



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

RESTAURADOR DINÂMICO DE TENSÃO SEM SATURAÇÃO NOS TRANSFORMADORES DE CONEXÃO

JAIRO DIAS INOCÊNCIO

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Elétrica da Universidade Federal da Paraíba
como requisito para a obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Elétrica.

ÁREA DE CONHECIMENTO: SISTEMAS DE ENERGIA

ORIENTADOR:
DARLAN ALEXANDRIA FERNANDES

JOÃO PESSOA, PARAÍBA, BRASIL
OUTUBRO, 2013

JAIRO DIAS INOCÊNCIO

**RESTAURADOR DINÂMICO DE TENSÃO SEM SATURAÇÃO NOS
TRANSFORMADORES DE CONEXÃO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Elétrica da Universidade Federal da Paraíba
como requisito para a obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Elétrica.

ÁREA DE CONHECIMENTO: SISTEMAS DE ENERGIA

**ORIENTADOR:
DARLAN ALEXANDRIA FERNANDES**

**JOÃO PESSOA, PARAÍBA, BRASIL
OUTUBRO, 2013**

I58r Inocêncio, Jairo Dias.
Restaurador dinâmico de tensão sem saturação nos transformadores de conexão / Jairo Dias Inocêncio.-- João Pessoa, 2013.
64f. : il.
Orientador: Darlan Alexandria Fernandes
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT
1. Engenharia elétrica. 2. Restaurador Dinâmico de Tensão. 3. Fluxo concatenado. 4. Saturação. 5. Transformador. 6. Inversor de tensão.

UFPB/BC

CDU: 621.3(043)

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA – UFPB
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS – CEAR
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - PPGE

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação

**RESTAURADOR DINÂMICO DE TENSÃO SEM SATURAÇÃO NOS
TRANSFORMADORES DE CONEXÃO**

Elaborada por

Jairo Dias Inocêncio

como requisito para obtenção do grau de

Mestre em Engenharia Elétrica.

COMISSÃO EXAMINADORA

PROF. DR DARLAN ALEXANDRIA FERNANDES (Presidente)
ORIENTADOR

PROF. DR ALEXANDRE CÉZAR DE CASTRO
EXAMINADOR INTERNO

PROF. DR ABEL CAVALCANTE LIMA FILHO
EXAMINADOR EXTERNO

João Pessoa/PB, ____ de _____ de _____.

A minha esposa Cinthia, pelo amor e apoio incondicional em todos os momentos.
Aos meus pais, Juraci e Graça, pelo cuidado, amor e lições de vida.

Dedico

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelas dádivas e bênçãos derramadas na minha vida.

Ao Prof. Dr. Darlan Fernandes, pela dedicação e préstimos nas correções e orientações neste período de aprendizado.

A Fabiano Fragoso pela contribuição e colaboração na ideia central contida neste trabalho.

A Gabriel Guimarães, aluno de iniciação científica, pela contribuição na parte experimental desse trabalho.

Aos meus colegas de trabalho engenheiros Flávio Carvalho e Átila Bonifácio pelo apoio e ajuda sempre que necessário.

Aos técnicos do DEE, Altemir Tomaz, Pedro Marcelo e Flaviano Batista pelo tempo dedicado à montagem experimental deste trabalho.

“A verdadeira medida de um homem não se vê na forma como se comporta em momentos de conforto e conveniência, mas em como se mantém em tempos de controvérsia e desafio.”

Martin Luther King Jr.

RESUMO

RESTAURADOR DINÂMICO DE TENSÃO SEM SATURAÇÃO NOS TRANSFORMADORES DE CONEXÃO

Este trabalho apresenta uma técnica para evitar a saturação dos transformadores de tensão em série aplicados em um restaurador dinâmico de tensão (DVR). A técnica consiste em alterar as tensões que são injetadas através dos transformadores para compensar afundamentos de tensão no sistema de potência. O método apresentado assegura uma eliminação completa do fluxo c.c. ou desloca a curva de fluxo, restringido sua amplitude c.a., de maneira que o nível de fluxo não exceda os limites do transformador, evitando que o mesmo trabalhe na região de saturação. A validação deste método será realizada a partir de simulações e resultados experimentais.

Descritores: Restaurador Dinâmico de Tensão, fluxo concatenado, saturação, transformador, inversor de tensão.

ABSTRACT

DYNAMIC VOLTAGE RESTORER WITHOUT CONNECTION TRANSFORMERS SATURATION

This work presents a technique to suppress saturation in series transformers applied to dynamic voltage restorer (DVR) systems. The technique consists in correcting the voltages which are injected through the transformers into the power system to compensate voltage sags. The presented method ensures complete elimination of the DC flux-linkage or shifts the flux-linkage curve, restricting their AC amplitude, so that the flux level does not exceed the limits of the transformer, preventing it works in the saturation region. The validation of this method will be realized from simulations and experimental results.

Key words: Dynamic Voltage Restorer, flux-linkage, saturation, transformer, voltage inverter

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	IX
LISTA DE TABELAS	X
GLOSSÁRIO.....	XI
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	12
1.1 MOTIVAÇÃO.....	15
1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO.....	16
CAPÍTULO 2 – CONTROLADORES DE TENSÃO SÉRIE.....	18
2.1 MODOS DE OPERAÇÃO DE UM DVR.....	22
2.2 LIMITAÇÕES DOS DVRS.	23
2.3 SATURAÇÃO DOS TRANSFORMADORES DE CONEXÃO DE UM DVR.....	24
CAPÍTULO 3 – MÉTODO PARA EVITAR SATURAÇÃO	28
3.1 MÉTODO PROPOSTO	28
3.2 ALGORITMO DE IMPLEMENTAÇÃO DO MÉTODO	33
3.3 FLUXOGRAMA DE IMPLEMENTAÇÃO DO MÉTODO	35
3.4 ANÁLISE DO MÉTODO	36
CAPÍTULO 4 – PLATAFORMAS DE SIMULAÇÃO E EXPERIMENTAL.....	38
4.1 PLATAFORMA DE SIMULAÇÃO DO DVR	38
4.2 PLATAFORMA EXPERIMENTAL DO DVR.....	40
CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E ANÁLISES	42
5.1 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO	42
5.2 RESULTADOS EXPERIMENTAIS	48
CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES.....	54
6.1 TRABALHOS FUTUROS	55

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56
APÊNDICE A – MÉTODO PARA LIMITAR O FLUXO NO TRANSFORMADOR	60
APÊNDICE B – ESQUEMA ELÉTRICO BANCADA DVR.....	63
APÊNDICE C - PUBLICAÇÕES	64

LISTA DE FIGURAS

1.1 - CONFIGURAÇÃO DE UM SISTEMA COM DVR	15
2.1 - CONTROLADOR DE TENSÃO SÉRIE	18
2.2 - ELEMENTOS BÁSICOS DE UM DVR EM UMA REPRESENTAÇÃO MONOFÁSICA	20
2.3 - CONTROLE DE TENSÃO EM MALHA ABERTA DE UM DVR	21
2.4 - CONTROLE DE TENSÃO EM MALHA FECHADA DE UM DVR	21
2.5 - TENSÕES DE COMPENSAÇÃO E FLUXO CONCATENADO NO TRANSFORMADOR	25
3.1 - FLUXO CONCATENADO NOS TRÊS TRANSFORMADORES DE INJEÇÃO DO DVR	29
3.2 - TENSÃO DE COMPENSAÇÃO INICIANDO EM UM SEMICICLO POSITIVO PARA UMA DAS FASES	30
3.3 - TENSÃO DE COMPENSAÇÃO INICIANDO EM UM SEMICICLO NEGATIVO PARA UMA DAS FASES	31
3.4 - FLUXOGRAMA DE IMPLEMENTAÇÃO DO MÉTODO DE CONTROLE DE FLUXO..	35
3.5 - FLUXO CONCATENADO NO TRANSFORMADOR	36
4.1 - PLATAFORMA DE SIMULAÇÃO PARA O SISTEMA DVR	39
4.2 - DETALHE DO INVERSOR DE TENSÃO DE 4 BRAÇOS USADOS NO SISTEMA DVR	39
4.3 - DVR EM ESCALA LABORATORIAL	41
5.1 - RESULTADOS DE SIMULAÇÃO PARA O SISTEMA DVR: SITUAÇÃO 1	43
5.2 - RESULTADOS DE SIMULAÇÃO PARA O SISTEMA DVR: SITUAÇÃO 2	45
5.3 - RESULTADOS DE SIMULAÇÃO PARA O SISTEMA DVR: SITUAÇÃO 3	47
5.4 - CIRCUITO PARA MEDIÇÃO DO NÍVEL DE SATURAÇÃO DO TRANSFORMADOR	48
5.5 - CURVA DE HISTERESE EXPERIMENTAL DO TRANSFORMADOR	48
5.6 - CORREÇÃO DE TENSÃO PELO DVR PARA UM AFUNDAMENTO NA FASE A - CASO 1	50
5.7 - CORREÇÃO DE TENSÃO PELO DVR PARA UM AFUNDAMENTO NA FASE A - CASO 2	51
5.8 - CORREÇÃO DE TENSÃO PELO DVR PARA UM AFUNDAMENTO NA FASE A - CASO 3	52
5.9 - CORREÇÃO DE TENSÃO PELO DVR PARA UM AFUNDAMENTO NA FASE A - CASO 4	53

LISTA DE TABELAS

1.1 - CLASSIFICAÇÃO DAS VARIAÇÕES DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO .	13
4.1 - PARÂMETROS PARA SIMULAÇÃO DO SISTEMA DVR	38

GLOSSÁRIO

ANEEL	-	Agência Nacional de Energia Elétrica
c.a.	-	Corrente Alternada
c.c.	-	Corrente Contínua
DSC	-	<i>Digital Signal Controller</i>
DVR	-	<i>Dynamic Voltage Restorer</i>
IEEE	-	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IGBT	-	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>
IGCT	-	<i>Integrated Gate Commutated Thyristor</i>
MQR	-	Mínimos Quadrados Recursivos
Prodist	-	Procedimento de Distribuição
pu	-	Por Unidade
PWM	-	<i>Pulse Width Modulation</i>
QEE	-	Qualidade de Energia Elétrica
VSI	-	<i>Voltage Source Inverter</i>
VTCD	-	Variação de Tensão de Curta Duração

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O termo Qualidade de Energia Elétrica (QEE) é utilizado para expressar, através de indicadores qualitativos e quantitativos, os padrões de serviço e de produto oferecidos pelos diversos agentes do setor de energia elétrica aos consumidores. Basicamente, busca retratar a continuidade do suprimento e a conformidade das formas de onda de tensão e corrente, tomando como referência as características consideradas adequadas para o bom desempenho do sistema elétrico.

A QEE tem-se tornado uma preocupação crescente e comum às empresas de energia elétrica e aos consumidores de modo geral. O interesse progressivo pela QEE deve-se, principalmente, à evolução tecnológica dos equipamentos eletroeletrônicos, hoje amplamente utilizados nos diversos segmentos de atividades industrial, comercial e residencial. Frente a estas novas demandas tecnológicas, pode-se dizer que os equipamentos eletroeletrônicos atuais, ao incorporarem mais funções de controle, tendem a tornarem-se mais sensíveis a perturbações provenientes do sistema elétrico de potência (STONES; COLLINSON, 2001).

As principais categorias de distúrbios eletromagnéticos que degradam a qualidade de energia elétrica são: harmônicas, flutuações de tensão, desequilíbrios de tensão, variações de frequência e variações de tensão de longa e curta duração.

As variações de tensão de curta duração (VTCDs) representam atualmente os eventos de maior importância na avaliação da QEE do ponto de vista dos consumidores industriais, comerciais e domésticos (BOLLEN, 2000; GHOSH; LEDWICH, 2002; COSTA; ALVES, 2003; CHEN, 2005; ZHAN et al., 2006; KAGAN et al., 2006).

Dentre as VTCDs, os afundamentos de tensão são os eventos mais incidentes nos sistemas de potência. Pesquisas indicam que 92% das interrupções

em instalações industriais estão relacionadas com afundamentos de tensão (CHEN et al., 2010). O impacto econômico para as indústrias pode representar milhões em perdas monetárias devido a danos em equipamentos e perdas de produção (TAN; RAMACHANDARAMURTHY, 2012).

Na Tabela 1.1, a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), no Módulo 8 do Prodist (Procedimentos de Distribuição) que trata da Qualidade de Energia Elétrica classifica as variações de tensão de curta duração. As variações são classificadas de acordo com a duração do evento e divididas em momentâneas ou temporárias, as primeiras sendo iguais ou inferiores a 3 segundos ($\leq 3s$) e as últimas maiores que 3 segundos e menores que 3 minutos. Se uma diminuição da amplitude da tensão em relação à tensão de referência for superior ou igual a 10% e inferior a 90% e tiver duração superior ou igual a um ciclo (16,67ms para uma frequência de 60Hz) já está caracterizado um afundamento momentâneo de tensão.

Para um equipamento corrigir um afundamento momentâneo de tensão ele necessita ser muito rápido na identificação do problema, cálculo da solução e aplicação da mesma, dispondo de uma janela de tempo de poucos milissegundos.

Classificação	Denominação	Duração da Variação	Amplitude da tensão (valor eficaz) em relação à tensão de referência
Variação Momentânea de Tensão	Interrupção Momentânea de Tensão	Inferior ou igual a três segundos	Inferior a 0,1 p.u
	Afundamento Momentâneo de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u
	Elevação Momentânea de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior a 1,1 p.u
Variação Temporária de Tensão	Interrupção Temporária de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Inferior a 0,1 p.u
	Afundamento Temporário de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u
	Elevação Temporária de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior a 1,1 p.u

Tabela 1.1. Classificação das Variações de Tensão de Curta Duração. (Fonte: Aneel–Prodist–Módulo 8–Qualidade de Energia, 2012)

Em geral, as VTCDs são associadas à faltas no sistema elétrico de potência, falhas em equipamentos de proteção, chaveamentos capacitivos ou indutivos, entrada ou saída temporária de porte significativo em relação ao nível de curto-circuito local do sistema (GHOSH; LEDWICH, 2002).

Os afundamentos de tensão nas cargas de um sistema, que é uma redução na magnitude da tensão de fornecimento seguido de seu restabelecimento depois de um curto período de tempo, são em sua grande maioria causados devido às faltas no sistema e, portanto, um problema comum, já que faltas no sistema elétrico são muito frequentes.

Existem várias abordagens para mitigar esse problema. Uma maneira seria realizar maiores investimentos nos projetos de sistemas de energia a fim de reduzir o número e o tempo de compensação das falhas ou para instalar caminhos redundantes para alimentar cargas críticas (AVENDAO; MILANOVIC, 2012). Essas soluções não são simples de serem implementadas e são geralmente dispendiosas. Outra abordagem é a aplicação de equipamentos de mitigação na interface sistema de potência-carga. Um desses equipamentos é o restaurador dinâmico de tensão (DVR).

O DVR é um dos dispositivos de potência personalizados mais eficazes para queda de tensão e compensação de elevação e tem atraído atenção crescente nos últimos anos (GOHARRIZI et al., 2012; KANJIYA et al., 2011; NAIDU; FERNANDES, 2009; FERNANDES; NAIDU, 2008).

Na Figura 1.1 um sistema elétrico incorporando um DVR está representado. Os vários tipos de cargas que são conectadas aos sistemas de potência são mostradas, dentre elas cargas lineares, não lineares e cargas sensíveis às variações de tensão. Para esse último tipo de carga, um DVR pode ser conectado na interface sistema de potência-carga através de transformadores em série, como pode ser observado. O DVR é composto pela parte do armazenamento de energia, que irá suprir a energia necessária para a correção do distúrbio e pelo conversor de potência, que é o elemento principal do dispositivo, responsável pela injeção da tensão na rede. Posteriormente o restaurador dinâmico de tensão será apresentado em detalhes.

