

Aplicação de Dispositivos para Limitação de Correntes de Curto-Circuito

L. C. Zanetta Jr, C. E. M. Pereira, PEA-USP, V. A. F. Campos, PEA-USP, R.L.Santos ISA-CTEEP

Resumo- Este artigo apresenta os resultados relativos ao estudo de aplicação de equipamentos para redução da corrente de curto circuito no sistema da ISA-Cteep.

Após uma análise bibliográfica, foram desenvolvidos modelos de vários dispositivos limitadores de curto para utilização com o programa de transitórios eletromagnéticos e também para regime permanente.

Foi feita uma avaliação da eficiência dos dispositivos para a redução da corrente de curto com base em simulações com o programa ATP levando em conta os efeitos na tensão de restabelecimento.

Foi desenvolvido um aplicativo para avaliação da redução do curto utilizando o programa Anafas. Esse aplicativo permite a escolha dos tipos de dispositivos a serem instalados e faz um histórico comparando a evolução dos valores de curto para cada alternativa gerada pelo usuário.

O aplicativo apresenta também uma base de dados de modelos de limitadores de curto para utilização no programa ATP.

Palavras-chave—Curto circuito, limitador de curto circuito, transitórios, regime permanente.

I. INTRODUÇÃO

O objetivo do projeto é desenvolver um sistema computacional em ambiente Windows e de utilização simples para a análise de alternativas de alocação de dispositivos limitadores de curto-circuito (DLC) na rede da ISA-Cteep.

O sistema utiliza modelos de DLC's desenvolvidos no decorrer do projeto após análise das novas tecnologias em estudo atualmente, baseadas em eletrônica de potência ou supercondutividade a altas temperaturas.

Também é objetivo deste trabalho a análise comparativa entre os dispositivos limitadores de corrente sob o aspecto de sobretensões causadas pela interrupção e, a partir daí, a definição de critérios ou indicadores técnico-econômicos que suportem a decisão pela solução mais adequada a ser adotada em sistemas onde se faz necessária a limitação do nível de curto-circuito.

A determinação e simulação de curtos-circuitos em sistemas de potência (inclusive junto a geradores), além da determinação da tensão de restabelecimento transitória em DLCs e disjuntores e da regulação em transformadores e reatores no sistema são tópicos de interesse para o desenvol-

vimento do trabalho proposto.

O campo de aplicação compreende casos de alterações de configuração ou expansões da rede que acarretem no aumento do nível de curto-circuito ou, ainda, quando tal fato se manifesta já na concepção de sistemas novos.

A metodologia utilizada foi inicialmente realizar um levantamento bibliográfico sobre dispositivos limitadores de curto em uso e em desenvolvimento, buscando possibilitar a implementação de modelos para regime permanente e transitório.

Em seguida foi feita a avaliação dos modelos e a implementação do aplicativo para controle de aplicação de limitadores com a versão livre Turbo Delphi da Borland.

II. MODELOS DE LIMITADORES DE CURTO

Os dispositivos com os modelos analisados foram os seguintes, listados inicialmente os já conhecidos, com tecnologia estabelecida e em uso e no final os dispositivos em desenvolvimento e com pouca aplicação atualmente:

- Reator de barramento
- Reator com núcleo de ar
- Impedância de aterramento
- Dispositivo pirotécnico
- Reator de inserção rápida
- Conexão back-to-back
- HVDC Light
- Transformadores especiais (IPC)
- TCSC – Thyristor Controlled Series Capacitor
- Limitadores supercondutores resistivos
- Circuitos ressonantes
- SSFCL - Solid State Fault Current Limiter
- Resistores poliméricos PTC

Alguns dos dispositivos normalmente são modelados de maneira extremamente detalhada, como por exemplo os que envolvem eletrônica de potência, como a conexão back-to-back, HVDC Light, TCSC – Thyristor Controlled Series Capacitor, UPFC – Unified Power Flow Controller e SSFCL - Solid State Fault Current Limiter.

Alguns modelos podem ser representados de forma menos detalhada, como o TCSC, outros como o SSFCL estão em fase de estudos. Neste trabalho não foram exploradas as representações baseadas em conversores da eletrônica de potência.

Alguns modelos podem ser modelados de forma bastante simples, como os reatores, se não forem considerados detalhes como a saturação e a capacitância em alta frequência.

No caso dos dispositivos pirotécnicos o modelo depende

Este trabalho foi financiado pela Cteep – Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista.

L. C. Zanetta Jr e C.E.M Pereira trabalham no LSP-USP Laboratório de Sistemas de Potência da Escola Politécnica da USP (e-mail: lzanetta@pea.usp.br).

