neutro em sistemas trifásicos a quatro fios, sem o emprego de elementos armazenadores de energia. Finalmente, a teoria de potência reativa instantânea generalizada é estudada, buscando identificar as diferenças básicas em relação à teoria $p-q$ original.

2.1 Introdução

A teoria de potências real e imaginária instantâneas, a teoria $p-q$, foi originalmente apresentada por Akagi, Kanazawa e Nabae [13] em 1983. Entretanto, somente em 1984, após a apresentação de outro trabalho pelos mesmos autores [14], é que a teoria tornou-se efetivamente conhecida. Segundo Watanabe, Aredes e Akagi [11]:

“Takahashi e Nabae (1980) [19] e Takahashi, Fujiwara e Nabae (1981) [21] forneceram uma pista para a derivação da teoria $p-q$. De fato, a formulação obtida é, um subconjunto da teoria $p-q$, sem fornecer explicação para o significado físico das variáveis”.

Em 1993, Watanabe, Richard e Aredes, fizeram um estudo detalhado da teoria $p-q$, expandindo seus resultados para sistemas trifásicos a quatro fios e desbalanceados, considerando a potência de seqüência zero [22].

Durante a década de 90, já com uma base formulada sobre as definições de potências e as estratégias de controle de filtros ativos, aprofundaram-se as pesquisas em torno das teorias existentes, indicando uma tendência nas baseadas no domínio do tempo [6, 9]. Ainda neste período diversos estudos foram feitos visando esclarecer diversos aspectos da aplicação da teoria $p-q$, como os de Willems em 1994 [23] e Aredes e Watanabe (1995). Recentemente, alguns pontos têm recebido mais atenção, tais como: o significado físico das potências, a eliminação da componente de seqüência zero, a necessidade de elementos armazenadores de energia no filtro ativo, a natureza da potência de seqüência zero, a necessidade do pré-processamento das tensões para obtenção de correntes senoidais da fonte, dentre outros.

Por outro lado é inegável o sucesso da teoria $p-q$ em aplicações no controle de filtros ativos. No Japão, por exemplo, a maior parte das aplicações de filtro ativos em consumidores individuais na década passada foram baseadas nesta teoria, onde já foram comissionados mais de quinhentos filtros desde 1981 (dados de 1996) [6].

2.2 Potências instantâneas definidas nas coordenadas $\alpha - \beta - 0$

Inicialmente, antes da definição das potências instantâneas, é necessário realizar uma transformação das variáveis do sistema $a-b-c$ para o sistema nas coordenadas $\alpha\beta 0$ através da Transformação de Clarke [24]. A primeira vez que houve o emprego das componentes alfa, beta e zero nos cálculos das tensões e correntes do sistema elétrico foi em 1917, apresentado por W. W. Levis, no artigo "*Short Circuit Currents on Grounded Neutral Systems*". Mais tarde, em 1931 receberam a denominação 0, alfa, beta no artigo "*Problems Solved by Modified Symmetrical Components*", de Edith Clarke. A publicação deste artigo difundiu a utilização deste sistema de coordenadas e, em homenagem à sua autora, a transformação foi batizada com seu nome [25]. Uma das vantagens da utilização desta transformação é a obtenção direta das componentes de seqüência zero do sistema.

A transformação das tensões nas coordenadas $a-b-c$ para $\alpha - \beta - 0$ pode ser obtida a partir de:

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}. \quad (2.1)$$

A transformação de correntes a partir das coordenadas $a-b-c$ pode ser obtida de maneira análoga. A transformação inversa é dada por:

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix}. \quad (2.2)$$

A matriz \mathbf{T} de transformação das equações anteriores foi normalizada, objetivando obter invariância em potência. Isto significa que a potência calculada em qualquer das uma das duas coordenadas terá o mesmo valor. Em conseqüência, a matriz obtida é ortogonal, isto é, $\mathbf{T} \cdot \mathbf{T}' = \mathbf{T}' \cdot \mathbf{T} = \mathbf{I}$.

Neste sistema de coordenadas, a potência real instantânea p , a potência imaginária q e a potência de seqüência zero p_0 são obtidas a partir de:

$$\begin{bmatrix} p_0 \\ p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_0 & 0 & 0 \\ 0 & v_\alpha & v_\beta \\ 0 & v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}, \quad (2.3)$$

onde:

$$p_0 = v_0 i_0, \quad (2.4)$$

$$p = v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta, \quad (2.5)$$

$$q = v_\beta i_\alpha - v_\alpha i_\beta. \quad (2.6)$$

A potência instantânea trifásica em um sistema a três ou quatro fios quantifica a energia que flui entre dois subsistemas por unidade de tempo. Nas coordenadas $a-b-c$ é definida por:

$$p_{3\phi} = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c. \quad (2.7)$$

A potência trifásica instantânea calculada no sistema $\alpha - \beta - 0$ também é definida como sendo o produto da tensão pela corrente em cada uma das coordenadas, sendo igual ao valor no sistema $a - b - c$, devido à invariância em potência:

$$p_{3\phi} = v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta + v_0 i_0. \quad (2.8)$$

A partir de (2.3), obtém-se as parcelas $p_\alpha = v_\alpha i_\alpha$ e $p_\beta = v_\beta i_\beta$ que compõem a potência real p . Portanto, a potência real trifásica nas coordenadas $\alpha - \beta - 0$ pode ser escrita como sendo:

$$p_{3\phi} = p_\alpha + p_\beta + p_0 = p + p_0. \quad (2.9)$$

Verifica-se, portanto, que a potência trifásica instantânea vale a soma da potência real p e a potência de seqüência zero. Em um sistema trifásico a três fios ou a quatro fios, quando a tensão e/ou corrente de seqüência zero forem nulas, não existe

a potência p_0 . Neste caso, a potência trifásica instantânea $p_{3\phi}$ é igual a potência real p .

A potência imaginária q representa a parcela da potência total que não contribui com a realização de trabalho. Está presente em cada fase individualmente, porém se anula quando computadas todas as fases do sistema. A importância da compensação desta potência está intimamente relacionada com as perdas do sistema elétrico, sem contribuir com o fluxo total de potência ativa. Sendo a potência imaginária q mais geral que a potência reativa convencional, Akagi *et al.* atribuíram a unidade *iva* (em português Volt-Ampère Imaginário). A antiga idéia de que esta energia oscilava entre dois subsistemas foi abandonada (sistemas trifásicos). Esta oscilação está relacionada a uma potência ativa trifásica, que possui valor médio nulo [9]. Existe, contudo, uma estreita relação entre a potência imaginária q e a potência reativa convencional Q . A equação a seguir apresenta a expressão de q nas coordenadas $\alpha - \beta - 0$ e $a - b - c$:

$$q = -v_\alpha i_\beta + v_\beta i_\alpha = \frac{1}{\sqrt{3}}[(v_a - v_b)i_c + (v_b - v_c)i_a + (v_c - v_a)i_b] \quad (2.10)$$

Em um caso particular, quando as tensões e correntes do sistema são senoidais e equilibradas, a potência imaginária vale $3VI \sin \phi$, que corresponde ao valor da potência reativa convencional, sendo V e I os valores eficazes das tensões de fase e das correntes de linha, respectivamente.

A corrente reativa é uma parcela da corrente total que está presente no sistema, contudo não contribui com o fluxo total de energia entre dois subsistemas. Utilizando a Transformada de Clarke, esta parcela é facilmente obtida a partir de (2.3). Neste caso, como $v_0 = 0$ e $p_0 = 0$, tem-se:

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha q} \\ i_{\beta q} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ q \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Observa-se que as correntes reativas independem da componente de seqüência zero, devido à própria definição da potência imaginária instantânea (2.10). Adicionalmente, a potência real p foi anulada, de forma a obter correntes que possuam

contribuição apenas da potência imaginária. A influência da seqüência zero na potência reativa é um tema que tem gerado grande controvérsia entre os pesquisadores. Contudo, admitindo-se as definições para as potências baseadas na “Teoria $p-q$ original”, a seqüência zero está relacionada somente à potência p_0 , que é de natureza ativa. Nos capítulos posteriores, a influência da seqüência zero nas potências do sistema é discutida novamente, levando em consideração abordagens feita por outros autores, especialmente na teoria de potência instantânea baseada no sistema de referências girantes $p-q-r$.

A aplicação da teoria $p-q$ em filtros ativos permite uma compensação seletiva de potências. Esta é uma das grandes vantagens desta teoria, já que é possível um dimensionamento correto do filtro, frente às reais necessidades de sua aplicação. As potências p e q , quando decompostas em série de Fourier, apresentam um valor médio e outro oscilante, resultado da composição dos demais harmônicos, conforme mostrado a seguir:

$$p = \bar{p} + \tilde{p} \quad (2.12)$$

$$q = \bar{q} + \tilde{q}. \quad (2.13)$$

Em [26] é possível encontrar o desenvolvimento completo das expressões das potências instantâneas para o caso mais geral, isto é, na presença de desbalanços e harmônicos. Para isto, foram utilizadas as decomposições em série de Fourier e em Componentes Simétricas, ficando explicitada a influência das componentes de seqüência positiva, negativa e zero em cada uma das potências. Por exemplo, o valor da potência \bar{p} é devido aos produtos das componentes de tensão e corrente de seqüência positiva ou negativa de mesma freqüência.

A compensação de toda a potência imaginária da fonte ($q = \bar{q} + \tilde{q}$), e da parcela oscilante da potência real é dada por:

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha c} \\ i_{\beta c} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} \begin{bmatrix} v_{\alpha} & v_{\beta} \\ v_{\beta} & -v_{\alpha} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ q \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Esta compensação, contudo, não garante que as correntes da fonte sejam

senoidais caso hajam harmônicos nas tensões, mas sim que a potência real fornecida é constante, garantido condições ótimas de fluxo de potência. No Capítulo 4 é apresentada a aplicação de filtros ativos paralelos utilizando a teoria $p-q$, onde são detalhados outros aspectos relativos à compensação de potência.

Considerando a presença de seqüência zero na tensão e corrente, a transformação inversa de (2.3) fornece:

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{v_0 v_{\alpha\beta}^2} \begin{bmatrix} v_{\alpha\beta}^2 & 0 & 0 \\ 0 & v_0 v_\alpha & v_0 v_\beta \\ 0 & v_0 v_\beta & -v_0 v_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_0 \\ p \\ q \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

onde,

$$v_{\alpha\beta}^2 = v_\alpha^2 + v_\beta^2$$

Esta transformação só é possível considerando $v_0 \neq 0$. A partir de (2.15), pode-se obter as correntes nas coordenadas $\alpha - \beta - 0$, isto é:

$$i_0 = \frac{v_{\alpha\beta}^2}{v_0 v_{\alpha\beta}^2} p_0 = \frac{1}{v_0} p_0 \quad (2.16)$$

$$i_\alpha = \frac{1}{v_{\alpha\beta}^2} v_\alpha p + \frac{1}{v_{\alpha\beta}^2} (v_\beta q) = i_{\alpha p} + i_{\alpha q} \quad (2.17)$$

$$i_\beta = \frac{1}{v_{\alpha\beta}^2} v_\beta p + \frac{1}{v_{\alpha\beta}^2} (-v_\alpha q) = i_{\beta p} + i_{\beta q} \quad (2.18)$$

Observando as equações anteriores, verifica-se que a teoria $p-q$ considera a componente de seqüência zero como sendo um circuito monofásico independente, uma vez que as correntes das fases “ α e β ” não estão associadas a esta seqüência. As correntes com o índice p e q são as componentes real e imaginária, respectivamente.

2.2.1 Significado físico das potências real, imaginária e de seqüência zero

Continuamente tem-se buscado a universalização de uma teoria de potências. Esta, por sua vez, deve atender a requisitos, tais como a interpretação dos fenômenos

físicos envolvidos e ser válida tanto para regime permanente quanto transitório. Particularmente, no estudo dos filtros ativos é indispensável um perfeito entendimento físico das variáveis envolvidas. Isto, por sua vez, é o que tem gerado as maiores discussões entre os pesquisadores, como os da área de eletrônica de potência.

Na teoria de potências instantâneas, a potência trifásica $p_{3\phi}$ quantifica o total de energia por unidade de tempo que está sendo transferida entre dois subsistemas ((2.8) e (2.9)). A grande vantagem desta definição é que, nas coordenadas $\alpha\beta 0$, fica evidente a contribuição da seqüência zero. A potência real, p , na ausência de tensão e/ou corrente de seqüência zero, quantifica este total de energia. Na presença de harmônicos e/ou desbalanços, a potência p pode ser separada em uma componente média e outra oscilante. A componente oscilante \tilde{p} , conforme mostrado em [26], pode ser gerada nas seguintes situações:

- “produtos de diferentes componentes de seqüência (+, -), mas de mesma freqüência;
- produtos de uma mesma componente de seqüência, e de diferentes freqüências;
- produtos de diferentes componentes de seqüência (+, -) e de diferentes freqüências.”

Os harmônicos de tensão e corrente que forem da mesma freqüência e seqüência contribuem nos valores das potências médias de p e q . Contudo, isto implica que também haverá contribuição em suas parcelas oscilantes.

A potência imaginária q não contribui com o fluxo de energia, uma vez que circula entre as fases do sistema. Considerando, por exemplo, as correntes $i_{\alpha q}$ e $i_{\beta q}$ definidas, respectivamente em (2.17) e (2.18), pode-se escrever:

$$v_{\alpha}i_{\alpha q} + v_{\beta}i_{\beta q} = v_{\alpha}\frac{1}{v_{\alpha\beta}^2}(v_{\beta}\cdot q) + v_{\beta}\frac{1}{v_{\alpha\beta}^2}(-v_{\alpha}\cdot q) = 0 \quad (2.19)$$

Considerando, portanto, a potência reativa instantânea existente em cada fase individualmente, porém desaparece quando computadas ambas as fases simultaneamente. Este resultado também é válido nas coordenadas $a-b-c$ [22].

Finalmente, a potência de seqüência zero, p_0 , definida como sendo o produto da tensão e corrente de seqüência zero, é de natureza ativa, segundo a teoria $p-q$. Conforme apresentado em [26], as potências monofásicas de seqüência zero são iguais nas três fases do sistema $a-b-c$. Além disso, é caracterizada como uma potência ativa, uma vez que não se anulam quando são consideradas as três fases simultaneamente, diferentemente da potência imaginária (2.19). Adicionalmente, conforme [9], p_0 não produz \bar{p}_0 sem produzir também uma potência \tilde{p}_0 oscilante. A parcela média, contudo, corresponde a uma transferência de energia unidirecional. Na Seção 2.4, o problema da potência de seqüência zero é retomado.

2.3 Compensação de sistemas trifásicos a quatro fios

2.3.1 Introdução

O princípio da compensação através do filtro ativo paralelo é explorada nesta seção, onde as parcelas indesejadas das potências da carga deixam de ser fornecidas pela fonte. Destarte, de acordo com o critério escolhido para a seleção das potências a serem compensadas, além das condições de tensão na carga, diferentes resultados podem ser obtidos para as correntes ou potências resultantes da fonte. A situação ideal seria a obtenção de correntes senoidais equilibradas e potência constante da fonte. Contudo, estas condições não podem ocorrer de forma simultânea [9], dependendo dos componentes presentes nas tensões do sistema.

2.3.2 Compensação de cargas não lineares

A teoria de potências instantâneas baseadas nas coordenadas $\alpha\beta 0$ tem sido amplamente utilizada na compensação de sistemas trifásicos a três e quatro fios, em condições genéricas de tensões e correntes. É possível realizar, de forma seletiva, a compensação das potências \tilde{p} , \tilde{q} , \bar{q} e $p_0 = \bar{p}_0 + \tilde{p}_0$. Já foi demonstrado em trabalhos anteriores que é possível realizar a compensação da potência imaginária q sem a necessidade de elementos armazenadores de energia [9, 13, 14, 26]. Con-

tudo, a compensação da potência de seqüência zero, a princípio, requer a utilização destes elementos. Em [9] é proposta uma estratégia para a compensação da seqüência zero através do balanço de energia no interior do filtro ativo, isto é, o valor médio da potência trifásica fornecida pelo filtro é nula. Na Seção 2.4, é proposta uma estratégia para a compensação da seqüência zero sem o emprego de elementos armazenadores de energia, onde são comparados os resultados com outras propostas existentes.

A compensação é realizada a partir da obtenção das tensões e correntes instantâneas do sistema que, por sua vez, são transformadas das coordenadas $a-b-c$ para $\alpha - \beta - 0$, ou seja:

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}. \quad (2.21)$$

A partir das tensões e correntes obtidas, calculam-se as potências real e imaginária instantâneas:

$$\begin{bmatrix} p_0 \\ p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_0 & 0 & 0 \\ 0 & v_\alpha & v_\beta \\ 0 & v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}. \quad (2.22)$$

As potências calculadas devem ser separadas em suas parcelas médias e oscilantes, obtendo:

$$p_0 = \bar{p}_0 + \tilde{p}_0 \quad (2.23)$$

$$p = \bar{p} + \tilde{p} \quad (2.24)$$

$$q = \bar{q} + \tilde{q} \quad (2.25)$$

Conhecidas as potências instantâneas e suas parcelas, calculam-se, então, as correntes de compensação que serão fornecidas pelo filtro ativo, isto é:

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha c} \\ i_{\beta c} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} \begin{bmatrix} v_{\alpha} & v_{\beta} \\ v_{\beta} & -v_{\alpha} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -\tilde{p} + \bar{p}_0 \\ -q \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

O cálculo acima leva em consideração o caso em que deseja-se realizar a compensação de toda a potência instantânea imaginária, além da parcela oscilante da potência real. A parcela \bar{p}_0 somada ao componente $-\tilde{p}$ realiza a compensação da potência de seqüência zero com balanço de energia, conforme proposto em [9]. Nesta situação, há condições ótimas de fluxo de potência, com a fonte fornecendo apenas \bar{p} .

O balanço de energia é realizado, uma vez que a potência de seqüência zero é totalmente fornecida pelo filtro ativo. Isto ocorre quando são determinadas as correntes de compensação nas coordenadas a - b - c , onde a corrente i_0 é considerada em (2.27). Para o suprimento da parcela média \bar{p}_0 seria necessário uma fonte no lado CC do filtro. Isto é contornado através do consumo de potência real constante numericamente igual a \bar{p}_0 , conforme (2.26). Nesta condição, a potência média trifásica do filtro ativo é nula, sendo necessários apenas elementos armazenadores de energia para realizar o intercâmbio de energia entre a carga e o filtro das parcelas \tilde{p}_0 e \tilde{p} . Os sinais das potências são determinados utilizando-se a convenção de que as correntes entram no filtro ativo.

As correntes de compensação nas coordenadas a - b - c são obtidas a partir da transformação inversa de Clarke, isto é:

$$\begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i_{cc} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -i_0 \\ i_{\alpha c} \\ i_{\beta c} \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

Caso não haja componente de seqüência zero nas tensões, a corrente i_0 da carga também é compensada, contudo o balanço de energia é desnecessário, uma vez que, neste caso, $p_0 = 0$.

Esta estratégia de controle também é denominada *estratégia de controle com potência constante da fonte*, já que a fonte fornece apenas potência real constante para a carga. Por outro lado, as correntes da fonte não são senoidais após a compen-

sação, já que não é possível atender às duas condições simultaneamente [9] quando há componentes de mesma seqüência e freqüência simultaneamente nas tensões e correntes.

Caso o objetivo seja obter correntes senoidais equilibradas, independentemente das condições das tensões do sistema, emprega-se outra estratégia, denominada *estratégia de controle com correntes senoidais da fonte*. Para obter-se esta condição, as potências na equação (2.22) são calculadas a partir de tensões oriundas de um detector de seqüência positiva, onde é considerada somente a componente V_{+1} (fundamental e de seqüência positiva) das tensões. A potência fornecida pela fonte, neste caso, não é mais constante, uma vez que no cálculo das potências para determinação das correntes de compensação, parcelas das tensões diferentes de V_{+1} quando multiplicadas pelas correntes de carga produzem uma potência que não é computada, porém presente no sistema. Esta, por sua vez, deverá ser fornecida pela fonte. Adicionalmente, não é necessário determinar a potência p_0 , já que a tensão de seqüência zero não é considerada e, conseqüentemente, seu valor também é zero. Outro aspecto que deve ser salientado é que, para o controle do filtro ativo, a carga comporta-se como se estivesse sendo alimentada por uma fonte equilibrada e senoidal. Contudo, caso haja componentes de seqüência zero nas tensões e correntes, o filtro irá produzir (ou consumir) uma parcela com valor médio diferente de zero de potência de seqüência zero (\bar{p}_0), conforme explicado na página 30. Isto é contornado com o auxílio do controlador de tensão do capacitor do filtro ativo, apresentado no Capítulo 4. Também neste capítulo, pode-se encontrar o detalhamento do detector de seqüência positiva proposto em [9].

A fim de apresentar o princípio de compensação baseado na teoria $p-q$, foram realizadas algumas simulações utilizando o *Matlab*, onde são considerados sistemas com tensões e correntes genéricas, que não representam, necessariamente, situações reais. A freqüência da componente fundamental é 50 Hz tanto para este capítulo, quanto para o seguinte. A princípio, pretende-se obter tanto correntes senoidais e potência constante da fonte. Três casos base foram realizados: o primeiro considerando tensões senoidais equilibradas. No segundo, foram adicionados componentes de seqüência zero nas tensões e, no último, foi adicionada uma componente de seqüência negativa em relação ao segundo caso. Em comum aos três, as correntes possuem componentes de seqüência zero e negativa, além da fundamental.

No primeiro caso, a fonte possui tensões trifásicas senoidais e equilibradas. As correntes possuem as seguintes componentes:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{01} = 0,2\angle\pi/2, \quad \dot{I}_{+1} = 1\angle -\pi/5, \quad \dot{I}_{-1} = 0,2\angle 0, \quad \dot{I}_{-2} = 0,2\angle 0, \quad A; \\ \dot{I}_{03} = 0,2\angle 0, \quad \dot{I}_{+4} = 0,2\angle 0, \quad \dot{I}_{-5} = 0,2\angle 0 \quad A, \end{aligned}$$

onde os subíndices 0, + e - significam as seqüências zero, positiva e negativa, respectivamente, enquanto 1, 2, 3, 4 e 5 correspondem à ordem dos harmônicos.

As tensões da fonte e as correntes de carga podem ser observadas na Figura 2.1. Na Figura 2.2 é possível observar os resultados quando aplica-se o algoritmo apresentado. Neste exemplo, a potência de p_0 vale zero, já que as tensões da fonte são senoidais e equilibradas. A potência trifásica da fonte é constante, já que o filtro compensa a parcela oscilante da potência real. As correntes resultantes da fonte tornaram-se senoidais e equilibradas, já que a potência oscilante que foi compensada pelo filtro é devida aos harmônicos da corrente de carga e também pela componente fundamental de seqüência negativa. Adicionalmente, verifica-se que o filtro apresenta valor médio nulo de potência trifásica, devido à compensação da potência real oscilante.

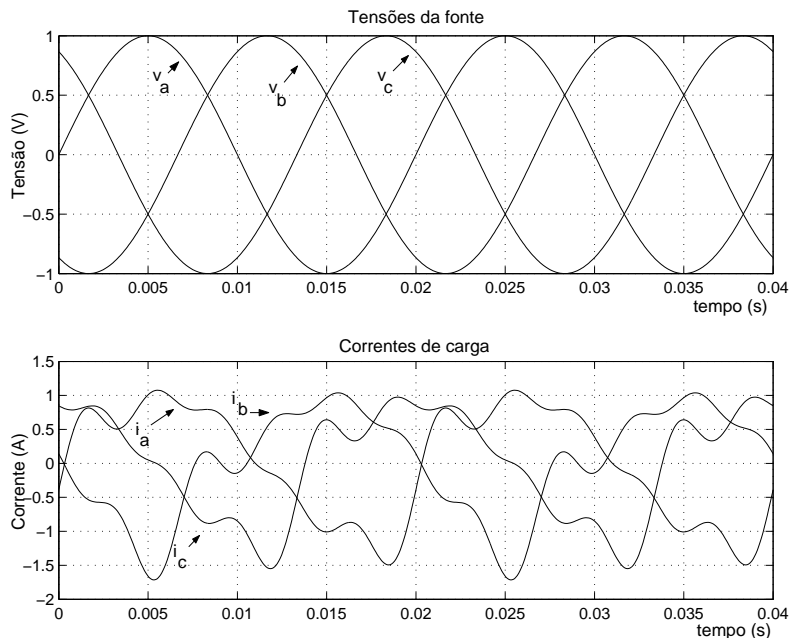


Figura 2.1: Teoria $p-q$ - correntes e tensões caso 1.

Introduzindo-se, agora, componentes de seqüência zero nas tensões da fonte (caso

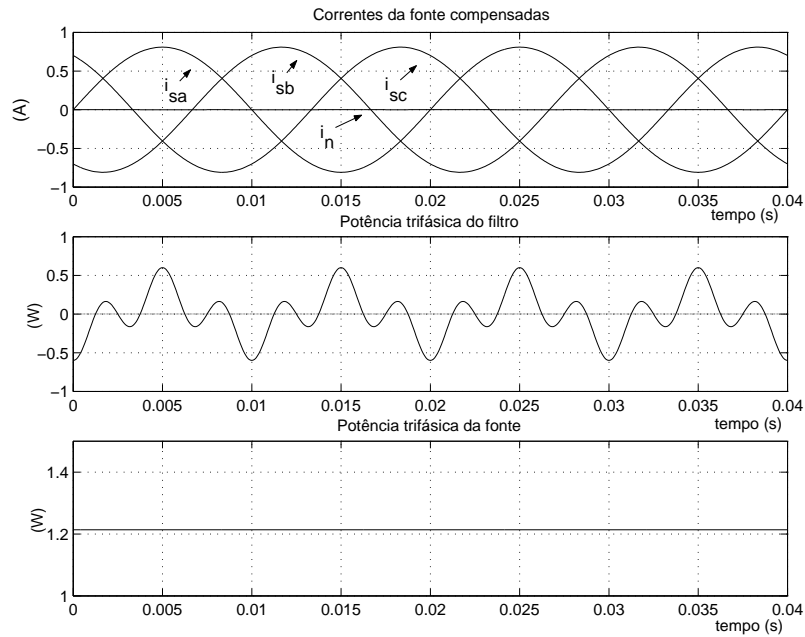


Figura 2.2: Teoria $p-q$ - sistema compensado caso 1.

2), busca-se verificar a diferença para o primeiro exemplo. Devido à existência de seqüência zero tanto nas tensões, quanto nas correntes, haverá p_0 . Será necessário, portanto, haver o balanço de energia no filtro. Sejam as seguintes condições de tensão e corrente para o segundo caso:

$$\dot{V}_{+1} = 1\angle 0, \quad \dot{V}_{01} = 0,2\angle 0, \quad \dot{V}_{03} = 0,2\angle 0 \quad V.$$

$$\dot{I}_{01} = 0,2\angle \pi/3, \quad \dot{I}_{+1} = 1\angle -\pi/5, \quad \dot{I}_{-1} = 0,2\angle 0, \quad \dot{I}_{-2} = 0,2\angle 0 \quad A;$$

$$\dot{I}_{03} = 0,2\angle 0, \quad \dot{I}_{+4} = 0,2\angle 0, \quad \dot{I}_{-5} = 0,2\angle 0 \quad A.$$

As tensões e correntes para este caso podem ser observadas na Figura 2.3. No segundo caso, é possível verificar que está ocorrendo o balanço de energia, já que o filtro ativo apresenta potência média trifásica nula, além da fonte fornecer uma parcela adicional de potência ativa, quando comparado ao caso anterior. As correntes também são senoidais, apesar das tensões não serem. O motivo é que a presença da seqüência zero nas tensões não afeta (2.26) e as correntes são completamente compensadas. De (2.27), as componentes harmônicas das correntes estão incluídas em \tilde{p} , e totalmente compensadas pelo filtro ativo.

A diferença entre a potência trifásica do filtro ativo nos dois casos anteriores reside exatamente na parcela oscilante da potência de seqüência zero, que não era

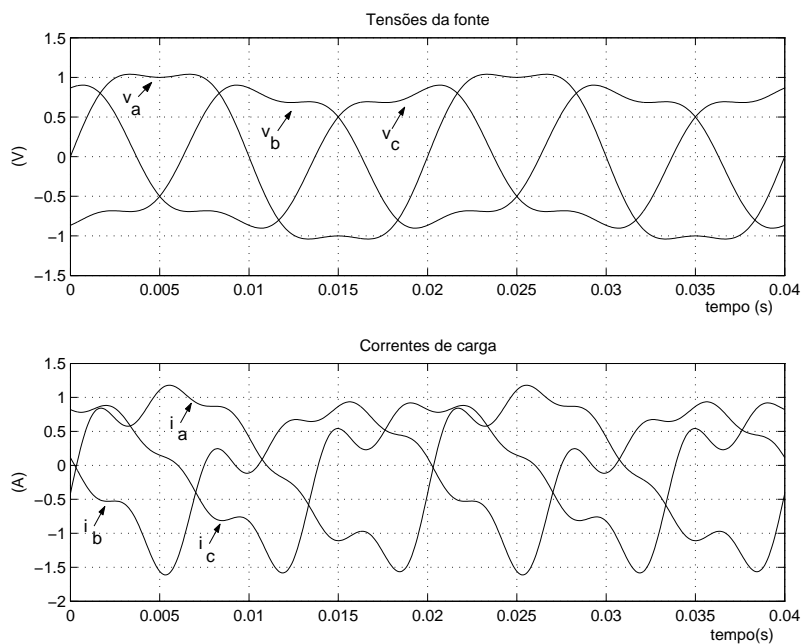


Figura 2.3: Teoria $p-q$ - correntes e tensões caso 2.

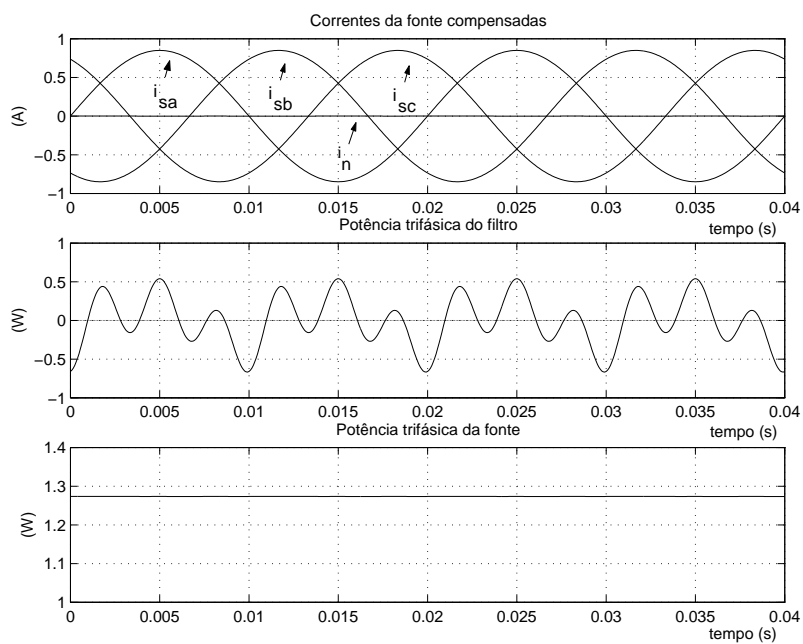


Figura 2.4: Teoria $p-q$ - sistema compensado caso 2.

compensada no primeiro caso, uma vez que $v_0 = 0$.

Finalmente, são introduzidas componentes de seqüência negativa nas tensões (caso 3). Considerando, então, as seguintes componentes de tensão e corrente:

$$\begin{aligned} \dot{V}_{+1} &= 1\angle 0, & \dot{V}_{01} &= 0,2\angle 0, & \dot{V}_{03} &= 0,2\angle 0, & \dot{V}_{-1} &= 0,2\angle 0 \quad V. \\ \dot{I}_{01} &= 0,2\angle \pi/3, & \dot{I}_{+1} &= 1\angle -\pi/5, & \dot{I}_{-1} &= 0,2\angle 0, & \dot{I}_{-2} &= 0,2\angle 0 \quad A; \\ \dot{I}_{03} &= 0,2\angle 0, & \dot{I}_{+4} &= 0,2\angle 0, & \dot{I}_{-5} &= 0,2\angle 0 \quad A. \end{aligned}$$

As correntes e tensões podem ser observadas na Figura 2.5. O resultado da aplicação do algoritmo é apresentado na Figura 2.6. Neste terceiro caso, a presença adicional da componente de seqüência negativa nas tensões da fonte fez com que as correntes compensadas deixassem de ser senoidais.

A distorção das correntes da fonte está relacionada à presença simultânea de componentes de seqüência negativa nas correntes de carga e nas tensões de alimentação. Quando existem componentes de seqüência positiva e negativa de mesma freqüência nas tensões e correntes, serão produzidas tanto parcelas médias, quanto oscilantes de potência real e imaginária [9]. Somente a parcela \tilde{p} é compensada. Contudo, as correntes harmônicas de seqüência positiva e negativa que produzem \bar{p} permanecerão no sistema, tornando as correntes da fonte não senoidais.