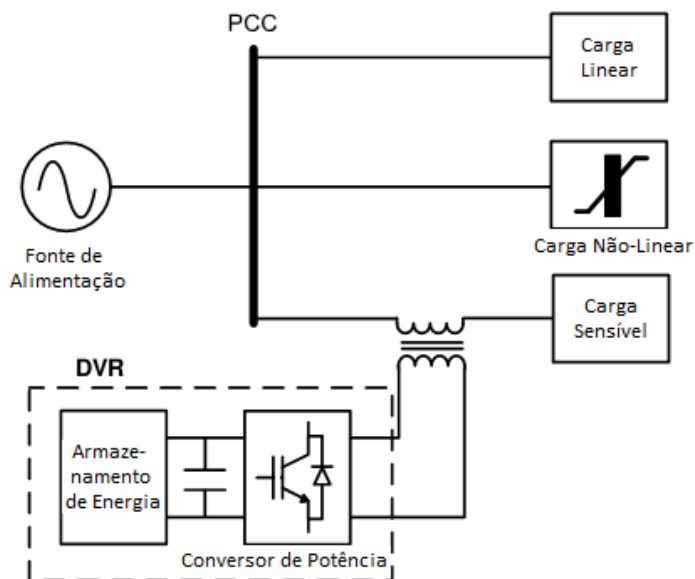


Figura 1.1. Configuração de um sistema com DVR

1.1 MOTIVAÇÃO

O DVR injeta tensões de compensação nas linhas de energia através de um transformador trifásico em série ou três transformadores monofásicos em série. Quando o sistema DVR corrige um afundamento de tensão um problema pode surgir. Dependendo do afundamento a ser corrigido, a tensão de compensação injetada pode fazer com que o fluxo concatenado no núcleo do transformador ultrapasse o limite nominal (TAYLOR et al., 2012). Isso, por sua vez, leva o transformador a trabalhar na região de saturação, ocasionado sobrecorrente e sobreaquecimento, o que reduz a vida útil do equipamento. Outra consequência do transformador trabalhar nesse modo é que os valores de tensão durante o afundamento não serão restaurados corretamente.

Para superar este problema, uma alternativa é superdimensionar os transformadores em série, o que acarreta um aumento no peso, tamanho físico e custo do transformador (MIDDLEKAUFF; COLLINS, 1998). Além desses contras uma diminuição do fator de potência do sistema também pode acontecer.

O fluxo concatenado excedente pode ser causado por uma componente de corrente contínua cuja amplitude depende do ângulo de fase inicial da tensão de compensação. Então, outra abordagem para superar o problema da saturação nos transformadores é realizar o controle do fluxo concatenado, limitando a tensão injetada para compensar o afundamento.

Em muitos sistemas de compensação de afundamentos, os transformadores são dimensionados para corrigir afundamentos geralmente iguais ou menores do que a tensão nominal da carga protegida, sem levar em consideração a saturação dos transformadores (CHEN et al., 2010; JIMICHI et al., 2011). Por conseguinte, é fundamental que o sistema desenvolvido esteja preparado para lidar com a problemática da saturação dos transformadores de conexão. É importante para o sistema de controle do fluxo concatenado lidar com a possibilidade de afundamentos de tensão que levem os transformadores a trabalharem na região de saturação, como também manter o fluxo concatenado dentro dos limites máximos do transformador.

Uma vez que o fluxo ultrapasse esse limite, as consequências negativas, como já citadas, irão acometer o sistema.

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

O objetivo geral deste trabalho é propor uma técnica para evitar a saturação dos transformadores de tensão em série de um DVR. Esta metodologia consiste em alterar as tensões que são injetadas, se a partir delas o fluxo estimado ultrapassar o valor limite de saturação dos transformadores. A alteração das tensões de compensação consiste em restringi-las durante o afundamento sempre que prever que o limite máximo para o fluxo concatenado estiver prestes a ser ultrapassado.

A aplicação deste método será mostrada a partir de simulações e resultados experimentais obtidos da montagem em laboratório de um sistema DVR.

Para alcançar os objetivos propostos acima, organizou-se este trabalho de acordo com os seguintes capítulos:

- No capítulo 2 são apresentados os controladores de tensão série. O DVR é apresentado, bem como seus modos de operações, limitações e a saturação dos transformadores de conexão.
- No capítulo 3 o método para evitar a saturação dos transformadores de conexão é apresentado.
- No capítulo 4 é mostrada a plataforma de simulação e a plataforma experimental, e também são descritas as partes que constituem as mesmas.
- No capítulo 5 os resultados são apresentados. A técnica proposta é testada mediante simulações e experimentalmente a partir de condições semelhantes à faltas ocorridas em uma rede elétrica.
- No capítulo 6 são apresentadas as conclusões.

CAPÍTULO 2

CONTROLADORES DE TENSÃO SÉRIE

O princípio básico da compensação série é simples: inserir uma tensão de amplitude e frequência solicitada. Assim, o compensador série pode restaurar a tensão do lado da carga para uma amplitude e forma de onda desejada mesmo quando a fonte de tensão é desequilibrada ou distorcida (FERNANDES, 2008).

Um dispositivo eletrônico de potência como base de um compensador série e que pode proteger cargas sensíveis a perturbações é mostrado na Figura 2.1. Este dispositivo faz uso de chaves de potência, como por exemplo, IGBTs e é capaz de injetar um conjunto de três tensões de saída c.a. em série e sincronizadas com as tensões do alimentador de distribuição.

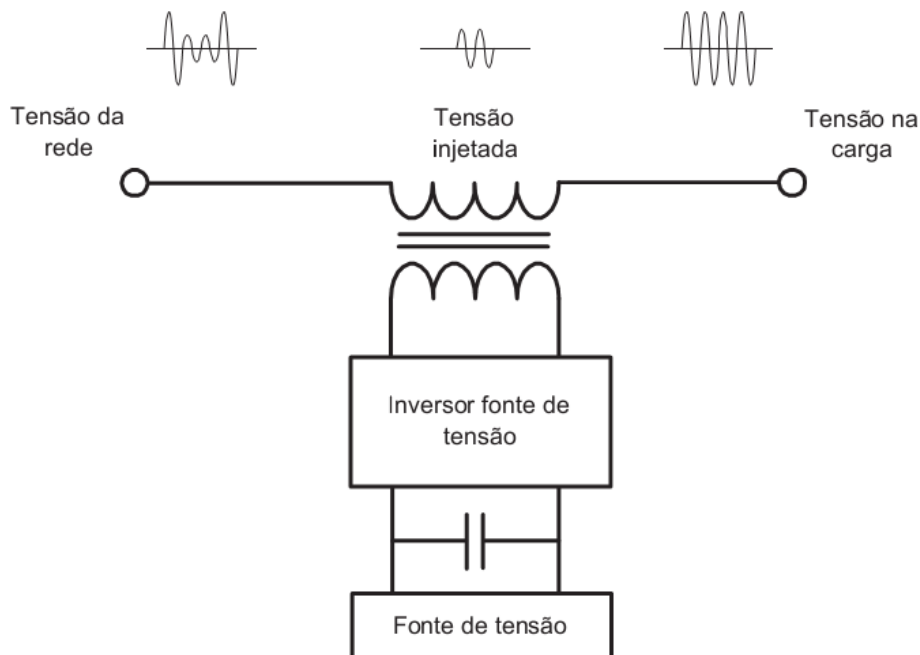


Figura 2.1. Controlador de Tensão Série
Fonte: FERNANDES, 2008

A amplitude e o ângulo de fase das tensões injetadas são variáveis permitindo o controle das potências ativa e reativa transferidas entre o compensador e o sistema de distribuição.

O terminal de entrada c.c. deste compensador é conectado a uma fonte de energia que irá fornecer a potência transferida entre o compensador e o sistema de distribuição. Como já visto, o Restaurador Dinâmico de Tensão (DVR) é um compensador de tensão conectado em série ao sistema.

Em agosto de 1996, a Westinghouse Electric Corporation instalou o primeiro DVR no mundo, na subestação de 12,47kV Duke Power Company em Anderson, Carolina do Norte, Estados Unidos (WOODLEY et al., 1999; WOODLEY, 2000). O comissionamento seguinte de um DVR foi feito pela Westinghouse em fevereiro de 1997 no sistema de distribuição da Powercor em Stanhope, Victoria, Austrália. O mesmo foi feito para proteger uma planta de processamento de leite. A economia resultante da instalação deste DVR é estimada em mais de US\$ 100.000 por ano (GHOSH; LEDWICH, 2002). A Asea Brown Boveri (ABB) tem vários DVRs instalados pelo mundo a partir de inversores com chaves de potência do tipo IGCT. No Brasil, um DVR foi instalado em um sistema de média tensão (13,8 kV) em São José dos Pinhais, região metropolitana de Curitiba (BIANCHIN, 2008).

Apesar dos restauradores dinâmicos de tensão (DVRs) vistos na literatura apresentarem uma diversidade de topologias, estes seguem uma estrutura base que pode ser dividida em fonte de energia, barramento c.c., inversor fonte de tensão, circuito de filtro e transformadores.

Na Figura 2.2 são apresentados os elementos básicos de um DVR em uma representação monofásica. O barramento c.c., que vai suprir a energia necessária para corrigir o afundamento, é mantido em um valor constante pela fonte de alimentação, esta podendo ser a própria rede ou uma alimentação auxiliar. O inversor de tensão converte a tensão c.c. na tensão c.a. com amplitude, frequência e fase solicitada. Neste trabalho foi utilizada a modulação escalar para a geração do sinal PWM para controlar os gatilhos dos IGBT's. A tensão na saída do inversor é filtrada pelo filtro passa-baixa de modo que seja inserida somente a componente fundamental no sistema. A injeção de tensão é realizada através dos transformadores de conexão, que podem ser três transformadores monofásicos ou um transformador trifásico.

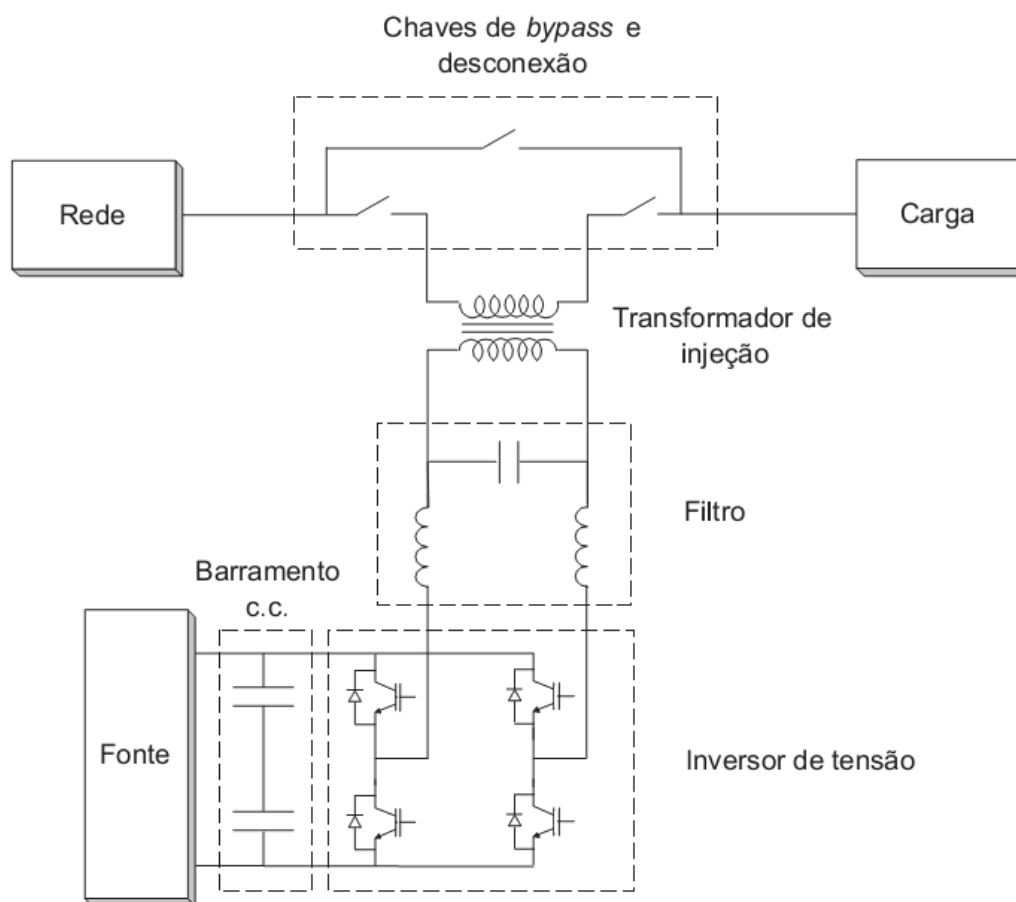


Figura 2.2. Elementos básicos de um DVR em uma representação monofásica.
Fonte: FERNANDES, 2008

De uma forma geral, estas são as partes necessárias para proceder à inserção de tensão para correção de afundamentos na rede. Ademais, cada uma destas partes pode ser construída aplicando-se uma determinada topologia e estratégias diferentes, as quais irão depender de fatores como: potência nominal disponível do DVR, diferentes condições de carga, problemas de qualidade da tensão (elevação ou distorção) ou mesmo tipos diferentes de afundamentos (NIELSEN et al., 2001).

Em um DVR, a geração dos sinais PWM com posterior filtragem e inserção das tensões de correção, sem realimentação de tensão e/ou corrente, classifica o sistema de controle como sendo em malha aberta.

O princípio de operação do controlador de tensão em malha aberta é ilustrado na Figura 2.3. A partir das tensões de referência e medições das tensões da rede é possível calcular as tensões a serem injetadas.

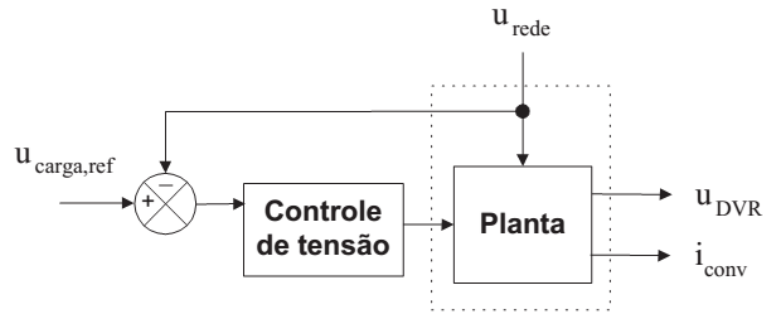


Figura 2.3. Controle de tensão em malha aberta de um DVR.
Fonte: FERNANDES, 2008

No controle em malha aberta, o parâmetro de referência é a tensão desejada na carga, $u_{carga,ref}$. A tensão de erro, $u_{rede,erro}$, deve ser injetada pelo DVR:

$$u_{rede,erro} = u_{carga,ref} - u_{rede} \quad (2.1)$$

A corrente do conversor pode servir de informação para a determinação da queda de tensão provocada pelo filtro. Uma queda de tensão no filtro e no transformador, u_{queda} , pode ser determinada e utilizada para compensar com o controle em malha aberta, ou seja:

$$u_{conv,ref} = u_{rede,erro} + u_{queda} \quad (2.2)$$

No controle em malha fechada, as tensões de carga ou as tensões do DVR são medidas e utilizadas no laço da realimentação.