R.L.Santos (in memoriam) trabalhou na Cteep – Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista.

basicamente do ensaio de fusão do elemento fusível, sendo utilizada uma curva de resistência em função da frequência, já que o modelamento físico do derretimento do mesmo é relativamente complexo, sendo mais confiável a utilização de resultados de ensaios.

Os modelos de supercondutores podem ser simplificados trabalhando-se com dois patamares de resistência, para os estados supercondutor e condutor, a partir da geometria do resistor e dos dados básicos do material supercondutor, como corrente crítica e resistividade na condição normal de operação.

A. Reator com núcleo de ferro

Reatores com núcleo de ferro podem ser usados em série ou para seccionar barramentos e podem ser representados adequadamente em estudos de curto circuito com sua impedância, calculada normalmente a partir dos valores nominais de potência, tensão e fator de qualidade.

$$Z_r = \left(\frac{1}{q} + 1j \right) X_r$$

$$X_r = \frac{Q_r}{V_r^2}, q = \frac{X_r}{R_r}$$

Onde:

Z_r é a impedância do reator

q é o fator de qualidade do reator

X_r e R_r são a reatância e a resistência do reator

Q_r e V_r são a potência e tensão nominal do reator

B. Reator com núcleo de ar

O modelo básico do reator com núcleo de ar é o mesmo que o do reator com núcleo de ferro, excluindo-se a possibilidade de representação da saturação.

Podem ser representadas as capacitâncias para alta frequência de forma similar ao caso de transformadores.

Os valores das capacitâncias são da ordem de até centenas de pF.

O modelamento para regime permanente é o mesmo que o do reator com núcleo de ferro.

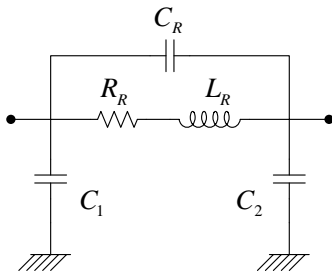


Fig. 1 – Modelo completo do reator com núcleo de ar.

C. Impedância de aterramento do neutro

Nos casos de aterramento resistivo e indutivo o modelo é basicamente uma impedância, já no caso de aterramento com

transformador, utiliza-se o modelo de transformador monofásico do ATP, sem a representação da saturação.

Os valores dos parâmetros do transformador serão:

$$Z_p = \left(\frac{1}{q} + 1j \right) \frac{x_t}{2} Z_{bp}$$

$$Z_s = \left(\frac{1}{q} + 1j \right) \frac{x_t}{2} Z_{bs}$$

$$q = \frac{x_t}{r_t}, Z_{bp} = \frac{V_p^2}{S_t}, Z_{bs} = \frac{V_s^2}{S_t}$$

Onde:

x_t é a impedância do transformador em pu

Z_p é a parcela da impedância do transformador no primário (neutro)

Z_s é a parcela da impedância do transformador no secundário (neutro)

q é o fator de qualidade do transformador

V_p e V_s são as tensões nominais do transformador

S_t são a potência e tensão nominal do transformador

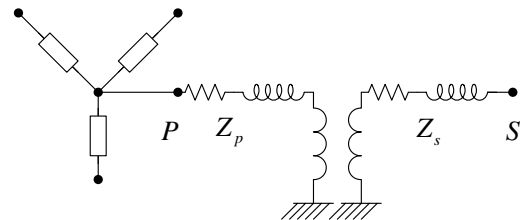


Fig. 2 – Modelo do transformador de aterramento.

O terminal secundário pode ser aterrado diretamente ou através de uma impedância.

Em regime permanente, como os programas trabalham internamente em pu, o modelo é uma resistência em série com uma reatância (em pu) a ser incorporado no diagrama de sequência zero.

$$Z'_{0t} = Z_{0t} + 3Z_n$$

Onde Z_n é a impedância do transformador de aterramento mais a impedância no secundário, em valores pu ou em Ω refletido no primário.

D. Dispositivo Pirotécnico

O modelamento do dispositivo pirotécnico é baseado em ensaios de laboratório, em que para uma determinada corrente de curto, que é registrada de forma analógica ou digital, também é registrada a forma de onda de tensão, permitindo o cálculo da resistência em função do tempo.

O tempo de disparo do explosivo para a inserção do fusível é de cerca de 1 ms após a superação do limite de corrente ajustado.

Dos ensaios verifica-se que o tempo de interrupção do fusível é de cerca de 8 ms, incluindo a interrupção do arco, que dura a maior parte desse tempo, pois o aquecimento até o ponto de fusão é de cerca de 1 ms para correntes próximas à nominal.

