XVIII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica

SENDI 2008 - 06 a 10 de outubro

Olinda - Pernambuco - Brasil

Modelagem e Análise de um Auto-Regulador Magnético de Tensão (ARMT) Para Regulação da Tensão em Redes de Distribuição de 13,8 kV

Saulo Emmanuel Constantino Carneiro Leão	Manoel Afonso de Carvalho Júnior, Ph.D
CELPE	UFPE
scleao@celpe.com.br	macj@ufpe.br

Palavras-chave
Compensação Série
Qualidade de Energia
Reator Saturado
Regulação de Tensão

Resumo

Oferecer serviços de qualidade, atendendo às exigências legais, sempre buscando a satisfação do cliente, é a meta de todas as empresas concessionárias que prestam serviços de distribuição de energia elétrica. Neste sentido, o objetivo do presente trabalho, resultado de uma pesquisa em andamento, é desenvolver o modelo do Auto-Regulador Magnético de Tensão (ARMT) e avaliar o seu desempenho frente às variações de tensão em um sistema elétrico de distribuição em 13,8 kV, possibilitando assim uma nova alternativa para a melhoria deste sistema, além das soluções utilizadas atualmente. O modelo computacional desenvolvido no programa EMTP-ATP consiste basicamente em um reator saturado e um capacitor série, e apresenta-se como uma alternativa viável para a regulação de tensão principalmente devido à velocidade de atuação durante fenômenos transitórios. Além de atuar na regulação da tensão do sistema elétrico de distribuição quando em regime permanente, o ARMT apresenta-se como uma alternativa para limitar a corrente de curto-circuito devido a presença do reator saturado em sua constituição. Os benefícios da utilização do ARMT para esta situação estão avaliados através de análises em regime transitório do equipamento.

1. Introdução

O cumprimento das exigências relacionadas com os critérios de qualidade nos seus aspectos de continuidade e conformidade do fornecimento de energia elétrica, estabelecidas pela Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL - reguladora da prestação do serviço, representa um desafio para as empresas distribuidoras. Estas, por sua vez, contam com recursos materiais e tecnológicos limitados para investir na melhoria do sistema. Não atender a estes critérios implica diretamente em pagamento

de elevadas multas, aplicadas pelos órgãos reguladores, e prejuízo na imagem da empresa diante de seus clientes.

Devido às grandes extensões territoriais encontradas nos estados brasileiros, e a distância que normalmente existe entre os centros de consumo e os pontos de geração, a questão da regulação da tensão é um problema que exige uma especial atenção das concessionárias de energia elétrica, principalmente por conta do aumento de cargas sensíveis às oscilações de tensão. No que se refere à melhoria na regulação da tensão nos sistemas de distribuição de energia elétrica, observa-se que muitos investimentos em equipamentos, principalmente reguladores de tensão monofásicos, vêm sendo realizados para este fim. Apesar da grande utilização destes equipamentos, uma nova abordagem ao problema poderá trazer benefícios adicionais tanto para as empresas quanto para os clientes. Neste sentido, o Auto-Regulador Magnético de Tensão (ARMT) surge como uma opção bastante atrativa, uma vez que pela própria estrutura do equipamento possibilita uma velocidade de atuação durante fenômenos transitórios e em regime permanente frente às variações de tensão, promovendo um controle contínuo das tensões ao longo da rede de distribuição.

O programa EMTP-ATP foi utilizado como ferramenta para modelagem e análise do ARMT, uma vez que este software é utilizado pelos especialistas brasileiros em sistemas elétricos e principalmente por dispor dos elementos necessários para modelar o reator saturado que compõe o ARMT.

2. Desenvolvimento

Anteriormente, os critérios de conformidade dos níveis de tensão da energia elétrica eram definidos pela Portaria do extinto Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica - DNAEE Nº 047, de 17 de abril de 1978. Com a reestruturação do setor elétrico iniciada em 1995, e a criação da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL surgiu a necessidade de rever e atualizar as disposições contidas nesta portaria, através da Resolução ANEEL Nº 505, de 26 de novembro de 2001.

A partir desta nova resolução foram definidas as faixas de tensão de atendimento, conforme mostrado na tabela abaixo:

Classificação da Tensão de Atendimento (TA)	**Faixa de Variação da Tensão de Leitura (TL) em relação à Tensão Contratada (TC)**
Adequada	$0{,}95\ TC \leq TL \leq 1{,}05\ TC$
Precária	$0{,}93\ TC \leq TL < 0{,}95\ TC$
Crítica	$TL < 0{,}93\ TC$ ou $TL > 1{,}05\ TC$

Tabela 01 – Classificação da Tensão de atendimento, conforme Art. 4º Res. ANEEL Nº 505, de 26.11.2001

Basicamente, o uso do Auto-Regulador Magnético de Tensão (ARMT) visa associar os benefícios proporcionados pelas técnicas de compensação série e das características dos reatores saturados, promovendo um controle natural da regulação da tensão para redes de distribuição.