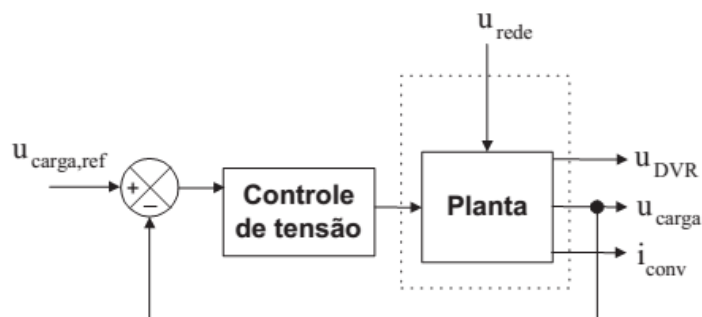


Figura 2.4. Controle de tensão em malha fechada de um DVR.
Fonte: FERNANDES, 2008

A Figura 2.4 ilustra o princípio do controle em malha fechada com a tensão de carga utilizada no laço de realimentação.

Neste trabalho o tipo de controle utilizado é o de malha aberta. Com este tipo de controle, a tensão do lado da rede é comparada com uma tensão de referência e a tensão de erro resultante é utilizada na geração do sinal PWM. Algumas vantagens são apontadas, principalmente devido a maior simplicidade de implementação em um microprocessador, sendo ainda possível apresentar bons resultados em relação ao objetivo de controle. O controle em malha fechada tem o potencial de obter uma resposta mais rápida e correta, mas por outro lado o projeto dos controladores é mais complexo.

É importante fazer menção sobre os modos de operação e as limitações de um DVR, os quais estão intimamente relacionados às estratégias de controle.

2.1 MODOS DE OPERAÇÃO DE UM DVR

O DVR basicamente pode funcionar em três diferentes modos de operação, que são apresentados como:

- Modo by-pass. O DVR é transpassado eletricamente durante correntes elevadas e curtos-circuitos a montante. É utilizado também para fins de manutenção. Neste modo, o equipamento fica impossibilitado de melhorar a qualidade da tensão.
- Modo standby. As tensões da rede estão no nível nominal e o DVR está pronto para compensar uma queda de tensão. Durante o modo standby, o equipamento pode ter funções secundárias e modos de operação (BOLLEN, 2000), como por exemplo, o modo de pequenas perdas.
- Modo ativo. A queda de tensão é detectada e o DVR injeta a tensão necessária para restabelecer a tensão nominal. O interesse neste trabalho é o estudo com o DVR operando no modo ativo.

O modo de pequenas perdas, ou seja, quando não há chaveamento até um determinado nível de tensão e as perdas são minimizadas, pode ser realizado em locais onde existe tolerância de tensão sobre a carga. Em locais com baixa

qualidade de tensão, as perdas no DVR pode ter uma prioridade secundária, sendo mais adequado operar no modo ativo para melhorar a qualidade de tensão da carga.

2.2 LIMITAÇÕES DOS DVRs

As limitações dos DVRs estão intimamente relacionadas com as estratégias de controle. Pode acontecer o caso em que a queda de tensão seja maior que a capacidade do dispositivo restaurar completamente a tensão afundada. Quatro importantes limitações a serem observadas para um DVR são (NIELSEN et al., 2001):

- Limite de tensão: O projeto do DVR é limitado pela capacidade de injeção de tensão, e consequente queda de tensão sobre o dispositivo.
- Limite de corrente: Uma menor demanda do nível de corrente pode baixar o custo do equipamento.
- Limite de potência: A potência é fornecida pelo barramento c.c., que pode ser convertida da própria rede ou ser provida de uma fonte c.c. auxiliar. Normalmente um conversor adicional é utilizado para manter a tensão do barramento constante e o suprimento deste conversor pode introduzir um limite de potência ao DVR.
- Limite de energia: A energia é utilizada para manter a tensão de carga constante e a injeção normalmente é dimensionada tão baixa quanto possível com o objetivo de reduzir custos. Alguns afundamentos consomem rapidamente esta energia e um controle adequado pode reduzir o risco de colapso causado pela falta da energia.

Outros fatores são importantes para a estratégia de controle e incluem ainda outras restrições de ordens físicas:

- Saturação: A injeção de tensões elevadas pode levar os transformadores à saturação, o que degrada completamente as tensões da carga e faz elevar os níveis de corrente (MIDDLEKAUFF; COLLINS, 1998)

- *In-rush*: No início da compensação, o fluxo de injeção no transformador pode causar correntes de magnetização (correntes de *in-rush*) de valores elevados durante a energização do transformador.
- Banda de passagem: Uma determinada banda de passagem tem influência na velocidade da resposta do sistema. Uma largura inadequada pode comprometer a compensação.
- Impedância do filtro: O filtro passa-baixas se faz necessário, mas ele pode causar quedas de tensão indesejáveis sobre o DVR e gerar oscilações de corrente nos componentes do filtro.

As limitações são bastante relevantes e devem ser levadas em consideração quando as estratégias de controle são desenvolvidas e avaliadas.

O foco deste trabalho será na primeira restrição de ordem física citada anteriormente, a saturação dos transformadores de conexão.

2.3 SATURAÇÃO DOS TRANSFORMADORES DE CONEXÃO DE UM DVR

Transformadores de potência podem apresentar valores elevados de correntes de magnetização após a energização, tais valores vão depender da intensidade da fonte, da impedância de dispersão, do fluxo residual do transformador e também do ângulo da tensão aplicada na energização.

A utilização de transformadores trabalhando na região de saturação é um problema a ser considerado nos sistemas que utilizam Restaurador Dinâmico de Tensão (DVR). As correntes de energização podem ser muito grandes, em alguns casos, excedendo 10 pu e com duração de até dezenas de segundos. Estas correntes de valores elevados aquecem significativamente os enrolamentos, resultando em degradação dos isolamentos.

Para superar o problema da saturação nos transformadores em série do dispositivo, uma alternativa é superdimensionar os transformadores em série. Para evitar saturação sob quaisquer condições, o transformador deve ser dimensionado de maneira que suporte duas vezes o fluxo concatenado máximo requerido em

estado estacionário para a máxima injeção de tensão sem que ocorra saturação (MIDDLEKAUFF; COLLINS, 1998).

Essa abordagem acarreta um aumento no peso, no tamanho físico e no custo do transformador, o que pode inviabilizar a aplicação do dispositivo. Outra abordagem é controlar o fluxo concatenado limitando a tensão injetada para compensar o afundamento.

Em (NIELSEN et al., 2004) o fluxo concatenado nos transformadores do DVR é mantido dentro de um limite máximo. Os controladores de saturação são concebidos para manter as tensões de referência do conversor em zero quando as correntes no mesmo alcançam um valor especificado. A tensão de referência é mantida em zero até que a corrente reduza o seu valor para um limite aceitável ou a tensão de referência seja alterada.

Em (CHENG et al., 2007) o fluxo é calculado por meio da integral da tensão e sempre que atinge um determinado limite a tensão é ajustada para zero. O princípio básico desse método é controlar a tensão injetada para que o fluxo concatenado do transformador não exceda um fluxo concatenado máximo pré-determinado. Isso pode ser obtido modificando a tensão aplicada ao transformador quando o fluxo tende a ultrapassar o limite máximo. A Figura 2.5 mostra a aplicação desse método.

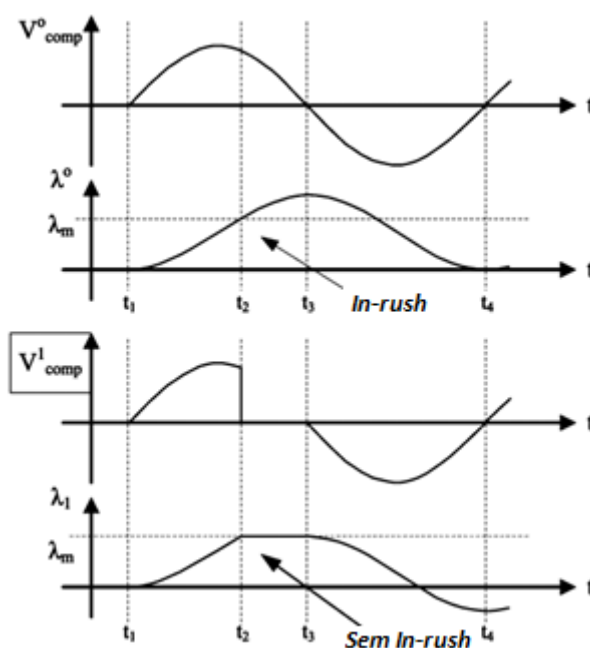


Figura 2.5. Tensões de compensação e fluxo concatenado no transformador
Fonte: CHENG et al., 2007

O método proposto em (JIMICHI et al., 2008) também faz uso da estimativa do fluxo concatenado com a finalidade de limitar as tensões de compensação. O método proposto é caracterizado pela não injeção de tensão de compensação durante um sexto do período (3,3ms à 50Hz) embora o afundamento de tensão nos terminais da carga esteja ocorrendo nesse período. A compensação do afundamento simplesmente inicia, para e depois reinicia em tempos pré-fixados.

A injeção da tensão está dividida em três intervalos de tempo. Entre o instante de detecção do afundamento e um sexto do período fundamental T após a detecção do afundamento, a tensão de compensação a ser injetada é totalmente aplicada para compensar o afundamento. Entre $T/6$ e $T/3$, a tensão injetada é ajustada para zero. A partir do instante $T/3$, novamente a tensão de compensação é aplicada totalmente.

Em (FITZER et al., 2002), dois métodos para controle do fluxo concatenado são apresentados. A prevenção da saturação nos transformadores é alcançada aplicando um fator de forma à tensão injetada. No primeiro método, o fator de forma é constante e a tensão de compensação é multiplicada por $\frac{1}{2}$ durante o primeiro meio ciclo da fundamental após o instante de detecção do afundamento e, após este período, a tensão de compensação completa é usada. Isto assegura que o fluxo c.c seja eliminado. O segundo método usa um fator de forma adaptativo. Dependendo da amplitude da tensão aplicada no transformador, e levando em conta a prevenção da saturação, pode não ser necessário remover completamente o fluxo c.c. Isso significa que para afundamentos menos severos em relação às características nominais do DVR, uma tensão proporcionalmente maior pode ser injetada inicialmente. O método então prevê se o fluxo concatenado ultrapassará o limite máximo durante o estágio inicial do afundamento de tensão, dentro de um meio ciclo após o cruzamento do zero. Se o fluxo máximo for excedido, então se introduz um fator de forma para limitar a tensão de compensação a ser injetada.

Em muitos sistemas de compensação de afundamentos, os transformadores são dimensionados para corrigir afundamentos geralmente iguais ou menores do que a tensão nominal da carga protegida, sem levar em consideração a saturação dos transformadores (CHEN et al., 2010; JIMICHI et al., 2011).

Por conseguinte, é fundamental que o sistema desenvolvido esteja preparado para lidar com a problemática da saturação dos transformadores de

conexão. É importante para o sistema de controle do fluxo concatenado poder lidar com a possibilidade de afundamentos de tensão que levem os transformadores a trabalharem na região de saturação, como também manter o fluxo concatenado dentro dos limites máximos do transformador.

Este trabalho propõe uma técnica para evitar a saturação dos transformadores de tensão em série de um DVR. O método consiste em alterar as tensões que são injetadas, se a partir delas o fluxo estimado ultrapassar o valor limite de saturação dos transformadores, restringindo as tensões de compensação durante o afundamento sempre que prever que o limite máximo para o fluxo concatenado estiver prestes a ser ultrapassado. A predição do fluxo é realizada no início da queda de tensão. Além disso, o método permite que certo nível de compensação de afundamento seja alcançado mesmo que a previsão de exceder o limite do fluxo seja confirmada. A validação deste método será realizado a partir de simulações e resultados experimentais obtidos da montagem em laboratório de um sistema DVR.

CAPÍTULO 3

MÉTODO PARA EVITAR SATURAÇÃO

3.1 MÉTODO PROPOSTO

Considere a tensão de compensação, v_c , descrita por:

$$v_c(t) = V \cos(\omega t + \alpha) \quad (3.1)$$

Na qual ω é a frequência fundamental e α é a fase inicial da tensão de compensação. Pela lei de Faraday, o fluxo concatenado, λ , no núcleo do transformador em um dado instante t , pode ser expresso por:

$$\lambda = \int_0^t V \cos(\omega \tau + \alpha) d\tau \quad (3.2)$$

Resolvendo essa integração, e supondo que o transformador está inicialmente desmagnetizado, isto é, $\lambda = 0$ em $t = 0$, obtém-se a seguinte expressão para o fluxo:

$$\lambda = (V / \omega) [\sin(\omega t + \alpha) - \sin(\alpha)] \quad (3.3)$$

Na equação (3.3), a primeira parcela é a componente c.a. do fluxo, enquanto que a segunda é a componente c.c. Sempre que a tensão injetada inicia em um

cruzamento do zero, isto é, $\alpha = \pi/2 \pm n\pi$, o fluxo tem seu valor dobrado. Por exemplo, se $\alpha = 3\pi/2$, a expressão para o fluxo é dada por:

$$\lambda = \frac{V}{\omega} [\cos(\omega t) + 1] \quad (3.4)$$

Esta situação é ilustrada na Figura 3.1(a). A fim de eliminar a componente c.c. do fluxo, um dos métodos descritos em (FITZER et al., 2002) podem ser aplicados (ver Apêndice A). Por isso, é suficiente multiplicar a tensão injetada por um fator $K = 0,5$ durante metade do ciclo após a tensão de compensação ser iniciada. A Figura 3.1(b) mostra o resultado da técnica para controlar o fluxo representado na Figura 3.1(a). A Figura 3.1(c) mostra a tensão na fase A com redução na amplitude pela metade durante meio ciclo (gráfico superior) e o correspondente fluxo c.c. eliminado (gráfico inferior).

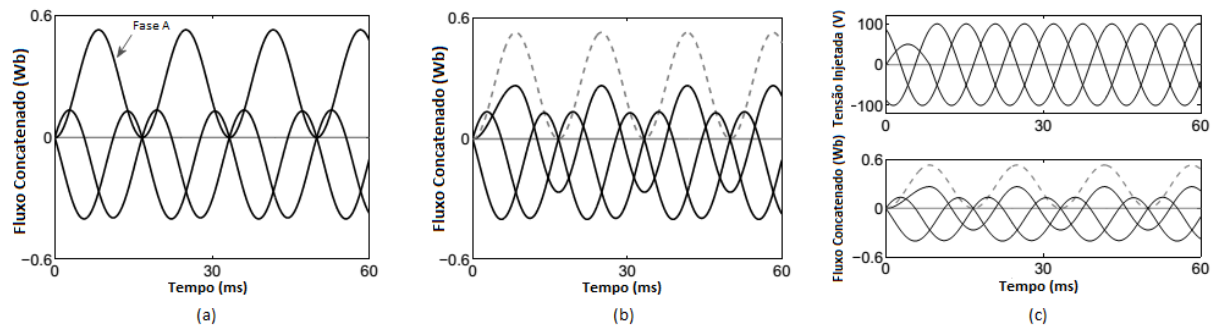


Figura 3.1. Fluxo concatenado nos três transformadores de injeção do DVR. (a) Fluxo concatenado máximo na fase A. (b) Eliminação do fluxo concatenado c.c. na fase A. (c) Redução da tensão de injeção na fase A (gráfico de cima).

A técnica proposta neste trabalho é inspirada em uma das técnicas descritas em (FITZER et al., 2002). Considerando a Figura 3.2, na qual a tensão injetada se inicia no ângulo α , é possível prever o fluxo concatenado λ' no instante correspondente ao ângulo $3\pi/2$ por meio da seguinte integração:

$$\lambda' = \int_{\alpha/\omega}^{(\pi/2)/\omega} V \cos(\omega t) dt + \xi \int_{(\pi/2)/\omega}^{(3\pi/2)/\omega} V \cos(\omega t) dt \quad (3.5)$$

Na equação acima, ξ é um fator de forma que é primeiramente ajustado em um. Entre α e $\pi/2$, a tensão injetada contribui positivamente para o fluxo. Entre $\pi/2$ e $3\pi/2$, a tensão contribui negativamente para o fluxo. Portanto, na situação mostrada na Figura 3.2, no ângulo de $3\pi/2$, o fluxo atinge o seu valor mínimo.