A variação da curva resistência x tempo não é muito

grande conforme indica a Fig.3 a seguir, que compara os dois ensaios citados anteriormente.

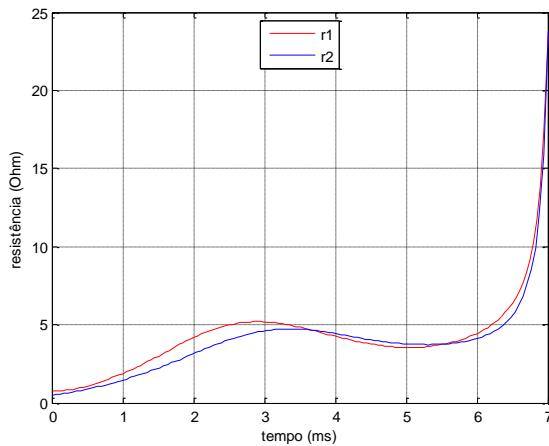


Fig. 3 – Comparação resistência x tempo para dois ensaios de dispositivo pirotécnico.

A implementação do modelo no ATP é feito com o uso da sub-rotina models, cujo funcionamento é descrito a seguir:

- verifica se a corrente passou do limite mínimo
- se passou o limite, a partir desse instante, insere a resistência conforme a curva do ensaio
- após 10 ms a resistência assume um valor fixo.

O tempo de atuação da carga explosiva pode ser alterado mas está padronizado em 1 ms.

Para estudos de regime esse limitador é um curto (bypass) na condição pré-falta e um circuito aberto no pós-falta.

E. Reator de inserção rápida

O reator de inserção rápida é modelado usando-se um modelo de dispositivo pirotécnico em paralelo com um modelo de reator, com núcleo de ferro ou núcleo de ar, conforme indicado na Fig. 4.

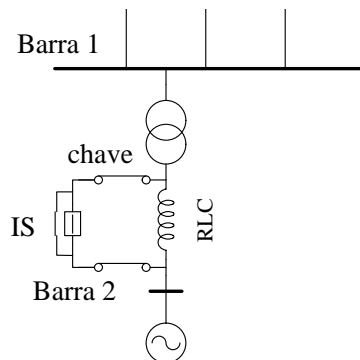


Fig. 4 – Inserção rápida de reator série com dispositivo pirotécnico.

As chaves estão indicadas mas não são necessárias no modelamento, sendo usadas na prática somente para manutenção ou recarga após atuação do dispositivo pirotécnico. Em relação ao regime permanente, o dispositivo sofre a transição de um curto para um reator, antes e após a falta.

F. IPC Interphase Power Controller

Uma das configurações de IPC mais eficientes é o IPC 120, mostrado na Fig. 5, e dessa forma esse será o modelo adotado como base.

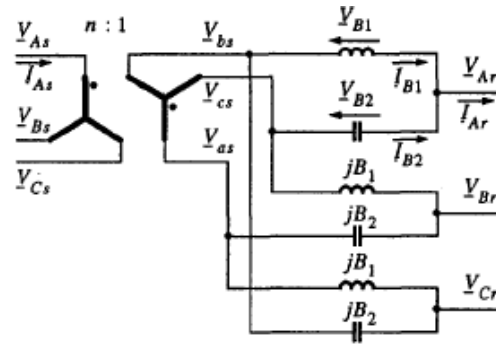


Fig. 5 - Diagrama trifásico do IPC 120.

O modelo do transformador basicamente é o mesmo que o dos equipamentos / limitadores anteriormente apresentados mas com uma diferença importante nas polaridades e nos pares de bobinas acopladas.

O transformador utilizado tem ligação estrela não aterrada - estrela não aterrada e defasagem de 180°.

Os pares de bobinas com a indicação de polaridade são:

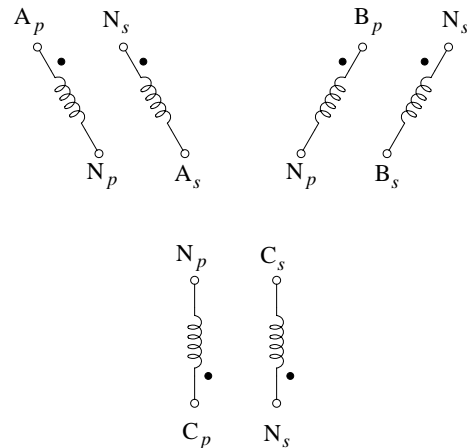


Fig. 6 – Pares de bobinas do transformador do IPC 120.

