

Desenvolvimento de Chave Estática com Algoritmo de Alta Velocidade e Eficiência para Detecção de Falta e Comando de Operação

Carlos G. Bianchin, André R. de Almeida, Matheus T. da Silva Filho, Rogers Demonti, Cleverson L. da Silva Pinto

Resumo – O trabalho apresenta os primeiros resultados da pesquisa para o desenvolvimento de uma chave estática para operação em sistema de média tensão de 13,8 kV. Neste trabalho, constam os resultados do algoritmo de detecção de falta de energia que permite ao processamento digital controlar a chave. Este algoritmo se baseou nas transformadas de Clarke e Park. A operação da chave consiste na transferência da alimentação de uma fonte onde ocorreu falha, para outra fonte de alimentação alternativa (*backup*). A duração da falta de energia à carga é da ordem de milissegundos. Foi montado um protótipo de baixa tensão para permitir que o algoritmo fosse avaliado e operado em situações de cargas variáveis.

Palavras-chave – Algoritmo de Detecção, Comando e Transferência, Controle digital, Tiristores em Série.

I. INTRODUÇÃO

Este artigo se baseia no projeto intitulado “Pesquisa e desenvolvimento de tecnologia em estado sólido para transferência de alimentadores em sistemas trifásicos de 13,8 kV”, com código ANEEL 2866-020/2005, que está em fase de execução. A empresa executora é o LACTEC – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento e o suporte financeiro foi provido pela COPEL – Companhia Paranaense de Energia.

O fornecimento de energia elétrica é a função básica de uma empresa de distribuição de energia elétrica e, por este motivo, também é atualmente o foco de fiscalização por parte do órgão regulador Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Dentro deste enfoque, a concessionária busca soluções para o problema de falta momentânea de energia em consumidores de grande porte, onde as cargas são sensíveis e não podem sofrer interrupção de fornecimento.

Uma possível solução identificada, e que é objeto deste trabalho, é o desenvolvimento de uma chave de transferência automática, capaz de operar em um intervalo de tempo curto o

suficiente para que a carga sensível não sofra interrupção no fornecimento.

Atualmente, estão disponíveis para comercialização, chaves automáticas eletromecânicas, que transferem a carga de uma fonte para outra. Entretanto, seu princípio de operação impõe um intervalo de tempo elevado para realização desta transferência, que interrompe o fornecimento de energia elétrica às cargas sensíveis.

Como a exigência do intervalo de tempo de operação é essencial, buscou-se na eletrônica de potência uma solução para tal necessidade: utilização de tiristores. A solução que será apresentada foi estudada e desenvolvida na forma de um protótipo.

Desde o surgimento dos primeiros SCR (Silicon Controlled Rectifiers), a capacidade de processamento desta tecnologia de dispositivos semicondutores apresentou uma grande evolução, sendo obtido comercialmente SCR de até 12kV e centenas/milhares de ampères de capacidade de condução. Entretanto, algumas aplicações exigem capacidade de bloqueio e condução acima das capacidades existentes comercialmente. Um exemplo de aplicação é a transmissão em alta tensão com tensão contínua (HVDC Transmission - High Voltage Direct Current Transmission). Nestes casos, conexões série e paralelo são necessárias para implementações de estruturas que exigem altas tensões e altas correntes [1].

A conexão série de chaves semicondutoras é necessária em aplicações onde se deseja capacidade de bloqueio além das tensões máximas diretas e reversas de cada dispositivo isoladamente. Entretanto, a distribuição da tensão aplicada ao conjunto não ocorre de maneira equilibrada através das chaves em série [2]. Portanto, é necessário aplicar componentes equalizadores para o correto funcionamento do conjunto de semicondutores. Além disso, altas taxas de variação de tensão entre os terminais dos tiristores (ânodo e cátodo) podem causar o disparo indesejado dos mesmos, ocasionando a perda de controle do dispositivo.

A entrada em condução em situações de sobretensão pode ser destrutiva quando a corrente que se segue após a ruptura do dispositivo atinge valor excessivo. Esta situação é típica quando ocorrem curto-circuitos entre os terminais da carga ou descarga de capacitâncias elevadas presentes no circuito e que afetem o tiristor [3].

Em se tratando de conexão em série de SCR, a Figura 1 mostra o comportamento desejado das tensões distribuídas em uma conexão série de 3 SCR, partindo da condição desligado

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL e consta dos Anais do VI Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (VI CITENEL), realizado em Fortaleza/CE, no período de 17 a 19 de agosto de 2011.

Carlos G. Bianchin, André R. de Almeida e Rogers Demonti trabalham no LACTEC – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (bianchin@lactec.org.br, andre.almeida@lactec.org.br, rogers@lactec.org.br).

Matheus T. da Silva Filho e Cleverson L. da Silva Pinto trabalham na COPEL – Companhia Paranaense de Energia (matheus@copel.com, cleverson@copel.com).

(bloqueio total), passando pelo condução direta e retornando ao bloqueio total.

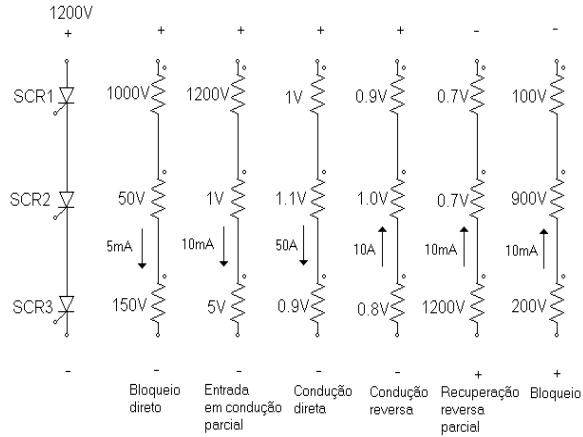


Figura 1 – Estados de operação possíveis para SCR em série sem rede de equalização.

