

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PPGEE
Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Engenharia Elétrica - CPDEE
Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG

**Projeto de uma Bancada de Testes para
Avaliação do Carregamento de
Transformadores Trifásicos de Potência
Utilizando Conversores Estáticos**

Clodualdo Venicio de Sousa

Dissertação submetida à banca examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador : Selênio Rocha Silva

Belo Horizonte, 29 de Março de 2007.

*À minha família e
aos meus amigos.*

“A informação que encontramos nos livros é como fogo. Nós trazemos dos nossos vizinhos, acendemos no lar, passamos para outros, e ela se torna propriedade de todos.”

Voltaire

Agradecimentos

Minha especial gratidão

a Deus;

aos meus pais, Miguel de Sousa e Maria Rita de Sousa e

a minha filha Julia e minhas irmãs Vanilda, Sandra, Consola e Natalia,
pelo incentivo e companheirismo;

ao professor Selênio Rocha Silva, pela dedicação, amizade e por compartilhar comigo sua experiência e conhecimento;

a todos os professores e funcionários das instituições que contribuíram para minha formação;

aos colegas e funcionários do CPDEE e CPH;

aqueles que estiveram mais próximos, Nayara, R. Gaiba, Júlio, Élice, Mara, Edna, Edgar;

e também aqueles que eu esqueci de citar.

Sumário

Resumo	xiii
Abstract	xv
Lista de Tabelas	xvii
Lista de Figuras	xxiii
Lista de Símbolos	xxvi
Lista de Abreviações	xxvii
1 Introdução	1
1.1 Introdução	1
1.2 Métodos de Ensaio em Carga	2
1.2.1 Faixa de potência do transformador	3
1.2.2 Alimentação do transformador	4
1.2.3 Controle de carregamento	5
1.3 Estado da Arte	10
1.4 Organização do Texto	13
2 Ensaio de Carregamento de Transformadores de Potência	15

2.1	Introdução	15
2.2	Classificação dos Transformadores	16
2.3	Carregamento de Transformadores	18
2.4	Condições Térmicas de Operação	20
2.5	Rigidez Dielétrica de Óleos Isolantes	22
2.6	Sobretensões em Transformadores	23
2.7	Ensaio em Carga de Transformadores	28
2.8	Comentários Finais	29
3	Regulação de Tensão	31
3.1	Introdução	31
3.2	Fontes de Tensão Conectadas à Rede	32
3.3	Conversores Conectados à Rede	35
3.4	Fluxo de Carga em Redes Elétricas	36
3.5	Fluxo de Carga pelo Método de Newton	40
3.6	Regulação de Tensão na Bancada	42
3.6.1	Elevação de tensão nas barras de carga	43
3.6.2	Redução da tensão nas barras de carga	45
3.7	Comentários Finais	47
4	Projeto da Bancada de Testes	49
4.1	Introdução	49
4.2	Descrição da Bancada	50
4.3	Projeto do Filtro LCL	52
4.4	Projeto do Capacitor do Barramento CC	60
4.5	Estratégia de Controle dos conversores	60
4.5.1	Estrutura de controle dos conversores	62
4.6	Malha de Controle do Conversor da Rede	63
4.6.1	Malha de controle de corrente	65

4.6.2	Malha de controle de tensão do barramento CC	66
4.6.3	Malha de controle de potência reativa	68
4.6.4	Malha de compensação de corrente de sequência zero	70
4.7	Malha de Controle do Conversor do Lado do Transformador	71
4.8	Análise do Comportamento Dinâmico do Controle da bancada	72
4.8.1	Controle do conversor do lado da rede	73
4.8.2	Controle do conversor do lado do transformador	79
4.9	Comentários Finais	83
5	Simulação do Desempenho Operacional Dinâmico da Bancada	85
5.1	Introdução	85
5.2	Resultados de Simulação	86
5.2.1	Transformador em condição nominal de operação	87
5.2.2	Operação do transformador em sobrecarga	93
5.2.3	Operação do transformador com potência abaixo da nominal	96
5.2.4	Operação do transformador em sobretensão	98
5.2.5	Operação do transformador com tensão abaixo da nominal	104
5.2.6	Operação do transformador com fator de potência diferente do unitário	109
5.3	Comentários Finais	113
6	Conclusões e Propostas de Continuidade	115
6.1	Conclusões	115
6.2	Propostas de Continuidade	117
	Referências Bibliográficas	119
A	Método de Newton Raphson	123

B	Transformação de Variáveis	125
----------	-----------------------------------	------------

C	Dados da Bancada Projetada	127
----------	-----------------------------------	------------

Resumo

Este trabalho apresenta, o projeto do circuito de potência e dos controles de uma bancada de teste para implementação de ensaio de carregamento em transformadores de potência, em condições adversas de funcionamento. Estas condições de operação podem reduzir a vida útil dos transformadores de potência, principalmente, se operarem com sobrecarga em longos períodos.

Assim, é apresentado um novo esquema para realizar teste de carregamento em transformadores de potência, usando conversores reversíveis. O uso de conversores estáticos para o controle de carga dos transformadores, possibilita o controle independente da potência ativa e reativa, em ambas as direções de fluxo, permitindo o controle automático do carregamento e a regulação da tensão. A potência gasta para realizar o ensaio, com esta topologia, representa apenas as perdas nos transformadores, filtros e conversores.

O objetivo desta bancada projetada é permitir realização dos testes, em ambiente laboratorial, onde podem ser explorados pontos de operação com sobrecarga e sobretensão. Com estas condições de operação, a variação da temperatura no enrolamento do transformador, isolamento e núcleo podem ser monitorados a todo instante. Resultados de simulação são apresentados para verificar o comportamento do sistema e mostrar que o esquema é viável.

Abstract

This work presents the design of a setup for load tests in power transformers, mainly in adverse conditions. Such operation conditions can reduce life expectancy of the power transformers, mainly if it operates overload for long periods. The overload capabilities depend primarily on the winding temperature.

A novel scheme to perform load test in power transformers using reversible power converters is presented. The use of the reversible static converter for the load control of the transformer allows the independent control of the active and reactive power, in both directions, allowing instantaneous and automatic load control as well as voltage regulation. The power spent to perform the test represents only the losses in the transformer, filters and converters.

The final goal of designed setup is to allow the test in laboratory, where overload and over-voltage operations can be explored. With this condition, the temperature variation of the transformer windings, insulation and core will be monitored. Simulation results are presented to evaluate the system behavior in order to show that the scheme feasible.

Lista de Tabelas

2.1	Limites de temperatura em transformadores de potência.	17
2.2	Alteração do carregamento do transformador com relação à temperatura ambiente.	19
2.3	Limites de elevação da temperatura em transformadores de potência imersos em óleo isolante.	21
2.4	Limites de carregamento de transformadores.	22
3.1	Variáveis calculadas na simulação.	44
3.2	Variáveis calculadas na simulação.	45
5.1	Parâmetros do transformador em teste	87
C.1	Tabela dos dados do transformador.	127
C.2	Tabela dos dados do filtro LCL.	127
C.3	Tabela dos dados do reator de entrada.	128
C.4	Tabela dos ganhos para o controle do CLR.	128
C.5	Tabela dos ganhos para o controle do CLT.	128

Lista de Figuras

1.1	Esquema básico do ensaio de transformadores de potência em operação isolada da rede.	5
1.2	Controle de fluxo de carga através de transformador defasador.	6
1.3	Esquema básico do ensaio em paralelismo com transformador defasador para controle de carregamento do transformador sob teste.	6
1.4	Esquema básico do ensaio em paralelismo com reator para o controle de carregamento do transformador sob teste.	7
1.5	Esquema básico do ensaio em paralelismo com conversor estático para controle de carregamento do transformador sob teste.	8
2.1	Curva tensão versus carregamento ou índice de carregamento.	24
3.1	Máquina síncrona conectada à rede de distribuição.	33
3.2	Diagrama fasorial do gerador.	33
3.3	Representação vetorial das variáveis de uma linha de transmissão.	34
3.4	Controle da frequência e da tensão em máquinas síncronas.	35
3.5	Conversor conectado a rede de alimentação.	35
3.6	Estrutura básica de controle dos conversores.	36

3.7	Modelo de uma linha de transmissão.	38
3.8	Diagrama esquemático da bancada para ensaio de transformadores de potência.	40
3.9	Representação do sistema em barras de carga.	42
3.10	Comportamento da tensão nas barras em função da variação da potencia reativa na barra 3 e da impedância da barra 1 para 2.	44
3.11	Comportamento da tensão nas barras em função da variação da potencia reativa na barra 3 e da impedância da barra 1 para 2.	46
4.1	Estrutura de potência da bancada de testes de transformadores.	49
4.2	Diagrama esquemático da bancada para ensaio de transformadores.	51
4.3	Estrutura do filtro LCL com amortecimento passivo.	52
4.4	Diagrama em blocos do filtro LCL.	54
4.5	Curva de atenuação da corrente injetada pelo filtro LCL.	57
4.6	Lugar das raízes obtido da função de transferência do filtro LCL projetado (função transferência 4.1).	58
4.7	Diagrama de Bode para a função de transferência entre a corrente da rede e a tensão no conversor (função transferência 4.2).	59
4.8	Diagrama de Bode para a função de transferência entre a corrente rede e a corrente do conversor (função transferência 4.3).	59
4.9	Estrutura do filtro LCL conectado ao conversor do lado da rede.	61
4.10	Representação dos eixos coordenados para orientação em referencial síncrono, orientado pela tensão da rede.	62
4.11	Diagrama em blocos da malha de controle do CLR.	64
4.12	Malha de controle de corrente de eixo direto.	65

4.13	Malha de controle de corrente de eixo em quadratura.	65
4.14	Malha de controle de tensão no barramento CC.	67
4.15	Malha de controle de potência reativa.	69
4.16	Malha de compensação da corrente de sequência zero.	71
4.17	Malha de controle de potência ativa.	71
4.18	Diagrama em blocos da malha de controle do CLT.	72
4.19	Transitório de carga do capacitor barramento CC.	74
4.20	Tensão barramento CC.	75
4.21	Correntes e tensões trifásicas.	75
4.22	Transitório no barramento CC.	77
4.23	Transitório das malhas de controle de corrente no CLR.	78
4.24	Transitório na malha de corrente de eixo direto.	80
4.25	Transitório na malha de corrente de eixo em quadratura.	81
4.26	Potências ativa e reativa nos conversores para uma sobrecarga no transformador sob teste.	82
4.27	Potências ativa e reativa nos conversores para uma sobretensão mantendo a mesma potência ativa no transformador sob teste.	83
5.1	Tensão no barramento CC.	86
5.2	Transformador em condição nominal de operação - CLT.	88
5.3	FFT da tensão e da corrente no conversor do lado da rede.	89
5.4	Transformador em condição nominal de operação - CLR.	90
5.5	Fluxo de potência ativa, reativa e aparente na rede de alimen- tação.	91
5.6	Tensões e correntes trifásica na rede de alimentação.	92
5.7	FFT da tensão e da corrente na rede de alimentação.	92

5.8	Fluxo de potência ativa, reativa e aparente na rede de alimentação.	94
5.9	FFT da tensão e da corrente no transformador sob teste. . . .	94
5.10	Operação do transformador em condição sobrecorrente - CLT.	95
5.11	Fluxo de potência ativa, reativa e aparente na rede de alimentação.	96
5.12	Operação do transformador em condição de corrente abaixo da nominal.	97
5.13	Operação do transformador em condição sobretensão - CLT. .	99
5.14	Operação do transformador em condição sobretensão - CLR. .	100
5.15	Tensão e corrente da fase A no conversor do lado da rede. . . .	101
5.16	Tensão e corrente da fase A no primário e secundário do transformador em teste.	101
5.17	Fluxo de potência ativa, reativa e aparente na rede de alimentação.	102
5.18	Tensões e correntes trifásica na rede de alimentação.	102
5.19	FFT da tensão e da corrente do transformador sob teste. . . .	103
5.20	FFT da corrente na rede de alimentação.	103
5.21	Operação do transformador em condição de tensão abaixo da nominal - CLT.	105
5.22	Operação do transformador em condição de tensão abaixo da nominal - CLR.	106
5.23	Tensão e corrente da fase A no conversor do lado da rede. . . .	107
5.24	Tensão e corrente da fase A no primário e secundário do transformador em teste.	107
5.25	Fluxo de potência ativa, reativa e aparente na rede de alimentação.	108

5.26	Tensões e correntes trifásica na rede de alimentação.	108
5.27	Operação do transformador com fator de potência diferente do unitário - CLT.	110
5.28	Operação do transformador com fator de potência diferente do unitário - CLR.	111
5.29	Fluxo de potência ativa, reativa e aparente na rede de alimentação.	112
5.30	Tensões e correntes trifásica na rede de alimentação.	112

Lista de Símbolos

minúsculo grandezas variáveis no tempo;
MAIUSCULO grandezas e parâmetros constantes;

e	Tensão na entrada do filtro
v	Tensão na saída do filtro
E	Tensão no barramento CC
i_{dc}	Corrente no capacitor do barramento CC
i_L	Corrente no barramento CC
L_1	Indutância do filtro LCL do lado do conversor
L_f	Indutância do filtro LCL do lado do transformador
L	Indutância total do filtro LCL
C_f	Capacitância do filtro LCL
R_d	Resistência de amortecimento
G_{conv}	Ganho do conversor
ΔE	Máxima variação de tensão barramento CC
ΔP	Máxima variação esperada de potência de saída
T_E	Tempo de resposta da malha de controle de tensão
θ_e	Angulo do vetor tensão
ω_n	Frequência angular
ω_{res}	Frequência angular de ressonância
ω_s	Frequência angular de chaveamento
h_s	Ordem harmônica na frequência de chaveamento
S	Potência aparente
S_{cc}	Potência de curto-circuito

P	Potência ativa
Q	Potência reativa
f_n	Frequência da rede
f_s	Frequência de chaveamento
K_i	Ganho integral
K_p	Ganho proporcional

Sobrescritos

*	Valor de referência
\wedge	Valor estimado

Subscritos

d	grandezas referidas ao eixo direto
q	grandezas referidas ao eixo em quadratura
0	grandezas referidas a seqüência zero
b	Valores base

Lista de Abreviações

CLR	Conversor do lado da rede
CLT	Conversor do lado do transformador
PWM	Modulação por largura de pulso (<i>Pulse With Modulation</i>)
FT	Função de transferência
Trafo	Transformador
PQ	Barra de carga
PV	Barra de geração
$V\theta$	Barra de referência
SEP	Sistemas elétricos de potência
THD	Taxa de distorção harmônica
FP	Fator de potência

Introdução

1.1 Introdução

Uma das grandes preocupações do setor elétrico consiste na utilização da energia elétrica de uma forma cada vez mais racional e eficiente. Surge, portanto, a necessidade de se estudar alternativas que contemplem a operação de forma otimizada dos transformadores. Neste sentido, pode-se citar a exploração do carregamento acima da potência nominal, sem comprometer a vida útil do equipamento ou com prejuízos calculados aceitáveis.

Considerando que o transformador é um dos componentes essenciais nos sistemas elétricos de potência, há um grande interesse em investigar o seu comportamento elétrico e térmico quando este equipamento está submetido a tensões e/ou correntes acima da nominal.

O transformador de potência trabalha em temperaturas superiores à temperatura ambiente devido à energia dissipada, sob a forma de calor, nos enrolamentos e no núcleo. A temperatura no transformador deve estar numa faixa de valores para garantir um perfeito funcionamento dos componentes, visto que, em caso de aquecimento excessivo ocorre deterioração do isolamento e, como consequência, a redução da expectativa de vida.

O ensaio em carga permite determinar se o transformador, ao funcionar em determinadas condições de carregamento, não ficará sujeito a temperaturas elevadas que prejudicariam seu funcionamento. O objetivo desta bancada projetada é avaliar o impacto de sobretensão permanente no comportamento de um transformador de potência em situação de sobrecarga, permitindo a

validação experimental de uma metodologia desenvolvida em um projeto de P&D (Barbosa (2005) e Silva and Lopes (2006)) que inclui nos estudos de carregamento dos transformadores de potência um modelo da variação das perdas em função de variações de tensão de excitação entre 90% e 110%.

O procedimento de ensaio em sobrecarga não é usual, sendo abordado de forma superficial nas normas e guias, logo pressupõe o desenvolvimento de uma técnica específica para este fim. Um dos principais limitador destes ensaios é a sua própria realização, em condições seguras para o sistema elétrico, consumidores e operadores, em condições controláveis, permitindo-se variar parâmetros operacionais de forma simples e automática, e com resultados em grau de precisão adequados.

Os ensaios para estudos do comportamento térmico e elétrico dos transformadores de potência, em condição de carregamento nominal ou diferente do nominal são onerosos, tendo em vista as perdas de potência associadas, em função das necessidades de flexibilidade e controlabilidade dos arranjos para estes testes. Certamente, este problema se agrava em transformadores, onde o ensaio com transformador conectado à rede ou alimentando cargas isoladas, peca pela perda de flexibilidade ou pela excessiva dissipação de potência.

Neste contexto, este capítulo de caráter introdutório apresenta o objetivo do trabalho desenvolvido, possíveis métodos de ensaio em carga de transformadores, introduz o estado da arte e apresenta a organização do texto.

1.2 Métodos de Ensaio em Carga

O ensaio em carga de transformadores de potência tem como finalidade principal a verificação das condições térmicas de operação do transformador em condições nominais e especiais de operação (Ebert, 1994). Diversas são as alternativas possíveis para realização dos ensaios em carga. A princípio, este ensaio envolve:

- faixa de potência do transformador a ser ensaiado;
- forma de alimentação do transformador;
- formas de controle do carregamento.

A faixa de potência do transformador sob ensaio pode ser em escala real ou em escala reduzida, estando este conectado a rede ou sendo alimentado de forma isolado da rede. Estando o transformador conectado a rede elétrica o controle do carregamento pode ser realizado por variação de impedância de paralelismo, transformador defasador ou conversor estático.

1.2.1 Faixa de potência do transformador

A utilização de transformadores de potência em escala real, para proceder ao ensaio de carregamento, possui elevado custo devido à faixa de potência e tensões envolvidas e os cuidados necessários à sua operação no sistema, sendo impraticável a operação isolada da rede.

O escalonamento de transformadores permite inferir sobre o funcionamento de grandes equipamentos a partir do ensaio de pequenos transformadores. O Ensaio de um transformador em escala reduzida simplifica os procedimentos operacionais de ensaio, seus custos iniciais e operacionais e não representa riscos para a integridade do sistema elétrico (Silva and Lopes, 2004). Pode-se caracterizar esta alternativa por apresentar:

- menor custo de investimento e menor custo operacional;
- necessidade da aquisição de um transformador novo com projeto específico e com monitoramento de temperatura;
- projeto e construção extremamentes diferentes, exigindo atenção especial na especificação do transformador;
- menores riscos operacionais do ensaio para o sistema elétrico da concessionária e para o fornecimento de energia elétrica com qualidade e confiabilidade;
- alimentação pode ser proporcionada em laboratório, com diversas formas de energização e de controle de carregamento.

A norma NBR5356 (2003) considera que um transformador é representativo de uma classe de transformadores, se é completamente idêntico no que concerne seus valores nominais e a construção. Pequenas diferenças nos valores nominais e outras características são aceitas.

1.2.2 Alimentação do transformador

A forma de alimentação do transformador a ser ensaiado depende da faixa de potência e pode ter impacto decisivo no sucesso do projeto. As alternativas possíveis são:

- conexão com a rede elétrica;
- alimentação de cargas isoladas.

O teste de carregamento em um transformador operando na subestação da concessionária significaria ter o transformador sob ensaio em paralelo com outros transformadores, o que resultaria em pouca flexibilidade do controle de carregamento, nenhum controle da variação no perfil de tensão e risco para a integridade do sistema e do fornecimento.

A realização do ensaio isolado da rede consiste em conectar o secundário do transformador sob ensaio a cargas passivas variáveis para o ajuste do seu carregamento, como ilustra a Figura 1.1. Esta alternativa agrega as seguintes características:

- elimina riscos para a concessionária e para o consumidor;
- minimiza as dificuldades operacionais;
- é impraticável, caso o transformador testado for em escala de potência real, para faixa de interesse (transformador de potência de vários MVA's);
- apresenta facilidades de controle do carregamento e de ajuste de um perfil de tensão.
- pode ser realizado em ambiente laboratorial permitindo total monitoramento do comportamento térmico e elétrico do transformador sob teste.

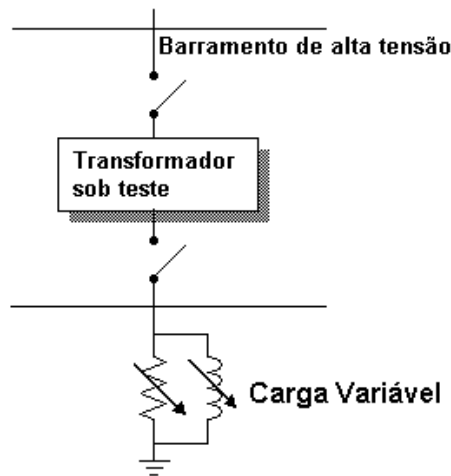


Figura 1.1: Esquema básico do ensaio de transformadores de potência em operação isolada da rede.

1.2.3 Controle de carregamento

Com a finalidade de se ensaiar um transformador conectado à rede elétrica, pode-se utilizar dois ou mais transformadores operando conjuntamente em paralelo. Para um perfeito controle do carregamento do transformador sob teste, certas condições para o paralelismo são obrigatórias. É necessário que as relações de transformação sejam iguais nos transformadores, ou próximas, e que tenham o mesmo defasamento angular (Oliveira et al., 2006). A variação do carregamento do transformador em teste pode ser realizada através de:

- transformador defasador;
- variação por impedância de paralelismo;
- conversor estático reversível.

1.2.3.1 Transformador defasador

O transformador defasador, como o próprio nome indica, consegue afetar o fluxo de potência introduzindo uma defasagem φ entre os nós k e P , como mostra a Figura 1.2.

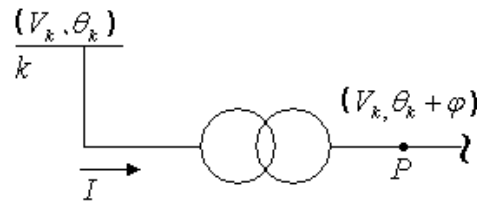


Figura 1.2: Controle de fluxo de carga através de transformador defasador.

Como mencionado, a regra básica de paralelismo de transformadores exige que os defasamentos angulares dos dois transformadores em paralelo sejam iguais. A proposta refere a variações angulares muito pequenas entre a unidade testada e a unidade em serviço, como ilustra a Figura 1.3. O controle do carregamento pode ser implementado por um transformador defasador, que poderia imprimir pequenos defasamentos angulares, provocando a transferência de carga no sistema.

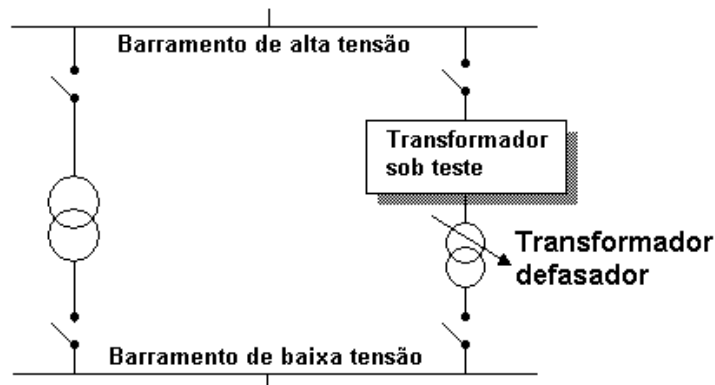


Figura 1.3: Esquema básico do ensaio em paralelismo com transformador defasador para controle de carregamento do transformador sob teste.

O grande impedimento desta alternativa é o custo deste transformador defasador, que mesmo em baixa potência excederá várias vezes o custo de aquisição do transformador principal, inviabilizando sua aplicação na faixa de potência real.

1.2.3.2 Variação da impedância de paralelismo

A idéia básica deste procedimento para controle de carregamento é variar a impedância do transformador a ser testado que se encontra em paralelo com um transformador existente. Este procedimento permite transferir carga entre os transformadores, podendo variar a faixa de potência do transformador a ser testado.

Como no caso de ensaio em carga o interesse é de carregar a unidade em teste e mesmo sobrecarregá-la, pode-se incluir um reator ajustável em série com o transformador em teste, como mostra a Figura 1.4.

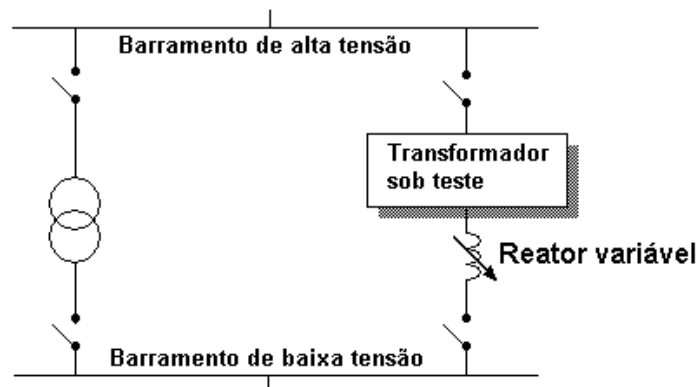


Figura 1.4: Esquema básico do ensaio em paralelismo com reator para o controle de carregamento do transformador sob teste.

As principais características do controle do carregamento de transformador utilizando reator em paralelismo são:

- a faixa de variação da potência transferida é função dos parâmetros de ambos os transformadores e fica limitada ao número de conexões possíveis no reator;
- é impraticável em transformadores de potência real, devido aos riscos operacionais;
- apresenta faixa de regulação de carga variável dependente das impedâncias dos transformadores e do perfil de carga do sistema;
- não há a possibilidade de ajuste da tensão secundária.

1.2.3.3 Conversor estático reversível

Uma alternativa para implementar o ensaio em carga é utilizar um conversor estático reversível em potência conectando ao secundário de dois transformadores, sendo um deles a unidade em teste. A Figura 1.5 ilustra esta configuração, que constitui uma alternativa inovadora neste tipo de ensaio.

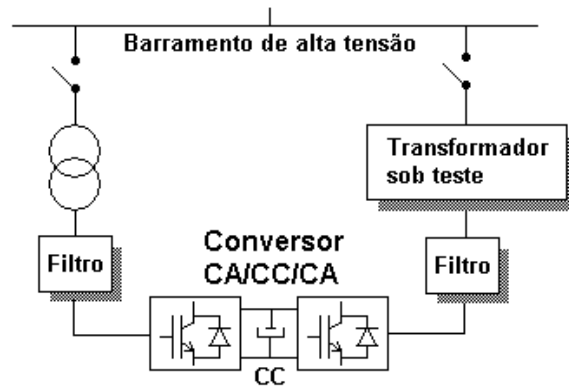


Figura 1.5: Esquema básico do ensaio em paralelismo com conversor estático para controle de carregamento do transformador sob teste.

A utilização do conversor estático reversível para o controle do carregamento do transformador permite o controle independente de potência ativa e reativa, em ambos os sentidos de fluxo, permitindo combinar efeitos de baixo fator de potência, controle de carga e controle do nível de tensão secundária. A potência gasta para realizar o ensaio representa apenas as parcelas de perdas dos dois transformadores e do conversor.

Um dos atrativos deste método é a possibilidade de realização em laboratório para transformadores de baixa potência, minimizando riscos operacionais. Podem-se citar como desvantagens o fato do conversor ter que possuir potência nominal superior à do transformador sob teste e os harmônicos gerados devido à ação de chaveamento dos conversores.

Os principais efeitos das correntes e tensões não-senoidais em transformadores de potência consistem no aparecimento de perdas adicionais, que elevam a temperatura comprometendo a isolação e reduzindo a vida útil do equipamento. Assim, deve-se projetar um filtro com intuito de atenuar os harmônicos gerados pelo chaveamento dos conversores.

Entre as alternativas apresentadas para a construção da bancada, optou-se pela utilização de um transformador em escala reduzida, projetado de forma a representar uma classe de transformadores de maior potência com relação ao comportamento térmico. É necessário que o comportamento térmico do transformador sob testes seja igual ou próximo ao dos transformadores que estão sendo representados. O transformador em teste será conectado diretamente à rede elétrica, sendo o controle do carregamento realizado por conversor estático reversível em potência.

Duas pontes conversoras trifásicas de 6 pulsos a IGBT's constitui o conversor estático reversível em potência. Através do controle do chaveamento das pontes de IGBT's é possível controlar as potências ativa e reativa permitindo o controle da característica do carregamento do transformador sob teste e a regulação da tensão de alimentação. As estruturas das malhas de controle de corrente os dois conversores são análogas.

As técnicas de controle vetorial são utilizadas para o controle de corrente, e a saída das malhas de controle são valores de referência de tensão a serem sintetizadas pelo conversor, que utiliza modulação por largura de pulsos (PWM). Para o controle desejado dos fluxos de potências ativa e reativa, e também para o controle da tensão no barramento CC, malhas de potência e de tensão são implementadas externas as malhas de controle de corrente.

A topologia da bancada permite que o transformador de conexão e o transformador sob teste sejam ensaiados, sem que para isto sejam trocados de posição. A possibilidade de fluxo de potência bidirecional permite que, o fluxo de potência ativa seja do transformador de conexão para o transformador sob teste ou do transformador sob teste para o transformador de conexão, permitindo assim um total controle do perfil de carregamento dos transformadores, possibilitando o ensaio dos dois transformadores.

Os filtros utilizados para atenuar os harmônicos no sistema são filtros LCL's. Os filtros LCL's são análogos, visto que, as características construtivas dos dois transformadores são bem próximas.

1.3 Estado da Arte

A topologia dos conversores estáticos reversíveis em potência são largamente utilizados em diversos setores industriais. Como exemplo, podemos citar a aplicação em geração eólica e sistemas de acionamento a velocidade variável, onde é desejada a frenagem da máquina de forma regenerativa. Apesar da aplicação de conversor CA/CC/CA para ensaio de transformadores ser algo até então pouco utilizado, a estratégia de controle de potência do conversor reversível já é utilizada a muito tempo. Pena et al. (1996) e Oliveira (2004) utilizam esta estratégia para controlar o conversor do lado da rede em uma turbina eólica acionando um gerador de indução duplamente excitado.

A utilização do conversor estático reversível em potência mostra-se atrativo para o controle do carregamento do transformador em teste, visto a flexibilidade existente no controle do perfil de carregamento e o menor consumo de energia durante o ensaio. O controle da corrente é efetuada de forma direta, através do conversor inversor. A regulação da tensão é realizada de forma indireta, através do controle da potência reativa no conversor retificador controlado. Coelho et al. (2002) sugere a regulação automática da tensão através do controle do fluxo de reativos nos conversores estáticos, onde são criados vínculos entre a tensão de saída e demanda de reativo. A ação de chaveamentos dos conversores para o controle do fluxo de potência no sistema provoca o surgimento de harmônicos, múltiplos da frequência de chaveamentos.

A frequência de chaveamento dos dispositivos de potência presente nos conversores, geralmente na ordem de 5 kHz, causa harmônicas de ordem elevada podendo perturbar outros equipamentos ou aumentar as perdas do transformador. Um filtro LCL destinado a atenuar os harmônicos de chaveamento é utilizado. Este filtro é alvo de muitos estudos, destacando-se entre eles, os procedimentos para desenvolvimento de um filtro trifásico para retificadores ativos. O projeto do filtro LCL leva em consideração a redução do fator de potência e as perdas de potência devido à utilização de um resistor de amortecimento para reduzir a frequência de ressonância (Liserre et al., 2001). Outro estudo importante na área foi realizado por Blaabjerg et al. (2003) onde foi analisada a estabilidade de conversores trifásicos controlados por corrente, levando em consideração a variação da impedância do transformador ligado ao filtro LCL. A análise da impedância de entrada é útil devido

à interação entre a impedância da fonte e a impedância do conversor poder conduzir o sistema à instabilidade.

Inúmeros trabalhos buscam o aprimoramento do filtro LCL de saída do conversor. Wang et al. (2003) compara várias topologias de amortecimento passivo para filtro LCL. Os critérios para a comparação entre estas topologias é a redução da frequência de ressonância sem prejudicar a faixa de atenuação do filtro. Teodorescu et al. (2003) apresenta o projeto de um retificador ativo com filtro LCL sem a utilização de amortecimento para reduzir o ganho na frequência de ressonância. A estabilidade é conseguida através da escolha apropriada dos elementos passivos do filtro LCL. Malinowski and Bernet (2004) propõem o projeto de um controlador simplificado para o controle do conversor reversível, que conecta um gerador à rede elétrica em sistema eólico. Neste artigo de Malinowski, é apresentado o projeto de um filtro LCL onde é realizada uma análise do custo e peso do filtro com relação à frequência de chaveamento do conversor e conclui-se que, quanto maior a frequência de chaveamento menor peso e conseqüentemente um menor custo do filtro LCL.

