



**XXI SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0
23 a 26 de Outubro de 2011
Florianópolis - SC

GRUPO – X

GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GDS

SISTEMA DE PROTEÇÃO DAS CHAVES ESTÁTICAS DE REGULADORES DE TENSÃO COM COMUTAÇÃO ELETRÔNICA DE TAPS CONTRA SOBRETENSÕES TRANSITÓRIAS

André Roger Rodrigues(*)
**IFMG – INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO,
CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS –
CAMPUS FORMIGA**

Marcelo Lynce Ribeiro Chaves
UFU – UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

RESUMO

Este trabalho apresenta um sistema de proteção das chaves estáticas de um regulador de tensão com comutação eletrônica de taps, contra sobretensões originadas tanto por surtos de manobra quanto por descargas atmosféricas. O sistema é baseado na instalação de pára-raios em paralelo com o barramento de chaves, e também em paralelo com a bobina de excitação do regulador de tensão. Todo o sistema elétrico estudado neste trabalho foi modelado utilizando-se o programa ATP.

PALAVRAS-CHAVE

Regulador de Tensão, Comutação Eletrônica de Taps sob Carga, Proteção das Chaves Estáticas, Sobretensões Transitórias, ATP - Alternative Transients Program.

1.0 - INTRODUÇÃO

A operação interligada de grandes sistemas elétricos e o rápido crescimento do setor elétrico, com a presença cada vez maior de cargas sensíveis aos distúrbios da tensão, exigiram a adequação da legislação vigente às necessidades dos consumidores, por exemplo, de terem garantido a manutenção de níveis de tensão constantes ao longo dos alimentadores das redes de distribuição de energia elétrica. O regulador de tensão tem sido um dos equipamentos mais utilizados no sentido de corrigir ou limitar as variações de tensão de curta duração (VTCD) nas redes de distribuição, sejam estas rurais ou urbanas. Sob este aspecto, verifica-se que os reguladores de tensão com comutação mecânica de taps, apresentam um tempo de resposta relativamente alto para atender determinadas exigências de VTCD's. Então, uma alternativa é utilizar os reguladores de tensão com comutação eletrônica de taps. Com essa ótica, justifica-se a necessidade de utilizar uma ferramenta computacional que seja capaz de reproduzir com a maior fidelidade possível a operação de um regulador de tensão tanto em regime permanente, quanto em regime transitório, permitindo a análise do desempenho do equipamento frente aos distúrbios elétricos.

Como os equipamentos de um sistema elétrico qualquer podem ser submetidos à sobretensões provocadas por descargas atmosféricas ou manobras do sistema, é fundamental a instalação de dispositivos de proteção para evitar danos e aumentar a confiabilidade. Os reguladores de tensão com comutação eletrônica de taps devem utilizar sistemas de proteção contra sobretensões transitórias originadas pela operação de comutação sob carga ou por incidência de descargas atmosféricas, tendo-se em vista o limite de suportabilidade elétrica intrínseco das chaves estáticas. Tal necessidade motivou este trabalho que consiste no desenvolvimento de um modelo de um sistema de proteção para reguladores de tensão com comutação eletrônica sob carga implementado no programa ATP ("Alternative Transients Program")(1). Nesse sentido a instalação de pára-raios é uma estratégia que se mostrou adequada para prover a proteção das chaves e limitar os níveis de sobretensões transitórias.

(*) Rua Marechal Deodoro, n° 986 – Apto. 201– CEP 35.570-000, Formiga, MG, – Brasil
Tel: (+55 37) 9129-9572 – Fax: (+55 37) 3322-2330 – Email: andre.roger@ifmg.edu.br

2.0 - O REGULADOR DE TENSÃO COM COMUTAÇÃO ELETRÔNICA DE TAPS

Com o intuito de fundamentar o estudo de proteção das chaves estáticas do regulador de tensão analisado neste trabalho, faz-se necessário descrever, mesmo que de forma sucinta, a operação do sistema de controle da comutação eletrônica de tap. Toda a lógica do controle da comutação de tap foi implementada empregando-se os dispositivos de controle disponíveis na TACS (Transient Analysis of Control System)(2) do programa ATP.

Basicamente, esse sistema de controle monitora constantemente o nível de tensão na carga e após ser detectado um desvio de tensão em relação ao seu valor nominal, quer seja elevação quer seja redução, o sistema de controle comanda o bloqueio da chave que está em condução, determina qual é o novo tap que deve ser acionado, e comanda o disparo da chave ligada a este tap, a fim de restabelecer a tensão da carga ao seu valor nominal ou próximo a este. Tal sistema foi implementado considerando o tempo de resposta do regulador de 3 ciclos, corrigindo a tensão da carga para o valor mais próximo do seu valor nominal, em conformidade com os níveis de tensão estabelecidos em (3), e com o acionamento do menor número de taps intermediários, evitando dessa forma, o desgaste excessivo do equipamento (contatos, terminais, chaves estáticas, etc.). O acionamento de taps intermediários até que a tensão na carga seja restabelecida, está associado ao tempo de atuação do controle de comutação e a constante de tempo do transitório eletromagnético que originou o desvio da tensão da carga do seu valor nominal.

O arranjo magnético do regulador de tensão implementado no programa ATP para a realização deste estudo é de um regulador do tipo A (4) com 9 degraus para ajuste da tensão na carga (6 degraus de elevação e 2 degraus de redução), com tensão na bobina de excitação igual a 7,967 (kV), corrente nominal de 100 (A) e faixa de regulação de tensão na carga de 10% para redução e 30% para elevação da tensão, conforme representação na Figura 1. A bobina de taps possui 9 derivações com tensão igual a 5% do valor nominal de tensão da bobina de excitação, cada uma delas. A bobina de taps foi dimensionada de forma a compensar a variação de tensão na bobina de excitação. Como pode ser observado na Figura 2, este modelo de regulador possui nove chaves estáticas sendo que apenas uma está em condução a cada instante. A modelagem eletromagnética do regulador de tensão utilizado neste trabalho foi desenvolvida com a utilização do programa ATP e está apresentada em detalhes em (5). Para a análise das sobretensões transitórias foram implementadas capacitâncias de fuga dos enrolamentos, estimadas com base em valores típicos(6).