Contudo, a corrente de neutro foi eliminada. O objetivo principal do algoritmo foi alcançado, já que a fonte fornece apenas potência ativa constante para a carga. Com o balanço de energia, o filtro ativo possui potência trifásica média nula de saída, mais ainda necessitando de elementos armazenadores de energia para realizar o intercâmbio de potência oscilante com a carga.

Neste último caso, foi possível verificar que não é possível atender à condição de potência constante e correntes senoidais e equilibradas da fonte concomitantemente. Esta seria uma situação ideal, já que haveria condições ótimas de fluxo de potência, sendo transmitida somente a energia que efetivamente realizaria trabalho com torque mecânico constante no gerador, aliada a correntes que não geram distorção harmônica nas tensões, atuando no sentido de melhorar a qualidade de energia do sistema. Contudo, caso seja fornecida ao algoritmo somente a componente fundamental e de seqüência positiva das tensões, obtém-se correntes senoidais da fonte,

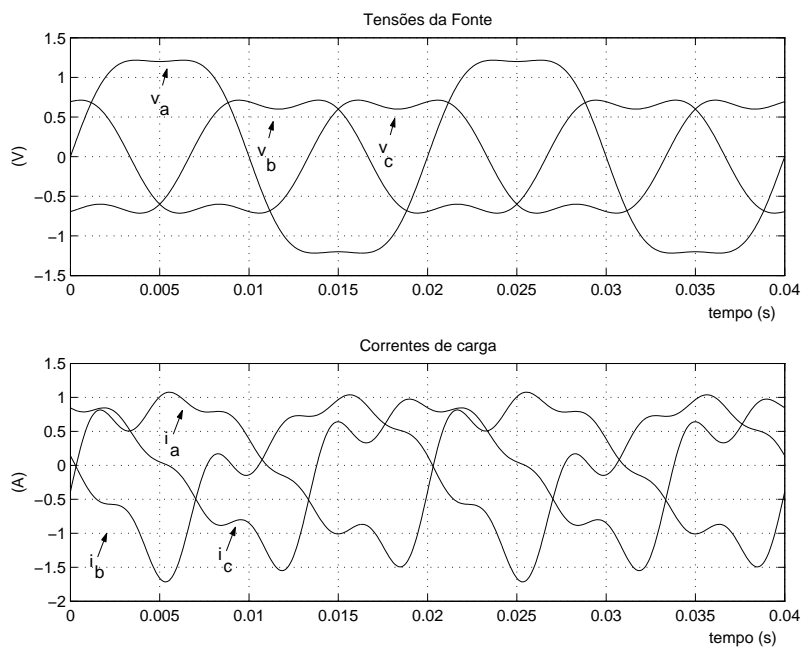


Figura 2.5: Teoria $p-q$ - correntes e tensões caso 3.

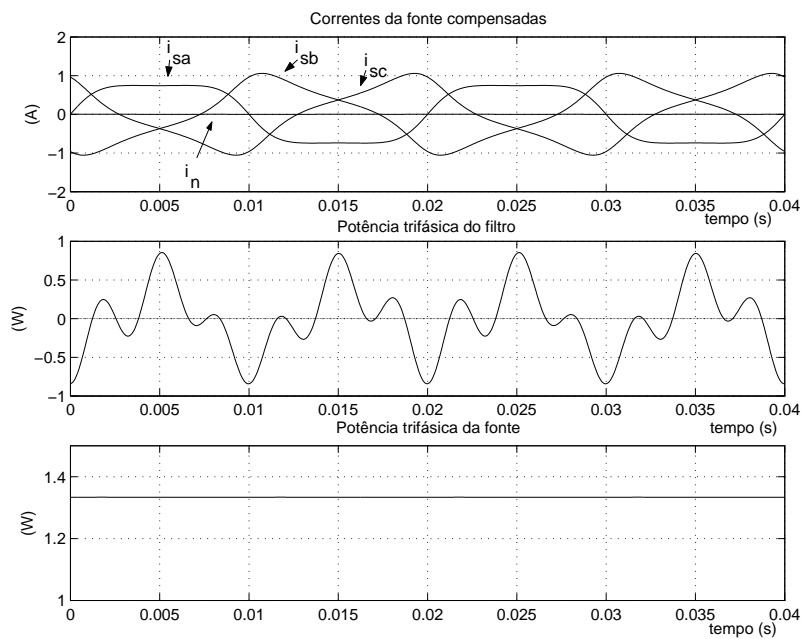


Figura 2.6: Teoria $p-q$ - sistema compensado caso 3.

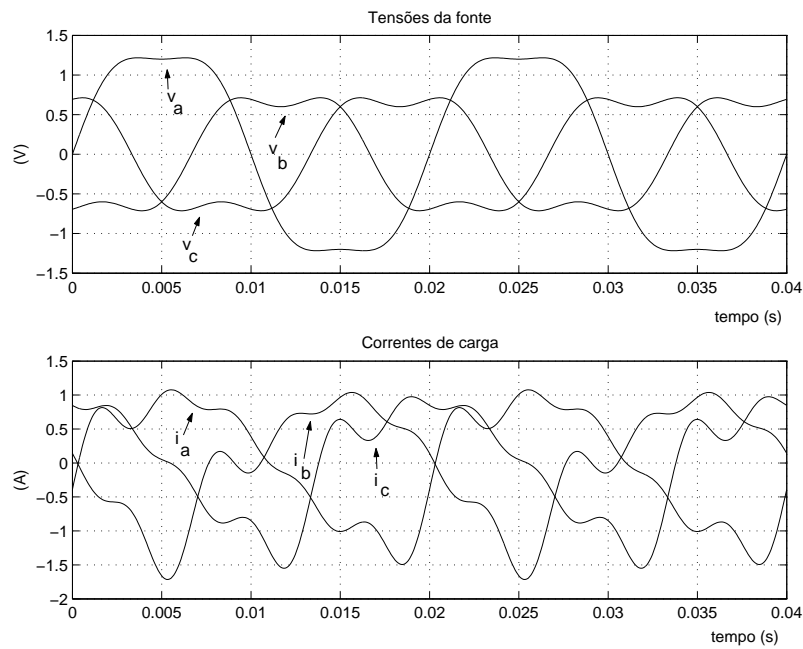


Figura 2.7: Teoria $p-q$ - correntes e tensões caso 4.

independentemente das condições das tensões da fonte e das correntes de carga, conforme já mencionado anteriormente. Este procedimento dá origem à “*estratégia de controle de correntes senoidais da fonte*” [9].

Fornecendo ao algoritmo somente a parcela de seqüência positiva V_{+1} as parcelas das potências a compensar incluirão todo o conteúdo harmônico presente em p e q . Como consequência, as correntes da fonte compensadas tornar-se-ão senoidais. Para exemplificar, considerando o caso anterior, fornecendo somente para o algoritmo a tensão V_{+1} da fonte.

Na Figura 2.7 é possível observar as tensões e correntes do sistema considerado, que são iguais ao caso anterior (caso 3). Já na Figura 2.8, verifica-se a modificação do algoritmo, quando é utilizada somente a tensão fundamental de seqüência positiva. O resultado imediato é a obtenção de correntes senoidais e equilibradas da fonte, como esperado. O custo desta escolha é constatado através da potência da fonte, que perdeu sua condição ótima. A parcela oscilante \tilde{p} observada é devida ao produto das componentes de seqüência negativa presentes (V_{-n}) com a componente fundamental de seqüência positiva da corrente.

Com este último exemplo foi possível comprovar que o algoritmo fornece correntes senoidais da fonte. Entretanto, o filtro também perde a condição ótima de potência

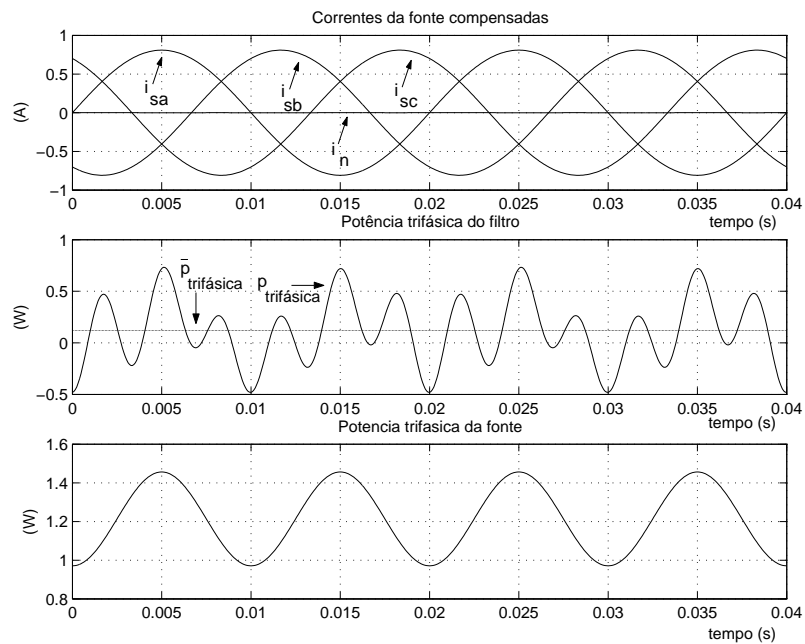


Figura 2.8: Teoria p - q - sistema compensado caso 4, onde é fornecida somente a tensão fundamental e de seqüência positiva.

neste caso. Por exemplo, quando o sistema possui tensões com componentes de seqüência negativa, as correntes desta seqüência injetadas pelo filtro ativo produzirão uma parcela de potência média, já que a tensão vista pelo dispositivo é a mesma da carga (a Figura 2.8 mostra que $\bar{p}_{3\phi} \neq 0$). Nesta condição, a princípio, seria necessária uma fonte no lado CC para fornecer esta parcela de potência. Raciocínio análogo foi feito em relação à componente de seqüência zero, já que com o emprego do detector de seqüência positiva, a potência p_0 é nula sob o ponto de vista do controle do filtro, não realizando o balanço de energia. Este problema é contornado utilizando-se o controle de tensão do capacitor, proposto em [9], que será objeto de estudo no Capítulo 4.

2.4 Compensação da componente de seqüência zero sem elementos armazenadores de energia

Na década de 80, *Akagi et al.* [13, 14] mostraram que era possível realizar a compensação da potência imaginária sem o emprego de elementos armazenadores de energia. A presença destes componentes está associada somente ao funcionamento do inversor. Mais recentemente, pesquisadores têm discutido a necessidade destes elementos na compensação da componente de seqüência zero. A dispensa de elementos armazenadores de energia só é possível quando a potência trifásica instantânea do filtro ativo é nula, isto é, não há consumo ou fornecimento de energia em qualquer instante. Na seção anterior, foi possível verificar que é possível eliminar a corrente de neutro nesta situação somente quando não há potência de seqüência zero. Quando está presente, contudo, elementos armazenadores são necessários devido à parcela oscilante da potência p_0 , onde o filtro consome/absorve energia ao longo do tempo. O balanço de energia, neste caso, permite que a parte média desta potência seja fornecida, porém consumindo uma potência adicional $\Delta\bar{p} = \bar{p}_0$ da fonte.

Nesta seção é proposta uma forma de compensação da componente de seqüência zero sem elementos armazenadores de energia na presença de componentes de seqüência zero nas tensões e correntes simultaneamente, empregando-se a teoria de potências instantâneas nas coordenadas $\alpha - \beta - 0$.

Considerando o algoritmo apresentado na Seção 2.3.2, a determinação das correntes de compensação nas coordenadas $\alpha - \beta$ é dada por:

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha c} \\ i_{\beta c} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} \begin{bmatrix} v_{\alpha} & v_{\beta} \\ v_{\beta} & -v_{\alpha} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -\tilde{p} + \bar{p}_0 \\ -q \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

Na equação (2.28), foi explorado o princípio da permuta de potência entre os modos homopolares (componentes de seqüência zero) e os modos não-homopolares (componentes de seqüência positiva e negativa) para a compensação de correntes de seqüência zero. Isto significa que é drenada do sistema uma potência real média produzida pelo modo não-homopolar, representado por tensões e correntes nas

coordenadas α e β e fornecida a potência p_0 . Logicamente, quando realizada a transformação inversa para as coordenadas a - b - c , a contribuição da corrente de neutro fica “diluída” entre as três fases. Este artifício permite realizar o balanço de energia no filtro, contudo ainda são necessários elementos armazenadores de energia, em virtude da presença da parcela oscilante \tilde{p}_0 .

Considerando o cálculo da potência reativa pelo método de minimização, onde o problema da determinação das correntes ativas i_{wk} ($k = a, b, c$) que produzem potência trifásica instantânea sem gerar potência reativa é resolvido através da aplicação do método dos Multiplicadores de Lagrange [9, 26, 27], são dadas por:

$$\begin{bmatrix} i_{wa} \\ i_{wb} \\ i_{wc} \end{bmatrix} = \frac{p_{3\phi}}{v_a^2 + v_b^2 + v_c^2} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}. \quad (2.29)$$

Analogamente, as correntes $i_{\alpha p_0}$ e $i_{\beta p_0}$:

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha p_0} \\ i_{\beta p_0} \end{bmatrix} = \frac{p_0}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix}. \quad (2.30)$$

representam as correntes no modo não-homopolar que produzem potência real numericamente idêntica à potência de seqüência zero produzida por v_0 e i_0 (modo homopolar).

Como o algoritmo existente realiza a compensação de toda a potência de seqüência zero através da componente i_0 em (2.27), é possível o filtro absorver/drenar esta parcela de energia produzindo potência real p em fluxo oposto, via coordenadas $\alpha\beta$, isto é:

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha c} \\ i_{\beta c} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ -q \end{bmatrix} + \frac{p_0}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix}. \quad (2.31)$$

As correntes de compensação nas coordenadas a - b - c podem ser obtidas da mesma forma, isto é:

$$\begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i_{cc} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -i_0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ i_{\alpha c} \\ i_{\beta c} \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

Desta forma, está garantido que a potência ativa instantânea trifásica do filtro é nula a todo instante. O filtro, desta forma, não necessita de elementos armazenadores de energia para a compensação da potência de seqüência zero. O balanço de energia no filtro para a compensação da seqüência zero está garantido, pois enquanto é fornecido p_0 a partir do primeiro termo de (2.32), o segundo termo faz o filtro consumir a mesma quantidade de energia na forma de uma potência real p . Verifica-se que a compensação das demais potências continua inalterada. Caso seja desejável, a potência real oscilante \tilde{p} pode também ser compensada, bastando incluí-la em (2.31), isto é:

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha c} \\ i_{\beta c} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} \begin{bmatrix} v_{\alpha} & v_{\beta} \\ v_{\beta} & -v_{\alpha} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -\tilde{p} \\ -q \end{bmatrix} + \frac{p_0}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} \begin{bmatrix} v_{\alpha} \\ v_{\beta} \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

Cabe ressaltar que, neste caso, elementos armazenadores de energia passam a ser necessários novamente, devido à compensação de \tilde{p} da carga.

Para exemplificar a estratégia proposta, são novamente utilizados os sistemas genéricos já apresentados na seção anterior. Em função do objetivo específico para esta demonstração, são considerados sistemas com seqüência zero tanto nas tensões, quanto nas correntes. São analisados dois casos: no primeiro as tensões e correntes possuem apenas componentes de seqüência zero e a fundamental. No segundo, serão introduzidas componentes de seqüência negativa. Inicialmente, sejam as seguintes componentes de tensão e corrente, apresentadas na Figura 2.9:

$$\begin{aligned} \dot{V}_{+1} &= 1\angle 0, & \dot{V}_{01} &= 0,2\angle 0, & \dot{V}_{03} &= 0,2\angle 0 \quad V; \\ \dot{I}_{01} &= 0,2\angle \pi/3, & \dot{I}_{+1} &= 1\angle -\pi/5, & \dot{I}_{03} &= 0,2\angle 0 \quad A. \end{aligned}$$

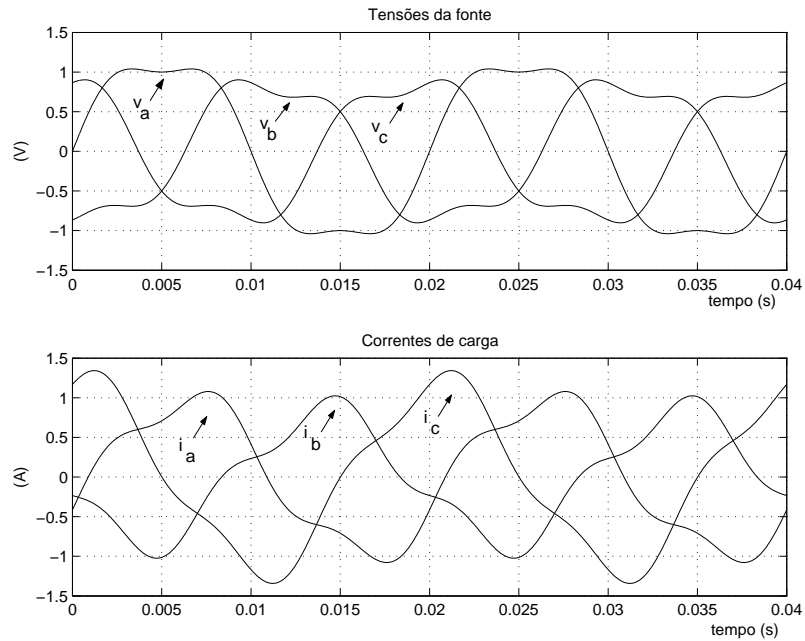


Figura 2.9: Compensação da corrente de neutro sem elementos armazenadores de energia baseada na teoria $p-q$ - Tensões e correntes do sistema no primeiro caso.

Após a aplicação do algoritmo proposto, os resultados podem ser vistos na Figura 2.10. Verifica-se que o objetivo principal da proposta é atingido, isto é, ocorre a compensação da potência de seqüência zero, com a eliminação da corrente de neutro, sem elementos armazenadores de energia, já que a potência trifásica do filtro é nula em qualquer instante. Contudo, há um custo que deve ser levado em consideração: a potência trifásica fornecida pela fonte não é mais constante, uma vez que está sendo drenada pelo filtro uma potência \tilde{p} que corresponde a todo instante ao valor da potência \tilde{p}_0 da carga. Logo, a parcela oscilante da potência trifásica da fonte é devida somente ao produto da seqüência positiva da fonte com harmônicos de seqüência positiva e negativa introduzidos pelo filtro.

Um outro exemplo pode ser realizado, considerando-se um caso mais geral que o anterior, onde foram adicionados componentes de seqüência negativa na corrente de carga e na tensão da fonte. Os valores utilizados são os mesmos já empregados no terceiro caso da seção anterior, isto é:

$$\begin{aligned} \dot{V}_{+1} &= 1\angle 0, & \dot{V}_{01} &= 0,2\angle 0, & \dot{V}_{03} &= 0,2\angle 0, & \dot{V}_{-1} &= 0,2\angle -0V. \\ \dot{I}_{01} &= 0,2\angle \pi/3, & \dot{I}_{+1} &= 1\angle -\pi/5, & \dot{I}_{-1} &= 0,2\angle 0, & \dot{I}_{-2} &= 0,2\angle 0 \text{ A}. \\ \dot{I}_{03} &= 0,2\angle 0, & \dot{I}_{+4} &= 0,2\angle 0, & \dot{I}_{-5} &= 0,2\angle 0 \text{ A}. \end{aligned}$$

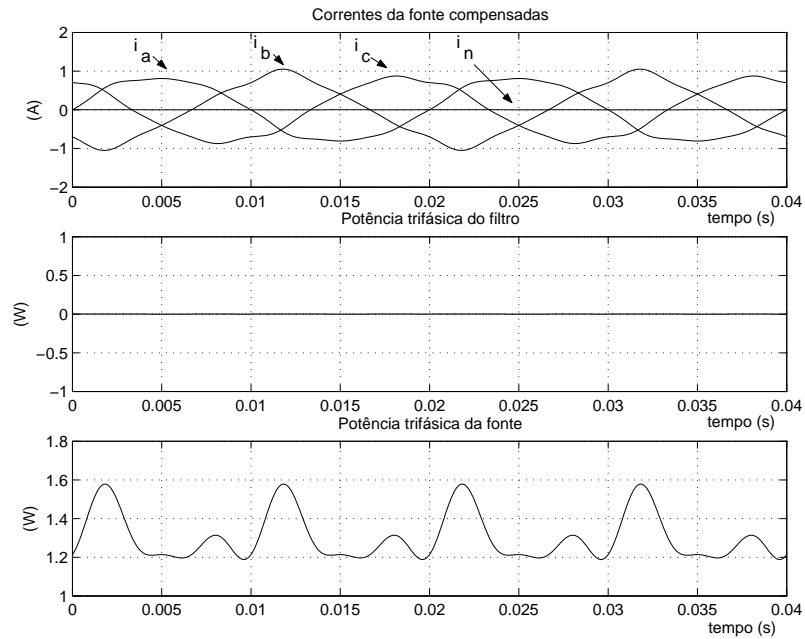


Figura 2.10: Compensação da corrente de neutro sem elementos armazenadores de energia baseada na teoria $p-q$ - Correntes e potências do sistema compensado no primeiro caso.

As tensões e corrente anteriores podem ser visualizadas na Figura 2.11 e os resultados da aplicação do algoritmo considerando a compensação de \tilde{p} da carga, dada por (2.33), é mostrado na Figura 2.12.

A consequência, neste caso, é que a potência trifásica instantânea do filtro não é mais nula, sendo necessários, portanto, elementos armazenadores de energia. Este fato não é devido à presença da potência de seqüência zero, mas sim pela compensação da potência real oscilante \tilde{p} da carga. Isto pode ser observado na Figura 2.12, pois há simetria entre a potência trifásica instantânea do filtro ativo e a potência \tilde{p} da carga que está sendo compensada. A potência trifásica fornecida pela fonte é igual ao caso anterior, uma vez que sua componente oscilante é devida somente ao valor de \tilde{p}_0 , incluído em (2.33), que é a mesma nos dois casos.

A partir dos exemplos apresentados, conclui-se que existem três alternativas para a realização da compensação de sistemas trifásicos a quatro fios empregando-se a teoria $p-q$. A primeira estratégia possibilitou a compensação de todas as potências indesejáveis consumidas pela carga, possibilitando um fluxo ótimo de potência na fonte. Neste caso, contudo, verificou-se que, sob determinadas condições, não é

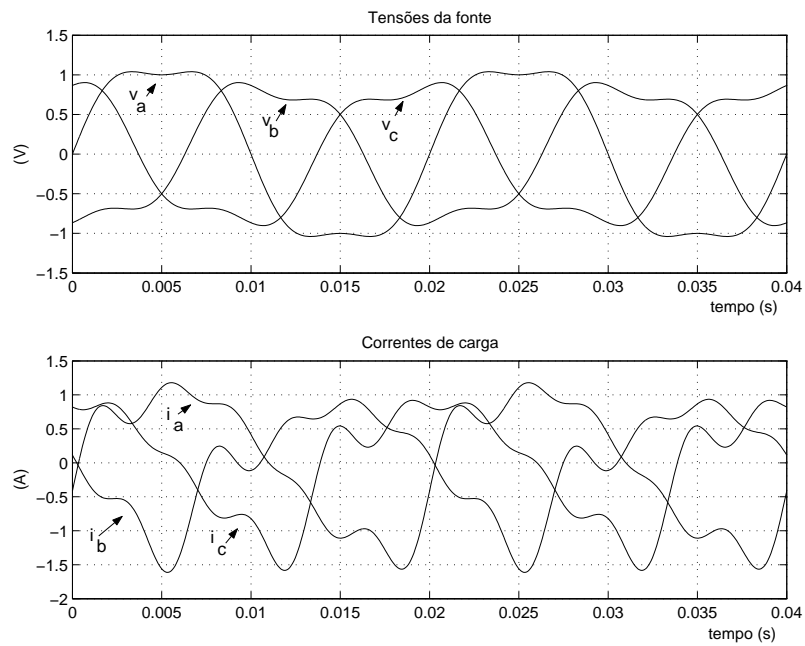


Figura 2.11: Compensação da corrente de neutro sem elementos armazenadores de energia baseada na teoria $p-q$ - correntes e tensões do sistema compensando \tilde{p} .

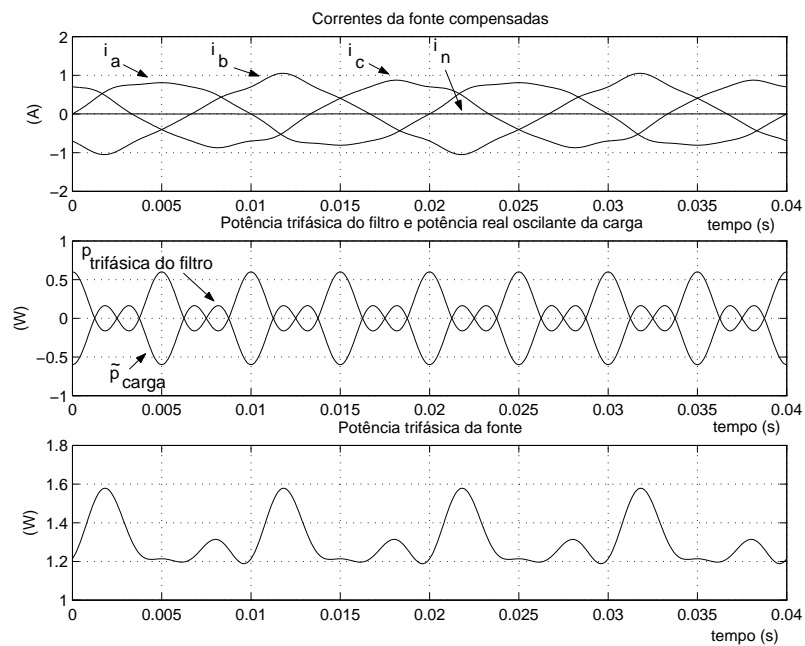


Figura 2.12: Compensação da corrente de neutro sem elementos armazenadores de energia baseada na teoria $p-q$ - correntes e potências do sistema compensando \tilde{p} .

possível existir concomitantemente fluxo de potência constante e correntes senoidais. Visando obter correntes senoidais em quaisquer condições, a segunda alternativa utiliza um detector de seqüência positiva, com o custo associado à existência de uma potência oscilante sendo drenada da fonte. Finalmente, a última alternativa é útil quando deseja-se empregar o filtro ativo para compensação da componente de seqüência zero sem a utilização de elementos armazenadores de energia. Verificou-se, entretanto, que as correntes não tornam-se senoidais e a potência trifásica da fonte não é constante. Caberá ao projetista do filtro escolher qual estratégia é mais conveniente, levando-se em consideração as condições de instalação do filtro ativo de potência.

2.5 Teoria de potência reativa instantânea generalizada

A teoria de potência reativa instantânea generalizada foi formulada inicialmente por *Nabae et al.* em 1994 [28, 29] e consolidada por *Peng et al.* em 1996 e 1998 [30, 31]. Em 1999, *Akagi et al.* publicaram um trabalho onde são comparadas a teoria proposta originalmente em 1983, apresentada neste capítulo, e a teoria que dá nome a esta Seção [32]. Esta, por sua vez, foi denominada de “*teoria modificada*” para que fosse distinguida da teoria original. Este termo, portanto, será utilizado para fazer referência a esta teoria.

A idéia de incluir este tópico neste trabalho visa realizar uma transição para o Capítulo 3, onde outra teoria de potências instantâneas, a teoria $p-q-r$ é apresentada. O elo de ligação reside na influência da componente de seqüência zero na potência imaginária, já que a teoria $p-q$ modificada subdivide esta potência em duas, da mesma forma que a teoria $p-q-r$, também dividindo a potência reativa em duas. A influência da componente de seqüência zero nas potências real e imaginária da teoria $p-q$ original já tinha sido analisada em 1993, quando Lima e Greenhalg [33] desenvolveram conceitos matemáticos levando em consideração esta componente. Contudo, não houve uma interpretação física destes conceitos.

A teoria $p-q$ modificada foi originalmente apresentada nas coordenadas $a-b-c$,

contudo, conforme provado em [31], é possível empregar a teoria utilizando-se das coordenadas $\alpha - \beta - 0$, uma vez que as potências p e q são iguais, independentemente do sistema de coordenadas utilizado. Neste trabalho é adotado o sistema de coordenadas baseado na Transformação de Clarke das coordenadas $a-b-c$, uma vez que facilita a comparação com a teoria original.

Considere um sistema trifásico a quatro fios, onde são definidos os vetores espaciais de tensão e corrente nas coordenadas $a-b-c$:

$$\vec{v}_{abc} = \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}, \quad \vec{i}_{abc} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

Denotando a matriz de Transformação de Clarke por $[C]$, os vetores espaciais nas coordenadas $\alpha - \beta - 0$ podem ser expressos por:

$$\vec{v}_{\alpha\beta 0} = \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_0 \end{bmatrix} = [C] \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad e \quad \vec{i}_{\alpha\beta 0} = \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = [C] \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

onde,

$$[C] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

A potência ativa instantânea $p_{3\phi}^1$ é definida por:

$$p_{3\phi} = \vec{v}_{\alpha\beta 0} \cdot \vec{i}_{\alpha\beta 0} = v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta + v_0 i_0, \quad (2.37)$$

isto é, equivalente ao produto escalar entre o vetor tensão e corrente definidos em

¹Originalmente, a potência ativa instantânea é denotada por p . Contudo, para não haver confusão com a potência instantânea real da teoria $p-q$, é utilizada a notação $p_{3\phi}$.

(2.34). Foi definido um vetor espacial de potência reativa instantânea (ou não-ativa), dado pelo produto vetorial dos vetores tensão e corrente:

$$q = \vec{v}_{\alpha\beta 0} \times \vec{i}_{\alpha\beta 0} = \begin{bmatrix} q_\alpha \\ q_\beta \\ q_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \begin{vmatrix} v_\beta & v_0 \\ i_\beta & i_0 \end{vmatrix} \\ \begin{vmatrix} v_0 & v_\alpha \\ i_0 & i_\alpha \end{vmatrix} \\ \begin{vmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ i_\alpha & i_\beta \end{vmatrix} \end{bmatrix}. \quad (2.38)$$

Agrupando (2.37) e (2.38), as potências instantâneas imaginárias q_0 , q_α e q_β e a potência real p são definidas por:

$$\begin{bmatrix} p_{3\phi} \\ q_\alpha \\ q_\beta \\ q_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta & v_0 \\ 0 & -v_0 & v_\beta \\ v_0 & 0 & -v_\alpha \\ -v_\beta & v_\alpha & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix}, \quad (2.39)$$

isto é:

$$p_{3\phi} = v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta + v_0 i_0 \quad (2.40)$$

$$q_\alpha = -v_0 i_\beta + v_\beta i_0 \quad (2.41)$$

$$q_\beta = v_0 i_\alpha - v_\alpha i_0 \quad (2.42)$$

$$q_0 = -v_\beta i_\alpha + v_\alpha i_\beta \quad (2.43)$$

As equações (2.8), (2.9) e (2.40) mostram que a potência ativa da teoria p - q modificada é a própria potência trifásica da teoria p - q (soma de p e p_0). A equação (2.43) define a potência reativa na coordenada “0”. Esta, por sua vez, é idêntica à definição original da potência imaginária instantânea definida por Akagi².

²A potência imaginária instantânea neste trabalho é definida por $q = v_\beta i_\alpha - v_\alpha i_\beta$, com um sinal menos em relação ao que foi proposto originalmente por Akagi [13]. Esta troca de sinais foi feita buscando uma perfeita compatibilização com a teoria convencional.

A principal diferença entre as duas teorias reside, especificamente, na definição de duas potências reativas instantâneas adicionais, q_α e q_β (equações (2.41) e (2.42)), que não contribuem para o fluxo total de energia entre dois subsistemas. Permanecem, contudo “circulando” entre as coordenadas “ $\beta - 0$ ” e “ $\alpha - 0$ ”, respectivamente.