As técnicas de compensação série para redes de distribuição vêm sendo desenvolvidas a muitos anos, sendo os primeiros capacitores série utilizados por volta do ano de 1950. A compensação série baseia-se na redução da impedância de natureza indutiva das redes de distribuição, com o objetivo de reduzir as quedas de tensão ao longo destas redes, melhorando assim os níveis de tensão.

Dentre as vantagens advindas da utilização da compensação série, podemos citar:

- Melhoria na tensão do sistema
- Redução nas flutuações de tensão
- Melhoria no fator de potência da rede
- Redução nas perdas da rede

Para ilustrar a análise fasorial de um sistema de distribuição radial, consideremos inicialmente uma rede representada com toda a carga concentrada no final da linha, sem compensação série.

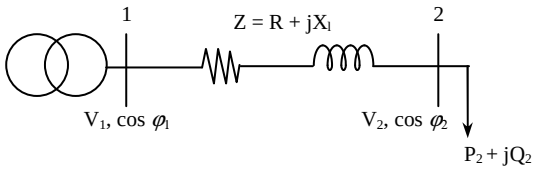
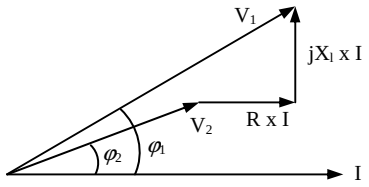


Figura 01 – Sistema Elétrico de Distribuição Radial, sem compensação série.

Onde:

V_1 = Tensão no início do alimentador;
V_2 = Tensão no final do alimentador;
Z = $R + jX_l$ = Impedância da rede, representada por uma resistência e uma reatância indutiva
Cos φ_1 = fator de potência no início do alimentador;
Cos φ_2 = fator de potência no fim do alimentador;
$P_2 + jQ_2$ = potência ativa e reativa, respectivamente, requerida pela carga.

O diagrama fasorial referente a esta configuração é apresentado abaixo.



A partir do diagrama fasorial, pode-se observar que a tensão no início da rede é:

$$V_1 = V_2 + RI + jX_l I = V_2 + I \times (R + jX_l) \qquad (1)$$

E a queda de tensão (ΔV) é dada por:

$$\Delta V = V_1 - V_2 = I \times \left(R + jX_l\right) \qquad (2)$$

Para este caso, instalando-se um banco de capacitor série, teremos uma nova configuração para o sistema.

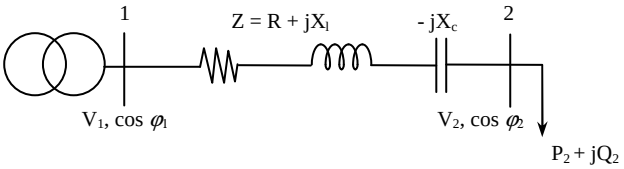
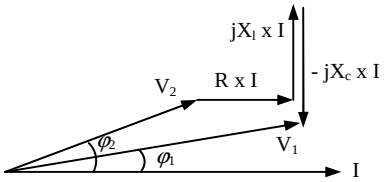


Figura 02 – Sistema Elétrico de Distribuição Radial, com compensação série.



Deve-se observar que, caso o ângulo de fase $\varphi 2$ seja muito próximo de zero, a redução na queda de tensão causada pela compensação série será insignificante, levando à conclusão que se obtém um melhor aproveitamento desta técnica quando a carga em questão for de natureza indutiva.

A regulação da tensão é feita considerando-se o grau de compensação desejado. O grau de compensação, k, é definido como a relação entre a reatância do banco de capacitores e a reatância indutiva do alimentador.

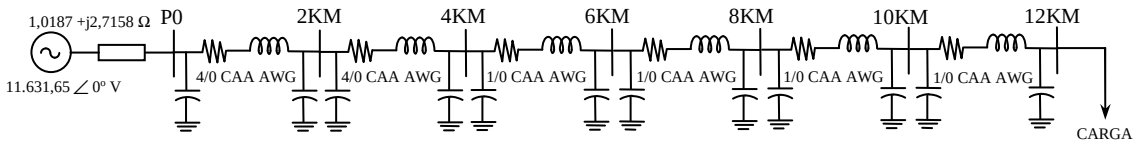
$$k = \frac{X_c}{X_l} \qquad (3)$$

Deste modo, podemos admitir a possibilidade de uma compensação total com a eliminação da reatância da linha, para k=1, ou uma sobrecompensação, para k > 1.

