



V SBQEE

Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica

17 a 20 de Agosto de 2003

Aracaju – Sergipe – Brasil



Código: AJU 12 199

Tópico: Aplicações de Novas Tecnologias

ESTRATÉGIAS DE PROTEÇÃO PARA UM RESTAURADOR DINÂMICO DE TENSÃO

Sidelmo M. Silva*

Braz J. Cardoso Filho

Depto. de Engenharia Elétrica

Universidade Federal de Minas Gerais

Tatiana Nesralla Ribeiro

EG/OP

Companhia Energética de Minas Gerais

RESUMO

Aplicações de eletrônica de potência em sistemas de energia, como é o caso da tecnologia do restaurador dinâmico de tensão (RDT), exigem cuidados especiais no projeto e dimensionamento do sistema de proteção, uma vez que o equipamento pode ser submetido a estresses bastante severos, durante a ocorrência de condições anormais, como curto-circuito ou surtos de tensão. Neste artigo são discutidos os principais aspectos necessários para a proteção de um RDT. O equipamento desenvolvido em parceria entre a UFMG e a CEMIG (500kVA / 440V) é utilizado como caso exemplo para ilustrar as metodologias descritas.

PALAVRAS-CHAVE

Proteção de conversores estáticos, restaurador dinâmico de tensão.

1.0 - INTRODUÇÃO

O Restaurador Dinâmico de Tensão (RDT), também conhecido como *DVR (Dynamic Voltage Restorer)*, é um equipamento baseado em eletrônica de potência que compensa distúrbios, como os afundamentos de tensão ou variações momentâneas de tensão, e reduz as tensões transitórias e harmônicas nos sistemas de energia, protegendo cargas sensíveis contra desligamentos inoportunos.

Uma vez que o restaurador dinâmico de tensão é construído a partir de componentes de elevado grau de sensibilidade a contingências de operação, como surtos de tensão e corrente, a garantia da operação correta e continuada do RDT, requer a disponibilidade de sistemas de proteção eficazes.

Neste artigo, são discutidos os diversos níveis necessários para a proteção do RDT e outras

aplicações da eletrônica de potência em sistemas de energia elétrica, contra distúrbios provenientes do sistema de energia ou da carga protegida. É ilustrado um caso de aplicação real em um RDT com potência de 500kVA/400V, desenvolvido através de uma parceria entre a Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) e a Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG).

2.0 - NÍVEIS DE PROTEÇÃO

A proteção de um equipamento conectado ao sistema de energia deve ser concebida, considerando-se todas as possíveis contingências ao qual o mesmo poderá ser submetido, de modo a se assegurar, não só a proteção e o bom funcionamento do equipamento em si, mas também da carga/processo protegido e do sistema de energia, além de garantir a segurança de pessoal envolvido na operação e manutenção do equipamento.

2.1 - Proteção do Equipamento

Neste estudo, visando uma abordagem mais clara do problema de proteção, classificam-se as várias contingências ou distúrbios quanto à origem, a qual pode ser:

- Sistema de energia
 - Sobretensões transitórias (descargas atmosféricas e chaveamento de banco de capacitores)
 - Interrupções de energia
 - Sobrecarga (*voltage sag* ou *swell* muito severo)
- Carga protegida
 - Sobrecarga
 - Curto-circuito
- Interna
 - Falha em semicondutores de potência
 - Falta em componentes passivos

- Falha no sistema de refrigeração
- Falha no suprimento de energia do sistema de controle.

2.2 - Segurança de Pessoal

Para a satisfação dos critérios de segurança das normas internacionais, especialmente a IEC 60204-1 [1], é importante que a filosofia de proteção do equipamento incorpore mecanismos que assegurem a integridade de pessoal envolvido na operação e manutenção do mesmo. Tais medidas podem ser sumarizadas em:

- Aterramento adequado do cubículo
- Travamento de portas durante operação e/ou descarga automática do barramento CC quando da abertura das portas do cubículo
- Presença de chaves para o isolamento, além de chaves de aterramento, quando da abertura de portas
- Presença de botão de parada de emergência.