No entanto, a série de SCR mostrada na Figura 1 não possui rede de equalização e isto causa implicações como a distribuição desigual de tensão entre os SCR, quando no bloqueio ou no transitório que leva a este estado.

Os resultados deste trabalho mostrarão que um projeto adequado desta rede de equalização permite a operação correta do sistema como um todo, enquanto o algoritmo desenvolvido permite definir os instantes de transição de uma fonte de energia para outra, sem a ocorrência de picos de tensão ou de corrente.

II. DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

Para um grupo de SCR, deve-se buscar dispositivos de um mesmo fabricante e modelo, de tal forma que apresentem correntes de fuga com valores próximos, tanto no bloqueio direto quanto no reverso. Mesmo entre SCR de mesmo modelo as correntes de fuga não são idênticas, fazendo com que aquele SCR de menor corrente de fuga esteja sujeito a maior queda de tensão durante os estados de bloqueio.

Considerando um arranjo em série como na Figura 2, se a faixa de corrente de fuga for definida como:

$$\Delta I_b = I_{b_{\max}} - I_{b_{\min}} \quad (1)$$

onde $I_{b_{\max}}$ é a corrente de fuga máxima pelo tiristor e $I_{b_{\min}}$ é a corrente de fuga mínima.

Pode-se deduzir que a pior situação de desbalanceamento ocorrerá quando um dos SCR apresentar $I_{b_{\min}}$, e todos os outros apresentarem $I_{b_{\max}}$. E_p é o máximo valor de tensão que cada tiristor suporta isoladamente. Como na Figura 2 o tiristor T1 tem a menor corrente de fuga, obtém-se $I_1 > I_2$. Assim:

$$E_p = I_1 \cdot R_s \quad (2)$$

$$E_m = E_p + (n_s - 1) \cdot R_s \cdot I_2 \quad (3)$$

onde E_m é a tensão da rede, I_1 e I_2 são as correntes através dos resistores de equalização estática R_s e n_s é o número de tiristores em série.

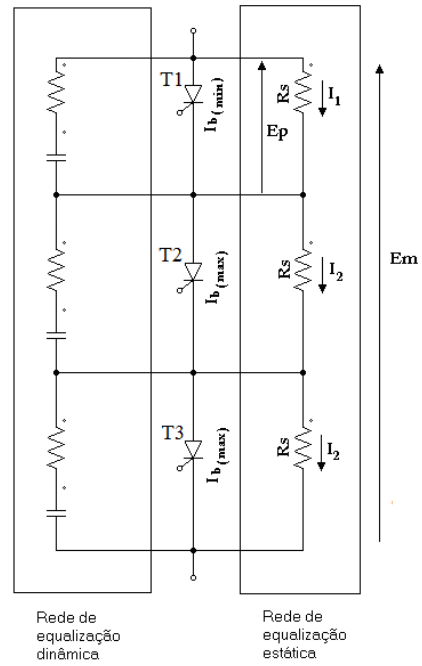


Figura 2 – Conexão elétrica em série com equalização de tensão estática e dinâmica.

Na Figura 2, os tiristores T2 e T3 possuem a mesma corrente de fuga $I_{b_{\max}}$.

Nas equações (2) e (3) está considerado que somente o SCR T1 possui corrente de fuga diferente dos demais. Isto serve para facilitar o entendimento sobre o processo de cálculo da resistência de equalização estática.

Pela Lei de Kirchhoff, a corrente I_2 pode ser calculada através de (4):

$$I_2 = I_1 - \Delta I_b \quad (4)$$

Assim, substituindo (2) e (4) em (3), tem-se:

$$E_m = n_s \cdot E_p - (n_s - 1) \cdot R_s \cdot \Delta I_b \quad (5)$$

Portanto:

$$R_s \leq \frac{n_s \cdot E_p - E_m}{(n_s - 1) \cdot \Delta I_b} \quad (6)$$

Em geral, o fabricante fornece apenas a corrente de fuga máxima para um determinado componente. Nestes casos, um projeto conservativo assume $I_{b_{\min}}$ igual a zero. O valor de R_s então se torna:

$$R_s \leq \frac{n_s \cdot E_p - E_m}{(n_s - 1) \cdot I_{b_{\max}}} \quad (7)$$

Convém ressaltar que a rede de equalização estática representa perdas e isto deve ser levado em conta na escolha dos valores de resistência. Além disso, ao contrário de chaves de comando mecânica, existe uma corrente de fuga considerável nos tiristores, quando estes estão bloqueados.

Em determinadas literaturas [4], [5], existem gráficos para seleção da resistência de forma normalizada, de acordo com a Figura 3.