Um dos principais pontos a serem observados na utilização da compensação série, é a proteção do capacitor em casos de sobretensão e possíveis fenômenos de ressonância. Além disto, quando um capacitor opera sob condições de curto-circuito, a corrente que circulará por ele poderá ocasionar a ruptura de sua caixa, devido à pressão do gás oriundo da decomposição dos materiais dielétricos pela ação do arco na região do defeito. Quanto maior a exposição do capacitor a esta corrente, e quanto maior sua intensidade, maior a probabilidade da ocorrência da ruptura da caixa. Os danos causados por uma proteção inadequada do capacitor, vão desde um simples vazamento de líquido até uma violenta explosão da caixa, podendo os fragmentos da mesma atingir pessoas ou equipamentos próximos.

3. Modelagem e Análise do Auto-Regulador Magnético de Tensão (ARMT)

Para modelagem do Auto-Regulador Magnético de Tensão (ARMT), foi considerada uma rede monofásica de distribuição em 13.800V, conforme apresentada na figura abaixo:



O sistema de alimentação está representado pelo seu equivalente de Thevenin na barra de 13.800 V (ponto P0). A carga está absorvendo uma corrente cujo valor de pico é 123A. Para esta configuração, a queda de tensão a 12 km do alimentador (na barra da carga) é de aprox. 10% da tensão da barra P0, justificando a utilização de métodos para a regulação da tensão neste ponto.

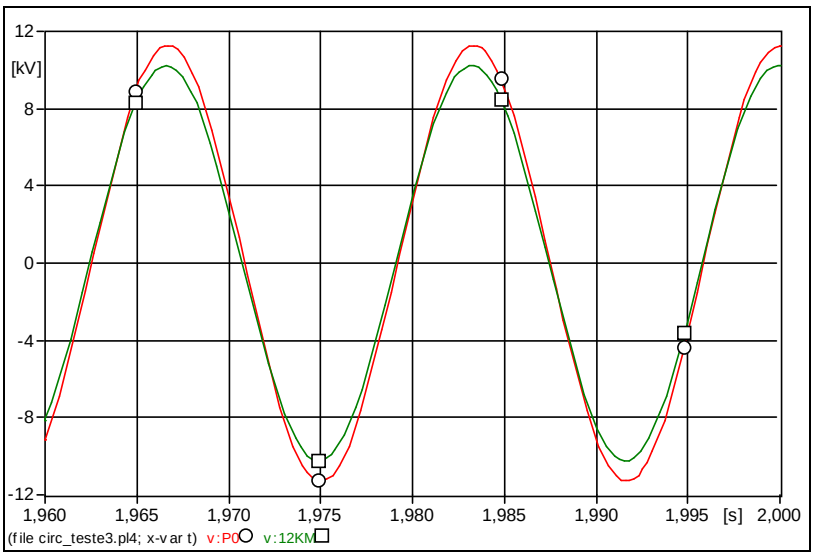


Figura 03 - Tensão nos pontos P0 e a 12 km da fonte

De modo a compensar a queda tensão a 12 km da fonte, um capacitor série foi introduzido no sistema visando uma compensação conforme descrito anteriormente.

A partir das medições de tensão em cada barra, foi identificado como ponto para instalação do capacitor série, a barra localizada a 8km do ponto de suprimento, tendo em vista que a tensão nesta barra encontrava-se em torno de 0,93 PU, ou seja no limite inferior previsto para a faixa de tensão precária.

A tensão sobre o capacitor pode ser calculada a partir da Lei de Ohm.

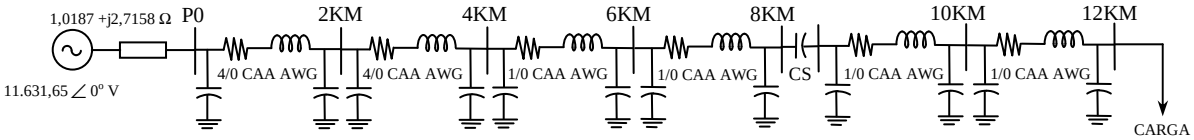
$$V_c = X_c \cdot I_c \qquad (4)$$

Conhecendo-se as tensões em cada ponto do sistema, verificou-se que o capacitor estaria submetido a uma tensão V_c = 1.364,11 V aplicada em seus terminais, e uma corrente de carga I_c = 123 A. O valores da reatância capacitiva X_c e da capacitância C, poderão ser calculados pelas seguintes expressões:

$$X_c = \frac{V_c}{I_c} \qquad (5)$$

$$C = \frac{1}{\varpi . X_c} \quad ; \text{onde } \varpi = 2\pi f \qquad (6)$$

A figura abaixo apresenta a configuração do sistema após a introdução do capacitor série.