3.0 - PROTEÇÃO CONTRA SOBRECARGA DEVIDO A DISTÚRBIOS MUITO SEVEROS

Este nível de proteção é implementado através da limitação, por *software*, da máxima tensão injetada pelo RDT. Outro ponto importante a ser mencionado é que, em casos nos quais o RDT deve operar também na compensação de *voltage swells*, este deve ser equipado com capacidade de retirada da energia do barramento CC, podendo ser utilizado um retificador controlado ou um chopper de descarga.

4.0 - PROTEÇÃO CONTRA SOBRECARGA

A proteção contra sobrecarga pode ser implementada de modo semelhante à utilizada em inversores de frequência convencionais. Neste caso, a presença de chaves térmicas bimetálicas, instaladas em contato com os arranjos dissipadores de calor, sinalizam, não só situações de sobrecarga, mas o mau funcionamento dos sistemas de refrigeração.

5.0 - PROTEÇÃO CONTRA SURTOS DE TENSÃO

Os principais surtos provenientes do sistema de energia, contra os quais o RDT deve estar protegido, são as sobretensões temporárias, causadas por chaveamentos de bancos de capacitores, e os surtos de tensão, provocados por descargas atmosféricas. Para tanto, atualmente se encontram disponíveis:

- MOV (*Metal Oxide Varistor*), ou varistor
- Diodos de avalanche
- GTA (*Gas Tube Arresters*), ou centelhadores
- Thyristor SPD (*Surge Protection Devices*), ou tiristores de proteção contra surto.

A escolha do tipo de dispositivo de proteção depende, não só das características do surto, mas do local de instalação e do equipamento a ser protegido. Para o RDT, essa escolha deve ser realizada segundo normas específicas sobre a

aplicação de cada um dos dispositivos [2,3,4] e sobre os distúrbios a serem considerados para o local de instalação [5].

Embora apresentem grande capacidade de sobrevivência a surtos de alta energia, a aplicação de centelhadores para a proteção de circuitos de alimentação CA é limitada, uma vez que, tendo ocorrido a ruptura dielétrica e se iniciado o arco elétrico no interior do dispositivo, sua extinção depende de características do sistema de energia, como relação X/R e da relação entre a impedância do sistema de energia e a resistência efetiva do centelhador. Deste modo, para a proteção de circuitos de alimentação CA, a utilização de centelhadores deve sempre ser associada a aplicação de outros dispositivos, como os MOVs, de modo a se garantir a extinção do arco elétrico.

Nos diodos de avalanche, a energia proveniente do distúrbio é dissipada nas junções PN, o que implica em uma capacidade de absorção de energia limitada. Isso faz com que sua aplicação seja indicada apenas para equipamentos com nível de exposição reduzido.

Os varistores constituem-se na associação série e paralela de micro-varistores, formados pela junção de grãos de zinco (condutor) com o óxido (isolante). Nestes dispositivos, a energia do surto é dissipada por todo o seu volume, o que aumenta significativamente sua capacidade de absorção de energia e o torna adequado para a proteção de equipamentos com alto grau de exposição e categoria de localização A, B ou C [5]. A Figura 1 (a) ilustra um esquema de proteção baseado em MOVs para sistemas de alimentação CA em baixa tensão. Em casos nos quais não se permite a conexão do neutro ao terra, um circuito opcional deve ser utilizado, conforme ilustrado na Figura 1 (b).