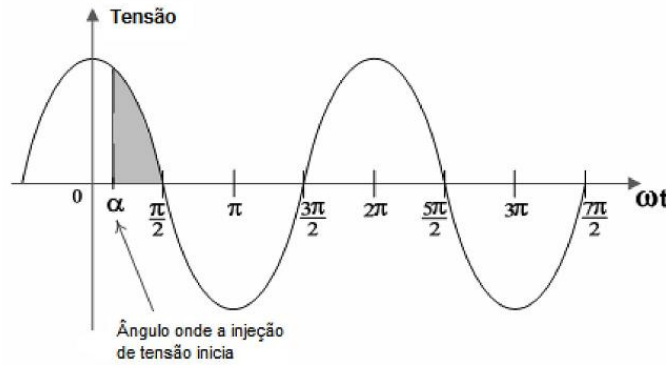


Figura 3.2. Tensão de compensação iniciando em um semiciclo positivo para uma das fases.

Se a previsão fornece um valor cujo módulo é maior que o fluxo concatenado máximo do transformador, então o parâmetro ξ deve ser ajustado a um valor tal que o módulo do fluxo não exceda o valor máximo permitido. Assim, se $\lambda' < -\lambda_{\max}$, fazendo $\lambda' = \lambda_{\max}$ na equação (3.5) obtém-se ξ como:

$$\xi = \frac{-\lambda_{\max} - V \int_{\alpha/\omega}^{(\pi/2)/\omega} \cos(\omega t) dt}{V \int_{(\pi/2)/\omega}^{(3\pi/2)/\omega} \cos(\omega t) dt} \quad (3.6)$$

A equação 3.6 garante que o fluxo não ultrapassará o limite mínimo. No entanto, não assegura que o limite máximo não seja ultrapassado pelo semiciclo positivo da tensão. O fator de forma ξ é aplicado à tensão durante o semiciclo negativo da tensão cossenoidal. Quando a tensão injetada é iniciada dentro de um semiciclo negativo da cossenoidal, Figura 3.3, λ' é calculada como:

$$\lambda' = \int_{\alpha/\omega}^{(3\pi/2)/\omega} V \cos(\omega t) dt + \xi \int_{(3\pi/2)/\omega}^{(5\pi/2)/\omega} V \cos(\omega t) dt \quad (3.7)$$

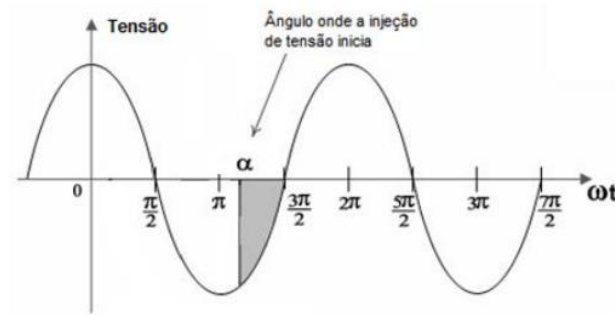


Figura 3.3. Tensão de compensação iniciando em um semiciclo negativo para uma das fases.

Se $\lambda' > \lambda_{\max}$, a tensão injetada exige escalonamento, e então, o fator de forma é escrito como sendo:

$$\xi = \frac{\lambda_{\max} - V \int_{\alpha/\omega}^{(3\pi/2)/\omega} \cos(\omega t) dt}{V \int_{(3\pi/2)/\omega}^{(5\pi/2)/\omega} \cos(\omega t) dt} \quad (3.8)$$

O processo descrito não elimina o fluxo c.c. Ele apenas desloca a curva de fluxo de modo que dentro do período compreendido pelo próximo semiciclo da senoide após o ângulo α , o fluxo não ultrapasse o limite do transformador. Ainda pode permanecer um fluxo líquido λ_{net} , e este fluxo líquido pode ultrapassar o limite após este período. Em outras palavras, o pico oposto da onda senoidal do fluxo pode exceder λ_{max} quando o procedimento de deslocamento é realizado. O procedimento apenas assegura que para a condição de $0 \leq \alpha < \pi/2$ ou $3\pi/2 \leq \alpha < 2\pi$, o fluxo não ultrapasse o limite máximo. Para a condição de $\pi/2 < \alpha < 3\pi/2$, o fluxo não exceda o limite mínimo, (cujo módulo é o mesmo que o limite máximo). Para a primeira condição, o fluxo líquido, λ_{net} , é dado por:

$$\lambda_{net} = \lambda' + \int_{(3\pi/2)/\omega}^{(5\pi/2)/\omega} V \cos(\omega t) dt \quad (3.9)$$

A segunda parte da equação 3.9 indica se o fluxo irá exceder o limite máximo após o deslocamento.

Para a segunda condição, $\pi/2 < \alpha < 3\pi/2$, o fluxo líquido é calculado por meio de:

$$\lambda_{net} = \lambda' + \int_{(5\pi/2)/\omega}^{(7\pi/2)/\omega} V \cos(\omega t) dt \quad (3.10)$$

O método proposto em (FITZER et al., 2002), não pode lidar com a situação em que o fluxo líquido é maior (ou menor) do que o valor máximo (ou mínimo) do fluxo limite do transformador.

Para lidar com esta hipótese, este trabalho propõe um método que prevê a partir do ângulo α se o fluxo líquido vai ultrapassar o limite do transformador, e esta é a principal contribuição deste método proposto para resolver o problema da saturação dos transformadores de conexão de um DVR.

O algoritmo a seguir resume a implementação do método apresentado.

3.2 ALGORITMO DE IMPLEMENTAÇÃO DO MÉTODO

1. No instante da detecção do afundamento, fazer a leitura da tensão de compensação $v_c(t)$, identificar o ângulo de fase α ($0 \leq \alpha \leq 2\pi$) e calcular a amplitude de $v_c(t)$;
2. Fazer ($\xi = 1$), ($\lambda_{amp} = V/\omega$). Se ($0 \leq \alpha < \pi/2$) ou ($3\pi/2 \leq \alpha < 2\pi$) então aplicar a equação (3.5). Se ($\pi/2 \leq \alpha < 3\pi/2$) aplicar a equação (3.7);
3. Se ($\lambda' < -\lambda_{max}$) então calcular ξ através da equação (3.6). Se $\lambda' > \lambda_{max}$ calcular ξ através da equação (3.8). Se nenhuma destas condições se verificarem, então $\xi = 1$;
4. Se ($0 \leq \alpha < \pi/2$) ou ($3\pi/2 \leq \alpha < 2\pi$), então, calcular λ_{net} através da equação (3.9). Se ($\pi/2 \leq \alpha < 3\pi/2$), utilizar a equação (3.10);
5. Se ($|\lambda_{net}| < \lambda_{max}$), então,

- Se ($0 \leq \alpha < \pi/2$) ou ($3\pi/2 \leq \alpha < 2\pi$), a tensão de compensação é dada por:

$$v_c(t) = V \cos(\omega t + \alpha), \text{ para } (\alpha \leq \omega t < \pi/2) \text{ e } (\omega t \geq 3\pi/2)$$

$$v_c(t) = \xi V \cos(\omega t + \alpha), \text{ para } (\pi/2 \leq \omega t < 3\pi/2)$$

- Se ($\pi/2 \leq \alpha < 3\pi/2$), então:

$$v_c(t) = V \cos(\omega t + \alpha), \text{ para } (\alpha \leq \omega t < 3\pi/2) \text{ e } (\omega t \geq 5\pi/2)$$

$$v_c(t) = \xi V \cos(\omega t + \alpha), \text{ para } (3\pi/2 \leq \omega t < 5\pi/2)$$

6. Se $(|\lambda_{\text{net}}| > \lambda_{\text{max}})$, então, fazer $V_{\text{max}} = \lambda_{\text{max}}\omega$ e a tensão de compensação deve ser determinada por:

$$v_c(t) = (V_{\text{max}} / 2) \cos(\omega t + \alpha), \text{ para } (\alpha \leq \omega t \leq \alpha + \pi / 2)$$

$$v_c(t) = (V_{\text{max}}) \cos(\omega t + \alpha), \text{ para } (\omega t > \alpha + \pi / 2)$$

A estimação dos fasores dos sinais analisados e do ângulo de fase α é realizada através de um algoritmo de mínimos-quadrados-recursivos (COSTA et al., 2013; BHOTTO; ANTONIOU, 2011).

Além disso, a correção das tensões pelo DVR somente acontece quando a estimação da amplitude é estabilizada, isto é, durante o período de transitório, o ângulo α e o fasor não estão disponíveis para serem utilizados no algoritmo apresentado.

3.3 FLUXOGRAMA DE IMPLEMENTAÇÃO DO MÉTODO

A seguir é apresentado um fluxograma do método descrito na seção anterior:

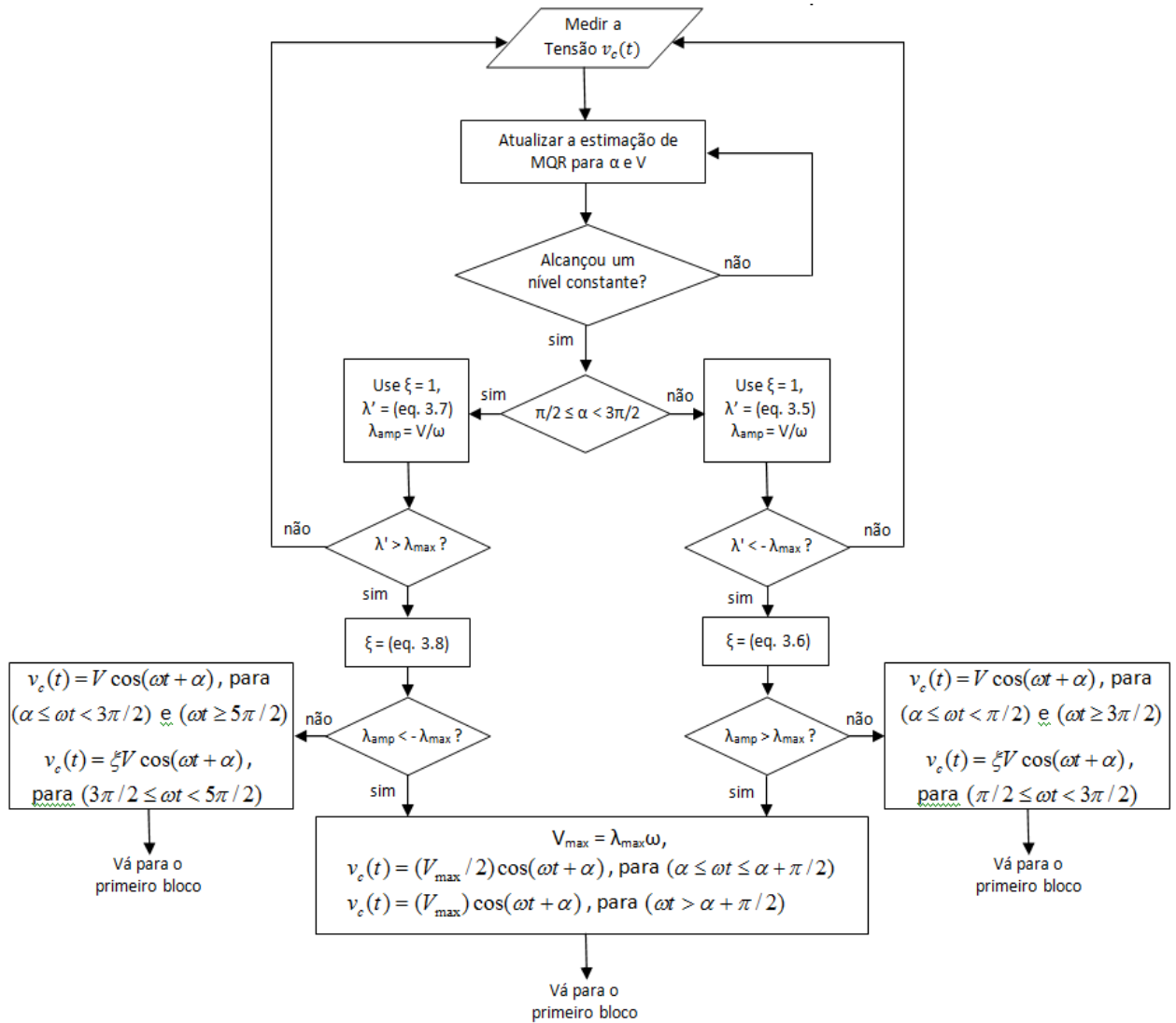


Figura 3.4. Fluxograma de implementação do método de controle de fluxo.

3.4 ANÁLISE DO MÉTODO

Na Figura 3.5 apresenta-se três cenários nos quais o fluxo concatenado excede o valor limite de saturação do transformador. Cada um dos cenários foi obtido para diferentes ângulos de injeção das tensões. As linhas tracejadas nos gráficos representam a situação em que a correção não ocorreu e as linhas cheias mostram o uso da metodologia apresentada.

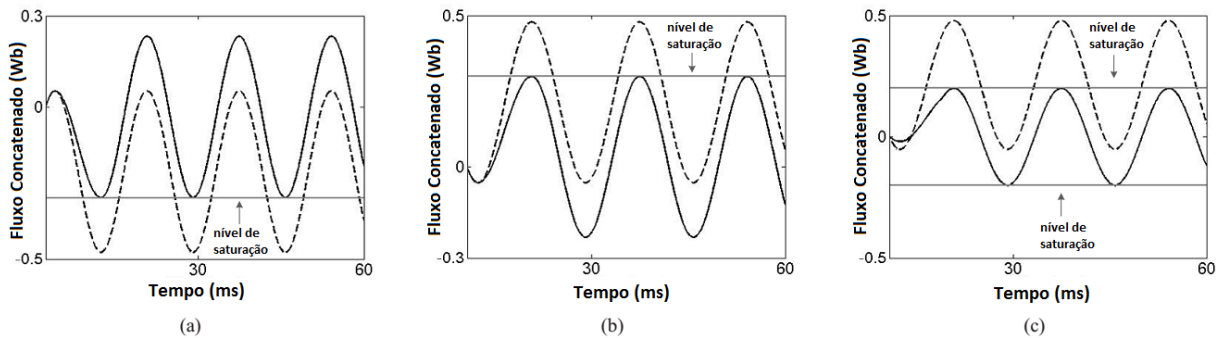


Figura 3.5. Fluxo concatenado no transformador. (a) Fluxo excedendo o limite inferior (tracejado) e fluxo corrigido (linha cheia). (b) Fluxo excedendo o limite superior (tracejado) e fluxo corrigido (linha cheia). (c) Fluxo concatenado no qual limites superior e inferior são corrigidos.

Para o valor limite de 0,3Wb para o fluxo (Figuras 3.5(a) e 3.5(b)), é possível observar que a técnica impõe à amplitude o valor máximo permitido para não entrar na região de saturação. Para isso, foi feito o deslocamento da forma de onda do fluxo concatenado multiplicando a respectiva tensão injetada pelo fator de forma ζ , mas mantendo a mesma amplitude da forma de onda. Esta ação previne que o fluxo concatenado máximo seja excedido e o transformador entre na região de saturação.

Entretanto, em alguns casos, o deslocamento da forma de onda pode causar uma ultrapassagem do limite de fluxo máximo pelo pico oposto da senoide. Isto pode ser observado na Figura 3.5(c), considerando agora 0,2Wb como valor de saturação. Neste caso é necessário limitar os picos positivos e negativos do fluxo seguindo o passo 6 do algoritmo apresentado na seção 3.2.