No programa AtpDraw a representação é a seguinte:

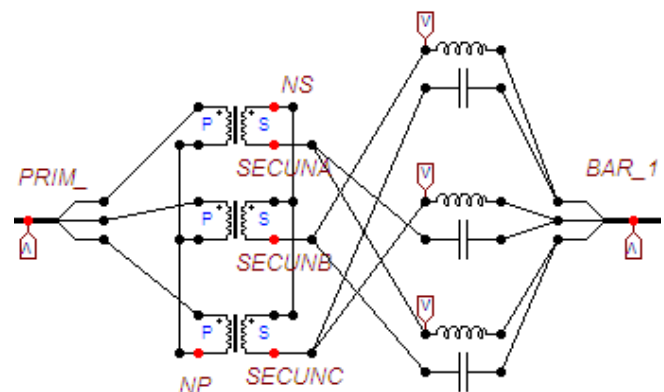


Fig. 7 – Modelo do IPC no programa AtpDraw.

A análise do IPC permite que se considere o seguinte modelo simplificado de sequência positiva do IPC 120 para curto trifásico.

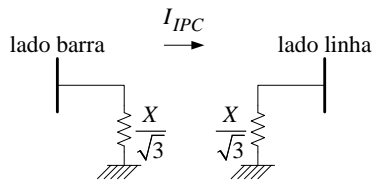


Figura 8 – Modelo de sequência positiva do IPC para curto trifásico.

No modelo, X é a reatância do capacitor do IPC, que deve ser igual à reatância do reator no caso de representação com transformador ideal.

Durante um curto trifásico em um dos lados do IPC, não há contribuição do outro lado para a corrente de curto trifásico e a corrente vinda do IPC tem o mesmo valor da corrente imposta em regime, havendo inversão do sentido para curto no lado barra.

Para o caso de curto fase-terra no lado barra a corrente fluindo do lado linha para o lado barra seria a corrente imposta na rede com inversão de polaridade e a corrente no lado linha seria a corrente imposta em regime com polaridade invertida na fase com falta e reduzida de $1/\sqrt{2}$ nas fases sãs.

Dessa forma o modelamento necessitaria de fontes de corrente para o lado sem falta, mas como em estudos de curto não é usual o modelamento de equipamentos com fontes de corrente, propõe-se utilizar para a sequência zero o mesmo modelo de sequência positiva.

G. TCSC – Capacitor série controlado por tiristor

O controle atua sobre os tiristores em série com o reator, o que corresponde aproximadamente a variar o valor da reatância.

O pára-raios ZnO deve proteger o capacitor contra sobretensões excessivas que poderão ocorrer no caso de circulação de corrente de curto. Assim o ZnO deve ser selecionado para evitar a superação do nível de isolamento dos componentes série, que é um valor bem menor que o nível de isolamento fase-terra dos componentes próximos da rede.

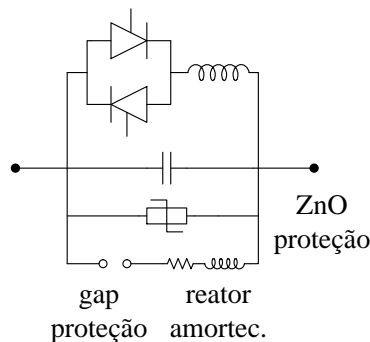


Fig. 9 – Diagrama do TCSC.

Nesse caso o TCSC será modelado conforme indicado na Fig. 10.

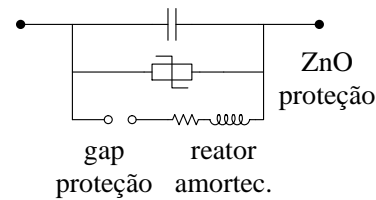


Fig. 10 – Modelo simplificado do TCSC.

No entanto o TCSC ainda não é utilizado comercialmente como um dispositivo controlador da corrente de curto circuito.

Para regime permanente o conjunto capacitor/ reator /válvula será representado simplificada por um capacitor fixo.

H. Limitador supercondutor do tipo resistivo

A principal característica que define o momento de atuação do limitador supercondutor resistivo é a corrente crítica que o mesmo suporta, sendo a mesma obtida a partir da densidade de corrente crítica do supercondutor e da área de sua seção.

Quando essa corrente crítica é atingida, o supercondutor começa a perder sua característica supercondutora. Dessa forma sua resistência aumenta e consequentemente sua temperatura aumenta acima da temperatura de supercondutividade.

Como a resistência atinge um valor considerável, consequentemente há limitação da corrente de curto.

O estado supercondutor é restabelecido após a eliminação da falta quando o sistema criogênico retorna à temperatura normal de operação de 77 K.



