



XVIII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica

SENDI 2008 - 06 a 10 de outubro

Olinda - Pernambuco - Brasil

Desenvolvimento e Implementação de um Modelo Digital do Regulador de Tensão com Comutador Eletrônico de Taps Operando num Ramal de Distribuição de Média Tensão

Mauricio Aredes

COPPE/UFRJ

aredes@coe.ufrj.br

Lucas Frizera Encarnação

COPPE/UFRJ

lucas@coe.ufrj.br

Mauro do Sandro Reis

COPPE/UFRJ

mauro@coe.ufrj.br

João Moor

CEFET-RJ

moor@coe.ufrj.br

Marcio Gavazzi

Energias do Brasil

gavazzi@enbr.com.br

Celso Crespi Sanches

ITB Equipamentos Elétricos

projeto@itb.ind.br

Palavras-chave

Autotransformador

Comutador Eletrônico de Taps

Regulador de Tensão

Tiristores

Variação de Tensão de Curta Duração

Resumo

Nas últimas décadas, os reguladores de tensão com comutadores eletromecânicos de taps vêm sendo comumente utilizados nos sistemas de distribuição para garantir que os consumidores disponham de uma tensão dentro dos limites adequados as suas necessidades. De fato a qualidade da energia elétrica está diretamente ligada aos níveis de tensão entregues aos consumidores. Entretanto, devido a grande utilização de equipamentos eletro-eletrônicos, sensíveis às variações de tensão de curta duração imperceptíveis para os reguladores eletromecânicos de tensão, motivou a busca de novas tecnologias visando à obtenção de um tempo de resposta mais rápido do circuito de comutação do regulador de tensão. Deste modo, os comutadores eletrônicos de taps proporcionam uma melhoria na qualidade de energia suprida devido a sua capacidade de responder rapidamente às oscilações de tensão. Nesse contexto, este artigo apresenta uma proposta de um Regulador de Tensão com Comutador Eletrônico de Taps (RECET) que foi desenvolvido visando à substituição dos reguladores convencionais com comutador eletromecânico de taps em sistemas de distribuição de média tensão. Serão apresentados resultados de simulações no programa PSCAD/EMTDC[®] que atestam que o RECET é uma opção efetiva na regulação de tensão.

1. INTRODUÇÃO

Uma utilização satisfatória da energia elétrica pela sociedade, em seus diferentes setores, pode ser garantida por intermédio de um sistema de distribuição eficiente. O crescimento dos sistemas de distribuição, de modo direto, aumenta a necessidade de inclusão de dispositivos que possibilitem a regulação de distúrbios na tensão. Nesse contexto, o uso de reguladores de tensão tem se mostrado de grande importância para a manutenção dos níveis de tensão dentro dos limites especificados pela resolução 505/2001 da ANEEL¹.

Atualmente, a maioria dos sistemas de potência vem operando bem próximos dos seus limites máximos de carga. Isto se deve ao aumento de consumo e às restrições econômicas e ambientais para a expansão da geração de energia elétrica e a instalação de novas linhas. Estes fatos têm comprometido a qualidade da tensão fornecida pelas concessionárias.

Variações de Tensão de Curta Duração (VTCDs) são ocorrências comuns numa rede do sistema elétrico. Porém, mais do que causar irritação aos consumidores, este tipo de ocorrência pode provocar danos financeiros de largas proporções às indústrias, especialmente aquelas que utilizam processos industriais complexos. Normalmente esses processos utilizam equipamentos sensíveis, ou cargas críticas, onde uma perturbação de tensão pode interromper o funcionamento das mesmas, podendo demorar até algumas horas para retornar à operação normal de funcionamento.

Os reguladores de tensão são amplamente utilizados nos sistemas brasileiros de distribuição há décadas. Estes equipamentos são baseados em comutadores automáticos eletromecânicos que possibilitam um bom desempenho na regulação da tensão em regime permanente². Entretanto, o tempo de resposta dos reguladores mecânicos de tensão, normalmente em torno de 5 a 8 segundos, não são rápidos o suficiente para regular um VTCD na ordem dos milisegundos. O tema deste trabalho é de desenvolver um novo circuito de comutação, para que o mesmo seja capaz de compensar variações de tensão mais rápidas, com isso aumentando a qualidade de energia dos sistemas de distribuição.

A utilização de Reguladores de Tensão com Comutador Eletrônico de Taps (RECET) possibilita que seja obtida uma regulação de tensão satisfatória mesmo diante de VTCDs. Isto somente é possível pelo fato do circuito do comutador ser baseado em semicondutores de potência, que apresentam um tempo de resposta na ordem dos milisegundos. Além do tempo de resposta mais rápido, os comutadores eletrônicos podem trocar os níveis de compensação de forma direta, por exemplo, do nível mais baixo para o nível mais elevado de compensação, sem ter a necessidade de excursionar sequencialmente todos os níveis intermediários como ocorre no comutador mecânico.

Neste cenário, este trabalho apresenta os aspectos gerais de um Regulador de Tensão com Comutador Eletrônico de Taps (RECET), que possibilita uma regulação de tensão em uma faixa compatível ao regulador de tensão comercial com comutador eletromecânico, porém com um tempo de resposta muito inferior. Sendo assim, tendo em vista a sua capacidade de responder rapidamente às variações da tensão da rede, a substituição do regulador de tensão convencional pelo RECET, possibilitará uma melhoria considerável na qualidade da tensão suprida aos consumidores.