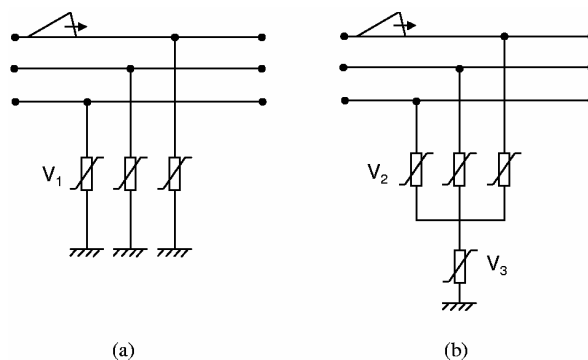


Figura 1 - Esquema de proteção para sistemas de alimentação CA em baixa tensão baseado em (a) MOVs com conexão direta neutro-terra (b) MOVs sem conexão direta neutro-terra.

Como forma de se aumentar ainda mais a capacidade de sobrevivência do equipamento contra os surtos provenientes do sistema de energia, são adicionados diodos de avalanche em cascata com os MOVs, especialmente nas entradas dos circuitos de medição e controle.

5.1 - Especificação dos MOVs e Diodos para o RDT

Para especificação dos MOVs e diodos, é necessário que se conheça as sobretensões às quais o equipamento estará submetido, em termos de amplitude, duração e formas de onda. A norma IEEE C62.41-1999 [5] define formas de onda e amplitudes para surtos padronizados para aplicações em níveis de baixa tensão. Para a escolha adequada dessas formas de onda, define-se em [5] o conceito de Categoria de Localização. Para o caso do RDT, considera-se:

- Categoria de Localização: B
- Nível de Exposição: Alto (3)

Esta caracterização define os parâmetros das ondas padronizadas a serem consideradas no estudo de proteção. No apêndice são sumarizadas as equações e os parâmetros para as ondas incluídas neste estudo.

5.1.1 - Onda Oscilatória Padronizada

A maior parte das ondas que se propagam em sistemas em baixa tensão abrigados apresentam natureza oscilatória. Normalmente, estas ondas se caracterizam por reduzido nível de energia, mas níveis bastante elevados de tensão.

5.1.2 – Onda Impulsiva Padronizada

De modo a se representar fenômenos com maior capacidade de transferência de energia, especialmente descargas atmosféricas, definem-se as formas de onda impulsivas padronizadas. Para tensão utiliza-se a onda $1,2/50 \mu s$ e para a corrente $8/20 \mu s$, onde $1,2 \mu s$ ($8 \mu s$) é o tempo de subida e $50 \mu s$ ($20 \mu s$) é o tempo de meia-onda.

5.1.3 - Onda Impulsiva Adicional

Descargas atmosféricas viajando em cabos subterrâneos apresentam normalmente frente de onda com tempo de subida reduzido, envolvendo, entretanto, maiores durações. Isso faz com que tais fenômenos apresentem maior capacidade de transferência de energia. Para a representação desses distúrbios, define-se a onda impulsiva adicional $10/1000 \mu s$.

5.1.4 - Onda Oscilatória Adicional

Esta onda é definida de modo a se representar os distúrbios causados por chaveamentos de capacitores e ações de disjuntores associados a cabos longos, os quais envolvem, normalmente, frequências mais baixas (centenas de Hz a alguns kHz), mas que possuem duração de até alguns milissegundos.

5.1.5 - Especificação Básica dos MOVs

No presente caso, são esperadas ocorrências de sobretensões temporárias entre fase e terra, tornando-se necessária a escolha particular do nível de proteção. Conforme definido em [3], o nível de proteção para tal caso deve variar em função da máxima sobretensão temporária esperada, sobretensão esta que varia em função do tipo de sistema de energia em questão, ou

seja, sistema trifásico a três fios, trifásico a quatro fios, sistema com neutro solidamente aterrado ou com neutro aterrado por impedância. Uma vez que na aplicação RDT não há definição prévia do tipo de sistema, uma abordagem conservativa e de aplicação mais abrangente deve ser adotada. Sendo assim, define-se que a máxima sobretensão temporária esperada entre fase e terra deve ser igual ao valor de pico da tensão fase-fase, adicionada a uma margem de variação aceitável na tensão, que pode chegar a 10%. Considera-se, pois, para o RDT, o nível de $440+10\%V$, ou seja, $484V_{rms}$.