Fig. 11 – Limitador de curto supercondutor de 11 kV (projeto piloto da Nexans)

O modelo do limitador super condutor resistivo implementado com o uso da sub-rotina Models do ATP é uma resistência variável calculada a partir da tensão e corrente medida no supercondutor, o equacionamento é baseado em [34] e as constantes físicas em [21]:

Dados de entrada: Tensão entre os terminais e corrente

no supercondutor.

Dado de saída: resistência do supercondutor

O supercondutor possui 3 regiões distintas quanto ao seu comportamento:

estado supercondutor: resistência baixíssima

transição: resistência crescente exponencialmente com a corrente

estado condutor: resistência alta com elevação linear com a temperatura

A seguir o equacionamento da resistência para cada região de operação, considerando a liga :

Estado supercondutor

Para $J < J_{c77}$

$$\rho_{sc} = \frac{E_0}{J_{c77}}$$

Onde:

ρ_{sc} é a resistividade na região supercondutora

$E_0 = 0,1 \frac{V}{m}$ é o campo elétrico na fronteira entre o estado

supercondutor para estado de transição

$J_{c77} = 1,5 \times 10^7 \frac{A}{m^2}$ é a corrente crítica para perda de supercondutividade à temperatura do nitrogênio líquido (77 K).

Para esses valores de E_0 e J_{c77} , tem-se:

$$\rho_{sc} = 6,667 \times 10^{-9} \Omega m$$

Transição

Para $J \geq J_{c77}$ e $T < T_c$

$T_c = 95 \text{ K}$ é a temperatura crítica de entrada na região condutora

O campo elétrico é exponencial com a densidade de corrente:

$$E = E_0 \left(\frac{J}{J_{c77}} \right)^n$$

E é o campo elétrico sobre o supercondutor

J é a densidade de corrente medida

n é uma constante adimensional

A referência [21] indica o valor $n = 4$, ao invés de $n = 10$ da referência [34].

O aquecimento é considerado rápido, não levando em conta a transferência de calor do supercondutor para o nitrogênio líquido, sendo o acréscimo de temperatura dado por.

$$\frac{dT}{dt} = \frac{EJ}{c} = \frac{VI}{c}$$

$$T = T_0 + \int \frac{VI}{c} dt$$

T é a temperatura do supercondutor

$T_0 = 77 \text{ K}$ é a temperatura inicial do supercondutor, igual a do nitrogênio líquido

$c = 1,5 \times 10^6 \frac{J}{Km^3}$ é o calor específico volumétrico do supercondutor

A resistividade é dada por:

$$\rho_t = \frac{E}{J}$$

Com E calculado a partir de (3.5).

Estado condutor

Para $T \geq T_c$

$$\rho_n = \rho_{T_c} \frac{T}{T_c}$$

ρ_n é a resistividade na região condutora a uma determinada temperatura

$\rho_{T_c} = 7 \times 10^6 \Omega m$ é a resistividade no início da região condutora, para a temperatura crítica de 95 K.

Para simulações em regime permanente, na condição pré falta utiliza-se a resistência do estado supercondutor e para o pós falta utiliza-se a resistência do estado condutor para a temperatura crítica (para resultados conservadores) ou um valor um pouco superior, já que o aquecimento após um período inicial será limitado pelo líquido refrigerante (N2).

I. Circuito ressonante paralelo

Uma forma de limitar a corrente de curto é com o uso de circuitos ressonantes.

Em regime a impedância equivalente é a do capacitor, pois o secundário pode ser considerado um circuito aberto. Durante a falta a impedância é o paralelo entre o capacitor e a impedância de curto do transformador, já que o secundário é praticamente curto-circuitado pelo ZnO

O modelo no programa ATP é apresentado na Fig. 12.

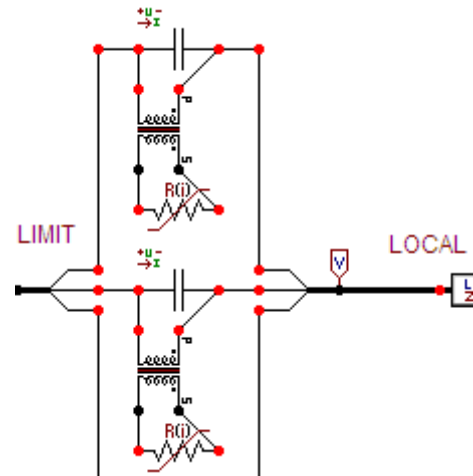


Fig. 12 – Modelo no ATP para o limitador com circuito ressonante paralelo.