Os resultados de simulação, obtidos no programa de transitórios eletromagnéticos PSCAD/EMTDC[®], serão apresentados comprovando a eficiência do RECET na regulação e na compensação de desequilíbrios de tensão. Foram realizadas duas simulações distintas, na primeira o RECET foi testado frente a aspectos básicos de operacionabilidade, enquanto na segunda simulação o RECET foi testado diante distúrbios de tensão em um sistema base representativo de um alimentador de uma concessionária.

2. DESCRIÇÃO DO RECET

O primeiro regulador de tensão com comutador eletrônico de Taps foi colocado em operação na Noruega em 1986 pela ABB Components³. Posteriormente, surgiram outras proposições envolvendo diferentes projetos de transformadores, conexões de chaves e técnicas de controle visando obter um nível de tensão desejado à carga⁴⁻⁹.

Como o regulador monofásico com comutador eletrônico desenvolvido é direcionado para operar em níveis de distribuição de média tensão, as chaves semicondutoras deverão operar com potências elevadas, o que certificou a aplicação de tiristores no circuito do comutador eletrônico. O comutador eletrônico foi concebido considerando a utilização de grupos de tiristores em anti-paralelo⁸, sendo que o número de pares em anti-paralelo foi especificado considerando as seguintes premissas:

- Apresentar uma potência similar a um valor padronizado utilizado nos reguladores de tensão no país;
- Possuir degraus de variação de tensão de 0.625% da tensão da entrada;
- Apresentar um total de 41 níveis de compensação, sendo 20 negativos, 20 positivos e um nível central, ou seja, sem compensação;
- Apresentar uma atuação de modo bidirecional em relação a corrente de carga do sistema.

A Figura 1 ilustra a conexão de um banco trifásico de Reguladores de Tensão com Comutadores Eletrônicos de Taps em uma rede de distribuição.

Devido ao fato do regulador convencional possuir um comutador mecânico, este irá apresentar variações das tensões em degraus, ou seja, de nível em nível. O objetivo principal é a substituição do comutador eletromecânico por chaves estáticas, compostas por dois tiristores em anti-paralelo em cada célula. O tiristor pode realizar a mesma operação do comutador mecânico de forma mais rápida, e ainda comutar de forma não seqüencial, saltando aleatoriamente de um nível mais baixo de tensão para um nível mais alto, ou vice-versa, de forma direta, sem necessidade de excursionar por todos os níveis intermediários. Além disto, o tiristor se caracteriza por apresentar uma dinâmica de comutação de 1/2 ciclo de onda o que é equivalente à cerca de 8ms, muito inferior que a dinâmica mecânica do comutador convencional.

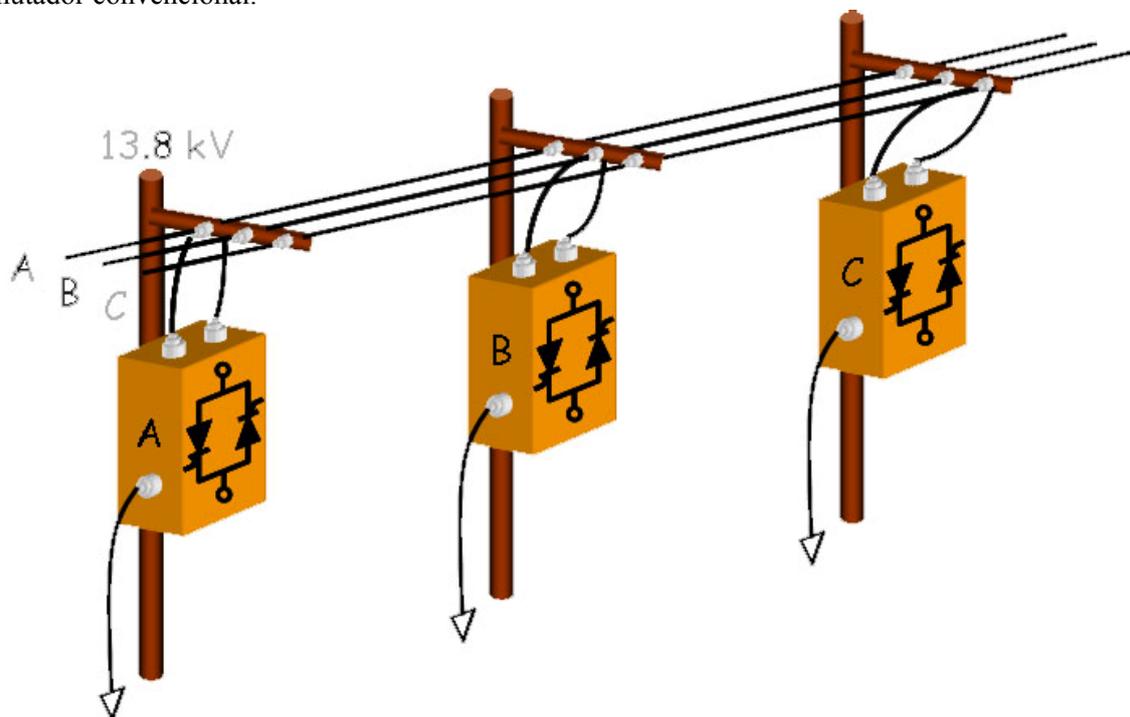


Figura 1 – Conexão do Banco de Reguladores de Tensão.