Uma distinção deve ser feita para os casos ilustrados na Figura 1. No circuito (a) (Circuito I), a tensão de grampeamento do MOV fica automaticamente definida como $V_1 > 484V_{rms}$. Para aplicações conforme a Figura 1 (b) (Circuito II), a tensão V_3 deve ser escolhida de modo que seja maior que a tensão fase-neutro, incluindo-se 10% de acréscimo, ou seja, $V_3 > 279 V_{rms}$. Além disso, a soma $V_2 + V_3 > 484V_{rms}$ e $2 \times V_2 > 484V_{rms}$, ou seja, $V_2 > 242V_{rms}$. Deste modo, o nível de proteção de fase fica definido como $V_2 + V_3 \geq 521V_{rms}$.

Para as próximas etapas do dimensionamento, são realizadas simulações, nas quais são aplicadas as formas de onda impulsivas e oscilatórias nos circuitos considerados.

Um outro dado importante consiste na impedância entre a fonte do surto e o sistema considerado. Esta impedância define a severidade do distúrbio e a distribuição de corrente/energia entre o protetor e o sistema de energia. Os parâmetros para as formas de onda variam em função da categoria de localização do equipamento, bem como, do grau de exposição. Para categoria B e alto grau de exposição, os parâmetros a serem utilizados são conforme mostrados na Tabela 1 [5].

Tabela 1 - Parâmetros para ondas padronizadas e adicionais.

Forma de Onda	Valor de Pico	Impedância de Curto-circuito (Ω)
Impulso Padrão 1,2/50 μs	6kV	2
Impulso Padrão 8/20 μs	3kA	2
Onda Oscilatória Padrão	6kV/0,5kA	12
Impulso Adicional 10/1000 μs	$1,3 \times U_{pk}$	0,25
Onda Oscilatória Adicional	$1,8 \times U_{pk}$	0,5

5.1.6 - Resultados de Simulação

Para cada um dos casos considerados, são escolhidos os níveis de proteção para os varistores, conforme valores comercialmente disponíveis. Foram aplicadas cada uma das ondas para a verificação do comportamento dos componentes escolhidos.

Na Tabela 2 e Tabela 3 são mostrados os valores de tensão, corrente e energia dissipada no varistor.

Tabela 2 - Resultados das simulações. Circuito I.

Forma de Onda	Pico de Corrente [kA]	Energia [J]	Potência Média [W]
Impulso Padrão 1,2/50µs	2,84	121,0	1,00
Impulso Padrão 8/20 µs	2,84	33,0	0,28
Onda Oscilatória Padrão	0,48	2,3	0,02
Impulso Adicional	0,75	162,0	1,35
Onda Oscilatória Adicional	0,77	12,0	0,10

Tabela 3 - Resultados das simulações. Circuito II.

Forma de Onda	Pico de Corrente [kA]	Energia [J]	Potência Média [W]
Impulso Padrão 1,2/50 µs	2,81	126,0	1,05
Impulso Padrão 8/20 µs	2,81	35,0	0,29
Onda Oscilatória Padrão	0,47	2,3	0,02
Impulso Adicional	0,53	84,5	0,70
Onda Oscilatória Adicional	0,66	9,3	0,77

Para a escolha final do varistor, necessita-se, ainda, da definição da potência média máxima dissipada no mesmo. Este valor está associado ao tempo mínimo entre a ocorrência de dois distúrbios com dissipação de energia. Infelizmente, não existe parágrafo específico nas normas que tratem do problema de proteção. O que se recomenda é uma especificação, baseada no nível de exposição, tempo de vida útil e importância do equipamento protegido. Sendo assim, considera-se neste estudo, que o tempo mínimo entre fenômenos sucessivos é de $2min$, o que conduz aos valores de potência média incluídos na Tabela 2 e Tabela 3.