Twining and Holmes (2003) propõe uma estratégia robusta para regular a corrente de um conversor conectado a uma rede elétrica através de um filtro LCL. A Idéia principal do trabalho é usar um controlador PI para regular a corrente da rede, junto com a corrente do capacitor, para estabilizar o sistema. Wu and Lehn (2005) apresenta um novo método de controle de corrente para conversores fonte de tensão onde é utilizado um amortecimento ativo para redução da frequência de ressonância do filtro LCL. Blaski and Kaura (1996) propõe um método ativo para amortecer a frequência de ressonância de filtro LC conectado a entrada de conversores fonte de tensão.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE), juntamente com os diversos setores envolvidos, produtores, consumidores e outros (faculdades, laboratórios), buscando normalizar os ensaios de transformadores de potência, criaram guias e normas que devem ser seguidos para a realização dos ensaios. As metodologias propostas por algumas normas e guias que tratam do carregamento de transformadores serão abordadas no trabalho, buscando um melhor entendimento do problema do carregamento sob o ponto de vista das especificações feitas pelos clientes aos fabricantes e das limitações de uso dos equipamentos sob o ponto de vista das concessionárias.

A norma NBR5356 (2003) estabelece as condições de funcionamento dos transformadores de potência trifásicos e monofásicos e autotransformadores, excetuando-se certas categorias de pequenos transformadores e transformadores especiais. Nesta norma, os transformadores são classificados em função de seus métodos de resfriamento, onde é definido o limite de elevação de temperatura e apresentados em detalhes os métodos de ensaios para a medição de elevação de temperatura. A norma fornece detalhes sobre os ensaios dielétricos do óleo de forma a conhecer as suas características isolantes, que definirão ou não sua imediata aplicação para a refrigeração de transformadores.

Um transformador pode ser carregado além dos valores nominais, desde que esse carregamento se dê de forma controlada. A norma NBR-5416 (1997) apresenta recomendações para o carregamento de transformador além de sua potência nominal. O guia IEEE-C57.91 (1995) descreve as recomendações e metodologia de cálculo para carregamento de transformadores de distribuição e de potência. Sua proposição se caracteriza por identificar os riscos e estabelecer limites e regras que busquem a minimização dos impactos na vida útil destes equipamentos, quando sujeitos a condições operativas diferentes dos valores nominais.

O guia IEEE-C57.92 (1981) cobre as recomendações gerais para carregamento de transformadores de potência imersos em óleo mineral isolante de potência nominal até 100MVA. Recomendações de carregamento para transformadores imersos em óleo mineral isolante e tendo potência nominal acima de 100MVA, quando trifásico, ou acima de 33MVA, quando monofásico são apresentados no guia IEEE-C57.115 (1991).

O guia IEEE-C57.100 (1999) define procedimentos de testes e estabelece uma metodologia única para investigação do efeito da temperatura de operação na expectativa de vida de transformadores imersos em líquido isolante. Os requisitos elétricos, mecânicos e de segurança de transformadores de distribuição, de potência ou transformadores de regulação, monofásicos e trifásicos, imersos em líquido isolante, com tensões acima de 600V no enrolamento de maior tensão são mostrados no guia IEEE-C57.12.00 (2000). Procedimentos de testes de elevação de temperatura para determinação de características térmicas de transformadores de potência necessários para avaliar as capacidades de carregamento em condições específicas de carga diferentes das condições nominais são abordadas no guia IEEE-C57.119 (2001).

Muito embora, observa-se que os temas que envolvem o projeto e controle dos conversores estáticos reversíveis têm sido bastante explorados, muito embora a aplicação para a concepção de uma bancada de testes de carregamento para transformadores seja inovadora. Neste sentido, o enfoque maior desta dissertação, segue na direção de complementar as referências anteriores, apresentando várias contribuições dentro do contexto aqui apresentado: o projeto da bancada de testes de transformadores utilizando conversores estáticos.

1.4 Organização do Texto

Este trabalho apresenta vários aspectos do projeto de uma bancada para a implementação de testes de carregamento em transformadores de potência em condições adversas de funcionamento. O trabalho é apresentado em 6 capítulos. O capítulo 1, em sua introdução, apresenta as configurações alternativas de ensaio em carga de transformadores. É discutida a viabilidade da realização do ensaio em ambiente laboratorial, através de conversores estáticos de potência, onde se tem baixo consumo de energia e flexibilidade no controle do perfil de carregamento do transformador sob teste.

O capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre ensaios de transformadores de potência, baseada nas normas e guias de carregamento em vigor. Neste capítulo, são discutidas as normas técnicas referentes ao ensaio de transformadores de potência, apresentando os principais parâmetros que influenciam na avaliação de um carregamento acima da potência nominal de forma a não comprometer a vida útil do equipamento.

No capítulo 3 é definida a estratégia de regulação da tensão para o sistema. Isto porque, os conversores de potência não possuem um vínculo natural entre a potência ativa e frequência, nem da tensão de saída e a demanda de reativo, sendo necessária a criação deste vínculo pelo sistema de controle.

O capítulo 4 apresenta as técnicas utilizadas para controlar o carregamento do transformador em teste. É apresentada a modelagem das malhas de controle do conversor estático reversível ligado ao transformador isolador e ao transformador em teste. Os projetos dos controladores e dos elementos passivos do sistema são mostrados (filtros e capacitor do barramento CC).

No capítulo 5, são apresentados os resultados obtidos na simulação operacional dinâmica da bancada de testes projetada. Primeiramente, é realizada a simulação do transformador em condição nominal de operação e em seguida o funcionamento em condições especiais de operação.

O capítulo 6 apresenta as conclusões finais e as propostas de continuidade do trabalho. Informações complementares ao desenvolvimento do trabalho são apresentadas nos apêndices.

Ensaio de Carregamento de Transformadores de Potência

2.1 Introdução

Neste capítulo, será realizada uma revisão bibliográfica sobre ensaios de transformadores de potência onde serão abordadas as principais normas regulamentais e conceitos necessários para o entendimento deste tema.

Segundo Associação Brasileira de Normas Técnicas, o transformador é um equipamento estático com dois ou mais enrolamentos que, por indução eletromagnética, transforma um sistema de tensão e corrente alternada em outro sistema de tensão e corrente, de valores geralmente diferentes, mas à mesma frequência, cujo objetivo é transmitir potência (NBR5356, 2003).

Sendo o transformador um dispositivo estático que pode trabalhar em condições de temperatura superiores à do ambiente devido à energia que é dissipada, suas propriedades devem estar numa gama de valores que garantam um perfeito funcionamento dos seus componentes. Através da realização de ensaios, as condições de funcionamento e a eficiência de um transformador podem ser determinadas.

São consideradas condições normais de funcionamento de transformadores:

- altitude inferior a $1000m$;
- meio ambiente com baixo grau de poluição;

- para transformadores trifásicos, as tensões de alimentação devem ser praticamente simétricas (máximo nível de desbalanceamento de 2%);
- forma de onda da tensão de alimentação deve ser praticamente senoidal. A distorção harmônica total da corrente secundária de carga não deverá exceder 5%, enquanto que o conteúdo de harmônicos pares deverá ser inferior a 1%;
- temperatura ambiente não inferior a $-25^{\circ}C$ e não superior a $40^{\circ}C$ e temperatura média em qualquer período de $24h$, não superior a $30^{\circ}C$;
- ambiente não sujeito a abalos sísmicos que interfiram no projeto do transformador.

São consideradas condições especiais de funcionamento aquelas nas quais o transformador está submetido a temperaturas muito elevadas ou muito baixas, umidade elevada, atividade sísmica, grau de poluição elevado, formas de onda de tensão e de corrente anormais, cargas intermitentes, sobreexcitação, subexcitação e altitude elevada.

O estudo das normas e práticas atualmente em vigor se faz imprescindível para a avaliação da elevação de temperatura em transformadores de potência em condições de sobrecarregamento. Este estudo tem como objetivo um melhor entendimento do problema sob o ponto de vista das exigências feitas aos fabricantes e das limitações de uso dos equipamentos sob o ponto de vista das concessionárias.

Este levantamento bibliográfico é realizado a partir das normas e práticas (ABNT e IEEE) atualmente em vigor que abordam as condições exigíveis aos transformadores de potência e os procedimentos para a aplicação de cargas nos mesmos.

2.2 Classificação dos Transformadores

Os transformadores podem ser classificados de acordo com o método de refrigeração utilizado (NBR5356, 2003). Para os transformadores imersos em óleo isolante, esta classificação é realizada por meio de um código de quatro

letras. A primeira letra define a natureza do meio de refrigeração interno em contato com os enrolamentos, a segunda letra define a natureza da circulação do meio de refrigeração interno, a terceira letra define meio de refrigeração externo e a quarta letra define natureza da circulação do meio de refrigeração externo. Os tipos de refrigeração mais utilizados são:

- ONAN - fluxo natural de óleo e ventilação natural;
- ONAF - óleo natural e ar forçado;
- OFAF - óleo e ar forçados;
- ODAF - fluxo de óleo dirigido e ar forçado.

A norma NBR5356 (2003) parte 1 classifica os transformadores segundo suas características térmicas de operação em:

- Classe $55^{\circ}C$ - temperatura média dos enrolamentos, acima da ambiente, não exceda $55^{\circ}C$ e cuja elevação de temperatura no ponto mais quente do enrolamento, acima da ambiente, fique abaixo de $65^{\circ}C$ (considerando $40^{\circ}C$).
- Classe $65^{\circ}C$ - temperatura média do enrolamento, acima da ambiente, não exceda $65^{\circ}C$ e cuja elevação de temperatura do ponto mais quente do enrolamento, acima da ambiente, fique abaixo de $80^{\circ}C$ (considerando $40^{\circ}C$).

A Tabela 2.1 apresenta os limites de temperatura para transformadores de classe $55^{\circ}C$ e $65^{\circ}C$.

Tabela 2.1: Limites de temperatura em transformadores de potência.

classe de temperatura	$55^{\circ}C$	$65^{\circ}C$
máxima temp. do topo do óleo	$95^{\circ}C$	$105^{\circ}C$
máxima temp. do ponto mais quente do enrolamento	$105^{\circ}C$	$120^{\circ}C$

2.3 Carregamento de Transformadores

Devido às imposições operacionais do sistema elétrico, freqüentemente os transformadores são submetidos a carregamentos acima da potência nominal aliados a uma sobretensão, que eleva sua temperatura, diminuindo a vida útil do equipamento.

O aproveitamento máximo da potência de um transformador é atingido quando são aplicadas cargas acima da nominal sem comprometer o tempo de vida útil do equipamento. Os valores dos carregamentos máximos admissíveis dependem das características de projeto do transformador, construção e condição de operação, manutenção, temperatura ambiente e o período de sobrecarregamento.

A temperatura no ponto mais quente do enrolamento do transformador é o principal limitador de carregamentos acima da potência nominal, devido à deterioração do isolamento. Buchas, comutadores de derivação e outros equipamentos auxiliares devem ser projetados de maneira a não restringir a capacidade de carregamento dos transformadores.

A aplicação de carregamentos acima da potência nominal do equipamento envolve riscos, como:

- a produção de gás livre proveniente dos condutores aquecidos pela carga e pelas correntes de Foucault, além das correntes criadas nas partes estruturais do transformador;
- operação em altas temperaturas, o que causa uma redução da resistência mecânica do isolamento estrutural e do condutor;
- a expansão térmica de condutores e materiais isolantes ou partes estruturais que pode resultar na deformação permanente;
- o aumento da pressão nas buchas, que pode resultar em vazamento nas juntas, perda de óleo e danos ao isolamento;
- a possível expansão do óleo além da capacidade do tanque, causando a operação do dispositivo de alívio de pressão.

Estas considerações devem ser cuidadosamente avaliadas antes de se submeter transformadores a carregamentos acima do nominal.

A temperatura ambiente é um importante fator para determinação do carregamento máximo admissível do transformador, uma vez que será somada à elevação da temperatura do transformador, para se obter a temperatura de operação do equipamento.

As normas sugerem que, no cálculo de carregamento máximo admissível do transformador, se utilize a temperatura ambiente real no período em que se deseja calcular a capacidade de carga. Porém, podem ser adotados valores médios dessa temperatura.

A norma IEEE-C57.91 (1995) fornece uma tabela na qual é apresentado o acréscimo ou decréscimo percentual no carregamento, de acordo com a variação da temperatura ambiente (Tabela 2.2).

Tabela 2.2: Alteração do carregamento do transformador com relação à temperatura ambiente.

Tipos de carregamento	% da potência nominal do transformador	
	Decréscimo de carga para cada $1^{\circ}C$ de elevação na temperatura ambiente	Acréscimo de carga para cada $1^{\circ}C$ de redução na temperatura ambiente
Ventilação normal OA	1,5	1,0
Resfriamento util. água OW	1,5	1,0
Ventilação forçada OA/FA e OA/FA/FA	1,0	0,75
Óleo e ar forçado resfriamento util. água FOA, FOW OA/FOA/FOA	1,0	0,75

2.4 Condições Térmicas de Operação

O envelhecimento do isolamento do transformador é um processo contínuo que ocorre em todas as temperaturas, dificultando a definição de um ponto crítico, onde esta degradação é mais acentuada. A elevação de temperatura é causada pelas perdas oriundas do cobre e do núcleo de ferro, e é a principal causa deste envelhecimento.

Um transformador pode ser carregado além dos valores nominais, desde que esse carregamento se dê de forma controlada. A norma NBR5356 (2003) e o guia IEEE-C57.91 (1995) especificam formas de se carregar um transformador além de sua potência nominal, sendo:

- carregamento em condição normal de operação ao qual transformador de potência é submetido, sem que a temperatura no topo do óleo e do ponto mais quente do enrolamento sejam excedidas além dos limites normais, mesmo que em alguns momentos do ciclo de carga a potência nominal seja ultrapassada;
- carregamento planejado além do valor nominal onde a temperatura do ponto mais quente atinge valores maiores do que os aceitos para a condição de carregamento em condição normal (120 a 130°C);
- carregamento em condição de emergência de curta duração onde existe condição de risco e cujo tempo deve ser sempre inferior à constante térmica do transformador.
- carregamento em condição de emergência onde é permitido que os limites de temperatura do carregamento em condição normal sejam ultrapassados até um certo valor.

Devido à constante de tempo térmica na elevação de temperatura do óleo, um transformador pode ser submetido a carregamentos além do carregamento nominal em pequenos intervalos de tempo sem que a temperatura limite do óleo seja excedida, contudo recomenda-se não utilizar, apenas a temperatura média no topo do óleo como critério para o carregamento de transformadores, já que as constantes de tempo térmicas do enrolamento são significativamente menores.

A NBR-5416 (1997) ressalta que, aplicações de cargas contínuas onde a temperatura do ponto mais quente ultrapassa 95°C e 105°C para transformadores classe 55°C e classe 65°C respectivamente, provocam envelhecimento acelerado do isolamento.

A Tabela 2.3 apresenta os limites de elevação de temperatura para transformadores imersos em óleo, (NBR5356, 2003).

Tabela 2.3: Limites de elevação da temperatura em transformadores de potência imersos em óleo isolante.

tipos de transformadores		limites de elevação de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) ^a						
		enrolamentos			ponto mais quente	óleo	partes metálicas	
		método da variação da resistência		em contato com a isolamento sólida ou adjacente a ela			não em contato com a isolamento sólida e não adjacente a ela	
		circulação do óleo natural ou forçada sem fluxo de óleo dirigido	circulação forçada de óleo com fluxo dirigido					
em óleo	sem conservador ou gás inerte acima do óleo	55	60		65	50 ^b		Não devem atingir temperaturas superiores à máxima especificada para o ponto mais quente da isolamento adjacente ou em contato com esta
	com conservador ou gás inerte acima do óleo	55	60	65	55 ^c			
		65 ^d	70 ^d	80 ^d	65 ^d			
		95 ^e	100 ^e	120 ^e	65 ^e			

^aOs materiais isolantes devem ser adequados para o limite de elevação de temperatura em que o transformador é enquadrado.

^bMedida próxima à superfície do óleo.

^cMedida próxima à parte superior do tanque, quando tiver conservador, e próxima à superfície do óleo, no caso de gás inerte.

^dQuando é utilizada isolamento de papel, este deve ser o termo utilizado.

^eEstes limites de elevação de temperatura são aplicáveis desde que acordado entre fabricante e comprador.

A norma NBR-5416 (1997) utiliza dois procedimentos para avaliar a aplicação de carga em transformadores, cuja escolha depende do controle disponível e das condições operacionais. Para usuários que não possuem controle das condições operacionais, não é permitido o carregamento acima do nominal do equipamento em regime de emergência de longa e curta duração. Para usuários que possuem controle das condições operacionais, é permitido

o carregamento do equipamento em regime de emergência de longa e curta duração. A Tabela 2.4 apresenta os limites de carregamento de transformadores de potência, para operação normal e emergencial de curta e longa duração (NBR-5416, 1997).

Tabela 2.4: Limites de carregamento de transformadores.

tipos de carregamento	temperatura $^{\circ}C$			
	classe $55^{\circ}C$		classe $65^{\circ}C$	
	óleo	pt. mais quente	óleo	pt. mais quente
normal	95	105	105	120
emerg. longa duração	105	120	110	130
emerg. curta duração	105	130	110	140

2.5 Rigidez Dielétrica de Óleos Isolantes

Todos os transformadores de potência acima de 20kVA são construídos de maneira a trabalharem imersos em óleo isolante. O óleo é usado para garantir um perfeito isolamento entre os componentes do transformador, e dissipar para o meio externo o calor proveniente do efeito Joule.

A análise convencional de um óleo mineral isolante em serviço, na qual são ensaiadas as principais características físico-químicas, permite avaliar, pelos valores obtidos, o grau de degradação do líquido dielétrico. Estes ensaios: rigidez dielétrica, teor de água, cor, densidade, índice de neutralização ou acidez são considerados suficientes para se determinar se um óleo está em condições de ser mantido em serviço, ou apresenta valores anormais para suas propriedades físico-químicas, que podem causar danos aos equipamentos.

A rigidez dielétrica mede a capacidade de um óleo isolante suportar tensões elétricas nas frequências de trabalho do equipamento, sem apresentar falhas. O líquido isolante sem umidade e limpo apresenta valores elevados de rigidez dielétrica. A presença de água e partículas sólidas em suspensão reduz acentuadamente a rigidez dielétrica do óleo isolante, prejudicando o isolamento entre os componentes do transformador e a dissipação para o meio exterior do calor, proveniente do efeito Joule nos enrolamentos, assim como no núcleo.

2.6 Sobretensões em Transformadores

A sobretensão em um transformador de potência pode provocar no material ferromagnético a saturação, causando um aumento significativo na corrente de excitação do equipamento. Os enlaces de fluxo não se mantêm mais somente confinados ao núcleo, e se fecham pelo meio isolante ou mesmo pelo tanque do transformador.

A impedância percentual de um transformador altera quando se tem sobretensão ou tensão abaixo da nominal aplicada no transformador, ao contrário da impedância equivalente que é uma constante independente da excitação. Com a alteração da impedância percentual tem-se uma alteração no comportamento térmico e elétrico do transformador.

Os limites de sobretensão presentes nas normas são considerados conservativos tanto por usuários, quanto por fabricantes, visto que, o funcionamento destes equipamentos em condições de sobrecarregamento, combinado com sobretensões vem se tornando algo comum no setor elétrico (Barbosa, 2005).

A norma NBR5356 (1993) cita que os transformadores devem ser capazes de operar, em regime contínuo, em sua derivação principal, com tensão ou frequência diferente da nominal, desde que se atenda os seguintes limites:

- tensão aplicada ao enrolamento primário excedendo, no máximo 5% de sua tensão nominal sob frequência nominal e corrente secundária nominal;
- tensão aplicada ao enrolamento primário acima da tensão nominal, sob frequência abaixo da frequência nominal, mantida a corrente secundária nominal. A tensão primária e a relação tensão/frequência não podem exceder 5% dos respectivos valores nominais com a frequência superior a $57Hz$;
- tensão aplicada ao enrolamento primário superior a 5% da tensão nominal e inferior a 10% desta sob uma frequência nominal, limitando-se a corrente secundária em k vezes a corrente nominal, de acordo com a Equação 2.1.

$$V_T(\%) = 110 - 5k^2 \quad (2.1)$$

sendo: $V_T(\%)$ o valor de tensão aplicada ao transformador e $0 < k < 1$

A Equação 2.1 permite traçar a curva tensão versus carregamento (Figura 2.1).

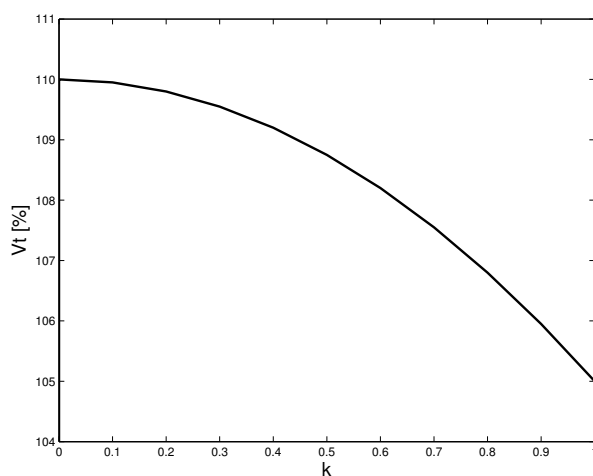


Figura 2.1: Curva tensão versus carregamento ou índice de carregamento.

- tensão primária 5% abaixo da tensão nominal do enrolamento primário, mantida a potência nominal do enrolamento secundário, sob frequência nominal, sendo que, nesta condição, as elevações de temperatura das várias partes do transformador não devem ultrapassar em mais de 5°C as elevações de temperatura obtidas em condição nominais;
- a vazio, com tensão aplicada ao enrolamento primário igual a 110% da sua tensão nominal, sob frequência nominal, sem que as elevações de temperatura ultrapassem os limites fixados;
- a vazio, com tensão aplicada ao enrolamento primário acima da tensão nominal, sob frequência abaixo da frequência nominal, desde que nem a tensão nem a relação de tensão/frequência excedam 110% dos respectivos valores nominais, sem que as elevações de temperatura ultrapassem os limites fixados;

A operação de transformadores de potência em situação de sobretensão apesar de ser comum, é carente de material técnico, visto a sensibilidade e a complexidade que envolve o assunto. A norma NBR5356 (2003) que cancela e substitui a norma NBR5356 (1993), não contém desta forma apresentada esta parte citada, que trata do funcionamento do transformador de potência com tensão ou frequência diferente da nominal. Consta na norma NBR5356 (2003) apenas que, um transformador deve ser capaz de operar em regime permanente sem danos, nas condições de sobreexcitação onde a relação entre a tensão e a frequência não exceda em mais de 5% a relação correspondente entre a tensão e frequência nominal.

O guia IEEE-C57.12.00 (2000) e a norma NBR5356 (1993) apresentam dados semelhantes no que se refere aos limites de sobretensão. Ambas apresentam uma limitação de 105% da tensão nominal para o transformador funcionando em plena carga. Para a condição de funcionamento a vazio estabelece um limite de 110% da tensão nominal.

Existem situações no sistema de distribuição onde a aplicação de sobretensões no primário do transformador é inevitável. No entanto, essa sobretensão aplicada aos transformadores provoca uma alteração nas perdas a vazio e em carga. Ebert (2000) mostra que as perdas a vazio em condição de sobreexcitação de até 110% ou excitação abaixo da nominal, de até 90%, podem ser obtidas através de:

$$P_{V2} = P_{V1} V_{pu}^{3,7} \quad (2.2)$$

sendo:

- P_{V1} - valor das perdas a vazio na condição de excitação nominal;
- P_{V2} - valor das perdas a vazio na nova condição de excitação;
- V_{pu} - valor da tensão de excitação em pu.
- 3, 7 - expoente médio determinado a partir de análise de dados de perda a vazio, medidos em vários transformadores de potência.

A Equação 2.2 permite concluir que as perdas a vazio, na condição de sobreexcitação, aumentam em relação a condição nominal de operação. Esta

equação para o cálculo das perdas a vazio do transformador só é válida para uma excitação máxima de 110%. A partir deste valor não se tem mais a garantia de que o núcleo do transformador não vai saturar e os riscos operacionais crescem exageradamente.

Para o transformador de potência operando com carga, as perdas presentes devido à sobretensão serão alteradas. Essas perdas podem ser obtidas através da Equação 2.3 (Ebert, 2000).

$$P_{C2} = P_{C1} \left(\frac{1}{V_{pu}} \right)^2 \quad (2.3)$$

sendo:

- P_{C1} - valor das perdas em carga na condição de excitação nominal;
- P_{C2} - valor das perdas em carga na nova condição de excitação.

Outra alteração importante provocada pela sobretensão no transformador é a elevação da temperatura no topo do óleo e a elevação no ponto mais quente. A elevação da temperatura do topo do óleo, pode ser calculada através da Equação 2.4, presente na norma NBR-5416 (1997):

$$\Delta\theta_0 = \Delta\theta_{on} \left(\frac{k^2 R + 1}{R + 1} \right)^n \quad (2.4)$$

onde:

- $\Delta\theta_0$ - elevação de temperatura do topo do óleo em uma condição de carregamento diferente do nominal;
- $\Delta\theta_{on}$ - elevação de temperatura do topo do óleo em carga nominal;
- k - razão entre o carregamento no qual se deseja calcular a elevação de temperatura e o carregamento nominal do transformador;
- R - relação de perdas em carga sob carga nominal e as perdas a vazio;

- n - expoente no cálculo de elevação de temperatura do óleo, que depende do método de resfriamento em funcionamento do transformador.

A Equação 2.4 calcula a elevação da temperatura no topo do óleo provocada apenas pelo carregamento do transformador, não levando em consideração as alterações causadas devido a excitação acima dos valores nominais. Barbosa (2005) propõe um modelo que considera a elevação da temperatura do óleo devido ao carregamento do transformador e à excitação acima dos valores nominais. A Equação 2.5 sintetiza a metodologia de cálculo proposta:

$$\Delta\theta_f = \Delta\theta_{on} \left[\frac{k^2 P_{nom} + P_{fe} (V_p)^{3,7}}{P_{nom} + P_{fe}} \right]^n \quad (2.5)$$

onde:

- $\Delta\theta_f$ - elevação de temperatura do topo do óleo sobre a temperatura ambiente sob uma carga específica;
- P_{nom} - perdas no enrolamento sob carga nominal;
- P_{fe} - perdas no ferro com 100% de excitação;
- V_p - tensão aplicada no primário do transformador.

A elevação de temperatura no ponto mais quente é calculada através da Equação 2.6, presente na norma NBR-5416 (1997) :

$$\Delta\theta_e = \Delta\theta_{en} (k^2)^m \quad (2.6)$$

sendo:

- $\Delta\theta_e$ - elevação de temperatura do ponto mais quente com carregamento diferente do nominal;
- $\Delta\theta_{en}$ - elevação de temperatura no ponto mais quente em carga nominal;

- k - razão entre o carregamento no qual se deseja calcular a elevação de temperatura e o carregamento nominal do transformador;
- m - expoente no cálculo de elevação de temperatura do enrolamento, que depende do método de resfriamento em funcionamento do transformador.

2.7 Ensaio em Carga de Transformadores

Na norma NBR 5356 consta que, um transformador pode além de sua potência nominal em carga contínua, ser submetido a um ciclo de carregamento temporário. O ensaio em carga aplica essencialmente a transformadores de potência de grande potência os quais as possibilidades de carregamento em condições de emergência merecem uma atenção especial. O ensaio busca levantar as condições térmicas de operação dos transformadores quando em operação.

O diagrama de carga recomendado para o ensaio consiste em uma corrente constante, expressa em valores por unidade da corrente nominal. Deve ser especificado se o ensaio começa com, o transformador em temperatura ambiente do local de teste ou a uma temperatura em regime, correspondente a uma corrente de carga inicial.

Para a realização do ensaio devem ser utilizados no mínimo três sensores de temperatura, sendo utilizado como valor, a temperatura média dos valores obtidos. Em caso de serem instalados sensores dentro do enrolamento a fim de ser registrar a temperatura no ponto mais quente, é aconselhável colocar vários sensores em posições diferentes, uma vez que a exata localização do ponto mais quente não é previamente conhecida.

A temperatura do óleo na parte superior é determinada pelos sensores imersos no óleo na tampa do tanque, dentro dos poços ou dentro das tubulações superiores que ligam o tanque aos radiadores ou trocadores de calor. A temperatura do óleo no fundo do tanque por questões práticas é considerada como idêntica à temperatura do óleo que retorna ao tanque pelos circuitos de refrigeração. A temperatura do óleo no fundo do tanque é determinada pelos sensores montados na tubulação dos trocadores de calor ou radiadores.

A temperatura do óleo média deve, em princípio, ser a temperatura média do óleo de refrigeração dentro dos enrolamentos.

Pode ser realizado o monitoramento das temperaturas superficiais do tanque e das conexões elétricas, para reduzir o risco de danos durante o ensaio, através de uma câmera infravermelha. A análise cromatográfica dos gases dissolvidos no óleo antes e após o ensaio de elevação de temperatura é um método de diagnosticar o comportamento térmico do transformador.

Os sensores para medir a temperatura do ar de refrigeração deverão ser dispostos ao redor do tanque, afastados entre 1 e 2m do tanque ou da superfície de refrigeração, e serem protegidos de radiação térmica direta.

2.8 Comentários Finais

Neste capítulo, foi realizado um estudo das normas e práticas recomendadas atualmente em vigor para a avaliação da elevação de temperatura em transformadores de potência em condições de sobrecarregamento. É observado que as normas e guias de carregamento, nacionais e internacionais abordam de maneira superficial o aspecto da operação do transformador em regime especial.

Diante da necessidade de operar o transformador de forma otimizada explorando no máximo o seu carregamento, fica evidente a necessidade de se aplicar carregamento acima do nominal nos transformadores. As normas vigentes permitem que, por um determinado período de tempo, o transformador opere acima de suas características nominais (condicionando a máximas temperaturas admissíveis, máximas correntes), desde que a expectativa de vida do transformador não seja reduzida.

Por norma, exige-se atualmente que o transformador apresente resultados no ensaio de elevação de temperatura abaixo de determinados valores de referência. Este teste pode envolver sérias dificuldades em se tratando de transformadores e sempre existe um custo e tempo de execução envolvido.

Finalmente, a operação com sobreexcitação e sobrecarga são analisadas e o modelo térmico sugerido em Barbosa (2005) é apresentado. Este modelo considera a excitação acima do nominal, fator este desprezado no modelo

sugerido na norma NBR-5416 (1997).

Este capítulo abordou as condições exigíveis aos transformadores de potência e os procedimentos para a aplicação de cargas nos mesmos. Teve como objetivo um melhor entendimento do problema do carregamento sob o ponto de vista das especificações feitas pelos clientes aos fabricantes e das limitações de uso dos equipamentos sob o ponto de vista das concessionárias.

Regulação de Tensão

3.1 Introdução

O objetivo central da bancada projetada é avaliar o transformador sob teste quando submetido a condição de sobrecarga associada à sobretensão. É desejado que a bancada permita o carregamento do transformador com uma tensão 10% maior que a tensão nominal do transformador, tendo em vista que para 110% de excitação tem-se a garantia que o núcleo do transformador não irá saturar. Neste capítulo, será feita uma análise do modelo estático do sistema com relação à estratégia de regulação de tensão adotada na bancada de testes.

A regulação de tensão em sistemas de potência pode ser realizada por meio de máquinas síncronas, alocação de banco de capacitores, transformadores reguladores de tensão, transformadores de taps regulados ou conversores estáticos. Neste capítulo, será vista a estratégia de regulação de tensão utilizando conversor estático. A análise inicialmente é considerada para uma fonte de tensão conectada a uma barra infinita através de uma linha de transmissão e posteriormente para um conversor estático.

A regulação da tensão em Sistemas Elétricos de Potência (SEP), permite o sistema manter um estado de equilíbrio sob condições normais de operação e ainda recuperar um aceitável estado de equilíbrio após a ocorrência de alguma perturbação. As máquinas síncronas acopladas a um SEP possuem um sistema de excitação e um sistema de força motriz, os quais possuem reguladores que permitem a regulação da tensão e da frequência, respectivamente.

De uma maneira similar à análise de uma máquina síncrona conectada a uma barra infinita, pode-se fazer a análise para conversores estáticos conectados a uma barra infinita (Coelho, 2000). Os conversores estáticos são equipamentos sem partes girantes capazes de gerar e/ou absorver potência reativa, cuja finalidade pode ser regular a tensão do SEP ao qual estão conectados. A capacidade de gerar uma tensão em módulo e fase distinta da tensão da rede possibilita a alteração nos fluxos de potência ativa e reativa. É capaz de solicitar corrente capacitiva e/ou indutiva controlada de um sistema elétrico de potência, e desta forma gerar ou absorver potência reativa.

O método de Newton, para resolução de sistemas não lineares têm sido amplamente utilizado nos estudos de planejamento e operação de sistemas elétricos de potência, (Monticelli (1983) e Kundur (1994)). Através deste método, são definidos os requisitos de suporte de reativos para a manutenção do perfil de tensão no sistema. Neste trabalho, o método de Newton será utilizado para quantificar o valor da potência reativa necessária no conversor retificador, para excitar o transformador em teste com uma tensão de 110%.