2.1 Circuito de Potência

A topologia monofásica do comutador eletrônico proposto está apresentada na Figura 2. Cabe ressaltar, que não constam na figura os circuitos snubbers, que são utilizados para proteger os tiristores deste circuito de comutação de variações abruptas de tensão (dv/dt).

O circuito eletromagnético do autotransformador é composto no total por três bobinas distintas. Uma bobina principal, normalmente denominada como bobina de excitação, que é dimensionada para suportar a tensão nominal da carga, e duas bobinas de taps, que serão utilizadas pelo circuito comutador.

As bobinas de taps possuem 3 (três) derivações, as quais são conectadas os tiristores em anti-paralelo. Devido a essa configuração, cada uma destas bobinas pode ser considerada como uma associação de 2 (duas) bobinas distintas em série, formando no total um conjunto de 4 (quatro) bobinas 1s, 2s, 5s e 12s. Esta configuração possibilita a utilização de no máximo 4 (quatro) bobinas e no mínimo nenhuma delas. Cabe ser salientado que esta topologia não permite que as bobinas de taps conectadas em série sejam utilizadas com as suas polaridades invertidas entre elas, ou seja, as bobinas 1s/2s ou 5s/12s não poderão ser subtraídas entre si, pois tendo em vista que nessa situação as mesmas terão seus terminais externos curto circuitados.

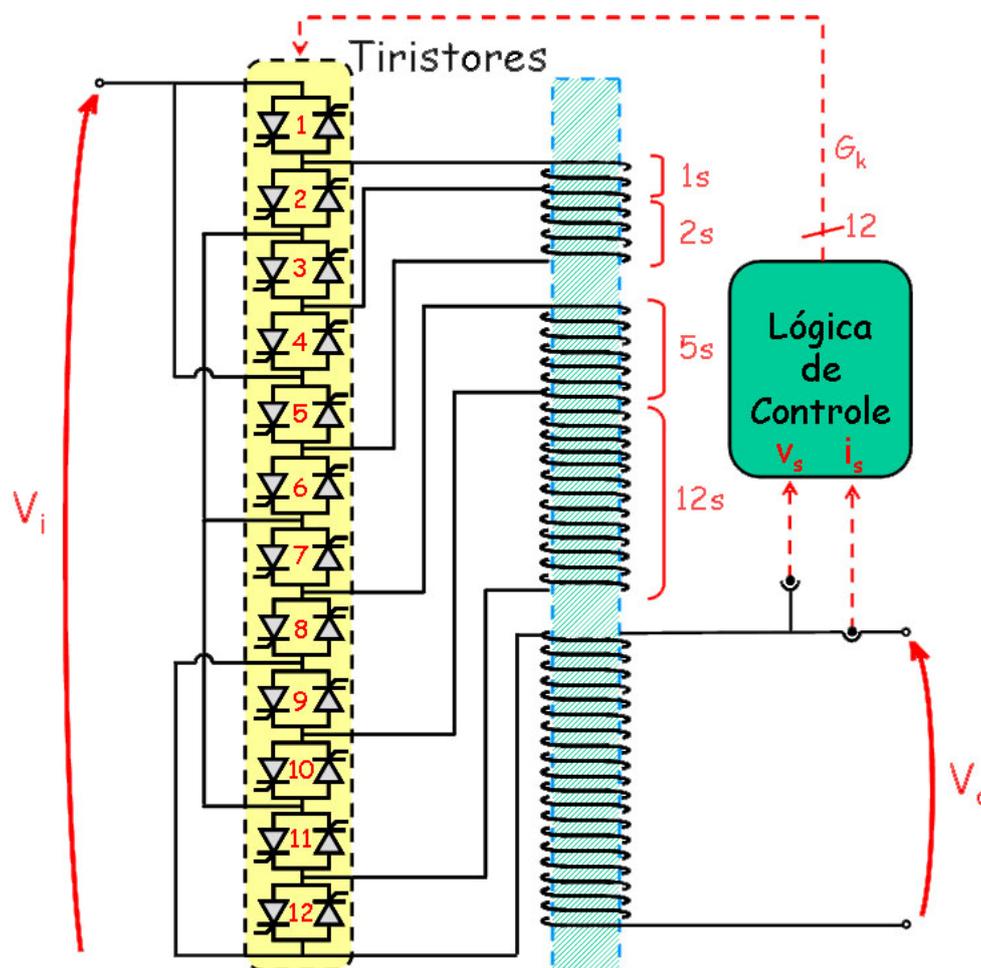


Figura 2 – Topologia monofásica do comutador eletrônico.

As relações das bobinas de taps foram definidas da seguinte forma: 0,625% (1s), 1,25% (2s), 3,125% (5s) e 7,5% (12s). Com este conjunto de bobinas, é possível obter excursões de tensão do ponto mínimo ($\pm 0,625\%$) até o ponto máximo ($\pm 12,5\%$) de compensação, sempre garantindo que as mesmas ocorram em degraus de no máximo 0,625%. Por exemplo, uma compensação de +10% é obtida pela combinação das bobinas 5s e 12s em sentido positivo (+10,625%) com a bobina 1s em sentido negativo (-0,625%), através do disparo dos tiristores das células 2, 4, 7 e 12.