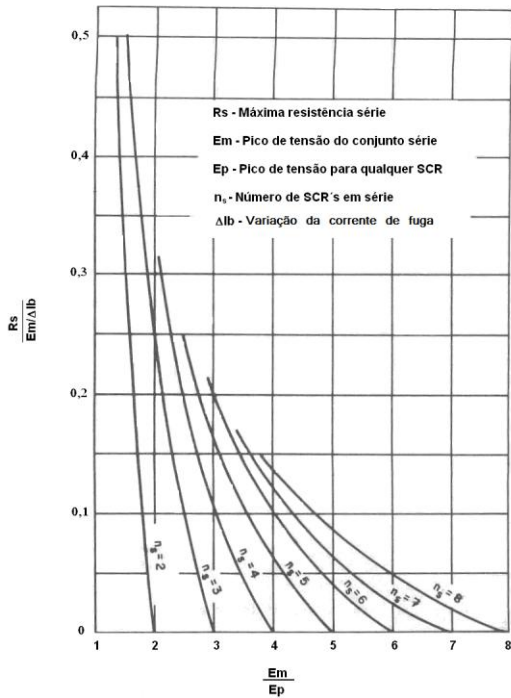


Figura 3 – Resistência de equalização para operação de SCR's em série.

Em uma junção semicondutora, na passagem do estado de condução direta para o bloqueio, os portadores de carga devem se reagrupar para formar novamente a barreira de potencial. Isto gera uma corrente transitória chamada *corrente de recuperação reversa*. Este fenômeno é mais evidente nos tiristores fabricados para transportar correntes mais elevadas.

Considerando dois SCR com correntes de recuperação reversa diferentes, a diferença entre estas correntes pode ser representada através das variações de carga que ocorrem na passagem do estado de condução para o de bloqueio. Isto pode ser visualizado na Figura 4.

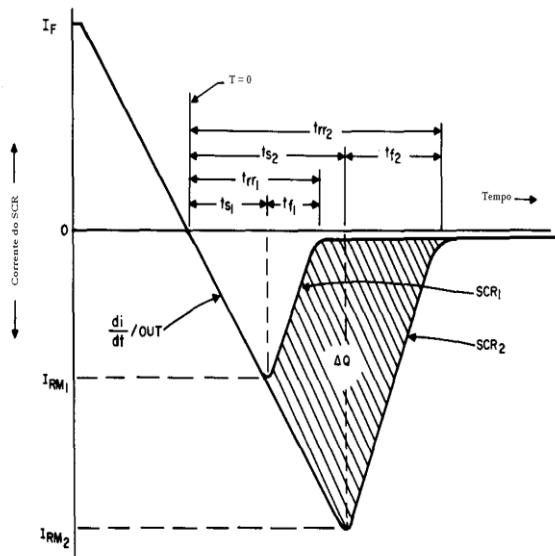


Figura 4 – Corrente de recuperação reversa para dois SCR do mesmo fabricante e com as mesmas especificações.

Os SCR da Figura 4 possuem características de recuperação reversa muito diferentes, o que leva à necessidade de

construir uma rede equalização dinâmica, como mostrada na Figura 2.

Na aplicação prática que corresponde a este artigo, dois SCR operarão em anti-paralelo, formando uma chave; cada par destes SCR será associado em série com outros conjuntos idênticos, para se constituir na chave CA mostrada na Figura 5.

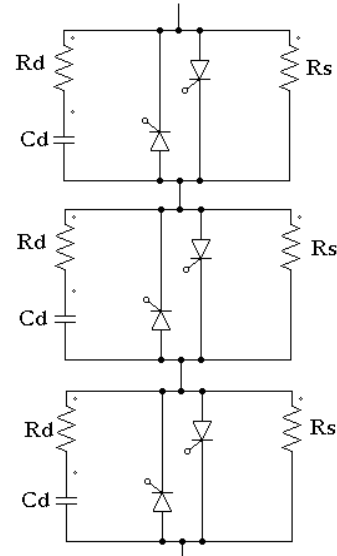


Figura 5 – Diagrama da chave estática.

A Figura 5 esboça com mais detalhes a rede de equalização dinâmica já mostrada na Figura 2, para o protótipo de baixa tensão. Esta rede, composta pelos resistores R_d e capacitores C_d , atua durante o transitório de abertura das chaves, impedindo que cargas tipicamente indutivas ou que tiristores com cargas reversas diferentes, danifiquem o conjunto da chave estática. Visualiza-se também a rede de equalização estática, composta pelos resistores R_s .

Na Figura 4, destaca-se a existência de uma região hachurada, denominada *diferença de carga para recuperação reversa*, ou simplesmente ΔQ . Devido a essa diferença de carga, os capacitores C_d da Figura 5 não se carregam de forma igual durante o bloqueio. Em outras palavras, estes capacitores terão tensões diferentes entre eles, devido às diferenças de fabricação. A diferença de carga ΔQ ocorre no momento transitório apenas.

Em função da diferença de carga ΔQ , existe também uma variação de tensão ΔV_{max} , dada por:

$$\Delta V_{max\ x} = \frac{\Delta Q_{max}}{C_x} \quad (8)$$

onde $x = 1, 2, 3, \dots, n$.

Se a fonte de alimentação tem a tensão de pico E_c , e no conjunto de SCR há um mais rápido, é com este que o problema de bloqueio é mais grave: bloqueando primeiro que os demais, ele terá que suportar a tensão mais elevada E_c no respectivo capacitor C_d .

Nesta condição, o cálculo do capacitor C_d é obtido através de:

$$C_d \geq \frac{(E_s - 1) \cdot \Delta Q_{max}}{n_s \cdot E_p - E_c} \quad (9)$$

No entanto, o parâmetro ΔQ_{max} é difícil de ser medido, al-

guns fabricantes nem mesmo fornecem seu valor. Segundo [1] é comum considerar $\Delta Q_{\max} = 400 \mu\text{C}$ para esta linha de trabalho. Este é um valor aproximado, pois nenhum processo de fabricação de semicondutores assegura total confiabilidade em grandeza tão peculiar de um tiristor.