Devido ao fato da bancada estar ligada em uma barra forte, para que a tensão seja regulada através do conversor estático, é necessário reduzir a potência de curto-circuito do sistema, inserindo em série uma reatância. No estudo de regime permanente do sistema utilizando o método Newton, o valor da reatância a ser inserida será definido.

3.2 Fontes de Tensão Conectadas à Rede

Os sistemas de potência são projetados com o principal objetivo de atender a demanda de energia requerida pelos seus consumidores dentro de certos limites de tensão e frequência. O controle de tensão é um aspecto importante a ser considerado na operação de um sistema de potência. Nos centros de controle, equipamentos são gerenciados para injetar ou absorver potência reativa necessária a regulação da tensão.

Várias configurações topológicas de SEP encontradas na prática podem ser reduzidas a esta simples configuração mostrada na Figura 3.1, cuja análise permite a compreensão dos fenômenos encontrados num sistema de potência real. Nesta configuração o gerador síncrono é representado por uma fonte de

tensão ideal ligada a uma barra interna, a impedância equivalente do gerador é representada por uma impedância entre a barra interna e a barra de carga.

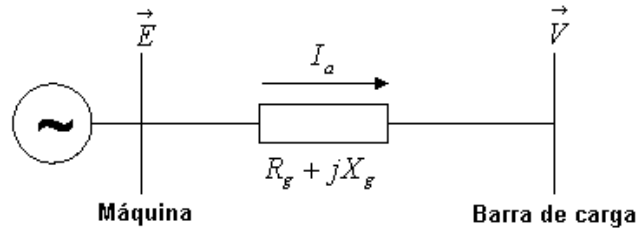


Figura 3.1: Máquina síncrona conectada à rede de distribuição.

Na Figura 3.2 podemos verificar que a variação da excitação de um gerador elétrico constitui um fator importante para o controle do fluxo de potência reativa. Quando a máquina é sobreexcitada, a corrente fornecida ao sistema está atrasada, ou seja, a máquina está fornecendo potência reativa ao sistema. Sendo a máquina subexcitada, a corrente fornecida ao sistema está adiantada, ou seja, a máquina está consumindo potência reativa do sistema (Stevenson, 1986).

$$\vec{E} = \vec{V} + jX_g \vec{I}_a \quad (3.1)$$

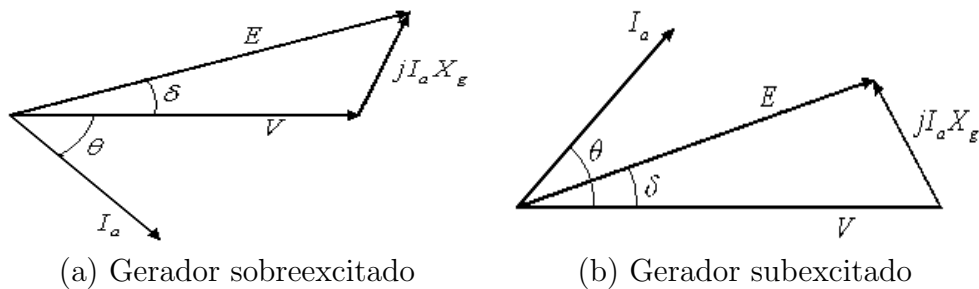


Figura 3.2: Diagrama fasorial do gerador.

O estudo da regulação de tensão consiste no cálculo dos módulos e ângulos da tensão nas barras e das máquinas geradoras do sistema elétrico de potência. As análises de regulação de tensão em SEP podem ser realizadas através da obtenção do perfil de tensão das barras em função de seu carregamento. Estas análises possibilitam a compreensão das condições de operação

do sistema para diferentes carregamentos. O controle em SEP integra uma série de subsistemas básicos, cuja função é manter o equilíbrio na distribuição dos fluxos de potência ativa e da potência reativa.

Em um sistema de transmissão sem perdas, as potências ativa e reativa são dadas por (Stevenson, 1986):

$$P = \frac{EV \operatorname{sen} \delta}{\omega L} \quad (3.2)$$

$$Q = \frac{E^2}{\omega L} - \frac{EV \cos \delta}{\omega L} \quad (3.3)$$

sendo $|E|$ e $|V|$ as amplitudes das tensões terminais, δ a fase relativa entre \vec{E} e \vec{V} e wL a reatância equivalente de linha, como pode ser observado na Figura 3.3.

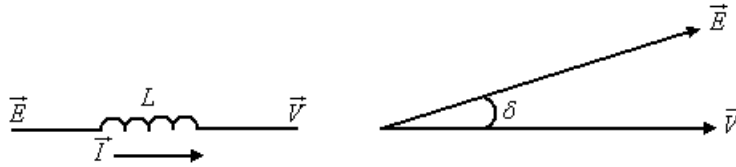


Figura 3.3: Representação vetorial das variáveis de uma linha de transmissão.

Apesar dos fluxos de potência ativa e reativa não serem completamente desacoplados, o controle do fluxo de potência ativa (CFPA) num sistema está mais diretamente ligado ao controle da frequência e o controle do fluxo de potência reativa (CFPR) encontra-se relacionado ao controle da tensão, como representado na Figura 3.4.

A máquina síncrona possui uma ligação direta entre a frequência de operação e a potência fornecida, ou seja, para uma potência mecânica fixa no eixo, a velocidade ou frequência naturalmente cai ao elevarmos a potência elétrica drenada da máquina.

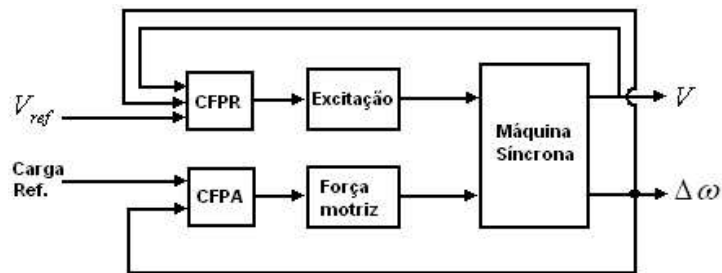


Figura 3.4: Controle da frequência e da tensão em máquinas síncronas.

3.3 Conversores Conectados à Rede

Diferentemente das máquinas síncronas, os conversores de potência não possuem uma ligação natural entre potência ativa e frequência, nem da tensão de saída e demanda de reativo (Coelho, 2000). Para a conexão de um inversor a uma barra infinita, é necessário que estes vínculos sejam criados pelo sistema de controle do conversor. A analogia com os sistemas elétricos de potência sugere a regulação automática da tensão através do controle de fluxo de reativos nos conversores estáticos, como representado na Figura 3.5.

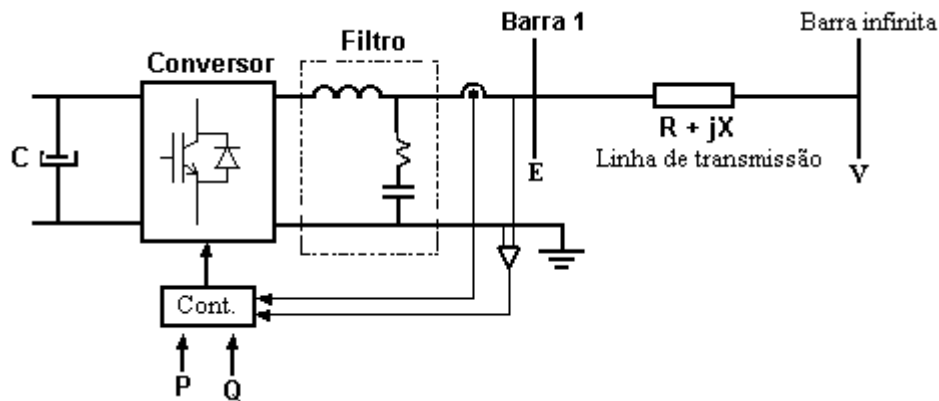


Figura 3.5: Conversor conectado a rede de alimentação.

Através do controle do módulo e sentido do fluxo de reativo no conversor é realizado a regulação da tensão E na barra de carga 1. Assim, a tensão E do conversor seguirá as leis de controle conforme equação 3.4, para o conversor fornecendo potência ativa e reativa e para o conversor fornecendo potência

ativa e consumindo potência reativa, as quais são representadas na Figura 3.6. Para uma potência reativa nula no conversor a tensão E na barra 1 de carga não é alterada. Ao injetar reativo na linha de transmissão o sistema passa a ter características capacitiva e a tensão sobe proporcionalmente ao fluxo de reativo. Ao retirar reativo da linha de transmissão através do conversor o sistema passa a ter características indutivas e a tensão é reduzida proporcionalmente.

$$E = E_0 - k_p Q \quad (3.4)$$

sendo:

- k_p - inclinação negativa.

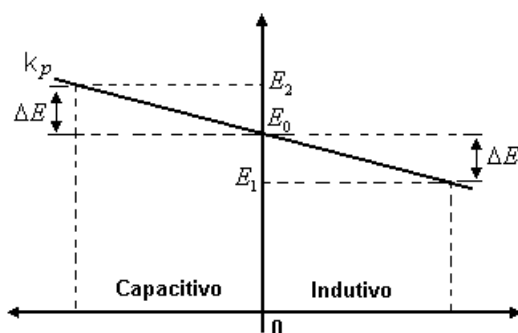


Figura 3.6: Estrutura básica de controle dos conversores.

onde:

- $E = E_0$ - resistivo;
- $E < E_0$ - indutivo;
- $E > E_0$ - capacitivo;

3.4 Fluxo de Carga em Redes Elétricas

O cálculo do fluxo de potência em uma rede de energia elétrica consiste essencialmente na determinação das tensões, correntes, potências ativas e

reativas e dos ângulos teta, por meio da representação de um conjunto de equações e inequações algébricas (Monticelli, 1983).

Na formulação básica do fluxo de potência, cada barra da rede é representada por quatro variáveis, sendo que duas variáveis possuem seu valor conhecido e duas são incógnitas.

- θ_i - ângulo da tensão na barra i ;
- V_i - módulo da tensão na barra i ;
- P_i - potência ativa injetada na barra i ;
- Q_i - potência reativa injetada na barra i .

De acordo com quais variáveis sejam incógnitas, definem-se três tipos de barras:

- PQ - barra de carga ;
- PV - barra de geração;
- $V\theta$ - barra de referência.

As barras dos tipos PQ e PV são utilizadas para representar, respectivamente, barras de cargas e barras de geração. A barra $V\theta$, ou barra de referência, como o próprio nome indica, fornece a referência angular do sistema; além disso, é utilizada para fechar o balanço de potência, levando em conta as perdas de transmissão não conhecidas. Em uma barra do tipo PQ são conhecidos P_i e Q_i , e calculados V_i e θ_i , na barra PV são conhecidos P_i e V_i , e calculado Q_i e θ_i e nas barras de referências são conhecidos V_i e θ_i , e calculado P_i e Q_i .

Esses três tipos de barras são as mais comuns e também as mais importantes. Entretanto, existem algumas situações particulares, como por exemplo o controle da magnitude da tensão de uma barra remota, nas quais aparecem outros tipos de barras (PQV , P e V).

O estudo de fluxo de carga em redes elétricas traduz-se na resolução de um sistema de equações algébricas, utilizando-se métodos iterativos (Ferreira and Costa, 2004). Dentro dos métodos iterativos existentes, que são inúmeros, podemos citar o método de Newton.

A solução do fluxo de carga dependerá das características comuns aos processos de solução de equações algébricas não-lineares, tais como do método utilizado na resolução, da existência da solução, das múltiplas soluções existentes, da existência de singularidades, da estimativa inicial, etc. O processo de solução de fluxo de carga por métodos numéricos tem um número infinito de soluções, o que se busca é uma solução ótima que é única.

As equações básicas do fluxo de carga são obtidas impondo-se a conservação das potências ativas e reativas em cada nó da rede, isto é, a potência líquida injetada deve ser igual à soma das potências que fluem pelos componentes internos que têm este nó como um de seus terminais. A Figura 3.7 mostra o modelo equivalente de uma linha de transmissão.

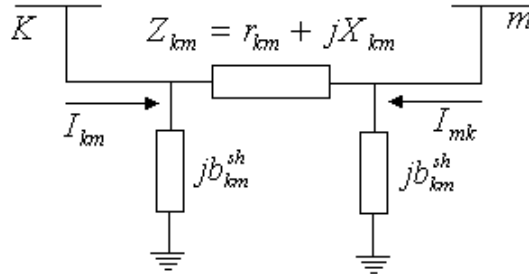


Figura 3.7: Modelo de uma linha de transmissão.

A corrente I_{km} em uma linha de transmissão na forma matricial é dada por:

$$\underline{I} = \underline{Y} \underline{E} \quad (3.5)$$

em que:

- \underline{I} - vetor das injeções de corrente, cujas componentes são $I_k (k = 1, NB)$;

- \underline{E} - vetor das tensões nodais cujas componentes são $E_k = V_k e^{j\theta_k}$;
- $Y = G + jB$ - matriz admitância nodal;

Os elementos da matriz Y são:

$$Y_{km} = -a_{km} e^{-j\varphi_{km}} y_{km} \quad (3.6)$$

$$Y_{kk} = j b_k^{sh} + \sum_{m \in \Omega_k} (j b_{km}^{sh} + a_{km}^2 y_{km}) \quad (3.7)$$

Onde b_{km}^{sh} é a susceptância shunt e y_{km} a admitância série. Para linhas de transmissão, $a_{km} = 1$ e $\varphi_{km} = 0$. A injeção de corrente I_k , que é a k -ésima componente do vetor \underline{I} , pode ser escrita na forma:

$$I_k = \sum_{m \in k} (G_{km} + jB_{km})(V_m e^{j\theta_m}) \quad (3.8)$$

A injeção de potência complexa S_k é dada por:

$$S_k^* = V_k e^{-j\theta_k} \sum_{m \in k} (G_{km} + jB_{km})(V_m e^{j\theta_m}) \quad (3.9)$$

As expressões dos fluxos de potência ativa P_{km} , e potência reativa Q_{km} , onde k é o conjunto de todas as barras m adjacentes à barra k , incluindo a própria barra k , podem ser obtidas identificando as partes reais e imaginária da equação 3.9 :

$$P_k = V_k \sum_{m \in k} V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \quad (3.10)$$

$$Q_k = V_k \sum_{m \in k} V_m (G_{km} \sin \theta_{km} + B_{km} \cos \theta_{km}) \quad (3.11)$$

sendo:

- G - parte real da matriz admitância nodal;
- B - parte imaginária da matriz admitância nodal;

3.5 Fluxo de Carga pelo Método de Newton

O método de Newton vem sendo utilizado por longa data na análise de sistemas de equações algébricas não-lineares (Monticelli, 1983). Embora o uso do método para análise de fluxo de carga possa implicar em problemas de não convergência, devido a problemas numéricos, para a análise do modelo estático da bancada, analisada neste trabalho, quanto à regulação da tensão este método pode ser utilizado. Devido o sistema ter um número reduzido de barras, não teremos problemas de não convergência por problemas numéricos, causados diante da inversão de matriz.

Na Figura 3.8, é apresentado o diagrama esquemático da bancada identificando as barras existentes. A impedância entre a barra de referência 1 e a barra de carga 2, representa o transformador de distribuição do laboratório onde será montada a bancada (300kVA). As impedâncias entre a barra de carga 2 e a barra 3 representam o transformador de conexão, sendo a impedância entre a barra 2 e a barra 4 o transformador sob teste de 25kVA, 220/220V. No sistema, são conhecidos P e Q das barras de carga 2, 3 e 4 e deseja-se definir o valor de V e θ . Para a barra de referência 1 é conhecido V e θ e pretende-se calcular P e Q .

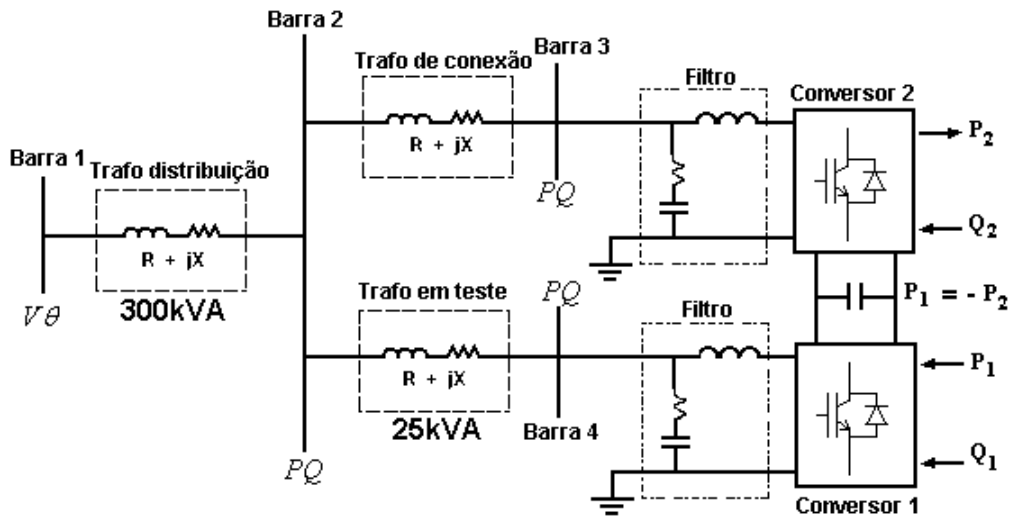


Figura 3.8: Diagrama esquemático da bancada para ensaio de transformadores de potência.

A potência ativa P_1 em módulo é igual a potência ativa P_2 , visto que o fluxo de potência ativa fornecida ao transformador em teste pelo conversor 1 é igual ao fluxo de potência ativa que o conversor 2 fornece ao conversor 1. As potências reativas dos conversores são independentes permitindo a regulação da tensão no sistema.

A aplicação do método de Newton para a resolução da função $\underline{g}(\underline{x}, \underline{y}) = 0$, consiste em se determinar o vetor de correção $\Delta \underline{x}$, o que exige a resolução do sistema linear dado por:

$$\underline{g}(\underline{x}^V) = -J(\underline{x}^V)\Delta \underline{x}^V \quad (3.12)$$

Para o sistema da Figura 3.8, têm-se:

$$\underline{g}(\underline{x}^V) = \begin{vmatrix} \Delta \underline{P}^V \\ \Delta \underline{Q}^V \end{vmatrix} \quad (3.13)$$

$$\Delta(\underline{x}^V) = \begin{vmatrix} \Delta \underline{\theta}^V \\ \Delta \underline{V}^V \end{vmatrix} \quad (3.14)$$

$$J(\underline{x}^V) = \begin{vmatrix} \frac{\partial(\Delta \underline{P})}{\partial \underline{\theta}} & \frac{\partial(\Delta \underline{P})}{\partial \underline{V}} \\ \frac{\partial(\Delta \underline{Q})}{\partial \underline{\theta}} & \frac{\partial(\Delta \underline{Q})}{\partial \underline{V}} \end{vmatrix}^{(V)} \quad (3.15)$$

As funções ΔP e ΔQ são dadas por:

$$\Delta \underline{P} = \underline{P}^{esp} - \underline{P}(\underline{V}, \underline{\theta}) \quad (3.16)$$

$$\Delta \underline{Q} = \underline{Q}^{esp} - \underline{Q}(\underline{V}, \underline{\theta}) \quad (3.17)$$

sendo \underline{P}^{esp} e \underline{Q}^{esp} constante.

A representação matricial do sistema é:

$$\begin{vmatrix} \Delta P^V \\ \Delta Q^V \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \theta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \Delta \theta^V \\ \Delta V^V \end{vmatrix} \quad (3.18)$$

3.6 Regulação de Tensão na Bancada

Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos na simulação do modelo estático da bancada. Para simulação, foi desenvolvido um programa no Matlab utilizando método de Newton para a resolução do sistema, de equações e inequações algébricas que constitui o modelo da bancada. Serão analisados a regulação da tensão nas barras de carga 2, 3 e 4 em função fluxo de potência reativa na barra de carga 3 e o valor da reatância necessária entre a barra 1 e 2 para permitir elevação da tensão.

Seja o sistema da Figura 3.8, sendo os conversores considerados como fontes de tensão ideais, ou seja, capazes de reproduzir instantaneamente na saída o valor de referência. A potência reativa da barra de carga 3 permite elevar ou abaixar a tensão nas barras de cargas do sistema, desde que uma reatância seja colocada na entrada, abaixando a potência de curto-circuito do sistema. O propósito da simulação é avaliar a capacidade de regulação de tensão na bancada para permitir a sobrecitação do transformador sob teste.

Na Figura 3.9, o sistema é representado por barras de carga, sendo as barras 2, 3 e 4 de carga e a barra 1 de referência.

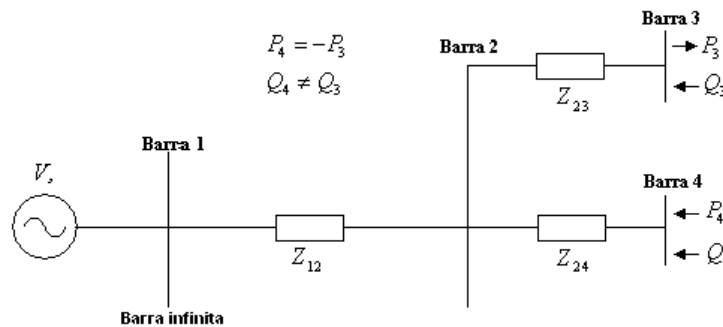


Figura 3.9: Representação do sistema em barras de carga.

3.6.1 Elevação de tensão nas barras de carga

O controle da potência reativa permite aumentar a tensão nas barras de carga do sistema, possibilitando o ensaio do transformador. A Figura 3.10 mostra o comportamento da tensão nas barras de carga quando mantém-se a potência ativa das barras 3 e 4 constante e altera-se a potência reativa da barra 3 e a impedância da rede entre as barras 1 e 2. A potência ativa P_3 da barra 3 tem sentido contrário à potência reativa Q_3 , ou seja o sistema do conversor está fornecendo potência ativa e consumindo potência reativa. Os valores apresentados têm como base o transformador sob teste de $25kVA$ e tensão de $220V$.

A tensão nas barras de carga não teve um aumento significativo quando se variou a potência reativa e se manteve constante a impedância entre as barras 1 e 2, $0,15\%$ de Z_{base} , sendo está a impedância do transformador de $300kVA$. É desejado para o ensaio de sobretensão do transformador um aumento de 10% da tensão. Podemos observar na Figura 3.10d e na Tabela 3.1 que através de uma impedância de $10,53\%$ de Z_{base} entre as barras 1 e 2, para $0,6pu$ de injeção de reativo é obtido um aumento acima de 10% da tensão em todas as barras de carga.

Através dos resultados da simulação apresentados na Tabela 3.1, pode-se verificar que o transformador isolador e o conversor reversível em potência possuem aproximadamente uma potência 20% maior que a do transformador que está sendo testado, visto que a potência ativa e reativa na barra 3 são $-0,9998pu$ e $0,6018pu$, respectivamente. O indutor inserido na entrada do sistema é de $1,047mH$ e pode ser construído através de núcleo de aço, sendo a frequência de alimentação $60Hz$. A corrente que circula neste reator é definida em função do fluxo de potência ativa retirada da rede para suprir as perdas internas do sistema e do nível de reativo necessário para regular a tensão no transformador em teste.

Tabela 3.1: Variáveis calculadas na simulação.

<i>variável</i>	<i>barra 1</i>	<i>barra2</i>	<i>barra3</i>	<i>barra4</i>
tensão	1,0000pu	1,1406pu	1,1568pu	1,1423pu
Potência ativa	0,0033pu	0,0000pu	-0,9998pu	0,9998pu
Potência reativa	-0,4883pu	0,0000pu	0,6018pu	0,0175pu
Ângulo θ	0,0000 ⁰	-0,0009 ⁰	-0,0282 ⁰	0,0259 ⁰

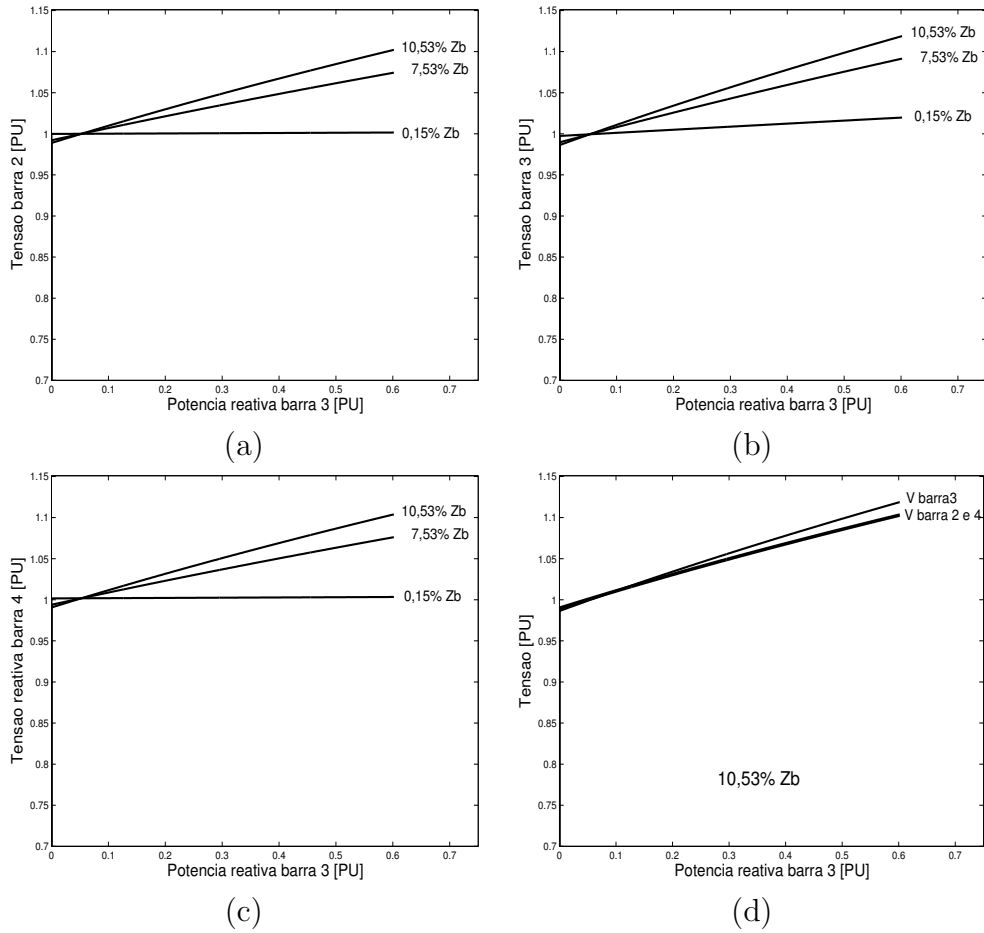


Figura 3.10: Comportamento da tensão nas barras em função da variação da potência reativa na barra 3 e da impedância da barra 1 para 2.

- (a) - Potência reativa barra 3 \times Tensões barra 2;
- (b) - Potência reativa barra 3 \times Tensões barra 3;
- (c) - Potência reativa barra 3 \times Tensões barra 4;
- (d) - Potência reativa barra 3 \times Tensão nas barras de carga.

3.6.2 Redução da tensão nas barras de carga

De forma análoga à regulação da tensão para ensaio do transformador em sobretensão, a bancada permite realizar o ensaio para tensão abaixo da nominal. O conversor não apenas permite elevar a tensão, mas também permite reduzir a tensão, bastando para isto mudar o sentido do fluxo de reativo. O sistema do conversor que estava fornecendo potência reativa passa a consumir potência reativa, baixando a tensão no transformador em teste.

A Figura 3.11 mostra o comportamento da tensão nas barras de carga quando-se mantém as potências ativas das barras 3 e 4 constante e altera-se a potência reativa da barra 3 e a impedância da rede entre as barras 1 e 2. As potência ativa e reativa da barra 3 possuem o mesmo sentido, ou seja o conversor está fornecendo potências ativa e reativa ao sistema. A potência reativa aplicada na barra 4 é zero e a potência ativa igual a 1pu.

A tensão nas barras de carga não apresenta uma redução significativa quando se variou a potência reativa e se manteve a impedância entre as barras 1 e 2 constante, 0,15% de Z_{base} . Para injeção de 0,6pu de potência reativa e impedância de 7,53% de Z_{base} a queda de tensão obtida é aproximadamente 10%. É observado na Figura 3.11d e na Tabela 3.2 que para uma potência reativa de 0,6pu e impedância entre as barras de 10,53% de Z_{base} , é obtida uma redução da tensão nas barras de aproximadamente 20%.

Pode-se concluir com tal análise que o valor da impedância inserida na entrada do sistema buscando elevar a tensão é suficiente para reduzir a tensão ao valor necessário para o ensaio o transformador com tensão abaixo da nominal.

Tabela 3.2: Variáveis calculadas na simulação.

<i>variável</i>	<i>barra 1</i>	<i>barra2</i>	<i>barra3</i>	<i>barra4</i>
tensão	1.0000pu	0.8205pu	0.7904pu	0.8223pu
Potência ativa	0.0068pu	0,0000pu	-0.9998pu	0.9998pu
Potência reativa	0.8681pu	0.0000pu	-0.6018pu	0.0175pu
Ângulo θ	0,0000 ⁰	-0.0016 ⁰	-0.0538 ⁰	0.0502 ⁰

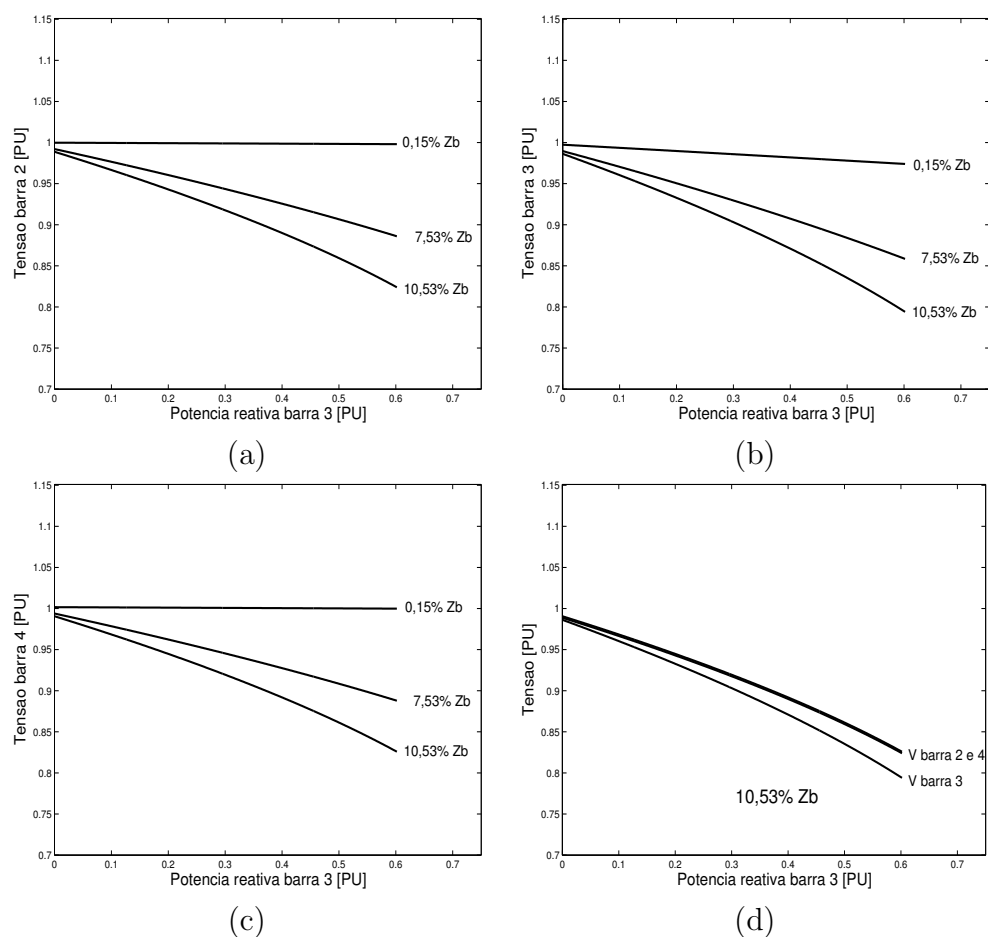


Figura 3.11: Comportamento da tensão nas barras em função da variação da potência reativa na barra 3 e da impedância da barra 1 para 2.

(a) - Potência reativa barra 3 \times Tensões barra 2;

(b) - Potência reativa barra 3 \times Tensões barra 3;

(c) - Potência reativa barra 3 \times Tensões barra 4;

(d) - Potência reativa barra 3 \times Tensão nas barras de carga.

3.7 Comentários Finais

A análise para regulação de tensão, da mesma forma que em Sistemas Elétricos de Potência, pode ser usada para análise de conversores estáticos conectados a uma barra infinita, servindo como uma importante ferramenta para as questões de projeto da bancada. Os resultados de simulação apresentados neste capítulo mostram a viabilidade da regulação de tensão na bancada para ensaio do transformador através do controle do fluxo de reativo.