O algoritmo apresentado soluciona este problema envelopando a senoide entre $-\lambda_{max}$ e λ_{max} , como pode ser observado na Figura 3.5(c). Esta ação é uma

precaução para que o transformador não entre na região de não-linearidade, apesar da amplitude da tensão injetada ser menor que a necessária para restaurar a tensão correta.

Operar o DVR neste modo é mais adequado que fazer uso do transformador na região de saturação, uma vez que isto vai gerar formas de ondas não-lineares e pode causar sobreaquecimento no dispositivo.

CAPÍTULO 4

PLATAFORMAS DE SIMULAÇÃO E EXPERIMENTAL

4.1 PLATAFORMA DE SIMULAÇÃO DO DVR

Um modelo do DVR proposto foi implementado nos pacotes *SimPowerSystems* e *Simulink* do Matlab. A metodologia para evitar a saturação dos transformadores descrita na seção anterior foi efetuada junto com o sistema de controle. A Figura 4.1 mostra a plataforma de simulação para o sistema DVR.

A Tabela 4.1 mostra os parâmetros utilizados na simulação.

Parâmetro	Valor
Saturação do Transformador	0.38 Wb
L (filtro)	2mH
C (filtro)	16 μ F
R (carga)	15 Ω
L (carga)	1mH
relação transformação	1:1

Tabela 4.1. Parâmetros para simulação do sistema DVR

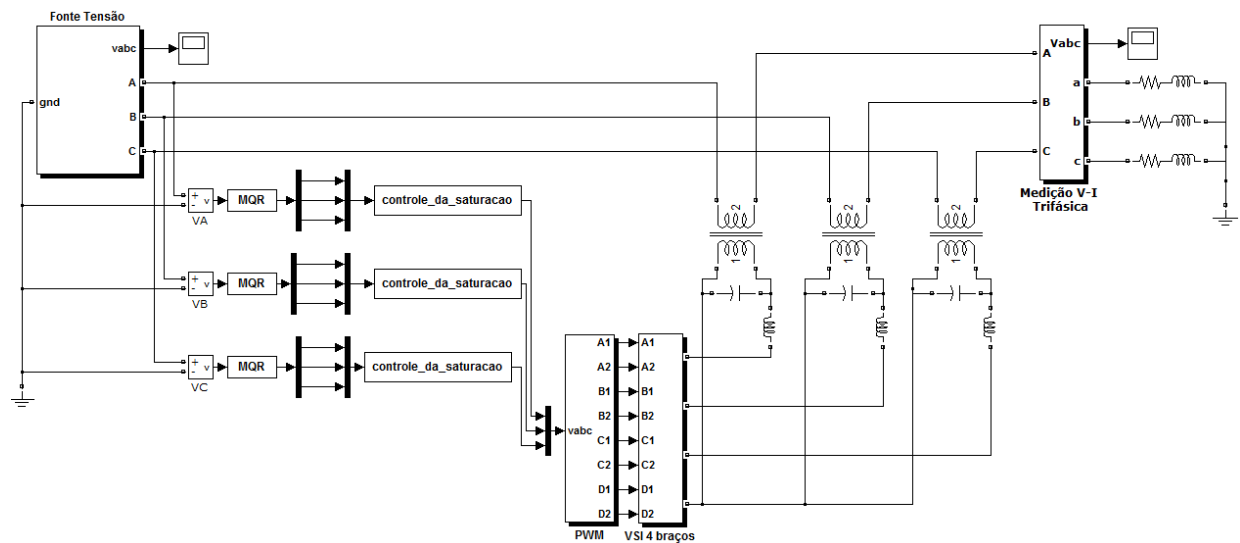


Figura 4.1. Plataforma de Simulação para o Sistema DVR.

Um inversor de 4 braços é adequado para a sintetização das tensões assimétricas. Na Figura 4.2 o inversor é mostrado em detalhes. O mesmo foi utilizado no bloco “4-leg VSI” da Figura 4.1. A inclusão do quarto braço permite a geração de componentes de sequência-zero. A estratégia PWM aplicada ao controle do inversor é descrita em (FERNANDES et al., 2013). Detalhes do sistema de controle do DVR podem ser encontrados em (COSTA et al., 2013; FERNANDES et al., 2009).

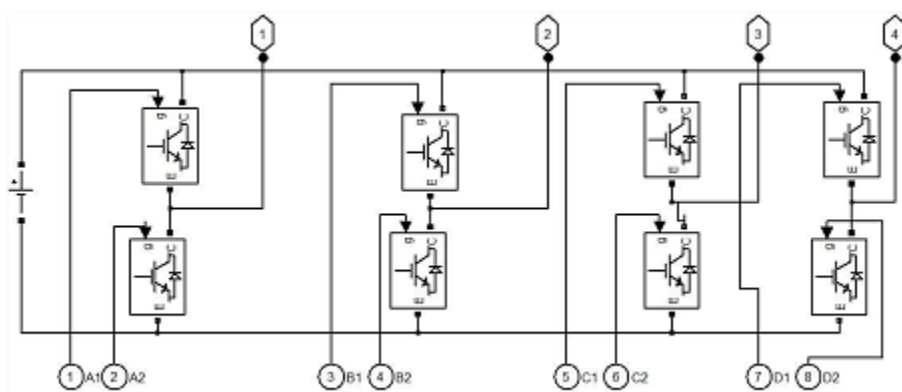


Figura 4.2. Detalhe do inversor de tensão de 4 braços usado no sistema DVR.

4.2 PLATAFORMA EXPERIMENTAL DO DVR

A plataforma experimental do Restaurador Dinâmico de Tensão utilizado neste trabalho foi montada em laboratório como mostrado na Figura 4.3. O dispositivo experimental é constituído por um estágio de potência e outro estágio de aquisição de dados e de sinais (Figuras 4.3(a) e 4.3(b) respectivamente).

No estágio de potência, o componente principal é o inversor fonte de tensão (VSI), composto por quatro braços, que pode ser visto em destaque na Figura 4.3(a). O barramento c.c. é composto por quatro capacitores de $2200\mu\text{F}/450\text{V}$ equivalente a $2200\mu\text{F}/900\text{V}$. As tensões moduladas são filtradas por um filtro LC (indicado na Figura 4.3 (c)) para cada fase. Os valores dos componentes utilizados são os mesmos apresentados na Tabela 4.1. O filtro LC passa-baixa foi projetado para uma frequência de corte de 2kHz.

A carga é constituída de resistores de potência e o sistema de aquisição de dados é formado por sensores de efeito Hall para tensões e correntes. O processamento do sinal é efetuado por um controlador digital de sinais da Texas Instruments (DSC) TMS320F28335.

Os transformadores utilizados pelo sistema DVR são mostrados na Figura 4.3(c). Os mesmos são de forma toroidal e seus núcleos são feitos de material ferromagnético de grãos orientados. Estas características minimizam as indutâncias de dispersão. Cada transformador tem potência de 1kVA e a relação de transformação do secundário para o primário é de 1:1.

O diagrama elétrico da bancada do DVR pode ser visto no Apêndice B.

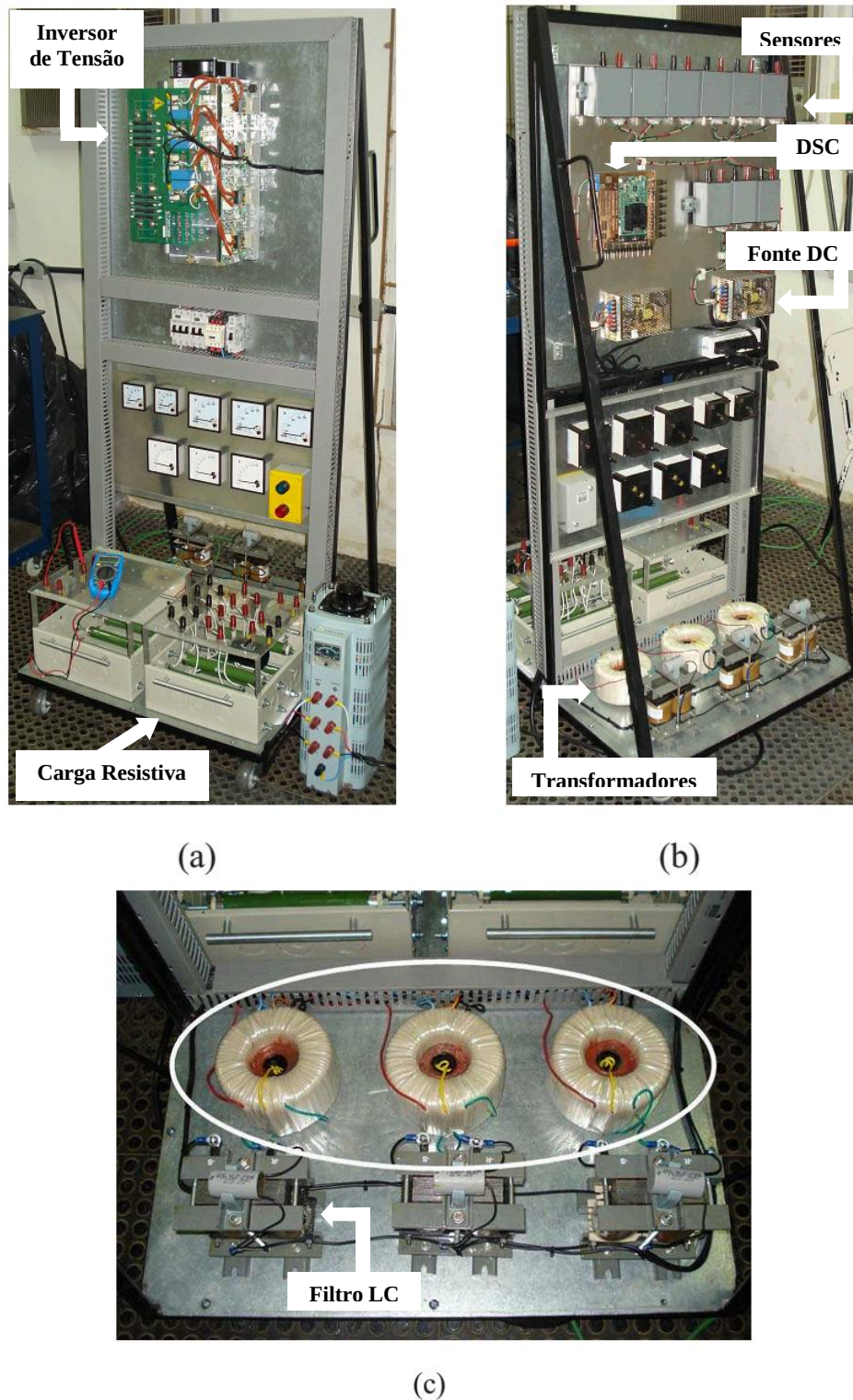


Figura 4.3. Restaurador Dinâmico de Tensão em escala laboratorial. (a) Estágio de potência. (b) Controle e sistema de aquisição de dados. (c) Detalhe dos transformadores usados no DVR

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos a partir das simulações realizadas, como também os resultados experimentais alcançados.

5.1 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Na Figura 5.1 é apresentado o primeiro resultado de simulação, obtido considerando um sistema trifásico submetido a um afundamento fase-fase de 0,7 p.u. (amplitude da tensão em relação à tensão de referência) durante 50ms.

Na Figura 5.1(a) são mostradas as tensões na rede, com destaque para as fases A e B que estão submetidas aos afundamentos de tensão. A Figura 5.1(b) mostra a estimação da amplitude da fase A pelo método dos mínimos quadrados. Além da amplitude, o algoritmo dos mínimos quadrados também estima o ângulo α . A estimação permite identificar os instantes nos quais a variação da tensão inicia e termina. Na Figura 5.1(b) os mesmos estão indicados pelas linhas pontilhadas e podem-se ver os instantes relacionados ao início do afundamento, bem como os relativos ao final do afundamento de tensão. Existe um tempo de transição no qual a amplitude da tensão está variando e durante esse tempo a correção da tensão não é ativada.

A Figura 5.1(c) apresenta as tensões injetadas pelo DVR para as duas fases que sofreram afundamentos. É importante salientar que a injeção da tensão na fase A se inicia no instante de tempo em que a estimação da amplitude para a fase A está estabilizada. Embora não esteja mostrado nesta figura, o mesmo ocorre para a outra fase.

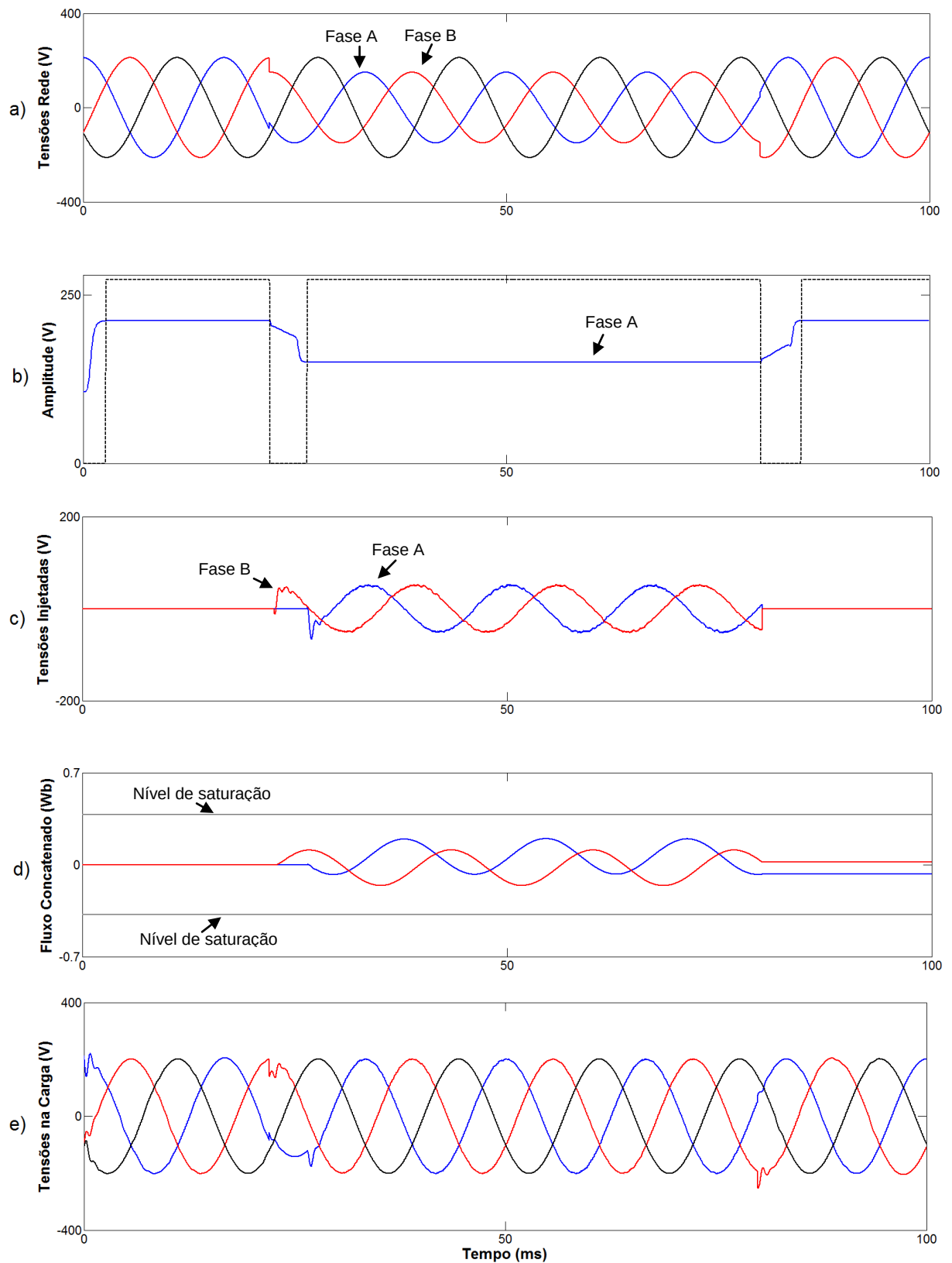


Figura 5.1. Resultados de simulação para o sistema DVR: Situação 1. (a) Afundamentos de tensão na rede, fases A e B. (b) Amplitude estimada para fase A. (c) Tensões injetadas na rede pelo DVR. (d) Fluxo concatenado nos transformadores. (e) Tensões corrigidas na carga.

