

Universidade Federal de Minas Gerais
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

**Proteção de inversores de frequência
em sistemas não-aterrados com faltas fase-terra intermitentes**

Marcelo Britto Martins

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: Prof. Antônio Emilio Angueth de Araújo, PhD.

Co-orientador: Prof. Braz Jesus Cardoso Filho, PhD.

Belo Horizonte, xxx de 2010

"Mas, agora, dedica-te ao pequeno dever, à grande missão de cada dia, ao teu estudo, ao teu trabalho, ao teu apostolado e, sobretudo, à tua formação, que pelo muito que ainda deves podar - não é tarefa nem menos heróica nem menos bela."

- São Josemaria Escrivá -

Agradecimentos

A Deus, por tudo, inclusive por todas as dificuldades que no fim só me fortaleceram.

A minha noiva Ana Carolina, por todo o carinho e compreensão.

A meus pais e irmãos, por todo o apoio e incentivo.

A meu padrinho de Crisma e profissão André Bessa, pelos ensinamentos e inspiração.

Ao professor Antônio Emilio, pela amizade, franqueza e pelos conselhos profissionais, pessoais e espirituais.

Ao professor Braz e a todos do LAI que me ajudaram, em especial ao Filipe, que foi essencial para a conclusão deste trabalho.

Ao Eduardo Giffoni e ao Sandro Moreira, representando a Samarco Mineração, pelo incentivo na continuidade deste trabalho.

Resumo

Os sistemas de acionamento a velocidade variável são hoje uma realidade nos acionamentos industriais. A ocorrência de falhas nestes sistemas pode comprometer severamente a produção das plantas. O aumento da confiabilidade destes sistemas é, portanto, muito desejável. Com esta preocupação em mente, sistemas de aterramento e proteção foram desenvolvidos com o passar do tempo. Em particular, a situação de um inversor PWM (*Pulse Width Modulated*) em um sistema não-aterrado merece uma análise mais cuidadosa. Se este inversor estiver acionando um sistema com falhas de isolamento para terra (e.g. um motor elétrico de indução), em um primeiro momento o acionamento não será interrompido pelas proteções existentes, o que é bom para a continuidade da operação. Porém, sobretensões fase-terra surgirão, podendo levar à falha dos isolamentos do inversor, avaria do equipamento e indesejada parada não-programada da produção. Esta dissertação se propõe a entender qualitativamente os fenômenos envolvidos que podem causar a falha do sistema, a perda do inversor e a conseqüente parada ou restrição da produção. A partir deste entendimento, projetar e construir um circuito capaz de garantir a continuidade da operação enquanto não se eliminam as falhas no motor, sem o risco de perda do inversor.

Abstract

Adjustable Frequency Driving Systems are nowadays a reality in industrial drives. Occurrence of failures in these systems can compromise plants production severely. Therefore, rising these systems' reliability is highly desirable. With this in mind, grounding and protection systems have been developed over time. Particularly, the situation of a PWM (*Pulse Width Modulated*) drive in a non-grounded system deserves closer examination. If that drive is driving a system with insulation failures to ground (e.g. induction motor), at first the driving will not be interrupted by existing protections, what is good for operation continuity. However, phase-to-ground overvoltages will arise and may lead to insulation failure, equipment breakdown and undesirable unscheduled production stop. This thesis aims to qualitatively understand involved phenomena that can cause system failure, loss of drive equipment and the subsequent production stop or restriction. Based on this understanding, design and build a circuit capable of ensure operation continuity while motor failures are not eliminated, without the risk of drive loss.

Conteúdo

Epígrafe	i
Agradecimentos	ii
Resumo	iii
Abstract	iv
Lista de Figuras	viii
Lista de Tabelas	xiii
1 Introdução	1
1.1 Relevância	1
1.2 Contribuições	4
1.3 Organização	5
2 Contexto	6
2.1 O problema	6

2.2	Métodos de aterramento em sistemas elétricos	7
2.3	Escalonamento da tensão neutro-terra em sistemas industriais com neutro não aterrado	10
2.4	Sobretensões em acionamentos a velocidade variável	12
2.5	Aterramento de sistemas elétricos com acionamentos a velocidade variável	13
2.6	Desafios de modelagem	15
3	Análise do problema	18
3.1	Medições iniciais em laboratório	18
3.2	Tensões e correntes em sistemas de acionamento a velocidade variável	20
3.3	Acionamentos a velocidade variável com faltas fase-terra	23
3.4	Faltas fase-terra intermitentes em acionamentos a velocidade variável	32
4	Projeto de um circuito supressor	34
4.1	Características desejadas	34
4.2	Escolhas de projeto	35
4.3	Metodologia de projeto	36
4.4	Alguns exemplos	46
5	Construção e testes de um circuito supressor	48
5.1	Especificação para teste	48
5.2	Testes de laboratório	49
5.2.1	Testes com um protetor em uma das fases	50

5.2.2	Testes com protetores em duas fases	55
5.2.3	Testes com dois protetores em paralelo	56
5.3	Análise dos resultados	57
6	Conclusões finais e propostas de continuidade	60
6.1	Conclusões	60
6.2	Propostas de continuidade	63

Lista de Figuras

2.1	Métodos de aterramento de neutro	8
2.2	Corrente de falta em um sistema não aterrado	10
2.3	Fenômeno do escalonamento de tensão em um sistema industrial não aterrado, causado por reignição de arcos em falhas para a terra	11
2.4	Oscilação nos terminais do motor somada às tensões chaveadas	12
2.5	Sistema de acionamento a velocidade variável com modulação PWM	14
2.6	Corrente de modo comum retornando pelo aterramento do neutro do transformador	15
3.1	Modelagem do circuito estudado	18
3.2	Tensões fase-terra na saída de um inversor em condições normais, circuito de 220V	21
3.3	Tensões fase-terra na saída de um inversor em condições normais, circuito de 220V	22
3.4	Tensões fase-terra na saída do inversor, em um circuito de 220V em condições normais, com frequência de chaveamento de 1,25KHz	22
3.5	Tensões fase-terra na saída do inversor, em um circuito de 220V em condições normais, com frequência de chaveamento de 2,5KHz	23

3.6	Tensões fase-terra na saída do inversor, em um circuito de 220V em condições normais, com frequência de chaveamento de 5,0KHz	24
3.7	Tensões fase-terra na saída do inversor, em um circuito de 220V em condições normais, com frequência de chaveamento de 10,0KHz	25
3.8	Tensão e corrente de modo comum, circuito de 220V. Escala de corrente: 100mV/1A	25
3.9	Tensões fase-terra na saída de um inversor no momento da falta, circuito de 220V	26
3.10	Sobretensões medidas em um circuito de 480V na ocorrência de uma falta fase-terra	26
3.11	Surtos de tensões fase-terra na saída do inversor, em um circuito de 220V na ocorrência de uma falta fase-terra	27
3.12	Surtos de tensões fase-terra na saída do inversor, em um circuito de 220V na ocorrência de uma falta fase-terra	27
3.13	Tensões fase-terra na saída do inversor, em um circuito de 220V na ocorrência de uma falta fase-terra, com frequência de chaveamento de 1,25KHz	28
3.14	Tensões fase-terra na saída do inversor, em um circuito de 220V na ocorrência de uma falta fase-terra, com frequência de chaveamento de 2,5KHz	28
3.15	Tensões fase-terra na saída do inversor, em um circuito de 220V na ocorrência de uma falta fase-terra, com frequência de chaveamento de 5KHz	29
3.16	Tensões fase-terra na saída do inversor, em um circuito de 220V na ocorrência de uma falta fase-terra, com frequência de chaveamento de 10KHz	30
3.17	Tensão e corrente de modo comum durante falta fase-terra, circuito de 220V. Escala de corrente: 100mV/1A	30

3.18	Tensões fase-terra na entrada do inversor no momento do curto (detalhe) circuito de 220V	31
3.19	Tensões fase-fase e fase-terra na entrada do inversor no momento do curto, frequência de chaveamento 1,25KHz, circuito de 220V	31
3.20	Tensões fase-fase e fase-terra na entrada do inversor no momento do curto, frequência de chaveamento 5KHz, circuito de 220V	32
4.1	Conexão dos protetores no circuito	35
4.2	Modelo do circuito implementado no ATP	37
4.3	Modelo de uma fase do inversor implementado no ATP	37
4.4	Modelo do motor implementado no ATP	38
4.5	Diodos zener ligados em anti-paralelo	40
4.6	Modelo do supressor com 4 conjuntos em série	40
4.7	Tensões e correntes em um diodo zener, circuito de 220V, frequência de chaveamento 5KHz, 3 conjuntos por fase, $V_Z = 150V$	42
4.8	Tensões e correntes em um protetor em uma fase, circuito de 220V, frequência de chaveamento 5KHz, 3 conjuntos por fase, $V_Z = 150V$	43
4.9	Corrente de modo comum, circuito de 220V, frequência de chaveamento 5KHz, 3 conjuntos por fase, $V_Z = 150V$	44
4.10	Potência máxima dissipada por um diodo zener em função da temperatura	44
4.11	Potência dissipada por um diodo zener	45
4.12	Potência dissipada por um diodo zener em detalhe	45

4.13	Potências médias em um diodo zener para um sistema de 480V e circuito protetor com 4 conjuntos de diodos em anti-paralelo por fase	47
5.1	Esquemático, projeto da placa e foto do circuito	49
5.2	Surtos de tensão fase-terra nos terminais de saída do inversor com o protetor em uma das fases	51
5.3	Surtos de tensão fase-terra no protetor e em um diodo com o protetor em uma das fases	51
5.4	Surtos de tensão fase-terra no protetor e em um diodo com o protetor em uma das fases	52
5.5	Tensões fase-terra na entrada do inversor no momento do curto (detalhe) circuito de 220V	52
5.6	Tensões fase-terra na entrada do inversor com o protetor em uma das fases	53
5.7	Corrente de sequência zero no momento do curto, com protetor em uma das fases. Escala de corrente: 100mV/1,0A	53
5.8	Corrente de sequência zero no momento do curto, com protetor em uma das fases. Escala de corrente: 100mV/1,0A	54
5.9	Corrente no protetor no momento do curto, com protetor em uma das fases. Escala de corrente: 100mV/1,0A	54
5.10	Tensão fase-terra nos terminais de saída do inversor com o protetor em uma das fases - teste de longa duração	55

5.11	Surto de tensão fase-terra nos terminais de saída do inversor com o protetor em duas das fases	56
5.12	Surto de tensão fase-terra nos terminais de saída do inversor com dois protetores em paralelo em uma das fases	57

Lista de Tabelas

3.1	Instrumentação utilizada para a medição de tensão nos terminais do cabo de potência de 1,5mm ²	19
5.1	Maiores valores de pico obtidos nos testes de laboratório	58
5.2	Maiores valores de pico obtidos em simulação	58

Capítulo 1

Introdução

1.1 Relevância

Eventos críticos em um sistema elétrico como a ocorrência de sobretensões das mais diversas causas influenciam diretamente na confiabilidade destes sistemas e, por conseqüência, da própria planta industrial. Neste contexto, é necessário que o projeto de sistemas de aterramento e proteção seja adequado para cada situação específica, reduzindo riscos operacionais com segurança.

Nos sistemas elétricos industriais atuais, os sistemas de acionamento em velocidade variável ocupam lugar de destaque, com uma importância crescente à medida que os parques se modernizam. Paradas não-programadas normalmente significam perdas de produção, gastos extras com manutenção e mão-de-obra, descumprimento de prazos e metas, dentre outros efeitos indesejados. Daí se depreende que a disponibilidade destes sistemas de acionamento é geralmente uma característica estratégica em uma planta industrial. Todo esforço deve ser despendido para garantir o máximo aproveitamento dos equipamentos com o mínimo de custo.

Sob a perspectiva da Engenharia de Confiabilidade, a disponibilidade de um sistema é função

da sua confiabilidade e manutenibilidade. A confiabilidade de um sistema é a probabilidade do mesmo não falhar em um determinado tempo, ou seja, a habilidade de continuar a desempenhar a sua função [1]. Por manutenibilidade se entende a probabilidade de um sistema ser reparado em um determinado tempo. Ao aumentar a confiabilidade de um sistema sem alterar a sua manutenibilidade, teremos um aumento da disponibilidade. Para aumentar a confiabilidade de um sistema, é necessário diminuir a ocorrência de seus modos de falha [2].

A rigor, o conceito de falha é associado ao não atendimento de uma missão/função. Falha refere-se a um evento que representa o *término da capacidade de um item desempenhar a função requerida*. Diferente do conceito de falha é o conceito de defeito. Um defeito nem sempre afeta a capacidade de um item desempenhar sua função requerida [2]. Porém, falhas estão sempre associadas a um ou mais defeitos. Desta forma, nem sempre um defeito no isolamento elétrico será imediatamente a causa para uma falha do sistema, entendendo-se falha como a parada da produção, que é o fim último de todo acionamento industrial. Deve-se, portanto, trabalhar para que as falhas sejam evitadas, atuando em suas causas fundamentais, a fim de aumentar a confiabilidade de um sistema.

O sistema de acionamento é considerado um sistema reparável, pois a substituição de um dos seus componentes é capaz de conduzi-lo a seu estado inicial de funcionamento. Todavia, o módulo de potência do inversor, que é parte deste sistema, é um item não-reparável. Falhas no isolamento para a terra constituem um importante modo de falha para o módulo de potência. Desta forma, os fenômenos transitórios eletromagnéticos que degradam os isolamentos do sistema influem diretamente no tempo médio entre falhas (*MTBF - Mean Time Between Failures*) e na confiabilidade destes sistemas, sendo portanto de particular interesse dos profissionais de

manutenção e produção.

À medida que o inversor foi sendo introduzido nas instalações, diversos fenômenos decorrentes do chaveamento em alta frequência começaram a ser relevantes. Com o advento dos IGBTs (*Insulated Gate Bipolar Transistors*) que permitiram o chaveamento de tensões com rampa de subida rápida, da ordem de dezenas de nanossegundos, a frequência de chaveamento pôde ser aumentada a alguns milhares de Hertz. Este tempo de subida do pulso associado às frequências de chaveamento causaram o aparecimento de fenômenos de interferência eletromagnética conduzida [3, 4], correntes elétricas nos mancais dos motores [5–7], assim como oscilações de tensão provenientes de reflexões de onda [3, 4, 8–11], dentre outros. O comprimento das ondas componentes das tensões chaveadas é da ordem de grandeza de algumas centenas de metros, coincidindo com os comprimentos dos cabos utilizados nos acionamentos industriais. Isto impossibilita a análise com modelos de parâmetros concentrados para caracterizar estes fenômenos. Este cenário trouxe novos desafios para a compatibilidade destes sistemas com as instalações existentes e futuras, trazendo novos elementos para a análise de sistemas elétricos industriais.

A degradação dos isolamentos causada por sobretensões transitórias introduzidas pelo chaveamento é um dos mecanismos de falha mais importantes em instalações com acionamentos a velocidade variável [10–12]. Considerando o caso específico de um motor que já apresente defeitos de isolamento, é desejável que estes defeitos não signifiquem parada imediata da operação, nem tenham como consequência a avaria de outros equipamentos no mesmo sistema, muito menos acidentes com lesões ao patrimônio ou às pessoas. Ao lançar mão de um sistema não aterrado, prática comum atualmente, os quesitos de continuidade da operação e segurança pessoal são atingidos, por limitarem a corrente de curto-circuito a valores muito baixos. Desta forma, uma

falta fase-terra não é capaz de sensibilizar nenhuma proteção elétrica, permitindo a continuidade da operação do sistema. Porém, esta prática não leva em conta a ocorrência de sobretensões causadas por faltas fase-terra de natureza intermitentes, que são capazes de causar falhas em outros equipamentos no mesmo sistema, especialmente o inversor que eventualmente esteja acionando o motor defeituoso. O estudo de sistemas industriais com estas características de falta já é bem conhecido na literatura [5, 13, 14], porém a presença de tensões chaveadas e sobretensões resultantes deste chaveamento traz novos elementos a esta análise nos sistemas atuais.

Portanto, faz-se necessário compreender adequadamente o fenômeno das faltas fase-terra intermitentes em sistemas de acionamento a velocidade variável, de maneira que possam ser apontadas alternativas para o projeto de sistemas de proteção mais eficientes, aumentando a confiabilidade dos acionamentos industriais.

1.2 Contribuições

Este trabalho traz as seguintes contribuições:

- 1 - Análise qualitativa dos sistemas de acionamento a velocidade variável em situações de faltas fase-terra intermitentes no motor.
- 2 - Metodologia para projeto de um circuito supressor de surto capaz de prevenir a falha do inversor na situação estudada, sem interromper a operação do sistema.
- 3 - Projeto e construção de protótipo de um circuito supressor e testes de laboratório.

1.3 Organização

O presente trabalho se encontra organizado da seguinte forma

Capítulo 2 - O problema - O problema escolhido é apresentado, estabelecendo o escopo de trabalho, os métodos de aterramento de sistemas elétricos existentes e os principais fenômenos de transitórios eletromagnéticos envolvidos.

Capítulo 3 - Medições iniciais em laboratório - É apresentada uma montagem em laboratório e as medições coletadas, com o objetivo de observar o comportamento de um sistema de acionamento na situação específica de faltas fase-terra em sistemas não aterrados.

Capítulo 4 - Projeto de um circuito supressor - É apresentada a proposta para a solução do problema. Segue-se então o desenvolvimento da metodologia de projeto de um circuito supressor de surto. Este circuito deverá ser capaz de eliminar as causas que possam levar à falha dos isolamentos do inversor na situação estudada.

Capítulo 5 - Construção e testes de um circuito supressor - Neste capítulo, um circuito projetado através da metodologia desenvolvida é construído e testado e sua eficácia comprovada através do teste prático na montagem apresentada no capítulo 3.

Capítulo 6 - Conclusões e propostas de continuidade - No último capítulo, as conclusões finais do trabalho são expostas, assim como as propostas de continuidade para o mesmo.