Nesta situação, o ganho de tensão obtido com a compensação série foi de 12%, entre os terminais do capacitor, possibilitando a tensão de 1,0 PU na carga.

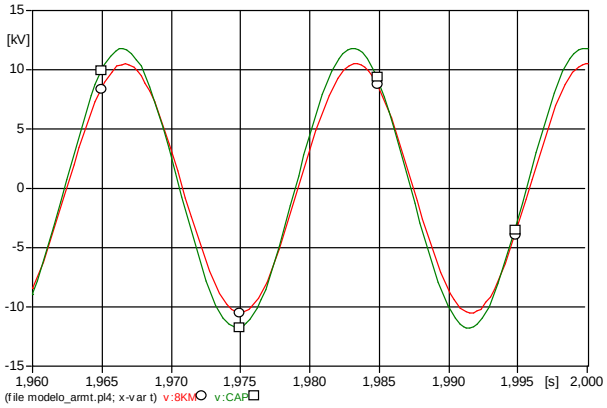


Figura 04 – Tensões nos terminais do capacitor série

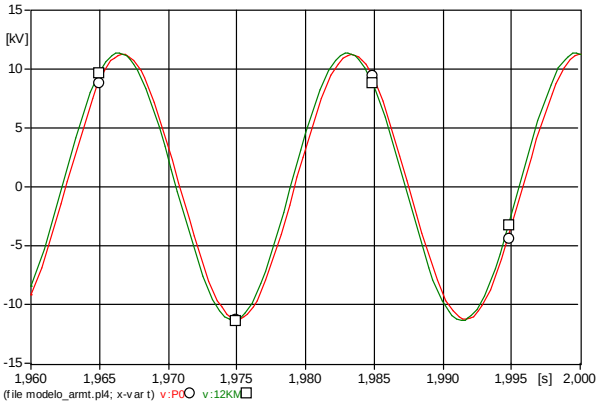


Figura 05 - Tensão nos pontos P0 e a 12 km da fonte (após a compensação série)

Em regime permanente, a regulação da tensão é feita naturalmente pela corrente de carga que circula pelo capacitor. Contudo, na ocorrência de um curto-circuito, por exemplo, nos terminais da carga, a elevada corrente que irá surgir neste instante provocará elevações de tensão inadmissíveis no sistema, pondo em risco toda a instalação inclusive o capacitor série.

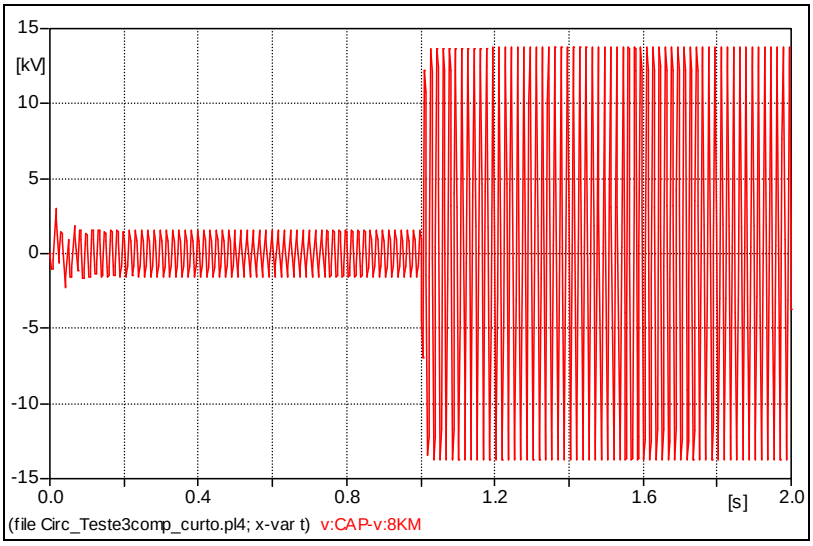


Figura 06 – Tensão nos terminais do capacitor série durante um curto-circuito

Visando promover um caminho para a corrente de curto-circuito, de modo a evitar que a mesma circule pelo capacitor, um reator de núcleo saturado será utilizado em paralelo, em função de suas características de funcionamento.

De forma elementar, o reator saturado pode ser analisado como um transformador com núcleo de ferro, contendo apenas os enrolamentos primários e operando em condições normais com o núcleo saturado. Na região não saturada, este núcleo deve apresentar uma alta permeabilidade, ou seja, uma elevada impedância de magnetização L_m, enquanto que na região saturada esta permeabilidade deve ser baixa e constante, de modo que a impedância L_m seja pequena. Esta característica dos reatores saturados pode ser observada na figura 08.