No protótipo com tensão reduzida, utilizou-se tiristores que possuem $E_p = 394 \text{ V}$ (280 V eficaz) e a fonte utilizada é um sistema com 311 V de pico (220 V eficaz). Como o protótipo possui 3 chaves em série ($n_s = 3$), tem-se que o capacitor C_d deve ser maior ou igual a $1,6 \mu\text{F}$. Foi utilizado um de valor $1,5 \mu\text{F}$ disponível comercialmente.

Para o resistor R_d , da Figura 5, o valor normalmente adotado está entre 1,2 e 5 ohms. Esta é uma faixa orientativa, pois deve-se atentar à possibilidade desse resistor provocar um tempo excessivo para descarga do capacitor, na operação de desligamento. Este trabalho adotou o valor de 1,2 ohms.

A chave estática com tiristores em série deve comandar o fornecimento de energia elétrica à carga e detectar a ocorrência de uma falta. O controle eletrônico deve oferecer à chave estática o comando para iniciar o processo de transferência de fonte de alimentação. Para alcançar estes objetivos, foi desenvolvido um algoritmo capaz de monitorar os sinais de tensão das duas fontes de alimentação, a tensão na saída da chave estática e a corrente consumida pela carga.

O algoritmo do controle eletrônico inova ao aplicar um conceito que foi desenvolvido, inicialmente, para o segmento de máquinas elétricas. Ele é baseado nas literaturas que tratam das transformadas de Clarke e Park [6], [7]. Estas transformadas possibilitam que o controle possa monitorar em tempo real as tensões da fonte principal e da auxiliar, de forma a identificar rapidamente a ocorrência de uma falta e comandar o chaveamento de uma fonte para a outra no caso de falta.

A técnica implementada considera duas transformações. A primeira, de Clarke, transforma as tensões trifásicas girantes em tensões de dois eixos $\alpha\beta$, de acordo com:

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (10)$$

onde v_a , v_b e v_c representam as tensões de fase das fontes de alimentação e a tensão v_0 representa a tensão de seqüência zero. Tanto para a fonte principal, quanto para a auxiliar, a transformação é aplicada.

Esta transformação projeta os vetores correspondentes às fases ABC nos eixos ortogonais estacionários $\alpha\beta$, conforme ilustra a Figura 6.

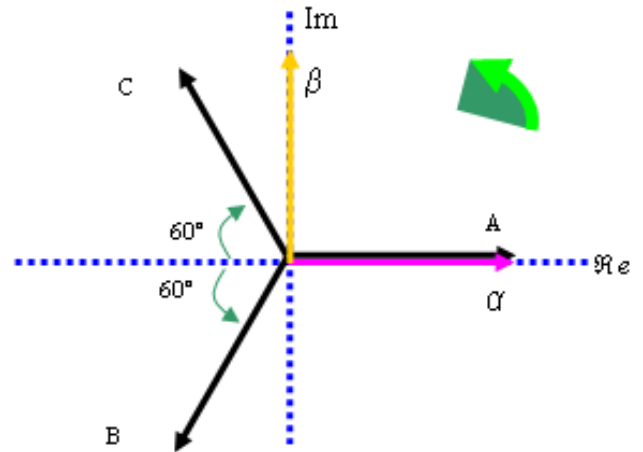


Figura 6 – Diagrama vetorial da transformação de Clarke

Como os vetores ABC estão girando na frequência da rede, também assim ocorrerá com o vetor resultante da transformada de Clarke, ou seja, pode-se escrever um vetor resultante $V_{\alpha\beta}$, que girará na frequência da rede com um ângulo φ , conforme mostra a Figura 7.

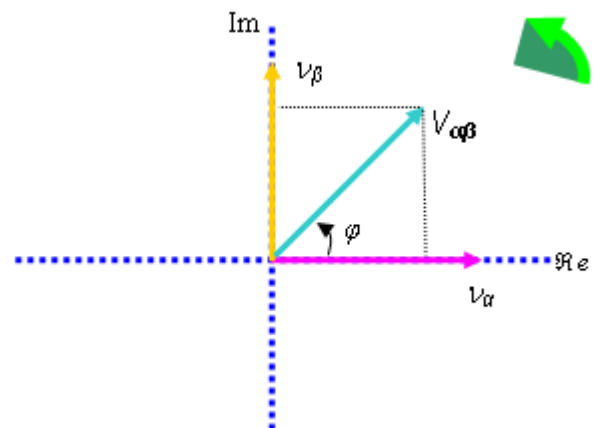


Figura 7 – Representação fasorial do vetor resultante $V_{\alpha\beta}$ com ângulo φ

Comparando as tensões ABC com os eixos $\alpha\beta$, pode-se concluir que a tensão A está em fase com a componente α (Figura 8).

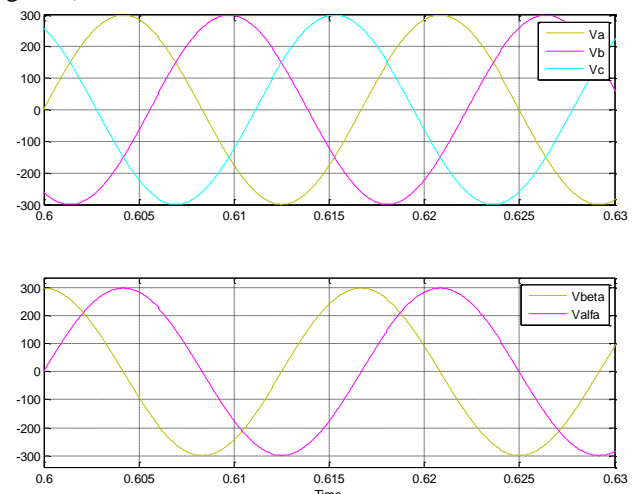


Figura 8 – Tensões ABC e correspondente $\alpha\beta$

Para um sistema trifásico desequilibrado, as componentes $\alpha\beta$ serão afetadas de forma direta. A Figura 9 mostra este comportamento em situação onde ocorre afundamento da fase A.