3.0 - PROTEÇÃO CONTRA SOBRETENSÕES ORIGINADAS POR MANOBRAS

Durante a comutação de taps nos reguladores automáticos, as chaves estáticas ficam sujeitas a grandes solicitações de tensão. Essas sobretensões ocorrem devido aos transitórios eletromagnéticos associados à condição de condução ou bloqueio das chaves estáticas ligadas aos taps. A amplitude das sobretensões nas chaves é dependente do arranjo e do tipo de carga alimentada pelo regulador. Sendo assim, a situação na qual a carga é representada por um único ramo RL, série, submete as chaves a sobretensões mais elevadas e impondo um maior limite de suportabilidade de tensão, em outras palavras, onerando o custo do equipamento (7). Essa condição de operação é mais rigorosa e, portanto, em todos os casos aqui estudados, o regulador de tensão alimenta uma carga de 100 A, representada por um único ramo RL série, com fator de potência 0,707.

3.1 Operação do Regulador de Tensão Automático com Comutação Eletrônica de Taps

Para nortear os estudos de proteção das chaves estáticas do regulador de tensão, realizou-se a simulação de operação do regulador ligado a um sistema elétrico. Primeiramente considerou-se o caso de operação do regulador sem o pára-raios, como mostrado na Figura 1, a fim de verificar os níveis de sobretensões aos quais as chaves são submetidas. Posteriormente, apresentam-se os resultados da operação do regulador com o pára-raios de proteção contra sobretensões de manobra, com a finalidade de comprovar a eficiência deste sistema de proteção. Nessa figura os taps 1A e 2A representam redução de tensão e os taps 1E, 2E, 3E, 4E, 5E e 6E representam elevação de tensão. A operação do regulador no caso simulado é descrita a seguir:

- Inicialmente, o regulador encontra-se alimentando a carga através do tap 00 sendo a fonte de alimentação é submetida a uma sobretensão de 10%(1,1 x 7.97 kV = 8,767kV). Essa situação impõe ao controle automático, a decisão de comandar a comutação para o tap 2A, a qual será realizada comutando primeiro para o tap 1A e em seguida para o tap 2A;
- No instante de tempo $t = 100$ ms, duas cargas com potência aparente igual a 4,64 MVA, cada uma, são ligadas à barra de alimentação do regulador de tensão, provocando uma redução na tensão da fonte para 70% da tensão nominal do regulador, ($0,7 \times 7,97 \text{ kV} = 5,579 \text{ kV}$) de maneira que o controle automático determina a comutação de taps do regulador que é feita da seguinte forma: a primeira comutação ocorre do tap 2A para o tap 2E; a segunda comutação ocorre do tap 2E para o tap 4E, um ciclo depois da primeira; a terceira comutação dá-se do tap 4E para o tap 5E no ciclo seguinte à segunda; e por último, o controle determina a quarta comutação que ocorre do tap 5E para o tap 6E, igualmente um ciclo após a terceira comutação. Essas quatro comutações ocorrem sucessivamente. Observa-se que essa situação de várias comutações sucessivas foi obtida impondo ao sistema de controle de comutação, maior rapidez de resposta à variação de tensão na carga, de forma que antes mesmo da tensão na carga atingir o valor final (5,58 kV), o controle já está operando no sentido de compensar a variação de tensão. Essa situação não é interessante quando se analisa os efeitos transitórios da comutação na tensão de carga, e muito provavelmente, deverá ser evitada. Contudo, para a análise da quantidade de energia que será

dissipada nos para-raios do sistema de proteção, ela se torna importante e deve ser considerada.

- No instante de tempo $t = 250$ ms, uma das cargas responsáveis pelo afundamento de tensão é desligada do sistema provocando a elevação da tensão na entrada do regulador e a conseqüente comutação do tap 6E para o tap 4E e deste para o tap 3E.