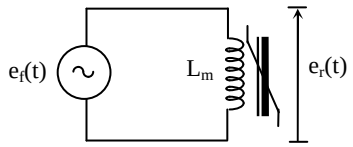


Figura 07 – Reator Saturado alimentado por uma fonte de tensão senoidal

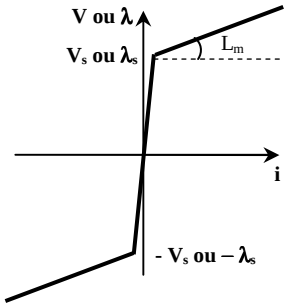


Figura 08 - Curva λ x i (ou V x i) do reator saturado

Obs: Relação entre a tensão (V) e o fluxo concatenado (λ): $V = \omega \cdot \lambda = 2\pi f \cdot \lambda$ (7)

O circuito da figura 07, composto por uma fonte de tensão senoidal alimentando um reator elementar, conforme descrito acima, terá o seguinte comportamento:

- Para valores de tensão abaixo do valor estabelecido para saturação ($e_f(t) < V_s$), idealmente, nenhuma corrente irá circular pelo circuito, funcionando como uma chave aberta.

- Contudo, quando a tensão de saturação ($e_f(t) \geq V_s$) for alcançada, uma corrente irá circular de modo a alimentar a indutância de magnetização L_m.

A figura 09 apresenta as mudanças sucessivas do reator do estado saturado para o não saturado, desprezando-se as perdas.

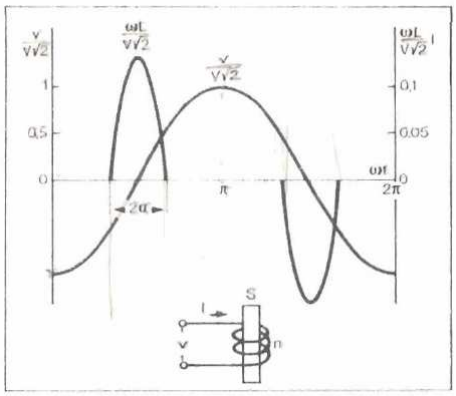


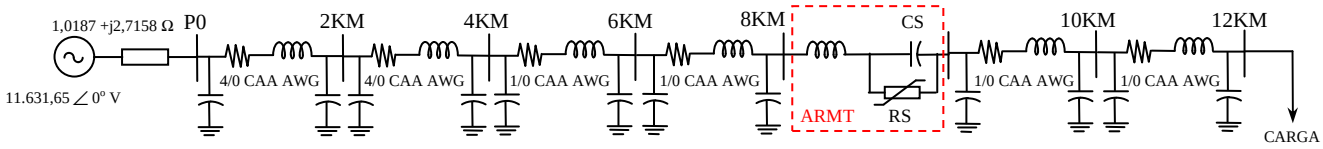
Fig. 09 – Corrente e tensão para um reator saturado

Durante o intervalo wt = α o núcleo magnético está saturado e a corrente é limitada pela indutância de magnetização L_m:

$$L \cdot \frac{di}{dt} = v \qquad (8)$$

No intervalo (π – 2α), o núcleo está não saturado de modo que o campo magnético e consequentemente a corrente sejam zero.

Durante um curto-circuito, a jusante do capacitor série, a corrente de falta irá ocasionar um aumento na tensão entre os terminais do mesmo, podendo danificá-lo. Visando restringir esta elevação de tensão, um reator saturado é utilizado em paralelo com o capacitor, operando na região não saturada em condições normais de carga. Adicionalmente, uma indutância linear é colocada em série com o capacitor, de modo a reduzir a corrente de curto-circuito.