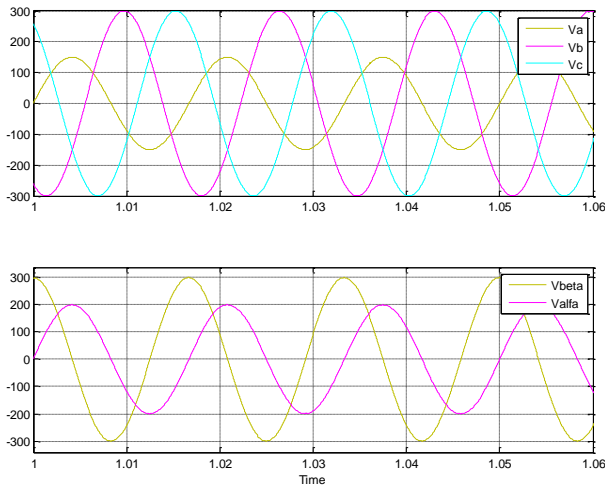


Figura 9 – Componentes $\alpha\beta$ para situação de afundamento monofásico (Fase A)

A transformada de Clarke gera um vetor $V_{\alpha\beta}$ que tem um ângulo φ , de difícil determinação, pois ele também gira de acordo com a frequência da rede e não se sabe qual é a sua defasagem em relação a alguma das tensões conhecidas. A transformada de Park é aplicada para produzir um sistema de eixos sincronizados com a rede e, portanto, não-girante. Esta transformada é representada abaixo:

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Para esta transformada, o ângulo θ deve estar sincronizado com a frequência da rede.

Aplicando estas transformadas, Clarke e Park, em um sistema trifásico equilibrado, o resultado é o mostrado na Figura 10, para as componentes d e q .

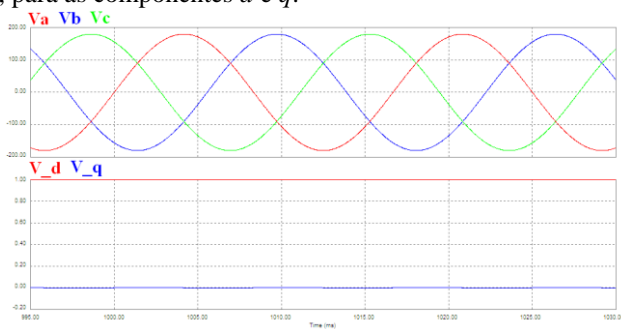


Figura 10 - Componentes v_d e v_q relativos a um sistema trifásico equilibrado

Até o momento, o controle eletrônico não é capaz de detectar oscilações rápidas que ocorram no sistema elétrico, nomeadamente uma variação brusca de tensão ou mesmo uma falta.

Esta detecção se torna possível mediante a utilização de um filtro passa-baixa, que fornecerá na sua saída um impulso correspondente às variações de tensão que se busca detectar.

Com a aplicação das transformadas anteriores, o algoritmo utiliza um filtro passa-baixa para obter o resultado final. O

objetivo do filtro é permitir somente a passagem das oscilações de frequência muito baixa.

A Figura 11 mostra como o filtro foi utilizado no modelo de simulação e também na implementação do protótipo da chave estática de transferência automática.

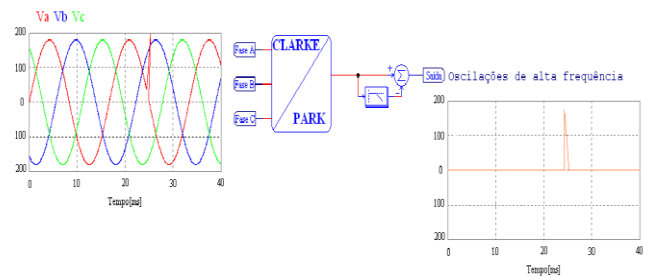


Figura 11 – Implementação do filtro passa-baixa

O objetivo do conjunto é permitir que os sinais que representam as oscilações rápidas, como as faltas, possam passar. Enquanto isto, os sinais referentes à frequência de 60 Hz ou oscilações naturais como as variações de valor rms, pertencentes e comuns ao sistema elétrico, são desconsideradas.

Desta forma, o controle eletrônico operará para comandar a chave estática somente em situações onde ocorram faltas.

No regime permanente, a resolução de (11) conduz a uma componente V_d igual a zero. Quando ocorre uma falta, então se registra um valor diferente, capaz de ser detectado pelo controle eletrônico. Um exemplo de comportamento da componente V_d é mostrado na Figura 12.

Como o comportamento da componente V_d é constante e contínuo, a implementação de um filtro passa-baixa torna-se facilitada, pois se baseará na média aritmética de um conjunto de amostras com tamanho determinado em função da frequência de corte. Neste caso o filtro passa-baixa possui frequência de corte de 1 Hz.