Na Figura 5.1(d) são mostrados os fluxos concatenados associados a cada fase. Os fluxos para as duas fases não excedem o limite de 0,38Wb (indicado pela linha nível de saturação), o que dispensa o uso do algoritmo para evitar a saturação. A Figura 5.1(e) mostra as tensões corrigidas aplicadas à carga, ficando evidente a eficiência na atuação do dispositivo DVR.

Na Figura 5.2 é apresentado o segundo resultado de simulação para um diferente ângulo de injeção α . Os resultados foram obtidos considerando um sistema trifásico submetido a um afundamento fase-fase de 0,4 p.u. (amplitude da tensão em relação à tensão de referência) durante aproximadamente 70ms.

Na Figura 5.2(a) são mostradas as tensões na rede, com destaque para as fases A e B que estão submetidas aos afundamentos de tensão. A Figura 5.2(b) mostra a estimativa da amplitude da fase A a partir do algoritmo de mínimos quadrados. Novamente, os instantes nos quais o afundamento se inicia e termina são evidenciados pelas linhas pontilhadas.

A Figura 5.2(c) apresenta um conjunto de quatro curvas de tensões injetadas pelo DVR na rede. As curvas pontilhadas são as tensões que seriam injetadas caso não houvesse a utilização do controle de fluxo apresentado neste trabalho. Já as linhas cheias são as tensões injetadas controladas pelo método proposto. Nesse caso particular, o fluxo é controlado seguindo os primeiros 5 passos do algoritmo apresentado na seção 3.2.

A Figura 5.2(d) apresenta um conjunto de quatro curvas de fluxos concatenados nos transformadores. As curvas pontilhadas são os fluxos caso não houvesse a utilização do controle. As linhas cheias são os fluxos controlados pelo método proposto. É verificado para este caso que as linhas sólidas não ultrapassam os limites de nível de saturação, diferentemente das linhas pontilhadas. Essa análise corrobora a eficiência do método utilizado.

Na Figura 5.2(e) são mostradas as tensões corrigidas aplicadas à carga, na qual se observa que as amplitudes com afundamento foram restauradas para os valores nominais, provando mais uma vez a atuação satisfatória do Restaurador Dinâmico de Tensão.

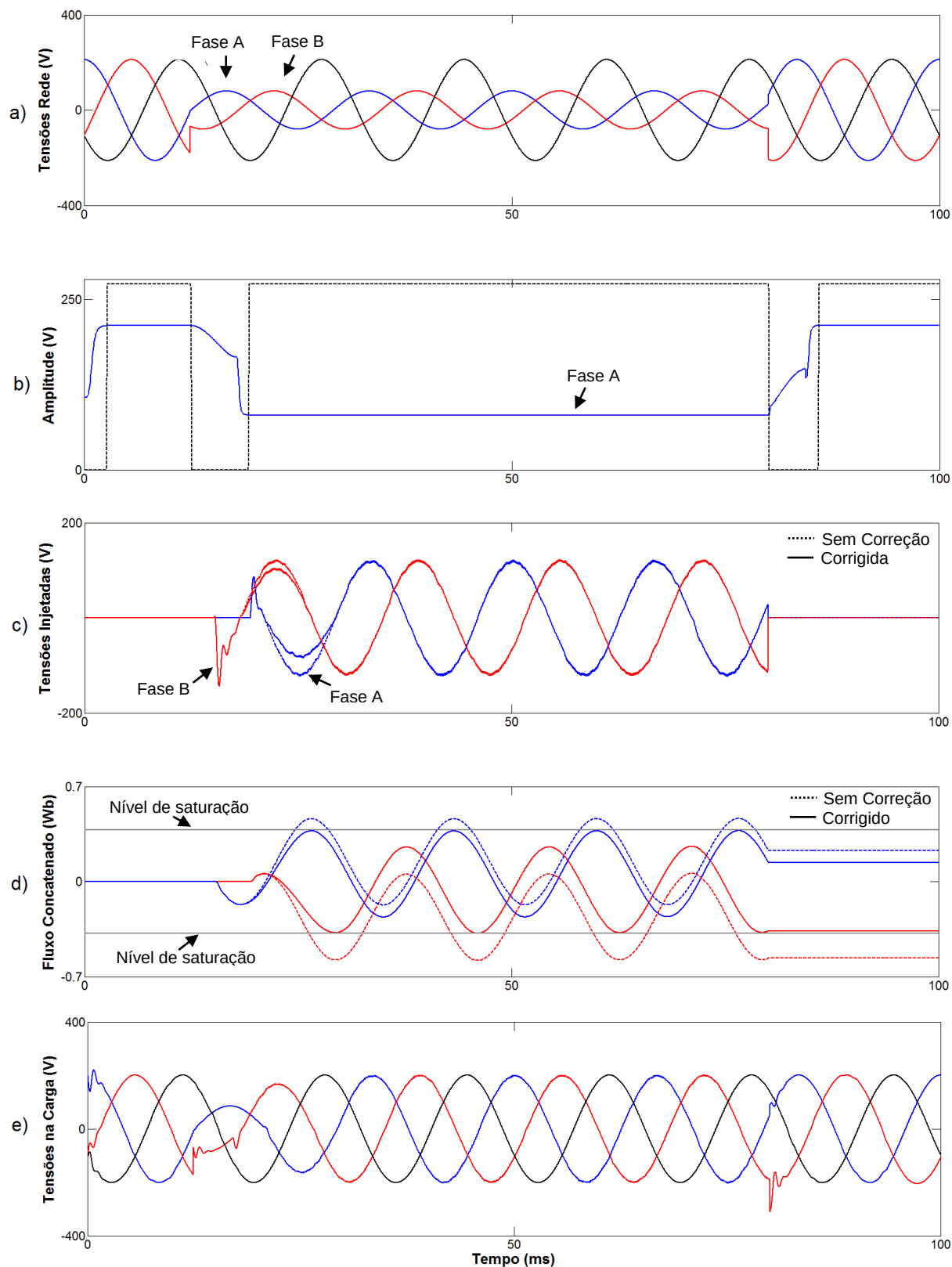


Figura 5.2. Resultados de simulação para o sistema DVR: Situação 2. (a) Afundamentos de tensão na rede, fases A e B. (b) Amplitude estimada para fase A. (c) Tensões injetadas na rede pelo DVR. (d) Fluxo concatenado nos transformadores. (e) Tensões corrigidas na carga.

Na Figura 5.3 é apresentado o terceiro resultado de simulação para um diferente ângulo de injeção α . Os resultados foram obtidos considerando um sistema trifásico submetido a um afundamento em uma das fases de 0,2 p.u. (amplitude da tensão em relação à tensão de referência) durante aproximadamente 70ms.

Na Figura 5.3(a) são mostradas as tensões na rede, com destaque para a fase A que está submetida ao afundamento de tensão. A Figura 5.3(b) mostra a estimação da amplitude da fase A a partir do algoritmo de mínimos quadrados. Novamente, os instantes nos quais o afundamento se inicia e termina são evidenciados pelas linhas pontilhadas.

A Figura 5.3(c) apresenta duas curvas de tensões injetadas pelo DVR na rede. A linha pontilhada é a forma de onda de tensão que seria injetada caso não houvesse a utilização do controle de fluxo apresentado neste trabalho. A linha cheia é a curva de tensão injetada controlada pelo método proposto. Nesse caso particular, o fluxo é controlado seguindo os seis passos do algoritmo apresentado na seção 3.2.

A Figura 5.3(d) apresenta duas curvas de fluxos concatenados nos transformadores. A curva pontilhada é a forma de onda do fluxo caso não houvesse a utilização do controle. A linha cheia é a curva do fluxo sendo controlado pelo método proposto. É verificado para este caso que a linha sólida não ultrapassa os limites de nível de saturação, sendo envelopado entre os limites mínimo e máximo. Já a linha pontilhada ultrapassaria o limite mínimo, alcançando quase o dobro do valor para a amplitude do fluxo. Essa análise também corrobora a eficiência do método utilizado.

Na Figura 5.3(e) são mostradas as tensões aplicadas à carga, na qual se observa que na fase A foi corrigido o afundamento da amplitude apesar do fluxo concatenado no transformador dessa fase ter sido restringido de maneira a não ultrapassar o seu valor máximo.

Essa simulação também mostra a atuação satisfatória do Restaurador Dinâmico de Tensão.

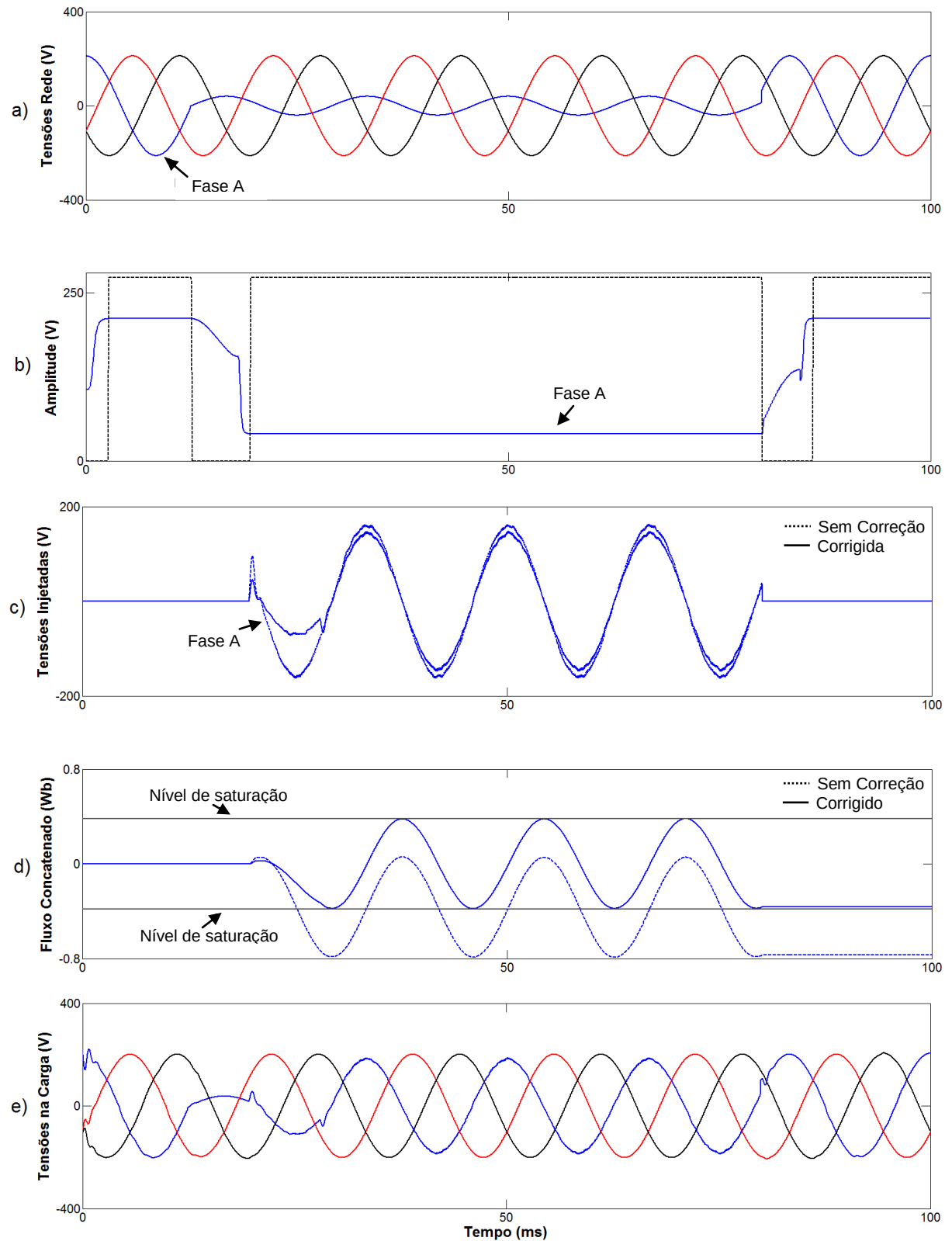


Figura 5.3. Resultados de simulação para o sistema DVR: Situação 3. (a) Afundamento de tensão na rede, fase A. (b) Amplitude estimada para fase A. (c) Tensões injetadas na rede pelo DVR. (d) Fluxo concatenado nos transformadores. (e) Tensões corrigidas na carga.

5.2 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Obteve-se como primeiro resultado experimental a determinação do valor de saturação dos transformadores do DVR. Para tanto, foi criado um circuito para medição composto por resistências e capacitores. O circuito é mostrado na Figura 5.4, no qual $R = 10\text{k}\Omega$, $C = 1\mu\text{F}$ e $r = 100\Omega$.

A Figura 5.5 mostra o resultado experimental para a curva de histerese do transformador.

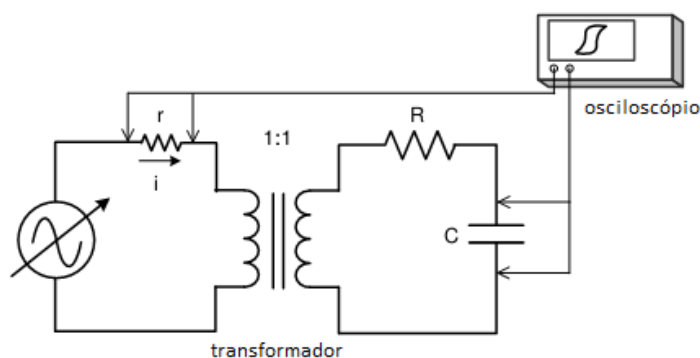


Figura 5.4. Circuito para medição do nível de saturação do transformador

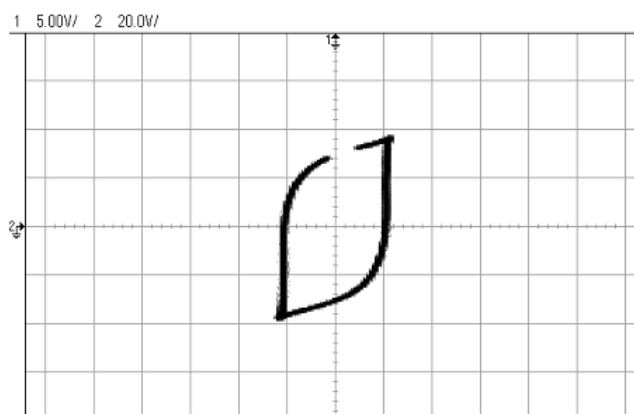


Figura 5.5. Curva de histerese experimental do transformador
(escala vertical = 5V/div; escala horizontal = 20V/div)

A partir dos valores encontrados na Figura 5.5 obtém-se o valor máximo para o fluxo concatenado do transformador. Os parâmetros R e C são selecionados de tal forma que $1 + sRC$ possa ser aproximado por sRC e $\omega_0 = 377 \gg 1 / (RC)$. Assim, foi escolhido $R = 10k\Omega$, $C = 1\mu F$ e $r = 100\Omega$.