A partir das folhas de dados de varistores, chega-se ao valor para a máxima sobretensão sobre o varistor ou associação de varistores quando da circulação de correntes de surto. No presente caso, $1650V$ ou $1600V$.

Neste ponto, torna-se necessário comparar esses níveis de sobretensão com a tensão de isolamento dos dispositivos utilizados na constituição do restaurador dinâmico de tensão. Para os módulos de IGBT e diodos de $1200V$, são fornecidas nas folhas de dados, as tensões de isolamento, definidas para aplicação de tensão CA por $1min$ entre qualquer terminal e a base do módulo. Neste caso, $V_{isol} = 2500V_{AC}$, ou seja, $V_{isol} = 3535V$, o que permite a conclusão de que qualquer um dos circuitos com os varistores selecionados são suficientes para a proteção dos circuitos de potência do RDT.

5.1.7 - Proteção Adicional para os Circuitos Eletrônicos
Além dos circuitos de potência, os circuitos de medição de tensão configuram-se também como elementos sensíveis aos surtos provenientes do sistema de energia. Sendo assim, uma vez que tais circuitos são conectados diretamente entre condutores de fase e neutro através de divisores de tensão, torna-se necessária a implementação de proteção adicional, como forma de evitar danos a esses circuitos, provocados pelos surtos.

A Figura 2 ilustra o esquema de proteção a ser utilizado. Conforme ilustrado, um surto proveniente do sistema de energia sofre uma limitação ou grampeamento em decorrência da presença dos varistores principais. Entretanto, dependendo do nível da corrente de surto que flui pelos varistores, é esperado algum nível de sobretensão, a qual percorre ainda os circuitos do equipamento. Na Figura 2, a impedância Z_s , representa a impedância de surto dos cabos de conexão do ponto de instalação dos varistores à entrada do circuito eletrônico de medição. Neste ponto, os diodos de grampeamento proporcionam uma limitação adicional na amplitude do distúrbio, de modo a proteger os circuitos eletrônicos sensíveis.

Ressalta-se que a escolha dos diodos neste caso é justificada pelo maior grau de proteção proporcionado pela característica fortemente não-linear da relação I/V dos mesmos. Uma vez que não se espera elevados níveis de energia do surto no ponto de conexão dos circuitos eletrônicos de medição, os diodos se configuram como uma opção adequada.

A especificação dos diodos deve seguir procedimento semelhante ao dos varistores. Considera-se a utilização de cabos coaxiais ou par-trançado com impedância de surto igual a 300Ω . Outros valores típicos (50Ω e 75Ω), podem ser também utilizados. Entretanto, a redução na impedância de surto do cabo eleva desnecessariamente o requisito sobre a capacidade de corrente/energia do elemento de proteção.

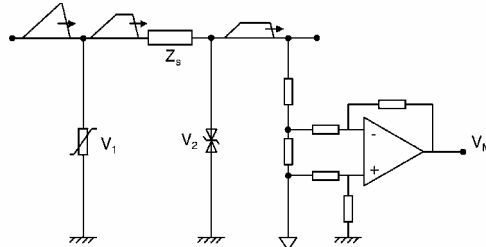


Figura 2 - Circuito para proteção do sistema de medição de tensão.

Conforme mostrado na Tabela 2 e Tabela 3, os maiores picos de corrente pelos varistores ocorrem para a aplicação das ondas de surto impulsivas padronizadas, sendo, portanto, estas, as consideradas para o dimensionamento dos diodos de grampeamento.

A Tabela 4 mostra o pico de corrente, a energia dissipada e a potência de pico nos diodos durante a aplicação dos surtos impulsivos.

Tabela 4 - Corrente de pico e energia dissipada nos diodos.