J. Circuito ressonante série

A seguir algumas possíveis configurações de limitadores ressonantes série:

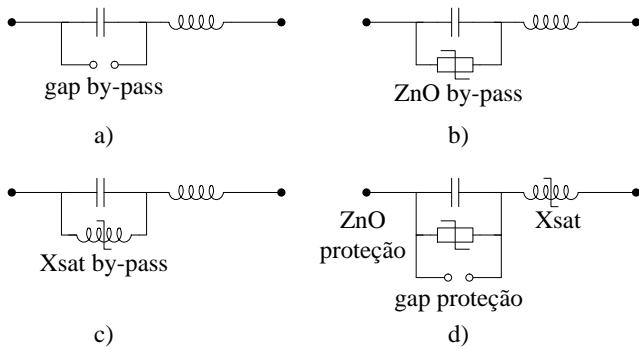


Fig. 13 – Configurações de limitadores ressonantes série.

A Fig. 14 mostra uma rede simples com o modelo no programa ATP para o limitador do tipo c).

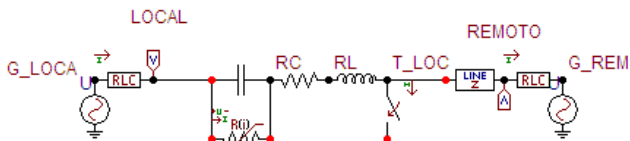


Fig. 14 – Modelo do limitador ressonante série tipo b).

Em condição pré-falta, no regime permanente, a impedância do limitador é a associação em série do capacitor com o reator, com sua reatância com núcleo de ferro no caso de reatores saturáveis.

No caso de curto a impedância, para cada um dos quatro tipos será:

- Impedância do reator
- Paralelo da capacitância com a reatância de núcleo de ar (X_{sat}) em série com o reator
- Soma da impedância do capacitor com a reatância de núcleo de ar (X_{sat})

III. AVALIAÇÃO DA APLICAÇÃO DE DLC'S

Foram avaliados os efeitos na corrente de curto e na tensão de restabelecimento de vários dispositivos limitadores de curto.

A. Rede elétrica e casos analisados

Os estudos foram feitas para uma rede elétrica com linhas de 230 kV e geração em 13,8 kV, indicada na Fig. 15.

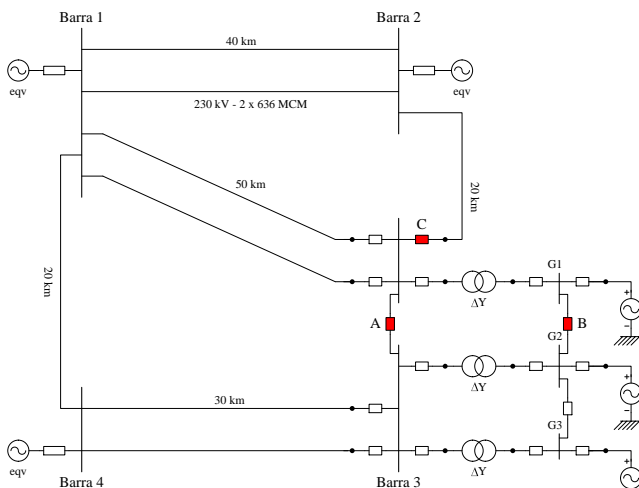


Figura 15 – Rede elétrica para estudo dos dispositivos limitadores de curto.

Foi avaliada a influência do uso de um único limitador de curto em cada caso, instalado em um dos pontos indicados em vermelho A, B ou C que originalmente são disjuntores.

B. Rede com IPC 120

O Intherphase Power Controller foi alocado em série com a linha de 20 km entre as barras 2 e 3.

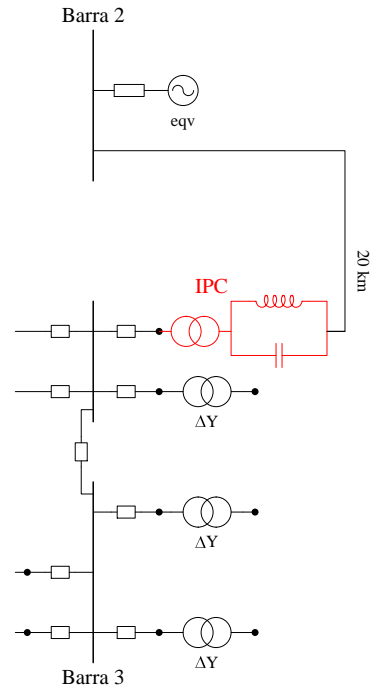


Fig. 16 – Local de instalação do IPC 120.