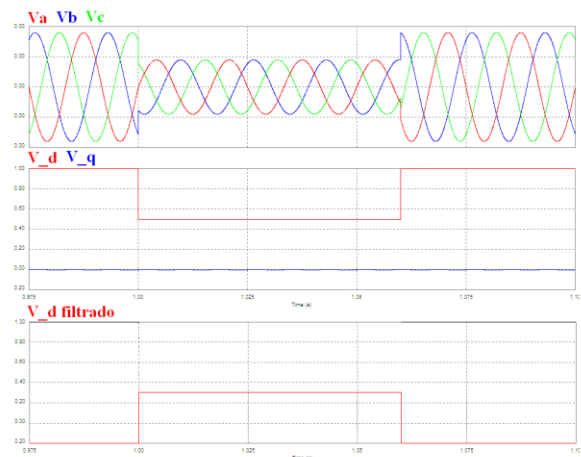


Figura 12 – Resultado da aplicação do algoritmo com as transformadas e o filtro passa-baixa

A transformação $abc-dq$ aplicada à detecção de faltas apresenta excelente resposta dinâmica, ou seja, resposta rápida e estável. A partir de uma componente V_d como a da Figura 12, é possível detectar a falta através da aplicação do filtro (componente V_d filtrado).

Devido à rápida detecção logo no início da falta, o controle eletrônico pode decidir pelo comando de transferência da chave estática. A frequência de corte do filtro passa-baixa dá

ao controle eletrônico um segundo para atuar. Este tempo é suficientemente grande para a detecção das faltas.

Na condição ideal, a variável V_q permanece em zero enquanto a variável V_d representa o pico médio das três tensões de fase. No entanto, as tensões do sistema elétrico possuem conteúdo harmônico e também eventual desbalanceamento de carga. Nesta condição, as variáveis V_d e V_q da transformada terão um comportamento oscilatório, porém de pequena magnitude, o que não influenciará o método de detecção da falta.

De forma comparativa, não existe no mercado equipamento que faça uso desta técnica de monitoração para transferência automática entre fontes de alimentação com aplicação a cargas sensíveis.

Há equipamentos que utilizam amplamente a técnica para controle de máquinas elétricas e no segmento de inversores de frequência para sistemas de fornecimento de energia ininterruptos (*no-breaks*).

III. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Um protótipo de chave estática foi montado, composto por três chaves semicondutoras tiristorizadas por fase, com capacidade de suporte de tensão de 840 V eficazes. As fontes de alimentação têm a mesma origem, onde a falta de energia é provocada pela operação manual, a qualquer instante, de um disjuntor trifásico, conforme mostrado na Figura 13.

Para operação deste tipo de chave, a pior carga é do tipo indutiva, pois quando da abertura, a indutância força a continuidade da passagem de corrente até que a mesma passe por zero e, somente então, o sistema pode ser considerado desligado.

Normalmente, uma carga não é puramente indutiva, então o protótipo reproduziu uma carga com componente ativa (resistiva) e também reativa (indutiva), de forma a se aproximar de situações reais.

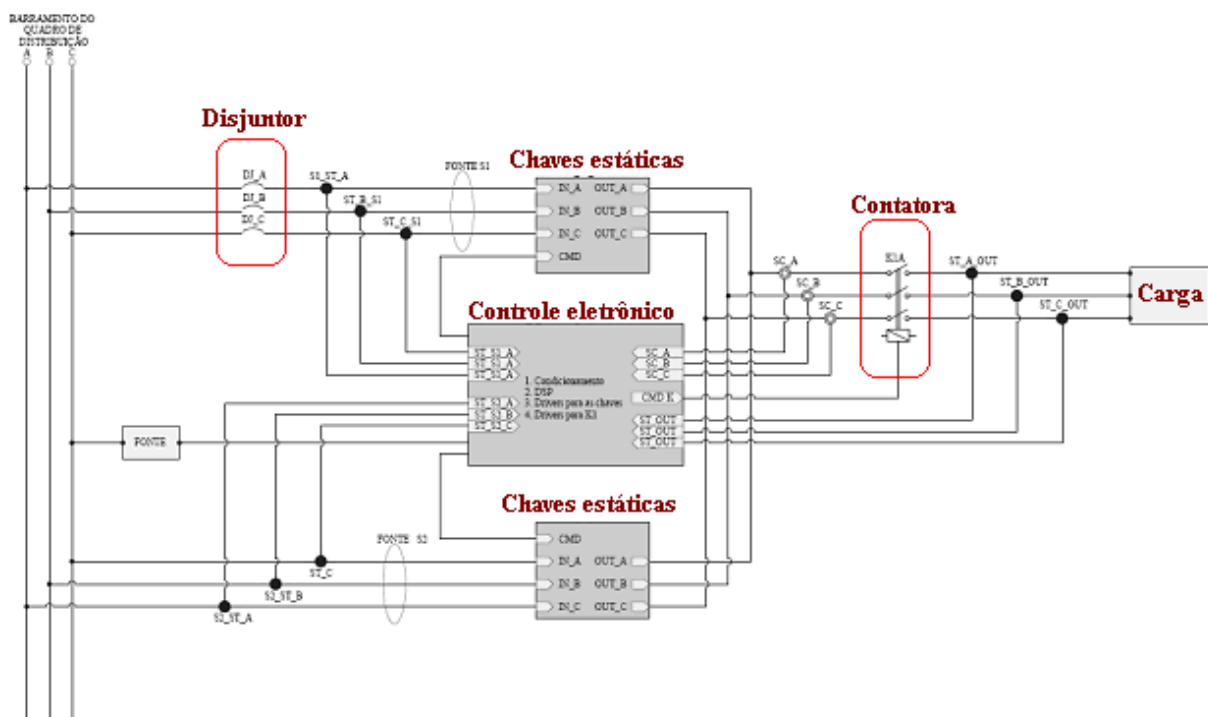


Figura 13 – Diagrama elétrico do protótipo de chave estática (testes de laboratório).