Z_s [Ω]	Forma de Onda	I_{pico} [kA]	E [J]	P_{pico} [kW]
50	Impulso Padrão 1,2/50 µs	13,5	0,60	10,49
	Impulso Padrão 8/20 µs	13,5	0,17	10,49
75	Impulso Padrão 1,2/50 µs	8,9	0,40	6,94
	Impulso Padrão 8/20 µs	8,9	0,11	6,94
300	Impulso Padrão 1,2/50 µs	2,3	0,10	1,74
	Impulso Padrão 8/20 µs	2,3	0,03	1,74

6.0 - PROTEÇÃO CONTRA CURTO-CIRCUITO NA CARGA

Sendo o RDT um equipamento conectado em série com a carga, o mesmo deve ser projetado para suportar quaisquer condições de falta que ocorram no lado da mesma. De modo a se coordenar a proteção do RDT com a proteção já existente na planta industrial e dispensar a instalação de disjuntores adicionais, a proteção do RDT deve incluir chaves de *bypass*, cujo objetivo é evitar a circulação de correntes de curto-circuito em seus transformadores série e conversores estáticos, conforme ilustrado na Figura 3. A chave de *bypass* é constituída de tiristores, para atuação rápida, em paralelo com chaves eletromecânicas, de alta capacidade de condução de correntes transitórias.

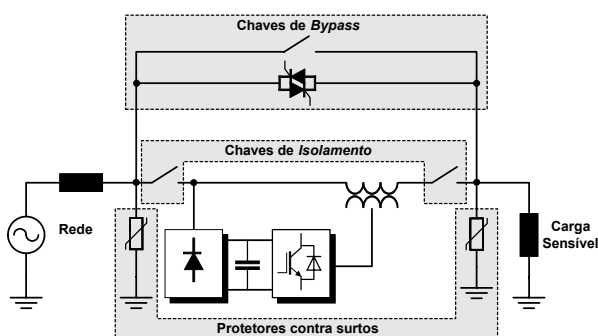


Figura 3 - Principais elementos de proteção do RDT.

6.1 Condições Gerais

Para que seja possível a especificação dos tiristores de *bypass*, são consideradas as seguintes condições:

6.1.1 - Potência de Curto-circuito

Para efeito de cálculo das correntes de curto-circuito, considera-se uma potência trifásica de curto-circuito igual a 7,5MVA. É também considerada a presença de um transformador exclusivo para a alimentação da carga protegida. Caso contrário, torna-se necessária a inclusão da contribuição de motores síncronos e assíncronos alimentados pelo mesmo ramal, o que pode elevar consideravelmente a potência de curto-circuito.

6.1.2 - Fator de Potência de Curto-circuito

O fator de potência de curto-circuito considerado é definido pela relação $X/R \leq 6,6$ [5].

6.1.3 - Tempo de Operação

Os tiristores de *bypass* devem ser capazes de conduzir as correntes de curto-circuito até a operação da chave eletromecânica de *bypass*. O tempo de operação típico para as chaves eletromecânicas apresenta variação aleatória, podendo superar 80ms. Para uma abordagem conservativa, considera-se neste estudo um tempo igual a 100ms.

6.1.4 - Temperatura

É considerada uma temperatura inicial para os tiristores igual a 50°C.

6.1.5 Arranjo Dissipador

Uma vez que o tempo de operação dos tiristores durante a proteção é relativamente reduzido, considera-se que não há variação na temperatura do arranjo dissipador, ou seja, elevada constante de tempo térmica do arranjo dissipador ($>100ms$).

6.2 – Resultados de Simulação

A especificação dos tiristores é feita em dois níveis: no primeiro, calcula-se a máxima corrente de pico e a integral do quadrado da corrente de curto-circuito (i^2t), conforme Figura 4 e Figura 5, respectivamente. Conforme pode ser visto, o pico de corrente durante o curto-circuito chega a $I_{sc} = 22,5kA$ e $i^2t = 7,8MA^2s$. Com essas informações, é feita a seleção prévia dos dispositivos, cujos dados são mostrados na Tabela 5.