Aplicando-se o método de Newton foi possível quantificar o valor da potência reativa necessária para regular a tensão nas barras desejadas. Para elevar a tensão no sistema é preciso diminuir a potência de curto circuito da rede de alimentação, aumentando-se a impedância entre as barras 1 e 2. A impedância inserida deve ser 10,53% de Z_{base} e o fluxo de reativo em módulo 0,6pu.

A tensão no transformador em teste, para o sistema do conversor fornecendo potência ativa e consumindo potência reativa, teve um aumento maior que 10% para injeção de 0,6pu reativo e impedância de 10,53% de Z_{base} . Para o sistema do conversor fornecendo potência ativa e reativa e as mesmas características de injeção de reativo e impedância inserida, a redução da tensão foi próxima de 20%, atendendo às necessidades de ensaio de 10%. Os conversores foram considerados fontes ideais, ou seja, capazes de reproduzir instantaneamente na saída os valores de referência. Foram desprezadas as perdas nos conversores.

Projeto da Bancada de Testes

4.1 Introdução

A estrutura de potência utilizada neste trabalho é apresentada na Figura 4.1. A configuração dos conversores envolvidos é formada por duas pontes conversoras trifásicas de 6 pulsos a IGBT's e um banco de capacitores no circuito intermediário, constituindo o barramento CC. Através do controle do chaveamento das pontes de IGBT's é possível fazer a transferência de potência em ambas as direções.

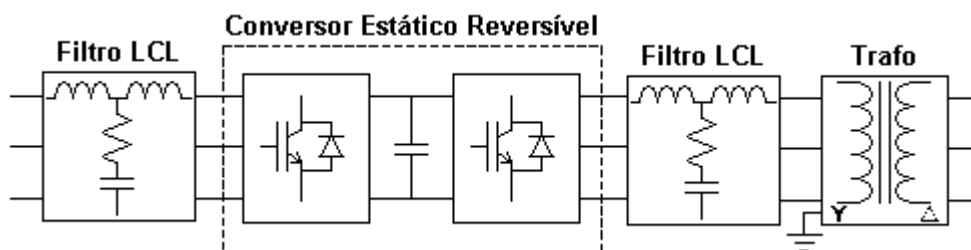


Figura 4.1: Estrutura de potência da bancada de testes de transformadores.

A utilização de um retificador controlado se justifica pelo fato de possibilitar o controle do fluxo de potência ativa injetada no barramento CC e o controle independente da potência reativa, permitindo regular a tensão no transformador em teste como discutido no capítulo anterior. A utilização de um retificador não controlado tornaria o circuito unidirecional, não permitindo a regulação da tensão através a injeção de reativo no sistema. O conversor estático reversível permite o controle independente da potência ativa e reativa, em ambas as direções do fluxo de potência, permitindo a

implementação de perfis de carga e tensão no transformador em teste, compatíveis com os objetivos de análise deste trabalho.

Para o controle dos fluxos de potências ativa e reativa, é implementado um controle interno linear de corrente para os conversores. Os fluxos de potências nos conversores é definida através da modulação por largura de pulso (*PWM*), sendo a saída das malhas de controle os valores de referência de tensão a serem sintetizados pelo conversor. Esta técnica de chaveamento, onde a amplitude dos pulsos é constante e a largura variável tem como objetivo gerar sinais modulados por largura de pulso para o controle do conversor, partindo de informações sobre as razões cíclicas de cada fase. Estes sinais de controle serão enviados ao circuito de comando para acionamento dos IGBT's.

Devido a modulação por largura de pulso, o conteúdo harmônico produzido nos conversores é de ordem elevada, múltiplos da frequência de chaveamento. Diante da alta frequência de chaveamento, existe uma maior facilidade na filtragem. No diagrama esquemático da estrutura de potência da bancada pode-se verificar a existência de dois filtros LCL. Os filtros têm como objetivo assegurar uma redução dos harmônicos múltiplos da frequência de chaveamento dos conversores e ao mesmo tempo, obter um conversor com melhor desempenho.

4.2 Descrição da Bancada

A Figura 4.2 apresenta o diagrama esquemático da bancada. O conversor do lado da rede (CLR) controla a potência injetada no barramento CC, buscando manter a tensão CC constante, independente do fluxo de potência ativa e a tensão de excitação aplicada no primário do trafo em teste. O conversor do lado do transformador (CLT) controla o carregamento do trafo em teste, ou seja, as potências ativa e reativa que fluem sobre ele. A regulação da tensão CA para ensaio do transformador em situação de sobreexcitação é realizada pelo conversor do lado da rede, através do módulo e sentido do fluxo de potência reativa.

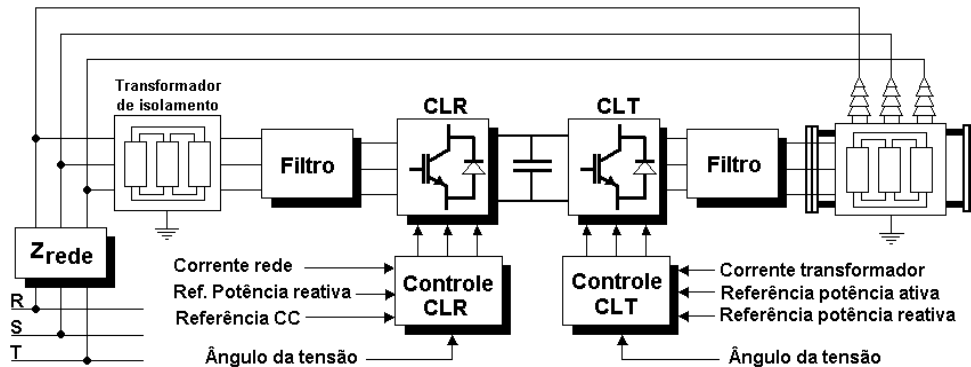


Figura 4.2: Diagrama esquemático da bancada para ensaio de transformadores.

O controle do conversor do lado da rede possui quatro malhas de controle e uma de compensação, sendo:

- malha de controle de corrente de eixo direto;
- malha de controle de corrente de eixo em quadratura;
- malha de controle de tensão do barramento CC;
- malha de controle de potência reativa;
- malha de compensação de corrente de seqüência zero.

A malha de controle de corrente de eixo direto é interna a malha de controle de tensão do barramento CC. Externa a malha de controle de corrente de eixo em quadratura tem-se a malha de controle de potência reativa. Devido a existência de um caminho para corrente de seqüência zero, uma malha de compensação de corrente de seqüência zero é colocada para compensar esta componente.

As malhas de controle de corrente do conversor do lado do transformador em teste são iguais às malhas de controle de corrente do conversor do lado da rede. A única mudança no controle do conversor do lado do transformador é a malha de controle de potência ativa externa a malha de corrente de eixo direto, que permite o controle do carregamento do transformador em teste.

Os filtros LCL's possuem características construtivas extremamente semelhantes, tendo em vista que os transformadores não devem apresentar

parâmetros distintos, sendo compostos por uma indutância L_1 e R_1 do lado do conversor, uma indutância L_f e R_f do lado do transformador e um capacitor C_f em série com o resistor de amortecimento R_d . Do lado do CLR o transformador isolador faz a ligação entre a rede elétrica e o filtro 1. O transformador sobre ensaio é ligado ao CLT através do filtro 2.

4.3 Projeto do Filtro LCL

O objetivo do filtro LCL é assegurar uma redução dos harmônicos causados devido à ação de chaveamento dos conversores, possuindo grande importância no desempenho do sistema como um todo. Este filtro não permite que o conversor polua o transformador com harmônicos, o que afetaria a quantidade de perdas, gerando maior aquecimento, problemas aos dielétricos, perda de vida útil, distorcendo os resultados dos ensaios que serão implementados na bancada.

O filtro LCL é uma estrutura com dois indutores em série e um capacitor em derivação no meio destes indutores como ilustra a Figura 4.3, e é dimensionado para atenuar os harmônicos múltiplos da frequência de chaveamento utilizada.

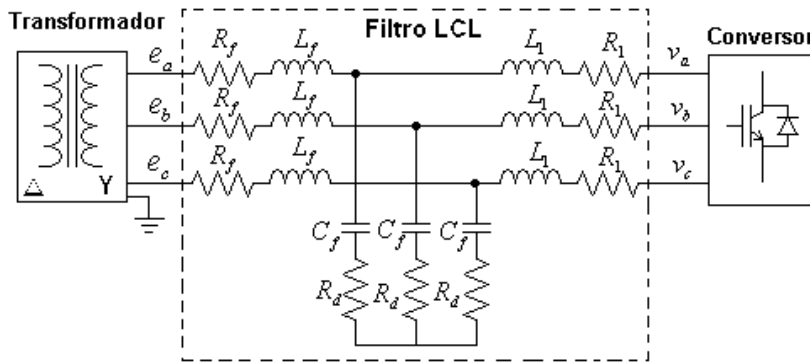


Figura 4.3: Estrutura do filtro LCL com amortecimento passivo.

Devido ao chaveamento dos dispositivos semicondutores, harmônicos de ordem elevada são injetados no sistema ao qual o conversor está conectado. Para reduzir os harmônicos de corrente próximo da frequência de chaveamento, normalmente um filtro RL é utilizado. A redução dos harmônicos

tem como objetivo estar em conformidade com os procedimentos da norma NBR5356 (2003) de ensaio de transformador e o guia IEEE-519-1992 (1993), que atualmente são os documentos de referência para estudo e análise da qualidade de energia em sistemas de potência. Os valores elevados de indutância podem conseguir este objetivo, entretanto, o indutor fica volumoso, caro e limita a dinâmica do conversor.

Uma possível solução, para os problemas encontrados com a utilização do filtro RL, é utilizar um filtro LCL. Ao se projetar um filtro LCL, deve-se considerar a necessidade de se manter o fator de potência próximo do unitário, considerar possível ressonância e perdas devido ao amortecimento passivo. O filtro LCL está conectado a um transformador, sendo assim a indutância e a resistência do transformador devem ser consideradas no projeto do filtro.

Uma grande dificuldade em relação a essa topologia de filtro é o critério utilizado na escolha dos parâmetros. O procedimento utilizado para o projeto do filtro neste trabalho se baseou nas publicações de Liserre et al. (2001), Blaabjerg et al. (2003), Malinowski and Bernet (2004). A escolha dos parâmetros do filtro mostrado na Figura 4.3 é parte fundamental para o bom desempenho da estratégia de controle adotada, visto que os ganhos dos controladores serão calculados em função dos elementos do filtro.

O filtro representa um importante elemento na transferência de potência, bem como proporciona bons padrões de qualidade da energia elétrica. Considerando que o comportamento do filtro pode ser representado pelo diagrama em blocos apresentado na Figura 4.4, pode-se chegar à função de transferência que relaciona corrente e tensão na entrada do conversor, dada por (Teodorescu et al. (2003)):

$$G(s) = \frac{i(s)}{v(s)} = \frac{L_f C_f s^2 + R_d C_f s + 1}{L L_f C_f s^3 + (L R_d C_f + L_f R_d C_f) s^2 + (L_f + L) s} \quad (4.1)$$

A função de transferência que relaciona corrente do sistema elétrico e a tensão na entrada do conversor é:

$$G(s) = \frac{i_g(s)}{v(s)} = \frac{R_d C_f s + 1}{L_f L C_f s^3 + C_f R_d L s^2 + L s} \quad (4.2)$$

A função de transferência entre a corrente do sistema elétrico e a corrente na entrada do conversor é:

$$G_1(s) = \frac{i_g(s)}{i(s)} = \frac{C_f R_d s + 1}{LC_f s^2 + C_f R_d s + 1} \quad (4.3)$$

As funções de transferência 4.1, 4.2 e 4.3 serão utilizadas para analisar a resposta em frequência do filtro e estudar o comportamento dos pólos e zeros do filtro em relação ao amortecimento passivo. A utilização de um amortecimento passivo para reduzir a frequência de ressonância do filtro, evitando ressonância nas mais baixas e altas frequências, provoca uma alteração na posição dos pólos e zeros do sistema.

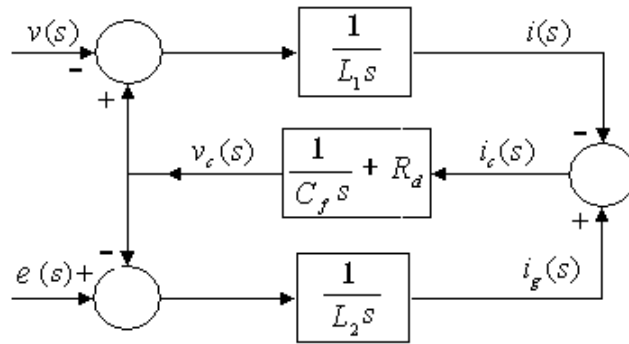


Figura 4.4: Diagrama em blocos do filtro LCL.

Os indutores do filtro devem ser corretamente projetados considerando o ripple de corrente admissível, o transformador mais próximo da conexão com a rede e a frequência de ressonância do filtro. A norma IEEE-519-1992 (1993) recomenda que a corrente de ripple máximo admissível não deve exceder 3,5%.

De acordo com Liserre et al. (2001) ao se projetar o filtro LCL alguns limites nos parâmetros devem ser introduzidos a fim de se obter melhor desempenho como:

- o valor do capacitor está limitado pela potência reativa máxima que circula no sistema (geralmente deve ser inferior a 5%);

- o valor total da indutância deve ser limitado a fim de reduzir a perda de tensão durante operação;
- a frequência de ressonância deve estar dentro de uma faixa que não crie problemas de ressonância nas mais baixas e mais altas frequências, isto é, entre dez vezes a frequência da rede, f_n , e a metade da frequência de chaveamento, f_s , ($10f_n < f_{res.} < 1/2f_s$);
- o valor do resistor R_d deve ser otimizado, levando em consideração a resposta dinâmica do filtro, a frequência de ressonância e as perdas geradas em baixa frequência.

A escolha dos parâmetros do filtro é dependente da potência do conversor (P_n), da tensão nominal eficaz do filtro (e), da frequência da rede (f_n), da frequência angular de rede (w_n) e da frequência de chaveamento do conversor (f_s). Assim, os valores do filtro serão normalizados em relação aos seguintes valores base (Liserre et al., 2001):

$$Z_b = \frac{e^2}{P_n} \quad (4.4)$$

$$C_b = \frac{1}{w_n Z_b} \quad (4.5)$$

A atenuação dos harmônicos de corrente injetados pelo conversor pode ser calculada por:

$$\frac{i_g(h_s)}{i(h_s)} = \frac{Z_{LC}^2}{|w_{res}^2 - w_s^2|} \quad (4.6)$$

onde:

- w_{res} - frequência angular de ressonância;
- w_s - frequência angular de chaveamento;
- h_s - ordem harmônica na frequência de chaveamento.

O indutor L_1 do filtro será calculado em função da corrente de ripple máxima admissível que pode ser obtido por (Malinowski and Bernet, 2004):

$$L_1 = \frac{e}{2\sqrt{6}f_s i_{ripple}} \quad (4.7)$$

O valor do indutor do filtro do lado do conversor L_f , é relacionado ao indutor L_1 através do parâmetro r , estimado através da equação de atenuação de corrente. O valor do capacitor do filtro esta limitado pela potência reativa que circula do sistema, através do parâmetro x ($x = 5\%$).

$$L_f = rL_1 \quad (4.8)$$

$$C_f = xC_b \quad (4.9)$$

$$C_f = 0.05 \frac{P_n}{2\pi f_n e^2} \quad (4.10)$$

O valor de r é escolhido através da equação de atenuação de corrente em função dos parâmetros calculados.

$$\frac{i_g(h_s)}{i(h_s)} = \frac{1}{|1 + r(1 - ax)|} \quad (4.11)$$

sendo $a = L_1 C_b \omega_s^2$.

Normalmente, o valor escolhido de atenuação por questões práticas é 20%, encontrando assim o valor de r (Liserre et al., 2001).

A frequência de ressonância do filtro é obtida pela expressão 4.12 e é imprescindível avaliar se este se encontra na faixa estabelecida anteriormente ($10f_n < f_{res.} < 1/2f_s$).

$$w_{res} = \sqrt{\frac{L_1 + L_f}{L_1 L_f C_f}} \quad (4.12)$$

O valor do resistor de amortecimento R_d inicialmente é definido igual ao dobro da impedância do capacitor na frequência de ressonância (Liserre et al. (2001)).

Após o projeto do filtro verificam-se as perdas, a atenuação e a frequência de ressonância e implementam-se as modificações necessárias para bom desempenho do sistema. É necessário que a distorção harmônica esteja dentro da faixa recomendadas pelas normas e guias.

A Figura 4.5 apresenta a função da atenuação harmônicos na frequência de chaveamento com o fator r . Como sugerido por Liserre et al. (2001), deve-se buscar uma atenuação de 20%, o que nos conduzirá a um valor de $r = 0,1$.

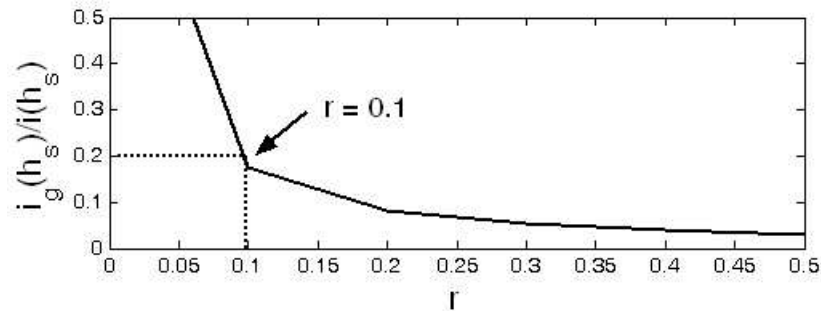


Figura 4.5: Curva de atenuação da corrente injetada pelo filtro LCL.

A Figura 4.6 apresenta o lugar das raízes da função de transferência do filtro LCL. Da análise do lado direito do plano Z está claro que o sistema está próximo da borda da região de instabilidade, se o amortecimento não é adotado ($R_d = 0\Omega$). Se um amortecimento igual ao dobro da impedância do capacitor na frequência de ressonância é adotado então o sistema fica mais estável ($R_d = 3,6\Omega$). À medida que o valor do resistor de amortecimento é aumentado, o sistema fica com um coeficiente de amortecimento maior, diminuindo o nível de oscilação, porém as perdas em baixa frequência no filtro são aumentadas e a resposta dinâmica alterada.

As Figuras 4.7 e 4.8 ilustram a resposta em frequência do filtro LCL, através das funções de transferência apresentadas. É observado que, R_d maior possibilita elevar o amortecimento, porém, após a frequência de corte do filtro tende a reduzir a atenuação. Deve-se buscar otimizar o valor do resistor,

levando-se em consideração a resposta dinâmica do filtro, a ressonância e as perdas geradas. É sugerido em Liserre et al. (2001) como valor ótimo, um resistor igual ao dobro da impedância do capacitor na frequência de ressonância.

Pode-se verificar nas Figuras 4.7 e 4.8, na frequência de ressonância do filtro, o efeito do amortecimento passivo, reduzindo o ganho e garantindo a atenuação dos harmônicos na frequência de chaveamento. Inicialmente tem-se uma queda de 20db/dec. e após a frequência de corte 60db/dec. caso não seja utilizado o resistor de amortecimento. Com o resistor de amortecimento igual $3,6\Omega$ a atenuação em baixa frequência não será alterada, o filtro comporta como um indutor, porém após a frequência de corte ela irá mudar para aproximadamente 40db/dec. mudando a resposta dinâmica inicial do filtro.

O valor do resistor adotado no filtro é de $3,6\Omega$, visto que, com este valor o ganho na frequência de ressonância foi amortecido, estando dentro da faixa recomendada e a redução da atenuação de 60db/dec. para aproximadamente 40db/dec. após a frequência de corte, não irá comprometer a resposta do filtro. O resistor foi calculado segundo recomendações de Liserre et al. (2001).

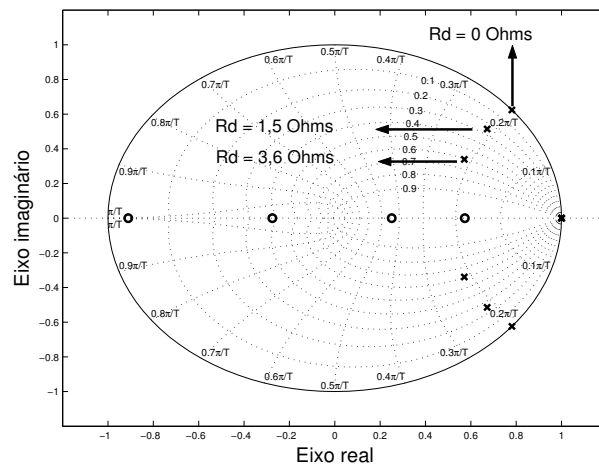


Figura 4.6: Lugar das raízes obtido da função de transferência do filtro LCL projetado (função transferência 4.1).

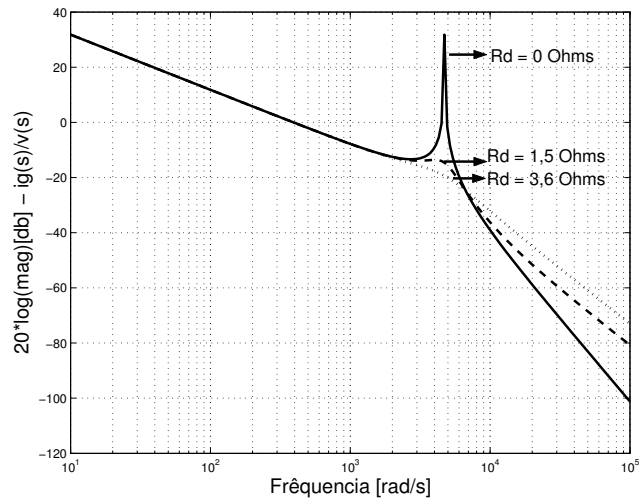


Figura 4.7: Diagrama de Bode para a fun\u00e7\u00e3o de transfer\u00eancia entre a corrente da rede e a tens\u00e3o no conversor (fun\u00e7\u00e3o transfer\u00eancia 4.2).

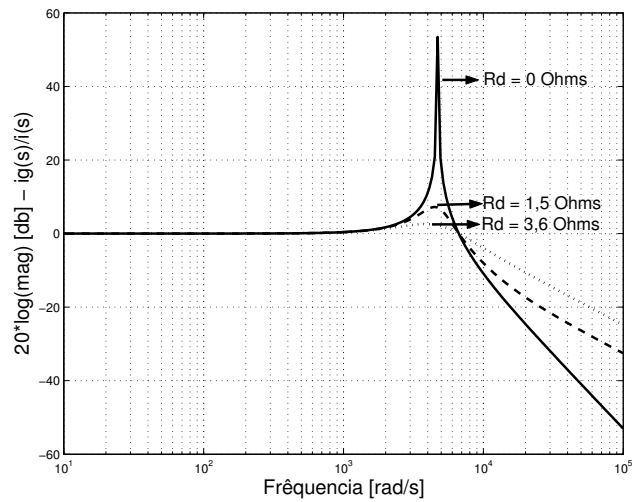


Figura 4.8: Diagrama de Bode para a fun\u00e7\u00e3o de transfer\u00eancia entre a corrente rede e a corrente do conversor (fun\u00e7\u00e3o transfer\u00eancia 4.3).

4.4 Projeto do Capacitor do Barramento CC

O capacitor do barramento CC deve ser projetado para suportar as variações de tensão que são provocadas pela demanda de potência de saída solicitadas pelo conversor do lado do transformador em teste. Os atrasos das malhas de corrente de eixo direto e em quadratura também devem ser considerados de forma que a tensão não ultrapasse os limites mínimos e máximos de tensão do capacitor especificado.

No projeto do capacitor se faz necessário conhecer a máxima variação de tensão no barramento CC (ΔE), a máxima variação esperada de potência de saída (ΔP), e o tempo de resposta da malha de controle de tensão (T_E), (Malesani et al., 1995). O valor do capacitor é obtido por:

$$C \geq \frac{T_E \Delta P}{2E \Delta E} \quad (4.13)$$

Considerando o atraso na modulação PWM no conversor do lado da rede, associado com a frequência de chaveamento de $5kHz$, temos $T_E = 5ms$. A tensão no barramento CC necessária para alimentar o conversor do lado do transformador sob ensaio é de $500V$, sendo a máxima variação de tensão no barramento igual a 3% do valor nominal, $15V$. Para um fluxo de potência no conversor de 120% da potência nominal do transformador sob teste, sendo a potência deste transformador $P_n = 25kVA$, obtém-se uma variação de potência de saída é igual $30kVA$.

A partir destes valores o capacitor calculado do barramento CC é:

$$C_{\min} = \frac{(0,005 * 30,000)}{2 * 500 * 15} = 10mF \quad (4.14)$$

4.5 Estratégia de Controle dos conversores

A Figura 4.9 ilustra a conexão do conversor ligado à rede, apresentando a estrutura do filtro LCL. Para fins de análise da estrutura, a tensão no secundário do transformador será chamada de $e(t)$ e na entrada do conversor de $v(t)$.

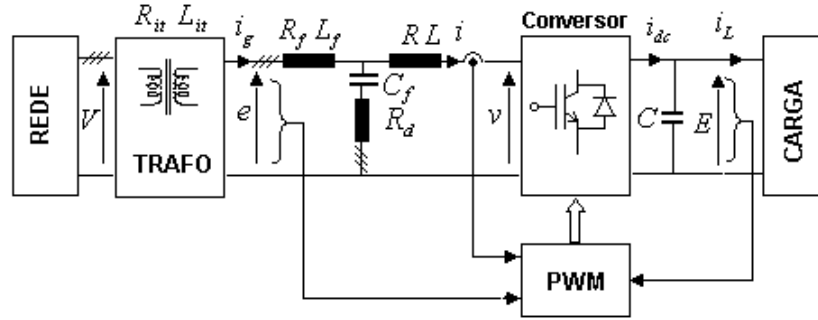


Figura 4.9: Estrutura do filtro LCL conectado ao conversor do lado da rede.

Considerando que o filtro é aproximadamente um indutor na frequência fundamental do sistema, aplicando-se os conceitos de vetores, obtém-se a equação que representa o lado CA do conversor do lado da rede.

$$\vec{V} = R \vec{i} + L \frac{d}{dt} \vec{i} + j\omega L \vec{i} + \vec{v} \quad (4.15)$$

onde $L = L_1 + L_f$ e $R = R_1 + R_f$

Escrevendo-se a equação 4.15 em coordenadas cartesianas dq obtém-se duas equações de tensão que permitem controlar as duas componentes de corrente de eixo direto e de eixo em quadratura em referencial síncrono.

$$e_d = Ri_d + L \frac{d}{dt} i_d - \omega L i_q + v_d \quad (4.16)$$

$$e_q = Ri_q + L \frac{d}{dt} i_q + \omega L i_d + v_q \quad (4.17)$$

Como pode ser observado nas equações 4.16 e 4.17, as correntes de eixos dq estão acopladas pelos termos cruzados $\omega L i_q$ e $\omega L i_d$. A fim de se obter um controle de corrente com elevado desempenho dinâmico, estes termos de acoplamento devem ser compensados por ação direta, tornando assim a variável de eixo direto independente a variável de eixo em quadratura.

O capacitor do barramento CC foi projetado para suprir a demanda da potência de saída durante o atraso da malha de controle de tensão CC. Para

o controle da tensão do barramento CC, uma vez definida a corrente no barramento CC i_L , a tensão de alimentação E e a corrente do conversor i_{dc} , a equação de tensão no capacitor pode ser representada por:

$$C \frac{d}{dt} E = i_{dc} - i_L \quad (4.18)$$

A equação 4.18 representa a dinâmica da tensão no barramento CC, representando o balanço de potência entre o conversor da rede e o conversor conectado ao transformador em teste.

4.5.1 Estrutura de controle dos conversores

No controle do conversor do lado da rede, a orientação em coordenadas dq tem como características, a tensão de eixo q igual a zero ($e_q = 0$) e a tensão de eixo d será constante e igual à amplitude da tensão na rede ($e_d = |\vec{e}|$), simplificando a realização do controle do conversor. O eixo direto é alinhado com o vetor tensão, girando em sincronismo com a rede ($\omega = \omega_e$). A Figura 4.10 mostra uma representação das variáveis do sistema operando em sincronismo com a rede.

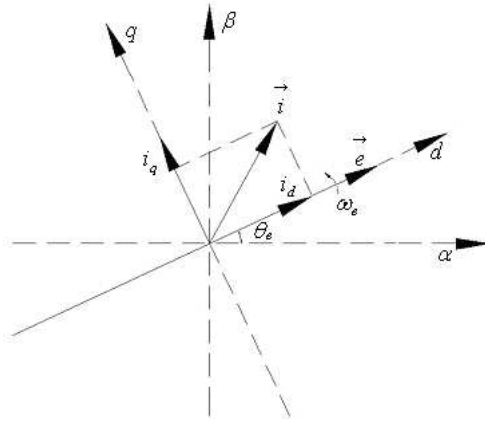


Figura 4.10: Representação dos eixos coordenados para orientação em referencial síncrono, orientado pela tensão da rede.

Considerando que os termos de acoplamento das equações de tensão de eixos dq foram compensados e a orientação escolhida, $\vec{e} = e_d + j0$, os fluxos de potência ativa e reativa que circulam pelo conversor podem ser controlados pelas correntes de eixo direto e em quadratura respectivamente, como ilustram as equações 4.19 e 4.20.

$$P = \frac{3}{2}e_d i_d \quad (4.19)$$

$$Q = -\frac{3}{2}e_d i_q \quad (4.20)$$

Através da equação 4.19 e 4.20 é verificado que o controle da potência ativa pode ser feito através da componente de corrente de eixo direto, i_d , ao passo que a potência reativa pode ser feita igual a zero, anulando-se a componente de quadratura, i_q .

4.6 Malha de Controle do Conversor da Rede

A Figura 4.11 mostra a estrutura para o controle de corrente do conversor do lado da rede. Nesta estrutura, o erro de tensão gerado através da comparação da tensão desejada no barramento CC com o valor medido, passa por um controlador PI, para gerar um valor de referência, i_d^* , para a componente de eixo direto da corrente. A referência da componente de eixo em quadratura, i_q^* , é definida em função do valor fluxo de reativo necessário para regular a tensão no transformador sobre teste. Externa à malha de corrente i_q , é inserido a malha de potência, onde o erro de potência reativa é alimentado a um controlador PI para gerar o valor de referência para a componente de eixo em quadratura de corrente. A referência de corrente de seqüência zero, i_0^* , é feita igual a zero para compensar a componente de seqüência zero que circula no sistema.

As tensões da rede, ABC , são transformadas nas componentes estacionárias, e_α e e_β , e em seguida, é calculado o ângulo do vetor tensão (θ_e), como mostra a equação 4.21. O ângulo do vetor tensão da rede é utilizado para a orientação do sistema de eixos.

$$\theta_e = \arctan \frac{e_\beta}{e_\alpha} \quad (4.21)$$

Os sinais medidos de corrente são transformados em correntes de eixos estacionários, e posteriormente, utilizando o ângulo do vetor tensão da rede como referência, em coordenadas $dq0$ girando em sincronismo com a rede. Estes sinais são realimentados aos controladores, gerando as referências de tensão, v_d^* , v_q^* e v_0^* . Os sinais de referências de tensão são transformados primeiramente em v_α^* e v_β^* e em seguida são transformados em v_a^* , v_b^* , v_c^* e sintetizados pelo modulador PWM senoidal.

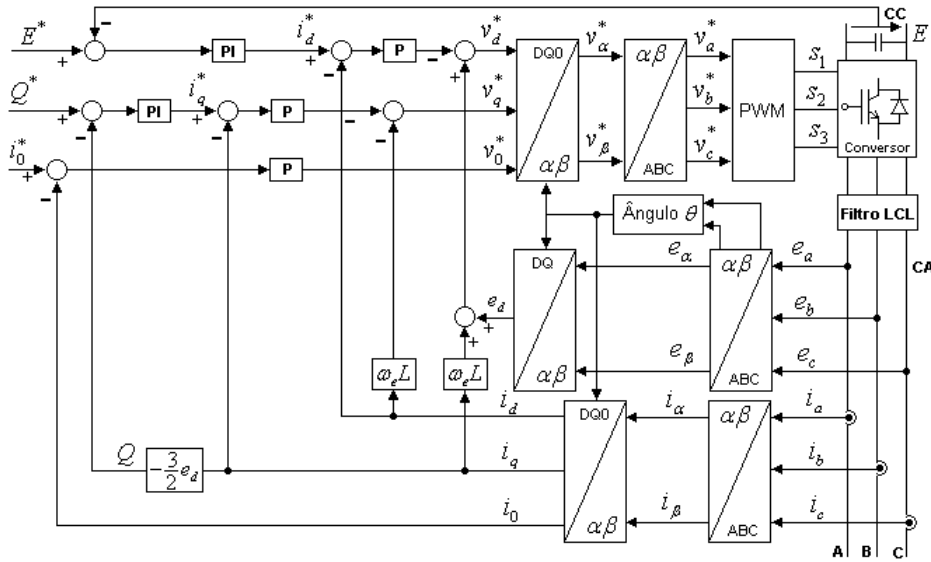


Figura 4.11: Diagrama em blocos da malha de controle do CLR.