Foram utilizadas como carga 3 bancos de resistências de 11 ohms em série com indutores de 1,5 mH em cada banco. Isto produz uma corrente defasada da tensão conforme mostra a Figura 14.

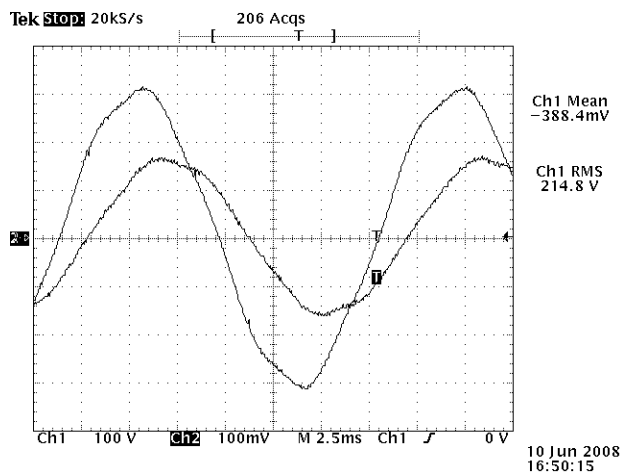


Figura 14 – Defasagem entre tensão [100V/div] e corrente [10A/div].

Foi provocada uma falta no protótipo, de modo a observar o controle eletrônico atuando. A Figura 15 mostra no canal 1 o sinal de comando até o instante em que o controle atua, bem como o comportamento da tensão na carga após a atuação (canal 2).

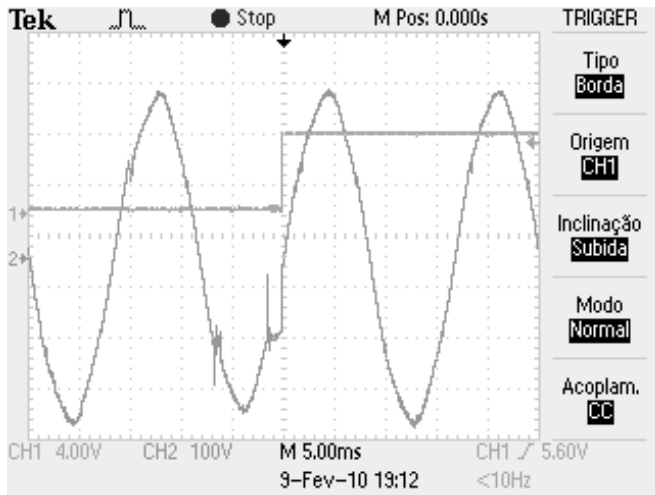


Figura 15 – Comportamento da tensão na carga durante o instante de comando de transferência de carga.

Nota-se que a tensão na carga sofre pequena oscilação durante o ciclo ocorrência da falta-deteção-atuação do controle eletrônico, alterando a fonte de alimentação.

Nesta mesma montagem, é possível comandar manualmente o protótipo de chave estática, para transferir o fornecimento de energia à fonte de alimentação principal. Se ela estiver em falta, o controle deve identificar esta situação e retornar o fornecimento para a fonte auxiliar.

Isto avalia o comportamento e a velocidade do protótipo: a carga permanece sem energia por um tempo inferior a meio ciclo da tensão de entrada. É o que se vê na Figura 16, onde a carga sequer sofre a pequena oscilação registrada na Figura 15.

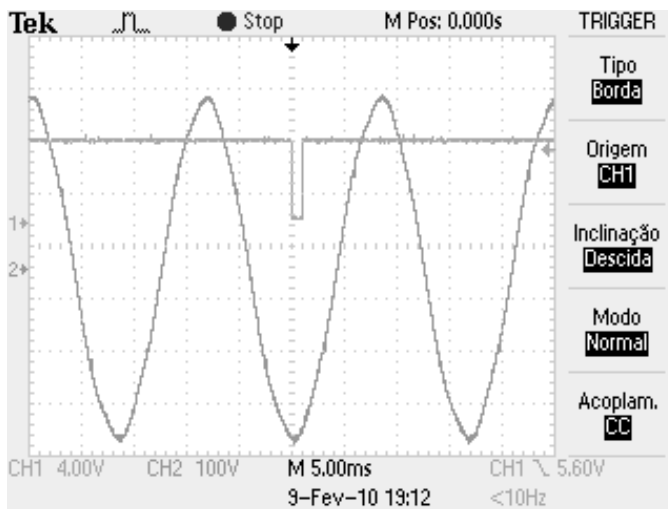


Figura 16 – Comportamento da tensão na carga durante chaveamento entre a fonte principal e a auxiliar, com retorno à fonte principal.

A falta cessou e a fonte principal está novamente disponível. A Figura 17 mostra este instante, e nota-se que mais uma vez a carga não sente oscilação alguma.