A transformação inversa de (2.39) fornece as correntes nas coordenadas $\alpha - \beta - 0$:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{v_{\alpha\beta 0}^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & 0 & v_0 & -v_\beta \\ v_\beta & -v_0 & 0 & v_\alpha \\ v_0 & v_\beta & -v_\alpha & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_{3\phi} \\ q_\alpha \\ q_\beta \\ q_0 \end{bmatrix}, \quad (2.44)$$

com

$$v_{\alpha\beta 0}^2 = v_\alpha^2 + v_\beta^2 + v_0^2.$$

A partir de (2.44), obtém-se as correntes em cada uma das coordenadas, ou seja:

$$i_\alpha = \frac{1}{v_{\alpha\beta 0}^2} v_\alpha p_{3\phi} + \frac{1}{v_{\alpha\beta 0}^2} (v_0 q_\beta - v_\beta q_0) = i_{\alpha p_{3\phi}} + i_{\alpha q_\beta} - i_{\alpha q_0} \quad (2.45)$$

$$i_\beta = \frac{1}{v_{\alpha\beta 0}^2} v_\beta p_{3\phi} + \frac{1}{v_{\alpha\beta 0}^2} (v_\alpha q_0 - v_0 q_\alpha) = i_{\beta p_{3\phi}} + i_{\beta q_0} - i_{\beta q_\alpha} \quad (2.46)$$

$$i_0 = \frac{1}{v_{\alpha\beta 0}^2} v_0 p_{3\phi} + \frac{1}{v_{\alpha\beta 0}^2} (v_\beta q_\alpha - v_\alpha q_\beta) = i_{0 p_{3\phi}} + i_{0 q_\alpha} - i_{0 q_\beta} \quad (2.47)$$

As três correntes de cada fase possuem duas componentes: uma ativa e outra não-ativa. Chama a atenção o fato de que a corrente de seqüência zero possui uma componente não-ativa, o que contraria a teoria p - q original. Em um caso particular, considerando não haver componentes de seqüência zero nas tensões e correntes do sistema, as equações anteriores ficam:

$$i_{\alpha} = \frac{1}{v_{\alpha\beta}^2} v_{\alpha} p_{3\phi} + \frac{1}{v_{\alpha\beta}^2} (-v_{\beta} q_0) = i_{\alpha p} + i_{\alpha q} \quad (2.48)$$

$$i_{\beta} = \frac{1}{v_{\alpha\beta}^2} v_{\beta} p_{3\phi} + \frac{1}{v_{\alpha\beta}^2} (v_{\alpha} q_0) = i_{\beta p} + i_{\beta q} \quad (2.49)$$

Que são resultados idênticos (a menos do sinal) aos obtidos na teoria original dados por (2.17) e (2.18). Considerando uma condição mais geral, isto é, $v_0 \neq 0$ e $i_0 \neq 0$, é possível verificar que as parcelas ativas das correntes i_{α} e i_{β} possuem duas componentes: uma devida à potência $p_{\alpha\beta}$ (potência p da teoria original) e outra à potência p_0 :

$$i_{\alpha p} = \frac{1}{v_{0\alpha\beta}^2} v_{\alpha} p_{3\phi} = \frac{1}{v_{0\alpha\beta}^2} v_{\alpha} (p_{\alpha\beta} + p_0) = \frac{1}{v_{0\alpha\beta}^2} v_{\alpha} p_{\alpha\beta} + \frac{1}{v_{0\alpha\beta}^2} v_{\alpha} p_0 \quad (2.50)$$

$$i_{\beta p} = \frac{1}{v_{0\alpha\beta}^2} v_{\beta} p_{3\phi} = \frac{1}{v_{0\alpha\beta}^2} v_{\beta} (p_{\alpha\beta} + p_0) = \frac{1}{v_{0\alpha\beta}^2} v_{\beta} p_{\alpha\beta} + \frac{1}{v_{0\alpha\beta}^2} v_{\beta} p_0 \quad (2.51)$$

Se as correntes $i_{\alpha p}$ e $i_{\beta p}$ corresponderem às correntes de compensação de um sistema trifásico, haveria uma estreita relação (a menos da componente v_0 presente em $v_{0\alpha\beta}^2$) com o algoritmo proposto na seção anterior, onde buscou-se a eliminação da corrente de neutro sem elementos armazenadores de energia (2.30). Além disso, a parcela reativa não produz $p_{3\phi}$, não interferindo no balanço de energia.

Substituindo (2.48) e (2.49) em (2.44), é possível relacionar a teoria modificada

e a original:

$$p_{3\phi} = v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta + v_0 i_0 = p + p_0 \quad (2.52)$$

$$q_0 = -v_\beta i_\alpha + v_\alpha i_\beta = q \quad (2.53)$$

$$q_\alpha = v_\beta \cdot i_0 - v_0 i_\beta = v_\beta i_0 - \frac{v_0}{v_{\alpha\beta}^2} v_\beta p - \frac{v_0}{v_{\alpha\beta}^2} v_\alpha q =$$

$$v_\beta i_0 - v_0 i_{\beta p} - v_0 i_{\beta q} \quad (2.54)$$

$$q_\beta = -v_\alpha \cdot i_0 + v_0 i_\alpha = -v_\alpha \cdot i_0 + \frac{v_\alpha}{v_{\alpha\beta}^2} v_\alpha p - \frac{v_0}{v_{\alpha\beta}^2} v_\beta q =$$

$$-v_\alpha i_0 + v_0 i_{\alpha p} + v_0 i_{\alpha q} \quad (2.55)$$

Somando-se as potências q_α e q_β , teremos:

$$q_\alpha + q_\beta = i_0(v_\beta - v_\alpha) + v_0(i_\alpha - i_\beta) \quad (2.56)$$

De acordo com as equações anteriores, a potência $p_{3\phi}$ da teoria modificada³ corresponde à potência trifásica da teoria p - q . A potência q_0 é igual à potência instantânea imaginária q . Sem dúvida, a diferença entre as teorias está relacionada à definição das potências reativas nas coordenadas α e β , associadas diretamente à presença de correntes e/ou tensões de seqüência zero. Por exemplo, caso $v_0 = 0$, teremos que $p_{3\phi} = p$. Como a potência q_0 independe de componentes de seqüência zero, esta continua sendo igual à q da teoria p - q . Como a corrente i_0 é dividida em uma parcela ativa e outra reativa, a parcela correspondente à parte ativa deixa de existir, de acordo com a equação (2.47). A componente reativa permanece, mostrando que nestas condições é possível compensar a corrente i_0 sem elementos armazenadores de energia. Contudo, foi mostrado que este resultado também pode ser obtido empregando-se a teoria original.

2.5.1 Compensação de sistemas trifásicos a quatro fios empregando-se a teoria p - q modificada

A partir de agora, a teoria modificada é empregada na compensação de sistemas trifásicos a quatro fios. A seqüência de procedimentos para determinação das cor-

³Lembrando que, para evitar confusões, somente a notação $p_{3\phi}$ é utilizada. Na definição original da teoria modificada [28, 29], esta potência é representada pelo símbolo p .

rentes de compensação do filtro ativo é a mesma já utilizada na teoria $p-q$. O primeiro passo é a transformação das tensões e correntes do sistema das coordenadas $a-b-c$ para $\alpha-\beta-0$ (2.20) e (2.21). Depois, são determinadas as potências p , q_0 , q_α e q_β da carga, de acordo com (2.39). Em seguida, são escolhidas, de acordo com o critério de compensação adotado, quais as potências a compensar (ou a parcela média/oscilante de cada uma). A partir daí, as correntes de compensação são determinadas a partir de (2.44), de acordo com:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha^* \\ i_\beta^* \\ i_0^* \end{bmatrix} = \frac{1}{v_{0\alpha\beta}^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & 0 & v_0 & -v_\beta \\ v_\beta & -v_0 & 0 & v_\alpha \\ v_0 & v_\beta & -v_\alpha & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ q_\alpha^* \\ q_\beta^* \\ q_0^* \end{bmatrix}. \quad (2.57)$$

Por último, realiza-se a transformação inversa para obtenção das correntes de compensação nas coordenadas $a-b-c$, conforme:

$$\begin{bmatrix} i_a^* \\ i_b^* \\ i_c^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha^* \\ i_\beta^* \\ i_0^* \end{bmatrix}. \quad (2.58)$$

A fim de exemplificar as definições de potências estabelecidas na teoria modificada, a exemplo do que foi realizado na seção anterior, são apresentados alguns resultados de simulação, objetivando tornar mais clara a interpretação das grandezas envolvidas, bem como realizar uma comparação com os resultados obtidos na aplicação da teoria $p-q$. Considerando, então, as seguintes potências de compensação:

$$p_{3\phi}^* = 0 \quad (2.59)$$

$$q_\alpha^* = q_\alpha \quad (2.60)$$

$$q_\beta^* = q_\beta \quad (2.61)$$

$$q_0^* = q_0 \quad (2.62)$$

A equação (2.59) é uma imposição do algoritmo, de forma que não sejam

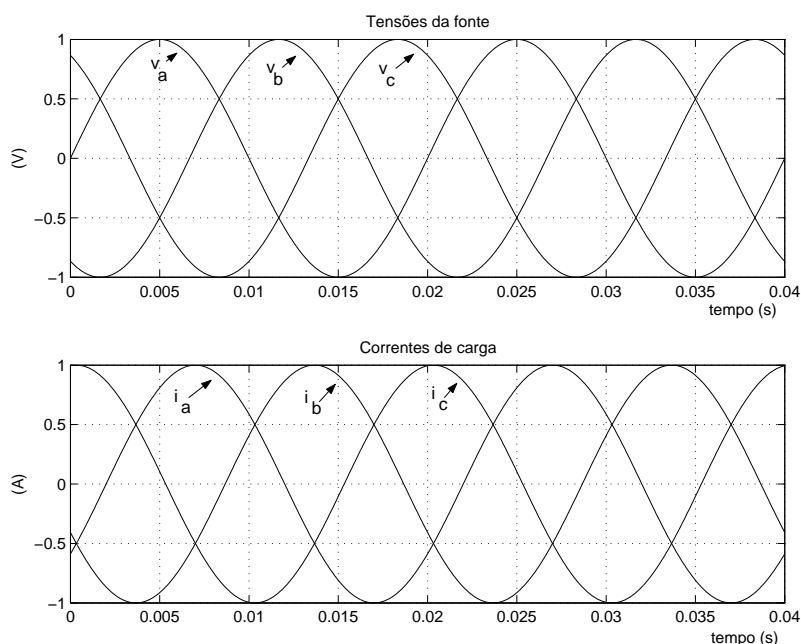


Figura 2.13: Teoria modificada: tensões e correntes do sistema caso 1.

empregados elementos armazenadores de energia⁴. As equações seguintes indicam que toda a potência reativa de carga é compensada.

Considerando, inicialmente, um sistema com tensões senoidais equilibradas alimentando uma carga indutiva qualquer. As formas de onda encontram-se na Figura 2.13. A aplicação do algoritmo fornece os resultados da Figura 2.14.

É possível perceber que a potência reativa da carga foi compensada, uma vez que as correntes estão em fase com as tensões da rede. Como era de se esperar, a potência trifásica do filtro é nula neste caso, além da potência da fonte ser constante.

No exemplo seguinte (caso 2) é introduzida uma componente de seqüência zero na corrente de carga e as tensões da fonte são mantidas senoidais e equilibradas. O valor introduzido vale $\dot{I}_{01} = 0,2\angle 0$. Na Figura 2.15 mostram estas grandezas. Já na Figura 2.16 encontram-se as correntes compensadas, as potências trifásicas do filtro e da fonte e as potências imaginárias do filtro.

Como a diferença em relação ao caso anterior é a presença da componentes de seqüência zero na corrente de carga, de acordo com (2.41) e (2.42), observa-se a

⁴É possível a compensação da parcela oscilante de $p_{3\phi}$, caso o objetivo seja a obtenção de correntes aproximadamente senoidais [31].

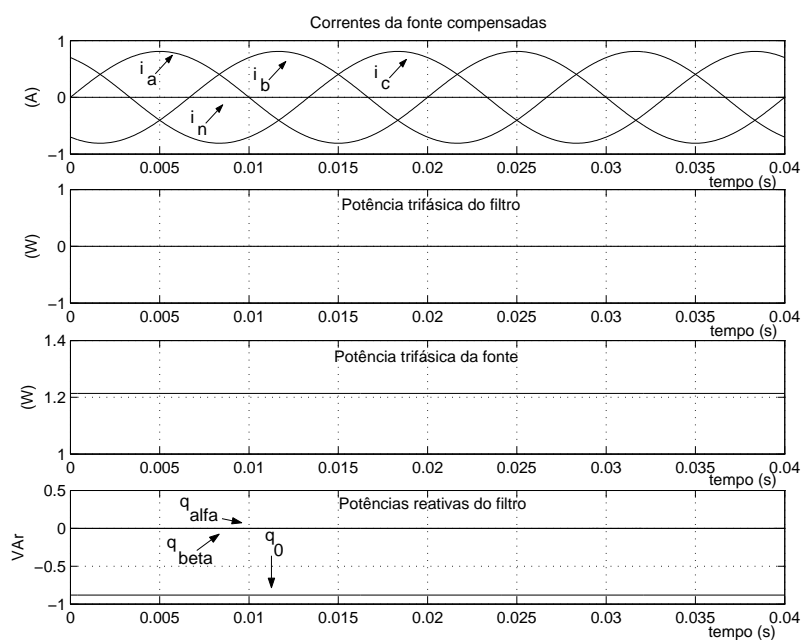


Figura 2.14: Teoria modificada: correntes compensadas e potências do caso 1.

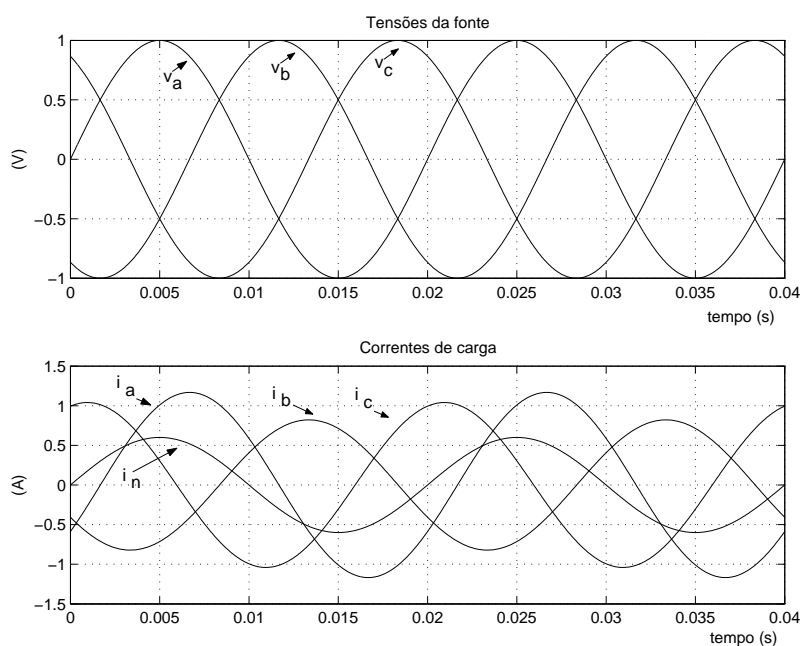


Figura 2.15: Teoria modificada: tensões e correntes do caso 2.

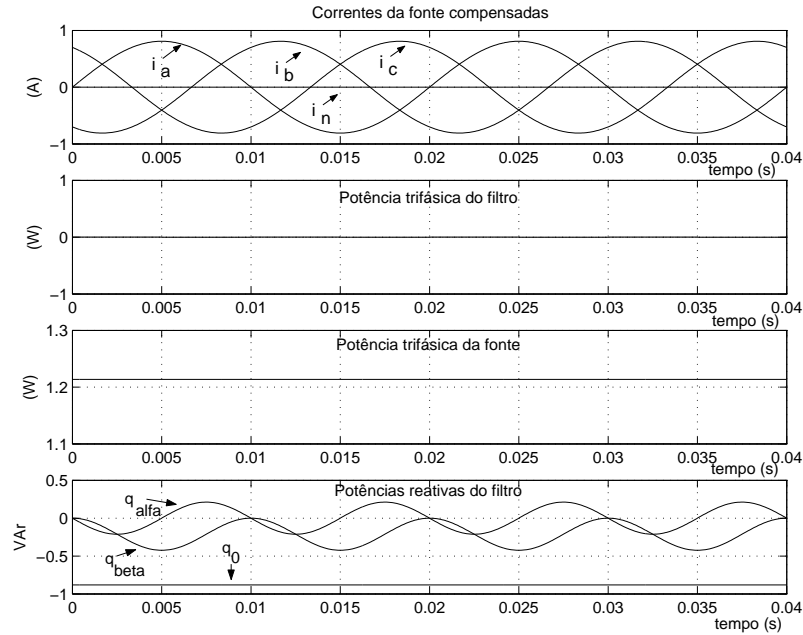


Figura 2.16: Teoria modificada: correntes compensadas e potências do caso 2.

presença das três potências reativas q_α , q_β e q_0 . As duas primeiras sempre existirão quando houver tensão ou corrente de seqüência zero. A corrente de seqüência zero será eliminada somente se as duas forem compensadas simultaneamente. A última, por sua vez, independe da componente de seqüência zero e é constante, uma vez que só há produto de tensões e correntes fundamentais e de seqüência positiva nas coordenadas α e β (2.43).

Caso seja utilizada a corrente $-i_0$ (ao invés de i_0^*) em (2.58), da mesma forma que é feito no algoritmo baseado na teoria $p-q$, e as potências q_α e q_β não sejam compensadas, o resultado para as correntes compensadas e potências trifásicas da fonte e do filtro é o mesmo da Figura 2.16. Isto dá uma pista de que na presença de seqüência zero somente na corrente, a teoria $p-q$ realizaria a compensação destas potências reativas. Uma vez que para obter as correntes de compensação nas coordenadas $a-b-c$ é utilizada a corrente i_0 na Transformação de Clarke, haveria, então, influência da corrente de seqüência zero de carga ponderada nas fases $a-b-c$ multiplicada pelas tensões da fonte, que produziria uma determinada parcela de energia não ativa, que seria compensada pelo filtro, eliminando a corrente de neutro e não atuando no balanço de energia, uma vez que a potência $p_0 = 0$.

Ainda no segundo caso, o resultado da compensação somente de q_α e q_β pode ser

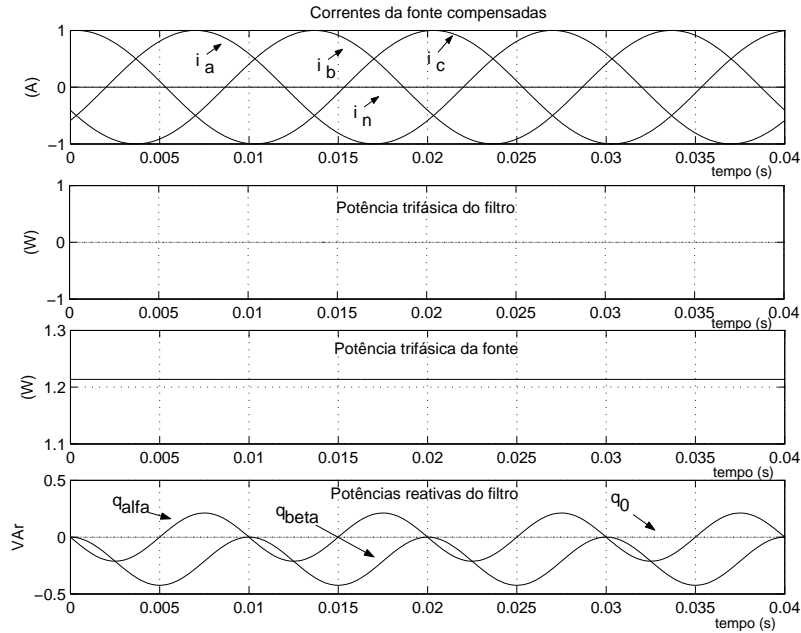


Figura 2.17: Teoria modificada: correntes compensadas e potências do caso 2 com $q_0^* = 0$.

observado na Figura 2.17. Verifica-se, neste caso, que a corrente de neutro é eliminada e, além disso, as correntes de fase estão atrasadas das tensões do sistema. Isto indica que, como era esperado, a potência reativa associada somente aos modos não homopolares ainda está presente. Adicionalmente, o valor eficaz das correntes compensadas são maiores que no caso anterior (Figura 2.16), apesar de transportarem a mesma quantidade de energia na forma de potência ativa.

Já no terceiro caso, há componentes de seqüência zero nas tensões e correntes do sistema, isto é, $\dot{I}_{01} = 0,28\angle -\pi/4$ A e $\dot{V}_{01} = 0,2\angle 0$ V, além da fundamental, conforme a Figura 2.18. Aplicando-se o algoritmo de compensação, obtém-se os resultados da Figura 2.19. Conforme já relatado em [32], o algoritmo proposto baseado na teoria modificada não compensa totalmente a corrente de neutro. Observe que foi imposto ao filtro $p_c = 0$, o que também pode ser visto na Figura. A corrente de neutro não foi completamente eliminada, já que na presença de componentes de seqüência zero nas tensões e correntes simultaneamente, há produção de potência real de seqüência zero, p_0 , de acordo com a teoria p - q . Como a potência trifásica do filtro é nula e não há balanço de energia, a parcela correspondente à i_{0p} em (2.47) não é compensada. Isto também pode ser verificado através da potência trifásica da fonte, que possui uma componente oscilante. Esta componente é devida justamente

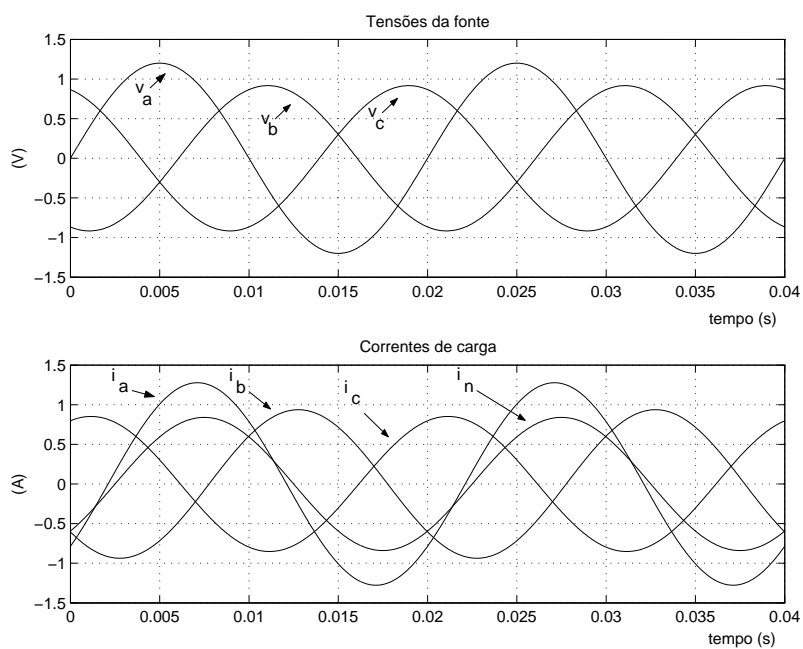


Figura 2.18: Teoria modificada: tensões e correntes do caso 3.

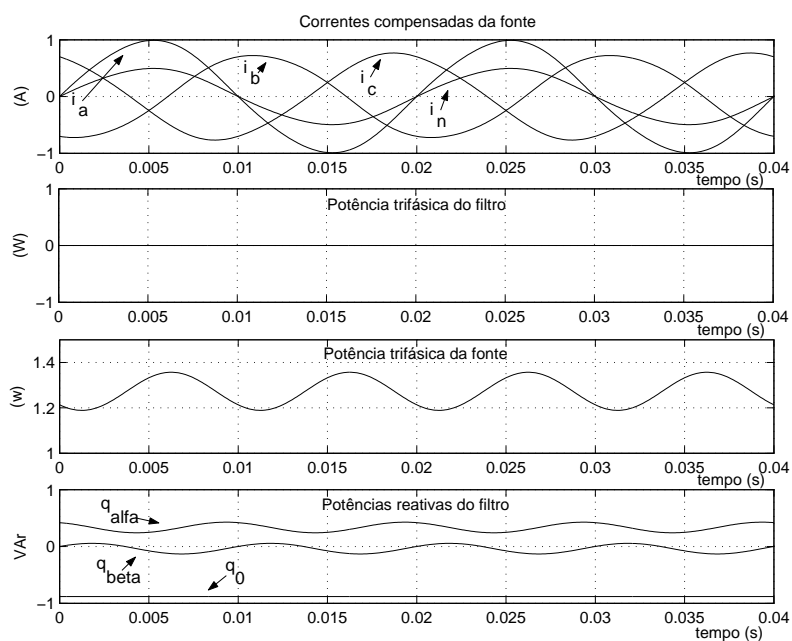


Figura 2.19: Teoria modificada: correntes compensadas e potências do caso 3.

à potência p_0 que não está sendo compensada. Sua componente média corresponde à potência ativa que está sendo fornecida à carga, juntamente com a parcela média da potência p_0 .

2.6 Conclusões

Neste capítulo, a teoria p - q foi estudada, com ênfase na compensação de sistemas trifásicos a quatro fios. Os resultados aqui obtidos mais uma vez confirmam a eficiência da aplicação desta teoria em filtros ativos, motivo pelo qual ela tem sido largamente utilizada nos equipamentos já desenvolvidos em escala comercial [6]. Foi demonstrada a possibilidade de obter-se correntes senoidais ou potência constante na fonte, com necessidade de elementos armazenadores de energia. Além disso, caso seja necessário eliminar a corrente de neutro sem estes elementos, foi proposta uma estratégia baseada nas próprias definições da teoria p - q , onde explorou-se o princípio de intercâmbio de potência entre o modo não-homopolar (potência real) e o modo homopolar (potência de seqüência zero), de forma a fechar o balanço líquido de potência no filtro ativo.

Adicionalmente, foi também explorada a teoria de potência reativa instantânea generalizada (ou teoria p - q modificada), procurando destacar as diferenças em relação à proposta original de Akagi. Verificou-se, contudo, que a teoria original mostrou-se mais eficiente na compensação dos sistemas trifásicos, já que os algoritmos são mais simples e, de fato, eliminam os elementos indesejáveis do sistema. Quando é feita uma determinada escolha das parcelas a compensar, isto é, $q_\alpha^* = q_\beta^* = 0$ em (2.57), além de empregar-se a corrente $-i_0$ em (2.58), ao invés de i_0^* , seu desempenho assemelha-se ao obtido pela teoria p - q . Neste último caso, ainda, seria necessária a realização do balanço de energia, pois o filtro forneceria p_0 . Nas condições originais, o algoritmo não consegue eliminar a corrente de neutro, uma vez que seu valor correspondente não é computado. Este estudo, no entanto, levanta a questão da natureza da potência de seqüência zero. Percebeu-se que na presença (não simultânea) de correntes ou tensões desta seqüência no sistema há uma potência não ativa que está relacionada a uma energia “circulante” entre as fases do sistema e o condutor neutro. Contudo, na presença de tensões de seqüência

zero, o algoritmo de compensação derivado da teoria $p-q$ modificada torna-se incapaz de eliminar totalmente a corrente de neutro da fonte.

Capítulo 3

Teoria $p-q-r$

O objetivo deste capítulo é analisar a aplicação da teoria $p-q-r$ em sistemas trifásicos a quatro fios. Os métodos de referência de potência e de corrente são abordados, indicando a aplicabilidade de cada um deles. Como em outras teorias, é possível a compensação de sistemas trifásicos de forma seletiva, de acordo com o método escolhido. Aspectos relacionados à eliminação da corrente de neutro sem elementos armazenadores de energia e obtenção de correntes senoidais da fonte sem o pré-processamento das tensões do sistema são abordados. Buscou-se, portanto, esclarecer os pontos que poderiam fazer desta teoria ser a mais indicada para aplicação no controle de filtros ativos de potência.

3.1 Introdução

Durante a década de 90, já com uma base formulada sobre as definições de potência e as estratégias de controle de filtros ativos, aprofundaram-se os estudos em torno das teorias existentes, indicando uma tendência do emprego naquelas baseadas no domínio do tempo [6, 9]. Neste contexto, alguns aspectos têm ganhado destaque, tais como: significado físico das potências, eliminação da componente de seqüência zero, necessidade de elementos armazenadores de energia no filtro ativo, natureza da potência de seqüência zero, necessidade do pré-processamento das tensões para obtenção de correntes senoidais da fonte, dentre outros. Apesar disto, em termos de aplicações práticas, pode-se tomar como referência o Japão, onde a maior parte das aplicações de filtros ativos em consumidores individuais na década passada são baseadas na teoria $p-q$ [6].

Neste cenário, em 1999, H. Kim e H. Akagi propõe a teoria de potência instantânea baseada na referência girante $p-q-r$, denominada Teoria $p-q-r$ [20], com a perspectiva da obtenção de correntes senoidais na fonte a partir da utilização direta das tensões do sistema ou eliminar a corrente de neutro sem a utilização de elementos armazenadores de energia. Neste capítulo, procurou-se esclarecer um pouco mais o significado das potências nas referências girantes $p-q-r$, além de analisar seu desempenho sob algumas condições de tensão e corrente. Para isto, foram realizadas simulações empregando-se fontes de tensão e corrente genéricas ideais. No Capítulo 4, é analisado o funcionamento de um filtro ativo paralelo em um sistema trifásico a quatro fios empregando-se um algoritmo baseado nesta teoria.

3.2 Potências instantâneas definidas nas referências girantes $p-q-r$

As tensões e correntes nas coordenadas $p-q-r$ são obtidas através de duas transformações sucessivas a partir das coordenadas $a-b-c$. O objetivo final das transformações é fazer com que o vetor espacial de tensão esteja alinhado com o eixo “p” da referência girante $p-q-r$. Inicialmente, as tensões e correntes nas coordenadas $a-b-c$ são transformadas para as coordenadas $\alpha\beta 0$ através da Transformada de Clarke:

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

A partir das tensões e correntes nas coordenadas $\alpha - \beta - 0$, a transformação para as coordenadas $p-q-r$ é obtida através de dois processos sucessivos: inicialmente o sistema é rotacionado em torno do eixo “0” em θ_1 graus, alinhando-se o eixo “ α ” com a projeção do vetor de tensões nas coordenadas $\alpha - \beta - 0$ no plano $\alpha\beta$, conforme apresentado na Figura 3.1. Neste instante o novo sistema de eixos é denominado $\alpha' - \beta' - 0$. A equação (3.3) mostra a relação entre dois sistemas de coordenadas¹:

$$\begin{bmatrix} i'_\alpha \\ i'_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & \sin \theta_1 & 0 \\ -\sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{v_\alpha}{v_{\alpha\beta}} & \frac{v_\beta}{v_{\alpha\beta}} & 0 \\ -\frac{v_\beta}{v_{\alpha\beta}} & \frac{v_\alpha}{v_{\alpha\beta}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

com

$$v_{\alpha\beta} = \sqrt{v_\alpha^2 + v_\beta^2}.$$

Após esta primeira rotação, o sistema de coordenadas girantes $p-q-r$ é obtido a partir do sistema $\alpha' - \beta' - 0$ através da rotação em torno do eixo β' em θ_2 graus, alinhando-se o eixo α' com o vetor de tensões na coordenada $\alpha - \beta - 0$, conforme a Figura 3.2 e:

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_q \\ i_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & 0 & \sin \theta_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_2 & 0 & \cos \theta_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i'_\alpha \\ i'_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{v_{\alpha\beta}}{v_{\alpha\beta 0}} & 0 & \frac{v_0}{v_{\alpha\beta 0}} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\frac{v_0}{v_{\alpha\beta 0}} & 0 & \frac{v_{\alpha\beta}}{v_{\alpha\beta 0}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i'_\alpha \\ i'_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

¹A mesma transformação é válida para as tensões.

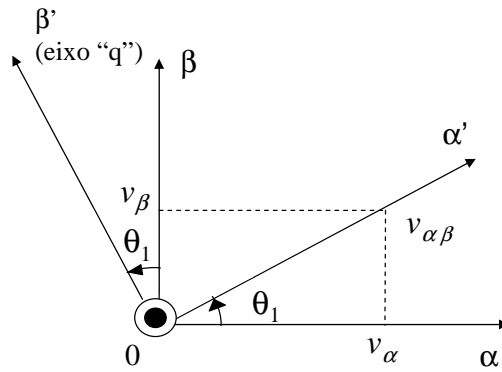


Figura 3.1: Relação entre as coordenadas $\alpha - \beta - 0$ e $\alpha' - \beta' - 0$.

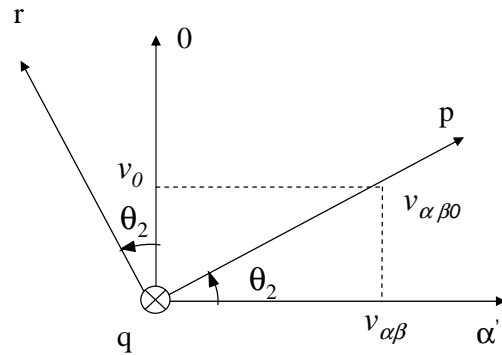


Figura 3.2: Relação entre as coordenadas $\alpha' - \beta' - 0$ e $p-q-r$.

com

$$v_{\alpha\beta 0} = \sqrt{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2 + v_0^2}.$$

Observando a Figura 3.2, verifica-se que o eixo “p” movimenta-se juntamente com o vetor espacial de tensão nas coordenadas $\alpha - \beta - 0$. Como conseqüência, só haverá a componente de tensão no eixo “p” nas coordenadas $p-q-r$ (vide (3.6)). O eixo “0” dá origem ao “r”, indicando uma correlação entre os dois, enquanto o eixo “q” já foi obtido no primeiro processo, já que este é o próprio eixo “ β' ” rotacionado de θ_1 . O eixo “ α' ”, após a segunda rotação, foi nomeado de eixo “p”. Estas duas transformações podem ser visualizadas de forma simultânea na Figura 3.3.