O conversor do lado da rede possui duas malhas internas de corrente, i_d e i_q e duas malhas externas, sendo uma de tensão no barramento CC e a outra de potência reativa. Pode-se verificar na Figura 4.11 que nas malhas internas de corrente de eixo direto e em quadratura foram utilizados somente controladores com ganho proporcional (P), tendo em vista a presença da ação integral na malha externa. A malha de controle de tensão no barramento CC e a malha de controle da potência reativa possuem um controlador proporcional e integral (PI). Os controladores do sistema foram projetados através da técnica de alocação de pólos.

4.6.1 Malha de controle de corrente

Das equações dinâmicas de tensão 4.16 e 4.17 obtém-se a função de transferência de primeira ordem entre a corrente e a tensão de eixo direto e em quadratura. A função de transferência para o eixo em quadratura é análoga a função de transferência para eixo direto. O projeto das malhas de controle foi realizado considerando o desacoplamento entre as duas equações.

$$G(s) = \frac{i_d(s)}{v_d(s)} = \frac{i_q(s)}{v_q(s)} = \frac{1}{Ls + R} \quad (4.22)$$

As Figuras 4.12 e 4.13 apresentam as malhas de controle e eixo d e q respectivamente: É verificado que o desacoplamento foi realizado pelas adição das estimativas de $\hat{w}_e \hat{L} \hat{i}_d$ e $\hat{w}_e \hat{L} \hat{i}_q$. Como mencionado anteriormente, a orientação do controle na tensão da rede produz $e_q = 0$.

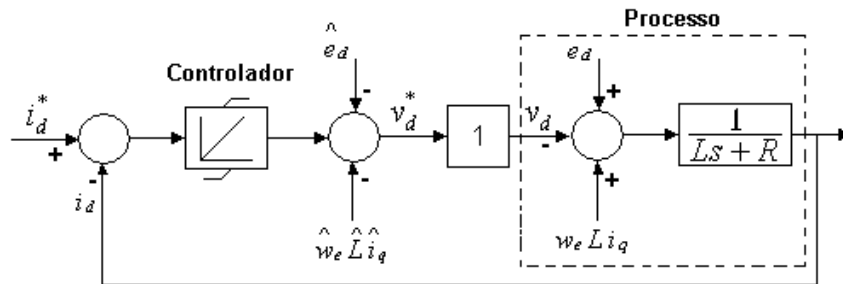


Figura 4.12: Malha de controle de corrente de eixo direto.

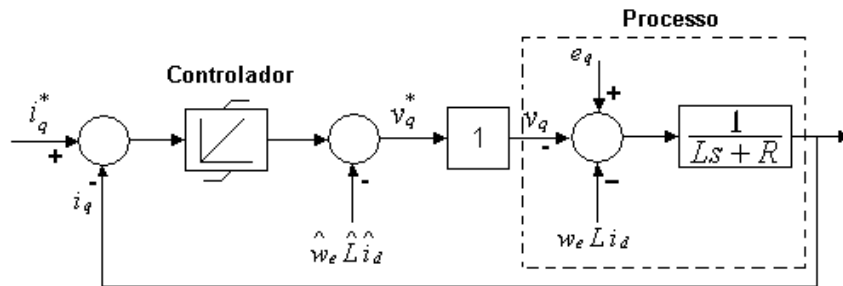


Figura 4.13: Malha de controle de corrente de eixo em quadratura.

Fechando-se a malha obtém a função de transferência que permite calcular o ganho proporcional da malha de corrente de eixo direto e quadratura.

A frequência de passagem para as malhas de corrente é definida em $2kHz$, valor este dez vezes maior que a frequência de passagem da malha externa de tensão e potência reativa. Esta frequência garante uma dinâmica de corrente rápida comparada com a dinâmica das malhas externas, (Silva, 1999). A faixa de passagem da malha de corrente é limitada pela faixa de passagem do conversor.

$$G(s) = \frac{i_d(s)}{i_d^*(s)} = \frac{K_{pid}}{Ls + (K_{pid} + R)} \quad (4.23)$$

Aplicando-se a técnica de alocação de pólos, o ganho pode ser obtido por:

$$K_{pid} = 2\pi f_c L - R \quad (4.24)$$

sendo:

- L - indutância do filtro;
- R - resistência do filtro;
- f_c - frequência de passagem da malha de corrente.

A malha de controle de corrente de eixo em quadratura difere da de eixo direto somente pelos termos que foram compensados, sendo, portanto os ganhos K_{pid} e K_{piq} os mesmos.

4.6.2 Malha de controle de tensão do barramento CC

O barramento CC fornece tensão contínua para a operação do conversor do lado do transformador (CLT). A malha de controle de corrente de eixo direto é interna a malha de tensão, podendo ser representada por um ganho de corrente do conversor (G_{conv}), sendo este obtido por:

$$G_{conv} = \frac{i_{dc}}{i_d} \quad (4.25)$$

Considerando-se nula as perdas internas do conversor, podem-se escrever as seguintes relações de potência ativa do sistema:

$$P = \frac{3}{2} e_d i_d = E i_{dc} \quad (4.26)$$

e sendo assim tem-se:

$$G_{conv} = \frac{i_{dc}}{i_d} = \frac{3 e_d}{2 E} = \frac{3}{2} \left| \frac{\vec{e}}{E} \right| \quad (4.27)$$

Da equação dinâmica do barramento CC temos a função de transferência que relaciona a saída de tensão no capacitor (E) e a corrente no capacitor (i_{dc}):

$$G_p(s) = \frac{E(s)}{i_{dc}(s)} = \frac{1}{Cs} \quad (4.28)$$

O diagrama em blocos do controle da tensão no capacitor do barramento CC é apresentado na Figura 4.14. Neste modelo, a dinâmica da malha interna de corrente é desprezada por ser muito mais rápida que as demais dinâmicas envolvidas. Esta dinâmica rápida é obtida ao impor uma frequência de passagem da malha de corrente dez vezes maior que a frequência de passagem da malha de tensão.

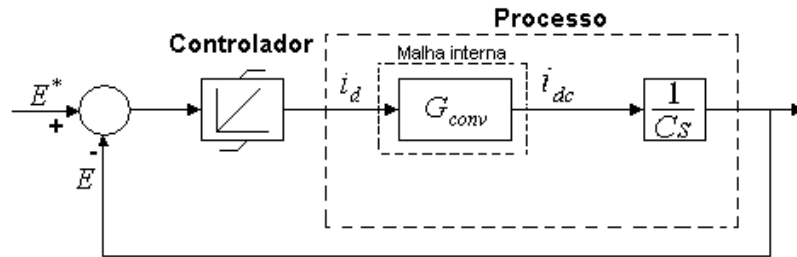


Figura 4.14: Malha de controle de tensão no barramento CC.

A função de transferência de malha fechada pode ser obtida e então é possível calcular o ganho proporcional K_{pE} e integral K_{iE} do controlador de tensão CC.

$$G_s(s) = \frac{E(s)}{E^*(s)} = \frac{K_{pE}s + K_{iE}}{Cs^2 + K_{pE}s + K_{iE}} \quad (4.29)$$

Utilizando-se a técnica de alocação de pólos e igualando o denominador ao polinômio característico típico para um sistema dinâmico de 2ª ordem com duas raízes reais obtêm-se os valores dos ganhos. Os ganhos podem ser dados em função da frequência de passagem das malhas por:

$$K_{pE} = 2\pi(f_{c1} + f_{c2})C \quad (4.30)$$

$$K_{iE} = 4\pi^2 f_{c1}f_{c2}C \quad (4.31)$$

sendo:

- C - valor do capacitor do barramento CC;
- f_{c1} - frequência de passagem para o ganho proporcional;
- f_{c2} - frequência de passagem para o ganho integral.

A frequência de passagem para o cálculo do ganho proporcional é definida dez vez menor que a frequência de passagem da malha de corrente ($f_{c1} = 200Hz$) e para o cálculo do ganho integral a frequência é definida dez vez menor que a frequência de ganho proporcional ($f_{c2} = 20Hz$).

4.6.3 Malha de controle de potência reativa

A potência reativa é controlada diretamente pela corrente de eixo em quadratura (i_q) do transformador isolador, como sugere a equação 4.20. Assim, para o controle da potência reativa em malha fechada, é colocada externa à malha de corrente i_q uma malha de controle de reativo. A malha externa de controle da potência reativa fornece a referência de corrente i_q^* para a malha interna de corrente.

Para efeito de simplificação da malha de controle da potência, a malha mais interna de corrente é considerada ideal neste caso, sendo sua função

de transferência considerada unitária. Isto também pode ser justificado pelo fato da velocidade de controle da malha de corrente ser bastante superior à velocidade da malha mais externa de controle de potência. Figura 4.15 mostra a malha de controle de potência reativa.

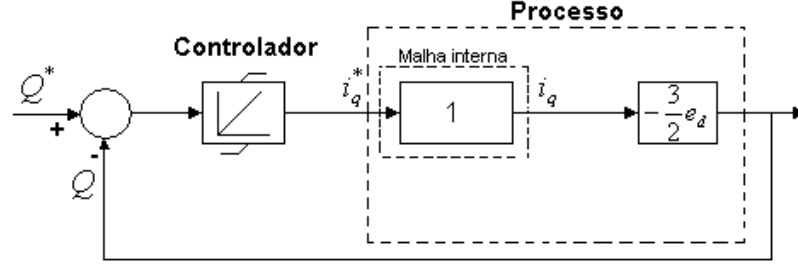


Figura 4.15: Malha de controle de potência reativa.

Fechando-se a malha temos:

$$G(s) = \frac{HK_{iQ} + K_{pQ}s}{HK_{iQ} + s(1 + HK_{pQ})} \quad (4.32)$$

sendo: $H = -\frac{3}{2}e_d$

Trabalhando a expressão, resulta em:

$$G(s) = \frac{1 + T_1s}{1 + T_2s} \quad (4.33)$$

onde: $T_1 = \frac{K_{pQ}}{K_{iQ}}$ e $T_2 = \frac{1+K_{pQ}H}{K_{iQ}H}$

Utilizando-se a técnica de alocação de pólos, obtém-se a frequência de corte do pólo e a frequência de corte do zero dado por:

$$\omega_{c1} = 2\pi \cdot f_{c1} = \frac{1}{T_1} \quad (4.34)$$

$$\omega_{c2} = 2\pi \cdot f_{c2} = \frac{1}{T_2} \quad (4.35)$$

Como técnica de projeto, definiu-se para a malha de controle de potência

frequência de corte 10 vezes menor que a frequência de corte da malha de controle de corrente ($2kHz$). Para o cálculo do ganho proporcional a frequência de corte adotada é $200Hz$ e para o ganho integral $20Hz$.

Resolvendo-se o sistema de equações obtêm-se os ganhos integral e proporcional do controlador PI

$$K_{iQ} = 2\pi f_{c1} K_{pQ} \quad (4.36)$$

$$K_{pQ} = \frac{2\pi f_{c2}}{(2\pi f_{c1} - 2\pi f_{c2})H} \quad (4.37)$$

4.6.4 Malha de compensação de corrente de sequência zero

Os transformadores que compõem o sistema são ligados em conexão ΔY devido o cancelamento do 3º harmônico e a existência do terminal de aterramento no lado de baixa tensão. Devido a presença do aterramento do lado de baixa, existe uma componente de corrente de sequência zero circulando no sistema, que deve ser compensada visando garantir a operação adequada da bancada.

A Figura 4.16 apresenta o diagrama em blocos da malha de compensação. A corrente de sequência zero (i_0) é medida, comparada com a referência (i_0^*) e forçada a zero através do controlador. Fechando-se a malha obtém-se a função de transferência para calcular o ganho proporcional da malha de corrente de sequência zero, que é análoga a função de transferência da malha de corrente de eixo d e q .

$$G(s) = \frac{i_0(s)}{i_0^*(s)} = \frac{K_{pi0}}{Ls + (K_{pi0} + R)} \quad (4.38)$$

Aplicando-se a técnica de alocação de pólos, o ganho pode ser obtido por:

$$K_{pi0} = 2\pi f_c L - R \quad (4.39)$$

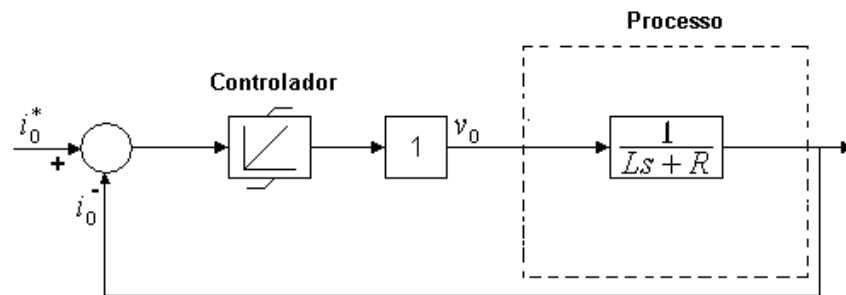


Figura 4.16: Malha de compensação da corrente de sequência zero.

4.7 Malha de Controle do Conversor do Lado do Transformador

A estrutura das malhas de controle de corrente do conversor do lado do transformador em ensaio são análogas às malhas de controle de corrente do conversor do lado da rede.

Com o objetivo de fornecer como referência o valor da potência ativa e reativa a ser aplicada no transformador sob ensaio, malhas de controle de potência são implementadas. Assim as malhas externas de controle de potência ativa e potência reativa fornecem a referência para as malhas internas de corrente, i_d^* e i_q^* , respectivamente. A malha de controle da potência reativa mostrada na Figura 4.15 para o CLR, é análoga a malha para o CLT. A malha para o controle da potência ativa é mostrado na Figura 4.17.

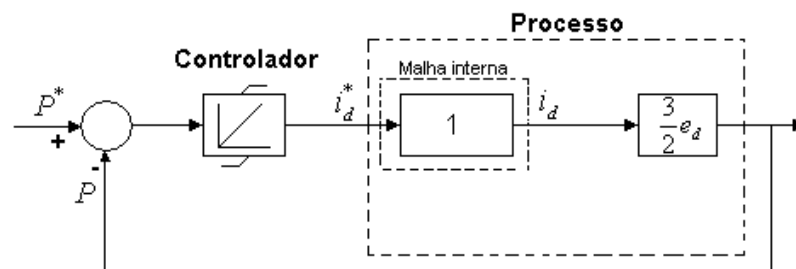


Figura 4.17: Malha de controle de potência ativa.

O diagrama em blocos da malha de controle do conversor do lado do transformador em teste, pode ser visto na Figura 4.18. Os ganhos para os controladores das malhas de corrente e potência reativa do conversor do lado do transformador são iguais aos ganhos dos controladores do conversor do lado da rede, pois os critérios de projeto são os mesmos e os parâmetros envolvidos também.

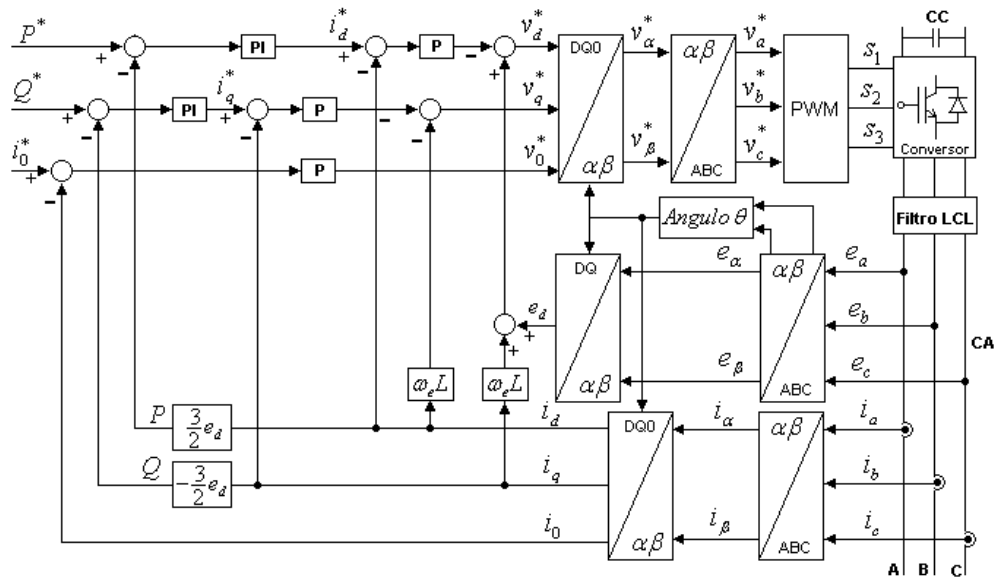


Figura 4.18: Diagrama em blocos da malha de controle do CLT.

Os limites para os controladores são definidos de acordo com os dados de potência e corrente máximas dos conversores. Os conversores foram especificados para uma potência 20% superior a potência do transformador.

4.8 Análise do Comportamento Dinâmico do Controle da bancada

Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos da simulação dinâmica do sistema, caracterizando a operação em diversas condições possíveis de acontecer na implementação prática. Os filtros LCL e os controladores das malhas de corrente e tensão foram ajustados de acordo com os valores calculados.

4.8.1 Controle do conversor do lado da rede

Os resultados mostrados têm como objetivo demonstrar o comportamento do sistema em malha fechada. As variáveis analisadas são tensão do barramento CC e as correntes de eixos direto e em quadratura. Estas malhas permitem avaliar o comportamento da malha de controle de tensão e dos controladores de corrente. Mudanças em degrau nas referências serão passadas para o controle, analisando assim o seu comportamento dinâmico diante de mudanças necessárias durante a operação da bancada, para regular a tensão no transformador sob teste e suprir a demanda de potência ativa no barramento CC.

Os transitórios esperados para operação da bancada não são em degrau, porém para análise será realizados os testes com alterações em degrau, visto que, representa uma condição crítica de funcionamento.

4.8.1.1 Transitório de carregamento do capacitor

A Figura 4.19 mostra o comportamento da tensão no barramento CC e das correntes de eixos direto e em quadratura diante o transitório de carregamento inicial. Observa-se que o valor de referência de 500V foi atingido em aproximadamente 0,15s. Para o sistema não é necessário que o valor final da tensão seja alcançado com uma constante de tempo de 0,15s, podendo a referência de tensão em degrau ser substituída por uma rampa.

Devido ao fato do controle não conseguir controlar as correntes de eixo dq enquanto a tensão do barramento CC for menor que a tensão da rede, tem-se uma grande corrente nos instantes iniciais. Após o transitório inicial, as correntes de eixos direto e em quadratura são estabelecidas, de acordo com o fluxo de carga no sistema. A alteração em degrau da tensão no barramento CC provoca o pico de corrente. Este transitório pode ser evitado com uma alteração da tensão no barramento CC em rampa, estando assim à trajetória dentro da faixa de passagem do controlador.

É verificado na Figura 4.19b que após o barramento CC ser carregado com a tensão de referência, a corrente no sistema torna-se mínima, sendo apenas a parcela necessária para suprir as perdas interna do sistema. O conversor do lado do transformador está desligado para esta análise.

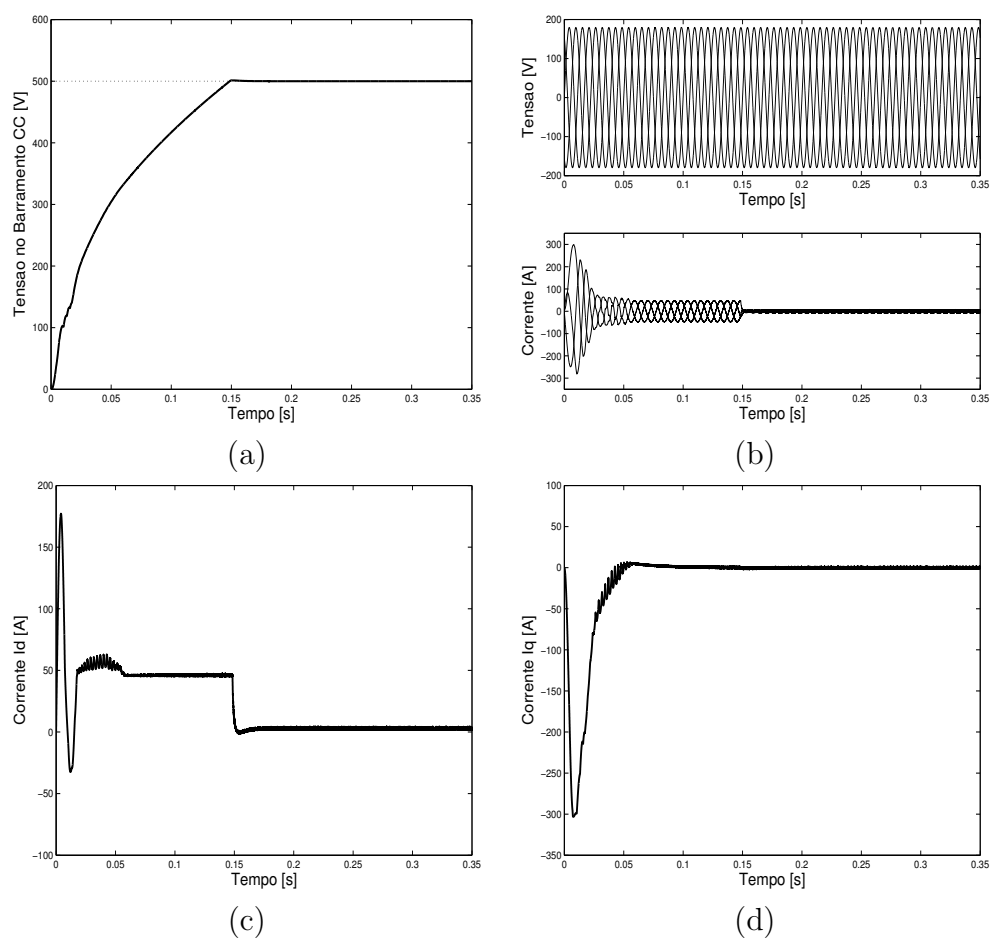


Figura 4.19: Transitório de carga do capacitor no barramento CC.

- (a) - Tensão no barramento CC;
- (b) - Correntes e tensões trifásicas da rede;
- (c) - Componente de eixo d da corrente da rede;
- (d) - Componente de eixo q da corrente da rede

Pode-se observar na Figura 4.19b que nos instantes iniciais existe uma sobrecorrente no sistema. Para evitar está sobrecorrente, pode-se aplicar ao capacitor do barramento CC uma carga inicial antes de ligar o conversor do lado da rede. Nas Figuras 4.20 e 4.21 é considerado que o capacitor do barramento CC possui uma tensão inicial de 500V. Devido à tensão do barramento ser maior que a tensão da rede nos instantes iniciais, o controle consegue controlar as correntes de eixo dq evitando a sobrecorrente, como pode ser verificado na Figura 4.21.

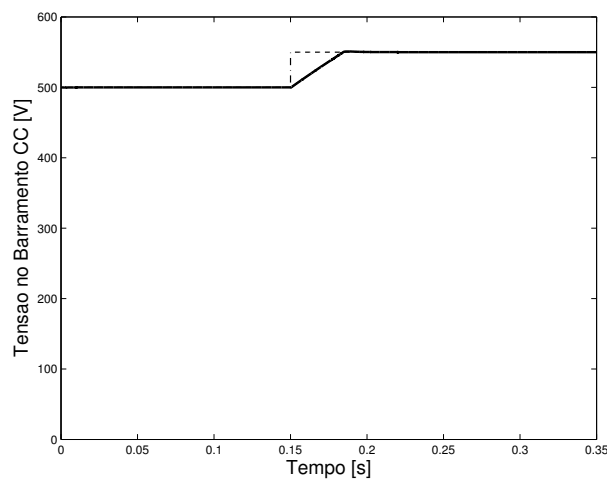


Figura 4.20: Tensão barramento CC.

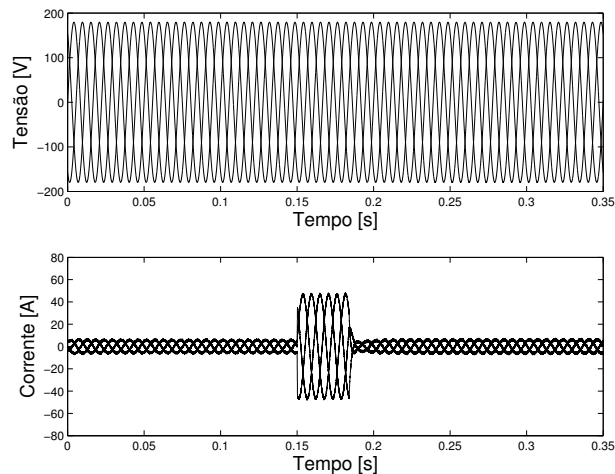


Figura 4.21: Correntes e tensões trifásicas.

4.8.1.2 Transitório no barramento CC

Com o objetivo de avaliar o desempenho dinâmico (rapidez de resposta, amortecimento, etc) e a rigidez a distúrbios do controle do conversor do lado da rede, o valor de referência de tensão do barramento CC é alterado em $\pm 10\%$, em um intervalo de tempo de $200ms$.

É verificado na Figura 4.22a que o controle atuou de forma eficiente, estabilizando o sistema na tensão de referência, em ambos os casos. A resposta transitória da malha de controle de corrente é bastante rápida, como pode ser visto pela sobreposição dos valores reais e de referência. O tempo de resposta atende a bancada de testes, visto que, em sistemas reais está dinâmica é significativamente mais baixa, chegando a valores de varios segundos.

Podemos observar na Figura 4.22c que, quando a tensão no barramento CC é baixada de $550V$ para $450V$, durante o tempo em que a referência é menor que a tensão medida no barramento, o fluxo de potência é invertido, sendo do barramento CC para a rede, provocando uma corrente de eixo d negativa. O excesso de energia armazenado no capacitor retorna para a rede elétrica.

A Figura 4.22d mostra que a corrente de eixo em quadratura se mantém nula após o transitório inicial de carregamento do barramento CC. Isto comprova o desacoplamento implementado no projeto, que é uma boa garantia de bom desempenho deste controle, mesmo durante os dois períodos transitórios provocados após o carregamento do barramento CC. As correntes e tensões trifásicas no conversor do lado da rede são mostradas na Figura 4.22b

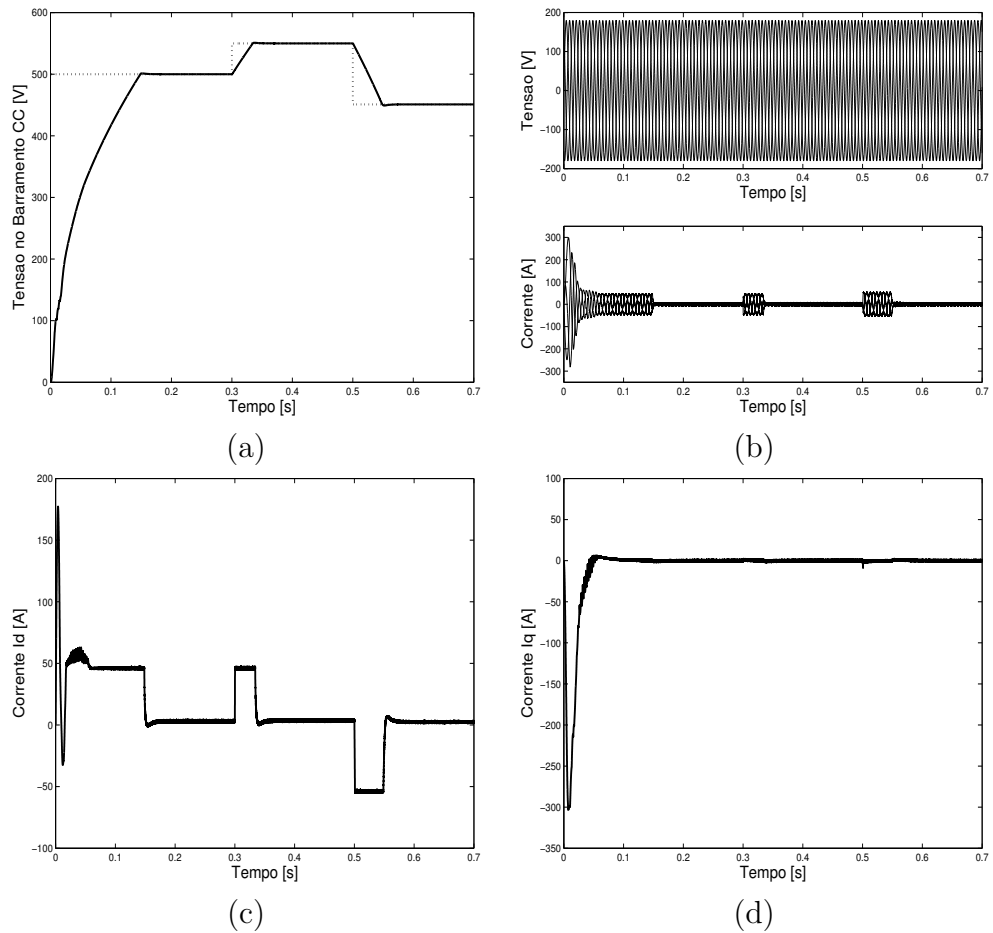


Figura 4.22: Transitório no barramento CC.

- (a) - Tensão no barramento CC;
- (b) - Correntes e tensões trifásicas da rede;
- (c) - Componente de eixo d da corrente da rede;
- (d) - Componente de eixo q da corrente da rede

4.8.1.3 Transitório das malhas de controle de corrente

A Figura 4.23 mostra a resposta a um degrau de corrente para a referência de corrente de eixo em quadratura. O desacoplamento realizado entre as duas malhas de controle dq pode ser comprovado através da observação da corrente de eixo direto e quadratura. Variando-se o valor de referência de corrente de eixo em quadratura, a corrente de eixo direto manteve-se praticamente constante.

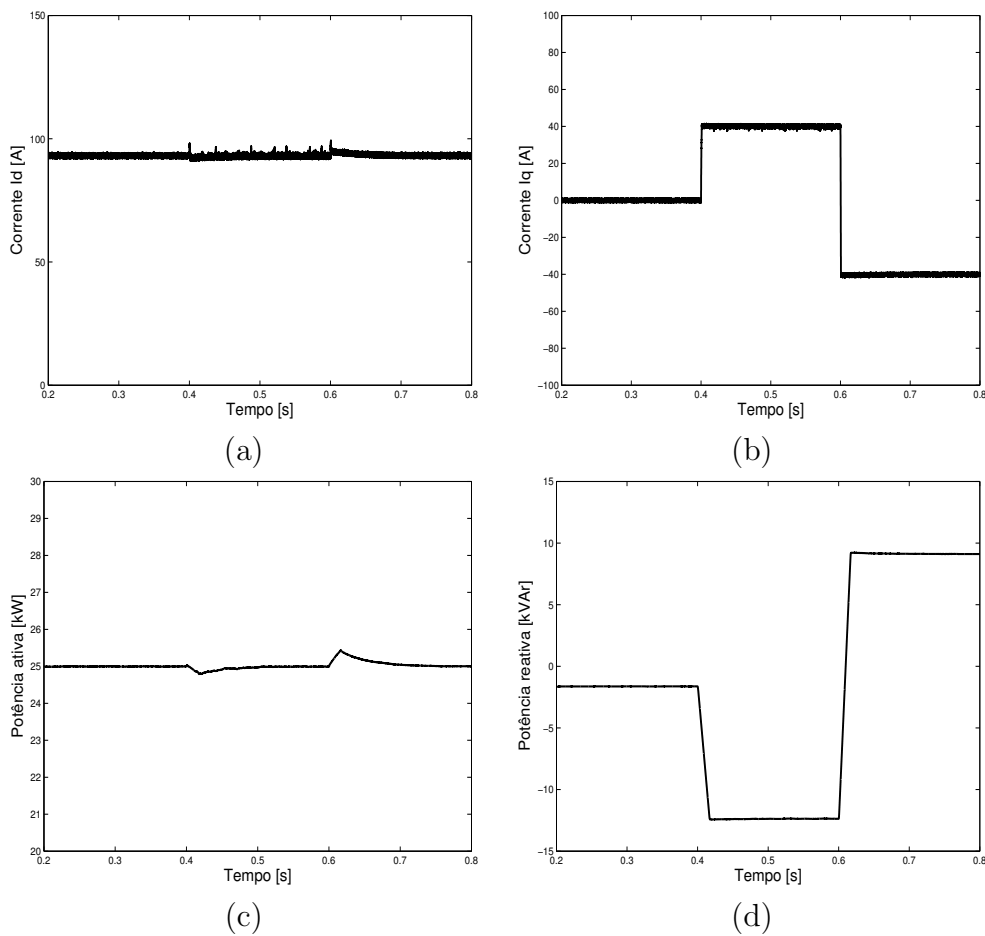


Figura 4.23: Transitório das malhas de controle de corrente no CLR.