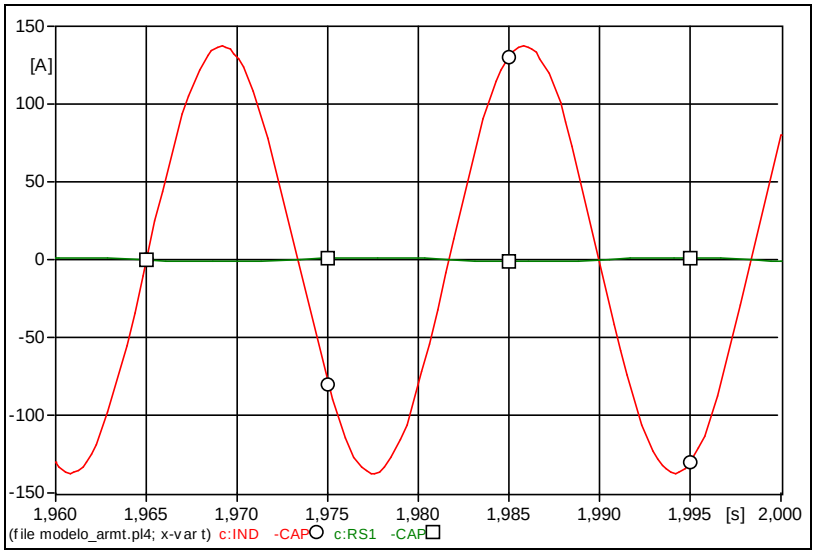


Figura 10 – Correntes no Capacitor Série (O) e Reator Saturado (□), quando em regime permanente.

Podemos observar pela figura 10 que, em regime permanente, praticamente toda a corrente flui através do Capacitor Série, uma vez que nesta condição o Reator Saturado estará operando como uma chave aberta.

O Reator Saturado (RS) é dimensionado de modo que a elevada tensão que surge nos terminais do capacitor durante a ocorrência de um curto-circuito, por exemplo, na barra de carga (12 km), seja suficiente para levá-lo à condição de saturação. Nesta condição, a corrente é desviada do Capacitor Série, passando a circular pelo Reator Saturado.

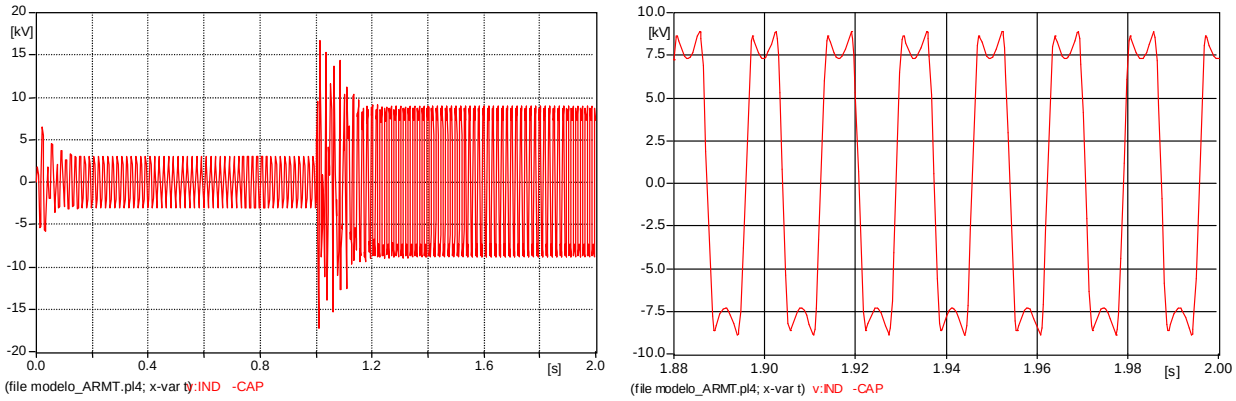


Figura 11 – Tensão no Capacitor Série, durante curto-circuito.

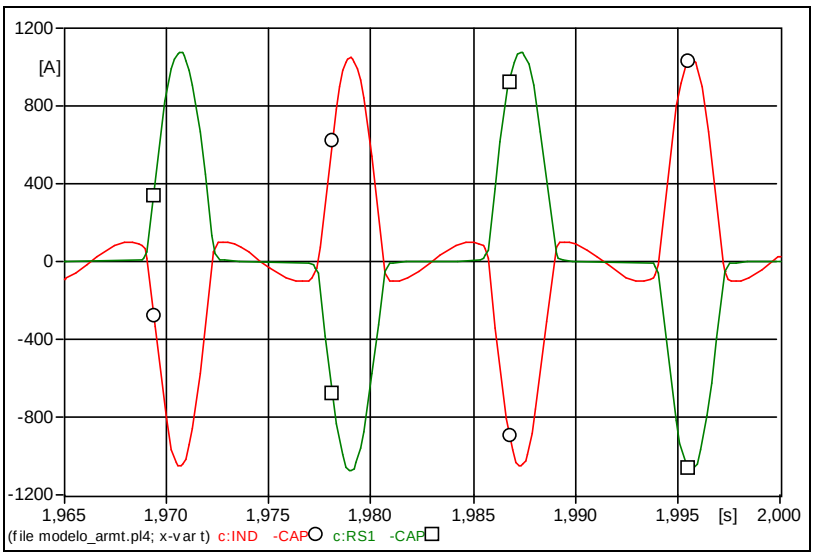


Figura 12 – Correntes no Capacitor Série (O) e Reator Saturado (□), durante curto-circuito.