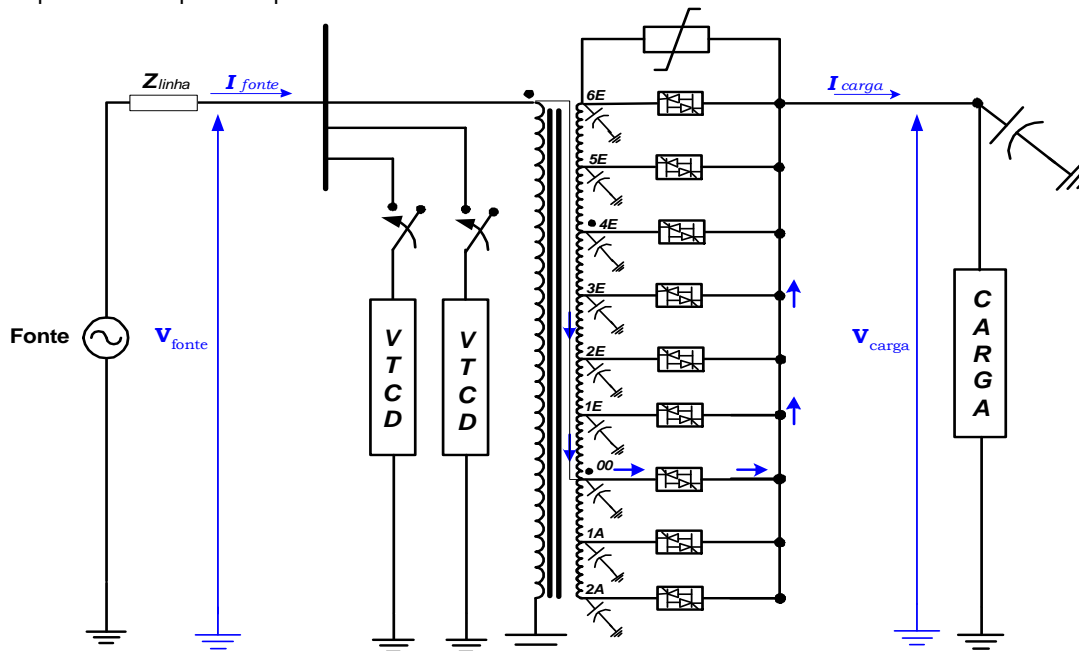


FIGURA 1 – Sistema elétrico considerado para estudos de proteção do regulador de tensão contra sobretensões originadas por manobra.

3.1.1 Operação do Regulador de Tensão sem Pára-raios de Proteção contra Sobretensões de Manobra

A seguir, são apresentados os resultados de simulação da operação do regulador de tensão no sistema elétrico de acordo com as características descritas no item 3.1, sem a instalação do pára-raios. Na Figura 2 – (a) é apresentada a forma de onda da tensão na bobina de excitação do regulador, notando-se que a sua operação está consoante com o roteiro descrito no item 3.1. O valor eficaz da tensão na carga é mostrado na Figura 2 – (b), onde percebe-se que a atuação do controle eletrônico de comutação regula a tensão na carga. Os afundamentos bruscos do valor eficaz da tensão referem-se aos instantes em que as chaves interrompem a corrente na carga. Observa-se que se bancos de capacitores e/ou cargas motrizes fossem considerados esses afundamentos seriam atenuados.

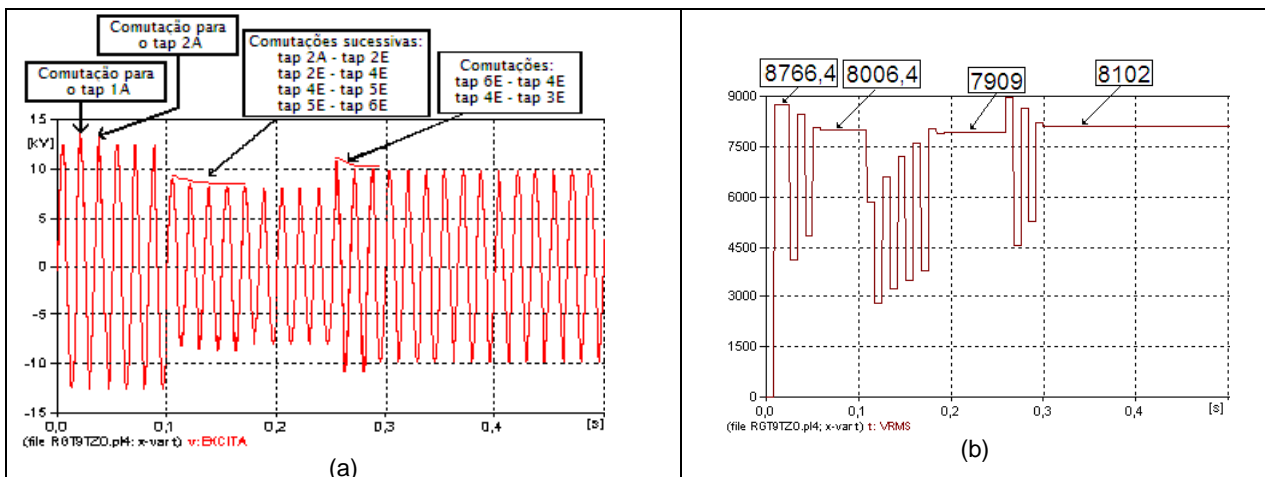


FIGURA 2 – (a) Forma de onda da tensão na bobina de excitação do regulador. (b) Valor eficaz da tensão na carga.

Os resultados dessa simulação mostraram que a chave do tap 6E fica submetida à maior solicitação de tensão quando ocorre uma comutação de taps, independente do arranjo e do fator de potência da carga ligada ao regulador. As sobretensões impostas a chave do tap 6E são mostradas na Figura 3 – (a). Observa-se que as maiores amplitudes das sobretensões de comutação ocorreram durante as duas primeiras comutações, que estão representadas, em detalhe, na Figura 3 – (b). Durante a segunda comutação, que ocorre do tap 1A para o tap 2A, a

amplitude da tensão na chave atinge valor de crista da ordem de 27 kV.