A partir de (3.3) verifica-se a que a primeira rotação corresponde à própria Transformação de Park. A segunda rotação, por sua vez, introduz a informação da componente de seqüência zero.

A transformação direta $\alpha - \beta - 0 - p-q-r$, obtida a partir da combinação de (3.3)

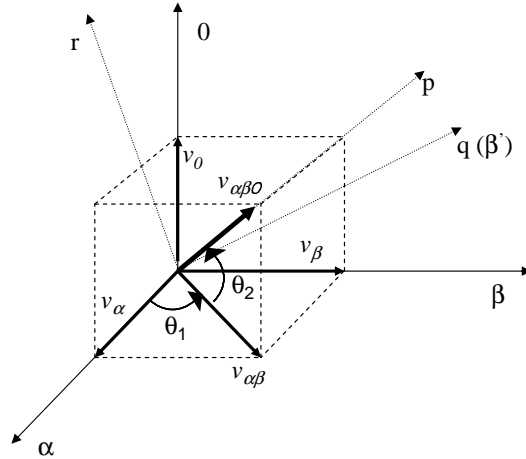


Figura 3.3: Vetores no espaço $\alpha\beta 0$ e as rotações θ_1 e θ_2 .

e (3.4), pode ser escrita como sendo:

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_q \\ i_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{v_\alpha}{v_{\alpha\beta 0}} & \frac{v_\beta}{v_{\alpha\beta 0}} & \frac{v_0}{v_{\alpha\beta 0}} \\ -\frac{v_\beta}{v_{\alpha\beta}} & \frac{v_\alpha}{v_{\alpha\beta}} & 0 \\ -\frac{v_0 v_\alpha}{v_{\alpha\beta} v_{\alpha\beta 0}} & -\frac{v_0 v_\beta}{v_{\alpha\beta} v_{\alpha\beta 0}} & \frac{v_{\alpha\beta}}{v_{\alpha\beta 0}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$\begin{bmatrix} v_p \\ v_q \\ v_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{v_\alpha}{v_{\alpha\beta 0}} & \frac{v_\beta}{v_{\alpha\beta 0}} & \frac{v_0}{v_{\alpha\beta 0}} \\ -\frac{v_\beta}{v_{\alpha\beta}} & \frac{v_\alpha}{v_{\alpha\beta}} & 0 \\ -\frac{v_0 v_\alpha}{v_{\alpha\beta} v_{\alpha\beta 0}} & -\frac{v_0 v_\beta}{v_{\alpha\beta} v_{\alpha\beta 0}} & \frac{v_{\alpha\beta}}{v_{\alpha\beta 0}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{\alpha\beta 0} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

No sistema de referências girantes $p-q-r$, somente v_p é diferente de zero. Isto se deve ao fato do eixo “p” estar na mesma direção do vetor espacial de tensão (2.35). De (3.5), conclui-se que a definição de i_q envolve apenas grandezas não-homopolares, ou seja, i_q não sofre influências de componentes de seqüência zero. A transformação inversa para as correntes é dada por:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{v_\alpha}{v_{\alpha\beta 0}} & -\frac{v_\beta}{v_{\alpha\beta}} & -\frac{v_0 v_\alpha}{v_{\alpha\beta} v_{\alpha\beta 0}} \\ \frac{v_\beta}{v_{\alpha\beta 0}} & \frac{v_\alpha}{v_{\alpha\beta}} & -\frac{v_0 v_\beta}{v_{\alpha\beta} v_{\alpha\beta 0}} \\ \frac{v_0}{v_{\alpha\beta 0}} & 0 & \frac{v_{\alpha\beta}}{v_{\alpha\beta 0}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_p \\ i_q \\ i_r \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Como somente $v_p \neq 0$, a transformação inversa para as tensões é dada por:

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{v_\alpha}{v_{\alpha\beta 0}} \\ \frac{v_\beta}{v_{\alpha\beta 0}} \\ \frac{v_0}{v_{\alpha\beta 0}} \end{bmatrix} \cdot v_p = \begin{bmatrix} \frac{v_\alpha}{v_{\alpha\beta 0}} \\ \frac{v_\beta}{v_{\alpha\beta 0}} \\ \frac{v_0}{v_{\alpha\beta 0}} \end{bmatrix} \cdot v_{\alpha\beta 0} \quad (3.8)$$

As potências ativa e reativa são definidas da mesma forma que fizeram Akagi *et al.* [14] e Peng *et al.* [30], isto é, o produto escalar e vetorial dos vetores espaciais de tensão e corrente, respectivamente:

$$p_{3\phi} = \vec{v}_{pqr} \cdot \vec{i}_{pqr} = v_p i_p \quad (3.9)$$

$$q = \vec{v}_{pqr} \times \vec{i}_{pqr} = \begin{bmatrix} 0 \\ -v_p i_r \\ v_p i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ q_q \\ q_r \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

As equações acima podem ser agrupadas, fornecendo uma expressão mais simples:

$$\begin{bmatrix} p_{3\phi} \\ q_q \\ q_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_p i_p \\ -v_p i_r \\ v_p i_q \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

De (3.11), as correntes nas coordenadas p - q - r podem ser escritas como sendo:

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_q \\ i_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{p_{3\phi}}{v_p} \\ \frac{q_r}{v_p} \\ -\frac{q_q}{v_p} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Diferentemente das teorias já apresentadas, as correntes em cada coordenada tem apenas uma componente, ativa ou reativa. A corrente i_p possui apenas a característica ativa, associada à potência $p_{3\phi}$. As correntes i_r e i_q estão associadas somente às potências reativas q_q e q_r , respectivamente. Segundo Kim e Akagi [20], esta característica fornece uma certa flexibilidade à teoria, uma vez que as três potências definidas são completamente independentes entre si.

Em termos de coordenadas $\alpha\beta 0$, as potências definidas em (3.11) podem ser escritas conforme as equações a seguir:

$$p_{3\phi} = v_p i_p = v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta + v_0 i_0 = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c \quad (3.13)$$

$$q_q = \frac{v_0}{v_{\alpha\beta}} (v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta) - v_{\alpha\beta} i_0 \quad (3.14)$$

$$q_r = \frac{v_{0\alpha\beta}}{v_{\alpha\beta}} (v_\alpha i_\beta - v_\beta i_\alpha) \quad (3.15)$$

A partir das equações precedentes, observa-se que a potência $p_{3\phi}$ é a própria potência ativa trifásica². Este resultado é o mesmo da teoria $p-q$ modificada do capítulo precedente. A potência reativa q_q possui duas componentes: a primeira possui uma parcela que é proporcional à potência real instantânea da teoria $p-q$. Esta componente somente existirá caso haja seqüência zero nas tensões do sistema. A segunda parcela da potência q_q é devida à presença de seqüência zero na corrente de carga. A potência q_r será igual à potência q da teoria $p-q$ quando não houver componente de seqüência zero nas tensões, já que $v_{0\alpha\beta} = v_{\alpha\beta}$. Quando há tensão de seqüência zero, ocorre uma variação da potência imaginária instantânea proporcional à relação $\frac{v_{0\alpha\beta}}{v_{\alpha\beta}}$. Desta forma, pela teoria $p-q-r$, haverá contribuição das componentes de seqüência zero das tensões e/ou das correntes nas três potências definidas. Além disso, as duas potências reativas q_q e q_r são dependentes de i_r e i_q , respectivamente.

3.3 Compensação de sistemas trifásicos a 4 fios

A partir de agora, novamente o foco está na compensação de sistemas elétricos, visando o emprego da teoria $p-q-r$ no algoritmo de controle de filtros ativos de potência. É possível realizar, basicamente, dois tipos de compensação: o primeiro é denominado *método de controle de referência de potência* e o segundo *método de controle de referência de corrente* [34]. Um importante aspecto é deixado claro pelos autores: quando o objetivo é realizar compensação da componente de seqüência zero sem a utilização de elementos armazenadores de energia, sem o compromisso da obtenção de correntes senoidais, o primeiro método deve ser utilizado. Por outro lado, quando o objetivo for a obtenção de correntes senoidais na fonte e compensação

²Originalmente, a potência é definida por p . Contudo, será adotada a notação $p_{3\phi}$ para não haver confusão com a potência real p da teoria $p-q$.

de corrente de neutro, porém com a necessidade de elementos armazenadores de energia, o segundo método deverá ser empregado. Em comum aos dois métodos é a eliminação da corrente de neutro.

3.3.1 Método de controle de referência de potência

O nome da estratégia de controle não está relacionado, como poderia se pensar inicialmente, com a obtenção de potência constante da fonte. Na verdade, está associado à imposição de potência trifásica nula do filtro ativo para eliminação da corrente de neutro, sem a necessidade de elementos armazenadores de energia.

Considerando, inicialmente, que não há componente de seqüência zero nas tensões, tem-se que:

$$v_{0\alpha\beta} = v_{\alpha\beta}$$

Sendo assim, a partir de (3.12) e (3.14) pode-se escrever:

$$i_r = -\frac{1}{v_{0\alpha\beta}}q_q = -\frac{1}{v_{0\alpha\beta}} \left[\frac{v_0}{v_{\alpha\beta}}(v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta) - v_{\alpha\beta} i_0 \right] = \frac{1}{v_{0\alpha\beta}}(i_0 v_{\alpha\beta}) = i_0 \quad (3.16)$$

Logo, verifica-se que, neste caso, a corrente de seqüência zero é igual à corrente i_r . Sendo assim, compensando-se a potência q_q , a corrente de neutro é eliminada sem o emprego de elementos armazenadores de energia ³.

Caso também haja tensões de seqüência zero, uma parcela **adicional** de q_q deve ser compensada. Isto pode ser entendido com o auxílio da Figura 3.4 [34], onde é mostrado o princípio da eliminação da corrente de neutro nesta condição. A idéia concentra-se no princípio de compensar a corrente i_r (e automaticamente i_0), de forma que o vetor espacial de corrente \vec{i}_{pqr} esteja posicionado no plano $\alpha\beta$. De acordo com a Figura 3.4, isto é possível se a corrente de referência i_r^* for igual a:

$$i_r^* = i_r - [-(i_p) \tan \theta_2] = i_r + (i_p) \tan \theta_2 \quad (3.17)$$

³Este resultado também é alcançado utilizando-se a teoria $p-q$. Não há, contudo, referência a uma potência reativa.

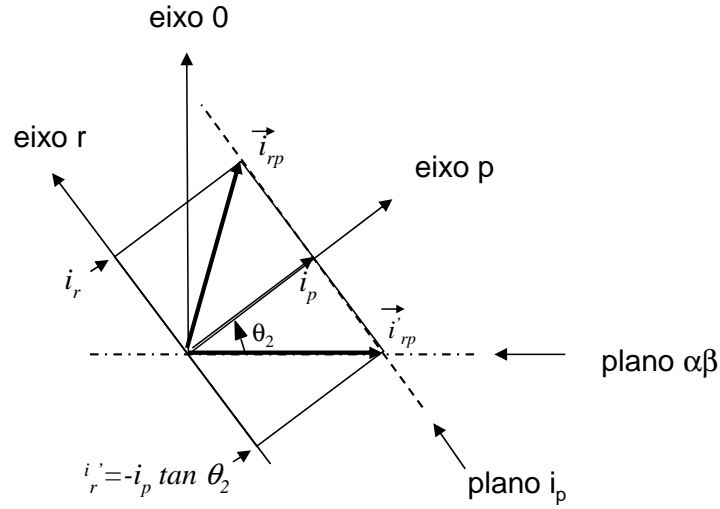


Figura 3.4: Relação entre a corrente i_0 e i_r .

Como $\tan \theta_2 = \frac{v_0}{v_{\alpha\beta}}$ (vide Figura 3.2), a corrente de referência vale:

$$i_r^* = i_r + (i_p) \left(\frac{v_0}{v_{\alpha\beta}} \right) \quad (3.18)$$

A partir de (3.11) e (3.18), a potência q_q^* a ser compensada pode ser escrita como sendo:

$$q_q^* = -(v_p)(i_r^*) = -v_p \left[i_r + \frac{v_0}{v_{\alpha\beta}} (i_p) \right] = -v_p i_r - v_p i_p \left(\frac{v_0}{v_{\alpha\beta}} \right) = q_q - \left(\frac{v_0}{v_{\alpha\beta}} \right) p_{3\phi} \quad (3.19)$$

Vale salientar que as parcelas $p_{3\phi}$ e i_p , nas equações anteriores, correspondem apenas ao valor destas grandezas, não atribuindo qualquer característica ativa na potência de compensação.

Logo, as potências de compensação no método de referência de potência podem ser escritas como sendo:

$$p_{3\phi c} = 0 \quad (3.20)$$

$$q_{qc} = q_q - \left(\frac{v_0}{v_{\alpha\beta}} \right) p_{3\phi} \quad (3.21)$$

$$q_{rc} = q_r \text{ ou } q_{rdc} \text{ ou } q_{rac}, \quad (3.22)$$

onde os subíndices dc e ac correspondem às parcelas média e oscilante da potência q_r , respectivamente.

Conforme mostrado em (3.35), é possível compensar toda a potência q_r ou somente suas parcelas média (q_{rdc}) e/ou oscilante (q_{adc}) (3.22). Segundo Kim *et. al*, a primeira parcela é devida somente às componentes fundamentais e de seqüência positiva das tensões e correntes, além de produtos de harmônicos de tensão e correntes que produzem potência reativa constante. A segunda parcela é devida aos demais componentes. Este ponto é discutido na Seção 3.3.2.

A partir da determinação das potências de compensação, calculam-se as correntes de compensação nas coordenadas $p-q-r$ através de (3.12). Em seguida, estas correntes são transformadas para as coordenadas $\alpha\beta 0$ a partir de (3.7). Finalmente, é utilizada a Transformação de Clarke para obter as correntes de compensação nas coordenadas $a-b-c$, isto é:

$$\begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i_{cc} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{\alpha c} \\ i_{\beta c} \\ i_{0c} \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

De forma a verificar as características do algoritmo baseado na teoria $p-q-r$, a seguir são apresentados alguns resultados de simulação para eliminação da corrente de neutro utilizando o método de referência de potência, considerando o filtro ativo e a fonte como sendo ideais.

Considerando, inicialmente, um sistema com fontes senoidais equilibradas e corrente de carga (indutiva) composta da fundamental mais $\dot{I}_{01} = 0,2 \angle 0$ A, de acordo com a Figura 3.5 (caso 1).

O sistema compensado pode ser visto na Figura 3.6. A corrente de neutro foi completamente compensada, através da potência de compensação q_q , também mostrada na figura. Este resultado pode ser considerado idêntico ao obtido através da teoria $p-q$. Nesta última, apesar de não haver uma definição de potência reativa relacionada à presença de corrente de neutro com tensões sem componente de seqüência zero, o filtro também não fornece potência instantânea trifásica. A potência q_r é constante e é igual à potência q da teoria $p-q$, de acordo com (3.15), já que $v_0 = 0$. A componente

média de q , por sua vez, é produzida por todos os harmônicos de tensão e corrente de mesma frequência e seqüência [9]. Neste caso, esta componente é produzida somente por componentes fundamentais e de seqüência positiva não homopolares, já que são os únicos presentes no sistema. Já a potência instantânea trifásica da fonte ($p_{3\phi}$) também é constante, já que a corrente de neutro na ausência de v_0 não produz potência ativa.

A seguir, são introduzidas componentes de seqüência zero nas tensões da fonte, isto é, $\dot{V}_{01} = 0,2\angle 0$ V e $\dot{V}_{03} = 0,2\angle 0$ V (caso 2), além da componente $\dot{I}_{03} = 0,2\angle 0$ A nas correntes de carga. As tensões e correntes descritas podem ser observadas na Figura 3.7, e, na Figura 3.8, o sistema compensado.

O sistema compensado apresenta, conforme imposto pelo algoritmo do método de referência de potência, $p_{3\phi c} = 0$. A potência fornecida pela fonte não é constante, de acordo com [34] e as correntes da fonte não são senoidais. Contudo, a corrente de neutro foi completamente compensada. A parcela oscilante ainda fornecida pela fonte está associada ao consumo de potência ativa oscilante pelo filtro pelo modo não-homopolar e fornecimento da mesma potência no modo homopolar para a carga. Neste caso, o princípio de intercâmbio de energia entre os modos homopolar e não-homopolar ocorre, já que o desequilíbrio devido à componente de seqüência zero, que gera \tilde{p}_0 , é “transferido” para as coordenadas α e β , que geram potência ativa apenas no modo não-homopolar. Neste caso, haverá uma nova parcela oscilante da potência $p_{3\phi}$ que totaliza o equivalente na teoria $p-q$ a \tilde{p} e \tilde{p}_0 que não foi compensada e permanece sendo fornecida pela fonte.

Para finalizar a exemplificação do método de referência de potência, considere os seguintes componentes de tensão da fonte e corrente de carga, apresentados na Figura 3.9:

$$\begin{aligned} \dot{V}_{+1} &= 1\angle 0, & \dot{V}_{01} &= 0,2\angle 0, & \dot{V}_{03} &= 0,2\angle 0, & \dot{V}_{-1} &= 0,2\angle 0V. \\ \dot{I}_{01} &= 0,2\angle -\pi/3, & \dot{I}_{+1} &= 1\angle -\pi/5, & \dot{I}_{-1} &= 0,2\angle 0, & \dot{I}_{-2} &= 0,2\angle 0 \text{ A}; \\ \dot{I}_{03} &= 0,2\angle 0, & \dot{I}_{+4} &= 0,2\angle 0, & \dot{I}_{-5} &= 0,2\angle -\pi/5 \text{ A}. \end{aligned}$$

O sistema compensado está mostrado na Figura 3.10. A proposta do algoritmo de eliminar a corrente de neutro já obtido sem o emprego de elementos armazenadores

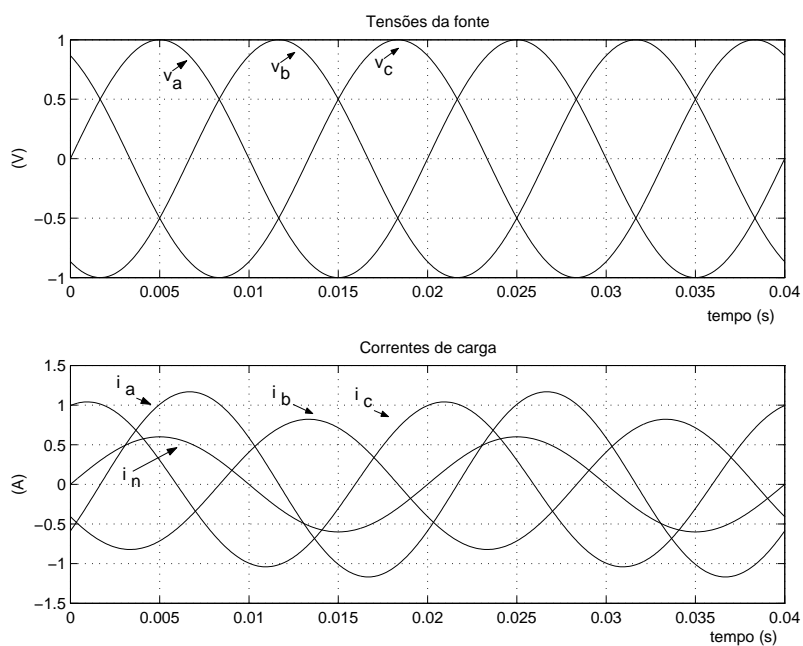


Figura 3.5: Método de referência de potência: tensões e correntes caso 1.

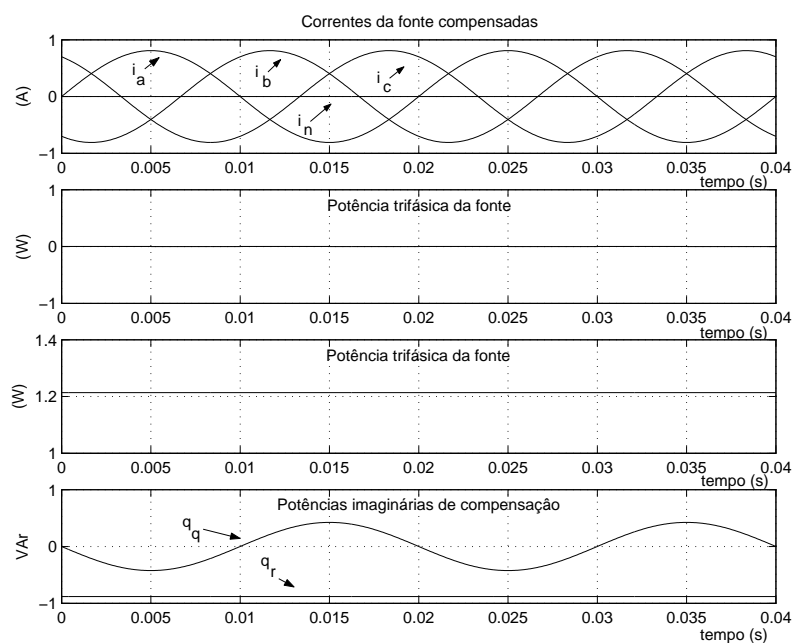


Figura 3.6: Método de referência de potência: sistema compensado caso 1.

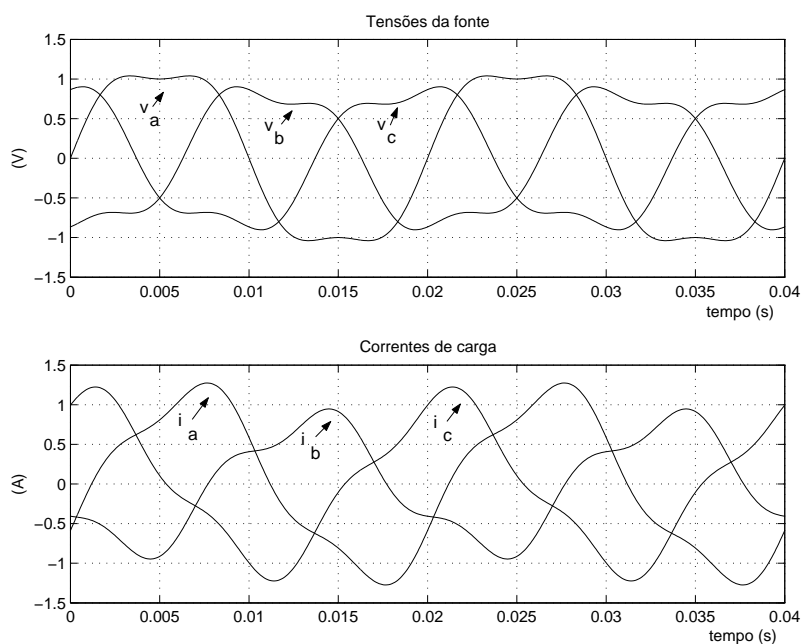


Figura 3.7: Método de referência de potência: tensões e correntes caso 2.

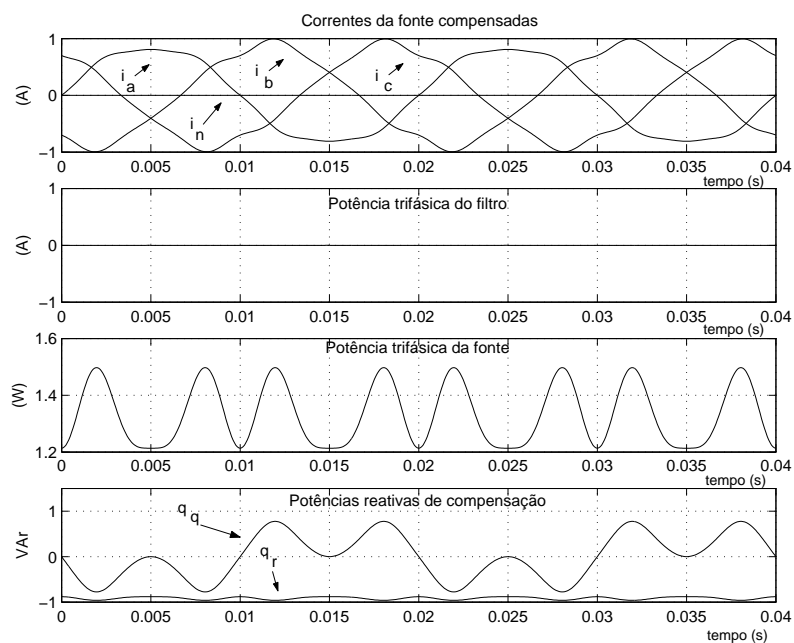


Figura 3.8: Método de referência de potência: sistema compensado caso 2.

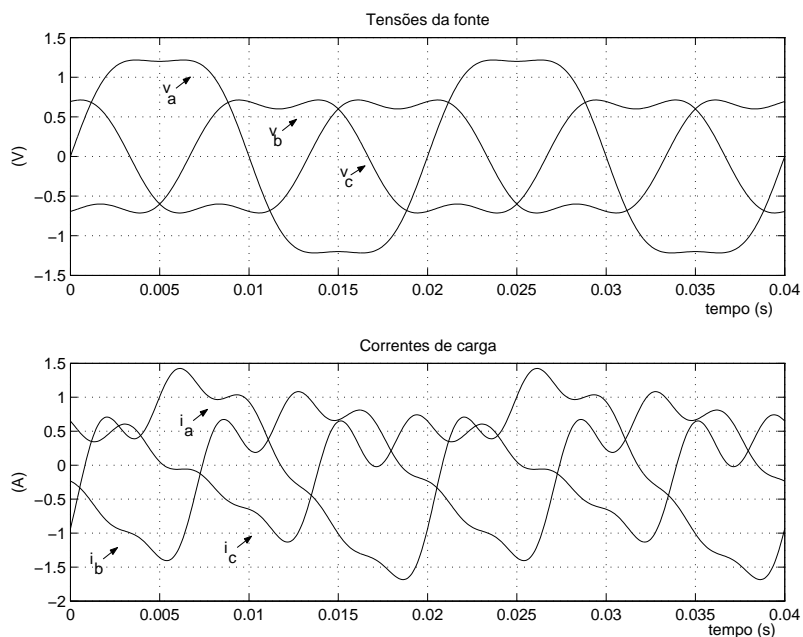


Figura 3.9: Método de referência de potência: tensões e correntes caso 3.

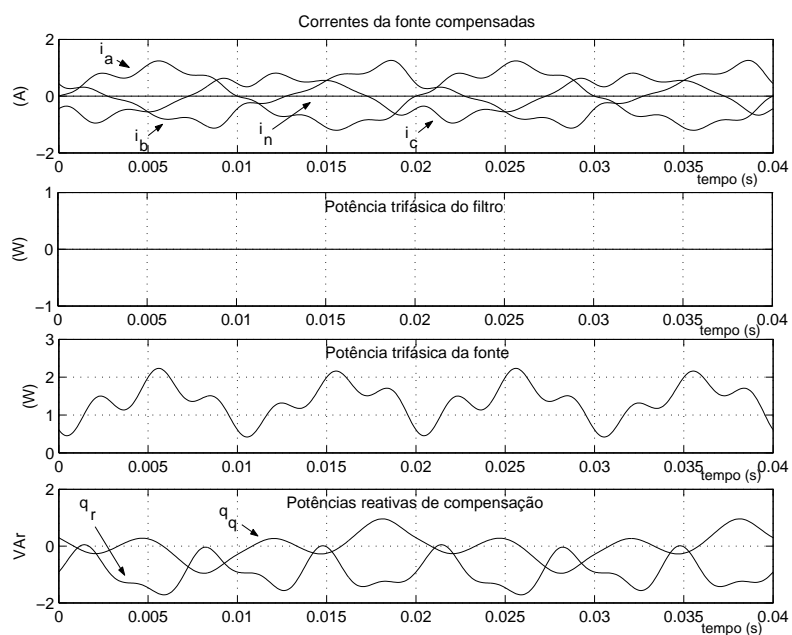


Figura 3.10: Método de referência de potência: sistema compensado caso 3.

de energia é alcançada, assim como na Seção 2.4 do Capítulo 2. Aqui, compensando-se somente as parcelas de potências reativas é possível eliminar as componentes de seqüência zero da corrente de carga, mesmo com $v_0 \neq 0$. Adicionalmente, conforme se esperava, não houve compromisso em obter correntes senoidais e/ou potência trifásica instantânea constante da fonte.

3.3.2 Método de controle de referência de corrente

O objetivo deste método de controle é obter correntes senoidais balanceadas na fonte, independentemente das condições do sistema. Neste caso, haverá a necessidade de elementos armazenadores de energia, uma vez que para tornar as correntes senoidais é preciso compensar potência ativa oscilante presente no sistema.

As correntes e tensões nas coordenadas p - q - r podem, de forma geral, ser decompostas em série de Fourier [34]:

$$v_p = v_{pdc} + \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2}V_{pn} \sin(n\omega t - \phi_{sn}) = v_{pdc} + v_{pac} \quad (3.24)$$

$$i_p = i_{pdc} + \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2}I_{pn} \sin(n\omega t - \phi_{pn}) = i_{pdc} + i_{pac} \quad (3.25)$$

$$i_q = i_{qdc} + \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2}I_{qn} \sin(n\omega t - \phi_{qn}) = i_{qdc} + i_{qac}, \quad (3.26)$$

onde as parcelas médias (subíndice dc) representam, segundo Kim *et. al* a componente fundamental e de seqüência positiva das tensões e correntes do sistema [34], enquanto as parcelas oscilantes (subíndice ac) correspondem aos demais componentes.

Contudo, isto somente é verdade quando as tensões do sistema são senoidais e equilibradas. De acordo (3.6), a tensão v_p vale:

$$v_p = v_{\alpha\beta 0} = \sqrt{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2 + v_0^2}. \quad (3.27)$$

Em condições mais gerais, quando existem harmônicos e desbalanços nas tensões do sistema, também haverá contribuição destes componentes para o valor médio de

v_p . Isto pode ser visto considerando as tensões e correntes nas coordenadas $\alpha\beta 0$, decompostas em componentes simétricas como sendo [9]:

$$\begin{aligned} v_\alpha &= \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{3}V_{+n} \sin(\omega_n t + \phi_{+n}) + \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{3}V_{-n} \sin(\omega_n t + \phi_{-n}) \\ v_\beta &= \sum_{n=1}^{\infty} -\sqrt{3}V_{+n} \cos(\omega_n t + \phi_{+n}) + \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{3}V_{-n} \cos(\omega_n t + \phi_{-n}) \\ v_0 &= \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{6}V_{0n} \sin(\omega_n t + \phi_{0n}) \end{aligned} \quad (3.28)$$

e

$$\begin{aligned} i_\alpha &= \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{3}I_{+n} \sin(\omega_n t + \delta_{+n}) + \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{3}I_{-n} \sin(\omega_n t + \delta_{-n}) \\ i_\beta &= \sum_{n=1}^{\infty} -\sqrt{3}I_{+n} \cos(\omega_n t + \delta_{+n}) + \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{3}I_{-n} \cos(\omega_n t + \delta_{-n}). \\ i_0 &= \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{6}I_{0n} \sin(\omega_n t + \delta_{0n}) \end{aligned} \quad (3.29)$$

Desta forma, a componente média de $v_{\alpha\beta 0}$ pode ser escrita como sendo:

$$v_{pdc} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} 3V_{+n}^2 + \sum_{n=1}^{\infty} 3V_{-n}^2 + \sum_{n=1}^{\infty} 3V_{0n}^2} \quad (3.30)$$

Verifica-se, ao contrário do afirmado em [34], que os harmônicos e as componentes de seqüência zero presentes nas tensões também contribuem para o valor médio de v_p .

O mesmo pode concluir-se para as correntes i_p e i_q . Considerando, por exemplo, a corrente i_p . A partir de (3.5), pode-se escrever:

$$i_p = \frac{v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta + v_0 i_0}{v_{\alpha\beta 0}} = \frac{p_{3\phi}}{v_{\alpha\beta 0}} \quad (3.31)$$

Logo, a componente média de i_p corresponderá a:

$$i_{pdc} = \frac{\bar{p}_{3\phi}}{v_{pdc}} \quad (3.32)$$

Ainda de acordo com [9], podemos escrever:

$$\begin{aligned} \bar{p}_{3\phi} = \bar{p} + \bar{p}_0 = \\ \sum_{n=1}^{\infty} 3V_{+n}I_{+n} \cos(\phi_{+n} - \delta_{+n}) + \sum_{n=1}^{\infty} 3V_{-n}I_{-n} \cos(\phi_{-n} - \delta_{-n}) \\ + \sum_{n=1}^{\infty} 3V_{0n}I_{0n} \cos(\phi_{0n} - \delta_{0n}) \end{aligned} \quad (3.33)$$

De (3.30), (3.32) e (3.33) conclui-se que haverá contribuição dos harmônicos de tensão e corrente no valor médio de i_p , desde que sejam de mesma seqüência (positiva, negativa ou zero) e freqüência. Raciocínio análogo pode ser feito para a corrente i_q .