Supondo-se um caso com um IPC 120 com relação de transformação 1:1 e reatâncias jX_1 e $-jX_1$ para o reator e o capacitor, a corrente imposta em regime seria:

$$I_A = \frac{-V_B - V_A}{jX_1} + \frac{-V_C - V_A}{-jX_1} = \frac{V_C}{jX_1} + \frac{V_B}{-jX_1} =$$

$$\frac{V_B - V_C}{-jX_1} = \frac{V_{BC}}{X_1} \angle 90^\circ = \frac{V_A \sqrt{3}}{X_1}$$

Onde V_A é a tensão de fase e a corrente está em fase com a tensão e I_A é a corrente na linha, indo da barra 3 para a barra 2.

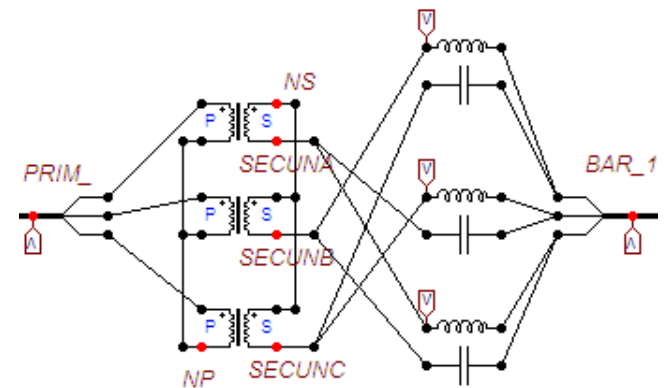


Fig. 17 – Modelo do IPC 120.

O IPC foi modelado com transformador ideal e reatâncias

de 1000Ω , de forma que a corrente imposta na linha é de 231 A.

As correntes no reator e no capacitor ligados na fase A na saída do IPC (BAR_1) são as seguintes para a situação sem falta:

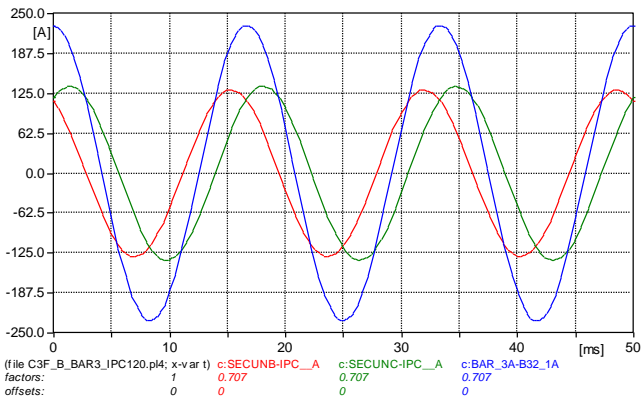


Fig. 18 – Correntes impostas na linha (Barra 3 – Barra 2) pelo IPC.

Observa-se que as correntes no indutor (vermelho) e no capacitor (verde) tem praticamente o mesmo módulo e formam um ângulo de cerca de 30 graus em relação à corrente imposta na linha (azul).

Além destes estudos digitais, foi feita uma montagem experimental, em escala reduzida, de um IPC 120. Nesta montagem foram observados diversos problemas de operação, como por exemplo a presença de não linearidades introduzindo impacto nos resultados. Maiores investigações neste sentido deverão ser efetuadas com este equipamento, sendo objeto de publicações futuras

C. Rede com limitadores ressonantes série

Esses limitadores foram aplicados de forma a seccionar a barra 3 em 2 seções substituindo o disjuntor.

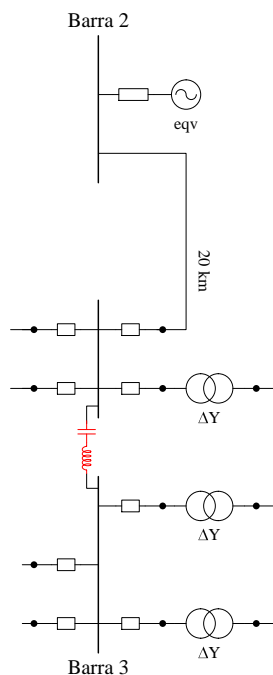


Fig. 19 – Alocação do limitador ressonante série.

Foram consideradas as seguintes opções para os circuitos

ressonantes série:

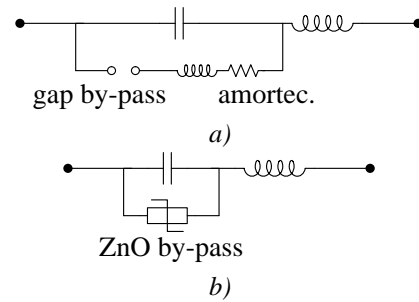


Fig. 20 – Limitadores ressonantes avaliados.