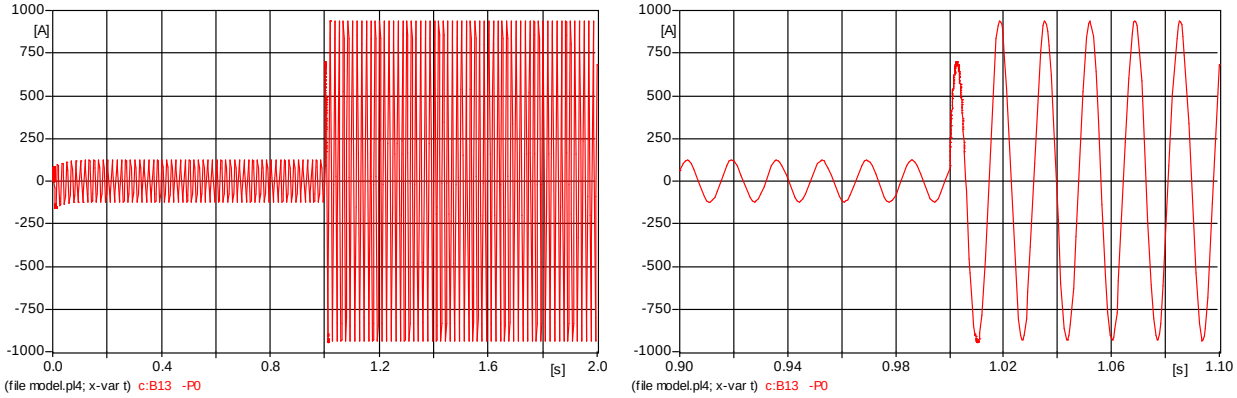


Figura 13 – Corrente fornecida pela Fonte do Sistema Elétrico, sem o ARMT.

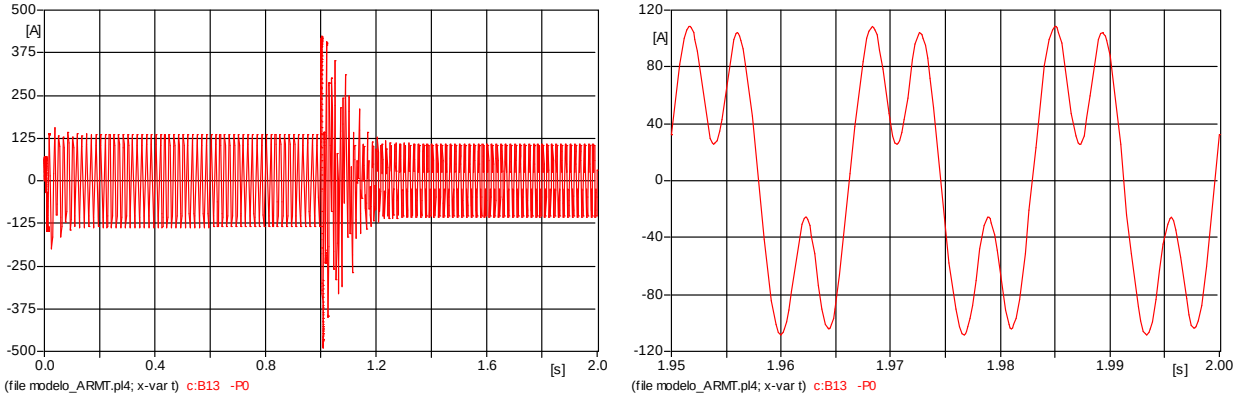


Figura 14 – Corrente fornecida pela Fonte do Sistema Elétrico, com o ARMT.

Apesar das distorções harmônicas apresentadas na corrente do sistema durante o curto-circuito, com a presença do ARMT, verificou-se que a forma de onda da tensão para cargas conectadas à montante do equipamento permanecerá inalterada.

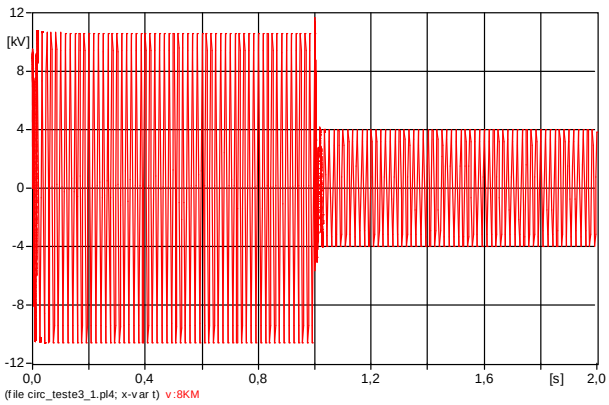


Figura 15 - Tensão no ponto a 8 km da fonte supridora, sem o ARMT (curto-circuito a jusante do equipamento, a 12 km da fonte).