- (a) - Corrente de eixo d da rede;
- (b) - Corrente de eixo q da rede;
- (c) - Fluxo de potência ativa P no conversor da rede;
- (d) - Fluxo de potência reativa Q no conversor da rede

Devido ao pequeno transitório que ocorre na corrente de eixo direto ao alterar a corrente de eixo em quadratura (Figura 4.23a) tem-se uma variação na potência ativa como pode ser visto na Figura 4.23c. O valor de pico da potência ativa durante o transitório corresponde a 2% da potência base do sistema.

4.8.2 Controle do conversor do lado do transformador

É desejado na bancada para ensaio de transformador, que através do conversor do lado da rede se possa controlar o carregamento do transformador sobre teste. Visto que as potências ativa e reativa são independentes, as características do carregamento do transformador podem ser controladas em função dos testes a serem realizados, controlando as correntes de eixo dq do conversor do lado do transformador. Para operação da carga com fator de potência unitário, como visto, é necessário que a corrente em quadratura seja nula, isto é $Q = 0$. O transformador sob teste conectado ao inversor, como mencionado anteriormente é de $25kVA$ e $220V$.

Para analisar o desempenho dinâmico da malha de controle do conversor do lado do transformador, são gerados transitórios na corrente de eixo direto e em quadratura. Tais testes têm como finalidade demonstrar a possibilidade do controle da potência ativa e reativa através da corrente de eixo direto e em quadratura respectivamente, de forma independente e simples, possibilitando a flexibilidade no controle do carregamento do transformador sob teste.

O conversor do lado do transformador permite o fluxo de potência em ambos os sentidos, do barramento CC para o transformador em teste e do transformador em teste para o barramento CC. Quando o valor da corrente de eixo direto é positivo, o fluxo de potência é do conversor para a rede, controlando o carregamento do transformador sob teste.

4.8.2.1 Transitório na malha de corrente de eixo direto

A Figura 4.24 ilustra a resposta a um degrau de corrente de eixo direto, de forma a controlar o fluxo de potência ativa no conversor do lado do transformador em teste. Através do resultado da simulação apresentado é

comprovado o controle independente da potência ativa, permitindo controlar o fluxo de carga aplicada no transformador.

A Figura 4.24a mostra um aumento na corrente de eixo direto, provocando um aumento na potência ativa aplicado no transformador sob teste. Observa-se na Figura 4.24b que a corrente de eixo em quadratura não foi alterada, mantendo a potência reativa nula, resultando fator de potência de operação da carga unitário.

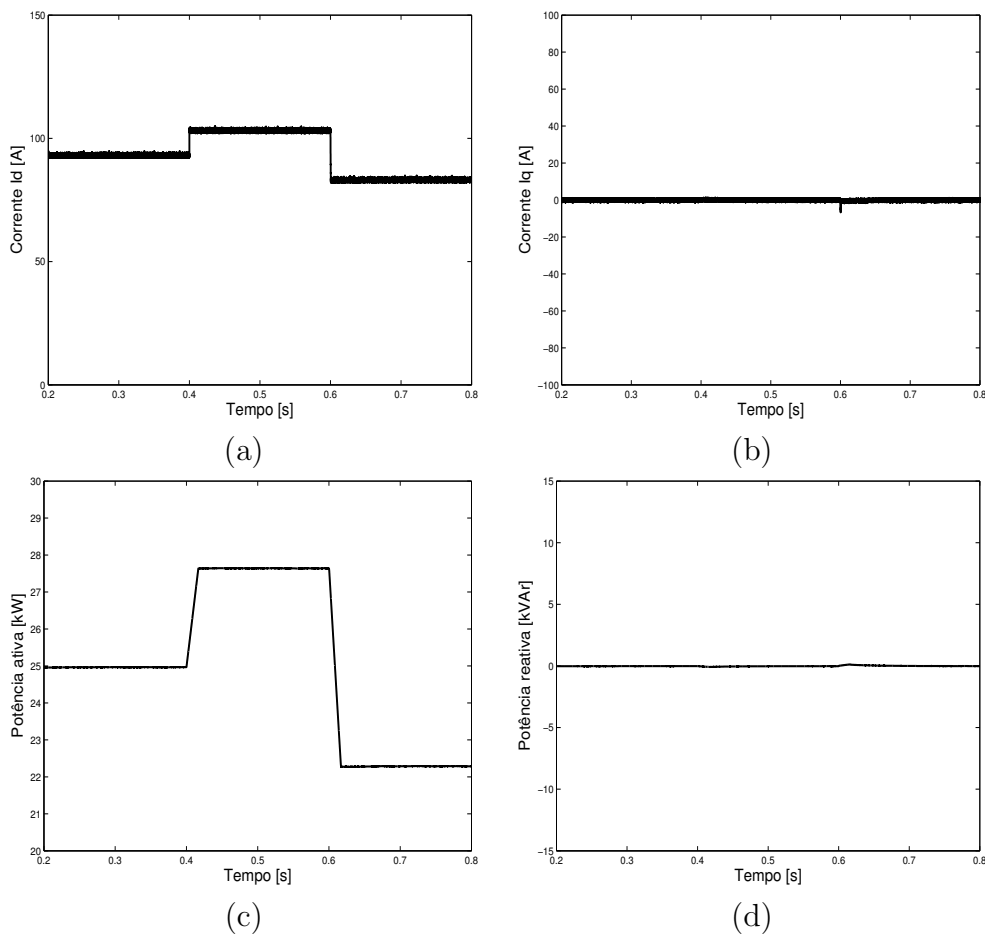


Figura 4.24: Transitório na malha de corrente de eixo direto.

- (a) - Corrente de eixo d do trafo;
- (b) - Corrente de eixo q do trafo;
- (c) - Fluxo de potência ativa P no conversor do trafo;
- (d) - Fluxo de potência reativa Q no conversor do trafo.

4.8.2.2 Transitório na malha de corrente de eixo em quadratura

Um segundo teste realizado no sistema consiste de aplicar um degrau de corrente para o eixo em quadratura. Observa-se na Figura 4.25 que a corrente de eixo direto permanece constante e que a corrente de eixo em quadratura acompanhou a referência, mudando-se a potência reativa do sistema. Existe uma pequena perturbação na potência ativa, devido ao transitório que ocorre na corrente de eixo d , quando é alterado a corrente de eixo q .

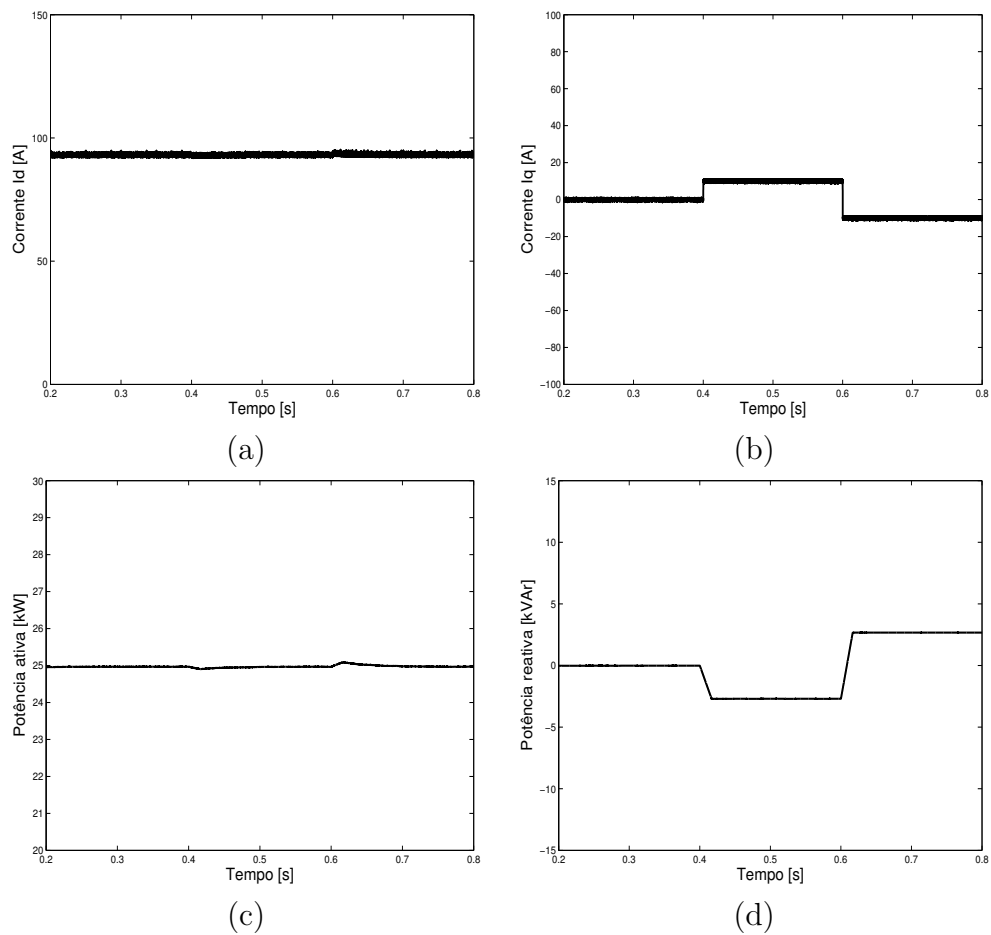


Figura 4.25: Transitório na malha de corrente de eixo em quadratura.

- (a) - Corrente de eixo d do trafo;
- (b) - Corrente de eixo q do trafo;
- (c) - Fluxo de potência ativa P no conversor do trafo;
- (d) - Fluxo de potência reativa Q no conversor do trafo

Como mencionado anteriormente, o conversor do lado da rede controla o fluxo de potência ativa aplicada no barramento CC, para suprir a demanda de potência ativa retirada do barramento CC pelo conversor do lado do transformador. Assim, existe uma dependência entre a potência ativa do conversor do lado da rede e a potência ativa do conversor do lado do transformador. Pode-se observar na Figura 4.26 que ao se elevar a potência no conversor do lado do transformador, a potência no conversor do lado da rede também é alterada, comprovando a dependência entre os fluxos de ativos nos conversores. As potências reativas dos conversores não foram alteradas, mostrando a independência entre ativo e reativo.

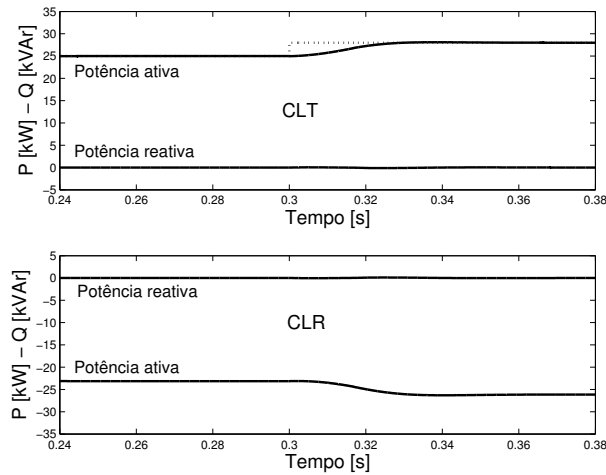


Figura 4.26: Potências ativa e reativa nos conversores para uma sobrecarga no transformador sob teste.

A tensão no sistema é regulada através do fluxo de reativo no conversor do lado da rede. Para que seja possível elevar a tensão no sistema e ao mesmo tempo operar o transformador sob teste com fator de potência unitário, as potências reativas dos conversores devem ser independentes. É verificado na Figura 4.27 que ao injetar 10kVAr no sistema para elevar a tensão, a potência reativa do conversor do lado do transformador sob teste não alterou, comprovando a independência entre os fluxos de reativo nos conversores. A potência ativa no conversor do lado do transformador teve um pequeno transitório devido ao tempo de atuação do controle para ajustar a corrente, mantendo a mesma potência na carga, diante da elevação da tensão no sistema.

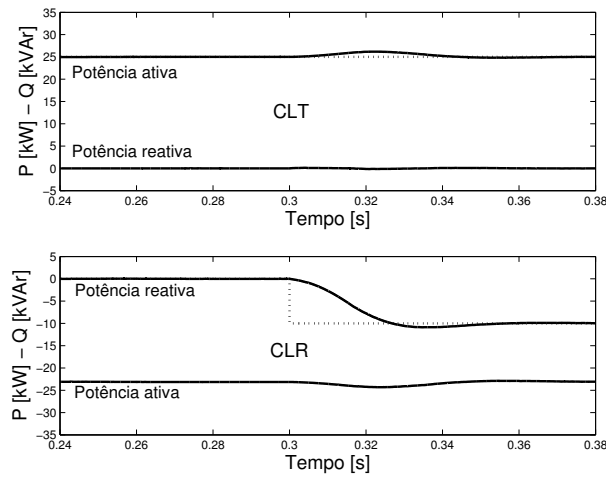


Figura 4.27: Potências ativa e reativa nos conversores para uma sobretensão mantendo a mesma potência ativa no transformador sob teste.

4.9 Comentários Finais

Neste capítulo foi apresentado o projeto da bancada de teste de transformadores. Com o objetivo de atenuar os harmônicos gerados pelo chaveamento do conversor foi projetado um filtro LCL. O desempenho do filtro foi analisado através da resposta em frequência e do lugar das raízes. Sendo adotado, para fins de projeto do filtro LCL a potência reativa máxima no sistema 5%, a frequência de corte ficou dentro dos limites recomendados sem interferir de forma significativa no fator de potência de operação da bancada. Os valores do indutor e do resistor do filtro foram calculados de forma que as perdas fossem minimizadas e a frequência de ressonância estivesse dentro da faixa desejada ($10f_n < f_{res.} < 1/2f_s$).

Também foram descritas as estratégias de controle dos conversores do lado da rede e do conversor do lado do transformador sobre ensaio. Foram projetados os controladores para as malhas de corrente, potência e tensão no barramento CC. As estruturas de controle resultantes foram simuladas, caracterizando a operação do sistema.

Foram realizados estudos de resposta transitória e em regime permanente do sistema sobre diversas condições de operação, sendo estas estabelecidas em função da implementação experimental a ser realizada. Não foram realizados

testes diretamente nas malhas de potência ativa e reativa e regulação da tensão CA, visto que os testes estão inclusos na parte de simulação dinâmica da bancada no próximo capítulo.

Com base nas diversas simulações efetuadas, pode-se afirmar que a estratégia de controle adotada mostrou-se eficiente, sendo capaz de controlar o fluxo de potência no sistema, permitindo combinar efeito de baixo fator de potência. O sistema em malha fechada apresentou um bom desempenho dinâmico e em regime, como pode ser comprovado pela rapidez de resposta exibida.

Simulação do Desempenho Operacional Dinâmico da Bancada

5.1 Introdução

Este capítulo apresenta resultados de simulação, obtidos da bancada de ensaio de transformador projetada no capítulo 4 (Figura 4.2). Os resultados apresentados correspondem à operação do sistema completo (CLR + CLT) aos seguintes testes aplicados ao transformador em teste:

- operação do transformador em condição de sobrecarga;
- operação do transformador em condição de potência abaixo da nominal;
- operação do transformador em condição sobrecarga associada a sobretensão;
- operação do transformador em condição de potência abaixo da nominal associada a tensão abaixo da nominal;

Com base nos resultados apresentados, será feita uma análise qualitativa do desempenho da arquitetura da bancada projetada. Dos conversores serão avaliadas as dinâmicas das correntes de entrada e da tensão no barramento CC, o fluxo de potência, a regulação de tensão e os harmônicos injetados na rede. Da rede de alimentação, serão avaliados o fluxo de potência consumido durante o ensaio do transformador.

5.2 Resultados de Simulação

Para o ensaio do transformador, o controle do fluxo de potência ativa e reativa é realizado através da corrente de eixo direto e em quadratura respectivamente, permitindo o controle do carregamento de forma plena. A tensão é regulada através do conversor do lado da rede, em malha aberta, por meio do fluxo de potência reativa.

Os testes foram realizados com o conversor do lado do transformador sendo ligado após o conversor do lado da rede carregar o barramento CC (0,13s). Pode-se observar na Figura 5.1, o transitório provocado na tensão do barramento CC no momento em que o conversor do lado do transformador em teste é ligado. Durante a partida, a tensão no capacitor sofre uma pequena perturbação, sendo que a malha de controle de tensão atua fazendo com que esta se recupere.

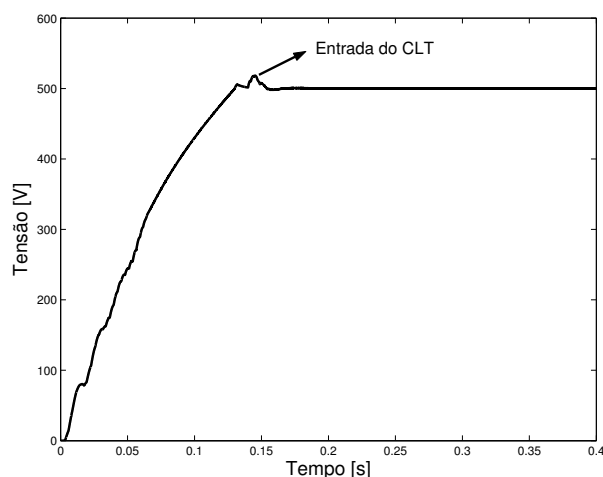


Figura 5.1: Tensão no barramento CC.

Na simulação da bancada são consideradas as perdas no conversor por condução e as perdas devido ao circuito Snubber de proteção. No transformador são consideradas as perdas no cobre, devido a passagem da corrente elétrica pela resistência ôhmica do mesmo, resultando perdas por efeito joule e as perdas no ferro. Os elementos passivos do filtro e a impedância inserida na entrada do sistema para baixar a potência de curto circuito completa as perdas existente na simulação da bancada. São desprezadas para efeito de

simulação as perdas no conversor por chaveamento, implicando uma pequena diferença entre o valor obtido e o valor real da energia consumida durante o ensaio.

Na bancada, têm-se dois transformadores, sendo um o transformador em teste e o outro o de conexão. Na Tabela 5.1, são apresentados os dados técnicos do transformador em teste:

Tabela 5.1: Parâmetros do transformador em teste

<i>Parâmetros</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidade</i>
Potência	25	kVA
Corrente	113	A
Tensão primário	220	V
Tensão secundário	220	V
Impedância	$1.8318e^{-3} + j0.0927e - 3$	pu

5.2.1 Transformador em condição nominal de operação

5.2.1.1 Conversor do lado do transformador

É considerada condição nominal de operação quando a tensão nominal é aplicada ao enrolamento primário e a corrente nominal flui nos terminais do enrolamento secundário, o transformador recebe a potência nominal correspondente.

Pode-se verificar na Figura 5.2 que o transformador está operando com tensão e corrente nominal, recebendo a potência de $25kVA$. A NBR5356 (2003) recomenda que a forma de onda da tensão de alimentação seja praticamente simétrica e senoidal. A distorção harmônica não deve exceder 5%, enquanto o conteúdo de harmônicos pares inferior a 1%. Neste sentido, a distorção harmônica total da corrente secundária de carga não excederá 5%. Pode-se observar através da FFT da corrente e da tensão no transformador em teste, Figura 5.2d, que o nível da THD está dentro da faixa recomendada, 0,33% para tensão e 0,18% para corrente, mostrando a efetividade dos filtros projetados.

O controle do fluxo de potência no transformador é realizado através

da corrente de eixo direto e em quadratura. Observa-se que o sistema está operando com fator de potência unitário, corrente de eixo em quadratura nula, conseqüentemente potência reativa nula. A corrente de eixo direto é definida em função da potência ativa passada como referência para o controle.

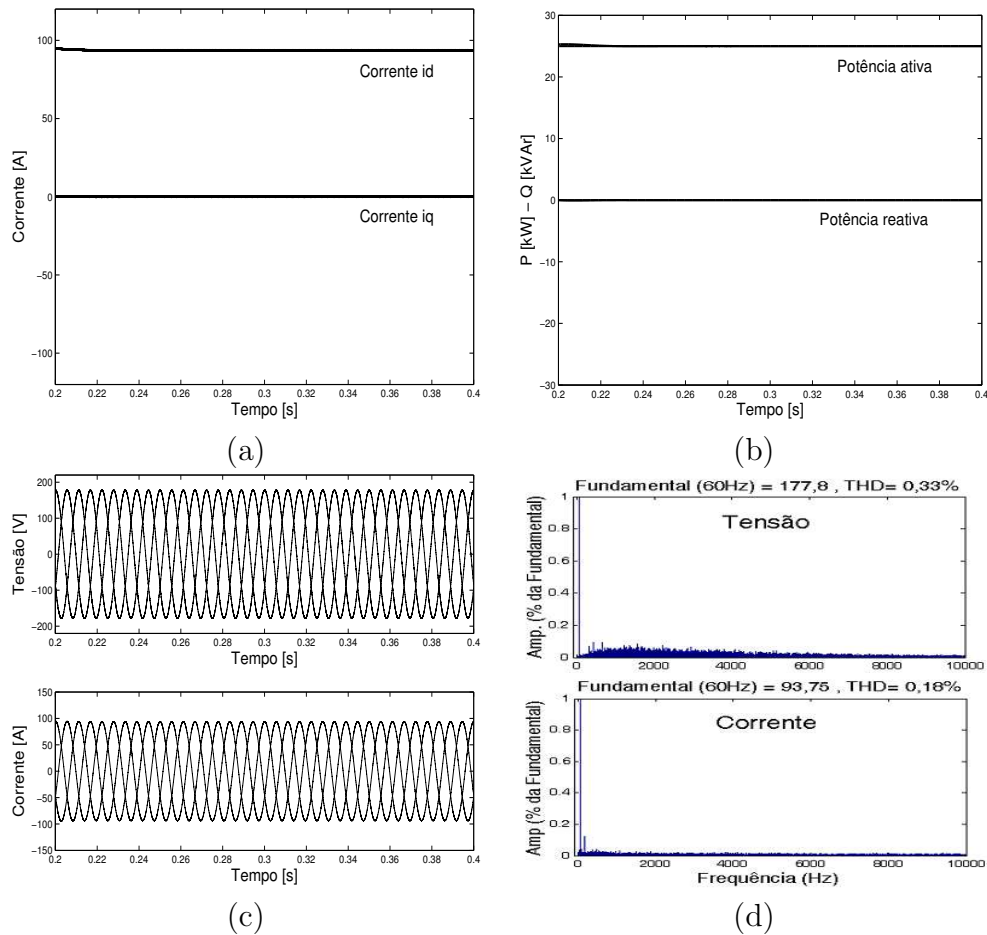


Figura 5.2: Transformador em condição nominal de operação - CLT.

- (a) - Corrente de eixo d e q no conversor do lado do transformador;
- (b) - Fluxo de potência ativa e reativa no transformador sob teste;
- (c) - Tensões e correntes trifásicas de alimentação do transformador;
- (d) - FFT da tensão e da corrente de alimentação do transformador.

5.2.1.2 Conversor do lado da rede

A Figura 5.3 mostra que a taxa de distorção harmônica de tensão e corrente no conversor do lado da rede são 0,33% e 0,21% respectivamente, estando os valores dentro dos limites recomendados pelas normas.

Analisando a Figura 5.4b pode-se observar que a corrente de eixo em quadratura no conversor do lado da rede não é nula, apesar da potência reativa ser nula. Para se ter fator de potência unitário, existe uma pequena corrente de eixo em quadratura para compensar a potência reativa de filtro e do próprio transformador.

Comparando-se a Figura 5.2b com a Figura 5.4c é possível verificar que o fluxo de potência no conversor do lado da rede é praticamente igual ao fluxo de potência no conversor do lado do transformador, visto que a potência fornecida ao barramento CC é igual à potência retirada do barramento CC e aplicada ao trafo em teste. Na Figura 5.4a pode-se observar que a tensão no barramento CC permanece constante independente do fluxo de potência no sistema.

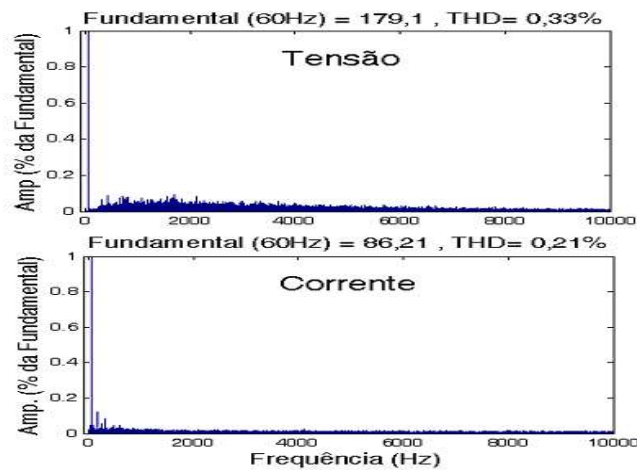


Figura 5.3: FFT da tensão e da corrente no conversor do lado da rede.

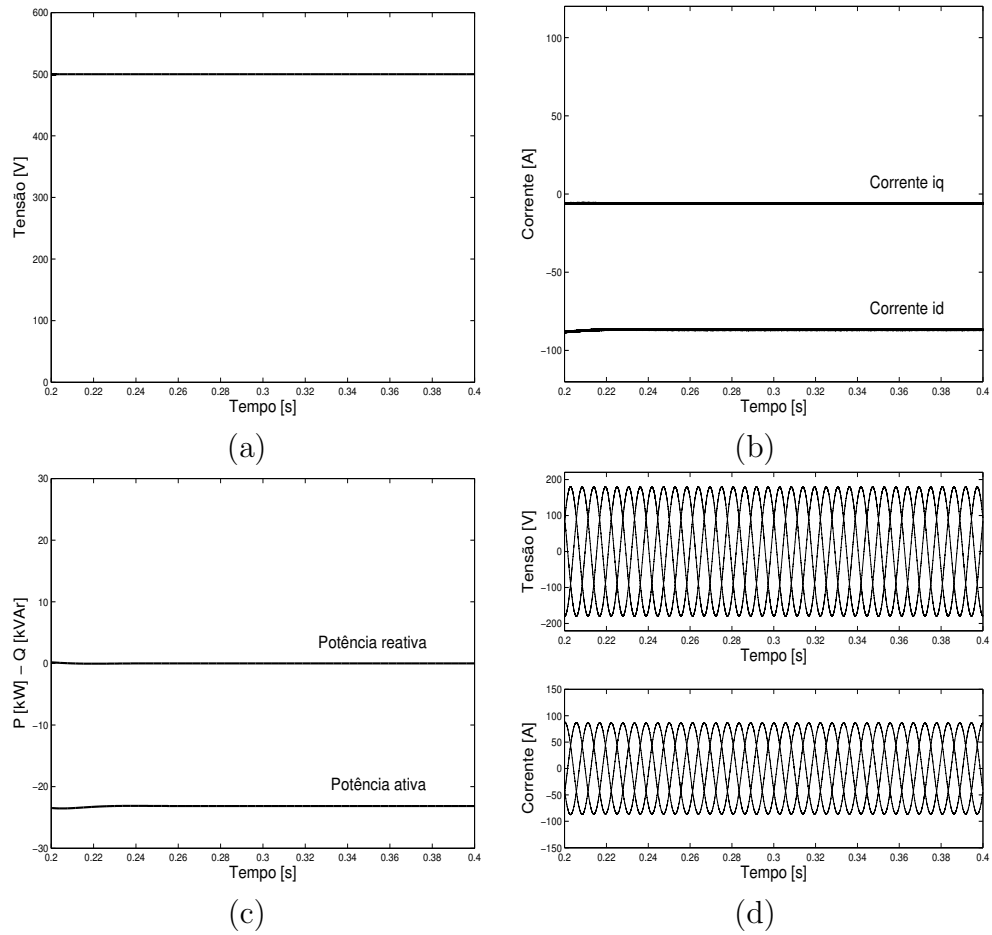


Figura 5.4: Transformador em condição nominal de operação - CLR.

- (a) - Tensão no barramento CC;
- (b) - Corrente de eixo d e q no conversor do lado da rede;
- (c) - Fluxo de potência ativa e reativa no conversor do lado da rede;
- (d) - Tensões e correntes trifásicas no conversor do lado da rede.

5.2.1.3 Rede de alimentação

Nas Figuras 5.5 e 5.6, são mostrados as formas de onda da rede de alimentação do fluxo de potência e das correntes e tensões trifásicas. Podemos verificar que a potência gasta para realizar o ensaio representa apenas as parcelas de perdas do sistema, aproximadamente 10% da potência base. O sistema esta operando em circulo fechado, sendo assim a potência necessária para o ensaio esta circulando internamente, retirando da rede apenas a parcela de potência necessária para repor as perdas nos filtros, nos conversores, nos transformadores e no reator de entrada.

Para o ensaio do transformador operando em condição nominal o consumo de energia é baixo, apresentado uma economia de aproximadamente 90%. Apesar de não ser o objetivo do trabalho definir o consumo de energia durante o ensaio do transformador, o valor do consumo apresentado não representa com precisão a perda no sistema real, na simulação alguns parâmetros foram estimados e as perdas por chaveamento dos conversores foram desprezadas.

Pode-se observar através da FFT, Figura 5.7, que a taxa de distorção harmônica da tensão na rede de alimentação é zero e que a taxa de distorção harmônica da corrente é 0,87%.

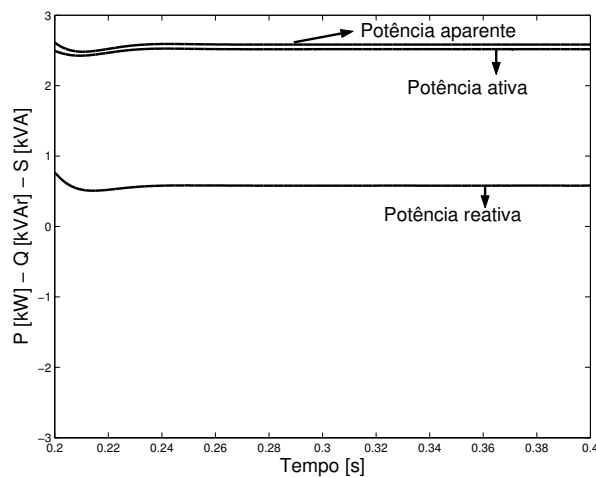


Figura 5.5: Fluxo de potência ativa, reativa e aparente na rede de alimentação.

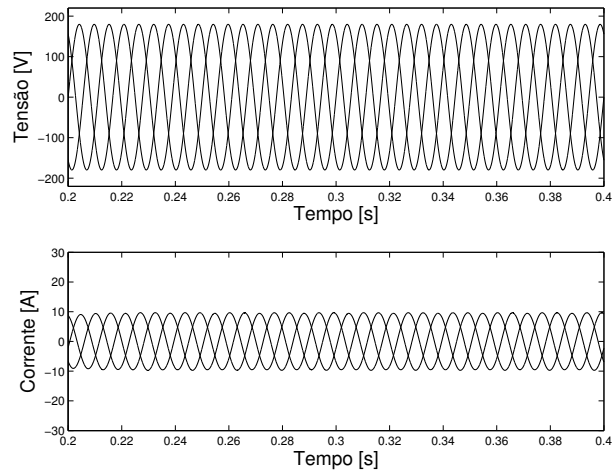


Figura 5.6: Tensões e correntes trifásica na rede de alimentação.

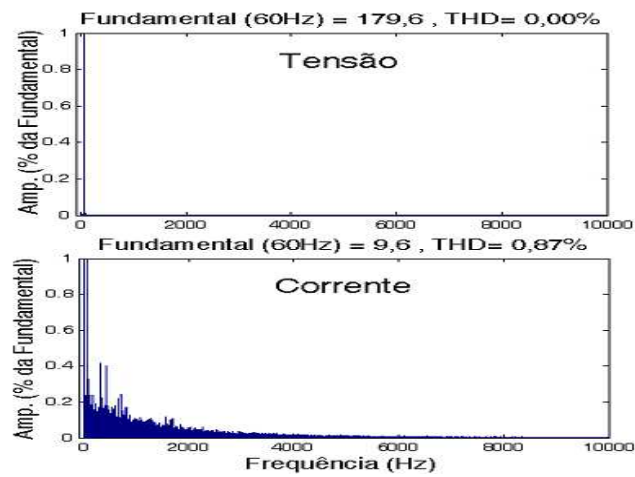


Figura 5.7: FFT da tensão e da corrente na rede de alimentação.

5.2.2 Operação do transformador em sobrecarga

5.2.2.1 Conversor do lado do transformador

Nas Figuras 5.8 e 5.10 são mostrados as formas de onda das potências, correntes e tensões na rede de alimentação e no transformador em teste respectivamente. A Figuras 5.9 apresenta a FFT da tensão e da corrente de alimentação do transformador sob teste. A potência ativa na rede sofre um pequeno transitório, mas após $0,025s$ volta ao valor inicial (10% da potência base), indicando que o consumo de energia durante o ensaio de sobrecarga do transformador não é alterado. O valor da potência reativa na rede é diferente de zero para compensar o reativo presente nos elementos passivos da bancada.