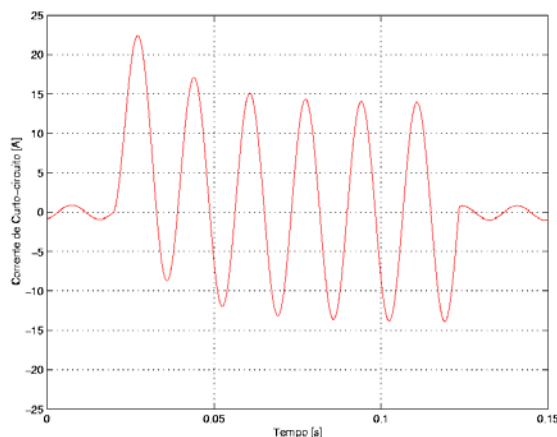


Figura 4 - Corrente de curto-circuito.

Tabela 5 – Dispositivos considerados.

Fabricante	Modelo	Tensão de Bloqueio [V]	I_{pico} [kA]	i^2t [MA ² .s]
A	I	600	42,0	8,82
	II	600	60,0	18,00
B	I	1800	50,0	11,05
	II	2800	65,0	18,00
C	I	1200	45,0	10,00
	II	1200	47,0	11,00

Para a avaliação da temperatura no interior dos dispositivos, utiliza-se os dados referentes às resistências e constantes térmicas do circuito equivalente do modelo térmico transitório dos dispositivos.

A Figura 6 ilustra a temperatura na junção de um dos tiristores do *bypass* durante a ocorrência do curto-circuito. A Tabela 6 sumariza os resultados obtidos. Ressalta-se que são mostrados os picos de temperatura nos dispositivos mais quentes do *bypass*.

Conforme a Tabela 6, as temperaturas máximas nos tiristores podem superar a temperatura máxima de operação sugerida pelos fabricantes (125°C ou 140°C). Entretanto, consideram-se

aceitáveis temperaturas até a ordem dos 240°C, uma vez que, para esta aplicação, não se faz uso da capacidade de bloqueio dos dispositivos.

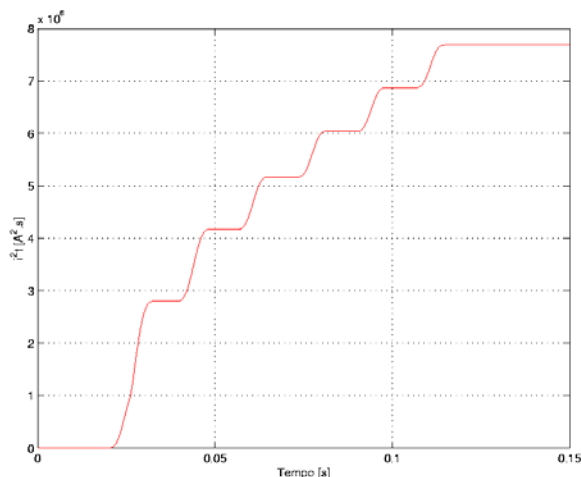


Figura 5 – Integral do quadrado da corrente de curto-circuito i^2t .

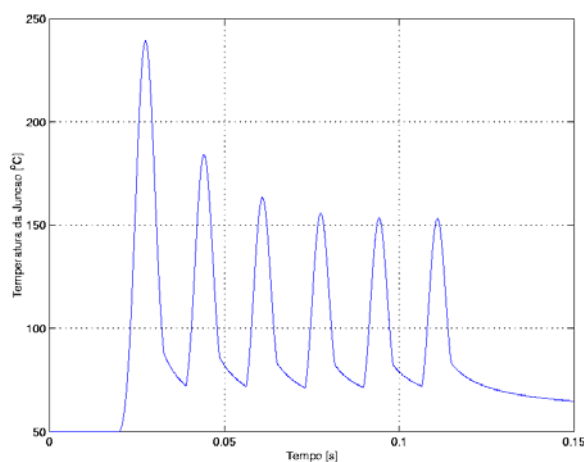


Figura 6 – Temperatura típica na junção de um tiristor do *bypass* durante o curto-circuito.