Capítulo 2

Contexto

2.1 O problema

Em uma instalação industrial com neutro não aterrado, um acionamento a velocidade variável com cabos longos e presença de sobretensões nos terminais do motor desenvolve uma falta fase-terra entre uma das bobinas do motor e sua carcaça. Deseja-se garantir que:

- 1 - a operação da planta industrial não seja interrompida pela ocorrência da falta;
- 2 - o sistema não ofereça riscos à segurança.
- 3 - a permanência da falta no sistema não cause falhas de isolamento e/ou queima de outros equipamentos, especialmente o inversor;
- 4 - a ocorrência da falta seja detectada de forma que o problema possa ser sanado em momento propício e planejado;

O primeiro quesito é atendido pelo fato do sistema não ser aterrado, o que garante que as proteções não irão atuar durante falta fase-terra e o acionamento pode continuar a operar por um tempo suficiente para que se tome alguma providência.

Quanto ao segundo quesito, cabe ressaltar que o aterramento em questão é o aterramento do neutro do sistema elétrico, e não o aterramento das carcaças dos equipamentos, que deve sempre ser garantido por questões de segurança [15–17]. O não aterramento do neutro também aumenta a segurança pessoal da instalação, pois as correntes de curto-circuito fase-terra são extremamente limitadas.

Este trabalho se concentra na solução dos dois últimos quesitos. É necessário, portanto, aprofundar a análise no que diz respeito ao aterramento do sistema, os fenômenos transitórios mais relevantes para este caso e seus efeitos sobre os equipamentos envolvidos.

2.2 Métodos de aterramento em sistemas elétricos

Historicamente, os métodos de aterramento de sistemas elétricos trifásicos datam do início do século passado, quando somente eram consideradas as opções de sistemas com o neutro solidamente aterrado ou não-aterrado. A primeira opção tem a desvantagem de apresentar altas correntes de curto-circuito. A segunda, por sua vez, apresenta valores altos de sobretensão na ocorrência de curtos. A percepção de que a continuidade da operação aumentava quando não havia aterramento fortaleceu a escolha pela segunda configuração. Com o passar do tempo, o aterramento através de resistências ou reatâncias surgiu como mais uma alternativa, trazendo mais opções aos projetistas [13, 14]. Atualmente, o aterramento por alta impedância ou não-

aterrado é o mais escolhido, por questões de segurança operacional e pessoal [18], pois a limitação da corrente de curto-circuito evita acidentes ou pelo menos diminui as suas consequências. Outra vantagem trazida é a possibilidade de identificação de faltas fase-terra através da medição da corrente no resistor de aterramento. A figura 2.1 nos traz um sumário dos métodos e respectivos diagramas de aterramento de neutro mais comuns. Alguns autores [16, 17] ainda classificam o aterramento via impedância como dois distintos, de (i)baixa ou de (ii)alta impedância, ou ainda [15] distinguindo as impedâncias de aterramento como (i) resistiva, (ii) indutiva ou (iii)neutralizadora de falta a terra ou ressonante, esta última um caso especial em que a impedância é calculada para atuar em ressonância com a capacitância do sistema, mais usada para linhas de distribuição e transmissão.



Figura 2.1: Métodos de aterramento de neutro

As faltas fase-terra e suas consequências dependem diretamente da estratégia de aterramento adotada na instalação. Pelo método das componentes simétricas, a corrente de falta fase-terra I_{GF} é dada pela equação 2.1

$$I_{FT} = \frac{3V_{FN}}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3Z_G} \quad (2.1)$$

em que

Z_1 é a impedância de sequência positiva

Z_2 é a impedância de sequência negativa

Z_0 é a impedância de sequência negativa

Z_G é a impedância combinada do circuito de retorno pela terra, incluindo a impedância de arco da falta, a impedância de aterramento do sistema e a impedância de aterramento de neutro, quando presente.

Em um sistema com o neutro aterrado via uma alta resistência, a resistência de neutro R_N é muito maior do que as demais, de forma que I_G se aproxima a V_{FN} dividido por R_N .

Neste trabalho, toma-se como premissa um sistema não aterrado. Isto significa que as impedâncias a terra são compostas predominantemente pelo acoplamento capacitivo do circuito em relação ao potencial do solo. Através destas impedâncias circulará uma corrente de valor muito baixo (geralmente alguns poucos amperes) durante a ocorrência de uma falta fase-terra, suficiente para carregar as capacitâncias do sistema para a terra (figura 2.2). Esta característica dificulta o dimensionamento de circuitos de proteção [16] e torna complicado o cálculo exato desta corrente pois a resistência do arco elétrico é muito significante e seu valor é reconhecidamente difícil de

prever [19].

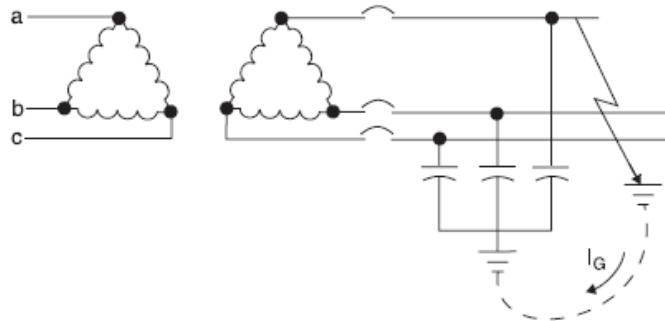


Figura 2.2: Corrente de falta em um sistema não aterrado

2.3 Escalonamento da tensão neutro-terra em sistemas industriais com neutro não aterrado

Em um sistema com neutro não aterrado, quando existem faltas à terra intermitentes ou com reignição de arcos, sobretensões transitórias de até oito vezes a tensão nominal de fase podem se desenvolver [16]. A bibliografia [13, 14] nos traz relatos de múltiplas falhas em equipamentos de um sistema inteiro em 480V na tentativa de localizar uma falta fase-terra, com medições de 1200V fase-terra e até maiores. A presença de capacitâncias e indutâncias parasitas cria condições favoráveis para o desenvolvimento de sobretensões transitórias em níveis superiores aos suportados pelos isolamentos. Efetivamente, todo sistema não aterrado está capacitivamente acoplado ao solo, fato que não pode ser negligenciado nas análises. Uma possível ocorrência de fenômenos intermitentes torna mais complicada a correta caracterização e controle das sobretensões causadas por estes fenômenos.

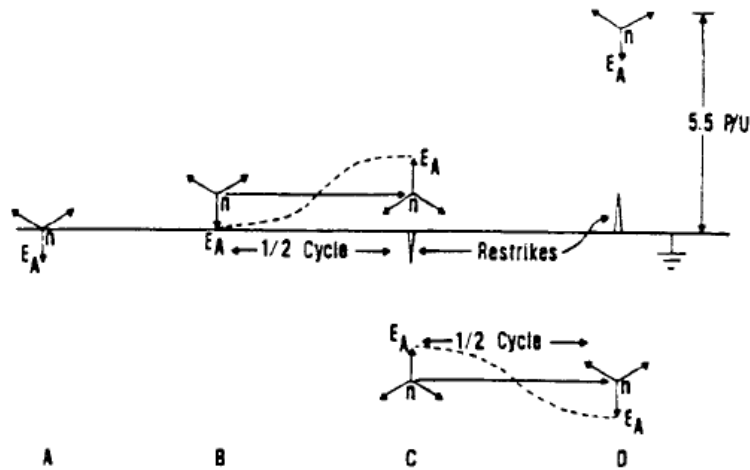


Figura 2.3: Fenômeno do escalonamento de tensão em um sistema industrial não aterrado, causado por reignição de arcos em falhas para a terra

A presença destas tensões é explicada pelo fenômeno de escalonamento da tensão mostrado na figura 2.3. Quando da ocorrência de uma falta fase-terra, as demais fases que não estão em falta assumem uma tensão fase-terra de mesmo valor da tensão fase-fase. Neste momento, pela natureza intermitente da falta, se ela se extinguir, as capacitâncias do sistema estarão carregadas, sendo capazes de manter a tensão do neutro em relação à terra deslocada de seu valor inicial. Num pior caso, se a falta aparecer de novo, teremos um surto de corrente no sentido contrário. Porém, este transitório irá causar uma oscilação de alta frequência, que somada às tensões originais, será capaz de deslocar o neutro a valores maiores do que os valores fase-fase originais, multiplicando as tensões até que algum isolamento se rompa em algum lugar, modificando o cenário, que provavelmente irá evoluir para situações catastróficas.

Importante ressaltar que este fenômeno se torna possível toda vez que, por algum motivo, as tensões do sistema apresentarem oscilações de frequências superiores à frequência de oper-

ação, conjugadas a faltas fase-terra em algum ponto do sistema. No sistema descrito, isto se dá pelo chaveamento das capacitâncias e indutâncias naturais presentes no circuito, realizado pela própria intermitência da falta.

2.4 Sobretensões em acionamentos a velocidade variável

O rápido tempo de subida dos pulsos PWM produzido pelo chaveamento dos IGBT's gera componentes de alta frequência que viajam pelo cabo até atingir o motor. Estas ondas de alta frequência apresentam comprimento de onda da ordem do comprimento dos cabos industriais para acionamento, usualmente algumas centenas de metros. Isto nos obriga a modelar o cabo com parâmetros distribuídos, como usualmente se faz com linhas de transmissão e distribuição de energia. Estas ondas, ao encontrar o motor, são refletidas, pois a impedância do motor nestas frequências se torna bem mais alta que a impedância característica do cabo. Desta forma, um sistema de acionamento a velocidade variável apresenta naturalmente oscilações da tensão nos terminais do motor (figura 2.4) causadas pela reflexão destas componentes de alta frequência. Estas oscilações estão presentes tanto entre fases como entre fase e terra.

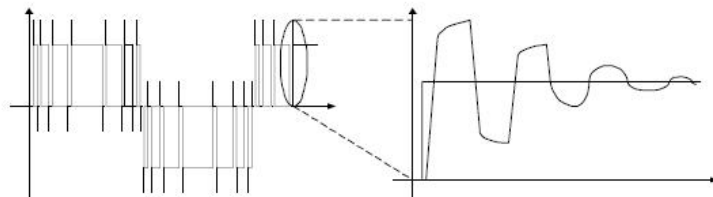


Figura 2.4: Oscilação nos terminais do motor somada às tensões chaveadas

Diversos estudos foram desenvolvidos nas últimas décadas para evitar que este fenômeno

causasse avarias aos isolamentos dos motores, assim como os problemas de interferência eletromagnética e correntes nos mancais. Um esforço muito grande foi despendido na modelagem eletromagnética destes sistemas [3,4,8,20–23] e no projeto de filtros e supressores de surtos [24]. Técnicas como filtros senoidais, filtros de dv/dt e até o uso de elementos como varistores [25–28] são descritos na literatura com o intuito de proteger os isolamentos do motor contra estas sobretensões.

Há que se destacar que muita atenção foi despendida na proteção dos motores, assunto este já bem tratado na bibliografia. Estas são soluções normalmente caras e complexas, razão pela qual a solução mais usual na indústria é utilizar motores com isolamento especial para acionamento com inversor.

Um ponto importante para este trabalho é entender que estas oscilações estão presentes também nos terminais do inversor. Se medirmos as tensões fase-terra na saída do inversor, veremos que estas oscilações aparecerão ali também, no caso do inversor não ser aterrado, o que é comum nas instalações industriais.

2.5 Aterramento de sistemas elétricos com acionamentos a velocidade variável

Os sistemas elétricos que possuem acionamentos a velocidade variável apresentam uma característica peculiar em relação ao aterramento de neutro e ao circuito de sequência zero. Os pulsos de tensão PWM não são, em alta frequência, um sistema de tensões trifásicas equili-

bradas, o que nos indica que há componentes de sequência zero em altas frequências. Em outras palavras, a diferença de potencial entre o neutro do motor e o ponto O do inversor na figura 2.5 não é nula. O ponto O pode ser localizado também no ponto médio entre o V_{CC} positivo e o V_{CC} negativo. Como só conseguimos medir um dos dois valores na saída do inversor, vamos tomar o potencial de V_{CC} negativo como referência, com o cuidado de considerar um *offset* nas medições.

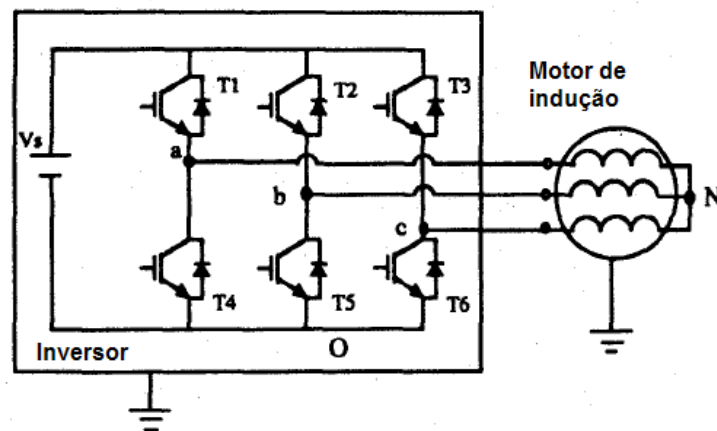


Figura 2.5: Sistema de acionamento a velocidade variável com modulação PWM

De fato, quando o sistema está com o neutro solidamente aterrado ou aterrado via impedância, o circuito de sequência zero oferece um caminho para que surjam correntes de sequência zero no sistema, também denominadas de modo-comum. Com o desenvolvimento dos inversores, as correntes de modo-comum passaram a interferir significativamente nos identificadores de falta fase-terra instalados nas plantas industriais, gerando falsos alarmes e paradas indesejadas. Estes falsos alarmes acontecem porque os identificadores de falta são circuitos que, em sistemas aterrados por uma impedância no neutro, medem de alguma forma a presença de correntes nessa

impedância. Esta corrente é a corrente de sequência zero de um circuito trifásico. Em um circuito equilibrado, idealmente a corrente de sequência zero é nula, só assumindo valores significativos na presença de algum desequilíbrio que envolva a terra, como uma falta fase-terra. Em sistemas que contenham inversores, a corrente de modo comum irá circular pela impedância de neutro, como mostrado na figura 2.6. Um identificador de falta fase-terra conectado ao neutro do transformador poderá acusar uma falsa corrente de curto. Uma maneira de sanar este problema é através da aplicação de filtros [29].

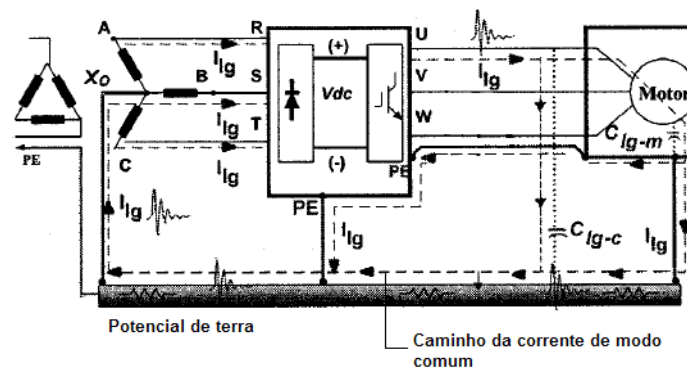


Figura 2.6: Corrente de modo comum retornando pelo aterramento do neutro do transformador

2.6 Desafios de modelagem

A modelagem matemática do sistema que se pretende estudar vários aspectos relativos ao inversor, ao cabo, ao motor e à falta. Estes aspectos são destacados a seguir [20, 21].

O inversor apresenta capacitâncias parasitas entre os nós dos seus circuitos de potência e a sua carcaça da ordem de centenas de pico-farads [30–32]. Esta capacitância fica sujeita à variação de potencial que existe entre a parte de potência do circuito, que nem sempre é aterrada,

e a carcaça, que sempre é aterrada. Esta capacitância, devido ao seu baixo valor, é medida por métodos especiais.

O valor desta capacitância é conseguido com medições especiais por ser um valor muito baixo, que não consegue ser medido por um instrumento usual pois a própria capacitância da ponta de prova é maior do que a capacitância que se deseja medir. A bibliografia traz alguns exemplos de casos em que se mediu esta capacitância em inversores ou em equipamentos similares, para estudos de compatibilidade eletromagnética.

A modelagem de cabos de potência para acionamentos em alta frequência já foi estudada em diversos trabalhos [3,4,8,22,23]. Modelos a parâmetros distribuídos foram desenvolvidos com o objetivo de representar com o máximo de exatidão os fenômenos de transitórios eletromagnéticos que surgem neste tipo de acionamento, notadamente as sobretensões nos terminais do motor. Para este estudo, é necessário que a modelagem do cabo represente muito bem os circuitos de sequência zero, pois a falta fase-terra é uma falta assimétrica, caracterizando o sistema estudado como um circuito trifásico desequilibrado.

A modelagem tradicional de motores de indução leva em conta o funcionamento do mesmo na frequência industrial. A partir desta premissa, foram construídos os modelos clássicos de circuitos equivalentes para um motor de indução trifásico, com o objetivo de descrever o comportamento em baixa frequência de tensões e correntes e suas relações com as variáveis mecânicas do equipamento, como torque e velocidade.

Para caracterizar os fenômenos em alta frequência, é preciso obter um modelo dos motores de indução em alta frequência. Este modelo se baseia normalmente na medição das impedâncias do motor nas frequências de interesse. Diversos trabalhos trazem exemplos de modelagem de

motores em alta frequência [3, 22, 33–36]. As máquinas em falta mereceram a atenção de alguns autores, que investigaram as tensões entre espiras e a influência de curtos no comportamento do motor [37–39].

O curto-circuito que se deseja estudar tem características de faltas com arco elétrico, o que torna a sua representação complexa, pelo caráter imprevisível da impedância de falta [40, 41].

Capítulo 3

Análise do problema

3.1 Medições iniciais em laboratório

Com o objetivo de observar os fenômenos eletromagnéticos mais relevantes, foi montado, nas dependências do LAI (Laboratório de Aplicações industriais), pertencente ao Departamento de Engenharia Elétrica da UFMG, o sistema mostrado na figura 3.1

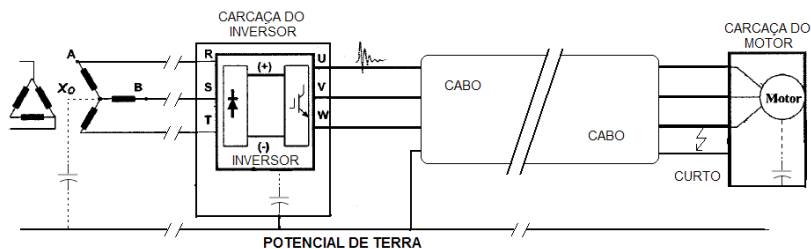


Figura 3.1: Modelagem do circuito estudado

Foram realizadas medições em duas oportunidades, uma com inversor WEG-CFW09 alimentado em 480V e outra com outro inversor de mesmo modelo, porém alimentado em 220V. O

método de modulação utilizado foi o PWM senoidal, com V/f constante.