2.2 Lógica de Controle

A estratégia de controle do RECET é baseada apenas duas medições, tensão e corrente de saída do autotransformador, que são obtidas internamente a estrutura do regulador, conforme mostrado na Figura 2. Cada unidade monofásica do RECET (veja Figura 1) apresenta um algoritmo de controle independente. Devido a esta característica, o banco trifásico de reguladores de tensão tem a capacidade de regular os desequilíbrios de tensão, aplicando em cada fase uma compensação diferente, quando necessária, equilibrando as tensões de saída. A Figura 3 apresenta o diagrama de blocos da lógica de controle para uma das estruturas monofásicas que compõe o banco de reguladores de tensão.

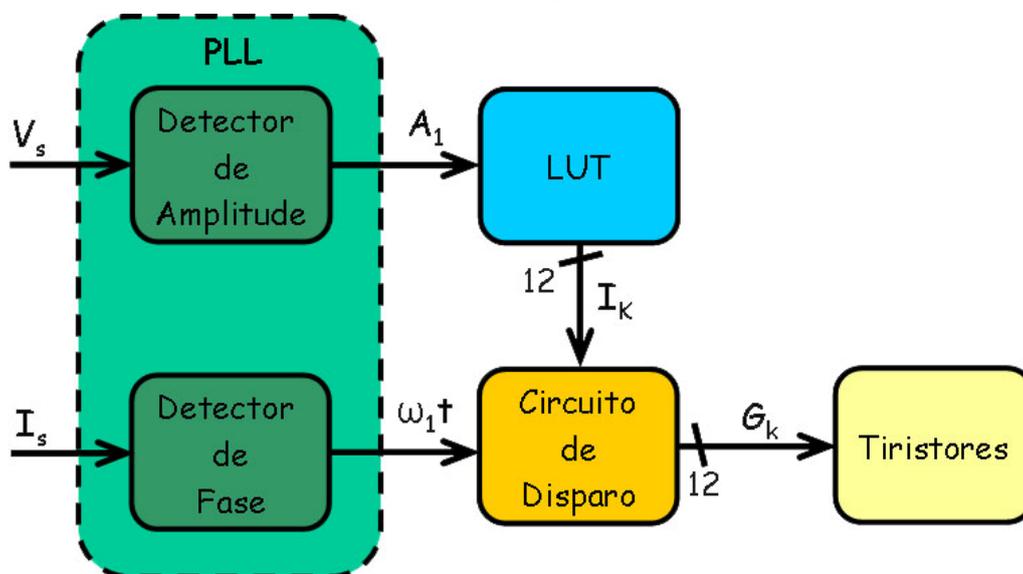


Figura 3: Lógica de controle monofásica do RECET.

Com o uso de um circuito de sincronismo (PLL – Phase Locked Loop)¹⁰⁻¹¹, as informações da componente fundamental da tensão monofásica (A_1) e do ângulo de fase da corrente ($\omega_1 t$) são calculadas a partir da tensão (V_s) e da corrente (I_s) medida, respectivamente. O valor calculado da componente fundamental da tensão monofásica é comparado com uma tabela pré-determinada de referência (LUT – Look Up Table), que determinará o grupo de 4 (quatro) células mais adequado (I_k), entre as 12 (doze) células possíveis, que deverá conduzir, durante o próximo semi-ciclo de onda, para garantir a melhor regulação da tensão na respectiva fase. O ângulo de fase da corrente, juntamente com a informação do grupo de células definido, são utilizados pelo circuito de disparo para acionar os tiristores do circuito de potência (G_k). Embora os controles sejam realizados de forma independente, a compensação das três fases é realizada com a mesma tabela pré-determinada.

A partir das medições das tensões e correntes trifásicas do sistema, é possível identificar o sentido do fluxo de energia. Esta informação é válida, pois cabe ao RECET a regulação da tensão de carga, que dependendo do fluxo de energia pode ser ajustante (V_i) ou a montante (V_o) ao regulador, conforme mostrado na Figura 2. Caso haja uma manobra no sistema, que resulte na mudança do fluxo de energia, uma manipulação é realizada na LUT capaz de mudar o ponto de tensão a ser regulado (V_o para V_i ou vice-versa).

3. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Foram realizadas duas simulações distintas para analisar o desempenho do banco de Reguladores de Tensão com Comutadores Eletrônicos de Taps. A primeira simulação foi direcionada para avaliar a resposta do banco de reguladores frente a situações normais de operação (rede simplificada). Na segunda simulação o banco de reguladores de tensão foi avaliado frente a distúrbios de tensão, causadas por curtos circuitos, em um sistema base simplificado de um alimentador da rede de distribuição da Bandeirante Energias do Brasil (caso base).

3.1 Simulação da Rede Simplificada

O objetivo desta simulação é de observar a resposta do RECET frente a diversas situações de operacionais, tais como, variações de tensão da fonte, desequilíbrios de tensão e corrente, inversão do fluxo de energia e o uso de cargas não lineares no sistema de distribuição. A Figura 4 ilustra o sistema simplificado simulado.