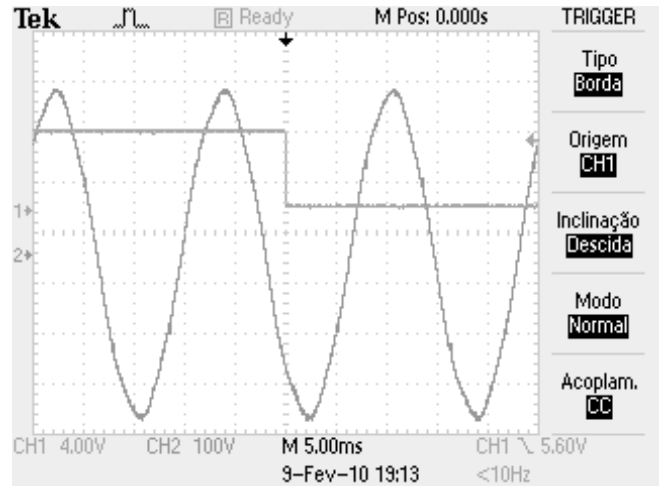


Figura 17 - Comportamento da tensão na carga durante chaveamento da fonte auxiliar para a principal.

Para mostrar que o algoritmo desenvolvido é rápido, foi implementado um algoritmo convencional de detecção de falta baseado na medição de valor eficaz com janela deslizante, permitindo que a cada nova amostra de sinal de tensão o controle eletrônico calcule o novo valor eficaz.

O sistema foi colocado em funcionamento e gerada uma falta. O comportamento do sinal de tensão na carga é notado na Figura 18.

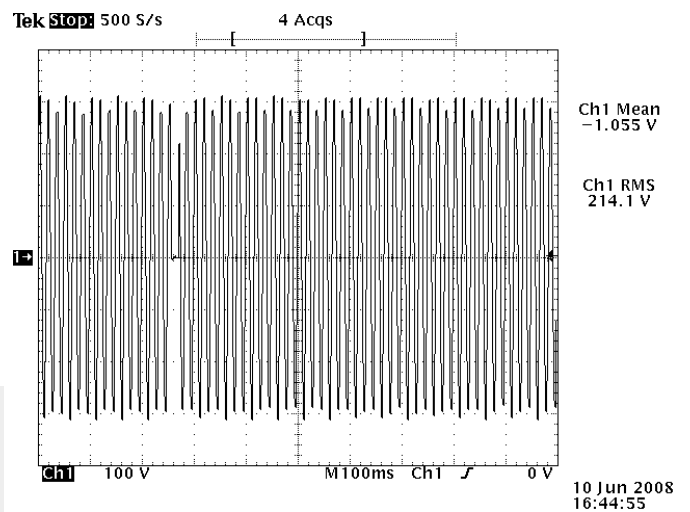


Figura 18 – Comportamento da tensão na carga em uma das fases utilizando medição de valor rms com janela deslizante.

Utilizando o valor rms para monitoração, pode-se definir um limite de magnitude de tensão abaixo do qual o controle comande a transferência de carga. Na Figura 18, adotou-se um limite próximo ao valor de pico e a interrupção durou 1,5 ciclos. Se este limite fosse ajustado para valores menores, como ocorre na interrupção no fornecimento de energia elétrica, ocorreria ausência de tensão na carga por períodos ainda maiores.

A título de comparação, para uma interrupção como a da Figura 18, a utilização de método convencional de monitoração da tensão provocaria falha na operação de componentes de um sistema industrial como aquele que contém contactores. Isto representa, em termos financeiros, prejuízos

que podem atingir a casa de milhões de dólares, dependendo do tipo de carga sensível que está operando.

IV. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um novo método, capaz de ser rápido e eficiente para controlar uma chave estática no fornecimento de energia elétrica a uma carga sensível, de forma que a mesma não sofra falta de energia ao alternar seu fornecimento para uma fonte auxiliar. É focado um segmento específico como cargas industriais que não podem sofrer interrupções, mesmo por períodos pequenos.

O trabalho apresentou novo método de monitoração para detecção de falta de energia com intervalo de tempo na ordem de microssegundos.

Quando comparados os métodos convencionais com o desenvolvido neste trabalho, nota-se que em determinadas situações, uma carga sensível será afetada por um tempo maior, quando controlada por métodos convencionais, que impõem faltas no fornecimento de energia por até vários ciclos de tensão da rede. O novo método é mais rápido e o sistema com semicondutores permite que o chaveamento ocorra em menos de meio ciclo.

O trabalho está agora no desenvolvimento de um protótipo para sistema elétrico de 13,8 kV (média tensão).

V. AGRADECIMENTOS

A equipe agradece a oportunidade propiciada pela Companhia Paranaense de Energia – COPEL que, através do programa de pesquisa e desenvolvimento da ANEEL, executa este projeto conjuntamente com o LACTEC.

VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Grafham, D.R., Golden, F.B., *SCR Manual – Sixth Edition*, General Electric, Prentice Hall, Inc, 1979.
- [2] Watanabe, E. H., Aredes, M. Souza, L.F.W., Bellar, M.D., “Series Connections of Power Switches for Very High Power Applications and Zero Voltage Switching”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol.15, No.1, January 2000.
- [3] Mathur, R. M., Varma, R. K., *Thyristor-Based FACTS Controllers for Electrical Transmission systems*, IEEE Series on Power Engineering, 2002.
- [4] Hoft, R., *SCR Applications Handbook*. International Rectifier, Semiconductor Division, USA, 1977.
- [5] Mitsubishi High Power Semiconductors, *Cooling Methods for Power Semiconductor Device Mounting Between Cooling Fins - Application Notes*, August, 1998.
- [6] Neacsu, D. O., *Power-Switching Converters*, CRC Press, 2006.
- [7] Sood, V. K., *HVDC and FACTS Controllers – Applications of Static Converters in Power Systems*, Kluwer Academic Publishers, 2004.