O cabo de acionamento utilizado tem geometria tetrapolar, com 100m de comprimento e seção transversal de $1,5\text{mm}^2$ (seção transversal de cada condutor), disposto sobre o solo . O motor é um motor GE, de 3HP, 4 polos, 220/380. A instrumentação necessária para a realização destas medições encontra-se listada na Tabela (3.1).

Equipamento	Modelo
Osciloscópio digital	Tektronix TDS3054B
Ponta de prova de tensão	Tektronix P2200
Ponta de prova de corrente	Tektronix A621

Tabela 3.1: Instrumentação utilizada para a medição de tensão nos terminais do cabo de potência de $1,5\text{mm}^2$.

Esta montagem foi baseada na montagem realizada nos trabalhos de Moreira e Milagres [3, 4, 8], com algumas modificações. A principal modificação diz respeito ao aterramento do sistema. A carcaça do motor está ligada à carcaça do inversor através de um dos condutores do cabo tetrapolar. Este condutor representa a malha de aterramento do sistema isolado. As carcaças não estão conectadas de nenhuma forma ao neutro do transformador, nem à malha de aterramento do laboratório. Desta forma, as tensões do sistema elétrico estão acopladas ao potencial das carcaças somente através das capacitâncias parasitas.

Após a partida do motor, estando o mesmo em regime, um curto-circuito simples pode ser causado através da ligação de uma das fases à carcaça do motor através de um condutor. Isto

não simula a situação de reignição de arcos e escalonamento de tensão, mas é uma primeira observação do comportamento do sistema na presença de uma falta de curta duração. A reprodução em laboratório de uma falta intermitente, com todas as características de um arco elétrico, se mostrou inviável no contexto deste trabalho, pela complexidade de implementação física, simulação computacional e indisponibilidade de recursos para eventuais testes potencialmente destrutivos. Contudo, o curto-circuito produzido se mostrou suficiente para os objetivos deste trabalho, como se perceberá adiante.

3.2 Tensões e correntes em sistemas de acionamento a velocidade variável

Normalmente, quando se estudam as sobretensões em acionamentos com inversores, são medidas as tensões entre fases nos terminais do motor, pois usualmente tenciona-se proteger os isolamentos deste e não daqueles. Neste trabalho, contudo, o objetivo é proteger o isolamento fase-terra do inversor na presença de uma falta fase-terra, pois este isolamento estará submetido a sobretensões críticas.

As tensões entre fases na saída do inversor não apresentam nenhuma oscilação de tensão, pois o inversor é a fonte destas tensões. Todavia, como o inversor não tem nenhuma ligação para a terra, o acoplamento entre o módulo de potência e a carcaça, que está aterrada, é capacitivo, como está evidenciado na figura 3.1.

Estas capacitâncias são carregadas e descarregadas pelas ondas refletidas, razão pela qual

observamos uma oscilação de alta frequência na tensão fase-terra nos terminais do inversor. As figuras 3.2 e 3.3 são medições destas tensões fase-terra na saída do inversor de 220V em uma condição normal de operação. Percebe-se que estas oscilações se mantêm dentro de limites aceitáveis em condições normais de operação.

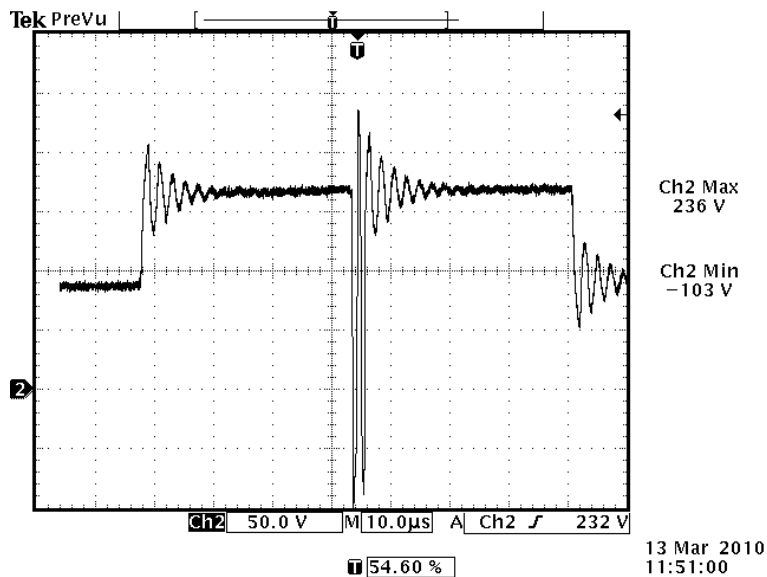


Figura 3.2: Tensões fase-terra na saída de um inversor em condições normais, circuito de 220V

Percebe-se, também, nas figuras 3.4, 3.5, 3.6, 3.7, as formas de onda de ciclos completos de modulação PWM nas quatro opções de frequência de chaveamento disponíveis no modelo de inversor utilizado. Em um mesmo ciclo de 60Hz, uma frequência de chaveamento maior vai causar mais surtos de tensão, como era de se esperar.

As correntes de modo-comum ou sequência zero surgem no condutor de aterramento e são causadas pela diferença de potencial que existe entre o ponto N do motor e o ponto O do inversor (figura 2.5), proveniente do próprio método de modulação PWM. Um exemplo de medição destas correntes e tensões é mostrado na figura 3.8. A corrente foi medida no condutor de aterramento

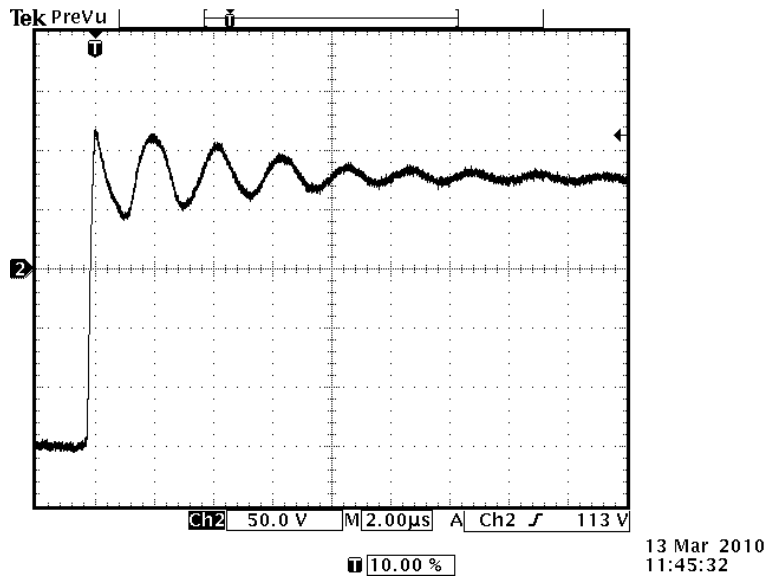


Figura 3.3: Tensões fase-terra na saída de um inversor em condições normais, circuito de 220V

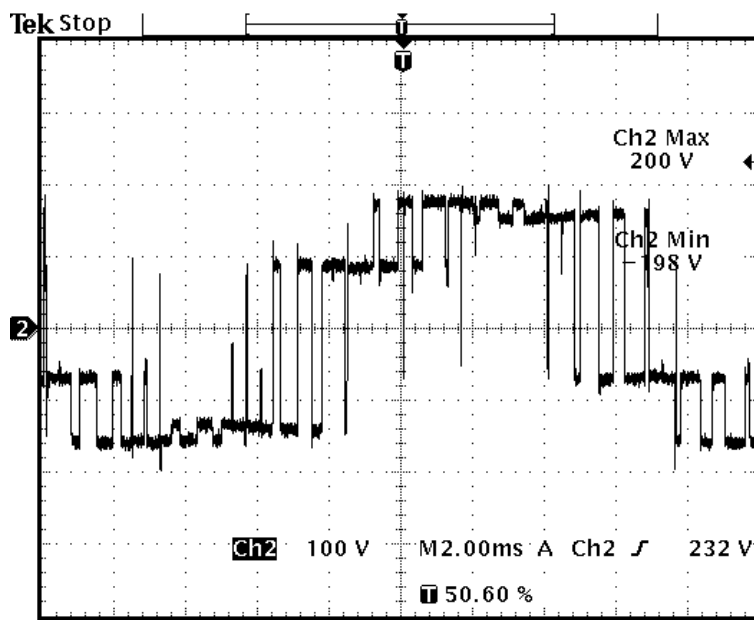


Figura 3.4: Tensões fase-terra na saída do inversor, em um circuito de 220V em condições normais, com frequência de chaveamento de 1,25KHz

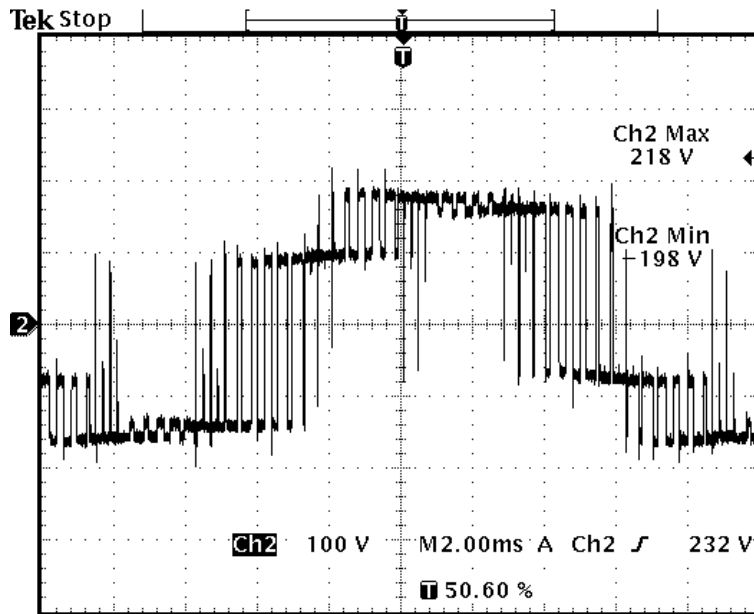


Figura 3.5: Tensões fase-terra na saída do inversor, em um circuito de 220V em condições normais, com frequência de chaveamento de 2,5KHz próximo ao inversor.

3.3 Acionamentos a velocidade variável com faltas fase-terra

Em uma situação de falta fase-terra na saída do inversor, a tensão fase-terra do inversor assumirá valores fase-fase, porém serão somadas as oscilações que já existiam anteriormente. As tensões fase-fase permanecerão inalteradas, permitindo que o acionamento continue em operação sem a atuação da proteção.

Na ocorrência de um curto-circuito próximo ao motor, ao medirmos as tensões fase-terra nos terminais do inversor, observa-se, nas fases sãs, uma sobretensão de 1280V de pico no primeiro caso (figura 3.10) e cerca de 800V (figuras 3.11 e 3.12) no segundo. Estas sobretensões, da or-

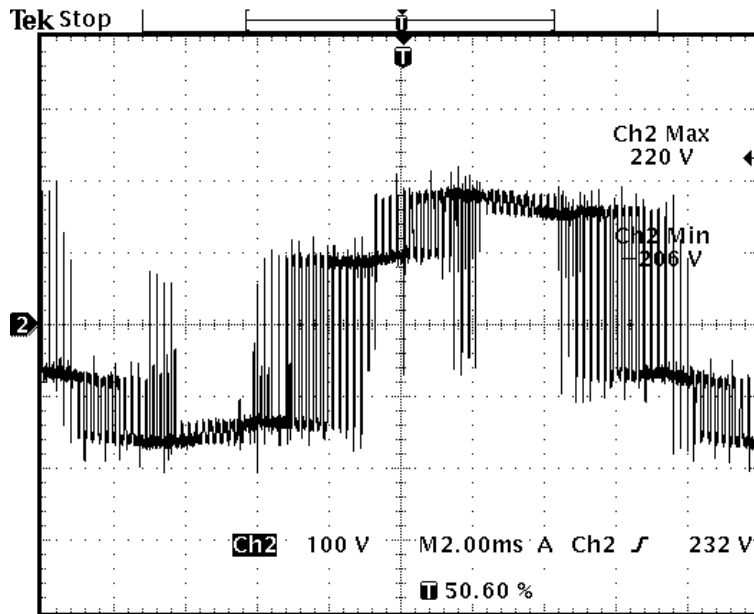


Figura 3.6: Tensões fase-terra na saída do inversor, em um circuito de 220V em condições normais, com frequência de chaveamento de 5,0KHz

dem de 3pu, aparecem nas capacitâncias parasitas, deslocando o neutro e oferecendo condições propícias para o desenvolvimento do escalonamento de tensão. Se a falta, que foi produzida uma só vez neste teste, acontecer novamente em momentos críticos como estes, as tensões poderão atingir valores ainda maiores, pois o próximo deslocamento do neutro poderá ser maior, desenvolvendo, assim, o escalonamento de tensão observado por Beeman [13].

Percebe-se, também, em uma situação de falta fase-terra, nas figuras 3.13, 3.14, 3.15, 3.16, as formas de onda de ciclos completos de modulação PWM com os quatro valores de frequência de chaveamento possíveis de serem configurados no modelo de inversor utilizado. As tensões medidas são das fases sãs. Em um mesmo ciclo de 60Hz, uma frequência de chaveamento maior vai causar mais surtos de tensão, como era de se esperar.

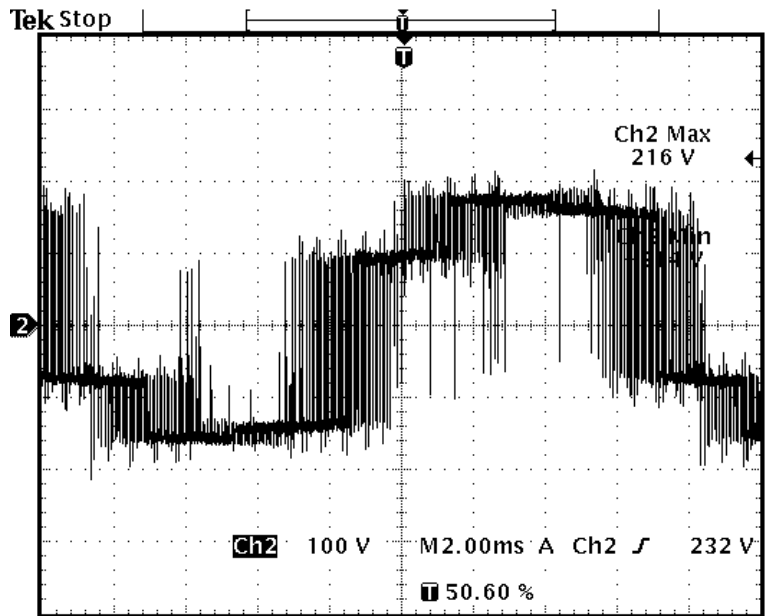


Figura 3.7: Tensões fase-terra na saída do inversor, em um circuito de 220V em condições normais, com frequência de chaveamento de 10,0KHz

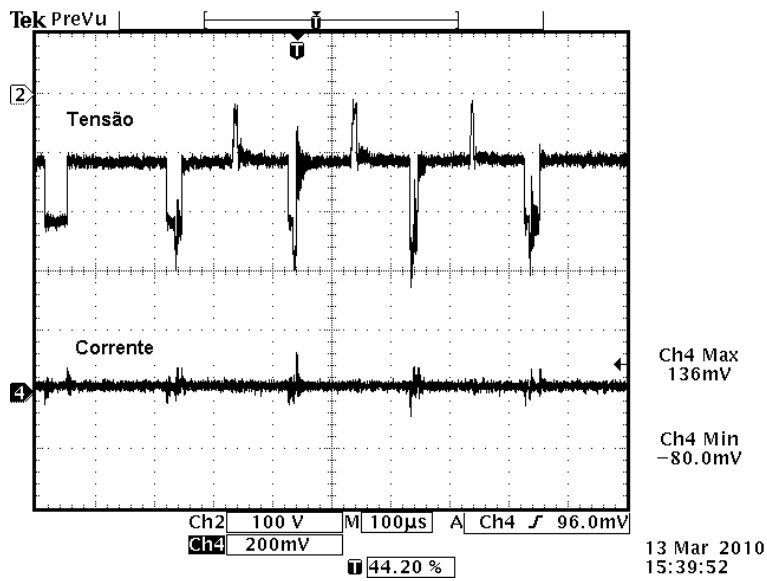


Figura 3.8: Tensão e corrente de modo comum, circuito de 220V. Escala de corrente: 100mV/1A

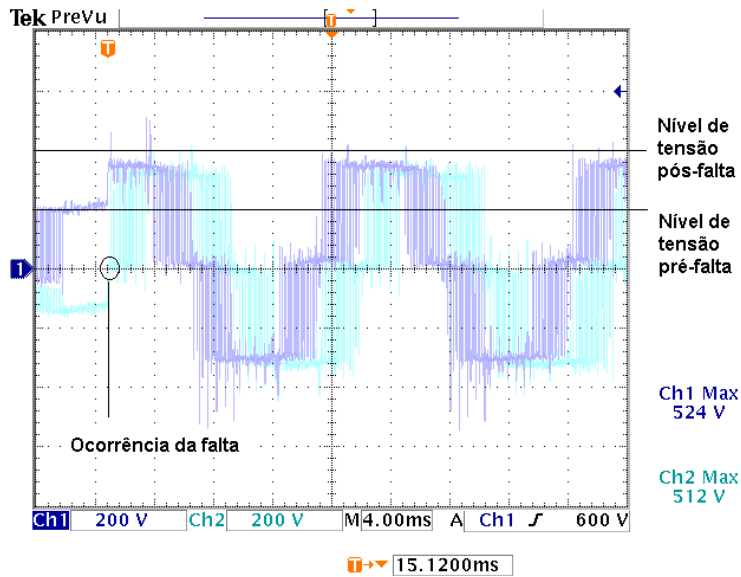


Figura 3.9: Tensões fase-terra na saída de um inversor no momento da falta, circuito de 220V

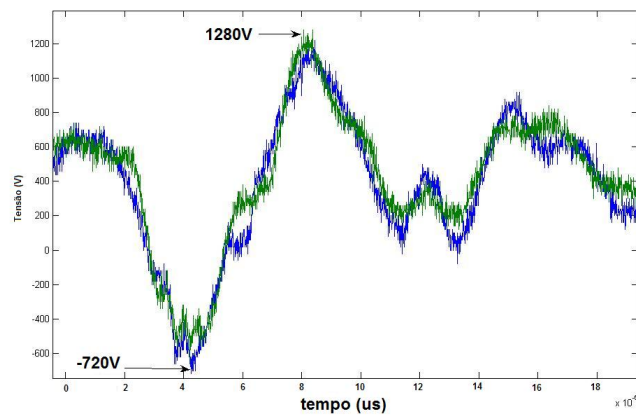


Figura 3.10: Sobretensões medidas em um circuito de 480V na ocorrência de uma falta fase-terra

A tensão de modo-comum não sofre alteração, porém a corrente de modo-comum aumenta significativamente, pois a ela é somada a corrente de falta. A figura 3.17 demonstra que estas correntes são da ordem de alguns amperes.