O sistema foi simulado durante 2,0 segundos. Inicialmente o banco de reguladores de tensão está desligado, ou seja, com nível de compensação zero, e o disjuntor D_1 fechado enquanto os disjuntores D_2 , D_3 e D_4 estão abertos. Com esta configuração, o fluxo de energia é oriundo da fonte SE-1 em direção a carga linear equilibrada conectada na barra V_{C1} (fluxo a). O banco de reguladores é ligado em 0,2 segundo, e em seguida, em 0,5 segundo, o disjuntor D_3 é fechado, inserindo uma carga não-linear com uma distorção harmônica total de aproximadamente 10% na barra V_{C1} . Depois de 1,0 segundo de simulação, o disjuntor D_1 é aberto e o disjuntor D_2 é fechado, invertendo então o fluxo de energia no RECET, que agora terá origem na fonte SE-2 em direção a carga linear equilibrada conectada na barra V_{C2} (fluxo b). Em 1,5 segundos o disjuntor D_4 é fechado, inserindo uma carga linear desequilibrada na barra V_{C2} .

Durante os 2,0 segundos de simulação as amplitudes das fontes SE-1 e SE-2 são alteradas, aleatoriamente em cada fase, no intuito de simular distúrbios de tensão no sistema.

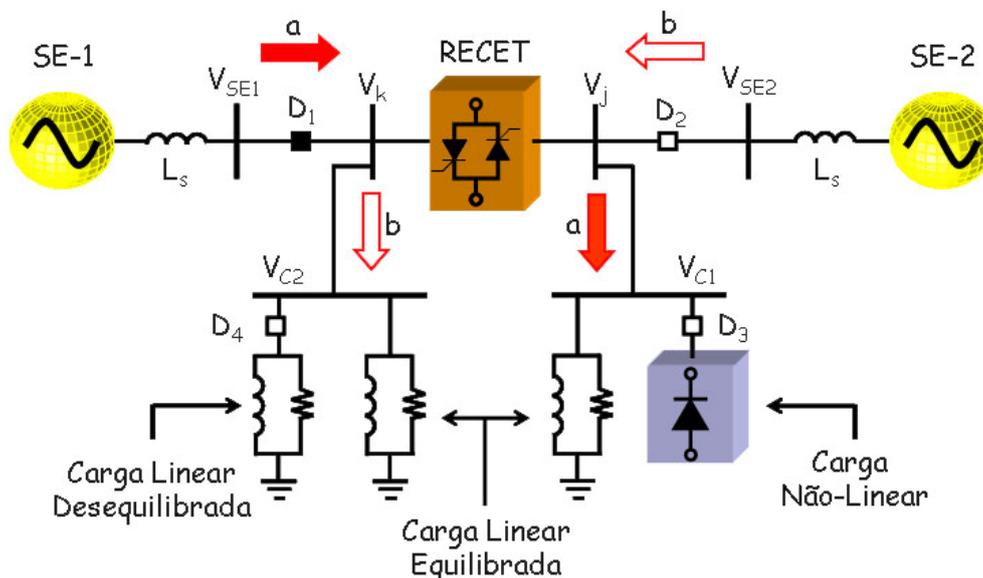


Figura 4: Diagrama unifilar do sistema simplificado.

A Figura 5 mostra a resposta do banco trifásico de reguladores, frente às condições descritas. Durante o primeiro segundo de simulação (1,0 segundo) o RECET regula a tensão na barra V_j , mesmo diante da inserção da carga harmônica. Após 1,0 segundo de simulação, devido à inversão do fluxo de energia, o RECET regula a tensão da barra V_k , mesmo com a presença da carga desbalanceada. Entre 1,4 e 1,8 segundos, a tensão na fase C sofre um afundamento de 18% ($A_{18\%}$), superior ao limite de 12,5% de compensação do RECET. Nessa situação o regulador ainda atuará, porém não será capaz de regular a tensão no seu nível nominal.

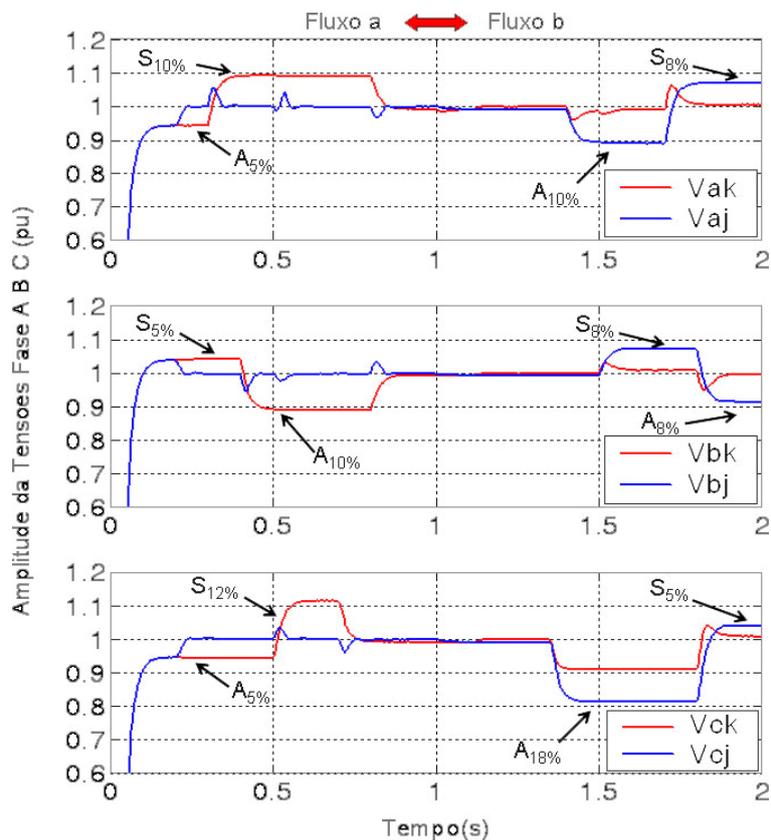


Figura 5: Tensões reguladas nas barras V_j (a) e V_k (b).