Os sinais de tensão, corrente e potência no transformador são mostradas na Figura 5.10. Observa-se que em $0.3s$ é dado um degrau de 10% de potência ativa provocando uma sobrecorrente no transformador em teste, mantendo-se a tensão de alimentação igual a nominal. A taxa de distorção harmônica da tensão de alimentação do transformador é 0,29% e da corrente 0,17%.

É verificado na Figura 5.10c que a resposta transitória da malha de controle de potência ativa é bastante rápida, estabilizando o sistema na potência de referência após $0,02s$. Para o ensaio de transformadores não se faz necessária uma dinâmica tão rápida, tais testes foram realizados nestas condições de operação, visto que, se o processo apresenta um bom desempenho para esta condição crítica, para as condições reais de operação, que são mais suaves, os resultados obtidos não serão inferiores. O fator de potência de operação do transformador em teste é unitário, potência reativa nula.

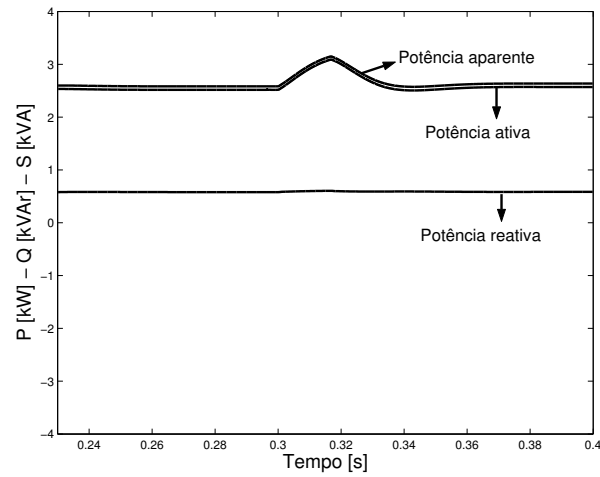


Figura 5.8: Fluxo de potência ativa, reativa e aparente na rede de alimentação.

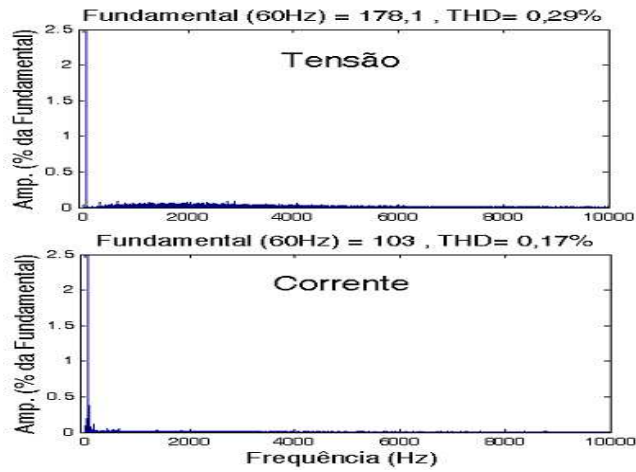


Figura 5.9: FFT da tensão e da corrente no transformador sob teste.

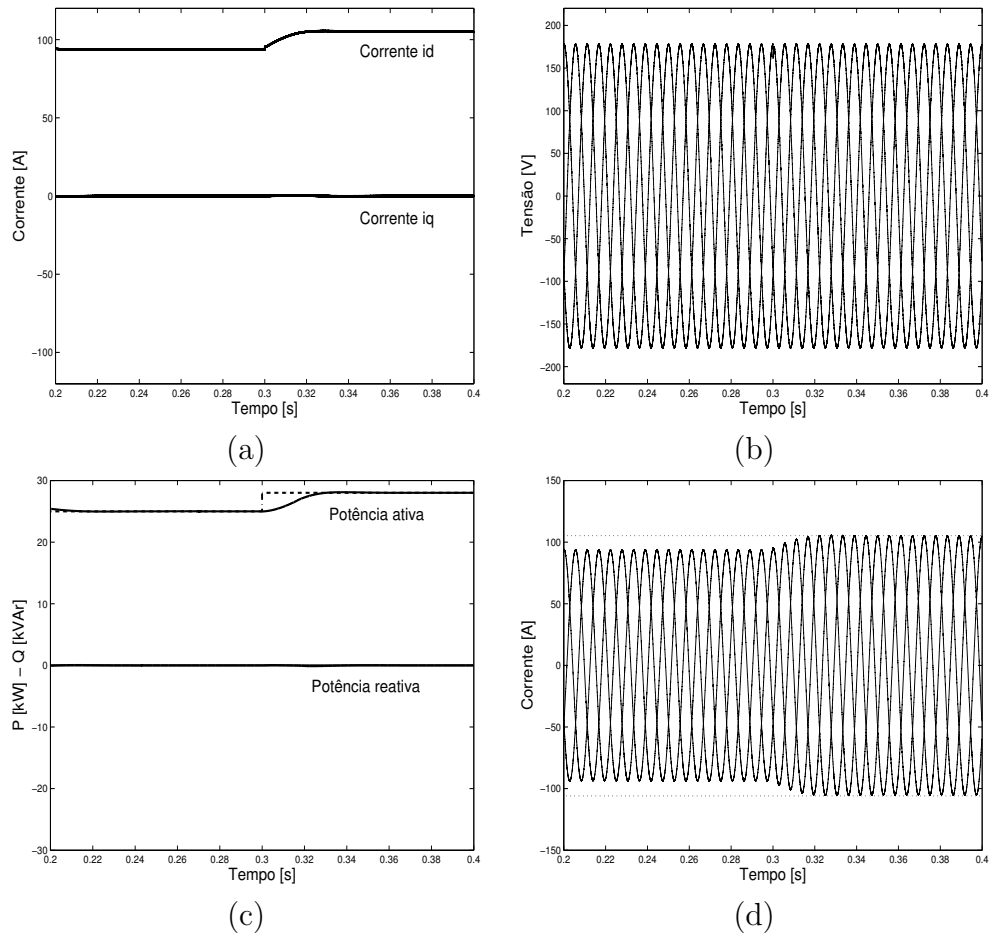


Figura 5.10: Operação do transformador em condição sobrecorrente - CLT.
(a) - Corrente de eixo d e q no conversor do lado do transformador;
(b) - Tensões trifásicas de alimentação do transformador;
(c) - Fluxo de potência ativa e reativa no transformador;
(d) - Correntes trifásicas no transformador.

5.2.3 Operação do transformador com potência abaixo da nominal

5.2.3.1 Conversor do lado do transformador

O ensaio do transformador em condição de carregamento abaixo do nominal altera levemente o consumo de energia, visto que, as perdas no sistema são alteradas. Na Figura 5.11 pode-se observar que após o transitório, o fluxo de potência ativa da rede para a bancada volta ao seu valor inicial.

A Figura 5.12 mostra o transformador sendo submetido a condição de corrente abaixo da nominal. Um degrau de -10% de potência ativa é fornecido como referência provocando uma situação de potência abaixo da nominal associada a uma queda de corrente no transformador em teste.

É visto na Figura 5.12b que a tensão de alimentação do transformador não alterou, mantendo-se no valor nominal. A corrente de eixo d teve uma queda, provocando uma redução na potência ativa de 10% e a potência reativa manteve-se nula, indicando fator de potência unitário de operação do transformador sob teste. O tempo de resposta da malha de controle de potência ativa é rápido, estabiliza no novo valor de referência fornecido em $0,02s$.

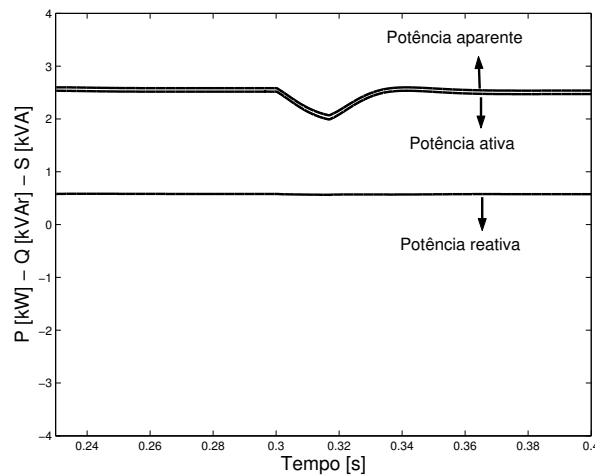


Figura 5.11: Fluxo de potência ativa, reativa e aparente na rede de alimentação.

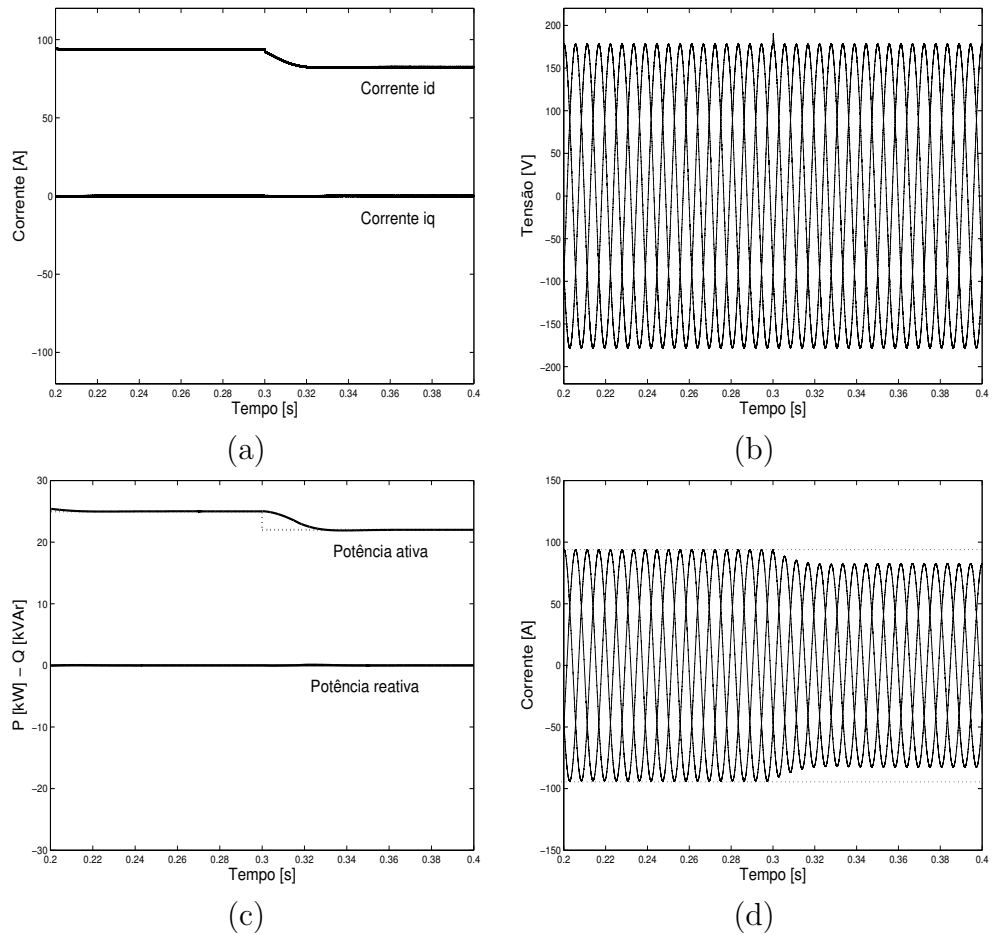


Figura 5.12: Operação do transformador em condição subcorrente - CLT.
(a) - Corrente de eixo d e q no conversor do lado do transformador;
(b) - Tensões trifásicas de alimentação do transformador;
(c) - Fluxo de potência ativa e reativa no transformador;
(d) - Correntes trifásicas no transformador.

5.2.4 Operação do transformador em sobretensão

5.2.4.1 Conversor do lado do transformador

A Figura 5.13 apresenta as formas de onda de tensão, corrente e potência no transformador em teste. Para o ensaio do transformador em situação de sobretensão associada a sobrecarga, a malha de controle de potência ativa do conversor do lado do transformador é retirada, visto que, a regulação da tensão é realizada em malha aberta, através do fluxo de reativo no conversor do lado da rede.

Se a malha de potência ativa não for retirada e a referência de potência não alterada, o controle do conversor do lado da rede eleva a tensão, mas o controle do lado do transformador reduz a corrente para manter a mesma potência de referência aplicada no transformador sob teste. Para manter a malha de potência ativa no conversor do lado da rede, é necessário que, no momento em que a tensão é alterada através do CLR, a referência de potência ativa seja mudada para o novo valor desejado de carregamento.

Na Figura 5.13b é vista a elevação de tensão no transformador em teste, alterando-se a potência ativa e mantendo constante a potência reativa. Pode-se verificar que a potência reativa é nula, indicando fator de potência unitário. A regulação da tensão pelo conversor do lado da rede através do fluxo de reativo não altera o fator de potência de operação do transformador em teste. A Figura 5.13d mostra que a corrente que circula nos enrolamentos do transformador não foi alterada, sendo igual à nominal.

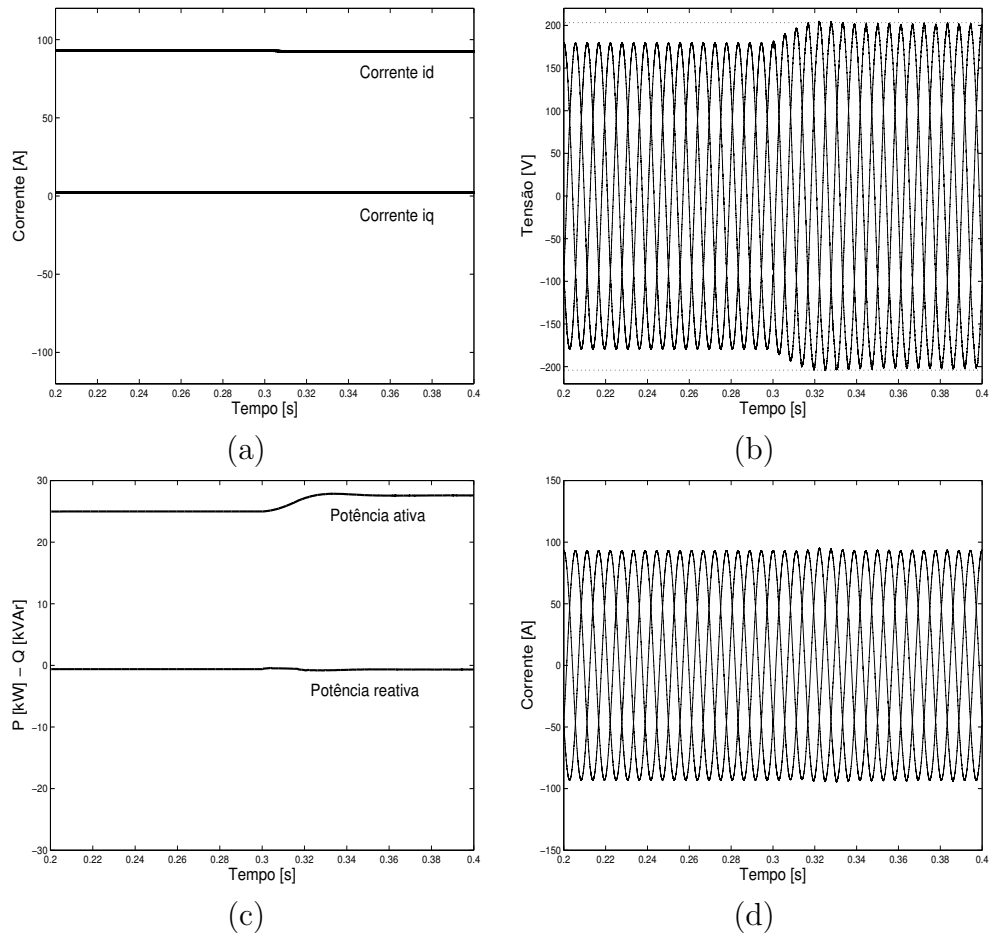


Figura 5.13: Operação do transformador em condição sobretensão - CLT.
(a) - Corrente de eixo d e q no conversor do lado do transformador;
(b) - Tensões trifásicas de alimentação do transformador;
(c) - Fluxo de potência ativa e reativa no transformador;
(d) - Correntes trifásicas no transformador.

5.2.4.2 Conversor do lado da rede

Como mencionado no capítulo 3, a tensão no transformador é regulada através da potência reativa no conversor do lado da rede. É mostrada na Figura 5.14 a elevação de 10% da tensão nos transformadores, para uma mudança na potência reativa de 60%. A potência ativa foi levemente alterada mantendo praticamente constante a corrente de eixo d .

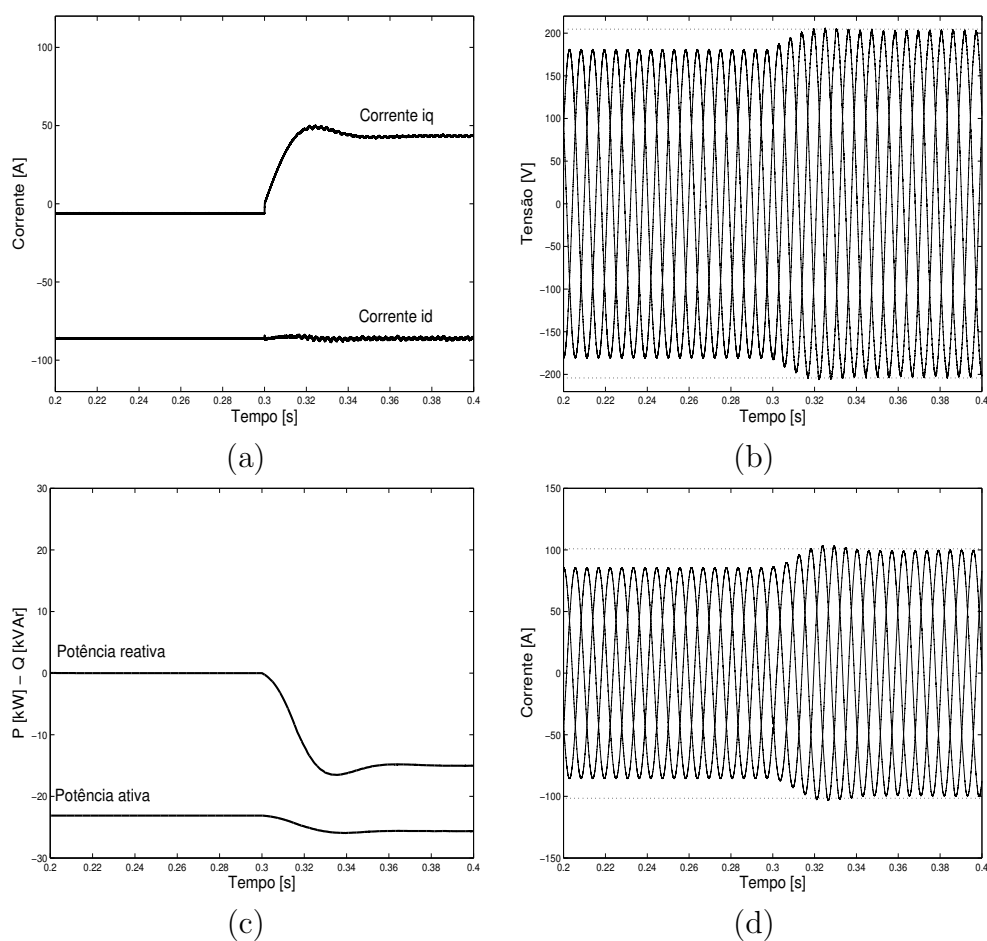


Figura 5.14: Operação do transformador em condição sobretensão - CLR.

- (a) - Corrente de eixo d e q no conversor do lado da rede;
- (b) - Tensões trifásicas no conversor do lado da rede;
- (c) - Fluxo de potência ativa e reativa no conversor do lado da rede;
- (d) - Correntes trifásicas no conversor do lado da rede.

A Figura 5.15 mostra a tensão e a corrente no conversor do lado da rede da fase A. Observa-se que, após 0.3s, a corrente está atrasada em relação a tensão, indicando uma operação com característica indutivas, o conversor está injetando corrente reativa no trafo isolador. Na Figura 5.16 é observado que a tensão e a corrente no transformador em teste estão em fase.

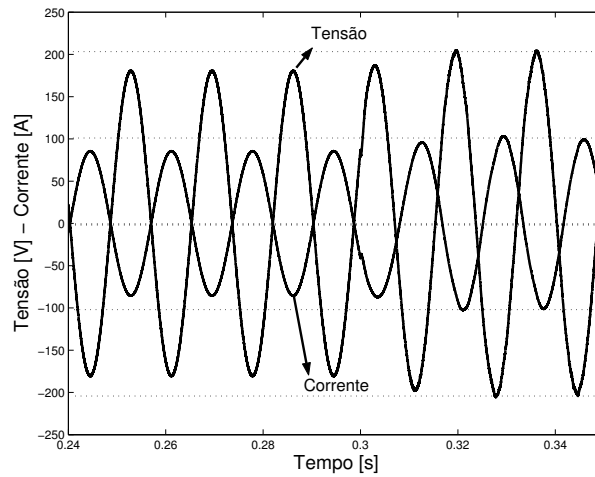


Figura 5.15: Tensão e corrente da fase A no conversor do lado da rede.

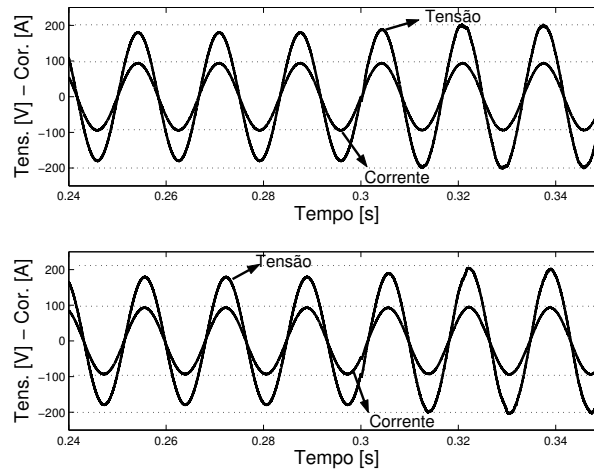


Figura 5.16: Tensão e corrente da fase A no primário e secundário do transformador em teste.

5.2.4.3 Rede de alimentação

A Figura 5.17 mostra a potência ativa, reativa e aparente na rede de alimentação para o ensaio de sobretensão do transformador. A potência aparente alterou-se significativamente em função da alteração da potência reativa. Na Figura 5.18 é apresentado o transitório de corrente e tensão na rede. A tensão permaneceu constante e a corrente foi alterada conforme a demanda de potência necessária para o ensaio.

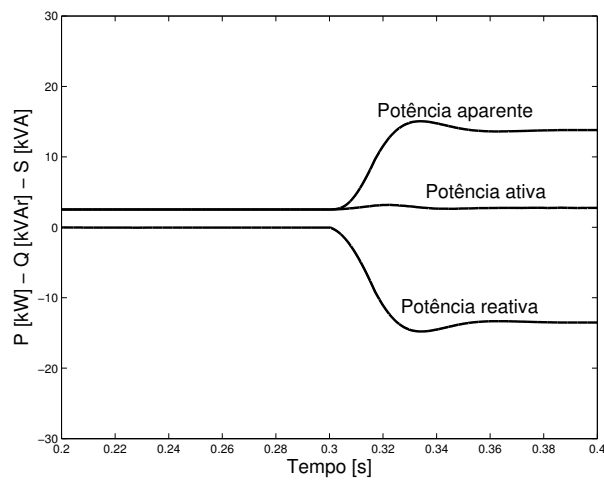


Figura 5.17: Fluxo de potência ativa, reativa e aparente na rede de alimentação.

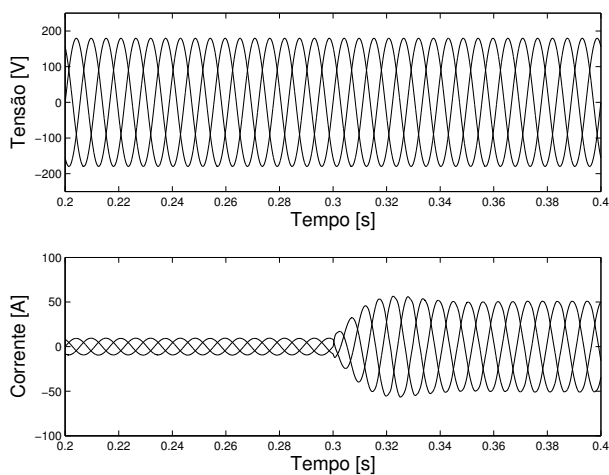


Figura 5.18: Tensões e correntes trifásica na rede de alimentação.

As Figuras 5.19 e 5.20 apresentam a FFT da tensão e corrente no transformador sob teste e a FFT da corrente na rede. Pode-se observar na Figuras 5.19 que a THD da corrente é 2,57% e da tensão 1,17%. O nível de distorção harmônica da corrente da rede para a condição de sobretensão é 2,31%. Com relação à condição nominal de operação do transformador sob teste a THD das variáveis aumentaram, mas continua dentro da faixa recomendada pelas normas e guias citado anteriormente. Esta condição de sobretensão representa a pior condição de funcionamento da bancada, no que diz respeito à qualidade de energia.

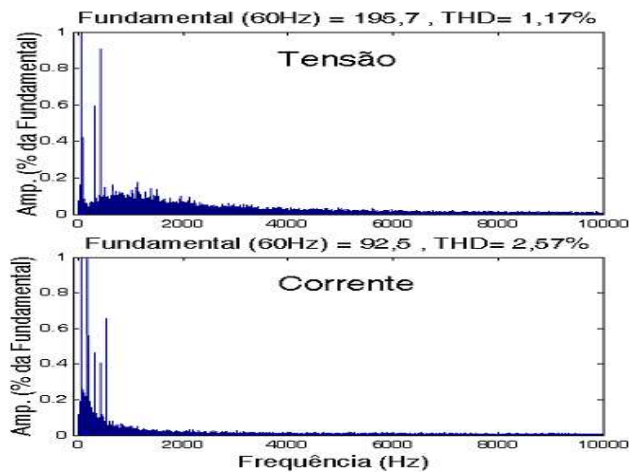


Figura 5.19: FFT da tensão e da corrente do transformador sob teste.

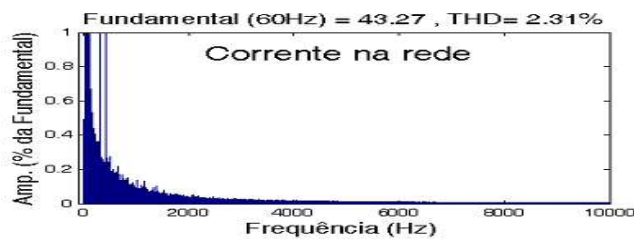


Figura 5.20: FFT da corrente na rede de alimentação.

5.2.5 Operação do transformador com tensão abaixo da nominal

5.2.5.1 Conversor do lado do transformador

De forma análoga a sobretensão, a análise é feita para a tensão abaixo da nominal, invertendo o sentido da potência reativa no conversor do lado da rede. Na Figura 5.21 pode se verificar a situação de tensão e potência abaixo da nominal. Para a obtenção destes resultados a malha de potência ativa do conversor do lado da rede foi retirada. Se desejado mudar a tensão, mantendo-se constante a potência ativa, deve-se manter a malha de potência ativa e ter como referência na malha de controle, a potência ativa nominal do transformador sob teste.

O transformador sob teste está operando com fator de potência unitário. A malha de controle de potência reativa faz com que o fluxo de reativo no sistema seja nulo, através da malha interna de corrente de eixo em quadratura. A malha de controle de potência ativa foi retirada, visto que é desejado o ensaio com tensão abaixo do nominal associado a potência abaixo do nominal, mantendo a corrente igual a nominal

Podemos observar na Figura 5.21 que o transformador está em condição nominal de operação durante os 0,3s iniciais, e que após a potência ativa aplicada no transformador sob teste reduz, visto que, o controle do fluxo de reativo pelo conversor do lado da rede faz com que ocorra uma queda de tensão. A corrente do transformador em teste não é alterada em nenhum momento, como pode ser comprovado através das Figuras 5.21a e 5.21d.

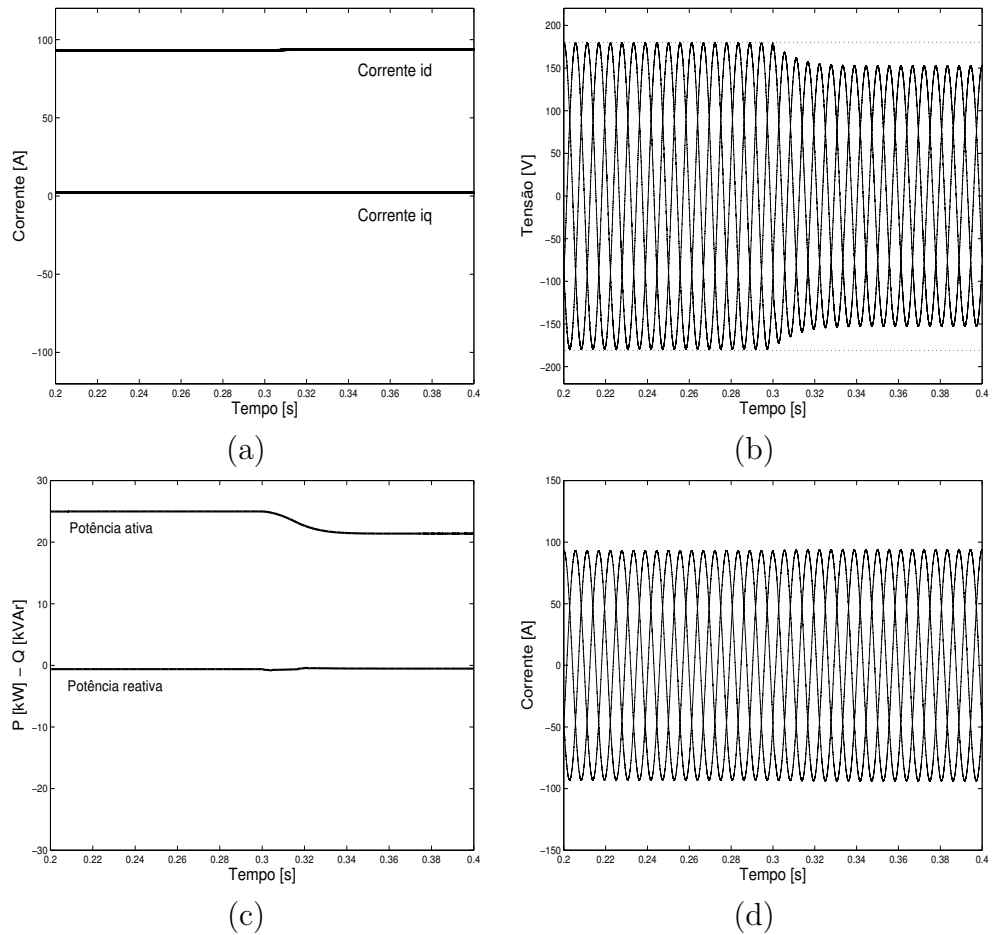


Figura 5.21: Operação do transformador em condição subtensão - CLT.

- (a) - Corrente de eixo d e q no conversor do lado do transformador;
- (b) - Tensões trifásicas de alimentação do transformador;
- (c) - Fluxo de potência ativa e reativa no transformador;
- (d) - Correntes trifásicas no transformador.

5.2.5.2 Conversor do lado da rede

É verificado na Figura 5.22 que a potência reativa foi invertida quando comparada com a situação de sobretensão, provocando uma situação de subtensão nos transformadores. A corrente de eixo direto do conversor do lado da rede praticamente manteve-se constante, alterando levemente a potência ativa. O fluxo de reativo faz com que as correntes trifásicas fiquem maiores, Figura 5.22d.