Adicionalmente, foram observadas as tensões fase-terra nos terminais de entrada do inversor.

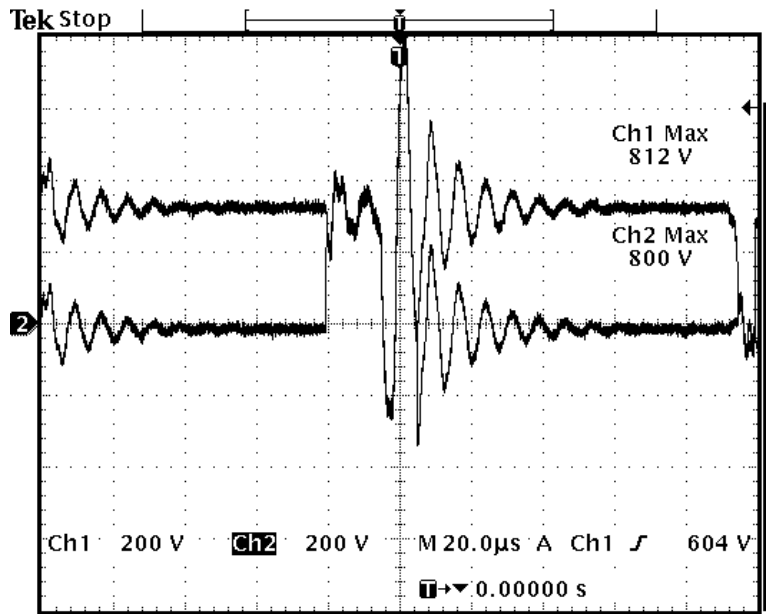


Figura 3.11: Surtos de tensões fase-terra na saída do inversor, em um circuito de 220V na ocorrência de uma falta fase-terra

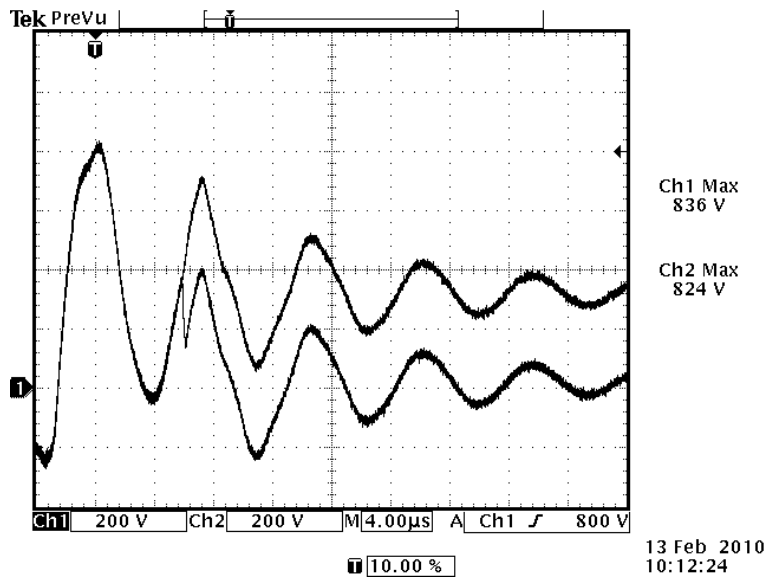


Figura 3.12: Surtos de tensões fase-terra na saída do inversor, em um circuito de 220V na ocorrência de uma falta fase-terra

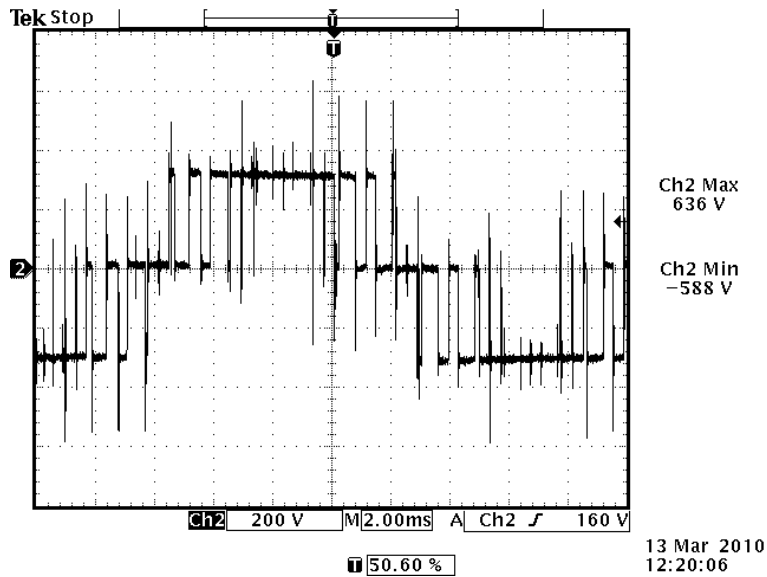


Figura 3.13: Tensões fase-terra na saída do inversor, em um circuito de 220V na ocorrência de uma falta fase-terra, com frequência de chaveamento de 1,25KHz

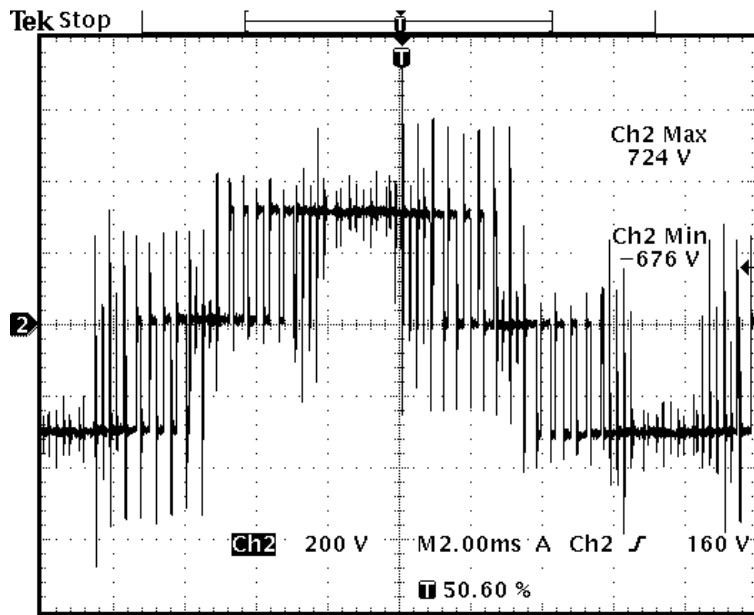


Figura 3.14: Tensões fase-terra na saída do inversor, em um circuito de 220V na ocorrência de uma falta fase-terra, com frequência de chaveamento de 2,5KHz

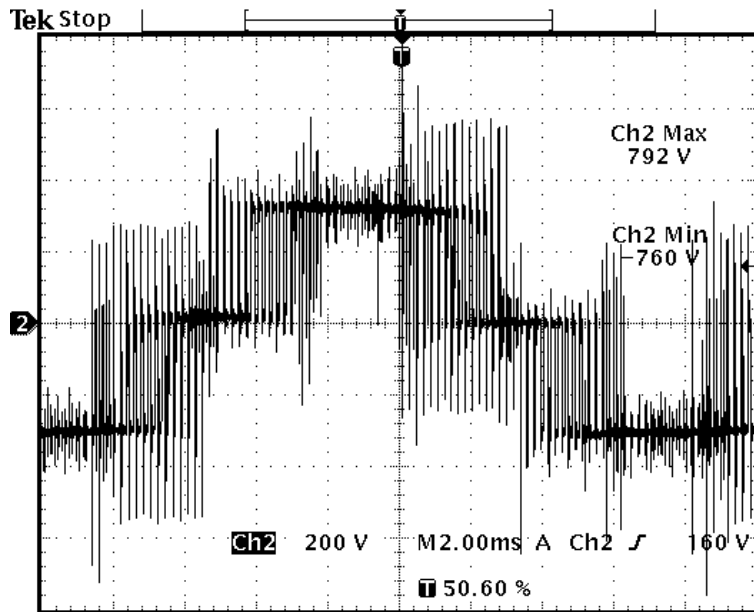


Figura 3.15: Tensões fase-terra na saída do inversor, em um circuito de 220V na ocorrência de uma falta fase-terra, com frequência de chaveamento de 5KHz

Somados à tensão em 60Hz da rede, podemos ver surtos de tensão no momento do curto (figura 3.18). Nesta mesma situação de curto, as figuras 5.5 e 3.20 mostram as tensões de entrada do inversor fase-fase e fase-terra medidas em duas situações diferentes de frequência de chaveamento. Pode-se perceber que a tensão fase-terra do sistema em 60Hz sofre uma alteração significativa em seu formato, ou seja, a presença do inversor modifica bastante o comportamento de um sistema elétrico em uma situação de curto-circuito fase-terra. Isto indica que outros equipamentos no mesmo sistema também sofrem a influência deste curto-circuito.

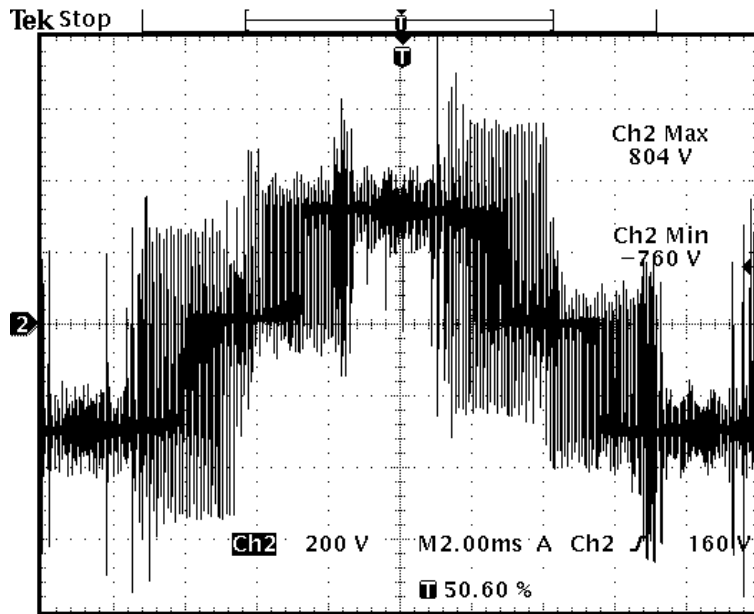


Figura 3.16: Tensões fase-terra na saída do inversor, em um circuito de 220V na ocorrência de uma falta fase-terra, com frequência de chaveamento de 10KHz

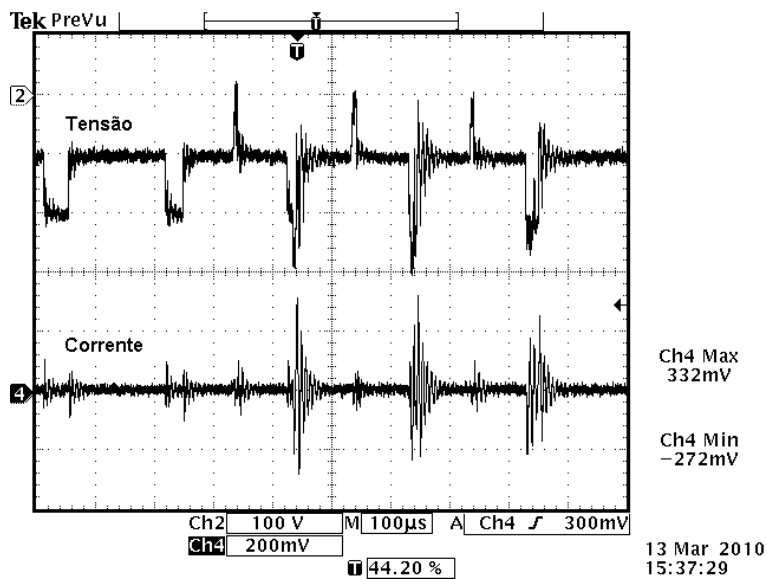


Figura 3.17: Tensão e corrente de modo comum durante falta fase-terra, circuito de 220V. Escala de corrente: 100mV/1A

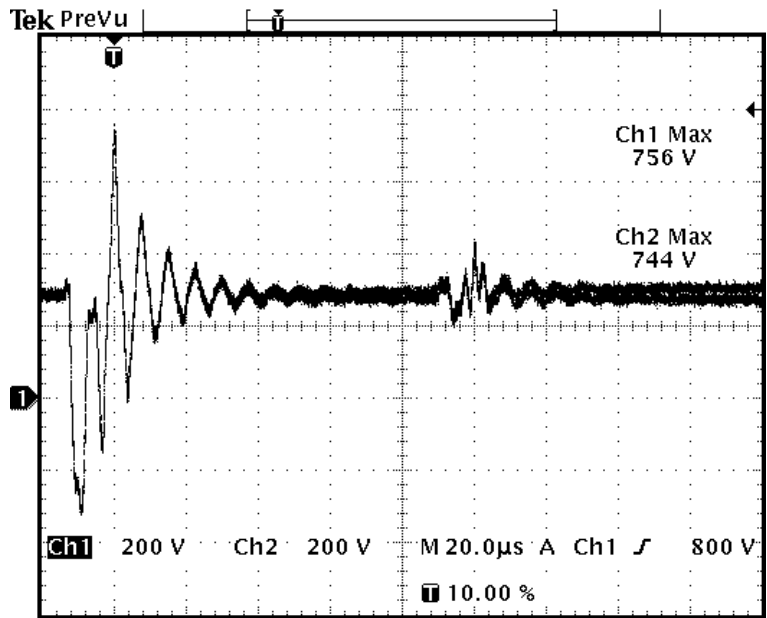


Figura 3.18: Tensões fase-terra na entrada do inversor no momento do curto (detalhe) circuito de 220V

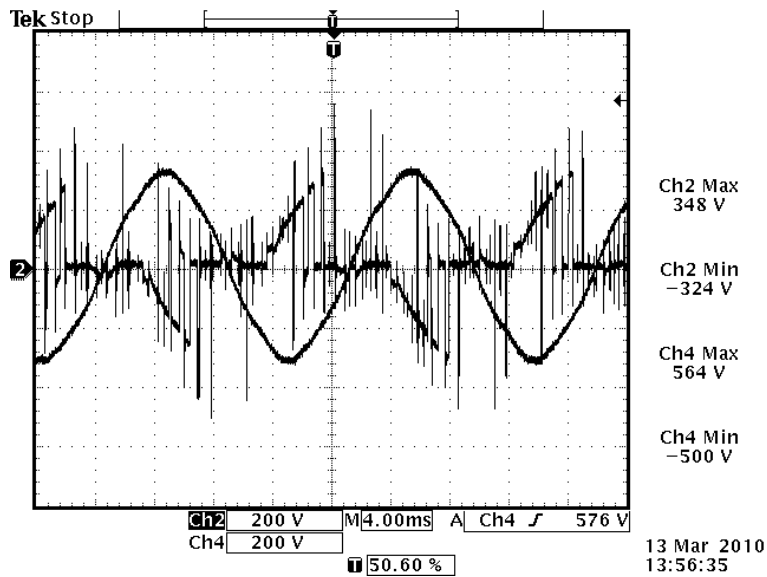


Figura 3.19: Tensões fase-fase e fase-terra na entrada do inversor no momento do curto, frequência de chaveamento 1,25KHz, circuito de 220V

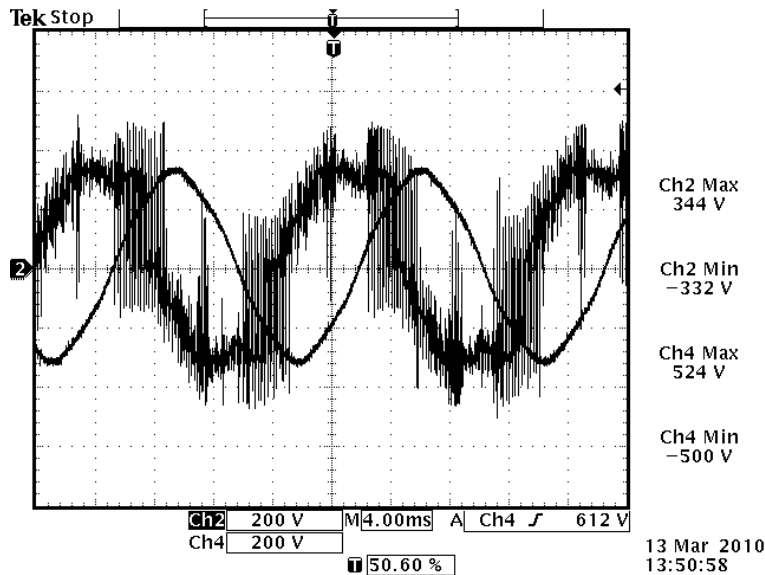


Figura 3.20: Tensões fase-fase e fase-terra na entrada do inversor no momento do curto, frequência de chaveamento 5KHz, circuito de 220V

3.4 Faltas fase-terra intermitentes em acionamentos a velocidade variável

A composição das sobretensões naturais do chaveamento com aquelas causadas por uma falta fase-terra intermitente no motor é capaz de gerar o fenômeno de escalonamento da tensão, pois as oscilações geradas pelo chaveamento sempre oferecerão uma das condições necessárias ao escalonamento. Além disso, estas oscilações estressam o isolamento do motor, num processo de desgaste contínuo do material isolante [42, 43], potencializando a ocorrência de falhas de natureza intermitente. Motores antigos e com classe de isolamento inadequada para o acionamento com inversores obviamente sofrem muito mais. A degradação do isolamento evolui gradativamente para um estado de curto-circuito. Assim, antes do estabelecimento de um curto-circuito

franco, estas falhas se tornarão intermitentes, favorecendo o estabelecimento do pior cenário previsto, que é o deslocamento incontido da tensão do neutro em relação à terra.