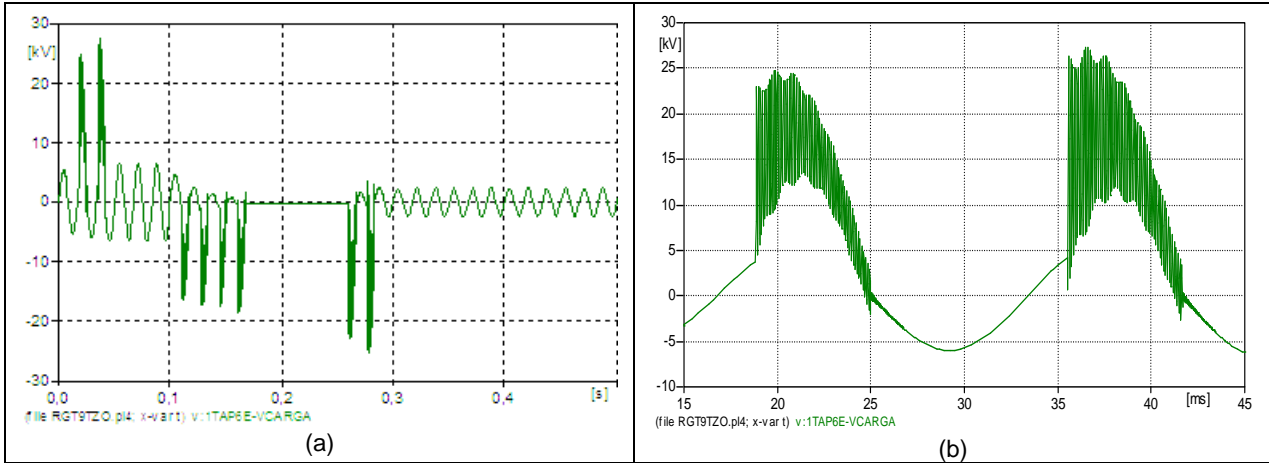


FIGURA 3 – (a) Forma de onda da tensão na chave do tap 6E. (b) Detalhe das sobretensões na 1ª e 2ª comutações.

3.1.2 Seleção do Pára-raios para Proteção das Chaves contra Sobretensões de Manobra

A estratégia adotada para limitar as sobretensões impostas às chaves nos instantes de comutação é a instalação de um para-raios em paralelo com o barramento de chaves, ligado entre os terminais da chave ligada ao tap 6E. Durante a operação de comutação de taps, o para-raios entra em condução, no momento em que a sobretensão ultrapassa o valor de tensão de segurança. Durante o estado de condução de corrente, o para-raios limita a tensão entre seus terminais dentro de valores compatíveis com o nível de suportabilidade das chaves assegurando a sua integridade operacional.

Os para-raios empregados na simulação são do tipo óxido de zinco e que não possuem centelhadores série. O modelo de para-raios está disponível no programa ATP (1), o qual é representado pela característica de tensão versus corrente, determinada na equação 1:

$$i = p \times \left(\frac{V}{V_{ref}} \right)^q \quad (1)$$

Onde:

- i - corrente no pára-raios;
- V - tensão no pára-raios;
- p e q - constantes características do dispositivo;
- V_{ref} - tensão de referência.

A análise da quantidade de energia dissipada no pára-raios, durante os transitórios de comutação, é fortemente dependente do valor da capacitância do barramento de carga. O valor de capacitância do barramento de carga que produz a situação de maior dissipação de energia é de 2,75 μ F, valor esse considerado muito elevado para capacitâncias de fuga dessa classe de tensão, porém que pode ocorrer devido à associação com outras capacitâncias do sistema elétrico do lado de carga. Esse valor de capacitância foi determinado computacionalmente através de simulações de operação do regulador de tensão com o pára-raios, considerando a situação de máxima dissipação de energia no dispositivo pára-raios, e portanto considerada neste estudo.

A escolha da tensão nominal do pára-raios deve ser feita de tal forma que o mesmo não apresente possibilidade de condução de corrente em valores sustentados pela fonte de tensão. Geralmente, a tensão nominal é o limite para as sobretensões dinâmicas permissíveis no sistema (7). No caso do modelo de regulador de tensão em estudo, considerou-se a possibilidade de uma sobretensão na fonte de 10% e também o fato de que o para-raios está ligado entre os terminais da chave 6E, a qual está conectada ao tap de elevação de tensão de 30%, então a tensão do pára-raios deve ser superior a 11,4 kV ($1,1 \times 1,3 \times 7,97$). No instante de abertura de uma chave, admitindo que haja uma sobretensão de 10% (8.767 V) na fonte, sendo a tensão no tap 6E 30% maior do que a tensão de entrada ($1,3 \times 8767 = 11,4$ kV), o para-raios estará então submetido a uma tensão de 27,4 kV de crista [$(11,4 + 7,97) \times \sqrt{2}$] quando se considera a inversão de polaridade da tensão da capacitância do barramento de carga carregada com o valor nominal. Usualmente, adota-se a tensão disruptiva de um para-raios com valor igual a duas vezes a tensão nominal. Analisando as características de 9 kV, 10,5 kV e 12 kV que poderiam atender as necessidades de proteção das chaves. As simulações consideraram a possibilidade de cada um desses três modelos.

Tabela 1 – Especificações dos pára-raios Bowthorpe EMP e determinação das constantes características.

Tensão Nominal [kV]	Máxima tensão residual com forma de onda de corrente			Capacidade de sobretensão Temporária durante 1 s (TOV) kV	Modelo de pára-raios	Parâmetros para representação no ATP		
	Surto de chaveamento		8/20 μ S			V_{ref} [kV]	p	q
	125A kV crista	500A kV crista	5kA kV Crista					
9	19,8	21,5	27,0	10,7	ESRA9	18	125	17,32
10.5	26,4	28,6	36,0	12,4	ESRA10.5	21	16,68	17,10
12	26,4	28,6	36,0	14,2	ESRA12	22	5,32	17,3

3.1.3 Operação do Regulador de Tensão com Pára-raios de Proteção contra Sobretensões de Manobra

Apresenta-se a seguir os resultados de simulação da operação do regulador de tensão no sistema elétrico descrito no item 3.1, com a implementação do pára-raios de 9 kV.

As sobretensões impostas a chave do tap 6E com a proteção por para-raios são mostradas na Figura 4 – (a). Os benefícios da operação do pára-raios são observados principalmente, nas duas primeiras comutações, onde o nível de sobretensão nas chaves é de 16,77 kV, conforme observa-se em detalhe, na Figura 4 – (b).