Os extremos da curva na Figura 5.5 representam o início da saturação. Para a direita da curva, o ponto extremo é (5,94; 37,90)V. A segunda coordenada deste ponto é a tensão do capacitor. A tensão no capacitor v_c é dada pela equação $v_c = 1/(RC) \int v_i$, sendo a integral de v_i o fluxo concatenado.

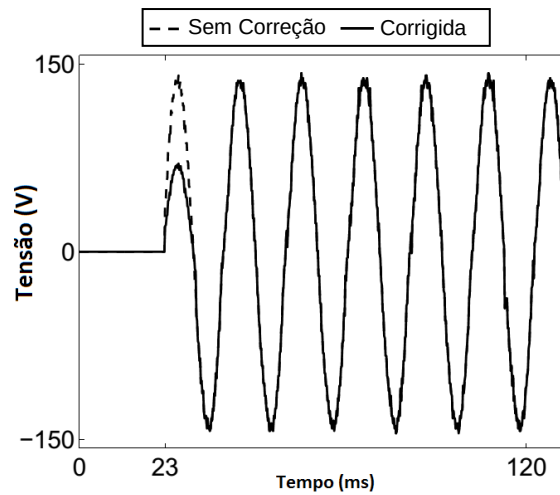
A tensão no capacitor v_c quando multiplicado por RC fornece o valor máximo para o fluxo concatenado, λ_{max} , que é aproximadamente 0.38Wb.

O próximo resultado experimental refere-se à eliminação do fluxo c.c.. A Figura 5.6 mostra os gráficos da tensão e do fluxo concatenado com e sem a eliminação do fluxo c.c.

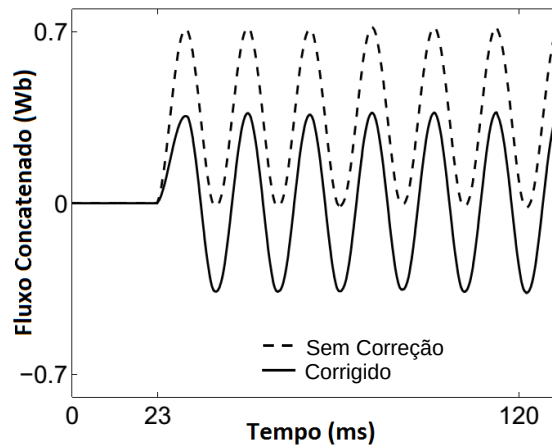
Na Figura 5.6(a) é mostrada a tensão injetada durante um afundamento na fase A. A linha tracejada é a tensão de compensação sem a aplicação do método apresentado e a linha cheia é a tensão aplicada com a correção. Na Figura 5.6(b) é apresentado o fluxo concatenado no núcleo do transformador. A linha tracejada representa o fluxo quando não há modificação na tensão de injeção. Nessa situação, o limite máximo para o fluxo (0,38Wb) é ultrapassado, o que levaria o transformador a trabalhar na região de saturação. Como já explanado anteriormente, isso ocorre devido ao instante de injeção da tensão de compensação e sua amplitude. Porém, aplicando o método para a eliminação do fluxo c.c., a curva do fluxo representada pela linha cheia é obtida, e mostra a faixa de variação do fluxo dentro dos limites do transformador.

Os próximos resultados experimentais ilustram as situações nas quais o fluxo é apenas deslocado aplicando o fator de forma e também as situações em que ele é limitado de acordo com o método apresentado neste trabalho.

Na Figura 5.7(a), a tensão de compensação se inicia em 15ms. A linha tracejada mostra a tensão que seria injetada sem a correção. O efeito correspondente na curva do fluxo pode ser visto na curva tracejada da Figura 5.7(b), na qual é notório que a curva do fluxo excede o limite mínimo.



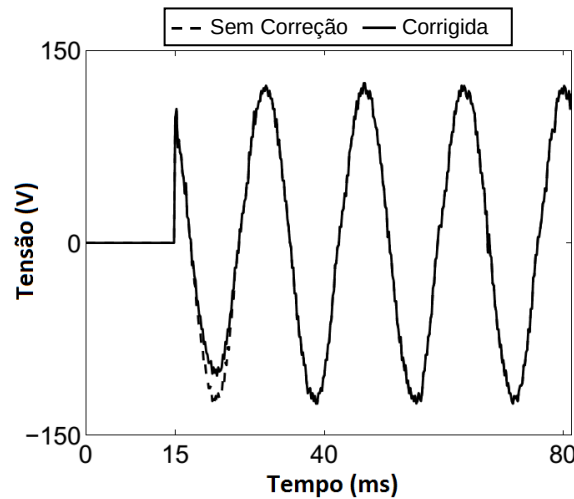
(a)



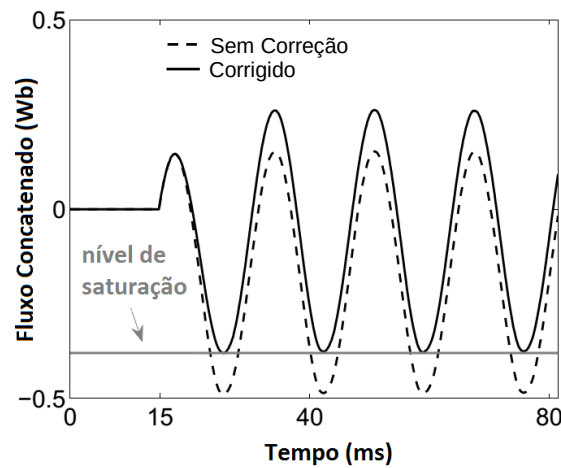
(b)

Figura 5.6. Correção de tensão pelo DVR para um afundamento na fase A – Caso 1. (a) Tensão de compensação sem a aplicação do método apresentado (linha pontilhada) e com a correção (linha cheia). (b) Fluxo excedendo o limite de saturação (linha pontilhada) e sem a componente c.c. (linha cheia).

Por meio da equação 3.5, é possível prever quando o fluxo vai exceder o limite. Então, através da equação 3.6, é calculado o fator de forma ζ para restringir a tensão de compensação. Isto pode ser observado na forma de onda da tensão (linha sólida) da Figura 5.7(a). Por isso, o fluxo é adequadamente deslocado de maneira que ele não ultrapasse o limite mínimo, como pode ser visto na forma de onda do fluxo (linha sólida) da Figura 5.7(b).



(a)



(b)

Figura 5.7. Correção de tensão pelo DVR para um afundamento na fase A – Caso 2. (a) Tensão de compensação sem a aplicação do método apresentado (linha pontilhada) e com a correção (linha cheia). (b) Fluxo excedendo o limite de saturação, ou seja, sem o controle (linha pontilhada) e com o controle (linha cheia).

De maneira similar ao último caso, a situação na Figura 5.8(a) mostra a tensão de compensação injetada (linha tracejada) que ocasiona um fluxo excedente (linha tracejada), visto na Figura 5.8(b).

Novamente, um fator de forma ζ adequado é calculado e aplicado à tensão durante metade de um ciclo fundamental, (linha cheia) Figura 5.8(a). Esta ação desloca o fluxo para o limite permitido, como pode ser visto na Figura 5.8(b) (linha cheia).

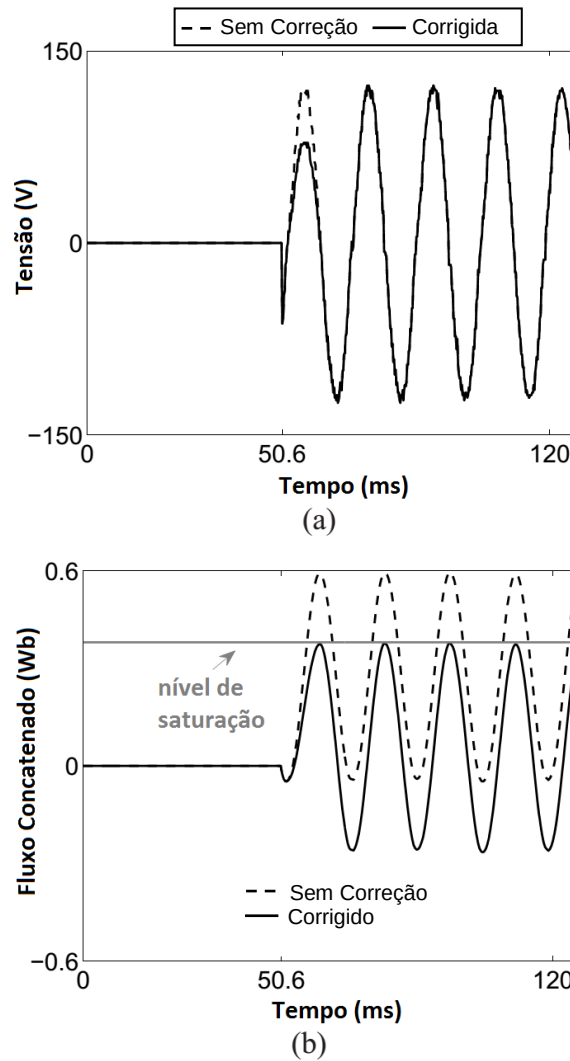


Figura 5.8. Correção de tensão pelo DVR para um afundamento na fase A – Caso 3. (a) Tensão de compensação sem a aplicação do método apresentado (linha pontilhada) e com a correção (linha cheia). (b) Fluxo excedendo o limite de saturação, ou seja, sem o controle (linha pontilhada) e com o controle (linha cheia).

A Figura 5.9(a) mostra a situação em que a tensão injetada não seria restringida por nenhum fator (linha tracejada). Isso implica na curva de fluxo (linha tracejada) visto na Figura 5.9(b). Novamente, é verificado que a curva de fluxo ultrapassaria o limite máximo. Aplicando o método do deslocamento de fluxo, o fator de forma ξ é calculado e aplicado à tensão para que o fluxo concatenado seja deslocado de maneira a não ultrapassar o limite máximo, como pode ser visto na curva de fluxo (linha tracejada-pontilhada) da Figura 5.9(b). Porém, como pode ser observado, acontece que o pico oposto da amplitude do fluxo ultrapassa o limite mínimo.

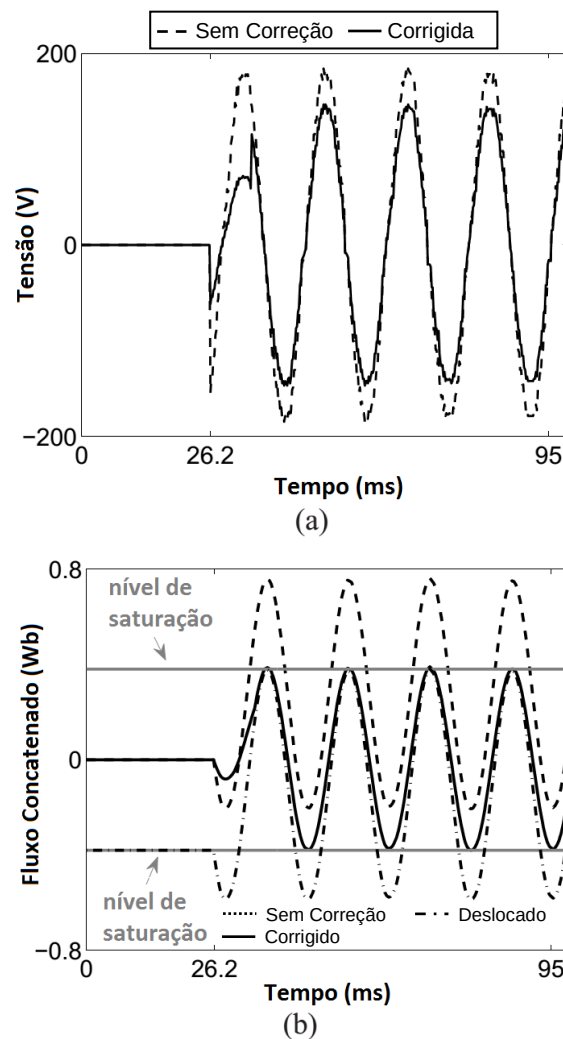


Figura 5.9. Correção de tensão pelo DVR para um afundamento na fase A – Caso 4. (a) Tensão de compensação sem a aplicação do método apresentado (linha pontilhada) e com a correção (linha cheia). (b) Fluxo excedendo o limite de saturação, ou seja, sem o controle (linha pontilhada) e com o controle (linha cheia).

Para solucionar este problema é realizado o procedimento de acordo com o algoritmo descrito na seção 3.2, que em suma é, eliminar o fluxo c.c. e restringir sua amplitude c.a. para o valor limite, como pode ser observado na curva de fluxo (linha cheia) da Figura 5.9(b). A desvantagem deste método é que a tensão de compensação não é suficiente para eliminar completamente o afundamento. Ainda assim, é preferível o uso do método apresentado a ter que trabalhar com o transformador na região de saturação, cujas características prejudiciais já foram apresentadas.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

No presente trabalho foi apresentado um método para controlar a saturação dos transformadores utilizados em um Restaurador Dinâmico de Tensão (DVR). Os transformadores são conectados em série ao sistema, aqui sendo três transformadores monofásicos, e responsáveis pela injeção da tensão de compensação durante um afundamento de tensão.

O método apresentado assegura uma eliminação completa do fluxo c.c. ou desloca a curva de fluxo, restringido sua amplitude c.a., de maneira que o nível de fluxo não exceda os limites do transformador, evitando que o mesmo trabalhe na região de saturação.

Uma limitação encontrada na técnica é quando se utiliza a restrição da amplitude c.a. do fluxo para o valor limite. Neste caso a tensão não é restaurada totalmente e o afundamento não é completamente corrigido.

A simulação do método foi realizada e os resultados contemplam os cenários de afundamentos de tensão com geração de fluxos excedendo os limites do transformador. A partir da análise dos resultados de simulação ficou demonstrada a eficácia do método apresentado no controle do fluxo concatenado dos transformadores do DVR.

Um protótipo experimental de um Restaurador Dinâmico de Tensão foi montado em escala laboratorial e utilizado na geração dos resultados experimentais apresentados. Alguns cenários de afundamentos de tensão e seus respectivos fluxos gerados foram testados. Tais resultados também corroboram a utilização satisfatória do método apresentado no controle de fluxo.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

1) Controle do DVR em malha fechada

Neste trabalho o tipo de controle utilizado no sistema DVR foi o de malha aberta. Seria interessante implementar a utilização do controle em malha fechada, pois o mesmo tem o potencial de obter respostas com atenuação de perturbações.

2) Simulação e obtenção de resultados para outros tipos de cargas

As cargas utilizadas para testes e obtenção de resultados de simulações e experimentais foram somente cargas lineares. Testar e obter resultados com cargas não-lineares seria um aspecto interessante a ser estudado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AVENDAO-MORA, M.; MILANOVIC, J. V. Monitor placement for reliable estimation of voltage sags in powernetworks. *IEEE Trans. Power Del.*, 27(2):936–944, Apr. 2012.

BHOTTO, M.Z.A.; ANTONIOU, A. Robust Recursive Least-Squares Adaptive-Filtering Algorithm for Impulsive-Noive Enviroments. *IEEE Trans. Signal Processing Lett.*,18(3):185-188, March. 2011.

BIANCHIN, C. G. et al.. Pesquisa e aplicação de restauradores dinâmicos de tensão (DVR) em linhas de distribuição. In: IAS. *Anais da VIII Conferência Internacional de Aplicações Industriais*. Poços de Caldas-Brasil, 2008. v. 1, p. 1-5. INDUSCON'08.

BOLLEN, M. H. J. *Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions*. New York: IEEE Press, 2000.