A variação dos Taps, em cada fase, é apresentada na Figura 6. Durante o primeiro segundo (1,0 segundo) o cálculo do nível de compensação é definido em função da tensão da barra V_k . Após a inversão do fluxo, a escolha do nível de compensação fica em função da tensão na barra V_j .

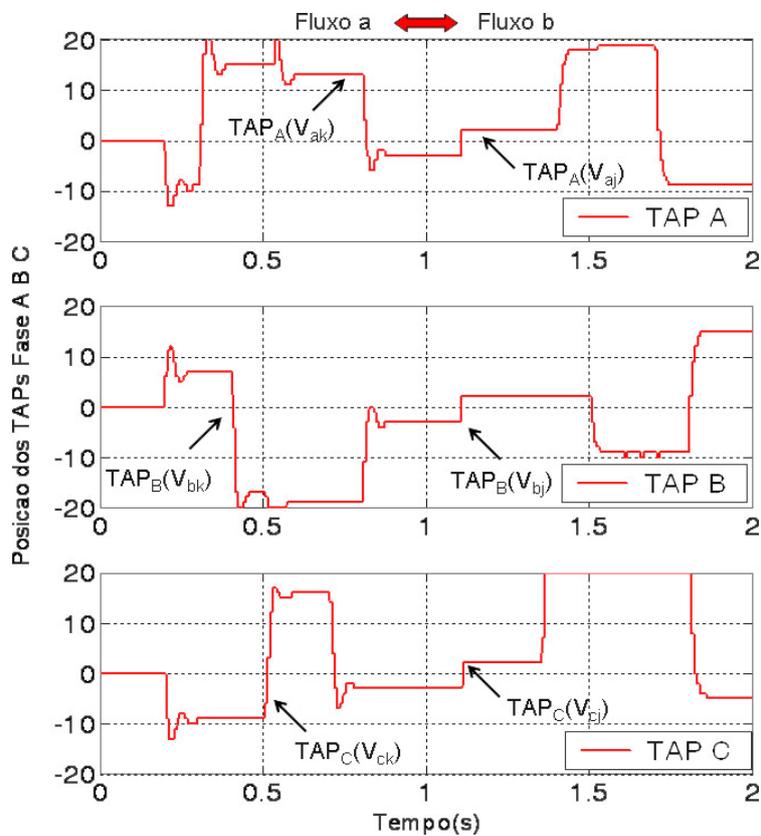


Figura 6: Variação dos taps do RECET.

3.2 Simulação do Caso Base

Um alimentador da rede de distribuição da Bandeirante Energias do Brasil foi modelado com o intuito de observar a resposta do RECET frente a um caso real de operação. O diagrama unifilar do caso base modelado pode ser observado na Figura 7. O diagrama possibilita uma visão geral do sistema representativo considerado onde a potência de curto trifásica na subestação SE é de 129 MVA.

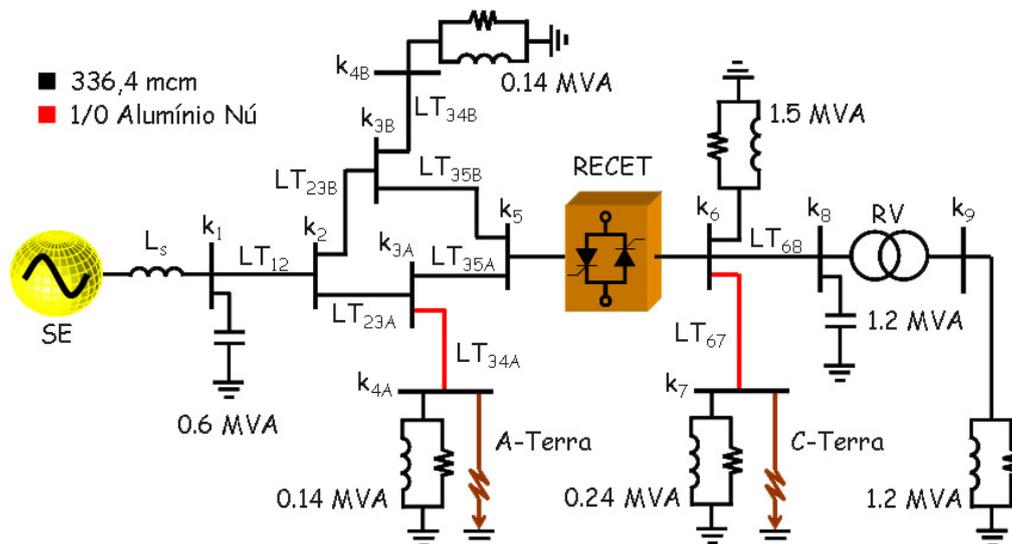


Figura 7: Diagrama unifilar do sistema básico modelado.

O caso analisado considera a conexão de um banco trifásico de Reguladores de Tensão com Comutadores Eletrônicos de Taps em um alimentador de 13.8 kV. Nesta situação, além da regulação em regime permanente da tensão, foram consideradas a ocorrência de faltas monofásicas que acarretaram o surgimento de VTCDs.