As potências p e q_r são definidas de acordo com (3.11). Empregando-se as tensões e correntes decompostas em (3.24) a (3.26), pode-se escrever [34]:

$$\begin{aligned} p = v_p i_p = v_{pdc} i_{pdc} + \sum_{n=1}^{\infty} V_{pn} I_{pn} \cos(\phi_{sn} - \phi_{pn}) + \\ + v_{pdc} \left(\sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} I_{pn} \sin(n\omega t - \phi_{pn}) \right) + \\ + i_{pdc} \left(\sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} V_{pn} \sin(n\omega t - \phi_{sn}) \right) + \\ + \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{n(\neq k)=1}^{\infty} V_{pk} I_{pn} \cos((k-n)\omega t - (\phi_{sn} - \phi_{pn})) - \\ - \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} V_{pk} I_{pn} \cos((k+n)\omega t + (\phi_{sn} - \phi_{pn})) \end{aligned} \quad (3.34)$$

$$\begin{aligned}
q_r = v_p i_q = v_{pdc} i_{qdc} &+ \sum_{n=1}^{\infty} V_{pn} I_{qn} \cos(\phi_{sn} - \phi_{qn}) + \\
&+ v_{pdc} \left(\sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} I_{qn} \sin(n\omega t - \phi_{qn}) \right) + \\
&+ i_{qdc} \left(\sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} V_{pn} \sin(n\omega t - \phi_{sn}) \right) + \\
&+ \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{n(\neq k)=1}^{\infty} V_{pk} I_{qn} \cos((k-n)\omega t - (\phi_{sn} - \phi_{qn})) - \\
&- \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} V_{pk} I_{qn} \cos((k+n)\omega t + (\phi_{sn} - \phi_{qn})) \tag{3.35}
\end{aligned}$$

Segundo Kim *et. al* [34], da mesma forma que as tensões e correntes do sistema, as potências p e q_r possuem uma componente média e outra oscilante.⁴ Para tornar as correntes da fonte senoidais e balanceadas, não basta compensar as parcelas oscilantes de p e q_r , uma vez que em suas componentes médias ainda existirão produtos de harmônicos de tensão e corrente que produzem potência constante. Desta forma, para atingir o objetivo do método, as correntes i_p (relacionada à potência p) e i_q (relacionada à potência q_r) do sistema devem ser separadas em suas parcelas médias e oscilantes. Toda as parcelas oscilantes devem ser compensadas, restando as componentes médias que seriam balanceadas e de seqüência positiva. Por outro lado, verificou-se neste trabalho que as parcelas médias das correntes i_p e i_q não correspondem às componentes balanceadas e de seqüência positiva. Para que isto seja verdade, as tensões do sistemas devem conter apenas a componente V_{+1} . Ainda segundo Kim *et. al* [34], não é necessário pré-processar as tensões do sistema para empregar o método, já que a própria transformação de coordenadas a - b - c para p - q - r das tensões e correntes faria com que a parcela oscilante das correntes de carga contenha todos os harmônicos diferentes da componente fundamental e de seqüência positiva. Compensando-se esta parcela, a corrente na fonte compensada tornaria-se senoidal e equilibrada. Verificou-se, portanto, que esta situação não é possível, sendo necessário que as tensões do sistema sejam senoidais e balanceadas. Caso não sejam é necessário fornecer ao algoritmo esta informação de forma a possibilitar a determinação das correntes de referência de acordo com as equações a seguir:

⁴Neste momento não há referência à potência q_q uma vez que está associada apenas à compensação da componente de seqüência zero.

$$i_{pc} = i_{pac} \quad (3.36)$$

$$i_{qc} = i_q \text{ ou } i_{qac} \text{ ou } i_{qdc} \quad (3.37)$$

$$i_{rc} = i_r + \frac{v_o}{v_{\alpha\beta}} i_p \quad (3.38)$$

A compensação seletiva se aplica neste método. A equação (3.37) ilustra este aspecto. Verifica-se que é possível compensar toda a corrente associada à potência imaginária, sua parcela média (associada à potência reativa convencional, causando deslocamento na componente fundamental nas correntes de carga em relação às tensões de alimentação) ou a parcela oscilante. A compensação somente da parcela oscilante pode ser uma boa estratégia em aplicações comerciais, com o objetivo de reduzir a potência total do filtro ativo. A compensação da parcela média é facilmente alcançada com filtros passivos sintonizados. Já (3.38) baseia-se no princípio da compensação da corrente de seqüência zero sem v_0 (parcela i_r) e com v_0 (parcela restante), de acordo com (3.18).

De posse das correntes de compensação nas coordenadas $p-q-r$, o procedimento para obtê-las nas coordenadas $a-b-c$ é o mesmo descrito na página 60.

Da mesma forma que na teoria $p-q$, não é possível obter correntes senoidais e potência constante da fonte de forma simultânea. Supondo que as correntes i_{pac} e i_r sejam compensadas, (3.34) e (3.35) ficam [34]:

$$p = i_{pdc} \left[v_{pdc} + \sum_n^{\infty} \sqrt{2} V_{pn} I_{pn} \sin(n\omega t - \phi_{sn}) \right] \quad , \text{ para } n \text{ par} \quad (3.39)$$

$$q_r = i_{qdc} \left[v_{pdc} + \sum_n^{\infty} \sqrt{2} V_{pn} I_{pn} \sin(n\omega t - \phi_{sn}) \right] \quad , \text{ para } n \text{ par}, \quad (3.40)$$

onde é possível verificar que permaneceram parcelas oscilantes nas potências fornecidas pela fonte.

A partir de agora, são apresentados alguns resultados de simulação, visando exemplificar o método de referência de corrente, bem como verificar, principalmente, a necessidade do pré-processamento das tensões do sistema para obtenção de correntes senoidais da fonte. Em todas as simulações, foram compensadas a parcela

oscilante da corrente i_p , as parcelas média e oscilante da corrente i_q , além de duas parcelas da corrente i_{rc} , de acordo com (3.36), (3.37) e (3.38).

No primeiro caso, considere um sistema com tensões senoidais e equilibradas, alimentando uma carga com os seguintes componentes: $\dot{I}_{+1} = 1 \angle -\pi/5$ A e $\dot{I}_{01} = 0,4 \angle 0$ A, conforme a Figura 3.11.

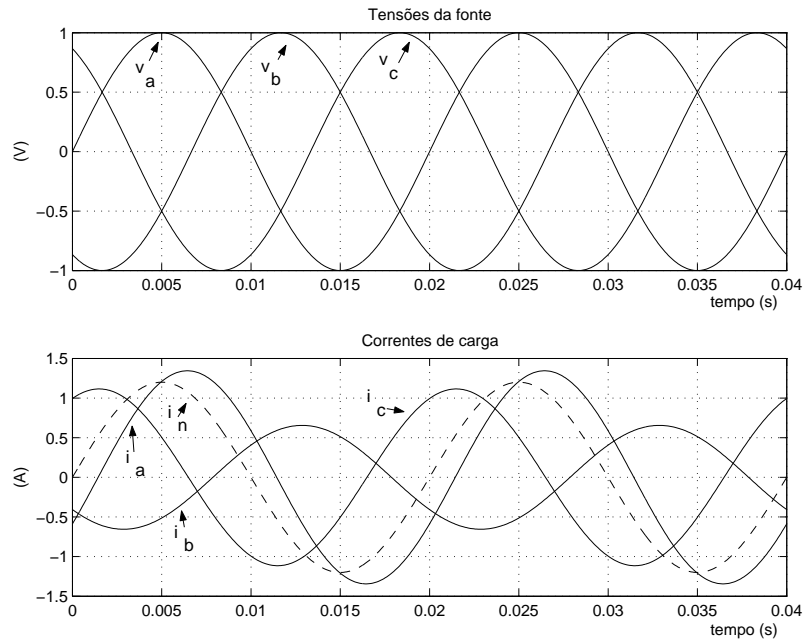


Figura 3.11: Método de corrente de referência: tensões e correntes caso 1.

Na Figura 3.12, observa-se que as correntes compensadas da fonte são senoidais, equilibradas e em fase com as tensões de alimentação. A potência q_q eliminou a corrente de neutro da fonte e a compensação da potência q_r fez com que o fator de potência seja unitário. Neste primeiro caso, como não houve compensação de potência ativa, a potência trifásica do filtro é nula a todo instante, enquanto a fonte fornece somente $\bar{p}_{3\phi}$.

No segundo caso, é introduzida uma componente de sequência zero nas tensões, isto é, $\dot{V}_{01} = 0,2 \angle 0V$. Este sistema está mostrado na Figura 3.13 e o resultado da aplicação do algoritmo é mostrado na Figura 3.14. Verifica-se que as correntes são aproximadamente senoidais, já que ainda há um resíduo na corrente de neutro, de acordo com a Figura 3.16. As correntes de compensação podem ser observadas na Figura 3.15.

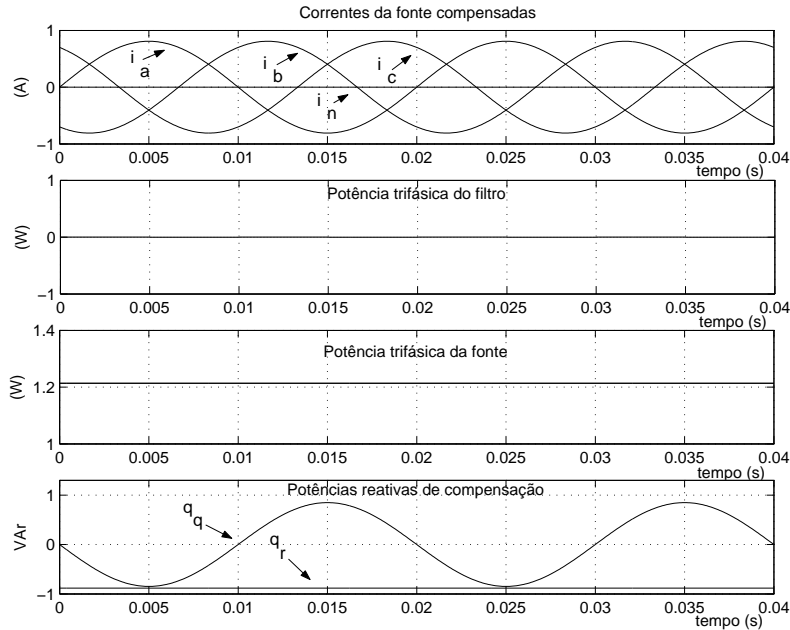


Figura 3.12: Método de corrente de referência: sistema compensado caso 1.

Curioso notar que, pela definição da teoria, não haveria envolvimento de potência ativa trifásica para a compensação da componentes de seqüência zero da corrente. Neste exemplo, contudo, fica evidente que o método de referência de corrente faz com que o filtro consuma uma parcela de potência ativa trifásica oscilante da fonte e forneça novamente para a carga com valor igual a $p_{0c} = v_0 i_{0c}$ ⁵. Isto pode ser observado na Figura 3.14, onde é possível comparar a potência trifásica do filtro e a parcela oscilante da potência p_{0c} , sendo ambas simétricas. Existe, portanto, uma parcela ativa nas correntes de compensação que produzem potência ativa trifásica oscilante, que é diferente da potência de seqüência zero definida da teoria $p-q$ que é igual a $p_0 = v_0 i_0$.

Caso seja utilizado i_0 na transformação de coordenadas $\alpha\beta 0$ para $a-b-c$ das correntes de compensação dadas em (3.23) ao invés de i_{0c} , o filtro passa a fornecer um valor aproximadamente igual a p_0 da teoria $p-q$, eliminando de forma mais eficiente a corrente de neutro, conforme é mostrado na Figura 3.16. A diferença entre estas duas potências pode ser observada na Figura 3.17. O valor fornecido não é exatamente igual a p_0 , já que os modos homopolares influenciam no cálculo das correntes de compensação $i_{\alpha c}$, $i_{\beta c}$.

⁵A corrente i_{0c} é obtida a partir da transformação das correntes de compensação das coordenadas $p-q-r$ para $\alpha\beta 0$.

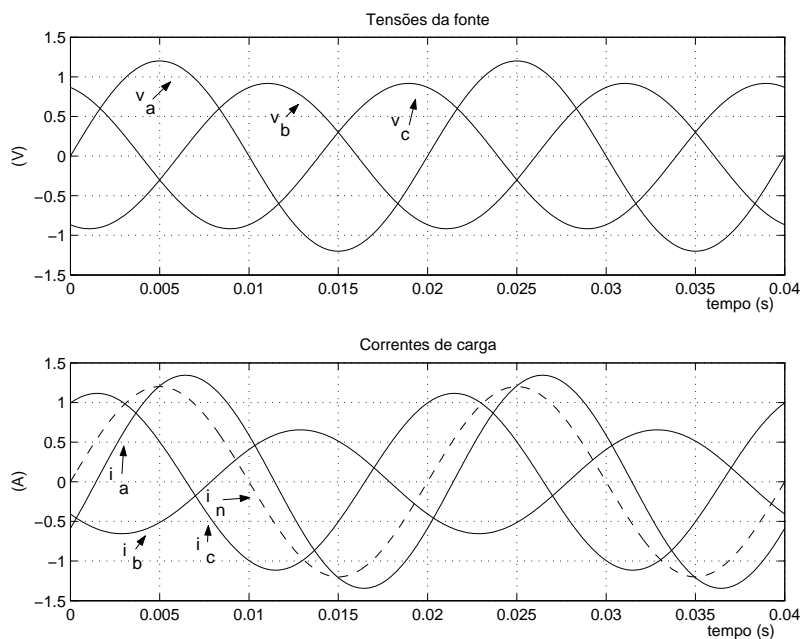


Figura 3.13: Método de corrente de referência: tensões e correntes caso 2.

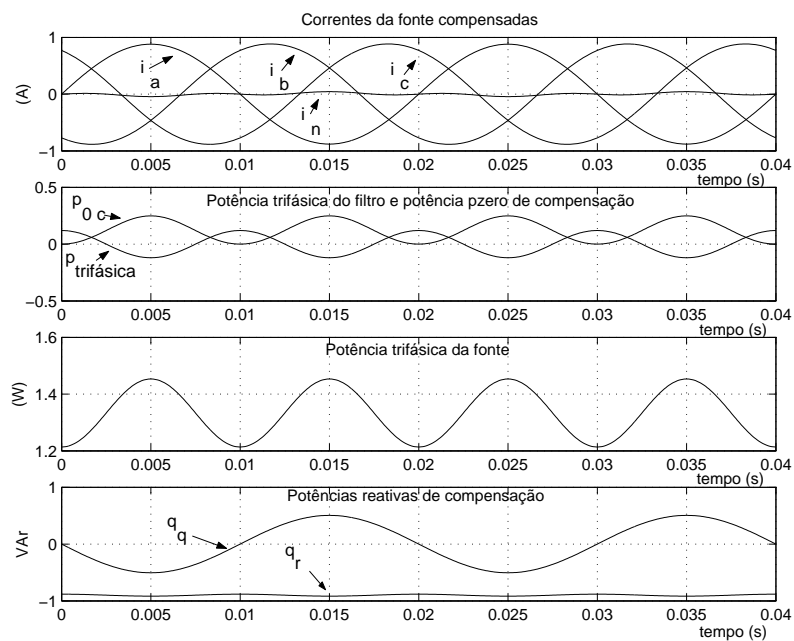


Figura 3.14: Método de corrente de referência: sistema compensado caso 2.

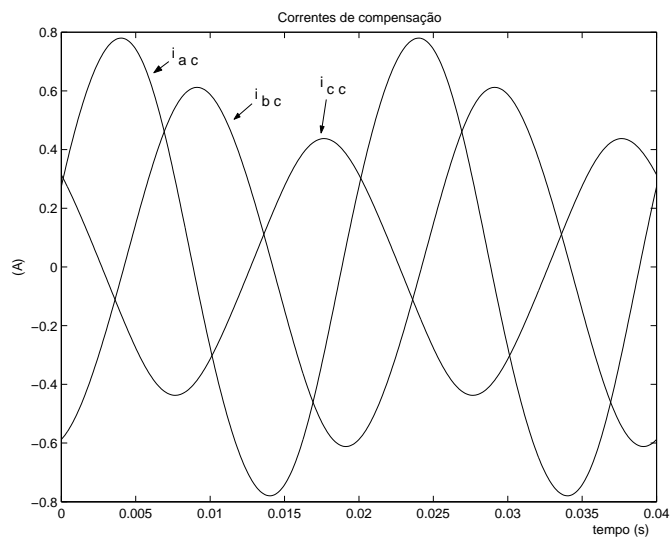


Figura 3.15: Método de corrente de referência: correntes de compensação do caso 2.

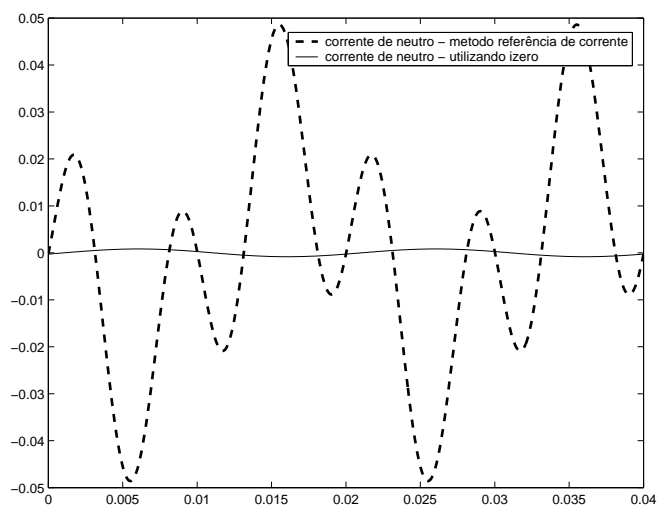


Figura 3.16: Método de corrente de referência: correntes de neutro do caso 2.

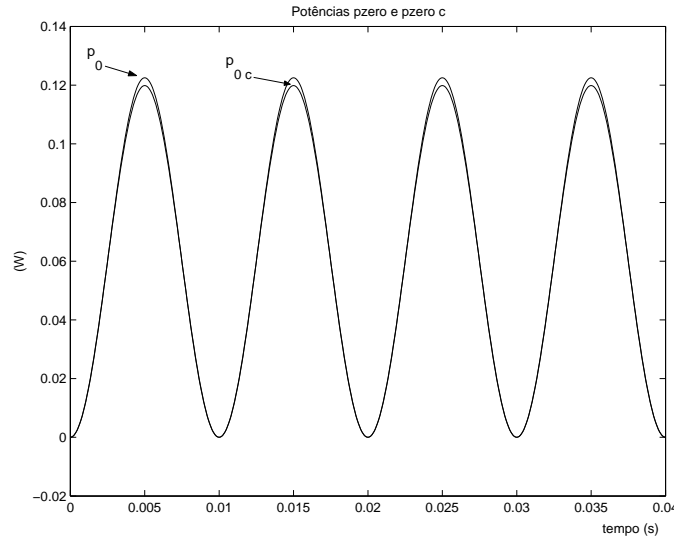


Figura 3.17: Diferença entre as potências p_0 e p_{0c} caso 2.

No terceiro caso são introduzidos, em relação ao anterior, componentes de seqüência negativa nas tensões e correntes, de acordo com:

$$\begin{aligned} \dot{V}_{+1} &= 1\angle 0, & \dot{V}_{01} &= 0,2\angle 0, & \dot{V}_{03} &= 0,2\angle 0 & \dot{V}_{-1} &= 0,2\angle -\pi/3 & V. \\ \dot{I}_{01} &= 0,2\angle -\pi/3, & \dot{I}_{+1} &= 1\angle -\pi/5, & \dot{I}_{-1} &= 0,2\angle 0, & \dot{I}_{-2} &= 0,2\angle 0 & A; \\ \dot{I}_{03} &= 0,2\angle 0, & \dot{I}_{+4} &= 0,2\angle 0, & \dot{I}_{-5} &= 0,2\angle 0 & A. \end{aligned}$$

As tensões e correntes, bem como o sistema compensado no terceiro caso podem ser vistos nas Figuras 3.18 e 3.19, respectivamente.

Neste último exemplo foi possível perceber que o resultado ficou abaixo das expectativas, uma vez que, com uma condição mais severa de tensões e carga, o filtro não conseguiu tornar as correntes senoidais, bem como eliminar a corrente de neutro. Um aspecto positivo a ser ressaltado é que foi realizado o balanço de energia no interior do filtro, obtendo valor médio nulo de potência trifásica. Não é possível, portanto, obter correntes senoidais da fonte em quaisquer condições de tensão do sistema, conforme é afirmado em [34]. Analogamente à teoria $p-q$, para atingir sucesso é necessário pré-processar as tensões do sistema. A diferença, neste caso, é que somente o conhecimento da frequência e da fase das tensões da componente V_{+1} é suficiente para que o algoritmo possa determinar precisamente quais parcelas

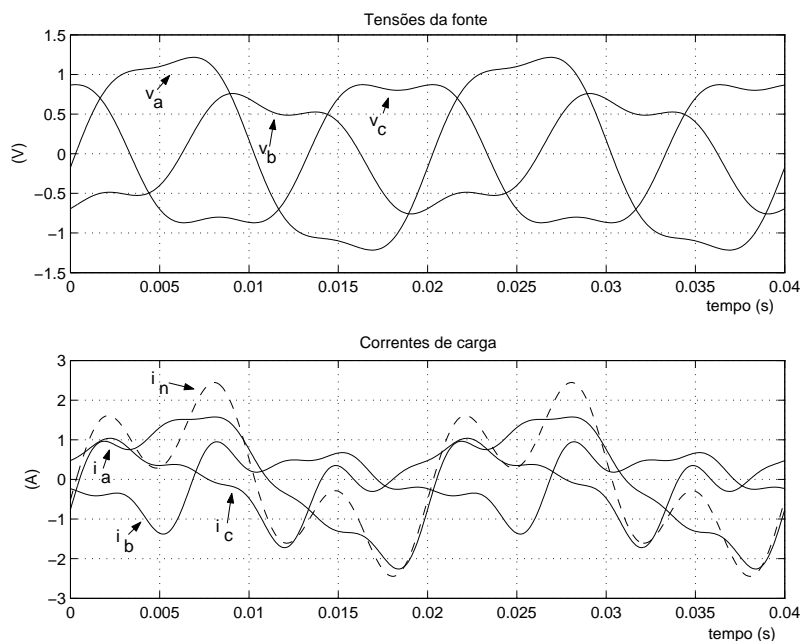


Figura 3.18: Método de corrente de referência: tensões e correntes caso 3.

oscilantes da potência são devidos somente às correntes. A informação da amplitude de V_{+1} não é necessária, fazendo com que as parcelas médias de i_p e i_q sejam devidas somente à componente fundamental e de seqüência positiva das correntes de carga. Para ilustrar este fato, a Figura 3.20 mostra os resultados obtidos quando é utilizada uma tensão fictícia, com freqüência e fase de V_{+1} .

Como esperado, as correntes da fonte tornaram-se senoidais e equilibradas. Destarte, confirma-se que não é possível obter pleno êxito no método de controle de referência de corrente sem o pré-processamento das tensões. Adicionalmente, verifica-se que o filtro ativo perdeu sua condição ótima de fluxo de energia. Isto deve-se, da mesma forma que foi explanado no Capítulo 2, à presença de componentes harmônicos de seqüências positivas ou negativas nas tensões do sistema e nas correntes de compensação que produzem um valor médio de potência ativa que não é compensado.

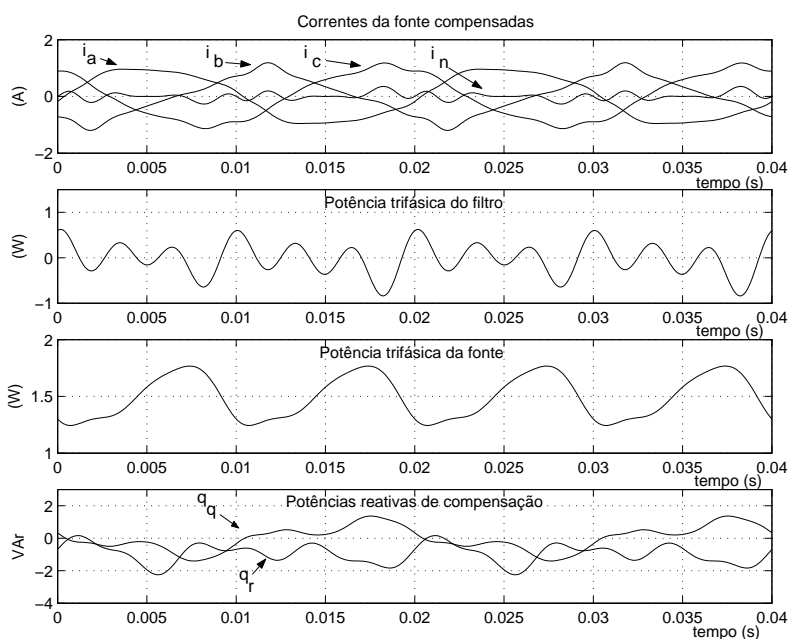


Figura 3.19: Método de corrente de referência: sistema compensado caso 3.

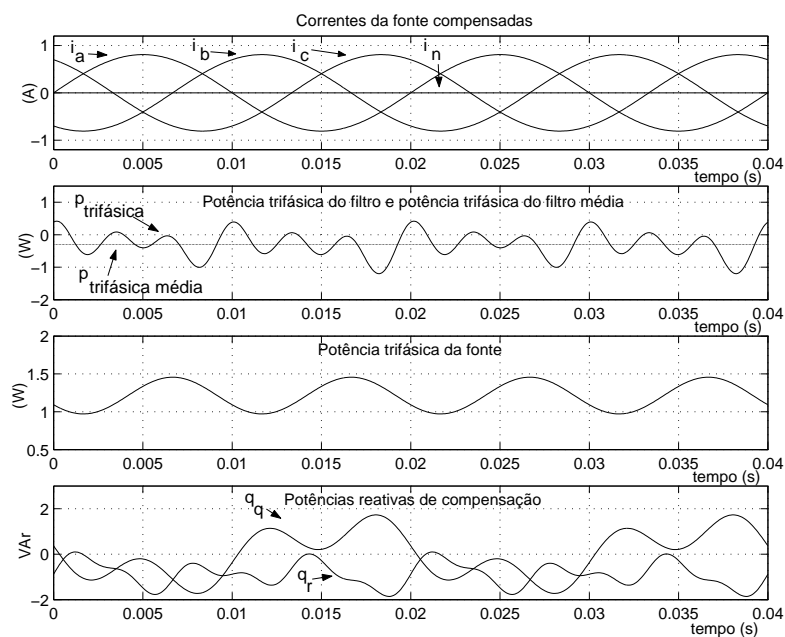


Figura 3.20: Método de corrente de referência: sistema compensado caso 3 com pré-processamento das tensões.

3.4 Comparação entre as teorias $p-q$, $p-q$ modificada e $p-q-r$

A comparação entre as três teorias de potências instantâneas é interessante sob dois aspectos: o primeiro está relacionado a uma possível adoção como uma teoria padrão, que interprete, de maneira coerente, os fenômenos físicos envolvidos. O segundo, por outro lado, está associado à compensação de sistemas trifásicos, que requer algoritmos eficientes, simples, robustos e rápidos. O atendimento das duas condições simultaneamente ainda é, e provavelmente continuará a ser por algum tempo, uma busca dos pesquisadores.

Neste cenário, procurou-se dividir esta seção em três partes, focando alguns tópicos que normalmente são bastante polêmicos entre os pesquisadores. Certamente não há a pretensão de esgotar o assunto. Contudo, baseado no que está apresentado neste e nos capítulos precedentes, é feita uma tentativa de elucidá-lo um pouco mais.

3.4.1 Elementos armazenadores de energia

A importância do emprego de elementos armazenadores de energia está associada, principalmente, ao aspecto econômico. A redução do tamanho dos capacitores em inversores VSI é uma das alternativas para diminuição dos custos envolvidos na montagem de filtros ativos de potência.

Um ponto pacífico em comum em todas as teorias de potência em geral é que, para a compensação da potência reativa trifásica, não são necessários elementos armazenadores de energia. O ponto obscuro está relacionado à eliminação da componente de seqüência zero da corrente de carga. Sabe-se dos vários problemas relacionados à presença de correntes de neutro excessivas que, muitas vezes podem ser até maiores que as correntes de fase [35]. O emprego de filtros ativos tem se mostrado eficiente na compensação da corrente de neutro. Contudo, o emprego de elementos armazenadores nos filtros ativos para exclusivamente este tipo de compensação mostrou-se desnecessário.

Na teoria $p-q$, foi proposta neste trabalho uma estratégia para a eliminação da

corrente de neutro com potência trifásica nula no filtro ativo. Verificou-se, contudo, que é necessário um balanço de energia através da geração de um fluxo contrário correspondendo a uma potência real oscilante, implicando em uma deterioração das correntes compensadas. Na teoria modificada, este princípio é obtido atribuindo um valor de $p_{3\phi c} = 0$ para o filtro [32]. O resultado para as correntes de fase, contudo, é a impossibilidade da eliminação total da corrente de neutro. Enquanto que na teoria p-q existe apenas a parcela de corrente que gera potência real (modo não-homopolar), na teoria modificada houve a divisão em duas parcelas, uma ativa e outra “reativa”. A parcela “reativa” apresenta algum significado, principalmente na ausência de seqüência zero nas tensões. Neste caso, as duas teorias realizam a compensação com $p_{3\phi c} = 0$, contudo, conforme já foi explanado no texto, a teoria p-q considera apenas o modo não-homopolar como sendo capaz de gerar potência reativa. Em outras palavras, a teoria p-q original classifica a componente de seqüência zero como não geradora de potência reativa. Finalmente, a teoria p-q-r propõe a compensação da corrente de neutro somente através da compensação de parcelas das potências reativas q_q e q_r . Realmente, este objetivo é atingido. Contudo, verificou-se neste trabalho que ocorre, da mesma forma que na estratégia proposta neste trabalho baseada na teoria p-q, um balanço entre uma parcela de energia ativa, de seqüência zero (que aqui denominamos de p_{c0}) e a potência trifásica instantânea da fonte. Portanto, o preço que se paga pela eliminação de elementos armazenadores de energia em qualquer estratégia de compensação total da corrente de neutro é a impossibilidade de se obter correntes senoidais se as tensões da rede contiverem componentes de seqüência zero.

Conclui-se, então, que o método de compensação proposto em [9] fornece a melhor condição para a eliminação da corrente de neutro, já que não ocorre degradação nem da potência real instantânea da fonte, nem das correntes de fase. O custo seria associado ao aumento da capacidade do elemento armazenador de energia, já que neste caso o balanço de energia é efetuado em termos de valores médios ($\Delta\bar{p} = \bar{p}_0$), ao invés de valores instantâneos ($\Delta p = p_0$). Este, por sua vez, não deve ser elevado de forma muito significativa, já que, em geral, a componente de seqüência zero das tensões tende a não ser muito elevada em sistemas de distribuição em média tensão.

3.4.2 Processamento das tensões da rede

A necessidade do pré-processamento das tensões da rede está diretamente relacionada à obtenção de correntes senoidais da fonte, independentemente das condições das tensões de fornecimento. Uma das estratégias de controle baseada na teoria $p-q$, proposta em [36], atinge com sucesso este objetivo. Será, inclusive, utilizada no Capítulo 4, onde encontram-se resultados de simulações digitais de um filtro ativo paralelo. Na teoria modificada, também é necessário o uso do detector, já que esta é uma “extensão” da teoria $p-q$ com uma interpretação diferente apenas da componente de seqüência zero.

A esta altura, o destaque fica para a teoria $p-q-r$, principalmente pela afirmativa de seus autores em [34]:

“A teoria p-q-r não necessita pré-processar as tensões do sistema, calculando as potências instantâneas diretamente ... O método de controle de referência de corrente pode controlar as correntes do sistema para tornarem-se senoidais e balanceadas em quaisquer condições do circuito.”

Neste trabalho, contudo, verificamos que isto não é possível, conforme mostrado no último exemplo da seção anterior. Somente com o uso das informações da fase e frequência de V_{+1} , analogamente às demais teorias de potências instantâneas, é possível a obtenção de correntes senoidais e balanceadas. Adicionalmente, no Capítulo 4 são apresentados os resultados de simulação digital do filtro ativo paralelo empregando-se a teoria $p-q-r$ com e sem o uso do pré-processamento das tensões, realizando uma comparação entre as duas condições.

3.4.3 Significado físico

O significado físico das potências da teoria $p-q$ foram discutidos na Seção 2.2.1. As correntes nas coordenadas α e β são decompostas em parcelas denominadas reais e imaginárias, além da corrente de seqüência zero. As componentes de seqüência zero estão associadas apenas à potência ativa [37]. Contudo, existem estudos que contrariam esta hipótese [23], principalmente quando não há componentes de se-

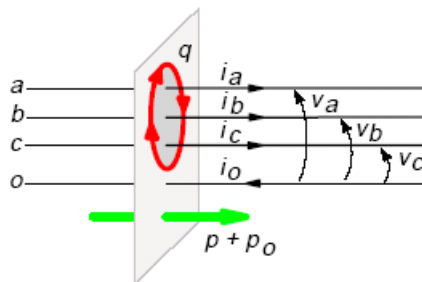


Figura 3.21: Significado físico das potências na teoria $p-q$.