O inversor é um equipamento particularmente sensível a esta situação. Estando ele num sistema não-aterrado, as proteções presentes atualmente nos modelos comerciais não são capazes de identificar faltas do tipo fase-terra, pois as baixas correntes geradas em sistemas isolados não conseguem sensibilizá-las. Nem poderiam, pois não há maneira de diferenciar o que seria uma corrente de falta do que é a corrente de carga natural do acionamento do motor. Faltas deste tipo são potencialmente perigosas, pois podem gerar sobretensões em níveis proibitivos nos terminais do inversor. Isto levará, mais cedo ou mais tarde, à ruptura do isolamento do mesmo e à avaria do equipamento por queima do módulo de potência, somada à parada indesejada da produção.

Sendo o módulo de potência o componente mais crítico a ser protegido, o esforço de projeto será direcionado neste sentido. O módulo de potência que desejamos proteger é o modelo EUPEC BSM30GP60. O fabricante informa que o teste de isolamento do módulo garante sua integridade até 2,5kV RMS na frequência de 50Hz durante 1min [44]. Não conhecemos, porém, o comportamento do isolamento diante das formas de onda apresentadas, que têm tempos de subida rápidos, nem sabemos por quanto tempo podem se estabelecer repetitivamente. Contudo, é certo que se controlarmos os surtos de tensão apresentados nestas medições iniciais, outros fenômenos que possam ser desencadeados na presença destes surtos estarão, também, controlados.

Capítulo 4

Projeto de um circuito supressor

4.1 Características desejadas

A proposta deste trabalho é construir uma solução que venha eliminar ou mitigar os riscos que corre a integridade dos isolamentos do inversor ao se estabelecer o cenário exposto. A reprodução do escalonamento de tensão em laboratório se mostrou inviável por se tratar de testes potencialmente destrutivos e a modelagem computacional do curto intermitente por falha de isolamento ser demasiado complexa. Porém, com os recursos disponíveis é possível chegar a uma solução que impeça o aparecimento das sobretensões medidas, limitando-as a níveis aceitáveis e eliminando, desta forma, a causa raiz do escalonamento de tensão, que são as oscilações de tensão em alta frequência somadas à fundamental.

A solução a ser desenvolvida deve manter as características desejadas do sistema que já são atendidas pela opção de sistema não aterrado, que são a continuidade da operação no caso de falta fase-terra e a segurança operacional.

Elementos como diodos zener, diodos supressores de surto, varistores e similares apresentam resistividade variável com a tensão, característica que pode ser aproveitada para este fim. O desafio se torna então especificar componentes comerciais e topologias de circuito que sejam capazes de atender às necessidades do projeto.

4.3 Metodologia de projeto

Antes de realizar testes de laboratório, é conveniente proceder a uma análise através da simulação computacional. A modelagem deve ser capaz de representar eficientemente pelo menos o inversor, o cabo, o motor, o circuito supressor que se deseja projetar e a ocorrência da falta fase-terra. Esta representação é suficiente para nossos objetivos.

Os modelos foram implementados no *software* de simulação de transitórios eletromagnéticos ATP (*Alternative Transients Program*). Um exemplo está ilustrado na figura 4.2. A figura não apresenta o modelo de cabo, pois ele não possui representação gráfica no *software*.

A representação do inversor consiste em fontes de tensão controladas que reproduzem o comportamento dos pulsos PWM (tempo de subida e instante de cada pulso) e capacitâncias para a terra, reproduzindo a capacitância do módulo de potência para a carcaça do inversor. Cada fonte de tensão controlada reproduz os pulsos de PWM em cada uma das três fases e está demonstrada na figura 4.3. Deve ser ressaltado que o nó de referência do circuito não coincide com o nó que representa o potencial de terra, que está indicado na figura.

Para o caso estudado aqui, é de particular interesse o modelamento das componentes de modo comum do circuito, pois estamos estudando faltas assimétricas. Isto significa que o circuito de

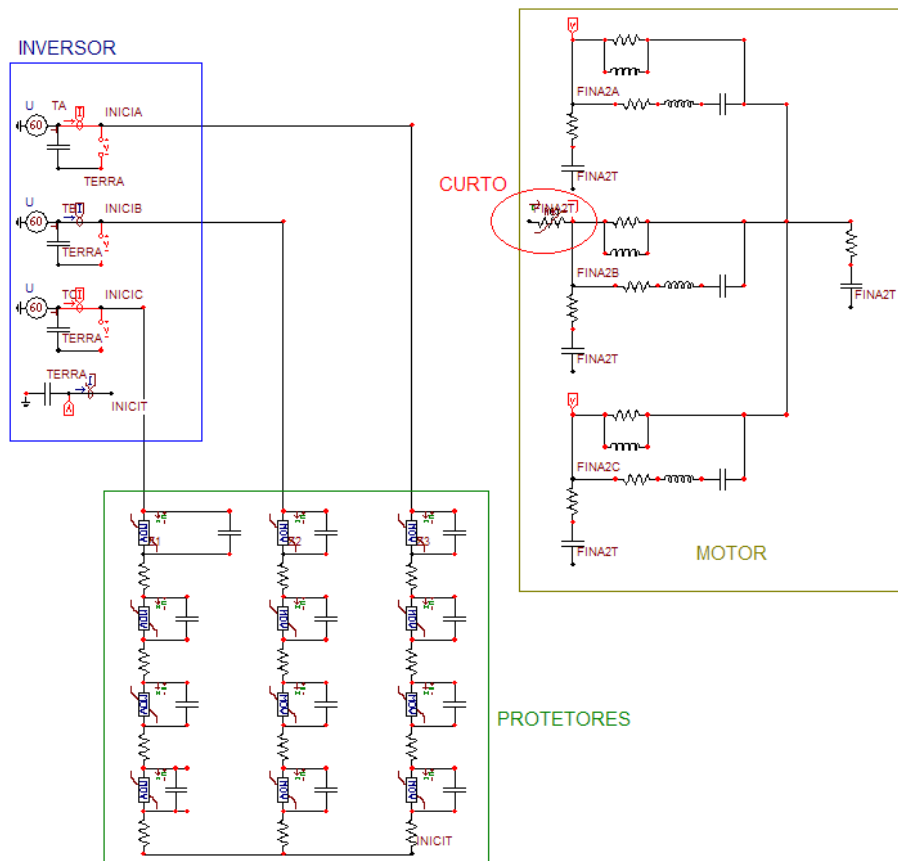


Figura 4.2: Modelo do circuito implementado no ATP

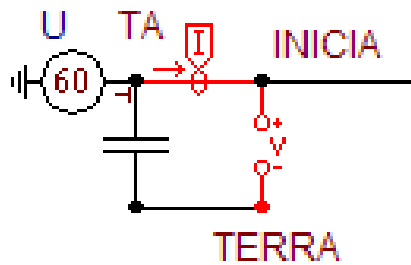


Figura 4.3: Modelo de uma fase do inversor implementado no ATP

sequência zero deve estar suficientemente condizente com a realidade. Por esta razão, o modelo de De Paula [23] foi escolhido para representar o cabo neste contexto.

Também a representação do motor necessita de uma nova abordagem. O motor utilizado neste trabalho já foi modelado em trabalhos anteriores [3, 4, 8, 22], sendo este o motivo para a sua utilização. O modelo implementado está mostrado na figura 4.4.

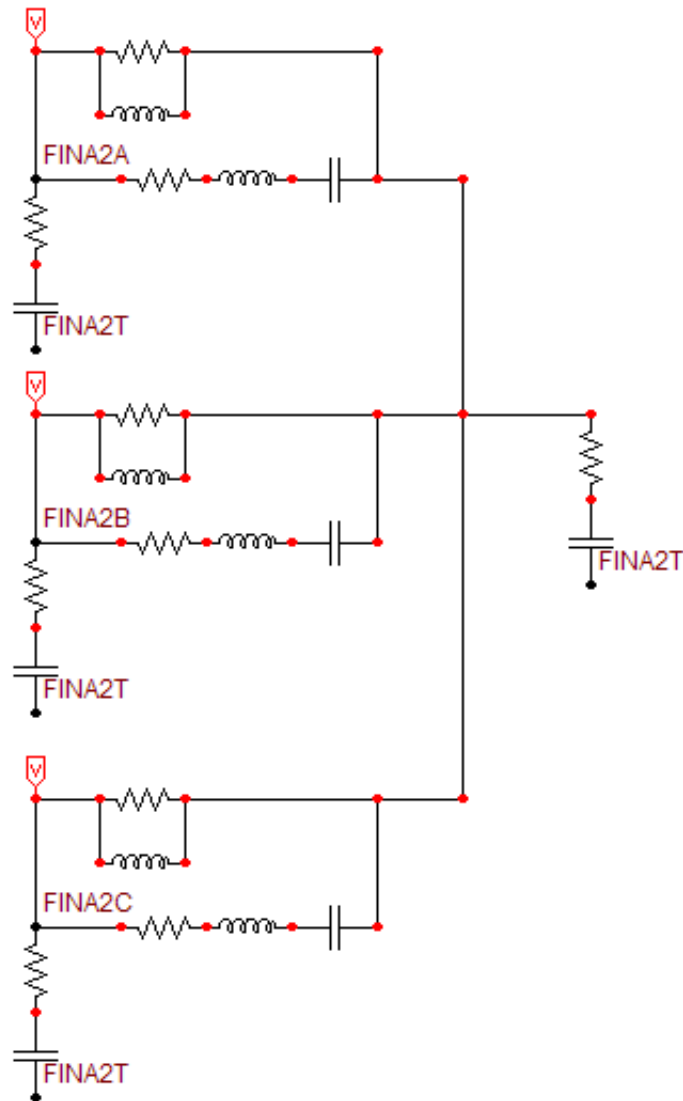


Figura 4.4: Modelo do motor implementado no ATP

A falta foi representada de maneira simplificada pela ligação direta de um dos terminais do

motor com o terminal do cabo que representa o potencial de terra. Assim como foi feito na montagem experimental, um dos quatro condutores do cabo tetrapolar representa a malha de aterramento e conecta as carcaças do inversor e do motor.

Os componentes não lineares foram representados matematicamente por um elemento não-linear, caracterizado por sua curva $V \times I$ bidirecional. Para atingir os requisitos de projeto, verificou-se que o componente que apresenta curva $V \times I$ mais adequada é o diodo zener, pois é necessária uma mudança brusca de inclinação da curva quando os valores de tensão começarem a ultrapassar os valores fase-fase nominais do circuito. Outros componentes não-lineares como varistores e diodos supressores de surto apresentam curvas mais suaves.

Em uma situação de curto, a tensão que aparecerá nos terminais de saída do inversor será a tensão do barramento CC somada à oscilação proveniente das reflexões de onda (figura 3.9). A tensão de corte do circuito supressor deverá ser, então, pouco superior à tensão do barramento CC, para que sejam reduzidas as oscilações por reflexão de onda e eliminadas quaisquer tensões acima disto, causadas por escalonamento da tensão.

No caso de um circuito de tensão nominal fase-fase de 220V, por exemplo, um valor possível para tensão de corte é em torno de 450V. Os diodos devem ser dispostos em anti-paralelo (figura 4.5), pois o circuito deve ser bipolar, funcionando tanto para tensões positivas quanto negativas. Como não existem diodos comerciais com tensão de zener acima de 200V, faz-se então uma associação em série destes componentes, no caso três conjuntos de diodos com tensão de zener de 150V.

As curvas dos componentes não são exatamente iguais, havendo uma variação entre os exemplares. Isto pode causar a sobrecarga de alguns deles, pois a tensão não fica igualmente dividida

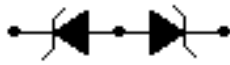


Figura 4.5: Diodos zener ligados em anti-paralelo

entre eles. É recomendado que se utilize em paralelo uma rede de capacitores para ajudar a equalizar as impedâncias. Como o circuito estará conectado na saída do inversor, esta capacitância não deve passar da ordem de centenas de nano-farads, pois valores mais altos começam a influenciar o tempo de subida dos pulsos e este projeto não pretende interferir em outras características de funcionamento do acionamento que não os valores das tensões fase-terra. Assim, o modelo computacional para o circuito protetor de cada fase fica como o mostrado na figura 4.6, com quatro conjuntos. É necessário incluir uma resistência de baixo valor entre eles, para não comprometer a modelagem de elementos não-lineares em programas de transitórios.

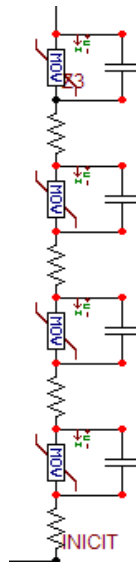


Figura 4.6: Modelo do supressor com 4 conjuntos em série

A desvantagem destes dispositivos semicondutores é a sua baixa capacidade de dissipação de potência, fator que deve ser sempre levado em conta. Desta forma, não é conveniente projetar a tensão de corte muito próxima da tensão fase-fase, pois os diodos seriam repetidamente solicitados pelas oscilações naturais do circuito numa situação de curto. Cada solicitação do diodo implica em uma corrente fluindo pela junção, causando dissipação de potência por efeito Joule. Portanto, deve-se evitar qualquer solicitação desnecessária. Para que isto aconteça, determina-se a tensão de corte acima da maior parte da ocorrência destas sobretensões por reflexão de onda.

Através da simulação, podemos prever o comportamento do circuito em dois pontos essenciais que são as tensões máximas alcançadas pelo sistema na presença da falta e a capacidade do circuito projetado de manter estas tensões dentro de limites aceitáveis. Esta capacidade é limitada pela dissipação de potência e pela curva $V \times I$ do componente.

Os diodos apresentam capacidade de dissipação de potência variável com a temperatura, como demonstrado na figura 4.10. Para determinar a potência dissipada em cada componente, procedemos à simulação, coletando a tensão e corrente em um semicondutor. A figura 4.7 é um exemplo de medição de tensão e corrente em um diodo, enquanto na figura 4.8 temos a tensão e corrente medidas no protetor de uma fase. A figura 4.9 mostra a corrente de modo comum do circuito.

O produto ponto a ponto dos sinais de tensão e corrente no diodo integrado no tempo nos dá a energia dissipada em um determinado período. A forma de onda da potência é mostrada na figura 4.11, onde percebemos vários pulsos de rápida duração, que podem ser vistos em detalhe na figura 4.12.

Em um quarto de ciclo de 60Hz temos toda a informação necessária, e podemos proceder ao

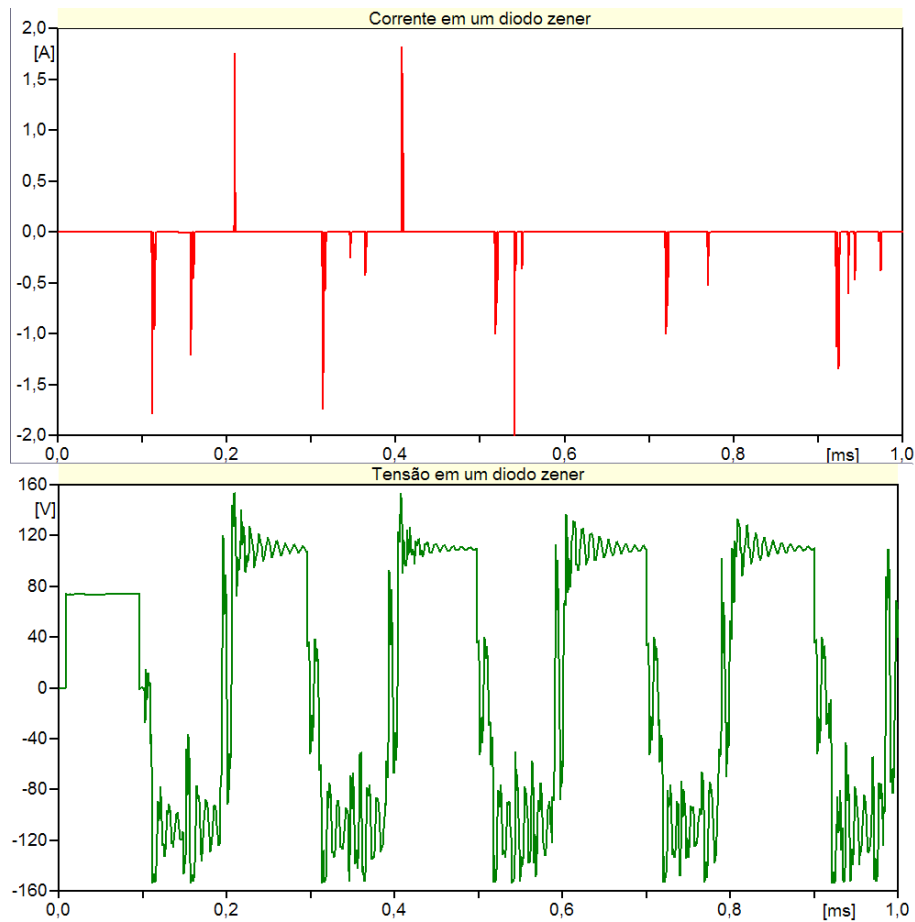


Figura 4.7: Tensões e correntes em um diodo zener, circuito de 220V, frequência de chaveamento 5KHz, 3 conjuntos por fase, $V_Z = 150V$

cálculo da potência média, calculando a energia em um quarto de ciclo dividida pela duração de um quarto de ciclo (equação 4.1). Assim,

$$P_{media} = (4/T) \int_0^{T/4} v(t)i(t)dt. \quad (4.1)$$

Este cálculo diminui o tempo de simulação necessário assim como o tamanho dos vetores de saída e o número de funções necessárias para representar corretamente o PWM (lembrando