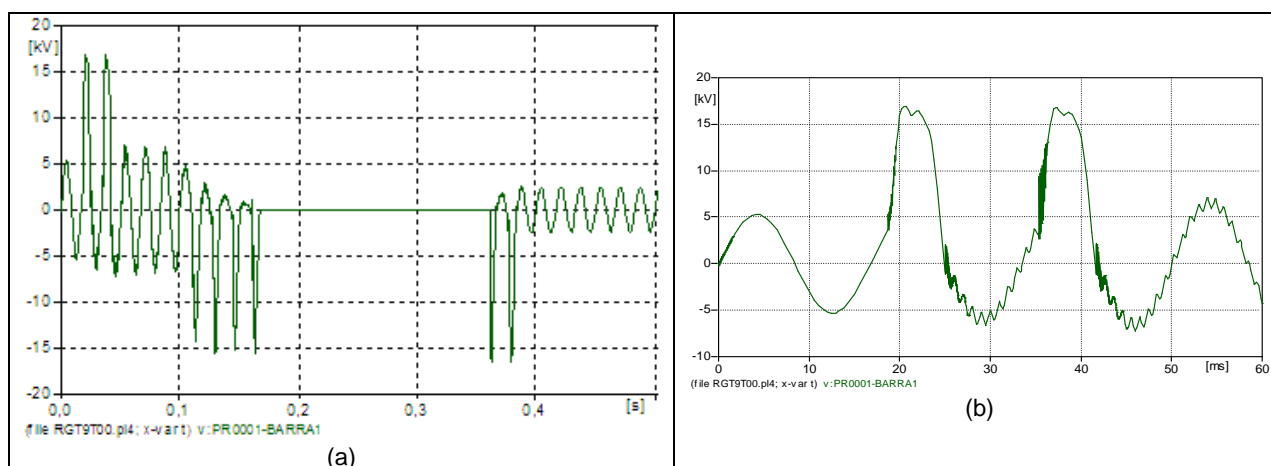
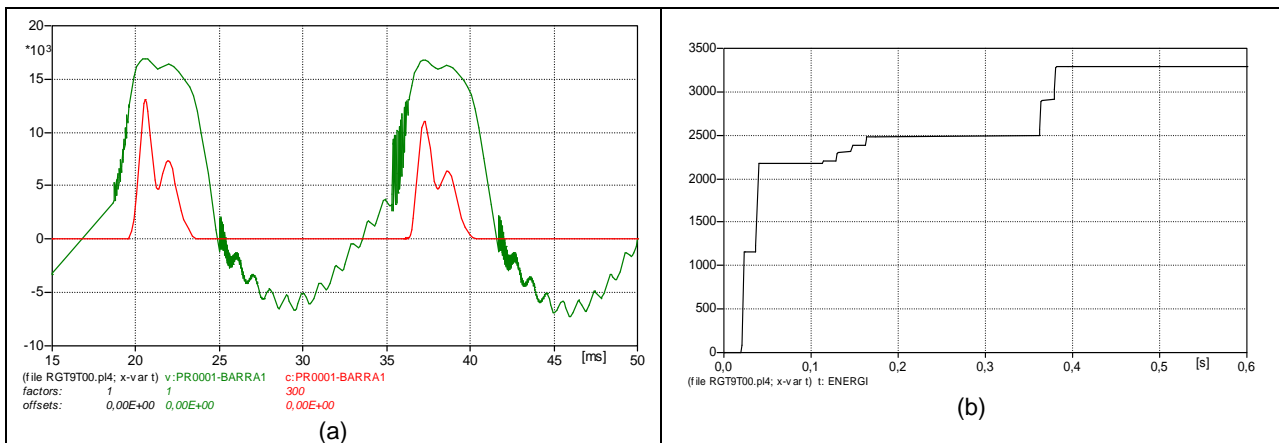


FIGURA 4 – (a) Forma de onda da tensão na chave do tap 6E com pára-raios de proteção . (b) Detalhe das sobretensões na 1ª e 2ª comutações

A análise da Figura 5 – (a) mostra que a tensão disruptiva de impulso de manobra é de 13,1 kV enquanto que a máxima tensão residual que aparece nos terminais do para-raios, tomada em seu valor de crista, é de 16,77 kV. O maior valor de crista da corrente observado no pára-raios de 9 kV é de 43,71 A. Ressalta-se que os valores de corrente apresentados na Figura 5 – (a) estão multiplicados por 300, para uma melhor visualização dessa grandeza mostrada juntamente com a tensão aplicada ao pára-raios. Nessa figura verifica-se que a corrente subsequente é eliminada logo após a tensão cair abaixo da tensão disruptiva (13,1 kV) e se mantém assim com a condução da próxima chave.

A quantidade de energia em Joules dissipada no para-raios de 9 kV, durante todo o tempo de simulação, foi de 3,3 [kJ] conforme apresentado na Figura 5 – (b). A capacidade de dissipação de energia dessa classe de pára-raios, de acordo com as informações do fabricante é de 2,1 kJ/kV, ou seja, sobre a capacidade de dissipação de energia, a instalação do pára-raios de 9 kV é perfeitamente viável.

A Tabela 2 apresenta os resultados dos estudos para os três modelos de pára-raios utilizados. Considerando-se os valores de tensão nominal e tensão disruptiva para os pára-raios de 9 kV, 10,5 e 12 kV, percebemos que a utilização do para-raios de 9 kV necessita de uma proteção by-pass, no momento em que todas as chaves estiverem bloqueadas, uma vez que o valor da sua tensão disruptiva de 13,1 kV é sustentado pela fonte.



Se a utilização do para-raios de 9 kV for descartada, a instalação do para-raios de 12 kV é a mais indicada, uma vez que este possui o maior valor de tensão disruptiva e limita a sobretensão nas chaves a um valor próximo ao modelo com tensão nominal de 10 kV.

Tabela 2 – Características elétricas dos modelos de pára-raios considerados neste estudo.