No circuito digital desenvolvido, o alimentador foi baseado no modelo de torre (modelo de fase dependente da frequência), ou seja, levando em consideração os detalhes geométricos dos cabos e postes da rede de distribuição. Nesta análise, foi adotada a condição de carregamento médio no alimentador, sendo que as cargas foram modeladas pelo critério de impedâncias constantes e com o fator de potência de 0.9 indutivo. Foram aplicadas faltas monofásicas em jusante e a montante do ponto de instalação do banco de reguladores de tensão em instantes distintos, o que possibilitou verificar a regulação de tensão frente à VTCDs.

O tempo total de simulação foi de 2,0 segundos. O banco de reguladores de tensão foi ligado em 0,2 segundo. Em 0,5 segundo, uma falta na fase A foi aplicada na barra k_{4A} e foi extinta 150ms depois (0,65 segundo). Posteriormente, em 1,0 segundo, uma falta na fase C foi aplicada na barra k_7 e foi extinta 250ms depois (1,25 segundos), conforme apresentado na Figura 7. Vale a pena ressaltar que, devido ao fluxo de energia ser oriundo da subestação SE em direção a barra k_9 , o RECET irá sempre regular a barra k_6 .

A Figura 8 mostra as tensões nas barras k_5 e k_6 . Pode ser observado que as tensões na barra k_6 são reguladas para o seu valor nominal em regime permanente. Durante as faltas as tensões nas fases sem defeito são reguladas nominalmente, enquanto as tensões nas fases defeituosas são reguladas, porém não nominalmente. Isto ocorre devido à intensidade do afundamento que é superior à capacidade de regulação do RECET.

A Figura 9 apresenta a resposta instantânea do banco de reguladores de tensão. O intervalo de 0,45 até 0,65 segundo foi escolhido para ilustrar o tempo de resposta necessário pelo banco de reguladores para regular a tensão na barra k_6 durante a falta na fase A. Devido à entrada do curto-circuito em 0,5 segundo, as tensões V_{ak5} , V_{bk5} e V_{ck5} sofrem perturbações diferentes. Enquanto V_{ak5} sofre um afundamento causado pela corrente de curto, as tensões V_{bk5} e V_{ck5} sofrem, respectivamente, uma

sobretensão e um afundamento. Essa variação de tensão é detectada pelo RECET, que precisa de aproximadamente apenas em 50ms para regular as tensões V_{ak6} , V_{bk6} e V_{ck6} . Cabe ressaltar que a tensão V_{ak6} não é regulada nominalmente, conforme mostrado na Figura 8, devido à intensidade do afundamento. As correntes i_a , i_b e i_c mostram que a continuidade da alimentação não é interrompida mesmo durante a troca de níveis do regulador.

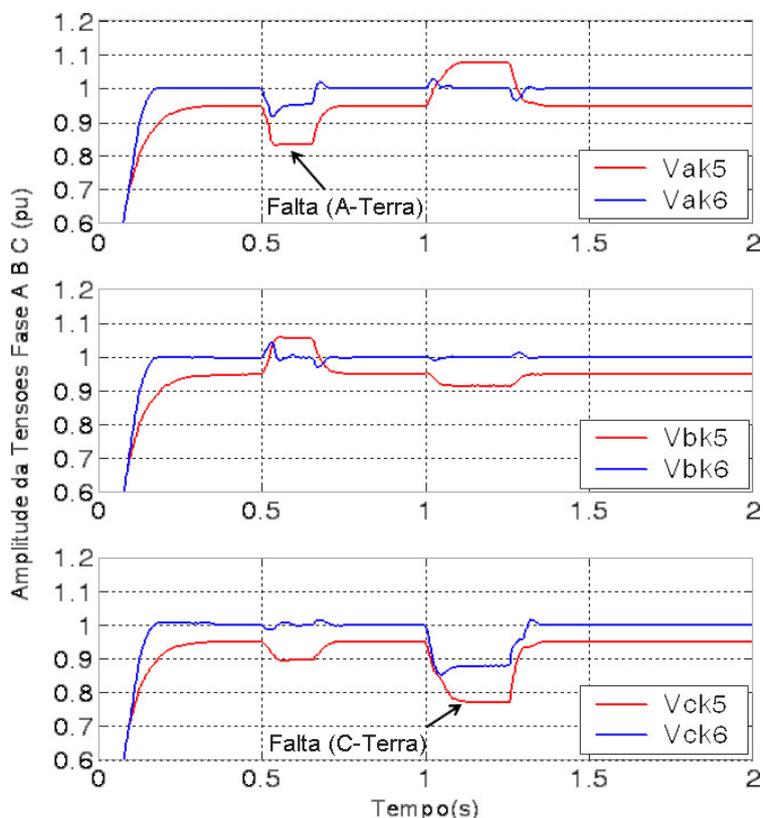


Figura 8: Tensões reguladas na barra V_{k6} .