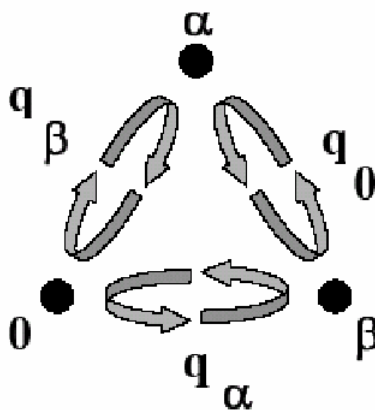


Figura 3.22: Significado físico das potências imaginárias na teoria $p-q$ modificada.

quência zero nas tensões. A Figura 3.21⁶ resume o significado físico das grandezas na teoria $p-q$, onde a potência q representa uma parcela de energia que transita entre as fases e a potência trifásica ($p + p_0$), representando o fluxo total de energia, por unidade de tempo, que flui entre dois subsistemas.

Na teoria modificada, a principal diferença está na divisão da corrente de sequência zero em parcelas ativas e não ativas. Em outras palavras, a definição das potências q_α e q_β ((2.41) e (2.42), respectivamente) levam à conclusão que há uma parcela de energia que circula entre as fases (conforme a teoria $p-q$) e outras duas, que circulam entre cada uma das coordenadas (α e β) com a coordenada zero, de acordo com a Figura 3.22⁷.

Finalmente, o significado físico na teoria $p-q-r$ pode ser interpretado a partir de (3.13), (3.14) e (3.15). A potência $p_{3\phi}$ é a potência ativa trifásica instantânea. A

⁶Figura originalmente apresentada em [9].

⁷Figura modificada a partir do original em [38].

potência q_q está relacionada à presença de componentes de seqüência zero nas tensões e/ou nas correntes. Isto pode ser representado através da circulação de energia reativa entre as fases devido à interação entre a componente de seqüência zero das tensões e as correntes de linha e/ou as componentes de seqüência positiva/negativa com a corrente de neutro. A potência q_r possui o mesmo significado que a potência q da teoria p - q . Contudo, tem seu valor majorado em função da presença da componente de seqüência zero nas tensões do circuito.

Capítulo 4

Filtro Ativo Paralelo

Este capítulo apresenta o funcionamento de um filtro ativo paralelo. São apresentados resultados empregando-se a teoria $p-q$ e $p-q-r$, procurando realizar uma análise comparativa entre as duas. Em relação à última, também é proposto o pré-processamento das tensões da rede através de um circuito PLL visando melhorar o desempenho do método de controle de correntes senoidais da fonte. Os resultados de simulação foram obtidos a partir da plataforma PSCAD/EMTDC.

4.1 Introdução

O esquema básico de um filtro ativo paralelo é novamente apresentado na Figura 4.1 por comodidade. A partir das informações de tensão e corrente do sistema, o controle do filtro ativo é responsável pela determinação das correntes de compensação, representadas por i_c^* , e utilizadas pelo controle PWM¹ (banda de histerese) do circuito de potência. A frequência de chaveamento deve ser, pelo menos, dez vezes maior que a frequência do maior harmônico de corrente a compensar [9]. Paralelamente, o controle do filtro também encarrega-se de manter a tensão do capacitor do inversor VSI² em um nível especificado. A determinação de i_c^* está intimamente relacionada com a estratégia de controle utilizada, conforme apresentado nos capítulos precedentes. O controle PWM comanda a abertura e o fechamento dos dispositivos semicondutores de potência a fim de sintetizar as correntes determinadas pelo algoritmo de controle do filtro. O inversor funciona, então, como uma fonte de corrente controlada ou, em outras palavras, como um amplificador linear de corrente não senoidal.

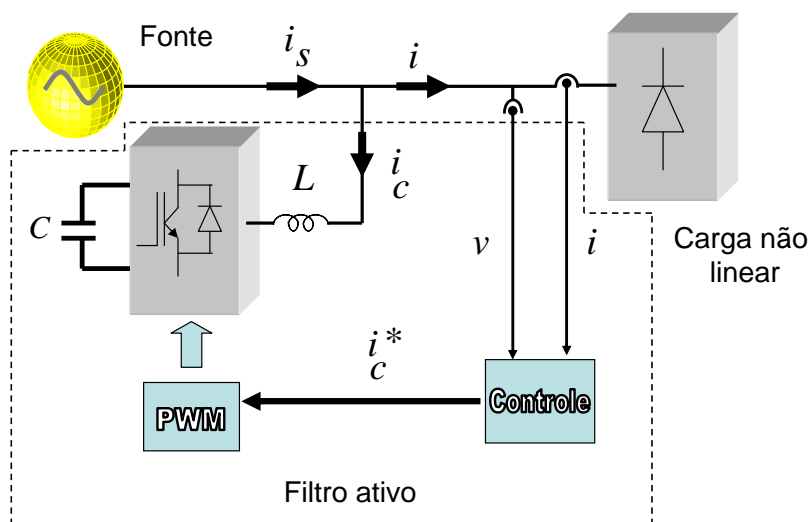


Figura 4.1: Configuração básica de um filtro ativo paralelo.

¹Pulse Width Modulation

²Voltage Source Inverter.

4.2 Circuito de potência do filtro ativo paralelo

O circuito de potência do filtro ativo paralelo utilizado neste trabalho pode ser observado na Figura 4.2. Existem os inversores VSI e CSI³, caso a alimentação CC sejam por uma fonte de tensão ou corrente, respectivamente. Neste trabalho, a escolha pelo inversor VSI está relacionada à sua maior eficiência e menor custo inicial, quando comparado ao CSI [39]. Em [40] é possível encontrar um comparativo entre as configurações, mostrando as vantagens e desvantagens de cada uma delas. Adicionalmente, os circuitos aplicados são os mesmos empregados no acionamento de motores CA [39].

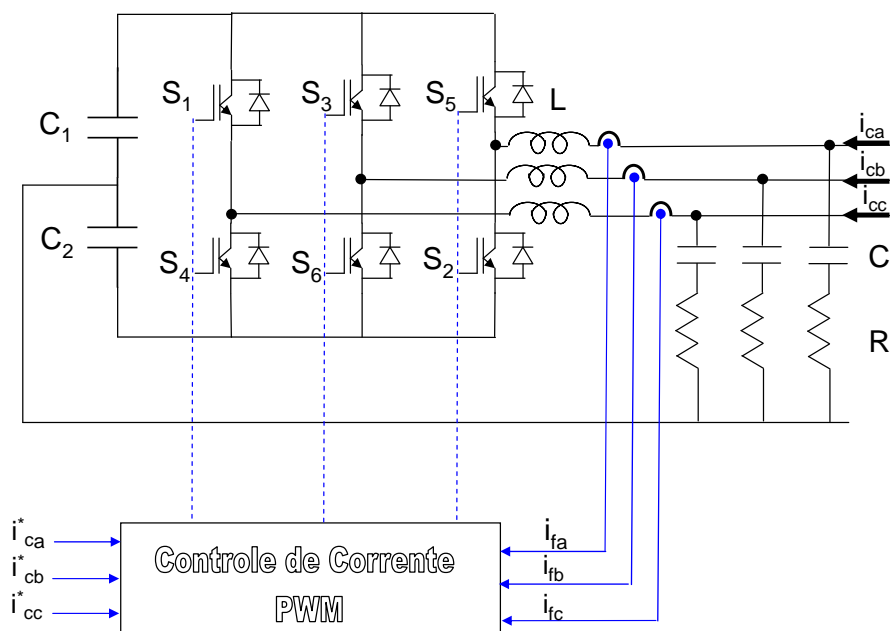


Figura 4.2: Circuito de potência um filtro ativo paralelo.

Os inversores são constituídos por chaves semicondutoras de potência controláveis. A potência do filtro, bem como a frequência de chaveamento requerida, determinará a escolha apropriada da chave. Alguns exemplos de chaves empregadas em equipamentos comissionados são: *Gate Turn-Off (GTO) Thyristors*, *Static Induction Thyristors (SIT)* e *Insulated-Gated Bipolar Transistors (IGBT)* [39]. GTO's de 6 kA e 6 kV são empregados em inversores de potência em aplicações industriais. Nas aplicações em condicionadores de energia, equipamentos com potência na

³Current Source Inverter.

ordem de 20 MVA, 4,5 kV e 3 kA, com frequência de chaveamento média de 300 Hz iniciaram operação na década de 90 no Japão [39]. Os IGBT's começaram a ser empregados em condicionadores naquele país na década de 80, com potência na ordem de 100 kVA e frequência de chaveamento de 8kHz. Em meados da década de 90, a terceira geração de IGBT's eram encontrados com tensão de 1700V e corrente de 600 A para aplicações em geral. Pesquisas continuam na direção de melhorar seu desempenho, estando atualmente na 5ª geração. Maiores detalhes sobre a evolução deste dispositivo, desde a 1ª geração, podem ser encontrados em [41].

A topologia empregada do conversor de potência é a apresentada na Figura 4.2, isto é, o condutor neutro é obtido através de sua conexão entre dois capacitores em série. Alternativamente, este condutor pode ser obtido através de um quarto ramo do conversor, onde sua corrente de referência é o valor negativo da soma das três correntes de fase. Em [42], é possível encontrar um comparativo entre as topologias com três e quatro ramos. No referido artigo, os autores concluem que o conversor com quatro ramos apresenta algumas vantagens em relação ao com três, como por exemplo uma menor tensão CC. Neste trabalho, contudo, optou-se pela configuração com três ramos, objetivando a redução do número de chaves [9].

O circuito de potência do filtro ativo paralelo aqui descrito será empregado na simulação tanto da teoria $p-q$, quanto da $p-q-r$. Sendo assim, apenas aspectos relacionados às estratégias de controle baseados em cada uma das teorias são apresentados a partir da Seção 4.3.

4.2.1 Controlador por banda de histerese e controlador de tensão

Controlador por banda de histerese

Para a geração das correntes de compensação do filtro ativo de potência, é utilizado um controlador por banda de histerese. O chaveamento de cada ramo do inversor é realizado de forma independente, quando as chaves superior e inferior são abertas ou fechadas em função com a comparação do valor atual de corrente (medido nos terminais do conversor) com os valores limites da banda, fornecidos pelo

algoritmo de controle.

Em virtude da utilização do ponto médio dos capacitores série para a obtenção do condutor neutro, existem problemas relativos à variação da tensão de forma independente nos capacitores C_1 e C_2 (Figura 4.2). Isto é possível, já que a corrente percorre apenas um deles e condutor neutro, em um dado intervalo de tempo, causando as diferenças de tensão. Para solucionar o problema, é empregada a técnica proposta em [9], onde é adicionado um *offset* dinâmico (ϵ) nas bandas superior e inferior, de forma a manter a diferença de tensão de ambos capacitores dentro de um certo limite. Seu valor é obtido a partir do regulador de tensão CC, apresentado no próximo tópico.

Os limites da banda de histerese são dados por:

$$\begin{cases} \text{limite superior} = & i_{ck}^* + \Delta(1 + \epsilon) \\ \text{limite inferior} = & i_{ck}^* - \Delta(1 - \epsilon) \end{cases}$$

com i_{ck}^* ($k = a, b, c$) e Δ equivale à metade da largura de banda. Como $1 \leq \epsilon \leq -1$, o valor total da banda (2Δ) não varia. Somente a referência em seu interior é modificada. Desta forma, dependendo do valor de ϵ , haverá alteração no tempo de abertura/fechamento das chaves, alterando a carga/descarga de cada capacitor, isto é,

$$\begin{cases} \epsilon > 0 \Rightarrow \text{aumenta } V_{C1} \text{ e diminui } V_{C2} \\ \epsilon < 0 \Rightarrow \text{aumenta } V_{C2} \text{ e diminui } V_{C1} \end{cases}$$

Regulador de tensão CC

A finalidade do regulador é manter as tensões dos capacitores C_1 e C_2 dentro de limites especificados. As principais causas de variação da tensão dos capacitores são:

- Perdas por chaveamento nos dispositivos semicondutores de potência.
- Corrente de neutro, devido à utilização da topologia “capacitor dividido” (dois capacitores).

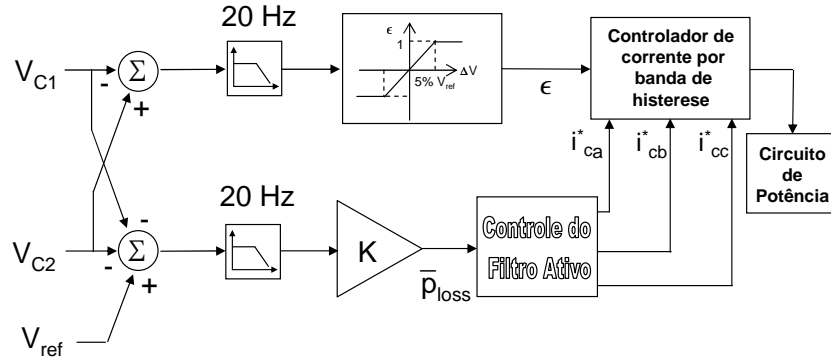


Figura 4.3: Regulador de tensão CC na configuração de capacitores divididos.

- Compensação da parcela oscilante da potência ativa (\tilde{p} e \tilde{p}_0) da carga.
- Consumo/fornecimento de potência real média devido à presença simultânea de componentes harmônicos de mesma seqüência e frequência na tensão do sistema e nas correntes de compensação (vide página 30).

O controle empregado neste trabalho é o que foi proposto em [9], onde são gerados dois sinais: \bar{p}_{loss} e ϵ .

O primeiro é empregado no algoritmo de controle para determinação das correntes de referência como sendo um consumo ou fornecimento de potência real média. Caso o valor de $V_{C1} + V_{C2}$ seja maior que a tensão de referência V_{ref} , o inversor fornece energia para o sistema, de forma a reduzir as tensões. Caso contrário, o inversor consumirá energia para aumentá-las.

O sinal ϵ , conforme já discutido anteriormente, é gerado para o controle por banda de histerese da seguinte forma:

$$\begin{cases} \epsilon = -1 & \Leftrightarrow \Delta V < -0.05V_{ref} \\ \epsilon = 1 & \Leftrightarrow \Delta V > 0.05V_{ref} \\ \epsilon = \frac{\Delta V}{0.05V_{ref}} & \Leftrightarrow -0.05V_{ref} \leq \Delta V \leq 0.05V_{ref}, \end{cases} \quad (4.1)$$

com

$$\Delta V = V_{C2} - V_{C1},$$

onde o valor 0.05 foi escolhido como sendo o limite da diferença de variação das tensões dos capacitores.

O filtro passa baixa de 20Hz introduzido no regulador faz com que o mesmo não responda à variações das tensões do capacitor devido à compensação da corrente de neutro na frequência fundamental.

4.3 Estratégias de controle baseadas na teoria $p-q$

No Capítulo 2 estão apresentadas duas estratégias de controle baseadas na teoria $p-q$. A primeira visa otimizar o fluxo de potência entre dois subsistemas, enquanto a segunda tem o objetivo compensar as correntes de carga, tornando-as senoidais e equilibradas, independentemente das condições de tensão. Foi proposta uma terceira alternativa, quando o objetivo é compensar a corrente de seqüência zero sem o emprego de elementos armazenadores de energia.

Nesta seção, visando verificar o desempenho do filtro ativo paralelo com estratégia de controle baseada na teoria $p-q$, são realizadas simulações digitais relativas ao método de correntes senoidais e de compensação de corrente de neutro sem elementos armazenadores de energia. Estes dois métodos são, posteriormente, comparados com seus congêneres da teoria $p-q-r$.

4.3.1 Detector de seqüência positiva baseado na teoria $p-q$

Com o objetivo de obter correntes senoidais da fonte, é necessário o conhecimento da tensão fundamental de seqüência positiva do sistema. O detector de seqüência positiva é capaz de determinar a componente V_{+1} através do emprego do circuito PLL, em condições quaisquer de tensões. O PLL, por sua vez, também será empregado no método de controle de referência de corrente da teoria $p-q-r$.

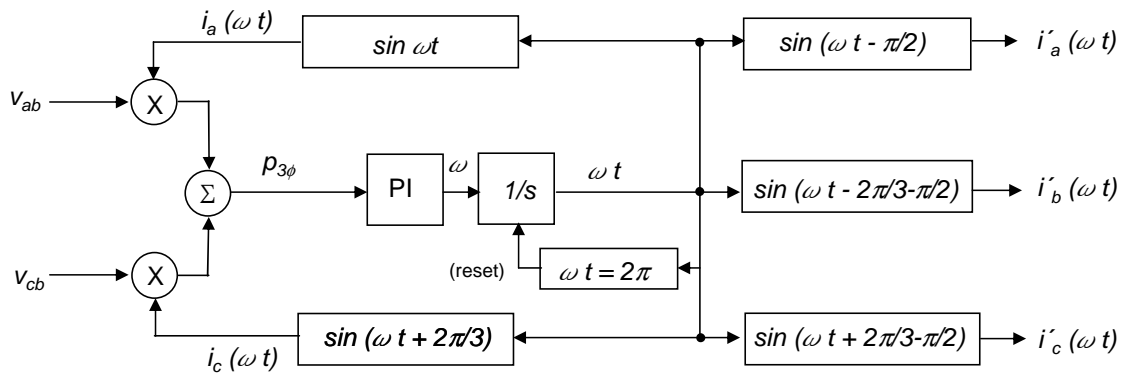


Figura 4.4: Circuito PLL.

Circuito PLL

O circuito PLL é capaz de determinar, em regime permanente, a fase e a frequência da componente fundamental de seqüência positiva das tensões do sistema. As entradas do circuito são as tensões v_{ab} e v_{cb} , baseado na equação de potência trifásica instantânea ⁴ nas coordenadas a - b - c :

$$p_{3\phi} = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c = v_{ab} i_a + v_{cb} i_c, \quad (4.2)$$

supondo que

$$i_a + i_b + i_c = 0. \quad (4.3)$$

Em regime permanente, a presença do controlador PI faz com que não haja erro de estado estacionário, isto é, $\bar{p}_{3\phi} = 0$. Isto irá acontecer quando as correntes fictícias i_a e i_c estiverem adiantadas de 90° de suas respectivas tensões. Neste caso, haveria a produção apenas de “potência imaginária”. Finalmente, a presença do integrador $\frac{1}{s}$ gera o sinal ωt a partir de ω , sendo reinicializado a cada 2π rad. As correntes $i'_k (k=a,b,c)$ devem, então, ser atrasadas em 90° para obtenção da fase correta das tensões do sistema. Se necessário, as correntes fictícias podem ser obtidas nas coordenadas $\alpha\beta$ diretamente, isto é:

⁴Esta potência é fictícia, assim como as correntes i_a e i_c

$$\begin{cases} i'_\alpha = \sin(\omega_1 t) \\ i'_\beta = -\cos(\omega_1 t) \end{cases} \quad (4.4)$$

Circuito detector de seqüência positiva

Através do circuito detector de seqüência positiva, é possível determinar com precisão a fase e a magnitude da componente fundamental de seqüência positiva (V_{+1}) das tensões do sistema. A idéia é baseada em dois princípios. O primeiro é o circuito PLL, descrito na seção anterior, que fornece correntes fictícias $i'_k (k=\alpha, \beta)$, que possuem somente a componente I'_{+1} . O segundo é o cálculo das potências auxiliares p' e q' , através da expressão:

$$\begin{bmatrix} p' \\ q' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i'_\alpha \\ i'_\beta \end{bmatrix}. \quad (4.5)$$

Admite-se, neste caso, que as tensões do sistema já foram transformadas para as coordenadas $\alpha\beta 0$. Separando as potências auxiliares obtidas em suas parcelas média e oscilante, através de um filtro Butterworth de 5ª ordem, suas parcelas médias são devidas somente à componente (V_{+1}) [9].

De posse destas parcelas, determina-se as tensões a partir da expressão:

$$\begin{bmatrix} v'_{\alpha c} \\ v'_{\beta c} \end{bmatrix} = \frac{1}{i'^2_\alpha + i'^2_\beta} \begin{bmatrix} i'_\alpha & -i'_\beta \\ i'_\beta & i'_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{p} \\ \bar{q} \end{bmatrix}. \quad (4.6)$$

Caso necessário, as tensões obtidas nas coordenadas $\alpha\beta$ podem ser transformadas para $a-b-c$ (2.2). Desta forma, as tensões resultantes correspondem somente à componente V_{+1} em regime permanente, em quaisquer condições do sistema.

4.3.2 Estratégia de controle de correntes senoidais da fonte

Esta estratégia foi apresentada na página 23, onde verificou-se que não é possível atender simultaneamente, sob determinadas condições, correntes senoidais e potência constante na fonte. As diferenças, neste caso, são:

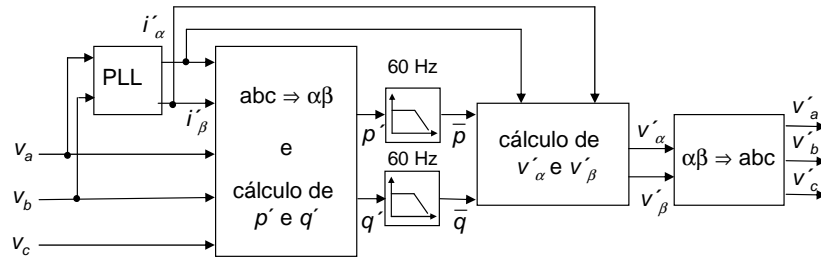


Figura 4.5: Detector de seqüência positiva baseado na teoria p - q .

- As tensões utilizadas no algoritmo principal serão provenientes do detector de seqüência positiva, ao invés das tensões medidas diretamente da rede.
- Não é necessário determinar p_0 (e conseqüentemente determinar \bar{p}_0) para realizar o balanço de energia no filtro, já que as tensões provenientes do detector de seqüência positiva não possuem v_0 .
- Como não é feito o balanço de energia para compensação da componente de seqüência zero, caso $p_0 \neq 0$, o regulador de tensão deve manter a tensão dos capacitores reguladas, já que o filtro fornecerá \bar{p}_0 . Isto será feito através do componente \bar{p}_{loss} , apresentado na Seção 4.2.1.

O diagrama de blocos contendo todos os módulos do algoritmo de controle de correntes senoidais da fonte pode ser visto na Figura 4.6.

4.3.3 Estratégia de controle de compensação de corrente de neutro sem elementos armazenadores de energia

Considere, inicialmente, a estratégia de controle de potência constante da fonte, conforme a Figura 4.7.

A única diferença para a implementação da estratégia de controle de compensação de corrente de neutro, em relação ao existente na Figura 4.7, é que não é mais necessário realizar a separação da potência p_0 em suas componentes média e oscilante, já que seu valor entra diretamente na determinação das correntes de compensação, conforme (2.31). Desta forma, o sinal \bar{p}_{loss} será devido apenas às perdas

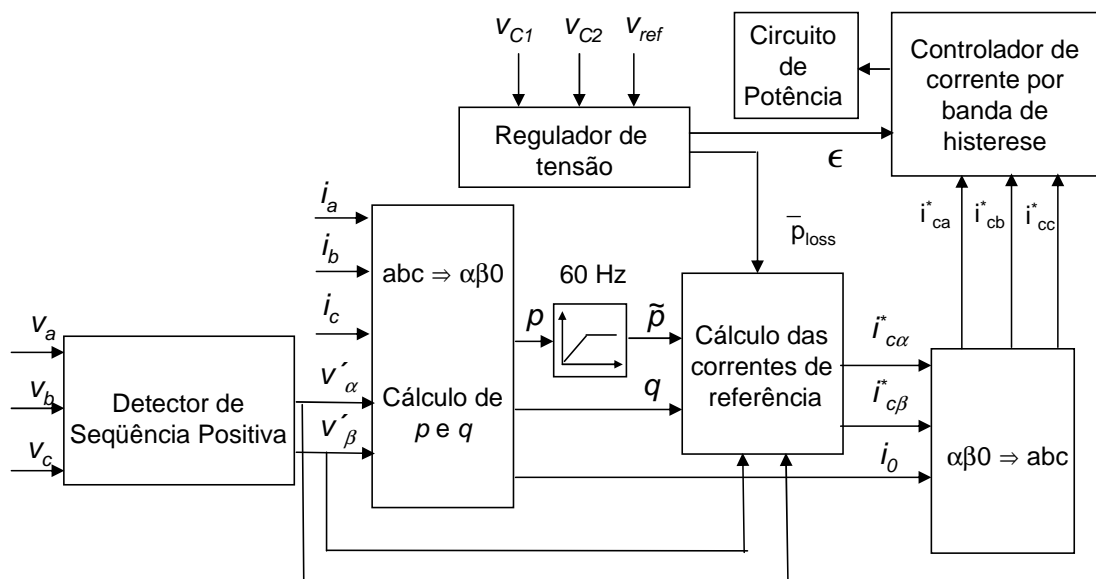


Figura 4.6: Bloco de controle do filtro ativo paralelo baseado na teoria p - q com correntes senoidais da fonte.

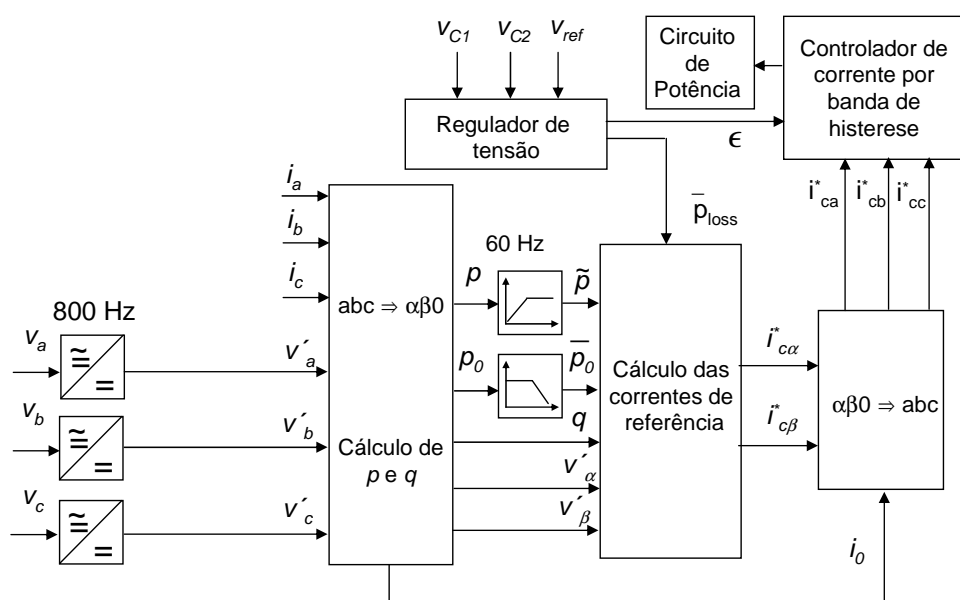


Figura 4.7: Bloco de controle do filtro ativo paralelo baseado na teoria p - q com potência constante da fonte.

associadas ao chaveamento dos dispositivos semicondutores.

Conforme apresentado em [9], devido às oscilações de alta frequência entre a impedância do sistema e o filtro RC da saída do inversor, as tensões do sistema não são diretamente utilizadas no controle, mas sim através de um filtro passa baixa, com frequência de corte de 800 Hz, de forma a atenuar os harmônicos que contribuem com este fenômeno.

4.3.4 Resultados de simulação empregando a teoria p-q

Visando analisar o funcionamento do filtro ativo paralelo, são apresentados nesta seção alguns resultados de simulações digitais baseadas na teoria p-q, tanto para a estratégia de controle de correntes senoidais da fonte, quanto para eliminação da corrente de neutro sem o emprego de elementos armazenadores de energia. As simulações foram realizadas a partir do PSCAD/EMTDC com passo de integração fixo igual a 8μ s, com um tempo total de simulação de 0,25 s.

O sistema simulado consiste em uma fonte trifásica, 60 Hz, 220V. Adicionalmente, foram incluídos os seguintes componentes harmônicos:

$$\dot{V}_{01} = 12\angle 0, \quad \dot{V}_{-3} = 6\angle 0 \quad V$$

A indutância equivalente do sistema vale 1,9 mH e a resistência 0,1 Ω . A carga é composta por duas pontes retificadoras, sendo a primeira trifásica controlável, com ângulo de disparo de 15° , indutância de entrada de 2,6 mH, e carga CC modelada como fonte de corrente constante, com potência de 2 kW. A segunda ponte é monofásica, não controlada, com indutância de entrada de 2,6 mH, e carga CC de 800 W, também modelada como fonte de corrente.

Os indutores de saída do inversor VSI do filtro ativo valem 10 mH e os capacitores utilizados como elementos armazenadores de energia apresentam um valor de 3000 μ F cada um, com tensão de referência igual a 300 V. Esta referência é mantida através do ajuste do controlador proporcional do regulador de tensão, $K_p = 5$. Para realizar a filtragem dos componentes de alta frequência gerados pelo inversor, é empregado um filtro passa alta RC, com valores de 1 Ω e 15 μ F por fase, respecti-

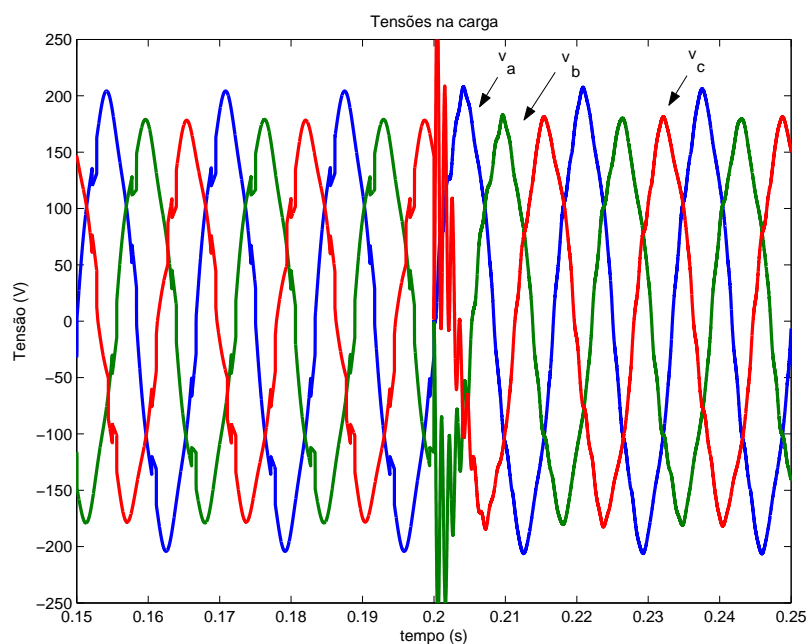


Figura 4.8: Tensões nos terminais da carga - estratégia de controle de correntes senoidais da fonte.

vamente, conectados em estrela, na saída do inversor, considerando uma frequência de chaveamento menor que 18 kHz.

Inicialmente, são mostrados os resultados empregando-se a estratégia de controle de correntes senoidais da fonte. A seguir, o desempenho do filtro empregado para eliminar a corrente de neutro sem elementos armazenadores de energia é apresentado.

As tensões do sistema podem ser visualizadas na Figura 4.8, compostas de componentes de seqüência negativa e zero, conforme descrito anteriormente. Desde já verifica-se que, ao conectar o filtro ativo paralelo no sistema ($t = 0.2$ s), houve uma melhora nas tensões após o transitório de conexão do filtro na rede, devido à compensação das correntes da fonte.

Como o objetivo desta estratégia de controle é a obtenção de correntes senoidais da fonte, é apresentada na Figura 4.9 as tensões obtidas a partir do detector de seqüência positiva. Em virtude da dinâmica do circuito de sincronismo, o sistema atinge o regime permanente em aproximadamente 0,07 s.