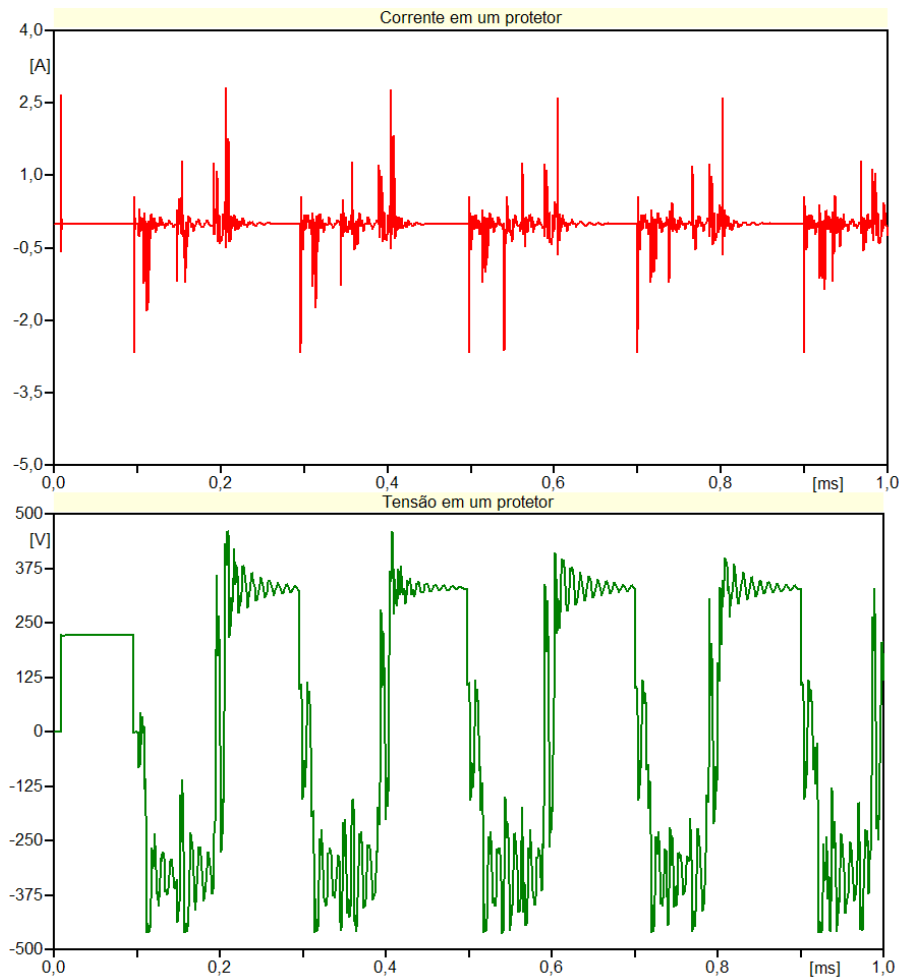


Figura 4.8: Tensões e correntes em um protetor em uma fase, circuito de 220V, frequência de chaveamento 5KHz, 3 conjuntos por fase, $V_Z = 150V$

que cada pulso é representado por uma fonte de tensão independente). De posse dos vetores de tensão e corrente, pode-se realizar a integração numérica do produto ponto-a-ponto (equação 4.2) e aplicar o resultado na equação 4.3:

$$E_{T/4} = \int_0^{T/4} v(t)i(t)dt; \quad (4.2)$$

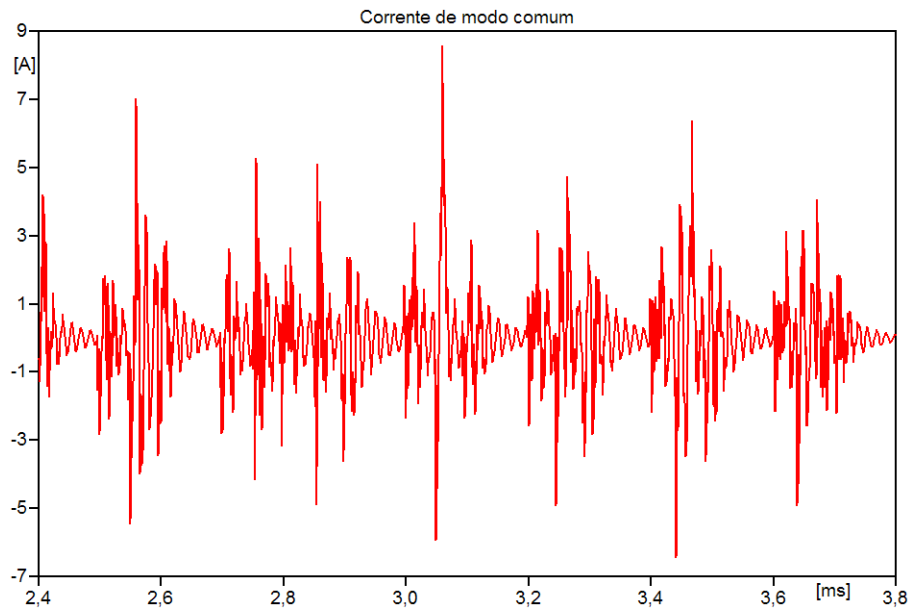


Figura 4.9: Corrente de modo comum, circuito de 220V, frequência de chaveamento 5KHz, 3 conjuntos por fase, $V_Z = 150V$

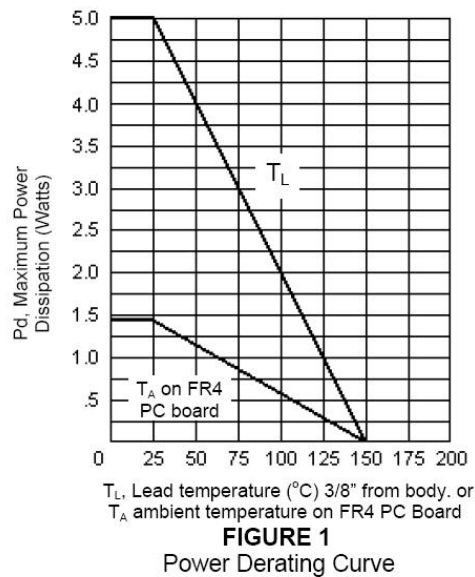


Figura 4.10: Potência máxima dissipada por um diodo zener em função da temperatura

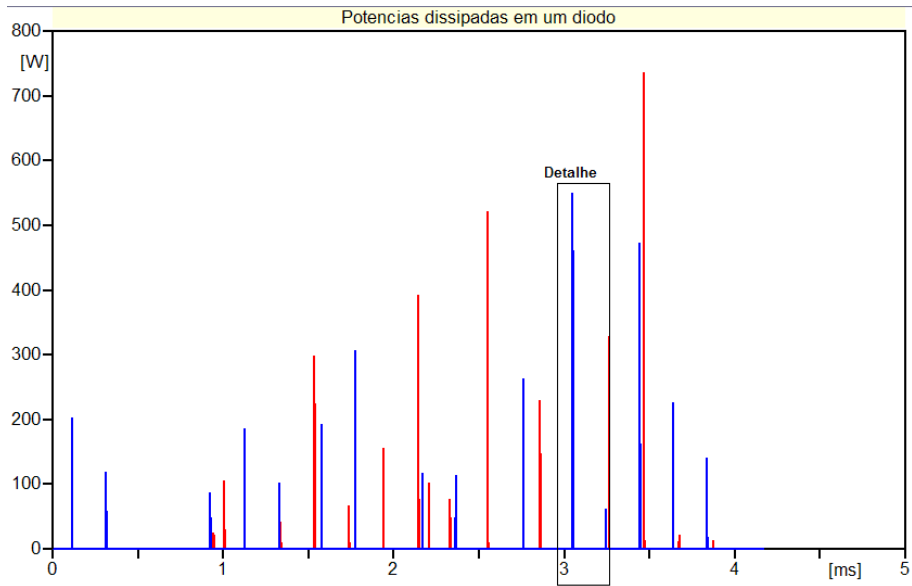


Figura 4.11: Potência dissipada por um diodo zener

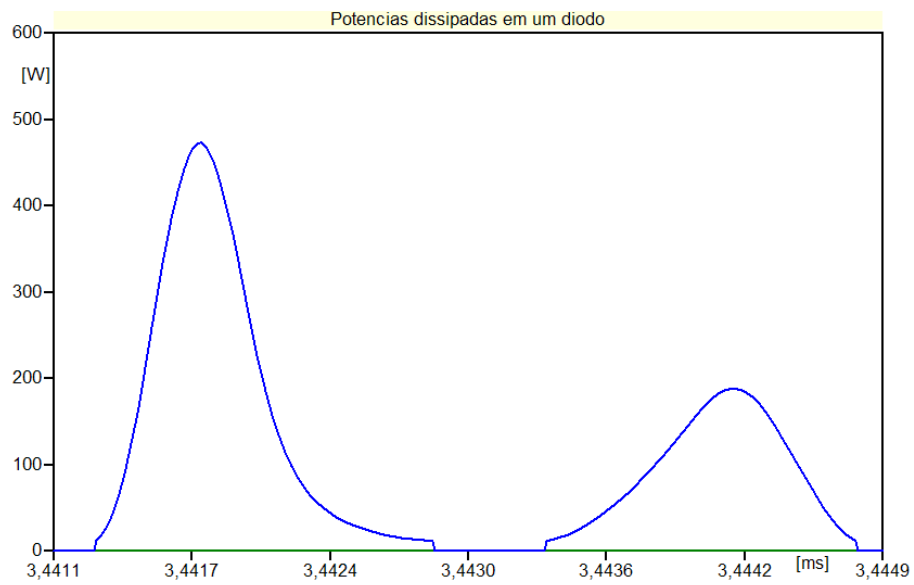


Figura 4.12: Potência dissipada por um diodo zener em detalhe

$$P_{media} = (4/T)E_{T/4}. \quad (4.3)$$

Desta forma, é possível obter uma estimativa da potência dissipada pelo diodo quando da sua exposição às sobretensões e, com isso, determinar se uma determinada especificação é adequada ou não.

4.4 Alguns exemplos

A metodologia proposta permite a simulação de alguns circuitos possíveis antes da construção de um protótipo. Algumas configurações foram testadas em circuitos de 480V. De posse dos valores de tensão e corrente, as potências médias dissipadas foram calculadas pela equação 4.3. Os resultados estão sintetizados na figura 4.13.

A tensão máxima não sofre alteração, devido à curva extremamente inclinada do diodo, contudo há uma variação sensível no valor da potência dissipada, que depende diretamente da tensão de corte especificada e do comprimento do cabo.

A utilização de elementos não-lineares para proteção de isolamentos é prática muito comum em estudos de coordenação de isolamento, em que se dimensionam pára-raios para proteção de isoladores de linhas de transmissão e distribuição de energia e outros equipamentos elétricos de potência. Nestes estudos, o comprimento da linha não é um fator determinante no dimensionamento dos componentes de proteção, pois a energia dos maiores surtos aos quais se espera serem submetidos estes equipamentos não é função do comprimento das linhas.

Todavia, o dimensionamento de protetores para acionamentos com modulação PWM não segue a mesma lógica. A energia presente nas sobretensões varia de forma aproximadamente linear com o comprimento do cabo. Com isso, a viabilidade de aplicação de uma determinada

configuração fica condicionada à capacidade de dissipação de potência do circuito projetado em função do comprimento do cabo na instalação.

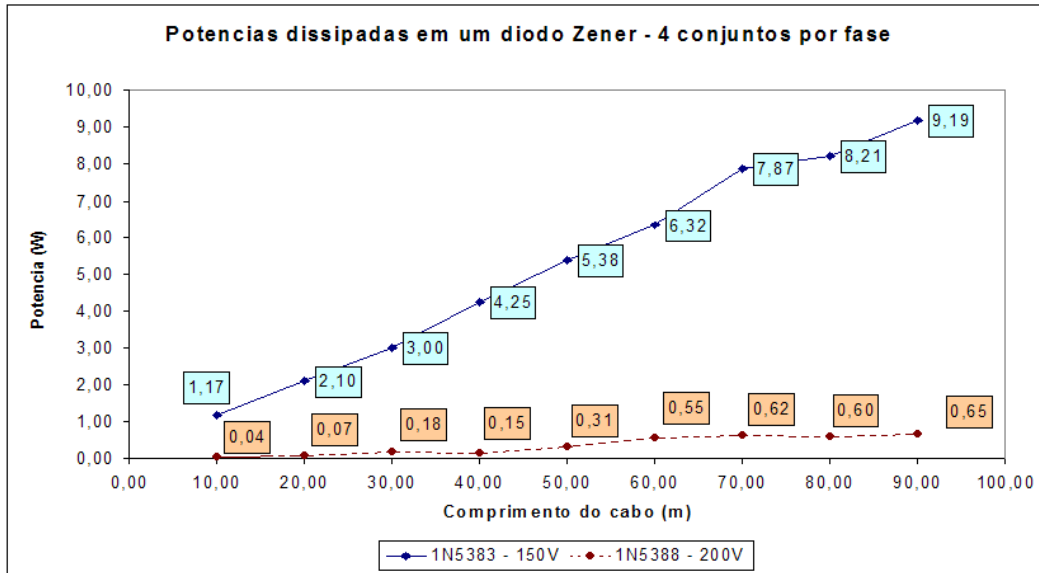


Figura 4.13: Potências médias em um diodo zener para um sistema de 480V e circuito protetor com 4 conjuntos de diodos em anti-paralelo por fase

Capítulo 5

Construção e testes de um circuito supressor

5.1 Especificação para teste

Para teste em laboratório, foi escolhida a configuração de 6 diodos em anti-paralelo, ou seja, 3 conjuntos, e capacitores de 47nF em um sistema de 220V. Para esta especificação, o teste de potência média foi aplicado e constatou-se via simulação que a potência a ser dissipada em um diodo seria de 0,0569W, para um cabo de 100m e frequência de chaveamento de 5KHz. Pela figura 4.10, percebe-se que o circuito funcionará perfeitamente, contanto que sua temperatura não atinja as proximidades de 150°C. O circuito construído está mostrado na figura (figura 5.1).

A placa foi projetada para prover isolamento galvânica de até 1000V entre as trilhas de potência do circuito. As trilhas foram projetadas para funcionar com uma elevação de temperatura de 30°C acima da temperatura sob condições normais. A placa possui dimensões de 120mmx35mmx16mm.

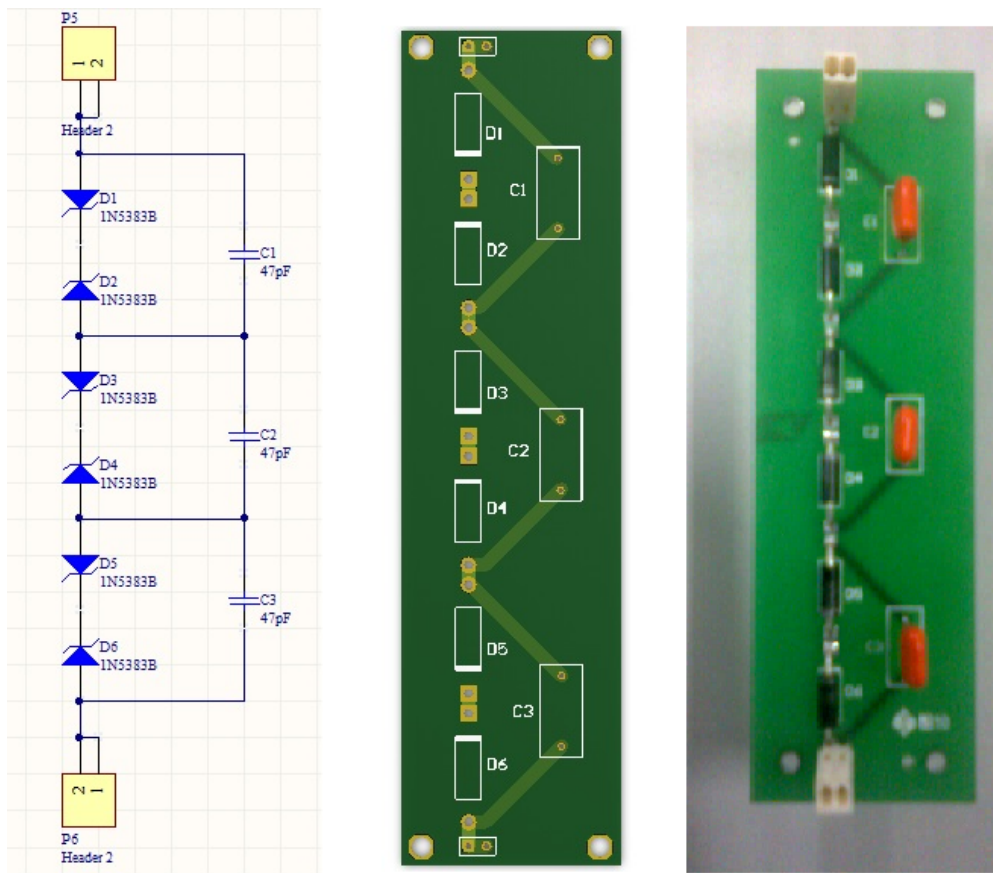


Figura 5.1: Esquemático, projeto da placa e foto do circuito

5.2 Testes de laboratório

O circuito construído foi submetido a testes na montagem apresentada no capítulo 3, com inversor de 220V. Para cada situação, foram medidas as tensões na saída e na entrada do inversor, as tensões em um dos diodos, a corrente de modo comum, a corrente no protetor e um teste com a aplicação da falta por 1,0min.

5.2.1 Testes com um protetor em uma das fases

Foi colocado um protetor em uma das fases, enquanto as outras duas permaneciam desprotegidas. Uma das fases sem proteção era curto-circuitada para a carcaça do motor de maneira breve.

Foram medidas as tensões na saída do inversor e na entrada do mesmo para verificar a atuação do protetor. O resultado observado é que a tensão máxima medida nos terminais de saída do inversor, atestado na figura 5.2, é muito menor do que o que era medido sem nenhuma proteção, figuras 3.11 e 3.12. A fase que se encontrava sem proteção apresentou tensão máxima de 620V, enquanto a fase protegida apresentou tensão máxima de 440V. Variando as frequências de chaveamento, as formas de onda são semelhantes, razão pela qual não são mostradas aqui. As figuras 5.3 e 5.4 trazem a comparação da tensão em um diodo com a tensão fase-terra.