Tensão nominal (kV)	Tensão Disruptiva (kV)	Tensão Residual (kV)
9	13,10	16,77
10,5	16,38	21,23
12	17,57	21,28

4.0 - PROTEÇÃO CONTRA SOBRETENSÕES ORIGINADAS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Para proteger as chaves estáticas do regulador de tensão contra sobretensões originadas por descargas atmosféricas, apresenta-se o modelo de sistema de proteção mostrado na Figura 6, proposto com base nos resultados deste estudo. Neste sistema elétrico estudado, a proteção das chaves estáticas contra sobretensões atmosféricas é feita através da instalação de um para-raios de 12 kV, em paralelo com a bobina de excitação do regulador e um segundo pára-raios de 9 kV em paralelo com a chave do tap 2A. Um outro pára-raios de 12 kV foi instalado no início da Linha 1 de distribuição, uma vez que é comum a instalação de diversos dispositivos pára-raios ao longo das redes elétricas. O comportamento do pára-raios de 9 kV, instalado para prover proteção contra sobretensões de manobra determinado no item 3.1.3 também será analisado neste estudo. A linha de transmissão foi representada por dois trechos de linha, Linha 1 e Linha 2, com 1 km de comprimento cada uma, modelada com parâmetros distribuídos. A linha possui resistência elétrica de 0,005 Ω /km, indutância igual a 1 mH/km e capacitância igual a 0,01111 μ F/km. Uma descarga de 10 kA com frente de onda de 1,2x50 μ s é aplicada no meio da linha elétrica, para analisar os níveis de sobretensões observados no regulador e nas chaves estáticas.

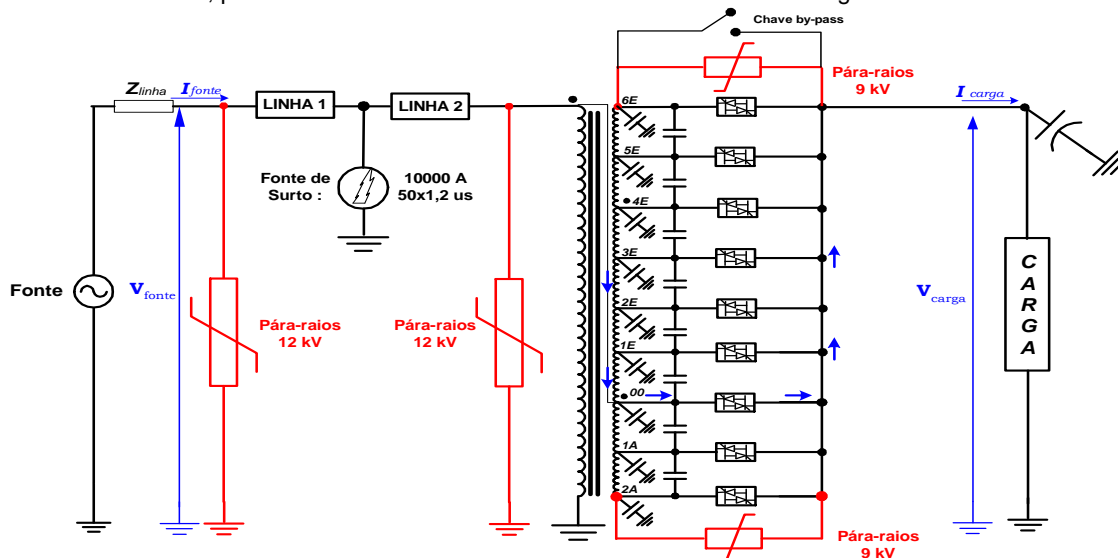


Figura 6: Modelo completo de proteção do regulador de tensão contra sobretensões atmosféricas e de manobra.

Durante a condução do para-raios da entrada do regulador, a tensão na bobina de excitação do regulador é limitada a um valor próximo ao dobro do valor da sua tensão nominal. Uma situação de extrema solicitação de sobretensão nas chaves, consiste naquela em que a descarga ocorre na linha de alimentação do regulador de tensão, no instante de tempo em que todas as chaves de taps estiverem na condição de bloqueio. Por esse motivo, essa situação de operação do regulador foi considerada para os resultados apresentados no item 4.1 a seguir.

4.1 Simulação de Descarga Atmosférica na Rede Elétrica que alimenta o Regulador de Tensão.

A diferença de potencial entre os terminais do para-raios da entrada do regulador é mostrada na Figura 7 – (a). Durante a descarga atmosférica, a máxima tensão residual neste para-raios foi de 33,5 kV. A forma de onda da corrente de descarga conduzida pelo pára-raios é mostrada na Figura 7 – (b), e tem valor de pico igual a 9,9 kA.