As correntes da fonte podem ser visualizadas na Figura 4.10. O filtro ativo paralelo entra em operação em $t = 0,2$ s. Até este instante, é possível identificar as

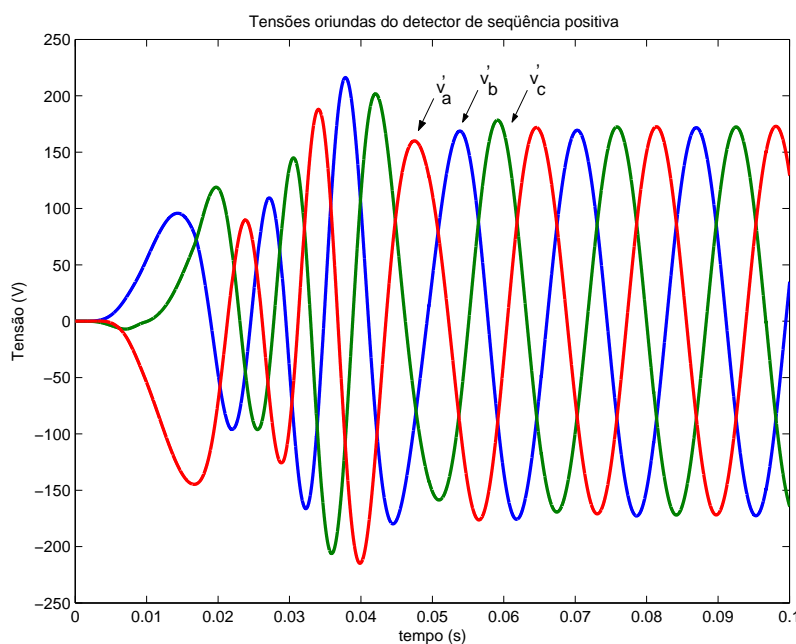


Figura 4.9: Tensões geradas pelo detector de seqüência positiva - estratégia de controle de correntes senoidais da fonte.

correntes típicas de conversores CA/CC com cargas altamente indutivas. A corrente na fase “c” é maior devido à conexão do retificador monofásico a diodos. As correntes tornaram-se aproximadamente senoidais, deterioradas por correntes geradas por harmônicos de tensão e que fluem pelos filtros passa alta (ramo RC) do filtro ativo. Para realizar o isolamento harmônico de correntes desta natureza, pode-se empregar o filtro ativo série, que gera uma “resistência dinâmica” para as mesmas. A corrente de compensação gerada pela estratégia de controle em uma das fases, bem como a fornecida pelo controle por banda de histerese do filtro ativo, são mostradas na Figura 4.11. A corrente do filtro começa a seguir a referência em $t = 0.2$ s. Na Figura 4.12 são mostradas as correntes de seqüência zero da fonte e da carga, onde é possível verificar duas componentes: a primeira, com freqüência de 1 kHz, devido à ocorrência de ressonâncias entre o sistema e o filtro passa alta. O segundo, de 60 Hz, é devido à excitação de corrente fluindo para o filtro RC devido à componente fundamental de tensão de seqüência zero ($V_{01} = 12V$).

A tensão nos capacitores C_1 e C_2 podem ser vistas na Figura 4.13, onde são mantidas em torno da referência de 300 V, através do regulador de tensão. Uma variação na freqüência de 60 Hz é observada devido à compensação da componente de seqüência zero da corrente de carga.

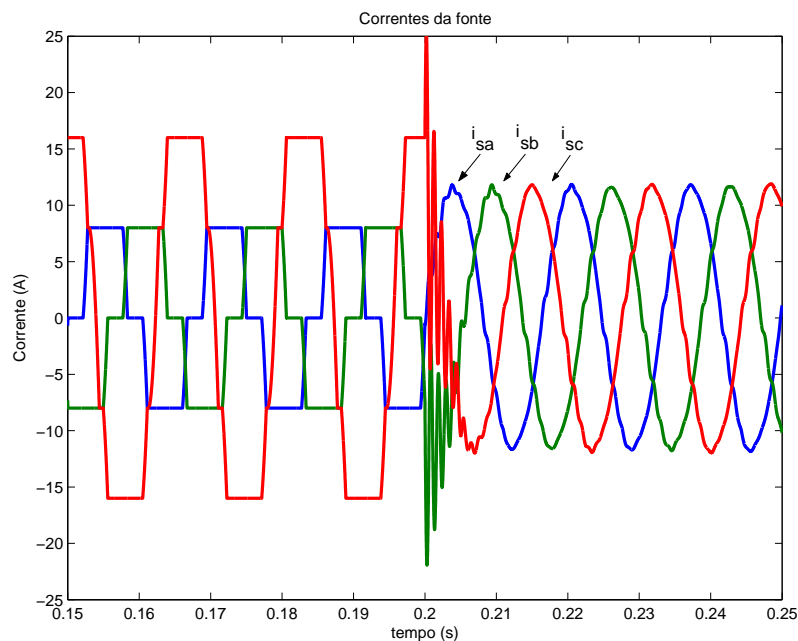


Figura 4.10: Correntes da fonte antes e após a conexão do filtro paralelo - estratégia de controle de correntes senoidais da fonte.

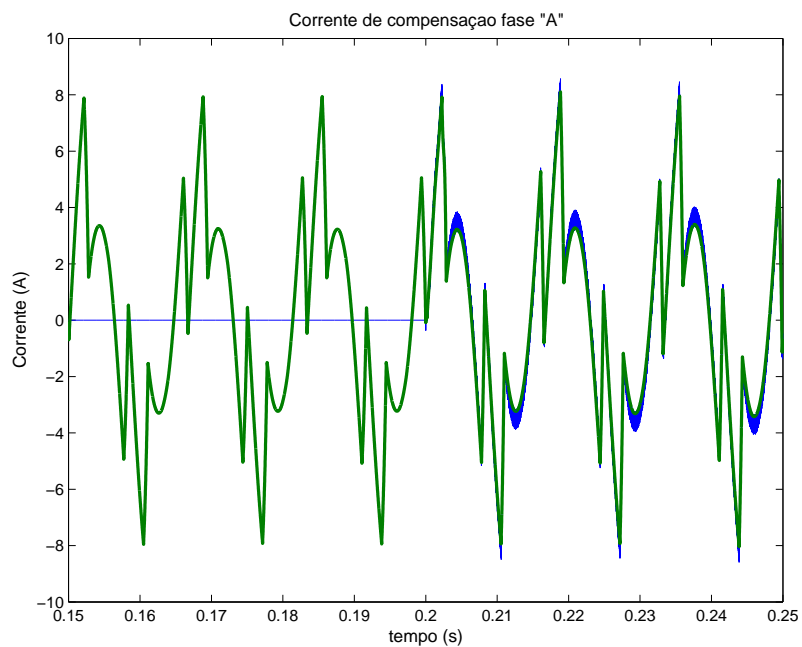


Figura 4.11: Correntes de compensação geradas pela estratégia de controle e pelo controle por banda de histerese - estratégia de controle de correntes senoidais da fonte.

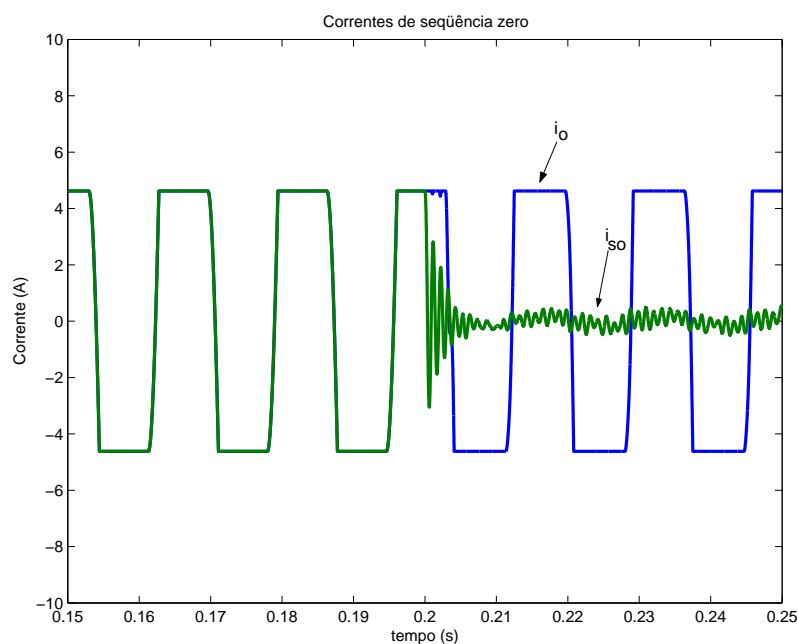


Figura 4.12: Correntes de seqüência zero da fonte e da carga - estratégia de controle de correntes senoidais da fonte.

De acordo com a proposta inicial do controle baseado na estratégia de correntes senoidais da fonte, as simulações do filtro ativo paralelo apresenta resultados dentro das expectativas, onde o objetivo principal foi alcançado. O regulador de tensão cumpriu as finalidades propostas, mantendo a tensão dos capacitores próximos aos valores de referência, fazendo com que as perdas devido ao chaveamento e produtos de harmônicos de mesma seqüência/freqüência (que produzem potência real constante) fossem compensadas drenando potência real da fonte através do sinal de controle \bar{p}_{loss} da Figura 4.6.

A seguir, encontram-se os resultados de simulação empregando-se a estratégia de controle para eliminação da corrente de neutro sem elementos armazenadores de energia.

Com o objetivo de avaliar o comportamento do filtro para este caso, são introduzidas as seguintes modificações em relação ao caso anterior:

- Além da fundamental, foi introduzida apenas o componente $V_{01} = 22\angle 0^\circ$ V.
- As cargas são lineares, compostas por uma indutância de 2,6 mH e uma resistência de 10Ω , conectadas em estrela. Na fase “c”, foi introduzida uma

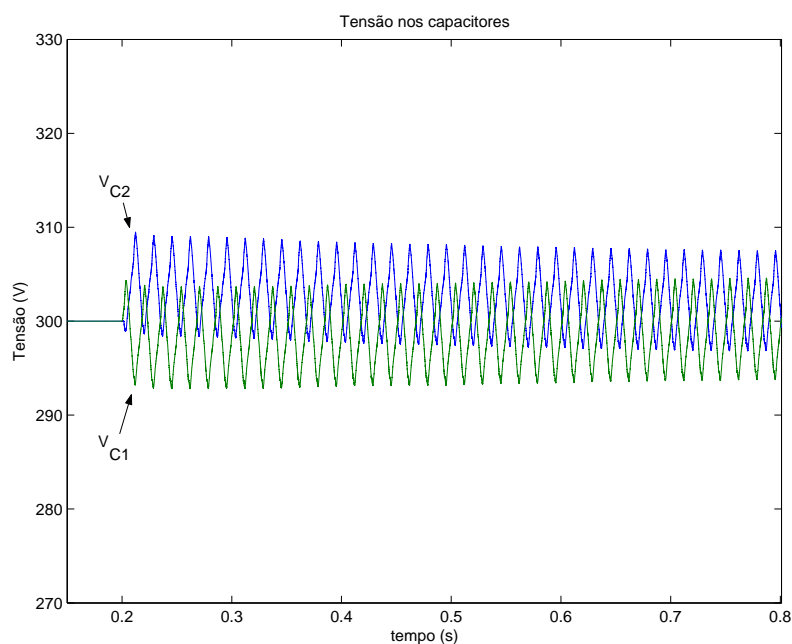


Figura 4.13: Tensão nos capacitores do inversor VSI - estratégia de controle de correntes senoidais da fonte.

impedância de mesmo valor com o objetivo de gerar a corrente i_0 .

As tensões na carga podem ser vistas na Figura 4.14, onde verifica-se a presença da componente fundamental de seqüência zero pelo aumento do valor eficaz da tensão na fase “a”.

Na Figura 4.15, é possível observar o comportamento da corrente de neutro, devido à presença da carga indutiva monofásica conectada na fase “c”. Em $t = 0,2$ s o filtro é conectado ao sistema, realizando sua compensação.

Contudo, como o objetivo da estratégia de controle é a compensação da corrente de neutro sem elementos armazenadores de energia, é necessário observar a potência trifásica do filtro ativo paralelo. Isto é possível na da Figura 4.16, onde verifica-se que a potência trifásica relativa à compensação é nula, a menos da perda devido aos chaveamentos do inversor.

O objetivo desta estratégia de controle está focado apenas na eliminação da corrente de neutro. Conseqüentemente, não há preocupação na obtenção de correntes senoidais. Desta forma, na Figura 4.17, é possível observar seu comportamento. Estas correntes produzem potência p oscilante, contudo não produzem p_0 , já que $i_0 = 0$.

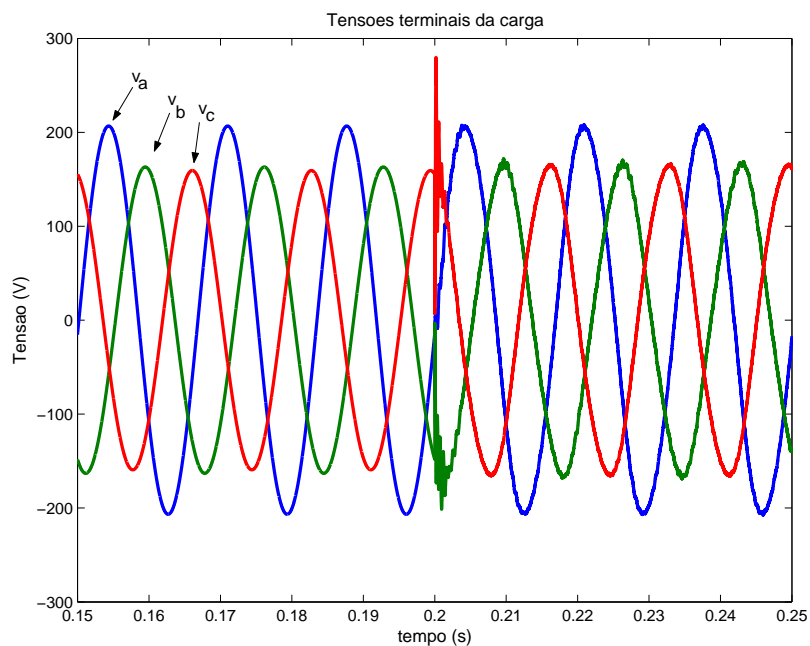


Figura 4.14: Tensões terminais da carga antes e após a conexão do filtro ativo - estratégia de controle de eliminação da corrente de neutro sem elementos armazenadores de energia.

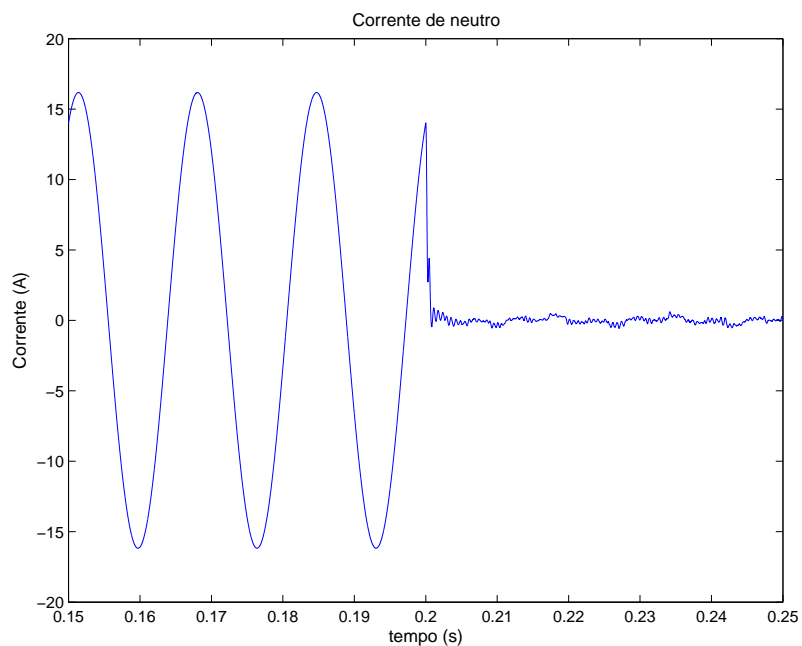


Figura 4.15: Corrente de neutro da fonte antes e depois da conexão do filtro ativo - estratégia de controle de eliminação da corrente de neutro sem elementos armazenadores de energia.

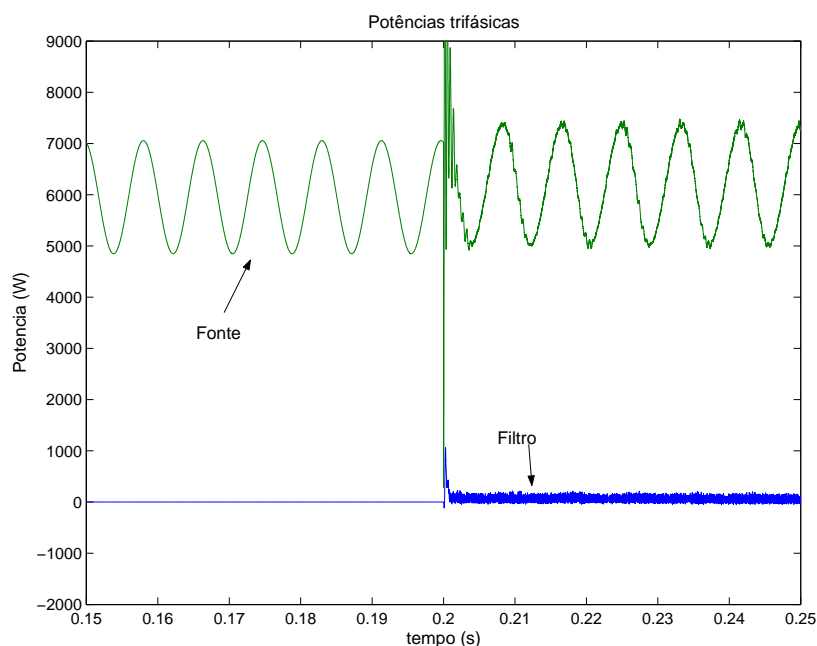


Figura 4.16: Potências trifásicas do filtro ativo e da fonte - estratégia de controle de eliminação da corrente de neutro sem elementos armazenadores de energia.

A potência imaginária também foi compensada, uma vez que também dispensa o uso de elementos armazenadores no inversor do filtro.

4.4 Estratégias de controle baseadas na teoria $p-q-r$

No Capítulo 3, duas estratégias de controle baseadas na teoria $p-q-r$ foram apresentadas. A primeira realiza a eliminação da corrente de neutro sem elementos armazenadores de energia compensando somente a potência reativa q_q . A segunda estratégia propõe a obtenção de correntes senoidais da fonte, porém sendo necessário o uso de elementos armazenadores de energia. Neste caso, entretanto, foi verificado que o pré-processamento das tensões do sistema melhora o desempenho do método.

A fim de realizar as simulações digitais do filtro ativo paralelo, foram empregados o circuito de potência, o regulador de tensão e o controlador por banda de histerese com a configuração descritos na Seção 4.3. Desta forma, apenas o emprego do circuito de sincronismo PLL é detalhado e, logo a seguir, são apresentados resultados

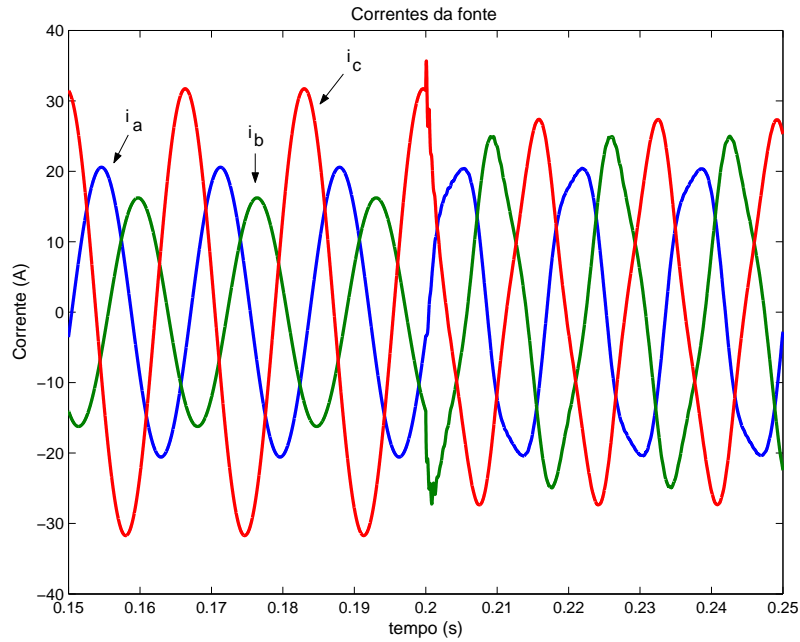


Figura 4.17: Correntes drenadas da fonte - estratégia de controle de eliminação da corrente de neutro sem elementos armazenadores de energia.

de simulação para os dois métodos de compensação (referência de potência e correntes senoidais). Em relação ao método de correntes senoidais, são comparados os resultados com e sem o pré-processamento das tensões terminais da carga.

Método de controle de referência de potência

Como já descrito neste trabalho, o objetivo do método de controle de referência de potência é a eliminação da corrente de neutro sem o emprego de elementos armazenadores de energia. O algoritmo foi descrito na Seção 3.3.1, sendo as potências de compensação dadas por:

$$p_{3\phi c} = \bar{p}_{loss} \quad (4.7)$$

$$q_{qc} = q_q - q'_q = q_q - \left(\frac{v_0}{v_{\alpha\beta}}\right)p_{3\phi c} \quad (4.8)$$

$$q_{rc} = q_r \text{ ou } q_{rdc} \text{ ou } q_{rac} \quad (4.9)$$

Houve uma alteração na potência ativa trifásica de compensação (4.7) já que, originalmente, o algoritmo impõe que esta potência seja nula. Porém é necessário

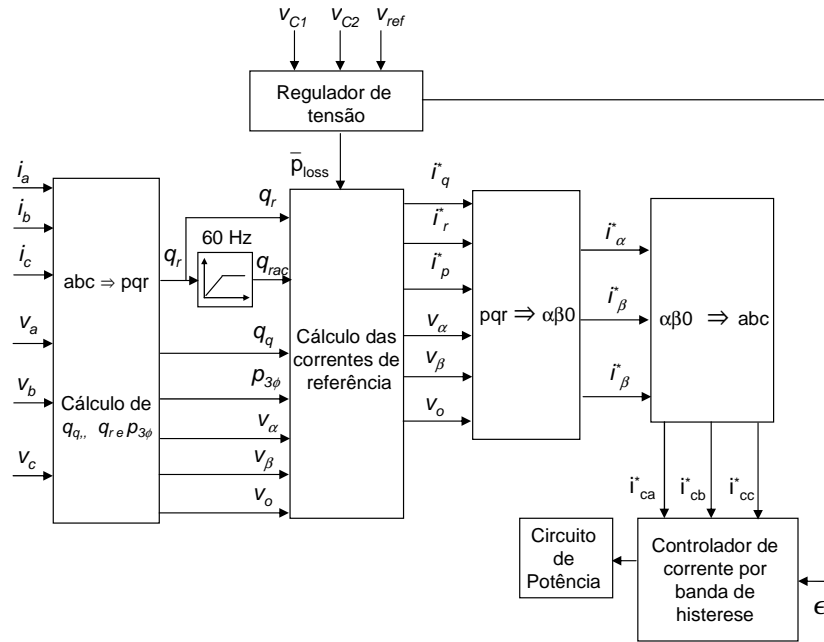


Figura 4.18: Diagrama de blocos do método de referência de potência - teoria $p-q-r$.

o controle das tensões dos capacitores do filtro ativo através do sinal \bar{p}_{loss} oriundo do regulador de tensão. Isto implica que a corrente de compensação i_p^* , determinada a partir de (3.12), sofrerá influência tanto do modo homopolar, quanto dos não-homopolares. Neste caso, podem ser introduzidas no sistema componentes de seqüência zero de corrente não existentes inicialmente. Cabe salientar que ainda não há na literatura qualquer referência sobre a regulação da tensão dos capacitores do filtro ativo baseado na teoria $p-q-r$.

Adicionalmente, a separação da componentes média e oscilante da potência reativa q_r (3.22), é feita através de um filtro Butterworth de 5ª ordem, com frequência de corte de 60 Hz. O diagrama do método pode ser observado na Figura 4.18. Notar que o valor de $p_{3\phi}$ entra no bloco de cálculo das correntes de referência nas coordenadas $p-q-r$ já que a potência de compensação q_{qc} utiliza esta variável, de acordo com (4.8).

Método de controle de referência de corrente

O método de controle de referência de corrente propõe compensar as correntes da fonte, de forma a torná-las senoidais e equilibradas. O custo, neste caso, está

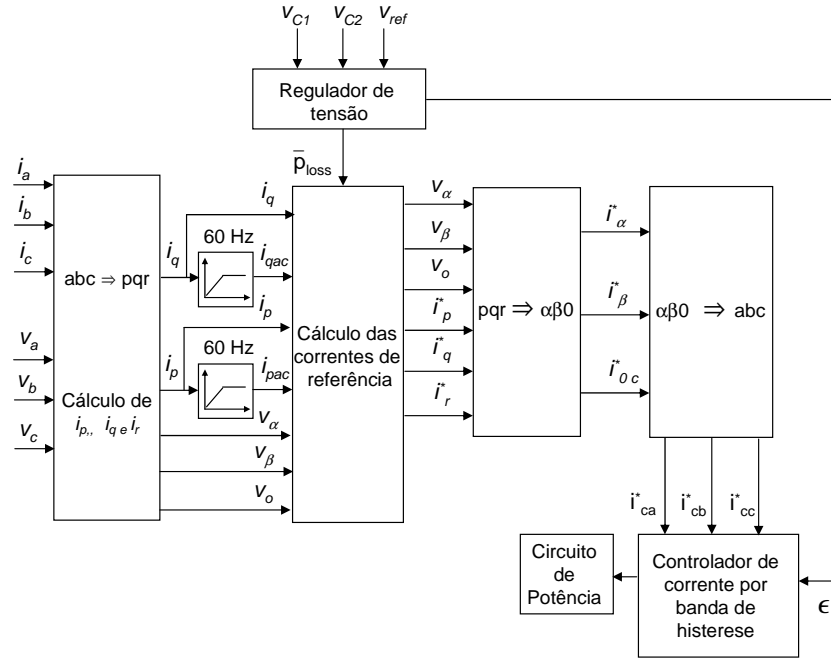


Figura 4.19: Diagrama de blocos do método de referência de corrente - teoria $p-q-r$.

associado à necessidade de elementos armazenadores de energia, uma vez que a potência trifásica instantânea do filtro é diferente de zero. Conforme já descrita na Seção 3.3.2, é necessária a separação das correntes i_p e i_q em parcelas média e oscilante. Mais uma vez, isto é realizado através de um filtro Butterworth de 5ª ordem, com frequência de corte de 60 Hz. As correntes de compensação são dadas por:

$$i_{pc} = i_{pac} + \frac{\bar{p}_{loss}}{v_{pdc}} \quad (4.10)$$

$$i_{qc} = i_q \text{ ou } i_{qac} \text{ ou } i_{qdc} \quad (4.11)$$

$$i_{rc} = i_r + \frac{v_o}{v_{\alpha\beta}} i_p \quad (4.12)$$

Observa-se que, adicionalmente à corrente i_{pac} prevista pelo método, foi adicionada a parcela $\frac{\bar{p}_{loss}}{v_p}$, objetivando a regulação da tensão dos capacitores. Este procedimento, contudo, deteriora o desempenho do algoritmo, tendo em vista que esta parcela adicional introduzirá harmônicos no sistema não existentes anteriormente, já que, como já mostrado, a parcela média de v_p não corresponde somente à componente fundamental e de seqüência positiva das tensões do sistema. Na Figura 4.19 é mostrado o diagrama do método de controle de referência de corrente.

Ainda no capítulo anterior, verificou-se que a utilização de tensões senoidais e equilibradas no algoritmo melhora seu desempenho. A seguir, é proposta a utilização do circuito de sincronismo PLL para atingir este objetivo.

Emprego do circuito de sincronismo PLL no método de referência de corrente

Dentre os pontos discutidos a respeito da compensação de sistemas trifásicos baseados na teoria $p-q-r$, dois poderiam ser destacados neste momento: primeiro é que a parcela média da tensão e das correntes nas referências girantes $p-q-r$ não corresponderão às suas respectivas componentes fundamentais e de seqüência positiva. O segundo, sendo uma consequência do primeiro, é a necessidade de fornecer a informação da fase e da freqüência da componente V_{+1} das tensões do sistema, melhorando o desempenho do método em epígrafe.

Neste sentido, o circuito de sincronismo PLL, já descrito na Seção 4.3.1, é novamente empregado. Este circuito fornece ao algoritmo tensões senoidais e equilibradas fictícias nas coordenadas $\alpha\beta$ (ou $a-b-c$) com freqüência e fase da componente V_{+1} das tensões da rede. Nesta condição, é possível afirmar que, ao separar os valores médio e oscilante das correntes i_p e i_q , o primeiro corresponderá somente à componente fundamental e de seqüência positiva das correntes de carga, enquanto o segundo corresponderá aos demais harmônicos. Entretanto, a informação do módulo dos vetores \vec{i}_p e \vec{i}_q será diferente daquela quando são utilizadas as tensões da rede diretamente na transformação $\alpha\beta0$ $p-q-r$ (3.5). Por outro lado, quando ocorre a transformação inversa (3.7), as correntes de compensação nas coordenadas $\alpha\beta0$ (ou $a-b-c$) recuperam esta informação corretamente.

As tensões oriundas do PLL não contém componente de seqüência zero. Como consequência, o algoritmo não consegue compensar a parcela adicional $\frac{v_0}{v_{\alpha\beta}} i_p$ da corrente de compensação i_r (4.12). Apesar disto, a compensação da corrente de neutro é possível, já que no cálculo das correntes de compensação nas coordenadas $a-b-c$ é considerada a influência da corrente i_0 , como mostra (3.23). A corrente i_0 , por sua vez, é igual à i_r nestas condições, conforme apresentado em (3.16).

O esquema do método de referência de corrente pode ser observado na Figura 4.20

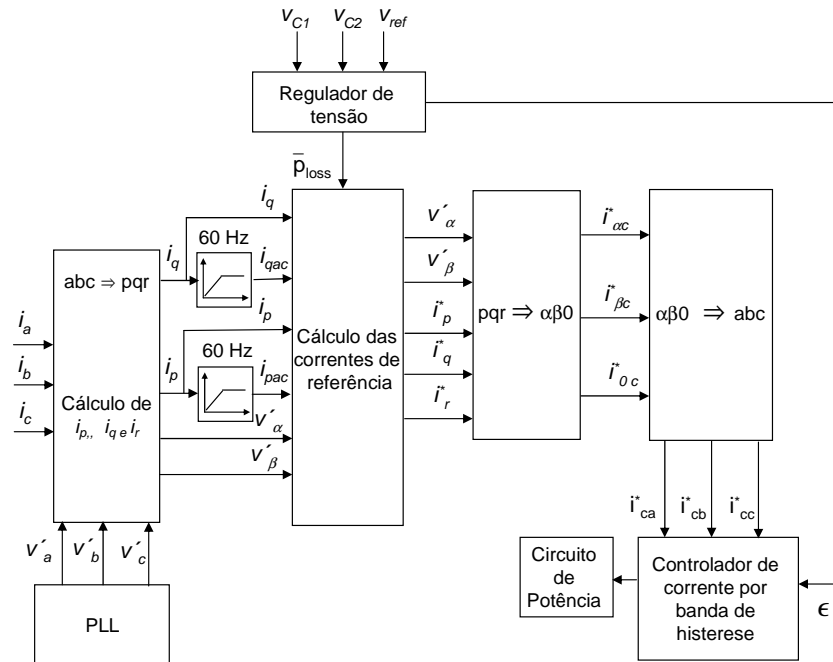


Figura 4.20: Diagrama de blocos do método de referência de corrente com pré-processamento das tensões - teoria $p-q-r$.

quando são utilizadas tensões oriundas do PLL. Notar que o sinal v_0 foi suprimido, quando comparado ao diagrama do método de referência de corrente original da Figura 4.19.

4.4.1 Resultados de simulação empregando a teoria $p-q-r$

A seguir, é analisado o desempenho do filtro ativo paralelo baseado na teoria $p-q-r$. Inicialmente, são apresentados os resultados do **método de controle de referência de potência** [34], cujo objetivo é eliminar a corrente de neutro sem elementos armazenadores de energia, atuando somente nas potências reativas. O circuito de potência é o mesmo já utilizado anteriormente. Toda a a potência reativa q_r de carga está sendo compensada, lembrando que as parcelas média e oscilante poderiam ser separadas para realizar uma compensação seletiva desta potência.

Considerando-se as tensões trifásicas, 60 Hz, 220V com os seguintes componentes adicionais (Fig. 4.27):

$$\dot{V}_{01} = 22\angle 0, \quad \dot{V}_{-3} = 12\angle 0 \quad V$$

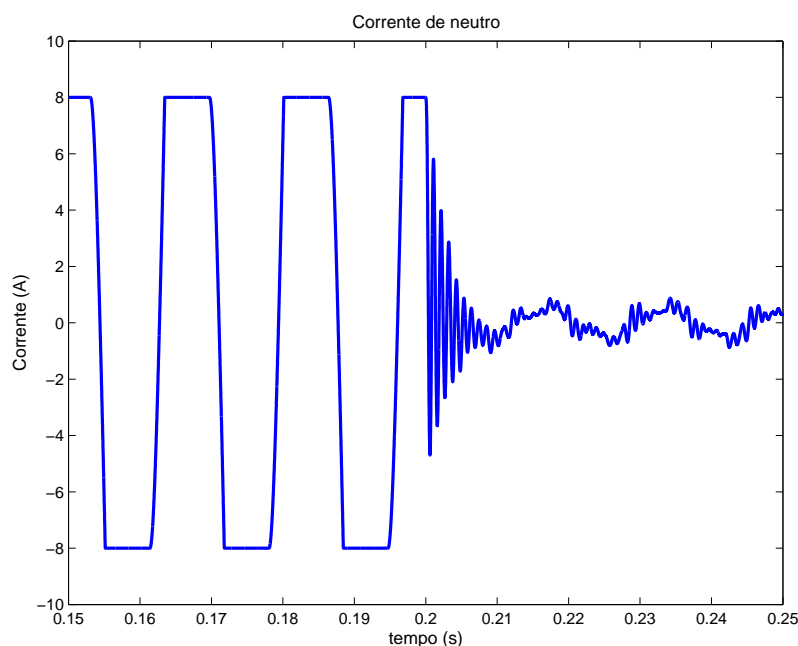


Figura 4.21: Corrente de neutro antes e depois da conexão do filtro ativo - método de referência de potência.