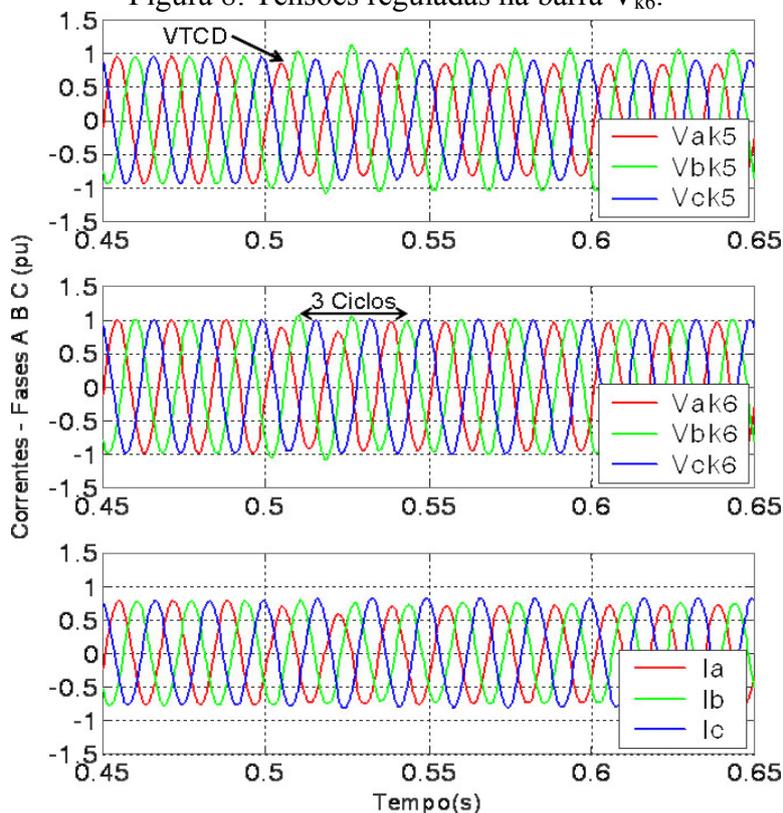


Figura 9: Tensões e correntes instantâneas nas barras K_5 e K_6 .

4. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou uma tecnologia baseada em eletrônica de potência como alternativa aos comutadores eletromecânicos de taps, que são utilizados nos reguladores de tensão monofásicos para sistemas de distribuição. O estudo realizado mostrou que a operação dos Reguladores de Tensão com Comutador Eletrônico de Taps possibilitou uma redução significativa no tempo de regulação da tensão, o que reflete diretamente em uma melhoria na qualidade da energia fornecida principalmente devido a capacidade de compensação de VTCDs.

Foram apresentados os aspectos gerais a respeito da topologia concebida e os detalhes para a conexão num sistema de média tensão do Regulador de Tensão com Comutadores Eletrônicos de Taps, bem como a lógica de controle do banco trifásico destes reguladores. Pode ser comprovada por intermédio dos resultados obtidos em simulações a flexibilidade operacional do banco de reguladores de tensão, bem como o seu desempenho satisfatório na regulação da tensão mesmo diante de VTCDs. Salienta-se que esta nova tecnologia está sendo transferida para o desenvolvimento e implementação de um protótipo cabeça de série do RECET em parceria com empresas nacionais. Sendo assim, pretende-se em um curto espaço de tempo a realização de testes em um “protótipo cabeça de série” a ser aplicado em um sistema de distribuição.

5. REFERÊNCIAS

- 1 ANEEL, “Resolução nº 505”, novembro de 2001, <http://www.aneel.gov.br/cedoc/res20011505.pdf>.
- 2 LESZCZYNSKI, J. T. Voltage Regulation Selection in Power Distribution Design. Textile Industry Technical Conference, IEEE/1998, Greenville, USA, 1998, pp. 10/1-10/6.
- 3 LARSSON, T. & INNANEN, R. & NORSTRÖM, G. Static Electronic Tap-Changer for Fast Phase Voltage Control. IEEE Electric Machines and Drives Conference Record, Milwaukee, USA, 1997, pp. TC3.4-1-TC3.4-3.
- 4 DEGENEFF, R. C. A New Concept for a Solid-State On-Load Tap Changers. 14th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution - IEE CIRED 97, Conference Publication No. 438, Birmingham, UK, 1997, pp. 7/1-7/4.
- 5 DEMIRCI, O. & TORREY, D. A. & DEGENEFF, R. C. & SCHAEFFER, F. K. & FRAZER, R. H. A New Approach to Solid-State On Load Tap Changing Transformers. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, No. 3, July 1998, pp. 952-961.
- 6 FAIZ, J. & SIAHKOLAH, B. New Solid-State Onload Tap-Changers Topology for Distribution Transformers. IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 18, No. 1, January 2003, pp. 136-141.
- 7 JIANG, H. SHUTTLEWORTH, R. AL ZAHAWI B. A. T. TIAN, X. and POWER, A. Fast Response GTO Assisted Novel Tap Changer. IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 16, No. 1, January 2001.
- 8 TOH, C. W. & LOCK, C. S. & CHEN S. & CHOI, S. S. A Voltage Quality Improvement Solution Using Step Dynamic Voltage Regulator. Proceedings of International Conference on Power System Technology IEEE Powercon 2000, Vol. 2, Perth, Australia, December 2000, pp. 983-988.
- 9 BAUER, P., & HAAN, W. H. New Concept for Voltage Regulation. Proceedings of International on Power Electronic Drives and Energy Systems for Industrial Growth, Vol. 2, 1998, PP. 918-923.
- 10 KARIMI, G. & IRAVANI, M. R. A New Phase-Locked Loop (PLL) System. Proceedings of the 44th IEEE-2001 Midwest Symposium Circuits and Systems – MWCAS 2001, Vol.1, 2001, pp. 421-424.
- 11 KARIMI, G. & IRAVANI, M. R. A Nonlinear Adaptive Filter On-Line Signal Analysis in Power Systems :Applications. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 17, No. 2, April 2002, pp. 617-622.