Adicionalmente, foram verificadas as tensões de entrada do inversor. Somado à tensão em 60Hz da rede, podemos ver um surto de tensão no momento do curto. Este surto foi medido sem a presença da proteção (figura 5.5) e com a proteção ligada na saída do inversor (figura 5.6). Percebe-se uma diminuição dos surtos na entrada do inversor, em comparação com a figura 3.18.

As correntes de sequência zero foram medidas e estão apresentadas nas figuras 5.7 e 5.8. Estas medições confirmam a previsão de que a presença do protetor iria aumentar a corrente de modo comum para controlar a tensão nos níveis pretendidos. A corrente do protetor é apresentada na figura 5.9. Esta corrente é somada à corrente de falta e à corrente de modo comum, gerando a corrente de sequência zero.

Foi realizado um teste de longa duração (figura 5.10) para testar se o circuito é capaz de

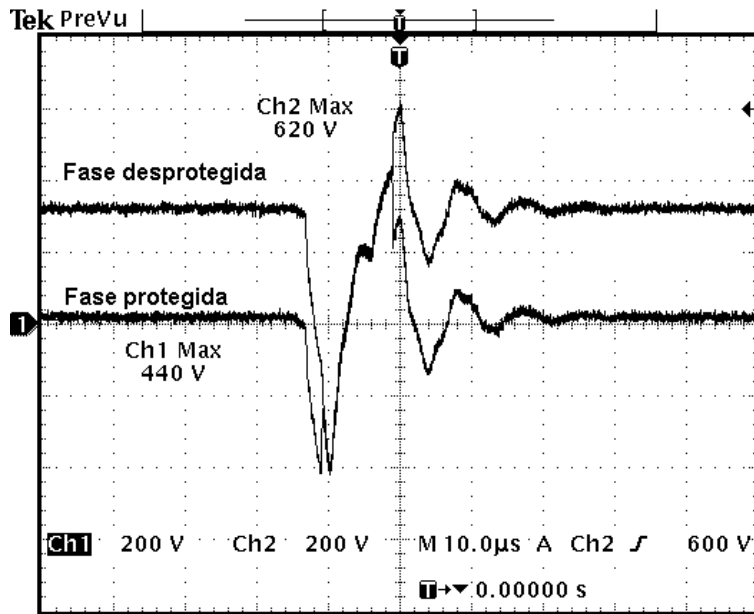


Figura 5.2: Surtos de tensão fase-terra nos terminais de saída do inversor com o protetor em uma das fases

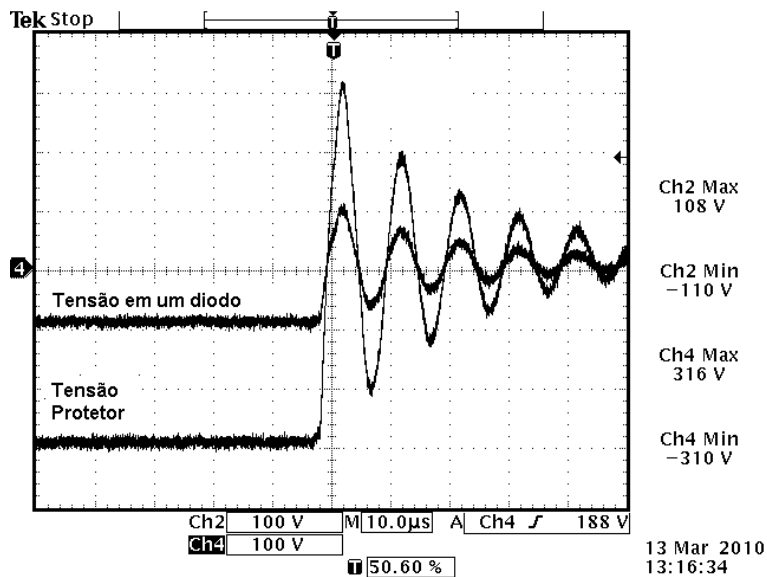


Figura 5.3: Surtos de tensão fase-terra no protetor e em um diodo com o protetor em uma das fases

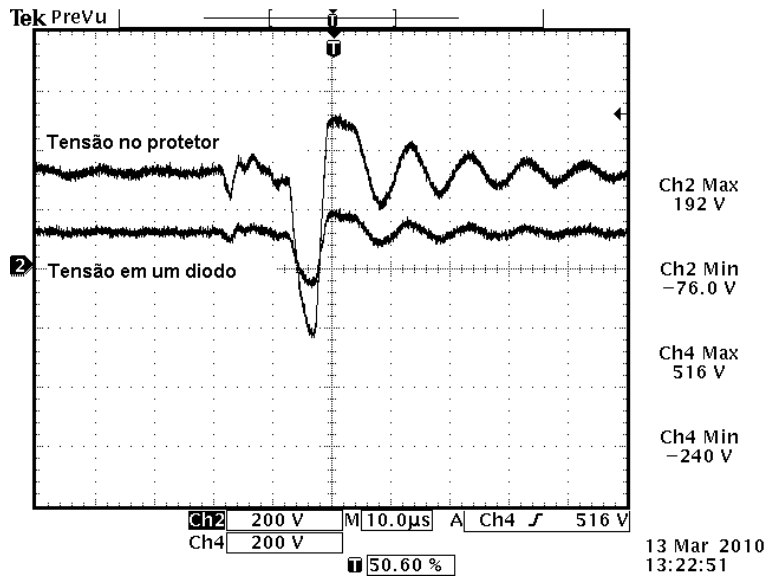


Figura 5.4: Surtos de tensão fase-terra no protetor e em um diodo com o protetor em uma das fases

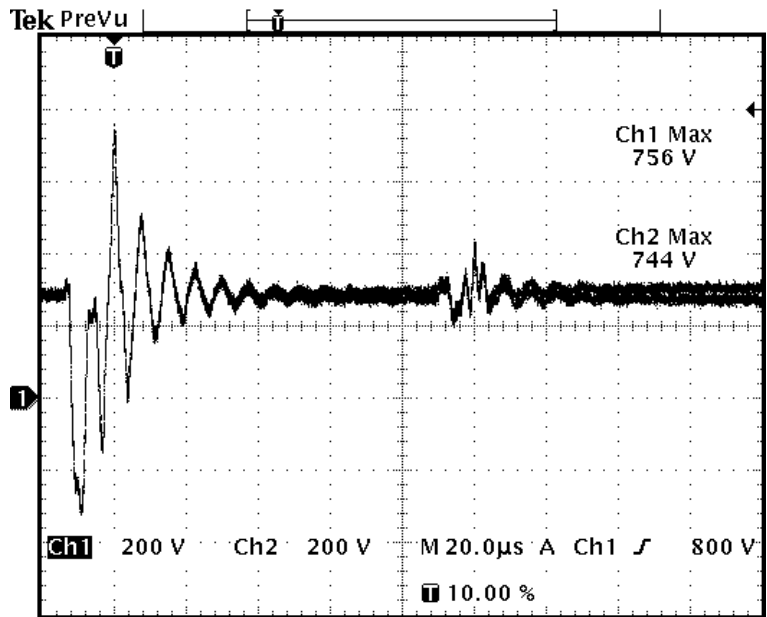


Figura 5.5: Tensões fase-terra na entrada do inversor no momento do curto (detalhe) circuito de 220V

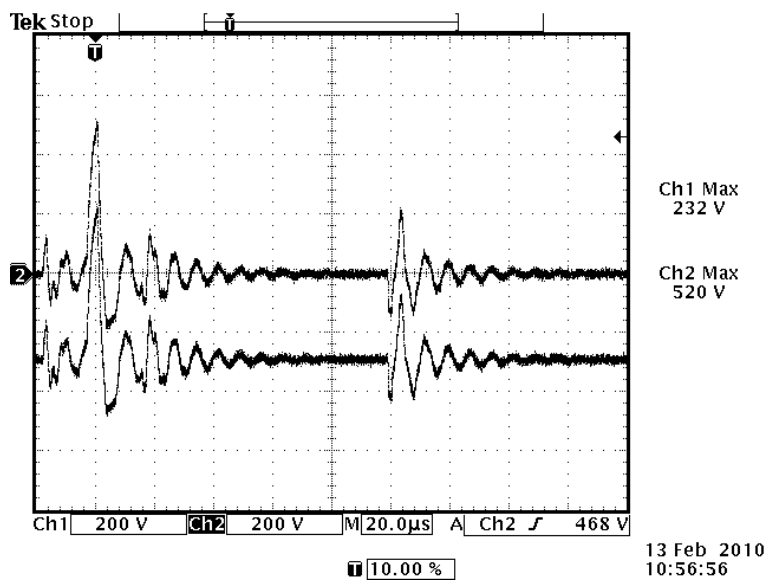


Figura 5.6: Tensões fase-terra na entrada do inversor com o protetor em uma das fases

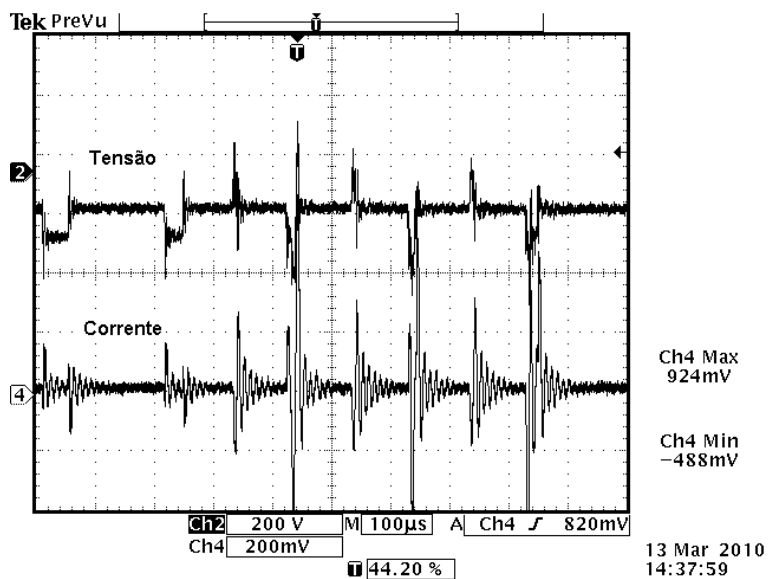


Figura 5.7: Corrente de sequência zero no momento do curto, com protetor em uma das fases.

Escala de corrente: 100mV/1,0A

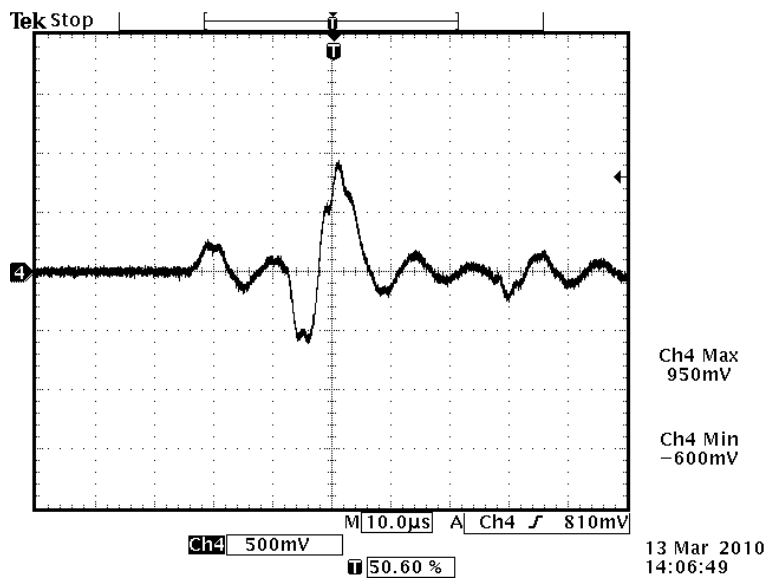


Figura 5.8: Corrente de seqüência zero no momento do curto, com protetor em uma das fases.

Escala de corrente: 100mV/1,0A

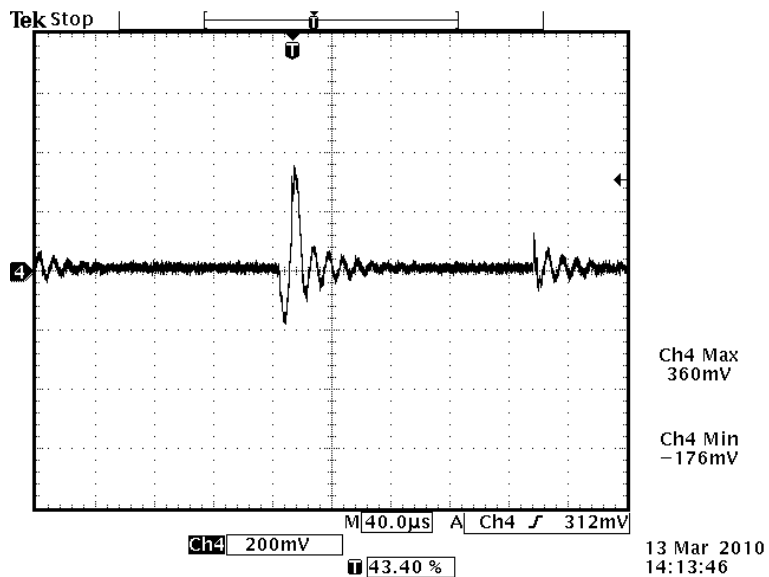


Figura 5.9: Corrente no protetor no momento do curto, com protetor em uma das fases. Escala

de corrente: 100mV/1,0A

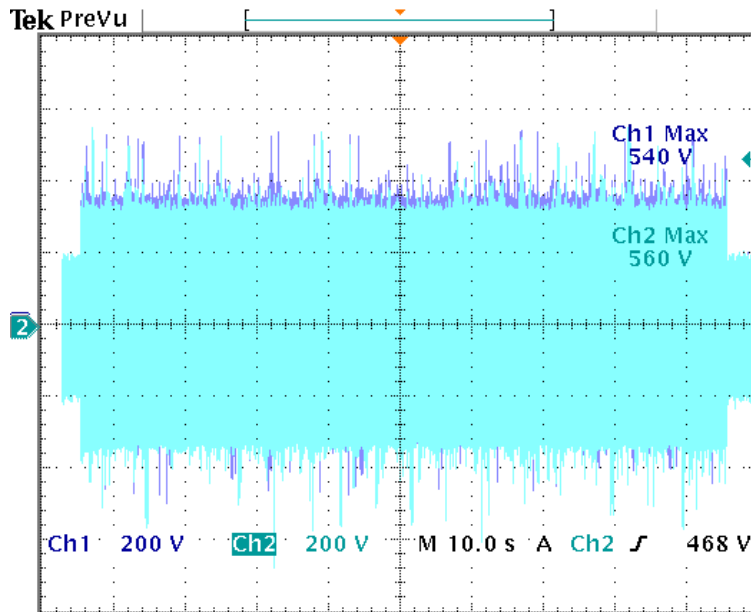


Figura 5.10: Tensão fase-terra nos terminais de saída do inversor com o protetor em uma das fases - teste de longa duração

suportar surtos repetitivos por um período maior de tempo. Durante 1,0min, o protetor foi submetido ao sistema com um curto fase-terra e não apresentou problemas de funcionamento nem queimas de componentes. A temperatura dos diodos se estabilizou em torno de 70°C, antes de 1,0min de duração do curto.

5.2.2 Testes com protetores em duas fases

Foram inseridos dois protetores em duas fases do circuito e a fase restante foi curto circuitada. Os mesmos testes da seção 5.2.1 foram realizados. Não foram verificadas alterações significativas no comportamento do circuito, exceto que agora as duas fases se encontram protegidas e com as tensões controladas, como podemos ver na figura 5.11.

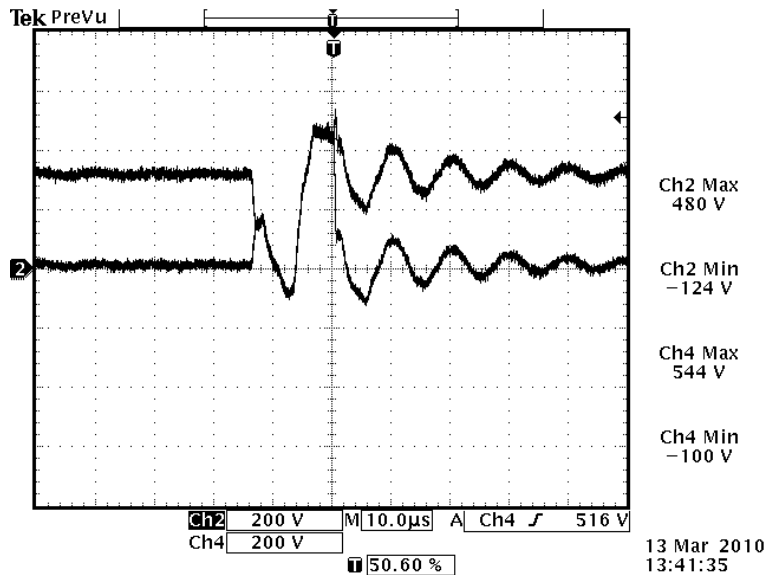


Figura 5.11: Surtos de tensão fase-terra nos terminais de saída do inversor com o protetor em duas das fases

5.2.3 Testes com dois protetores em paralelo

Foram inseridos dois protetores em paralelo em uma fase do circuito e a fase restante foi curto circuitada. Os mesmos testes da seção 5.2.1 foram realizados. Somente um dos protetores apresentou aumento de temperatura nos mesmos níveis observados anteriormente, ou seja, somente um deles atuou e a presença de outro protetor não influenciou no resultado. Isto pode ser atribuído ao descasamento dos diodos utilizados. Um exemplo da tensão na fase protegida pode ser visto na figura 5.12.