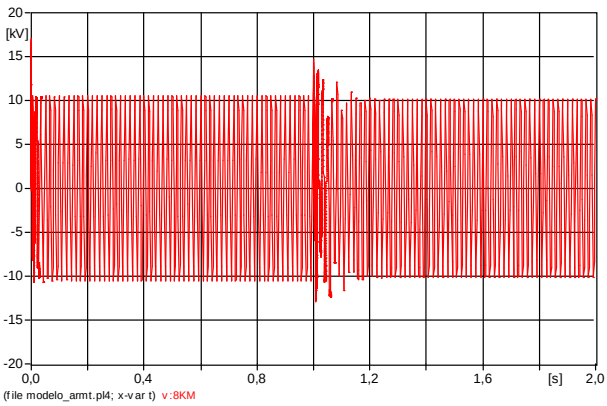


Figura 16 - Tensão no ponto a 8 km da fonte supridora, com o ARMT (curto-circuito a jusante do equipamento, a 12 km da fonte).

As figuras 15 e 16 apresentam as tensões que seriam aplicadas a uma carga localizada a 8 km da fonte supridora, quando da ocorrência de um curto-circuito a 12 km desta fonte, sem e com a presença do ARMT. No primeiro caso, a carga estaria submetida a uma tensão de 0,39 PU daquela existente no mesmo ponto antes do curto-circuito, o que equivale a uma queda de tensão de aproximadamente 0,61 PU, enquanto que no segundo com o ARMT, esta tensão seria de 0,97 PU, de modo que a queda de tensão seria de apenas 0,03 PU.

4. Conclusões

Conforme observado, a utilização do Auto-Regulador Magnético de Tensão (ARMT) mostra muitas vantagens, por ser um equipamento robusto necessita de poucas intervenções (manutenção), sendo a regulação de tensão controlada de forma natural pelo capacitor série. Dentre outras vantagens, nas simulações, o Auto-Regulador Magnético de Tensão (ARMT) mostrou-se ainda eficiente na função de limitador de corrente de curto-circuito, contudo estudos adicionais fazem-se necessários no sentido de minimizar, através de filtros, as distorções harmônicas geradas pela presença de um componente não-linear no sistema.

Apesar das aparentes vantagens apresentadas, uma análise de viabilidade econômica deve ser realizada de modo a indicar até que ponto a utilização do AMRT passa a ser competitiva frente aos demais equipamentos existentes no mercado.

5. Referências bibliográficas

CAMPONÊS DO BRASIL, D. O. *Aplicação de Reatores Saturados em Sistema de Transmissão*. Dissertação de Mestrado, UFPE, Maio 1996.

LEAL, F. S. *Reatores Saturados com Excitação Paralela*. Dissertação de Mestrado, UFPE, 2000.

MAGNATA DA FONTE, L. A. *Reator Saturado – Alguns aspectos Operacionais e de Projeto*. Dissertação de Mestrado, UFPE, Dezembro 1997.

ABB POWER SYSTEMS. *Reactive Power Compensation: Series Compensation for Distribution Networks*.

COMPANHIA ENERGÉTICA DE PERNAMBUCO – CELPE. *Parâmetros Elétricos das Linhas de Distribuição – Sistemas de 13,8 e 34,5 kV*. Recife, 1998.

FILHO, J. A.; PEREIRA, M. P. *Curso Básico Sobre a Utilização do ATP*. Novembro 1996.

ATP – ALTERNATIVE TRANSIENTS PROGRAM. *IV-E Saturable Transformer Component*. Rule Book, 1987.

TOSHIBA DO BRASIL S.A. *Manual de Instrução para Reguladores de Tensão Monofásicos*. Setembro 2005.

HARRIS, L. A.; WELCH, I. M. *Dynamic Reactive Compensation for the 2000MW HVDC Link*. CEGB Transmission and Technical Services Division.Guildford. UK.

THANAWALA, H. L.; YOUNG, D. J. *Saturated Reactors – Some Recent Applications in Power Systems*. Energy International, Volume 7, Number 11, November 1970.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Legislação Básica do Setor Elétrico Brasileiro – Resoluções. Volume II, Março 2002, p. 506 – 519.

INDUCON; LAELC INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA. Manual Inducon – Capacitores de Potência. 3ª Edição. Abril 1999.