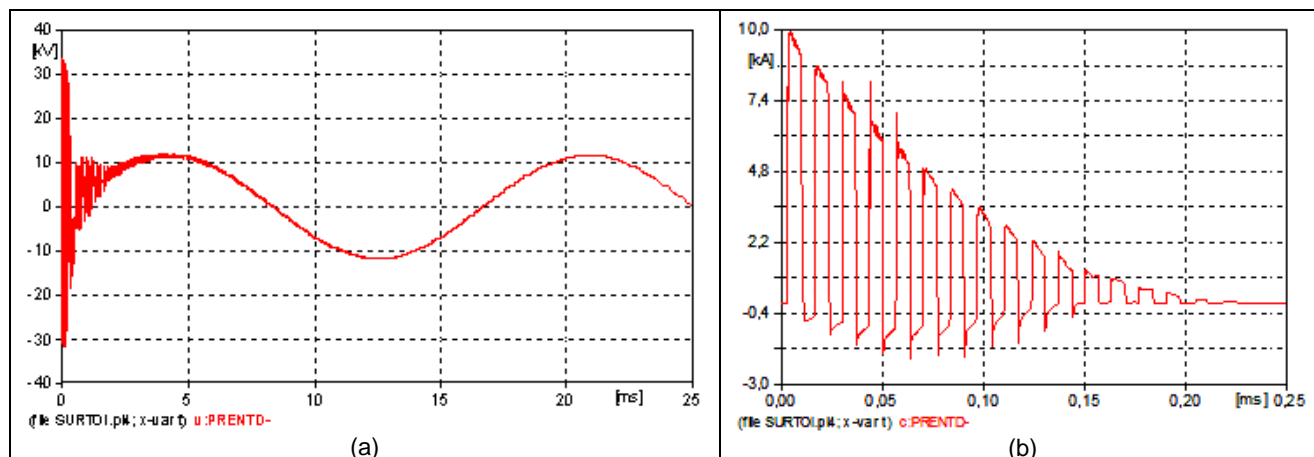


FIGURA 7 – (a) Forma de onda da tensão no pára-raios instalado na entrada do regulador. (b) Corrente de descarga no pára-raios instalado na entrada do regulador.

A quantidade de energia dissipada no para-raios da entrada do regulador é de 13,6 kJ durante um intervalo de tempo de 0,2 ms, ou seja, com uma taxa de 6,8 kJ/ms. Toda a energia da descarga atmosférica foi dissipada num intervalo de tempo de 0,2 ms, instante a partir do qual a corrente de descarga se torna desprezível, conforme observado na Figura 7 – (b).

O sistema de proteção contra sobretensões originadas por descargas atmosféricas é completado com a instalação de um outro para-raios de 9 kV em paralelo com a chave do tap 2A, conforme mostrado na Figura 6. A Figura 8 – (a) mostra que a chave do tap 2A fica submetida a um nível de sobretensão da ordem de 43kV durante a descarga atmosférica. A Figura 8 – (b) mostra que a instalação do pára-raios de 9 kV em paralelo com a chave do tap 2A limita a sobretensão a 25,3 kV.

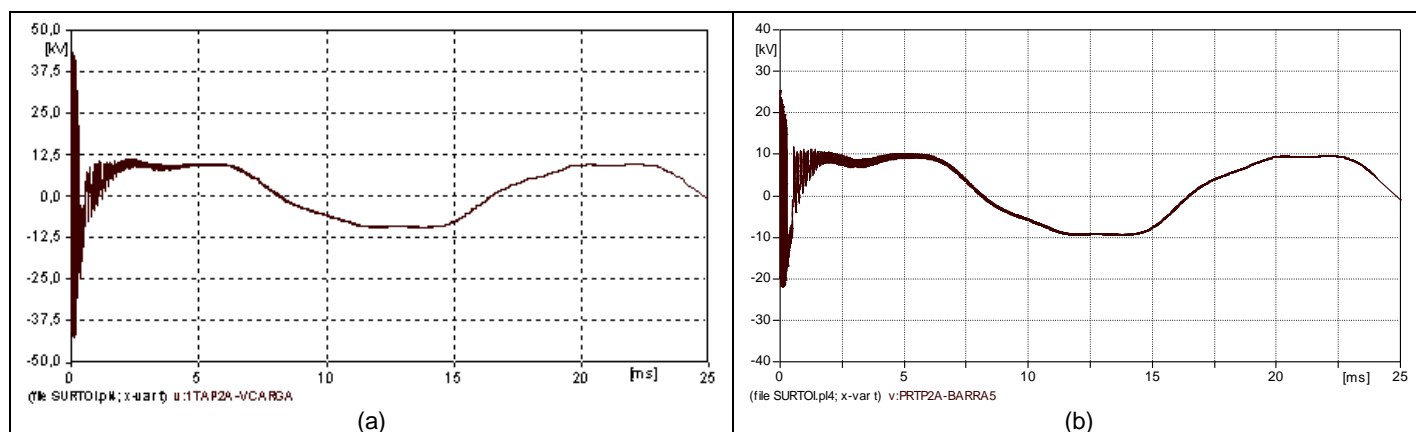


FIGURA 8 – (a) Solicitação de tensão imposta a chave do tap 2A sem pára-raios. (b) Tensão no pára-raios de 9KV do tap 2A.

O pára-raios instalado no tap 2A somente entra em condução em decorrência da descarga atmosférica, ou seja, em operação contínua, estando todas as chaves na condição de bloqueio, este para-raios não fica submetido a valores de tensão maiores que o seu nível de tensão disruptiva, não necessitando de proteção como a chave “by-pass” para a sua operação em regime permanente.

5.0 - CONCLUSÃO

Este trabalho teve como enfoque analisar a situação considerada mais crítica para a operação de chaves estáticas em reguladores de tensão com comutação eletrônica. O modelo empregado não considera o circuito de comutação sob carga, comum nos reguladores convencionais. O controle de comutação de taps utilizou uma lógica para efetivar o processo em 3 ciclos (50 ms), sendo o primeiro ciclo utilizado para o sensor de tensão e os outros dois para a definição de tap e a realização do processo. Essa forma rápida de atuação faz com que o controle atue antes mesmo que o afundamento de tensão alcance o seu valor final. Isto faz com que comutações intermediárias aconteçam acarretando um maior desgaste das chaves estáticas. Então, o sistema de proteção das chaves deve ser rigoroso no sentido de assegurar o seu bom funcionamento.

Os resultados das simulações computacionais de regulação de tensão mostraram que durante a operação de comutação de taps, a chave ligada ao tap 6E está submetida a valores de sobretensão transitória mais elevados. Tais valores indicam que a localização de um pára-raios utilizado para a proteção deve ser em paralelo com essa chave e que o mesmo deve ser selecionado em conformidade com os níveis de sobretensão.