Considerando as tensões do sistema (Fig. 4.27), o emprego do método de controle de referência de potência reduz a corrente de neutro significativamente, com resultado próximo ao obtido nas demais estratégias de controle. Esta corrente pode ser vista na Figura 4.21, considerando que o filtro foi conectado ao sistema em $t = 0,2$ s.

As potências trifásicas da fonte e do filtro ativo são mostradas na Figura 4.22. Nesta estratégia, o sinal \bar{p}_{loss} , da mesma forma que no filtro ativo baseado na teoria $p-q$, é utilizado para controlar variações nas tensões dos capacitores do filtro ativo. Portanto, no cálculo da correntes de compensação i_p foi considerada esta potência média, correspondendo ao consumo/fornecimento de potência instantânea trifásica.

Conforme mostrado em [34], este método de controle não tem compromisso em relação às correntes resultantes da fonte, já que o objetivo é a eliminação da corrente de neutro sem elementos armazenadores de energia. Estas correntes são mostradas na Figura 4.23.

Considerando, agora, o objetivo de tornar as correntes da fontes senoidais e equilibradas, são apresentados os resultados utilizando o **método de controle de correntes senoidais da fonte**. Neste método, duas condições de tensões terminais

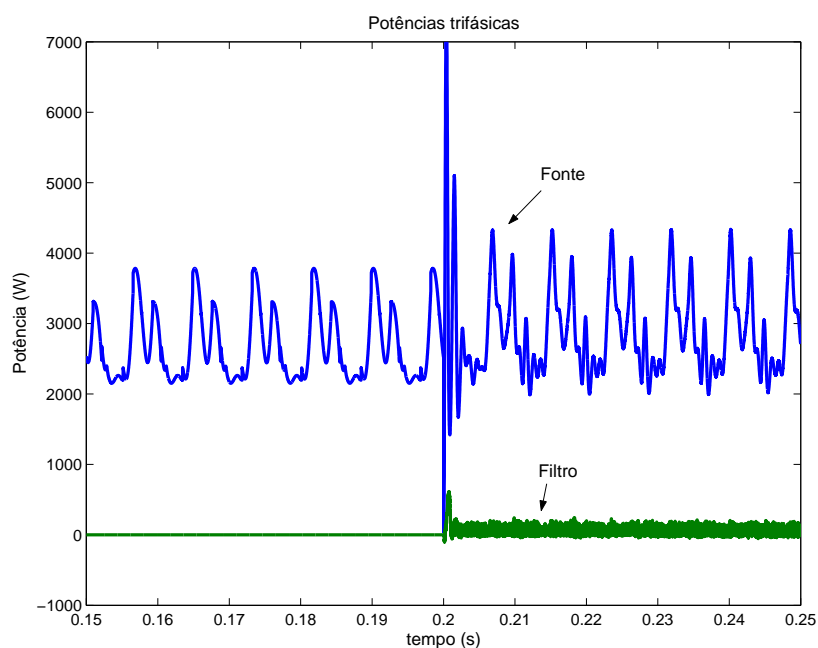


Figura 4.22: Potências trifásicas do filtro ativo e da fonte - método de referência de potência.

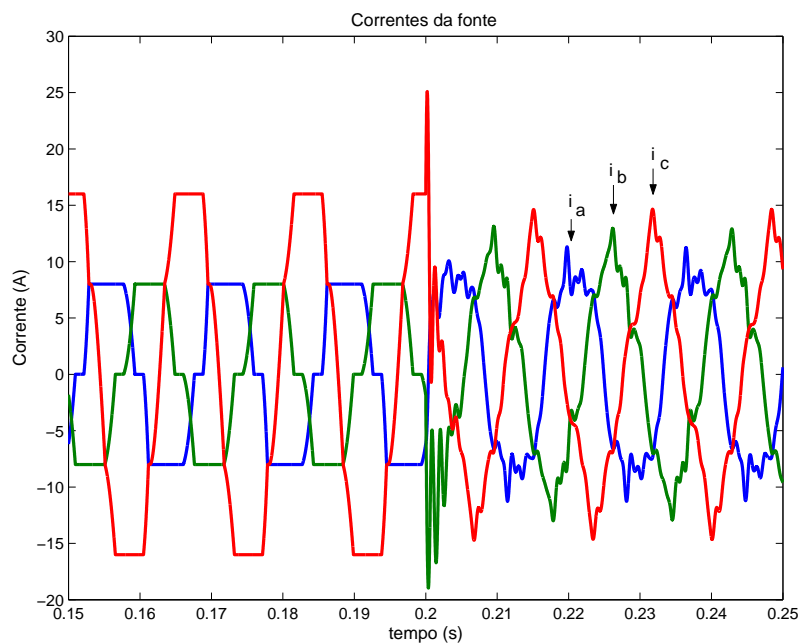


Figura 4.23: Correntes da fonte antes e depois da conexão do filtro ativo - método de referência de potência.

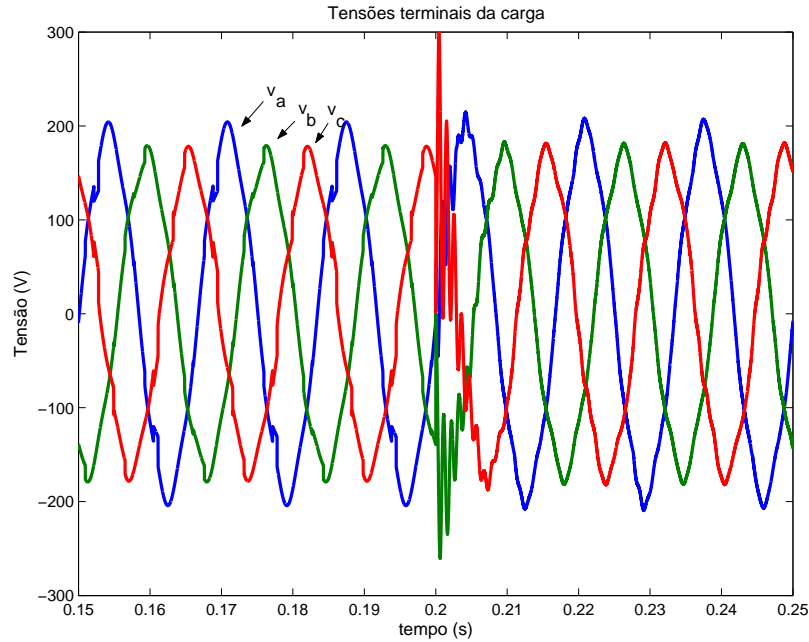


Figura 4.24: Tensões terminais da carga na primeira condição - método de referência de corrente.

de cargas são consideradas, com diferentes valores de componentes de seqüência zero e negativa. Na primeira, o sistema simulado consiste em uma fonte trifásica, 60 Hz, 220V com os seguintes componentes adicionais:

$$\dot{V}_{01} = 12\angle 0, \quad \dot{V}_{-3} = 6\angle 0 \quad V,$$

que são os mesmos utilizados nas simulações da teoria *p-q* da seção anterior, conforme a Figura 4.24

As correntes compensadas da fonte são mostradas na Figura 4.25, sendo aproximadamente senoidais. A corrente de neutro é compensada, apresentando um resultado muito próximo ao da teoria *p-q*, conforme a Figura 4.26.

Considerando condições mais severas de tensões terminais, entretanto, ocorre uma deterioração do desempenho do filtro ativo. Considerando, por exemplo, o incremento dos valores das componentes de seqüência zero e negativa (segunda condição), isto é:

$$\dot{V}_{01} = 22\angle 0, \quad \dot{V}_{-3} = 12\angle 0 \quad V.$$

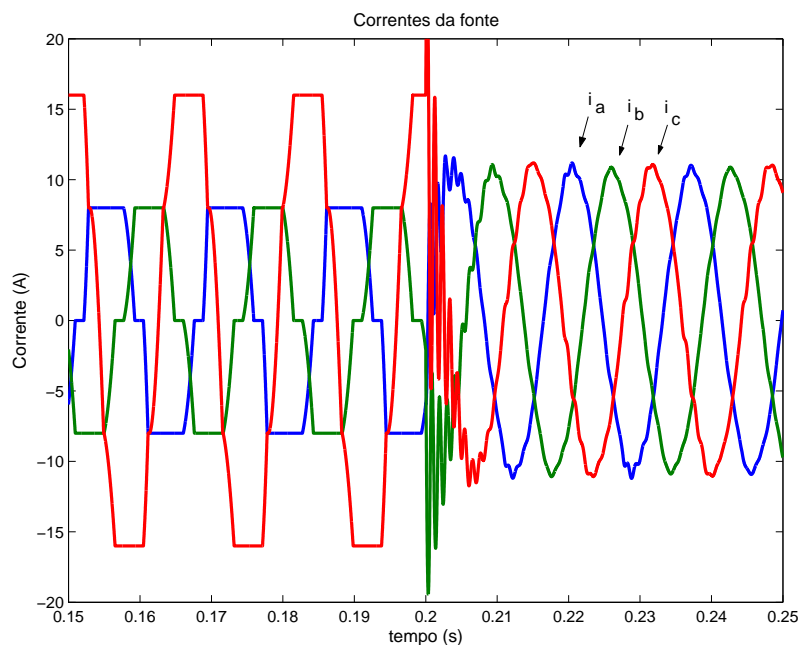


Figura 4.25: Correntes da fonte antes e depois da conexão do filtro ativo na primeira condição - método de referência de corrente.

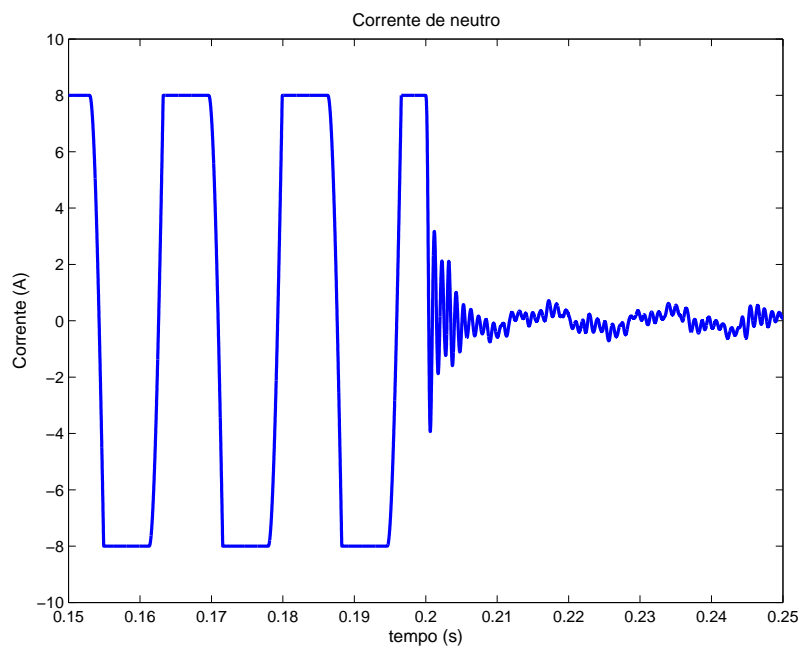


Figura 4.26: Corrente de neutro antes e depois da conexão do filtro ativo na primeira condição - método de referência de corrente.

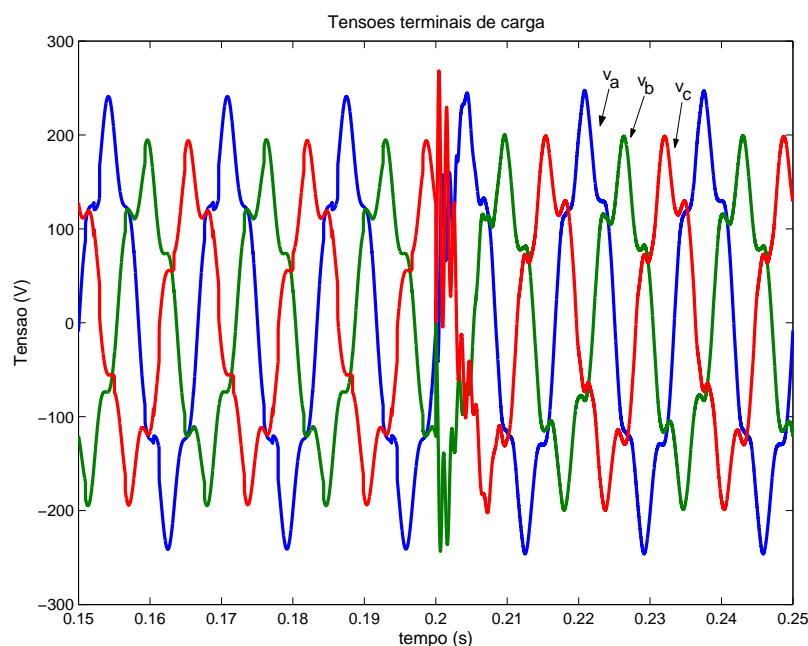


Figura 4.27: Tensões terminais da carga na segunda condição - método de referência de corrente.

Estas tensões podem ser visualizadas na Figura 4.27. As correntes resultantes são mostradas na Figura 4.28. Neste caso, o maior valor do terceiro harmônico de seqüência negativa nas tensões terminais de carga influencia na capacidade de compensação do filtro. No método de controle de correntes senoidais, verificou-se que a separação das correntes de carga nas coordenadas $p-q-r$ em suas parcelas média e oscilantes não é capaz de isolar sua componente fundamental de seqüência positiva, tornando-se evidente neste caso.

Caso seja fornecida uma tensão senoidal e balanceada, com fase e freqüência de V_{+1} para o algoritmo de controle, o método de compensação apresenta um desempenho superior, conforme mostrado no Capítulo 3. A fim de verificar o resultado quando as tensões do caso anterior são pré-processadas, empregou-se o circuito de sincronismo PLL descrito anteriormente.

As correntes compensadas da fonte podem ser vistas na Figura 4.29. Quando comparadas com as obtidas sem o pré-processamento das tensões do sistema (Fig. 4.28), as últimas apresentam um resultado melhor. Porém, ainda possuem algum conteúdo harmônico.

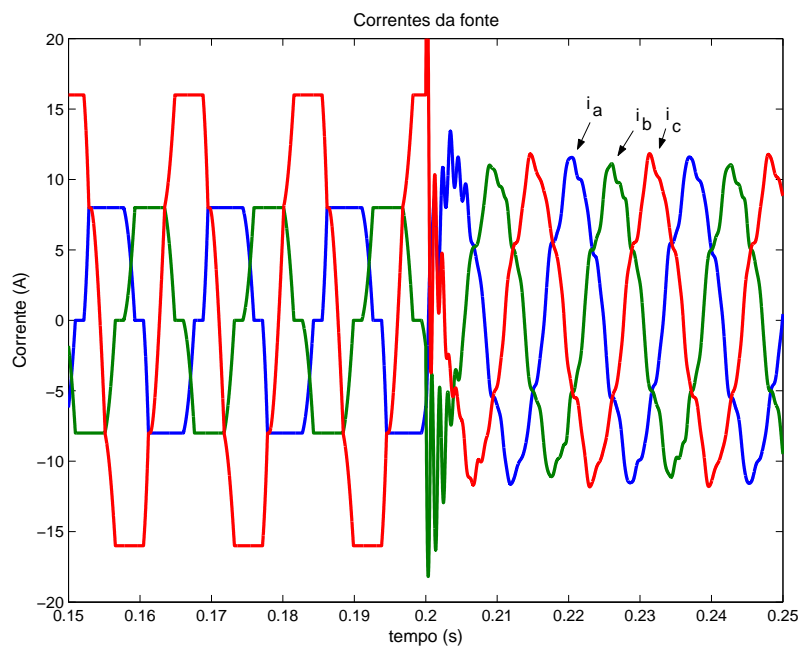


Figura 4.28: Correntes da fonte antes e depois da conexão do filtro ativo na segunda condição - método de referência de corrente.

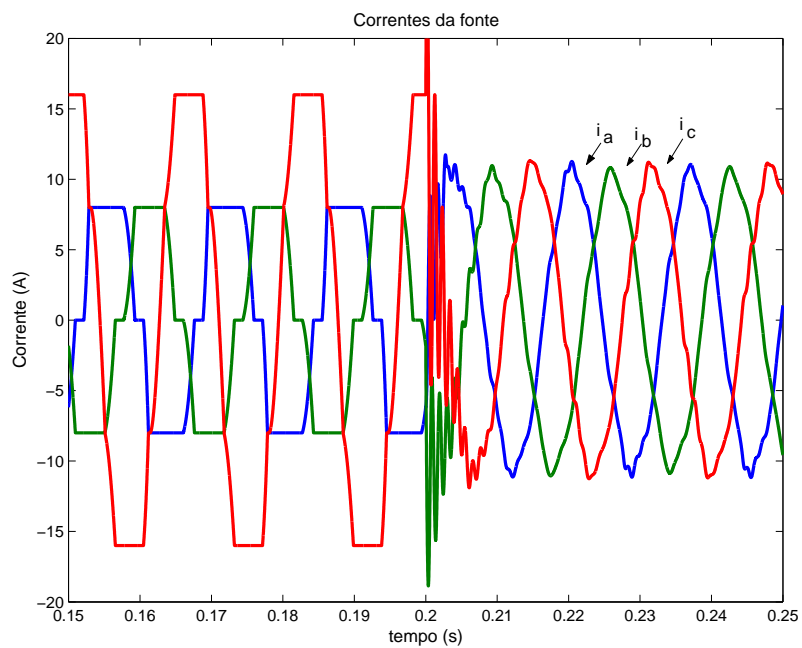


Figura 4.29: Correntes da fonte antes e depois da conexão do filtro ativo com o emprego do PLL na segunda condição - método de referência de corrente.

4.4.2 Análise comparativa do desempenho do filtro ativo paralelo baseado nas teorias $p-q$ e $p-q-r$

Neste capítulo, o funcionamento em regime permanente do filtro ativo paralelo baseado nas teorias $p-q$ e $p-q-r$ foi estudado. A partir dos resultados de simulação apresentados, além dos vários trabalhos que abordam este assunto, verificou-se que as duas teorias de potência realizam a compensação de sistemas trifásicos a quatro fios.

Os objetivos de cada método de compensação foram alcançados, destacando-se dois aspectos principais: o primeiro está relacionado à obtenção de correntes senoidais da fonte. Caso haja apenas a componente fundamental e de seqüência positiva nas tensões do sistema, o desempenho das duas teorias é similar, apesar de haver um tratamento diferenciado em relação à eliminação da corrente de neutro. Por outro lado, as diferenças surgem em condições mais gerais, quando estão presentes harmônicos e desbalanços de tensão. Caso a presença destes componentes não seja significativa, pode-se afirmar que a teoria $p-q-r$ apresenta resultados satisfatórios. Contudo, em condições mais severas, é necessário o pré-processamento das tensões, da mesma forma que na teoria $p-q$. Não obstante a utilização de detectores de seqüência positiva, as simulações mostraram que o desempenho da teoria $p-q$ é superior: primeiramente pela comparação direta entre as duas correntes compensadas da fonte, considerando especificamente o caso estudado; por outro lado, o esforço computacional também é menor, já que a transformação das coordenadas $a-b-c$ para $p-q-r$ envolve uma quantidade maior de operações matemáticas.

O segundo aspecto está relacionado à compensação da corrente de neutro. Verificou-se que, nas duas teorias, é possível atingir este objetivo sem a necessidade de elementos armazenadores. O que poderia ser uma vantagem para a teoria $p-q-r$ está associada ao fato de haver a manipulação apenas de potência reativa. Contudo, verificou-se no Capítulo 3 que, na verdade, o algoritmo realiza um balanço de potência ativa trifásica oscilante. Na teoria $p-q$ isto foi feito explicitamente através da proposta apresentada neste trabalho, onde através da atuação apenas nos modos não-homopolares (coordenadas $\alpha\beta$) eliminou-se a corrente de neutro. Apesar dos dois algoritmos cumprirem sua finalidade inicial, o custo da escolha destes métodos é a degradação das correntes do sistema, onde são introduzidos harmônicos não

existentes inicialmente. Este fenômeno fica mais evidente quando o filtro é empregado em sistemas que contém apenas cargas lineares.

O entendimento do princípio da compensação na teoria $p-q$ é mais fácil de ser alcançado, quando comparado com a teoria $p-q-r$. Isto deve-se, principalmente, à dificuldade da interpretação física das grandezas nas coordenadas $p-q-r$.

Destarte, as estratégias de controle baseadas nas duas teorias apresentam bom desempenho na compensação de sistemas trifásicos a quatro fios. A escolha de qualquer uma delas, ou de outras diversas existentes, dependerá dos objetivos a serem alcançados, da compreensão do entendimento físico e da simplicidade do algoritmo. Enquanto a teoria $p-q$ já vem sendo estudada por mais de vinte anos, sendo utilizada com sucesso em compensadores estáticos de potência, depara-se com mais uma proposta de uma nova teoria no domínio do tempo. Conclui-se, portanto, que sempre haverá pontos positivos e negativos a serem ressaltados, cabendo ao projetista avaliar os fatores que mais podem contribuir ou degradar o desempenho do sistema no que se refere à escolha da estratégia de controle.

Capítulo 5

Conclusões Gerais

O objetivo principal deste trabalho foi realizar uma comparação entre três das principais teorias de potência instantâneas no domínio do tempo. Neste sentido, alguns aspectos foram enfatizados, dentre eles a utilização direta ou indireta das tensões da rede pelos algoritmos, a necessidade do emprego de elementos armazenadores de energia no inversor para a compensação da corrente de neutro, bem como o entendimento físico das grandezas envolvidas.

A principal motivação para a realização do estudo comparativo e, em especial, das três teorias escolhidas, está associada aos seguintes fatores: primeiramente, o algoritmo baseado na teoria $p-q$ pode ser considerado como sendo um dos mais importantes, principalmente por sua significativa aplicação comercial em filtros ativos comissionados. Seu sucesso também pode ser constatado pelos inúmeros trabalhos já publicados relacionados ao seu emprego na compensação de sistemas trifásicos, além de ter sido uma das responsáveis pelo impulso no desenvolvimento de compensadores estáticos na década de 80 e 90 [6]. Já a escolha da teoria modificada está associada à busca de um elo de ligação entre a teoria $p-q$ e a $p-q-r$. Esta ligação, por sua vez, ocorre através da interpretação da potência reativa associada à presença de componentes de seqüência zero nas tensões e correntes do sistema. Por último, a escolha da da teoria $p-q-r$ está relacionada ao fato de ter sido gerada uma certa expectativa em relação ao seu potencial, aparentando ser uma alternativa consistente aos algoritmos existentes. Justamente pelas vantagens destacadas por Kim *et. al* em [34], como por exemplo a obtenção de correntes senoidais e equilibradas da fonte independentemente das condições das tensões dos sistema, houve de imediato a necessidade de realizar uma comparação com o que estava estabelecido já á algum tempo.

Os principais pontos apresentados neste trabalho foram:

- É possível a compensação da corrente de neutro sem elementos armazenadores de energia empregando-se a teoria $p-q$ original. O algoritmo proposto permite, adicionalmente, a compensação da potência ativa oscilante da carga.
- A teoria $p-q$ modificada separa a corrente i_0 em duas parcelas, uma ativa e outra reativa. Duas potências reativas relacionadas à presença de componentes de seqüência zero nas tensões e correntes do sistema são definidas. Verifica-se, entretanto, sua ineficácia na eliminação da corrente de neutro.

- A teoria $p-q-r$ realiza a compensação da corrente de neutro através da compensação da potência reativa q_q . Verificou-se, contudo, que o filtro ativo realiza um balanço de energia de forma a tornar a potência ativa trifásica instantânea de saída do filtro nula em qualquer instante.
- As parcelas médias da tensão e correntes nas coordenadas $p-q-r$ não representam somente as componentes fundamentais e de seqüência positiva destas grandezas.
- A transformação para as coordenadas $p-q-r$ que, a princípio, dispensaria a necessidade de pré-processar as tensões do sistema, mostrou-se insuficiente para a obtenção de correntes senoidais.
- É difícil realizar um entendimento físico das grandezas nas coordenadas $p-q-r$. Neste trabalho, isto foi feito com o auxílio das coordenadas $\alpha\beta 0$.

Espera-se, portanto, que este texto tenha trazido alguma contribuição adicional na discussão em torno das teorias de potências instantâneas. Certamente, os debates continuarão em busca de um denominador comum. É possível, entretanto, que este ainda seja um objetivo distante.

5.1 Trabalhos Futuros

Dentre os possíveis trabalhos que podem vir a ser realizados, sugere-se os seguintes:

- Otimizar os parâmetros do circuito de potência e de controle do filtro ativo paralelo baseado na teoria $p-q-r$.
- Proposta de um algoritmo baseado na teoria $p-q-r$ aplicável ao filtro ativo série do condicionador UPQC (“*Unified Power Quality Conditioner*”).
- Realizar uma comparação do desempenho do filtro ativo paralelo baseado na teoria $p-q$ e $p-q-r$ em termos de distorção harmônica total e individual das correntes compensadas da fonte.

-
- Estudar o desempenho do filtro ativo baseado na teoria $p-q-r$ através do emprego de conversores multiníveis e técnicas de controle vetorial do inversor VSI.

Referências Bibliográficas

- [1] N. G. Hingorani, “Introducing to custom power,” *IEEE Spectrum*, pp. 41–48, junho 1995.
- [2] J. Arrillaga, M. H. J. Bollen, and N. R. Watson, “Power quality following deregulation,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 88, pp. 1129–1136, fevereiro 2000.
- [3] M. H. J. Bollen, *Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions*, IEEE Press, 1999.
- [4] “IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems,” *IEEE Std 519-1992*.
- [5] A. A. Girgis, J. W. Nims, and J. Jacomino, “Effect of voltage harmonics on the operation of solid-state relays in industrial applications,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 28, pp. 1166–1173, setembro/outubro 1992.
- [6] H. Akagi, “New trends in active filters for power conditioning,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 32, pp. 1312–1322, novembro/dezembro 1996.
- [7] D. O. Koval, “Power quality characteristics of computer loads,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 33, pp. 613–621, maio/junho 1997.
- [8] H. Fugita and H. Akagi, “A practical approach to harmonic compensation in power systems - series connection of passive and active filters,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 27, pp. 1020–1025, novembro/dezembro 1991.
- [9] M. Aredes, *Active Power Line Conditioners*. Tese de doutorado, Universidade Técnica de Berlin, 1996.

- [10] B. K. Bose, "Evaluation of modern power semiconductor devices and future trends of converters," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 28, pp. 403–413, março/abril 1992.
- [11] E. H. Watanabe, M. Aredes, and H. Akagi, "The p-q theory for active filter control: Some problems and solutions," *Anais do XIV Congresso Brasileiro de Automática*, pp. 1078–1083, setembro 2002.
- [12] L. Gyugyi and E. C. Strycula, "Active ac power filters," *IEEE Industry Applications Annual Meeting Conference Record*, vol. 19-C, pp. 529–535, 1976.
- [13] H. Akagi, Y. Kanazawa, and A. Nabae, "Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits," *Int. Power Electronics Conference, Tokio, Japão*, pp. 1375–1386, 1983.
- [14] H. Akagi, Y. Kanazawa, and A. Nabae, "Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage elements," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. IA-20, pp. 625–630, março/abril 1984.
- [15] O. B. Shallenberger, *The Distribution of Electricity by Alternative Current*, Electrical World, 1888.
- [16] C. I. Budeanu, "Puissances reactivas et fictives," *Institut Romain de l'Energie*, no. 2, 1927.
- [17] S. Fryze, "Wirk-, blind- und scheinleistung in elektrischen stromkreisen mit nicht-sinusförmigem verlauf von strom und spannung," *ETZ-Arch. Elektrotech.*, vol. 52, pp. 596–599, 625–627, 700–702, 1932.
- [18] D. A. Marshall, J. D. Wyk, F. P. Venter, L. Malesani, and Z. Zuccato, "A comparative evaluation of power theories," *V ICHPS - International Conference on Harmonics in Power Systems*, pp. 625–630, setembro 1992.
- [19] I. Takahashi and A. Nabae, "Universal reactive power compensator," *IEEE - Industry Application Society Annual Meeting Conference Record*, pp. 858–863, 1980.

- [20] H. Kim and H. Akagi, "The instantaneous power theory on the rotating p-q-r reference frames," *IEEE Int. Conf. on Power Electronics and Drive Systems*, pp. 422–427, 1999.
- [21] I. Takahashi and I. F. A. Nabae, "Distorted current compensation system using thyristor based line commutated converters," *Transactions of the IEE-Japan, Part B*, vol. 101, no. 3, pp. 121–128, 1981.
- [22] E. H. Watanabe, R. M. Stephan, and M. Aredes, "New concepts of instantaneous active and reactive powers in electrical systems with generic loads," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 8, no. 2, pp. 697–703, 1993.
- [23] J. L. Willems, "A new interpretation of the akagi-nabae power components for nonsinusoidal three-phase situations," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 41, no. 4, pp. 523–527, 1992.
- [24] E. Clarke, "Problems solved by modified symmetrical components," *General Electric Revue*, vol. 41, novembro e dezembro 1931.
- [25] C. C. B. de Oliveira, H. P. Schmidt, N. Kagan, and E. J. Robba, *Introdução a Sistemas Elétricos de Potência - Componentes Simétricas*, Edgard Blücher Ltda, 1996.
- [26] M. Aredes, *Novos Conceitos de Potência e Aplicações em Filtros Ativos*. Tese de mestrado, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1991.
- [27] T. Furuhashi and S. Okuma, "A study on the theory of instantaneous reactive power," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 37, fevereiro 1990.
- [28] S. Togasawa, T. Murase, H. Nakano, and A. Nabae, "Reactive power compensation based on a novel cross-vector theory," *IEEJ Transactions on Industrial Applications - em japonês*, vol. 114, março 1994.
- [29] A. Nabae, H. Nakano, and S. Togasawa, "An instantaneous distortion current compensator without any coordinate transformation," *Proceedings of IEEE International Conference on Harmonics and Quality of Power*, vol. 114, no. 3, pp. 1654–1655, 1995.

- [30] F. Z. Peng and J. S. Lai, “Generalized instantaneous reactive power for three-phase power systems,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 45, pp. 293–297, fevereiro 1996.
- [31] F. Z. Peng, G. W. O. Jr., and D. J. Adams, “Harmonic and reactive power compensation based on the generalized instantaneous reactive theory for three-phase four-wire systems,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 13, pp. 1174–1181, novembro 1998.
- [32] H. Akagi, S. Ogasawara, and H. Kim, “The theory of instantaneous power in three-phase four-wire systems: a comprehensive approach,” *Conf. Rec. of IEEE Industry Applications Conference*, vol. 1, pp. 431–439, 1999.
- [33] G. G. Lima and A. B. Greenhalgh, “Active filters and the zero sequence component,” *Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência, Uberlândia*, pp. 219–224, 1993.
- [34] H. Kim, F. Blaabjerg, B. Bak-Jensen, and J. Choi, “The instantaneous power compensation in three-phase systems by using p-q-r theory,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 17, pp. 701–710, setembro 2002.
- [35] P. N. Enjeti, W. Shireen, P. Packebush, and I. J. Pitel, “Analysis and design of a new active power filter to cancel neutral current harmonics in three-phase four-wire electric distribution systems,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 30, pp. 1565–1573, dezembro 1994.
- [36] M. Aredes, J. Häfner, and K. Heumann, “Three-phase four-wire shunt active filter control strategies,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 12, pp. 311–318, março 1997.
- [37] A. Ferrero and G. Superti-Furga, “A new approach to the definition of power components in three-phase systems under nonsinusoidal conditions,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 40, pp. 568–577, junho 1991.
- [38] C. F. T. Soares, *Filtro Ativo de Potência com Controle Digital para a Compensação das Potências Reativa e Harmônica*. Projeto final de curso, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2004.

- [39] H. Akagi, "Trends in active power line conditioners," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 9, pp. 263–268, maio 1994.
- [40] L. Benchaïta, S. Saadate, and A. N. Salem, "A comparison of voltage source and current source shunt active filter by simulation and experimentation," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 4, pp. 642–647, maio 1999.
- [41] E. R. Motto and J. F. Donlon, "The latest advances in industrial igbt module technology," *IEEE APEC 04 - Applied Power Electronics Conference and Exposition*, vol. 1, pp. 235–240, 2004.
- [42] C. A. Quinn and N. Mohan, "Active filtering of harmonic currents in three-phase, four-wire systems with three-phase and single-phase non-linear loads," *IEEE APEC 92 - Applied Power Electronics Conference and Exposition*, vol. 1, pp. 829–836, 1992.