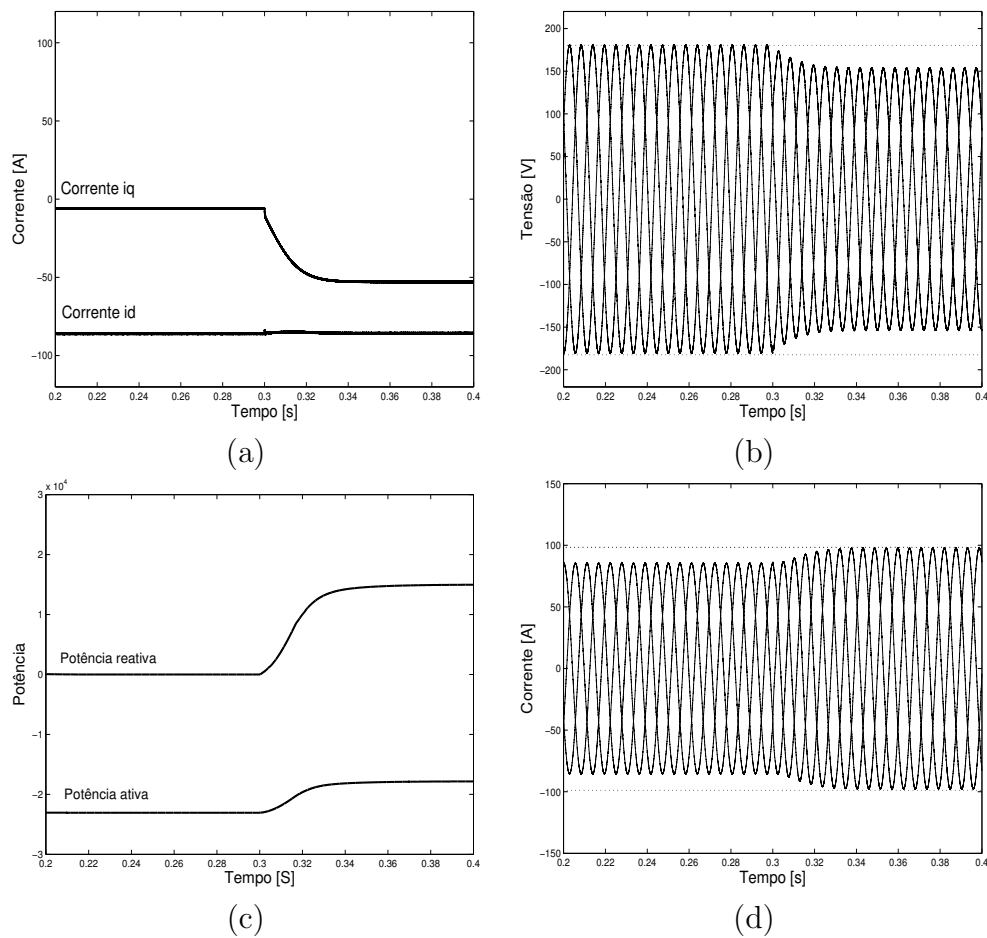


Figura 5.22: Operação do transformador em condição subtensão - CLR.

- (a) - Corrente de eixo d e q no conversor do lado da rede;
- (b) - Tensões trifásicas no conversor do lado da rede;
- (c) - Fluxo de potência ativa e reativa no conversor do lado da rede;
- (d) - Correntes trifásicas no conversor do lado da rede.

A Figura 5.23 apresenta a tensão e a corrente no conversor do lado da rede da fase A para a condição de subtensão. Observa-se que a corrente está adiantada em relação a tensão, indicando uma operação com característica capacitiva, o conversor está recebendo potência reativa. Na Figura 5.24 é observado que a tensão e a corrente no transformador em teste estão em fase, indicando operação com fator de potência unitário.

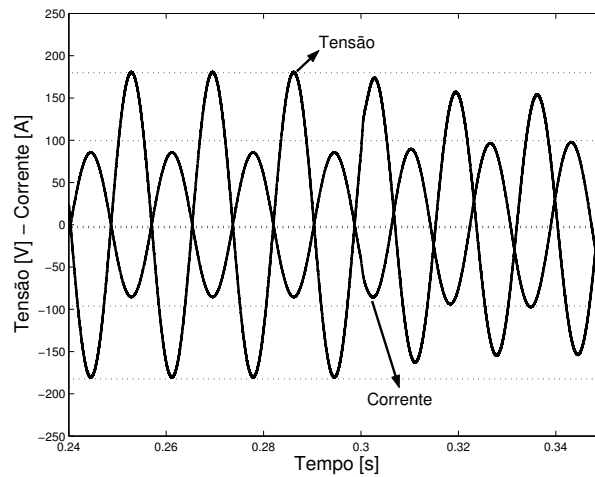


Figura 5.23: Tensão e corrente da fase A no conversor do lado da rede.

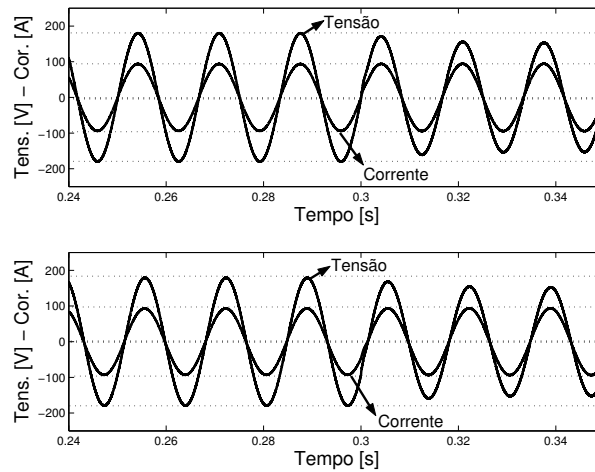


Figura 5.24: Tensão e corrente da fase A no primário e secundário do transformador em teste.

5.2.5.3 Rede de alimentação

Como verificado para situação de sobretensão, novamente a potência aparente durante o ensaio de tensão abaixo da nominal foi alterada significativamente quando comparado a situação de operação nominal, visto a necessidade de alterar a potência reativa no conversor do lado da rede, elevando a corrente, para fins de regulação da tensão. A potência ativa manteve-se constante.

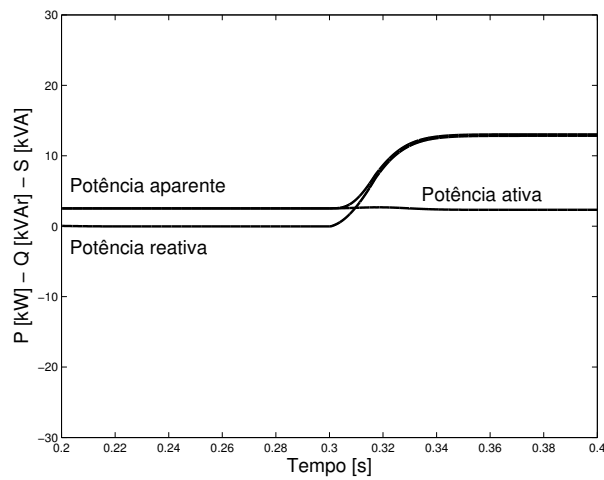


Figura 5.25: Fluxo de potência ativa, reativa e aparente na rede de alimentação.

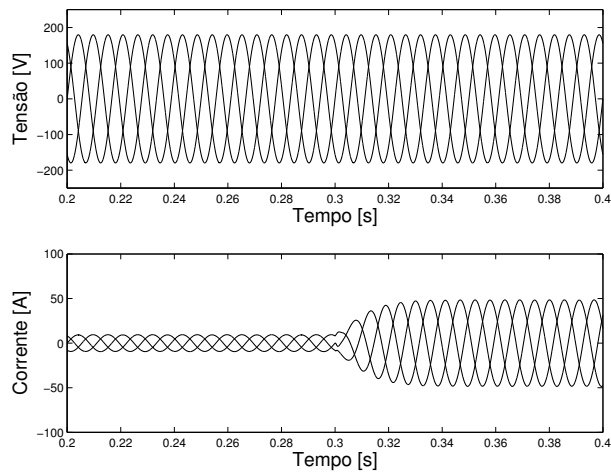


Figura 5.26: Tensões e correntes trifásicas na rede de alimentação.

5.2.6 Operação do transformador com fator de potência diferente do unitário

5.2.6.1 Conversor do lado do transformador

Apesar de não ser o objetivo central do projeto, a bancada proposta permite que o transformador seja carregado com fator de potência diferente do unitário, através do controle da potência ativa e reativa no conversor do lado do transformador. É possível definir o fator de potência de operação do transformador em teste, controlando o fluxo de potência ativa e reativa através das correntes de eixo direto e em quadratura respectivamente.

A Figura 5.27 mostra o transformador operando inicialmente com fator de potência unitário e após $0,3s$ o fator de potência é alterado para $0,95$. O fator de potência é mudado em função da potência ativa e reativa, mantendo constante a potência aparente no conversor.

A corrente de eixo em quadratura é alterada em função do fluxo de reativo no sistema. Pode-se verificar na Figura 5.27c que o fluxo de potência reativa aumentou e o fluxo de potência ativa baixou, mantendo-se constante o fluxo de potência aparente no transformador. Para alterar o fator de potência de operação do transformador, mantendo constante a potência ativa no sistema, basta alterar o fluxo de reativo no conversor do lado do transformador e manter constante a referência de potência ativa.

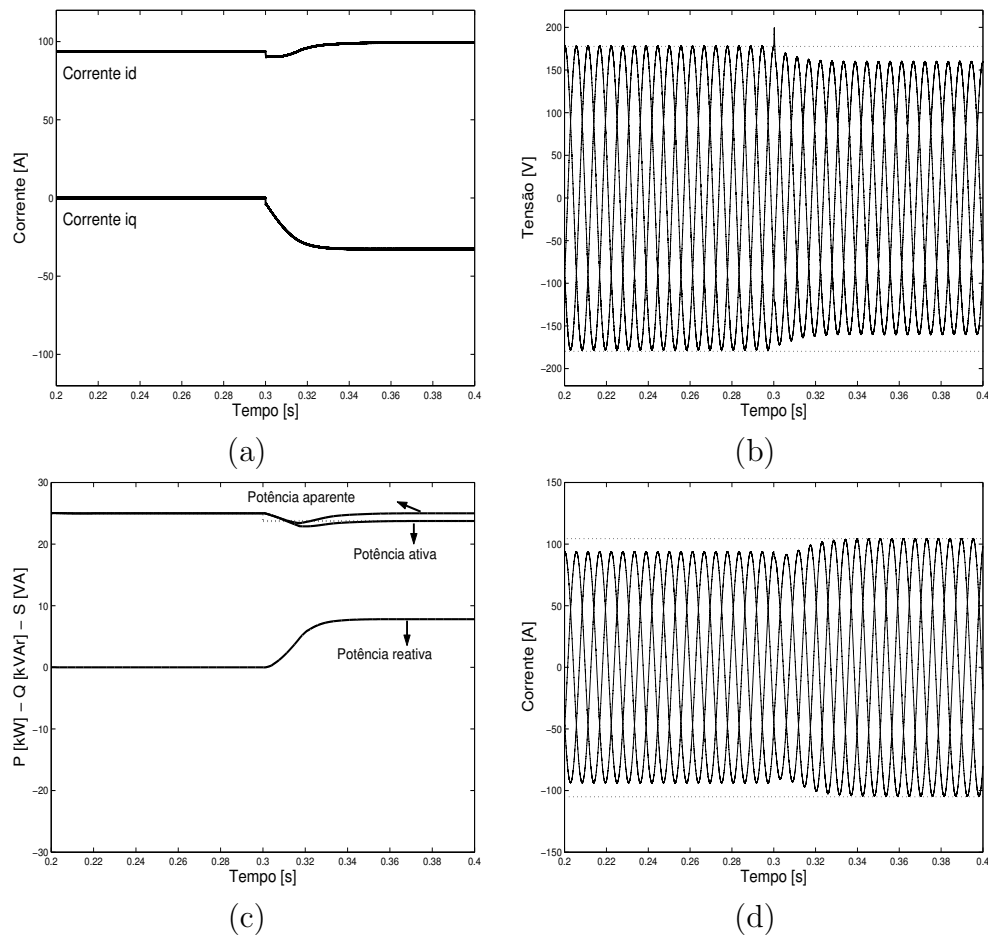


Figura 5.27: Operação do transformador com fator de potência diferente do unitário - CLT.

- (a) - Corrente de eixo d e q no conversor do lado do transformador;
- (b) - Tensões trifásicas de alimentação do transformador;
- (c) - Fluxo de potência ativa e reativa no transformador;
- (d) - Correntes trifásicas no transformador.

5.2.6.2 Conversor do lado da rede

No conversor do lado da rede a potência reativa permaneceu constante e a potência ativa teve um pequeno transitório devido a alteração no fluxo de ativo no transformador em teste. Podemos verificar na Figura 5.28 que a corrente i_d é alterada em função da alteração do fluxo de ativo. É verificado que a tensão cai no CLR, visto a alteração do fluxo de reativo no CLT, fazendo com que a corrente aumente.

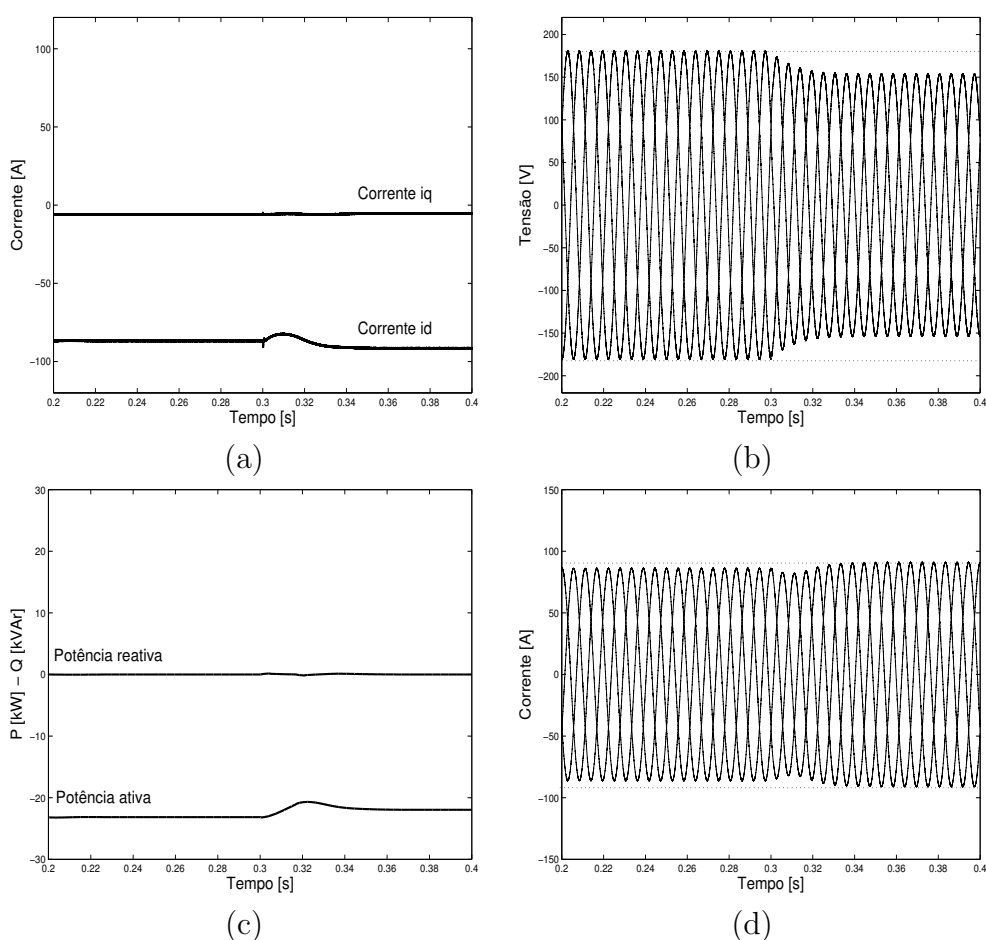


Figura 5.28: Operação do transformador com fator de potência diferente do unitário - CLR.

- (a) - Corrente de eixo d e q no conversor do lado da rede;
- (b) - Tensões trifásicas no conversor do lado da rede;
- (c) - Fluxo de potência ativa e reativa no conversor do lado da rede;
- (d) - Correntes trifásicas no conversor do lado da rede.

5.2.6.3 Rede de alimentação

Na Figura 5.29 é verificado uma mudança na potência aparente da rede, devido a alteração do fator de potência de operação do transformador em teste. A potência ativa após um pequeno transitório estabiliza na condição de operação inicial e a potência reativa e quase igual a potência aparente. A Figura 5.30 mostra que a corrente na rede aumenta, devido a alteração do fluxo de reativo no conversor do lado do transformador em teste.

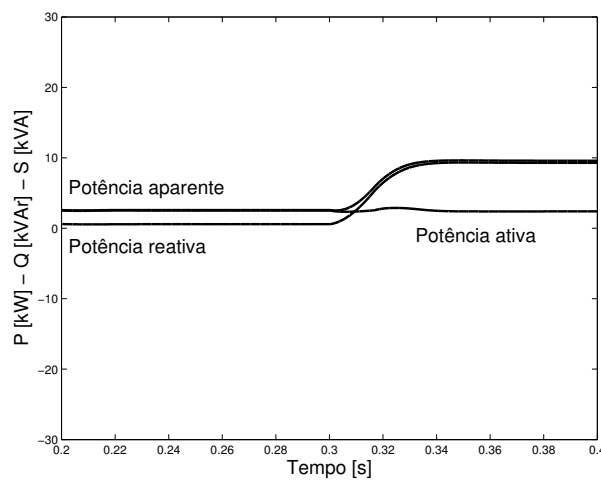


Figura 5.29: Fluxo de potência ativa, reativa e aparente na rede de alimentação.

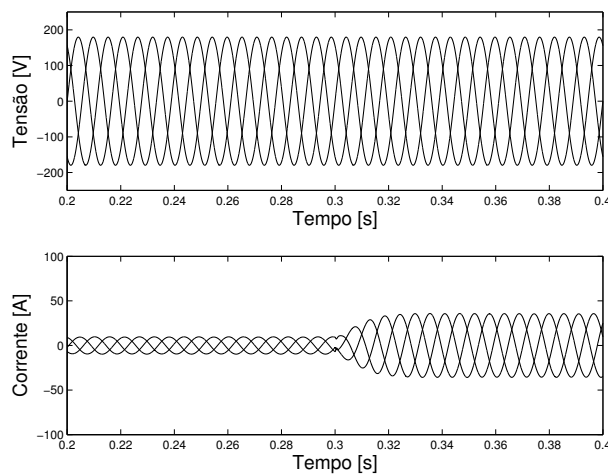


Figura 5.30: Tensões e correntes trifásica na rede de alimentação.

5.3 Comentários Finais

Neste capítulo, foram apresentados os resultados de simulações para a operação da bancada de ensaios em carga de um transformador em varias situações de funcionamento. Os resultados permitem observar os transitórios das variáveis envolvidas no momento da transição de funcionamento, condição nominal para a condição especial de funcionamento.

No ensaio do transformador, o consumo de energia é baixo, visto que o sistema opera em ciclo fechado, retirando da rede apenas o necessário para repor as perdas dos componentes internos. Para o ensaio com sobretensão, tensão abaixo do nominal e fator de potência diferente do unitário, o fluxo de potência reativa retirada ou injetada na rede de alimentação aumenta de forma significativa.

Para o ensaio do transformador em condição de sobretensão e tensão abaixo da nominal, a malha de potência ativa do conversor do lado do transformador foi retirada visto a necessidade de associar sobretensão a sobrecarga e tensão abaixo da nominal a potência abaixo da nominal. Para efetuar o ensaio de sobretensão e tensão abaixo da nominal para potência nominal basta manter a malha de potência ativa e não mudar a potência de referência.

Como pode ser observado, a utilização dos conversores estáticos para ensaio de transformadores permite o controle de todas as variáveis envolvidas, seja de forma direta ou indireta, contornando alguns problemas presentes nas outras formas de ensaio. O nível de distorção harmônica da tensão e corrente está dentro dos limites estabelecidos pelas normas vigentes (NBR5356 (2003) e IEEE-519-1992 (1993)).

Conclusões e Propostas de Continuidade

6.1 Conclusões

Este trabalho apresentou uma concepção de projeto do circuito de potência e dos controles de uma bancada para o ensaio de transformadores de potência. Entre as diversas vantagens presentes na metodologia, vale a pena destacar a possibilidade de realizar o ensaio em ambiente laboratorial de forma segura, com baixo consumo de energia e controle total sobre o carregamento do transformador.

Para este fim, um modelo completo da bancada de ensaio foi desenvolvida em ambiente Matlab/Simulink, tendo como principal equipamento um conversor CA/CC/CA com retificador controlado. As malhas de controle de cada lado do conversor foram modeladas e foram definidos os critérios de projeto dos principais controladores. Por fim, foram apresentados e analisados os resultados de cada estrutura.

A operação isolada de cada componente da estrutura e a operação global foram descritas com o auxílio de diagramas em blocos e esquemáticos. Desta forma, foram abordados as malhas de controle, os conversores e os filtros LCL's que compõem a bancada de teste.

O projeto foi precedido de um estudo através de simulação, que além de mostrar a estratégia de regulação de tensão, permitiu projetar o reator

necessário na entrada do sistema, para reduzir a potência de curto circuito, possibilitando a elevação ou redução da tensão ao valor desejado no ensaio do transformador.

A estratégia adotada no controle do conversor do lado do transformador mostrou-se capaz de realizar o ensaio de carregamento do transformador nas condições adversas desejadas. O controle do conversor do lado da rede, permitiu o controle do fluxo de potência ativa aplicada no barramento CC e a regulação da tensão para o ensaio de sobretensão e tensão abaixo da nominal no transformador em teste. O desempenho dinâmico e em regime permanente dos controladores foram bastante satisfatórios, não apresentando erro em regime permanente.

Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que o desempenho da bancada de testes experimentais é adequado para o ensaio de transformadores de potência. Com a bancada é possível efetuar o levantamento das condições térmicas e elétricas de operação de transformadores em condição de sobrecarga aliado a sobretensão.

Na implementação prática da bancada, o indutor do filtro alocado do lado do conversor deve ser construído em núcleo de ferrite, visto a presença de sinais de alta frequência. A corrente que irá circular neste núcleo está na ordem de mais ou menos $110A$, impossibilitando a construção do indutor de $2,6mH$ em apenas um núcleo, sendo assim necessário vários indutores de menor valor ligados em série.

O reator inserido na entrada do sistema para reduzir a potência de curto-circuito, permitindo a elevação da tensão no sistema altera a resposta dinâmica do filtro. Nos resultados obtidos da simulação da bancada pode-se verificar que o nível de distorção harmônica da tensão e da corrente para a condição de operação do transformador com tensão acima e abaixo da nominal aumentou, apesar de não sair da faixa aceitável. O trabalho tem a particularidade da aplicação e de projeto de estratégia de controle e de filtros para conversores operando em baixa potência de curto circuito (razão de curto circuito de 10%)

6.2 Propostas de Continuidade

Como propostas de continuidade deste trabalho, podem ser descritos alguns itens relevantes:

- implementar a bancada projetada neste trabalho, através de uma montagem;
- quantificar quanto a reatância de entrada e a alteração do fluxo de reativo no conversor do lado da rede interferem na resposta dinâmica do filtro LCL projetado;
- implementar a malha de tensão para o controle do carregamento do transformador em situação de sobretensão e tensão abaixo da nominal em malha fechada;
- validar a metodologia de cálculo do efeito da sobretensão associada ao nível de carregamento sobre o aumento de temperatura e suas consequências na vida útil dos transformadores de potência, através de uma seqüência implementada de testes;
- através das informações coletada na bancada, desenvolver modelos matemáticos paramétricos para estimar o tempo de vida útil de transformadores, utilizando técnicas de identificação;
- projetar transformadores de baixa potência que possa ser representativos em escala reduzida de transformadores de potência nos aspectos de aquecimento devido às perdas em carga e a vazio.

Referências Bibliográficas

- Barbosa, S. R. (2005). Estudos dos efeitos da sobretensão em transformadores de potência a carregamento acima da potência nominal. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais.
- Blaabjerg, F., Chiarantoni, E., Aquila, A. D., and Vergura, S. (2003). Analysis of the grid side behavior of a LCL filter based three-phase active rectifier. *IEEE*, pages 775 – 780.
- Blaski, V. and Kaura, V. (1996). A novel control to actively resonance in input LC filter of a three phase voltage source converter. *IEEE*.
- Coelho, E. A. A. (2000). *Técnicas de Controle Aplicadas ao Paralelismo de Inversores*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG.
- Coelho, E. A. A., Cortizo, P. C., and Donoso, P. F. (2002). Small-signal stability for parallel-connected inverters in stand-alone ac supply systems. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 38(2):533 – 542.
- Ebert, J. A. (1994). Application considerations for variable volts per turn power transformers. *IEEE transactions on Power Delivery*, 9(1):240– 248.
- Ebert, J. A. (2000). Power transformer operation at over and underexcitation, benefits and consequences. *IEEE transactions on Power Delivery*, 15(1):192 – 197.
- Ferreira, C. A. and Costa, V. M. (2004). Controle de tensão no fluxo de potência contínuo - modelagem e efeitos na estabilidade de tensão. *Revista Controle e Automação*, 15:459 – 466.

- IEEE-519-1992 (1993). *Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*.
- IEEE-C57.100 (1999). *IEEE Standard Test Procedure for Thermal Evaluation of Liquid-Immersed Distribution and Power Transformers*. IEEE.
- IEEE-C57.115 (1991). *IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Power Transformers Rated in Excess of 100 MVA (65 C Winding Rise)*. IEEE.
- IEEE-C57.119 (2001). *IEEE Recommended Practice for Performing Temperature Rise Tests on Oil-Immersed Power Transformers at Loads Beyond Nameplate Ratings*. IEEE.
- IEEE-C57.12.00 (2000). *IEEE Standard General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers*. IEEE.
- IEEE-C57.91 (1995). *IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers*. IEEE.
- IEEE-C57.92 (1981). *Guide for loading Mineral-oil-immersed Power Transformers*. IEEE.
- Kundur, P. S. (1994). *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill.
- Liserre, M., Blaabjerg, F., and Hansen, S. (2001). Design and control of an LCL-filter based three-phase active rectifier. *IEEE*.
- Malesani, L., Rossetto, L., Tenti, P., and Tomasin, P. (1995). Ac/dc/ac PWM converter with reduced energy storage in the dc link. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 31:287 – 292.
- Malinowski, M. and Bernet, S. (2004). Simple control schema of PWM converter connecting wind turbine with grid - simulation study. *Nordic Wind Power Conference*, pages 1 –3.
- Monticelli, A. J. (1983). *Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica*, volume 1. Editora Edgard Blucher LTDA, 1 edição.
- NBR-5416 (1997). *Aplicação de Cargas em Transformadores de Potência - Procedimentos*. ABNT.

- NBR5356 (1993). *Transformadores de Potência - Generalidade, Aquecimento, Níveis de Isolamento, Curto Circuito*. Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT.
- NBR5356 (2003). *Transformadores de Potência Parte 1 - Generalidade, Parte 2 - Aquecimento, Parte 3 - Níveis de Isolamento*. Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT.
- Oliveira, J. C., Cogo, J. R., and de Abreu, J. P. G. (2006). *Transformadores Teoria e Ensaios*, volume 1. Editora Edgard Blucher LTDA, 6 edição.
- Oliveira, R. G. (2004). Controle e integração a rede elétrica de um sistema eólico com gerador de indução duplamente excitado. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais.
- Pena, R., Clare, J. C., and Asher, G. M. (1996). Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable-speed wind-energy generation. *IEE Proc. Electr. Power Application*, 143(3).
- Silva, S. M. (1999). Estudo e projeto de um restaurador dinâmico de tensão. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG.
- Silva, S. R. and Lopes, I. J. (2004). Especificação e viabilidade de ensaios experimentais. Relatório Técnico, UFMG - Universidade Federal de Minas Gerais.
- Silva, S. R. and Lopes, I. J. S. (2006). Comprovação experimental de metodologia de avaliação de transformadores de potência em situação de operação envolvendo sobretensão de regime de carregamento acima do nominal. Relatório Técnico, Universidade Federal de Minas Gerais.
- Stevenson, W. D. (1986). *Elementos de Análise de Sistemas de Potência*. 2 edição.
- Teodorescu, R., Blaabjerg, F., Liserre, M., and Aquila, A. D. (2003). A stable three-phase LCL-filter based active rectifier without damping. *IEEE Transactions on reliability*, pages 1552 – 1557.
- Twining, E. and Holmes, D. G. (2003). Grid current refutation of a three-phase voltage source inverter with an LCL input filter. *Transactions on Power electronics*, 18(3):888 – 895.

Wang, T. C., Ye, S., Sinha, G., and Yuan, X. (2003). Output filter design for a grid-interconnected three-phase inverter. *IEEE Transactions on reliability*, pages 779 – 784.

Wu, E. and Lehn, P. W. (2005). Digital current control of a voltage source converter with active damping of LCL resonance. *IEEE*, pages 1642 – 1649.

Método de Newton Raphson

O método de Newton, usado no cálculo das raízes de uma equação algébrica não linear, é baseado na linearização sucessiva da função a partir de uma condição inicial arbitrária. Considere-se inicialmente um sistema n -dimensional ($n \times 1$):

$$\underline{g}(\underline{x}) = 0 \tag{A.1}$$

Sendo $\underline{g}(\underline{x})$ uma função vetorial ($n \times 1$) e \underline{x} o vetor das incógnitas ($n \times 1$) ou seja:

$$\underline{g}(\underline{x}) = [g_1(\underline{x}), g_2(\underline{x}), \dots, g_n(\underline{x})]^t \tag{A.2}$$

$$\underline{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^t \tag{A.3}$$

A linearização da função vetorial $\underline{g}(\underline{x})$ para $\underline{x} = \underline{x}^V$ é dada pelos dois primeiros termos da série de Taylor:

$$\underline{g}(\underline{x}^V + \Delta \underline{x}^V) \cong \underline{g}(\underline{x}^V) + J(\underline{x}^V) \Delta \underline{x}^V \tag{A.4}$$

sendo a matriz jacobiana J dada por:

$$J = \frac{\partial g}{\partial x} = \begin{vmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial x_1} & \frac{\partial g_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial g_2}{\partial x_1} & \frac{\partial g_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial g_2}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial g_n}{\partial x_1} & \frac{\partial g_n}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial g_n}{\partial x_n} \end{vmatrix}$$

O vetor de correção $\Delta \underline{x}$ é calculado supondo-se que:

$$\underline{g}(\underline{x}^V) + J(\underline{x}^V)\Delta \underline{x}^V = 0 \quad (\text{A.5})$$

Que é a maneira linearizada de se resolver $\underline{g}(\underline{x}^V + \Delta \underline{x}) = 0$.

Transformação de Variáveis

Transformação $ABC/\alpha\beta 0$

$$\begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \\ f_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2/3 & -1/3 & -1/3 \\ 0 & 1/\sqrt{3} & -1/\sqrt{3} \\ 1/3 & 1/3 & 1/3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_A \\ f_B \\ f_C \end{bmatrix} \quad (\text{B.1})$$

Transformação $\alpha\beta 0/ABC$

$$\begin{bmatrix} f_A \\ f_B \\ f_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1/\sqrt{2} \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 & 1/\sqrt{2} \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \\ f_0 \end{bmatrix} \quad (\text{B.2})$$

Transformação $\alpha\beta 0/dq0$

$$\begin{bmatrix} f_d \\ f_q \\ f_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \text{sen}\theta & 0 \\ -\text{sen}\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \\ f_0 \end{bmatrix} \quad (\text{B.3})$$

Transformação $dq0/\alpha\beta 0$

$$\begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \\ f_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\text{sen}\theta & 0 \\ \text{sen}\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_d \\ f_q \\ f_0 \end{bmatrix} \quad (\text{B.4})$$

Transformação $ABC/dq0$

$$\begin{bmatrix} f_d \\ f_q \\ f_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ -\text{sen} \theta & -\text{sen}(\theta - 2\pi/3) & -\text{sen}(\theta + 2\pi/3) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_A \\ f_B \\ f_C \end{bmatrix} \quad (\text{B.5})$$

Transformação $dq0/ABC$

$$\begin{bmatrix} f_A \\ f_B \\ f_C \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\text{sen} & 1 \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & -\text{sen}(\theta - 2\pi/3) & 1 \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & -\text{sen}(\theta + 2\pi/3) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_d \\ f_q \\ f_0 \end{bmatrix} \quad (\text{B.6})$$

Dados da Bancada Projetada

Dados do Transformador em Teste

Tabela C.1: Tabela dos dados do transformador.

Parâmetros	Valores
Potência	25kVA
Tensão primária	220V
Tensão secundária	220V

Dados do Filtro LCL

Tabela C.2: Tabela dos dados do filtro LCL.

Parâmetros	Valores	Características
Indutor (L_1)	$2,6mH$	Núcleo de ferrite
Capacitor C_f	$70\mu F$	Filme prolipropileno
Resistor (R_d)	$3,6\Omega$	-
Corrente (i)	$\approx 100A$	-
Tensão (V)	$\approx 220V$	-

Dados do Reator de Entrada

Tabela C.3: Tabela dos dados do reator de entrada.

Parâmetros	Valores	Características
Indutor (L)	$1,047mH$	Núcleo de ferro
Corrente (i)	$\approx 50A$	-
Tensão (V)	$\approx 220V$	-

Dados do Controle do Conversor do Lado da Rede

Tabela C.4: Tabela dos ganhos para o controle do CLR.

Parâmetros	Valores	Unidade
K_{pid}	37	Ω
K_{piq}	37	Ω
K_{pi0}	37	Ω
K_{pE}	20	$1/\Omega$
K_{iE}	2368	$1/\Omega$
K_{pQ}	-0,0004	$1/V$
K_{iQ}	-0,5	$1/V$

Dados do Controle do Conversor do Lado do Transformador

Tabela C.5: Tabela dos ganhos para o controle do CLT.

Parâmetros	Valores	Unidade
K_{pid}	37	Ω
K_{piq}	37	Ω
K_{pi0}	37	Ω
K_{pP}	0,0004	$1/V$
K_{iP}	0,5	$1/V$
K_{pQ}	-0,0004	$1/V$
K_{iQ}	-0,5	$1/V$