Os resultados computacionais obtidos neste estudo permitem a definição das características elétricas dos pára-raios mais adequados para compor o sistema de proteção bem como o local mais adequado à instalação destes dispositivos. A proteção do regulador de tensão é feita com a instalação de um para-raios na entrada do regulador de tensão enquanto que o sistema de proteção das chaves é composto por um para-raios instalado em paralelo com a chave do tap 6E e outro instalado em paralelo com a chave do tap 2A, conforme apresentado na Figura 6. A implementação do modelo de pára-raios ZnO utilizando valores comerciais extraídos de um catálogo de fabricante e portanto, mostrando a exequibilidade de tal operação, demonstrou que tanto as chaves eletrônicas quanto o próprio regulador de tensão podem ser eficientemente protegidos contra sobretensões.

A proteção de todas as chaves contra sobretensões originadas pela comutação de taps pode ser feita utilizando-se um pára-raios de 9 kV instalado entre os terminais da chave ligada ao tap 6E, uma vez que este é o modelo que mais limita a sobretensão imposta às chaves eletrônicas dos taps dentre os três tipos considerados. Para esse para-raios verifica-se que a taxa de crescimento de energia no para-raios é da ordem de 34 joules/ms. Logo, levando-se em conta a sua capacidade de dissipação energética que é de 2,1 kJ/kV, ou seja, 18,9 kJ, verifica-se que a chave “by-pass” deve operar em torno de 500 ms para garantir a sua integridade.

Se a utilização do pára-raios de 9 kV for descartada, os resultados mostram que entre os dois tipos restantes (10,5 kV e 12 kV) o pára-raios de 12 kV se apresenta como o mais indicado. Essa conclusão baseia-se no fato de que o pára-raios de 12 kV limita a sobretensão de comutação de taps a um valor praticamente igual ao do pára-raios de 10,5 kV e a sua tensão disruptiva é maior que a tensão sustentada pela fonte. Além disso, o pára-raios de 12 kV suporta uma sobretensão temporária de 14,2 kV (rms) por 1 segundo ao passo que o de 9 kV suporta somente 10,7 kV (rms) e, em caso de operação contínua do regulador com 10% de sobretensão na fonte de alimentação, o pára-raios do tap 6E ficará submetido a 11,39 kV ($7,97 \text{ kV} \times 1,1 \times 1,3 = 11,39 \text{ kV}$). A opção por um ou outro pára-raios está vinculada ao limite de suportabilidade de tensão das chaves eletrônicas.

A proteção contra sobretensões originadas por descargas atmosféricas é feita através da instalação de um pára-raios de 12 kV na entrada do regulador, limitando a tensão na bobina de excitação em 33 kV sendo que a quantidade de energia dissipada neste pára-raios foi de 13,6 kJ, o que não coloca em risco a integridade do equipamento visto que o mesmo possui uma capacidade de dissipação energética de 2,1 kJ/kV.

A instalação de pára-raios de 9 kV entre os terminais das chaves dos taps 2A e 6E provê a proteção de todas as chaves dos demais taps contra sobretensões originadas tanto por comutação de taps quanto por descargas atmosféricas. Nesse último caso, o maior valor de sobretensão imposta às chaves é de 25,3 kV. Como foi mostrado anteriormente, o para-raios de 9kV instalado no tap 6E fica submetido a uma situação de condução contínua porque o valor de crista da tensão no tap é maior que a sua tensão disruptiva. Para esse para-raios verifica-se que a taxa de crescimento de energia no para-raios é da ordem de 34 joules/ms. Logo, levando-se em conta a sua capacidade de dissipação energética que é de 2,1 kJ/kV, ou seja, 18,9 kJ, verifica-se que a chave “by-pass” deve operar em torno de 500 ms para garantir a sua integridade.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) LEUVEN EMTP CENTER (LEC) - Alternative Transients Program (ATP) – RULE BOOK, july/1987.
- (2) L. DUBE and H. W. DOMMEL, “Simulation of control systems in an electromagnetic transients program with TACS, “IEEE PES PICA Conference Record, vol. 10, pp. 266-271,1977.
- (3) ANEEL - “Resolução nº505, de 26 de novembro de 2001” <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/res2001505.pdf>>, ONLINE, 10 de março de 2011.

- (4) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 11809. – Reguladores de tensão – Fevereiro/1991, Brasil.
- (5) FELÍCIO, J. R. – “Modelagem de reguladores de tensão com 32 degraus para estudos em regime permanente e Transitório”. Dissertação de Mestrado, UFU, Uberlândia/2006.
- (6) GREENWOOD, Allan – “Electrical transients in power systems, Ed. John Wiley & Sons, INC., New York, 1991, 2nd edition.
- (7) FILHO, JOÃO M. - “Manual de equipamentos elétricos”, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, 1994, Vol 2, 2ª edição.

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



André Roger Rodrigues

Nascido em Patos de Minas, MG, Brasil em 26 de Julho de 1979. Obteve o título de Mestre em Ciências em 2007 pela Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) e a Graduação em Engenharia Elétrica obtida em 2004 pela Universidade Federal de Uberlândia. É professor em regime de dedicação exclusiva do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais - Campus Formiga. Suas áreas de Interesse são: Transitórios Eletromagnéticos, Conversão de Energia Elétrica.



Marcelo Lynce Ribeiro Chaves

Nascido em Ituiutaba, MG, Brasil em 03 de outubro de 1951. Obteve o título de Doutorado em 1995 pela Unicamp Campinas, SP. O título de Mestrado foi obtido em 1985, na Universidade Federal de Uberlândia (UFU) e a Graduação em Engenharia Elétrica obtido em 1975, também pela Universidade Federal de Uberlândia. É professor titular na Universidade Federal de Uberlândia. As suas áreas de interesse são: Acionamentos Elétricos, Transitórios Eletromagnéticos e Modelagem de Transformadores.