Tabela 6 – Máximas temperaturas das junções.

Fabricante	Modelo	Máxima Temperatura da Junção [°C]
A	I	255
	II	205
B	I	241
	II	204
C	I	284
	II	300

Conforme a Tabela 6, as temperaturas máximas nos tiristores podem superar a temperatura máxima de operação sugerida pelos fabricantes (125°C ou 140°C). Entretanto, consideram-se aceitáveis temperaturas até a ordem dos 240°C, uma vez que, para esta aplicação, não se faz uso da capacidade de bloqueio dos dispositivos.

Para que se tenha uma margem de segurança, permitindo não só o aumento no número de operações, mas acomodando, ainda, instalações com variações no nível de curto-circuito, além da presença de motores elétricos alimentados pelo mesmo ramal de alimentação da carga protegida, qualificam-se para a composição da chave de

bypass os dispositivos: A II e B II. Recomenda-se a utilização de circuitos de disparo com grande capacidade de corrente, de modo a reduzir o fenômeno de formação de pontos quentes e elevar a vida útil dos dispositivos, tendo em vista os possíveis níveis de corrente da aplicação.

7.0 - CONCLUSÕES

Neste artigo são discutidos os principais aspectos necessários à proteção de um restaurador dinâmico de tensão, incluindo-se a proteção contra surtos provenientes do sistema de energia e a proteção contra curto-circuito na carga protegida. O equipamento desenvolvido em parceria entre a UFMG e a CEMIG (500kVA / 440V) é utilizado como caso exemplo para ilustrar as metodologias descritas.

8.0 - APÊNDICE

8.1 – Onda Impulsiva Padronizada (1,2/50µs)

$$V(t) = AV_{pk}(1 - e^{-t/\tau_1})e^{-t/\tau_2}$$

$$A = 1,037, \tau_1 = 0,4047 \mu s, \tau_2 = 0,4047 \mu s$$

8.2 – Onda Impulsiva Padronizada (8/20µs)

$$I(t) = AI_{pk}t^3e^{-t/\tau}$$

$$\text{onde } A = 0,01243(\mu s)^{-3}, \tau = 3,9411 \mu s$$

8.3 – Onda Oscilatória Padronizada

$$V(t) = AV_{pk}(1 - e^{-t/\tau_1})e^{-t/\tau_2} \cos(\omega t)$$

onde

$$A = 1,590, \tau_1 = 0,533 \mu s, \tau_2 = 9,788 \mu s, \omega = 2\pi 10^5 \text{ rad/s}$$

8.4 – Onda Impulsiva Adicional (10/1000µs)

$$I(t) = AI_{pk}(1 - e^{-t/\tau_1})e^{-t/\tau_2}$$

$$A = 1,019, \tau_1 = 3,827 \mu s, \tau_2 = 1404 \mu s$$

8.5 – Onda Oscilatória Adicional

$$V(t) = AV_{pk}(1 - e^{-t/\tau_1})e^{-t/\tau_2} \cos(\omega t)$$

onde

$$A = 1,027, \tau_1 = 0,7356 \mu s, \tau_2 = 280,4 \mu s, \omega = \pi 10^4 \text{ rad/s}$$

9.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] - IEC 60204-1- Safety of Machinery - Electrical Equipment of Machines - Part 1.

[2] - IEEE Std C62.22-1991. IEEE guide for the application of metal-oxide surge arresters for alternating-current systems.

[3] - ANSI-IEEE Std C62.2-1987. IEEE guide for the application of gapped silicon-carbide surge arresters for alternating current systems.

[4] - ANSI-IEEE Std C62.42-1987. IEEE guide for the application of gas tube arrester low-voltage surge-protective devices.

[5] - IEEE C62.41-1999. IEEE Recommended practice on surge in low-voltage AC power circuit.

[6] - IEEE Std C62.37.1-2000. IEEE guide for the application of thyristor surge protective devices.