CHEN, S. Feature selection for identification and classification of power quality disturbances. In: IEEE-PES. *Proceedings of PES General Meeting Conference*. San Francisco-Ca, 2005. v. 1, p. 1-6. PESGM'05.

CHEN,Y.-H.; LIN, C.-Y.; CHEN, J.-M.; CHENG, P.-T. An inrush mitigation technique of load transformers for the series voltage sag compensator. *IEEE Trans. Power Electron.*, 25(8):2211–2221, Aug. 2010.

CHENG, P.; CHEN, W.;CHEN, Y.; NI, C.; LIN, J. A transformer inrush mitigation method for series voltage sag compensators. *IEEE Trans. Power Electron.*, 22(5):890–899, Sept. 2007.

COSTA, F. F; FERNANDES, D.A; SANTOS, R. C.; FERREIRA, R. R.; ALMEIDA, L. A. L.; COURY, D. V. Adaptative Phasor Estimator Based on Recursive Least-

Squares. In: *IEEE International Conference on Electric Power Engineering*, 2013, Grenoble. Proceedings of POWERTECH, 2013. p. 1-5.

COSTA, J. G.; ALVES, M. F. Avaliação do impacto econômico do afundamento de tensão na indústria. In: CIGRE-BRASIL. *Anais do XVII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*. Uberlândia-Brasil, 2003. v. 1, p. 1-5. SNPTEE'03.

FERNANDES, D. A.; COSTA, F. F.; SANTOS JR, E. C. Digital-Scalar PWM Approaches Applied to Four-Leg Voltage-Source Inverters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* (1982. Print), v. 60, p. 2022-2030, 2013.

FERNANDES, D. A. *Um Restaurador Dinâmico de Tensão para Correções de Variações de Tensão de Curta Duração em Redes Elétricas Trifásicas*. 2008. 175 p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande – Paraíba, 2008.

FERNANDES, D. A.; NAIDU, S. R. Estratégia de modulação para um inversor de tensão de quatro braços utilizado em um restaurador dinâmico de tensão. *Eletrônica de Potência - SOBRAEP*, 58(13):2580–2587, Dec. 2008.

FERNANDES, D.A.; NAIDU, S.R.; COURA JR., C. A. E. Instantaneous sequence-components resolution of 3-phase variables and its application to dynamic voltage restoration. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 58(8):2580-2587, Aug 2009.

FITZER, C.; ARULAMPALAM, A.; BARNES, M.; ZUROWSKI,R.. Mitigation of saturation in dynamic voltage restorer connection transformers. *IEEE Trans. Power Electron.*, 17(6):1058–1066, Nov. 2002.

GHOSH, A.; LEDWICH, G. *Power Quality Enhancement Using Custom Power Devices*. Norwell, Massachusetts: KAP, 2002.

GOHARRIZI, A. Y.; HOSSEINI, S. H.; SABAHI, M.; GHAREHPETIAN, G. B.. Voltage sag acceptability assessment using multiple magnitude-duration function. *IEEE Trans. Power Electron.*, 27(4):1706–1718, Apr. 2012.

JIMICHI, T.; FUJITA, H.; AKAGI, H. An approach to eliminating dc magnetic flux from the series transformer of a dynamic voltage restorer. *IEEE Trans. Ind Appl.*, 44(3):809–816, May/Jun. 2008.

JIMICHI, T.; FUJITA, H.; AKAGI, H. A dynamic voltage restorer equipped with a high-frequency isolated dc-dc converter. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 47(1):169–175, Jan. 2011.

KAGAN, N.; ALMEIDA, C. F. M.; SILVA, L. M. C. Alocação ótima de medidores de qualidade de energia em redes de transmissão para a monitoração de variações de tensão de curta duração. In: *Anais do X Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica*. Florianópolis-Brasil: [s.n.], 2006. v. 1, p. 1-5. SEPOPE'06.

KANJIYA, P.; SINGH, B.; CHANDRA, A.; HADDAD, K. A-. SRF theory revisited to control self supported dynamic voltage restorer (DVR) for unbalanced and non-linear loads. In *IEEE Industry Application Society Annual Meeting. Proc. of IAS'11*, volume 1, pages 1 – 8, 2011.

MIDDLEKAUFF, S. W.; COLLINS, E. R. System and customer impact: Considerations for series custom power devices. *IEEE Trans. Power Del.*, 13(1):278–282, Feb. 1998.

NAIDU, S. R.; FERNANDES, D. A. Dynamic voltage restorer based on 4-leg voltage source converter. *IET Gen. Transm. Distrib.*, 3(5):437–447, May 2009.

NIELSEN, J.; BLAABJERG, F.; MOHAN, N. Control strategies for dynamic voltage restorer compensating voltage sags with phase jumps. In: *IEEE-PELS-IAS*.

Proceedings of Applied Power Electronics Conference and Exposition. Anaheim-Ca, 2001. v. 2, p. 1267-1273. APEC'01.

NIELSEN, J. G.; NEWMAN, M.; NIELSEN, H.; BLAABJERG, F. Control and testing of a dynamic voltage restorer (DVR) at medium voltage level. *IEEE Trans. Power Electron.*, 19(3):806–813, May 2004.

STONES, J.; COLLINSON, A. Power quality. *Power Engineering Journal*, v. 15, n. 2, p.58-64, April 2001.

TAN, R. H. G.; RAMACHANDARAMURTHY, V. K. Voltage sag acceptability assessment using multiple magnitude-duration function. *IEEE Trans. Power Del.*, 27(4):1984–1990, Oct. 2012.

TAYLOR, D. I.; LAW, Joseph D.; JOHNSON, Brian K.; FISCHER, Normann. Single-phase transformer inrush current reduction using prefluxing. *IEEE Trans. Power Electron.*, 27(1):245–252, Jan. 2012.

WOODLEY, N. H. et al.. Field experience with the new platform-mounted DVR. In: IEEE-PES. *Proceedings of International Conference on Power System Technology*. Western-Australia, 2000. v. 3, p. 1323-1328. POWERCON'00.

WOODLEY, N. H.; MORGAN, L.; SUNDARAM, A. Experience with an inverter-based dynamic voltage restorer. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 14, n. 3, p. 1181-1186, July 1999.

ZHAN, Y. Q.; CHOI, S. S.; VILATHGAMUWA, D. M. A voltage-sag compensation scheme based on the concept of power quality control center. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 21, n. 1, p. 296-304, January 2006.

APÊNDICE A

MÉTODO PARA LIMITAR O FLUXO NO TRANSFORMADOR

(*Mitigation of Saturation in Dynamic Voltage Restorer Connection Transformers*,

Chris Fitzer, Atputharajah Arulampalam, Mike Barnes, and Rainer Zurowski.

IEEE Transactions on Power Electronics, November, 2002)

A tensão injetada através do primário (lado do DVR) de um dos três transformadores de injeção pode ser representada por:

$$V_{injetada} = |V| \cos(\omega t + \alpha) \quad (A.1)$$

Se a tensão é injetada ($t = 0$) em um ângulo α , então o fluxo concatenado no transformador para um ângulo posterior $\alpha + \beta$ é dado por:

$$\begin{aligned} \lambda &= \int_{0/\omega}^{\beta/\omega} |V| \cos(\omega t + \alpha) dt = \frac{|V|}{\omega} \cos(\alpha) [\sin(\omega t)]_{0/\omega}^{\beta/\omega} + \frac{|V|}{\omega} \sin(\alpha) [\cos(\omega t)]_{0/\omega}^{\beta/\omega} \\ &= \frac{|V|}{\omega} [\sin(\alpha + \beta) - \sin(\alpha)]. \end{aligned} \quad (A.2)$$

Se $\alpha = 3\pi/2$ e $\beta = \omega t$, então:

$$\lambda = 1 - \cos(\omega t) = \lambda_{AC} + \lambda_{DC} \quad (A.3)$$

Sendo λ_{DC} a componente c.c. do fluxo concatenado.

Um método efetivo de prevenir a saturação pode ser alcançado aplicando um fator de forma à tensão injetada.

A. FATOR DE FORMA CONSTANTE

Considere um fator de forma constante aplicado por um tempo fixo β/ω . Se um afundamento de tensão ocorrer em um ângulo α , a função de forma $f()$ que multiplica a tensão injetada por mais um ângulo β , pode ser representada pela série:

$$f(\omega t - \alpha) = K_0 + K_1(\omega t - \alpha) + K_2(\omega t - \alpha)^2 + K_3(\omega t - \alpha)^3 + \dots \quad (\text{A.4})$$

Isto leva a um fluxo concatenado residual no transformador de injeção depois do ângulo $\alpha + \beta$ de λ' , com o fluxo concatenado geral em qualquer ângulo subsequente θ radianos depois, dado por:

$$\lambda = \lambda' + \int_{\alpha+\beta/\omega}^{\alpha+\beta+\theta/\omega} |V| \cos(\omega t) dt = \lambda' + \frac{|V|}{\omega} [\sin(\alpha + \beta + \theta) - \sin(\alpha + \beta)] \quad (\text{A.5})$$

No qual λ' pode ser estimado por:

$$\begin{aligned} \lambda' &= |V| \int_{\alpha/\omega}^{\alpha+\beta/\omega} f(\omega t - \alpha) \cos(\omega t) dt = \frac{|V|}{\omega} [f(\omega t - \alpha) \sin(\omega t)]_{\alpha/\omega}^{\alpha+\beta/\omega} - \frac{|V|}{\omega} \int_{\alpha/\omega}^{\alpha+\beta/\omega} \frac{df(\omega t - \alpha)}{dt} \sin(\omega t) dt \\ \lambda' &= \frac{|V|}{\omega} [f(\omega t - \alpha) \sin(\omega t)]_{\alpha/\omega}^{\alpha+\beta/\omega} - \left\{ \frac{|V|}{\omega^2} \left[\frac{-df(\omega t - \alpha)}{dt} \cos(\omega t) \right]_{\alpha/\omega}^{\alpha+\beta/\omega} + \frac{|V|}{\omega^2} \int_{\alpha/\omega}^{\alpha+\beta/\omega} \frac{d^2 f(\omega t - \alpha)}{dt^2} \cos(\omega t) dt \right\} \\ \lambda' &= |V| \sum_{i=0}^{\infty} (-1)^{i+2} \cdot \left\{ \frac{1}{\omega^{2i+1}} \left[\frac{d^{2i} f(\omega t - \alpha)}{dt^{2i}} \sin(\omega t) \right]_{\alpha/\omega}^{\alpha+\beta/\omega} + \frac{1}{\omega^{2i+2}} \left[\frac{d^{2i+1} f(\omega t - \alpha)}{dt^{2i+1}} \cos(\omega t) \right]_{\alpha/\omega}^{\alpha+\beta/\omega} \right\} \quad (\text{A.6}) \end{aligned}$$

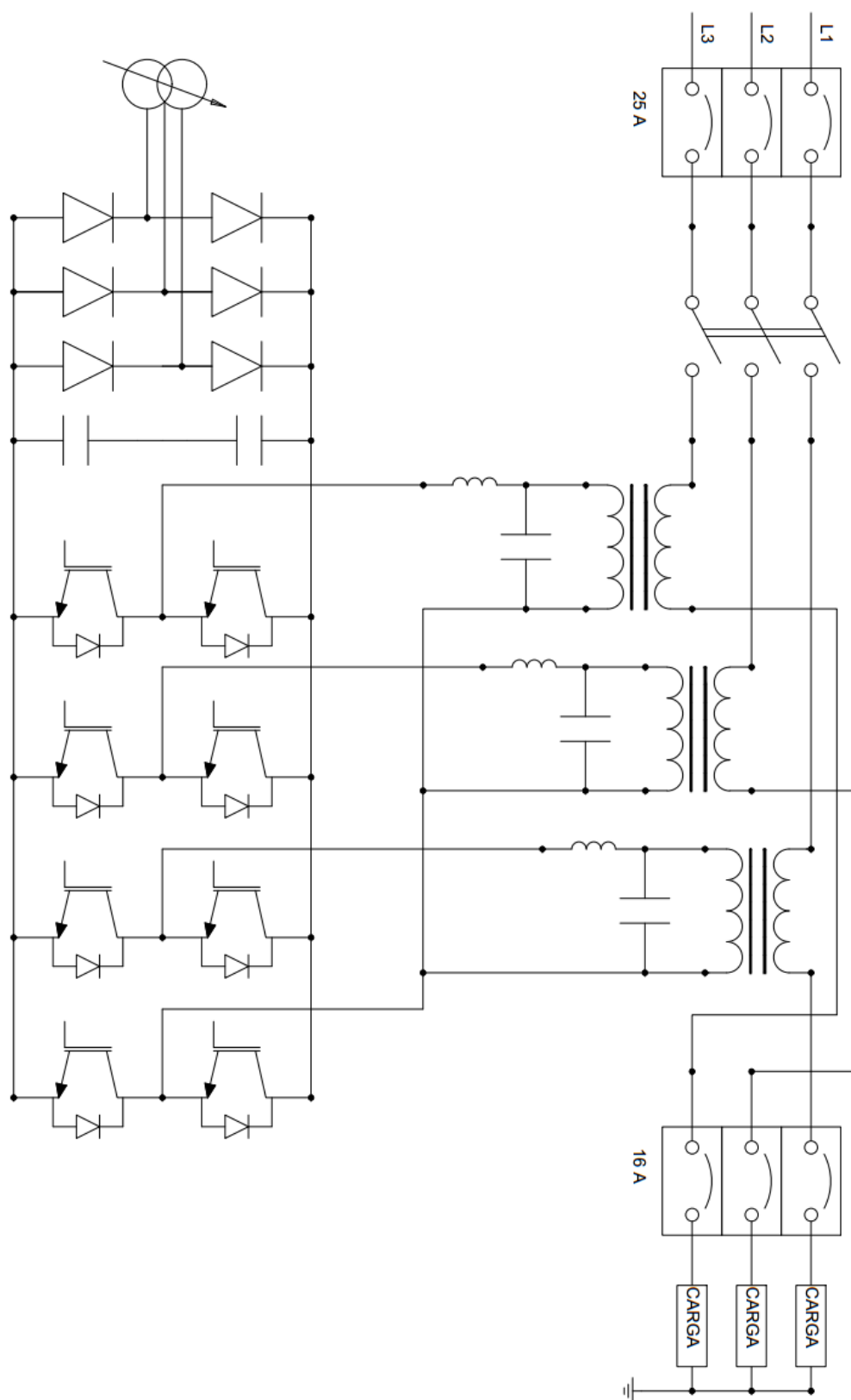
Remetendo-se à equação A.3, um método para prevenir a saturação é remover inteiramente ou prevenir a componente DC do fluxo concatenado λ_{DC} . Isto pode ser alcançado através da resolução da equação A.6.

Métodos analíticos apresentam como uma solução:

$$\beta = \pi, K_0 = 0.5, K_i = 0, \text{ para } i \geq 0.$$

Isso resulta que apenas metade da tensão necessária deve ser injetada na primeira metade do ciclo. A solução posiciona corretamente o fluxo concatenado do transformador de injeção de maneira que subsequentemente a tensão plena possa ser aplicada após a primeira metade do ciclo, já que λ_{DC} foi removido.

ESQUEMA ELÉTRICO BANCADA DVR



FERNANDES, D. A.; COSTA, F. F.; INOCENCIO, J. D.; CASTRO, A. C.; FREITAS, I. S. Transformers Flux-Linkage Control in Dynamic Voltage Restorer Systems. In: *IEEE International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, 2013, Istanbul. Proceedings of POWERENG, 2013. v. 1. p. 433-438.

FERNANDES, D. A.; COSTA, F. F.; INOCENCIO, J. D.; CASTRO, A. C.; FREITAS, I. S. Dynamic Voltage Restorer with complete control of the connection transformers saturation. *Revista Eletrônica de Potência – SOBRAEP*. August, 2013.