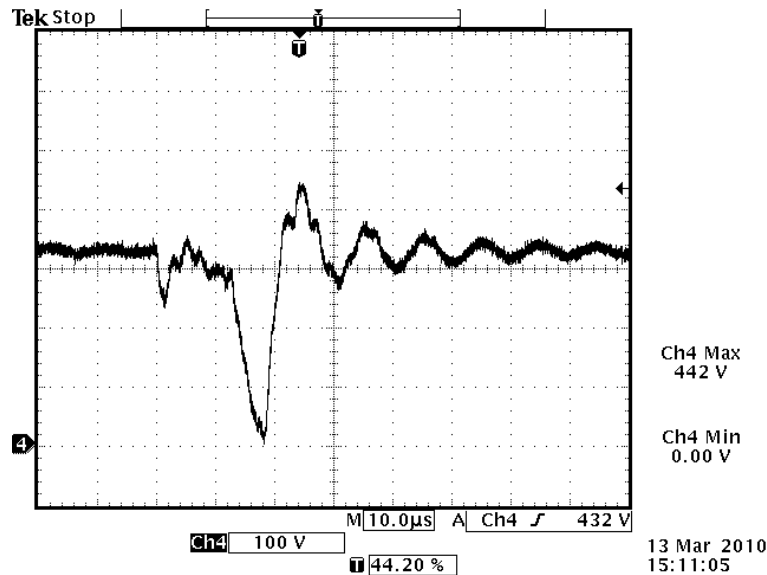


Figura 5.12: Surtos de tensão fase-terra nos terminais de saída do inversor com dois protetores em paralelo em uma das fases

5.3 Análise dos resultados

Os maiores valores medidos em todas as oportunidades de medição estão resumidos na tabela 5.1, em que

V_{FTPWM} é o valor de pico da tensão fase-terra na saída do inversor;

V_{FTrede} é valor de pico da tensão fase-terra da rede, na entrada do inversor;

I_{MC} é valor de pico da corrente de modo comum;

$I_{protetor}$ é valor de pico da corrente que passa em um protetor.

Os resultados dos testes confirmam a eficácia do circuito projetado com a metodologia proposta, comprovando que é possível, com componentes passivos e de baixo custo, oferecer uma alternativa de proteção aos isolamentos dos equipamentos em sistemas não aterrados. Os componentes projetados suportaram os surtos de tensão, sendo registrado um aumento de temperatura

Situação	V_{FTPWM} (V)	V_{FTrede} (V)	I_{MC} (A)	$I_{protetor}$ (A)
Normal	236	180	1,36	0
Falta fase-terra	836	756	3,36	0
Falta fase-terra com proteção	516	520	9,50	3,60

Tabela 5.1: Maiores valores de pico obtidos nos testes de laboratório

Situação	V_{FTPWM} (V)	V_{FTrede} (V)	I_{MC} (A)	$I_{protetor}$ (A)
Falta fase-terra com proteção	460	-	6,7	4,0

Tabela 5.2: Maiores valores de pico obtidos em simulação

durante a sua atuação, o que evidencia a dissipação de potência nos semicondutores. O valor desta potência média não pode ser medido com a instrumentação disponível, este é um ponto para desenvolvimento futuro.

As formas de onda das simulações são bastante semelhantes às observadas na prática. Pode-se prever através delas a presença de oscilações nos pulsos de tensão PWM fase-terra, correntes de modo comum da ordem de alguns amperes e o mecanismo de funcionamento de um circuito baseado em elementos não-lineares. Baseado nos valores de tensão e corrente simulados, pode ser feita uma estimativa da potência dissipada por um diodo zener, com o objetivo de prever se o mesmo será capaz de suportar os pulsos de tensão repetitivos para um determinado circuito. A tabela 5.1 foi construída através de uma simulação com um protetor e mostra que a modelagem computacional utilizada consegue fornecer valores aproximados para o projeto do circuito, mas ainda é preciso melhorar alguns aspectos para se conseguir resultados mais precisos.

Os oscilogramas nos mostram reduções visíveis dos níveis máximos de tensão presentes nos terminais do inversor quando os circuitos supressores são utilizados, resumidos na tabela 5.1, além de evidenciar visualmente a atuação destes, pela deformação dos picos de onda apresentados em comparação com o formato inicial, sem a presença de proteção. Este controle é essencial para se evitar a ocorrência de fenômenos de escalonamento de tensão em sistemas não aterrados.

Há evidência inclusive de que o circuito projetado não protege somente o inversor em questão, mas os demais equipamentos que possam estar ligados ao mesmo barramento, como mostram as medições na entrada do inversor. Com isso, a importância deste desenvolvimento aumenta significativamente, pois constata-se que a ocorrência de curtos-circuitos em motores sendo acionados por inversores ocasiona a aparição de surtos de tensão que se propagam por toda a rede elétrica, podendo causar avarias em outros equipamentos. A solução apresentada se torna, então, uma proteção não só dos equipamentos envolvidos, mas de todo o sistema em que eles estão inseridos.

Uma parte da corrente de sequência zero irá fluir pelos protetores, devido à não-linearidade dos componentes. Este é o mecanismo que permite controlar as tensões dentro dos limites especificados. Portanto, muito cuidado precisa ser tomado com o dimensionamento térmico dos componentes do circuito, sendo esta a principal dificuldade tecnológica na aplicação de diodos zener para este fim.

Capítulo 6

Conclusões finais e propostas de continuidade

6.1 Conclusões

A análise dos sistemas de acionamento a velocidade variável em situações de curto-circuito mostra que não somente os motores, mas também os inversores e outros equipamentos em sistemas elétricos não aterrados estão expostos a sobretensões fase-terra potencialmente perigosas. Esta vulnerabilidade pode ocasionar queimas dos módulos de potência dos inversores, gerando paradas indesejadas dos processos industriais que são conduzidos por acionamentos deste tipo, o que gera custos de manutenção e perdas de produção.

Os fenômenos de deslocamento da tensão de neutro podem ser potencializados pelas oscilações naturais provenientes do chaveamento dos IGBT's quando se utilizam cabos longos. Uma possível falta fase-terra intermitente nos motores acionados por inversores coloca todo o

sistema elétrico em risco, pois os surtos de tensão se propagam para além do inversor. Alternativas para controlar as tensões precisam ser desenvolvidas nesta filosofia de aterramento.

Uma metodologia de projeto de um circuito supressor de surto com componentes passivos de baixo custo e fácil implementação foi apresentada e se mostrou eficiente, pois permitiu a construção de um protótipo que teve o seu funcionamento comprovado por testes de laboratório. Este circuito é capaz de controlar as tensões fase-terra dentro de limites estabelecidos, evitando, assim, o desenvolvimento de fenômenos de deslocamento de tensão.

Uma análise preliminar dos fenômenos indica que os principais parâmetros a serem considerados no projeto de um circuito deste tipo são a curva $V \times I$ dos componentes, o número de componentes utilizados, o nível de tensão do circuito, o nível de tensão que se deseja estabelecer como tensão de corte, o comprimento do cabo utilizado no acionamento, a frequência de chaveamento utilizada no acionamento e as características em alta frequência de inversor, motor e cabo. Estas variáveis irão influenciar na capacidade do circuito de controlar as tensões e dissipar a potência necessária para tal, sem prejudicar o funcionamento normal do acionamento e garantindo a continuidade da operação em uma situação de falta fase-terra.

A reprodução destes fenômenos em laboratório não é trivial, porém com os recursos disponíveis já é possível extrair observações consistentes que nos ofereçam subsídios para a construção de soluções. Igualmente complexa é a correta caracterização e modelagem matemática de todos os fenômenos envolvidos, por se tratar aqui de uma composição de fenômenos em alta e baixa frequências. Contudo, com as modelagens e ferramentas computacionais disponíveis hoje, a estimativa de tensões máximas e potências dissipadas se mostrou eficiente e suficiente, portanto, para o cumprimento dos objetivos deste trabalho, que se concretizou na construção de um pro-

tótipo com comportamento dentro do previsto pelas simulações.

Para que se consiga chegar a soluções comerciais que possam ser aplicadas a uma variedade maior de circuitos, mais testes são necessários. É preciso testar diferentes topologias e especificações de circuitos supressores e sistemas de acionamento diferentes para determinar a relação entre todas as variáveis e o grau de importância que elas têm no dimensionamento de circuitos desse tipo. Em outras palavras, o circuito construído se mostrou eficaz no sistema de acionamento estudado e seguramente o será em sistemas com comprimentos de cabo menores e frequências de chaveamento menores, com os mesmos inversor e motor. Outras configurações precisam ser investigadas com mais critério, para estabelecer relações de importância entre as variáveis que influenciam no projeto.

O circuito desenvolvido apresenta a vantagem de ser construído com componentes passivos, de baixo custo e implementação simples, o que é uma grande vantagem em relação a outras soluções mais complexas. Ele apresenta ainda diversas limitações, mas o conceito de se proteger o inversor com este tipo de artefato se mostrou eficaz à medida que as tensões são limitadas e a capacidade de dissipação de potência dos componentes é suficiente para as correntes que circulam por ele.

Por fim, este trabalho abre caminho para um leque de testes e investigações necessários para o desenvolvimento desta tecnologia. Diversas outras topologias, configurações, componentes podem ser agora testados seguindo a metodologia desenvolvida e/ou melhorando a própria metodologia, dando continuidade ao trabalho iniciado.

6.2 Propostas de continuidade

Algumas opções que podem ser vislumbradas para continuidade deste trabalho são listadas a seguir:

- Construir uma modelagem física e computacional mais aproximada das características dos curtos circuitos fase-terra nos enrolamentos de um motor de indução;
- Desenvolver modelagens de transformadores e seu acoplamento capacitivo ao solo quando não estão com neutro aterrado, para estudar os efeitos das faltas no restante do sistema elétrico;
- Investigar a influência das características do transformador e da sua ligação com o inversor nos fenômenos observados;
- Testar a utilização de outros dispositivos semicondutores e/ou desenvolver a fabricação de dispositivos otimizados para esta aplicação;
- Analisar a influência dos curtos circuitos em outras cargas em paralelo no mesmo barramento;
- Desenvolver uma modelagem térmica para os circuitos protetores e medir as potências dissipadas;
- Prosseguir no desenvolvimento da tecnologia, realizando testes exaustivos de aplicabilidade da metodologia de projeto e da eficácia dos circuitos construídos para diferentes configurações, com o intuito de levantar de forma mais detalhada suas potencialidades e limitações. Testar outras topologias para o circuito e melhorar a metodologia para dimensionamento térmico;
- Realizar mais testes com diferentes comprimentos de cabos;
- Estabelecer relações de importância entre as variáveis que influenciam no projeto do prote-

tor;

- Desenvolver testes destrutivos de longa duração para estimar a vida útil dos protetores com o objetivo de aumentar a confiabilidade do produto;

- Desenvolver um circuito capaz de identificar a atuação dos diodos, com o objetivo de informar a presença de falta fase-terra no circuito alimentado pelo inversor;

- Realizar as mesmas análises para sistemas com aterramento via impedância de neutro, que também é uma situação bastante comum na indústria;

- Testar a utilização deste tipo de protetor também para a proteção de motores.

Bibliografia

- [1] I. S. Board, *IEEE - Std 493 IEEE Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems*. IEEE, 1997.
- [2] A. B. de Normas Técnicas (ABNT), *NBR-5462: Confiabilidade e Manutenibilidade*, 1994.
- [3] A. F. Moreira, T. A. Lipo, G. Venkataramanan, and S. Bernet, “High frequency modeling for cable and induction motor: Overvoltage studies in long cable drives,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 38, no. 5, pp. 1297–1306, Sep./Oct. 2002.
- [4] T. Milagres, “Modelagem a parâmetros distribuídos de cabos de potência utilizados em acionamentos elétricos,” Master’s thesis, UFMG, 2006.
- [5] T. A. L. S. Chen and D. Fitzgerald, “Source of induction motor bearing currents caused by pwm inverters,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 11, no. 1, pp. 25–32, March 1996.
- [6] —, “Modeling of motor bearing currents in pwm inverter drives,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 32, no. 6, pp. 1365–1370, November/December 1996.
- [7] T. A. L. S. Chen and D. W. Novotny, “Circulating type motor bearing current in inverter drives,” *IEEE Industry Applications Magazine*, pp. 32–38, January/February 1998.
- [8] F. M. M. P. A. F. M. Thiago F. L. Milagres, Patrick M. Santos, “Over-voltage analysis using multi-conductor transmission line with distributed parameter representation,” *VI Induscon Joinville*, 2004.

- [9] G. S. R. Kerkman, D. Leggate, "Interaction of drive modulation cable parameters on ac motor transients," *IEEE Industry Applications Conference*, vol. 1, pp. 143–152, 1996.
- [10] J. C. G. Wheeler, "Effects of converter pulses on the electrical insulation in low and medium voltage motors," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 21, no. 2, pp. 22–29, March/April 2005.
- [11] E. Persson, "Transient effects in application of pwm inverters to induction motors," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 28, no. 5, pp. 1095–1101, September/October 1992.
- [12] G. C. S. Austin H. Bonnett, "Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phase squirrel-cage induction motors," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 28, no. 4, pp. 921–937, July/August 1992.
- [13] D. Beeman, *Industrial Power Systems Handbook*, McGraw-Hill, Ed., 1955.
- [14] D. D. Shipp and F. J. Angelini, "Characteristics of different power systems neutral grounding techniques," *IEEE*, pp. 107–116, 1990.
- [15] I. S. 142-1991, *IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems (IEEE Green Book)*, ANSI, 1991.
- [16] I. S. 242-2001, *IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems (IEEE Buff Book)*, ANSI, 2001.
- [17] I. S. 141-1993, *IEEE Recommended Practice Electric Power Distribution for Industrial Plants (IEEE Red Book)*, ANSI, 1993.
- [18] J. P. Nelson and P. K. Sen, "High resistance grounding of low voltage systems a standard for the petroleum and chemical industry," *IEEE*, 1996.
- [19] I. S. 551-2006, *IEEE Recommended Practice for Calculating Short-Circuit Currents in Industrial and Commercial Power Systems (IEEE Violet Book)*, ANSI, 2006.
- [20] A. I. C. Antonio Carlos S. de Lima, Richard M. Stephan, "Comparison of overvoltage mitigation methods in industrial drives with long cables," *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, vol. 1, pp. 252–257, 2003.

- [21] R. M. S. Antonio Carlos Siqueira de Lima, Hermann W. Dommel, “Modeling adjustable-speed drives with long feeders,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 47, no. 3, June 2000.
- [22] G. V. S. B. A. F. Moreira, T. A. Lipo, “High frequency modeling for cable and induction motor over-voltage studies in long cable drives,” *IEEE Industry Applications Conference*, vol. 3, pp. 1787 – 1794, 2001.
- [23] H. de Paula, “Uma metodologia para determinação de sobretensões e correntes de modo comum em sistemas de acionamento de motores de indução com conversores pwm,” Ph.D. dissertation, Universidade Federal de Uberlândia, 2005.
- [24] S. T. Hirofumi Akagi, “A passive emi filter for eliminating both bearing current and ground leakage current from an inverter-driven motor,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 21, no. 5, September 2006.
- [25] M. A. Rocks, V. Hinrichsen, “Application of varistors for overvoltage protection of machine windings in inverter-fed drives,” *IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives*, pp. 335 – 340, 2007.
- [26] V. H. Alexander Rocks, “Effect of varistors for overvoltage protection in inverter-fed drives on the voltage distribution in the stator winding,” *IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, pp. 624 – 627, 2008.
- [27] V. H. A. Rocks, “Overvoltage protection of inverter-fed drives with the help of energy varistors dimensioning and lifetime considerations,” *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, pp. 860 – 865, 2008.
- [28] V. H. Alexander Rocks, “Overvoltage protection of inverter-fed drives with the help of energy varistors dimensioning rules for consideration of different cable types,” *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, pp. 330 – 335, 2009.
- [29] G. L. Skibinsky, B. M. Wood, J. J. Nichols, and L. A. Barrios, “Effect of adjustable-speed drives on the operation of low-voltage ground-fault indicators,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 37, no. 5, pp. 1423–1437, September/October 2001.

- [30] E. P. S. C. T. W. N. Jih-Sheng Lai, Xudong Huang, "Inverter emi modeling and simulation methodologies," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 53, pp. 736 – 744, 2006.
- [31] A. R. Vittorio Cecconi, Antonino Matranga, "New circuital models of grounding systems and pds for emi analysis during a lightning strike," *31st Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society*, 2005.
- [32] E. Hertz, "Thermal and emi modeling and analysis of a boost pfc circuit designed using a genetic-based optimization algorithm," Master's thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2001.
- [33] E. C. A. Boglietti, "Induction motor high frequency model," *Thirty-Fourth IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, vol. 3, pp. 1551 – 1558, 1999.
- [34] —, "Experimental high frequency parameter identification of ac electrical motors," *IEEE International Conference on Electric Machines and Drives*, pp. 5 – 10, 2005.
- [35] S. G. W. J. H. R. Stefan-Peter Weber, Kart Hoene, "Modeling induction machines for emc-analysis," *35th IEEE Power Electronics Specialists Conference*, 2004.
- [36] D. Hyypio, "Mitigation of bearing electro-erosion of inverter-fed motors through passive common-mode voltage suppression," *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS*, 2005.
- [37] T. G. H. Rangarajan M. Tallam and R. G. Harley, "Transient model for induction machines with stator winding turn faults," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 1, pp. 632 – 637, 2002.
- [38] G. W. E. H. Fengxiang Wen, Lily Zhang, "Modeling and simulation of inter-turn voltage distribution in the stator windings of the pulling motor," *2004 International Conference on Solid Dielectric*, 2004.
- [39] K. L. B. Hang Wang, "Modeling transformers with internal incipient faults," *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, 2002.
- [40] J. M. Tammy Gammon, "Arcing-fault models for low-voltage power systems," *Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference*, pp. 119 – 126, 2000.
- [41] —, "Instantaneous arcing-fault models developed for building system analysis," *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS*, 2001.

- [42] Y.-J. K. I.-W. L. T.-H. L. D.-H. K. Don-Ha Hwang, Ki-Chang Lee, “Assessing the insulation characteristics for stator windings of low-voltage induction motors for adjustable-speed drive applications,” *Conference 38th IAS Annual Meeting*, vol. 1, pp. 432 – 438, 2003.
- [43] E. A. C. Fermin P. Espino-Cortes and S. Jayaram, “Effectiveness of stress grading coatings on form wound stator coil groundwall insulation under fast rise time pulse voltages,” *IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION*, 2005.
- [44] *EUPEC BSM30GP60 Technical Information*.