O reator adotado é de 26,5 mH ou $10,0 \Omega$ com fator de qualidade 50 ou seja resistência de $0,2 \Omega$. O valor da capacitância deve ser corresponde a uma reatância de 10Ω , ou seja $265 \mu\text{F}$.

D. Circuito ressonante série do tipo a)

O gap foi ajustado para disparar com 70 kVp, o circuito de amortecimento adotado foi similar ao utilizado em capacitores série, ou seja, 2Ω com $X/R = 50$.

Comparando-se a corrente de curto trifásico sem e com o circuito ressonante série do tipo a) tem-se:

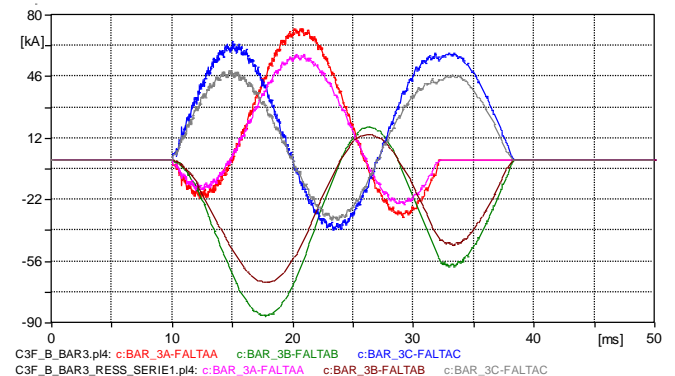


Fig. 21 – Comparação da corrente de curto trifásico na barra 3 – rede sem limitador e com circuitos ressonantes série do tipo a).

A redução da corrente de falta foi de 19,5%.

E. Rede com dispositivo pirotécnico

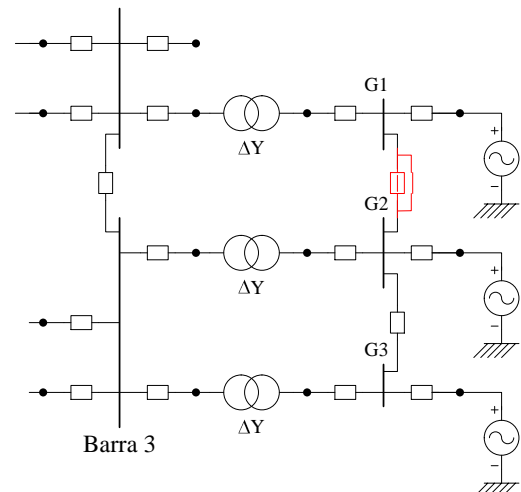


Fig. 22 – Alocação do dispositivo pirotécnico.

A carga explosiva foi ajustada para atuar com a corrente

de 11 kAp e o ponto de alocação está indicado a seguir (mesmo dos outros limitadores).

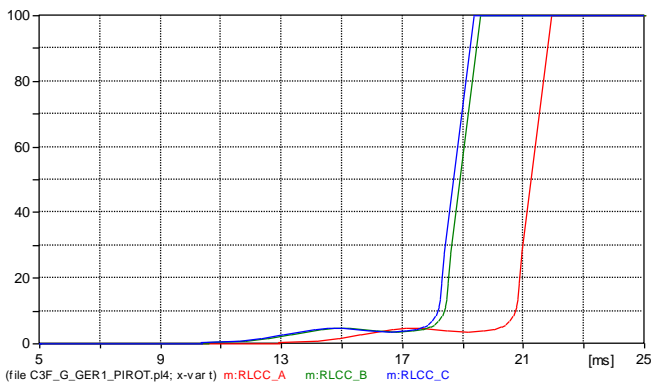


Fig. 23 – Curva resistência tempo do fusível do dispositivo pirotécnico.

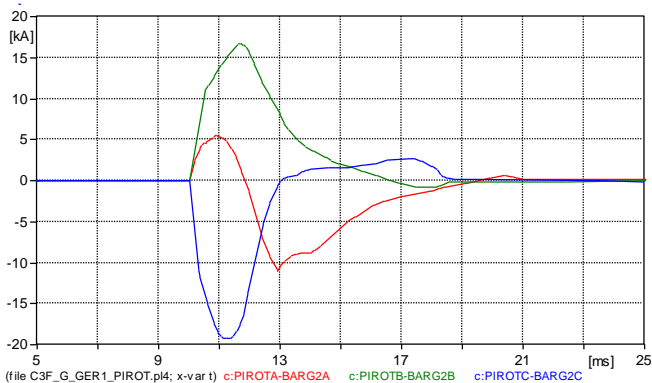


Fig. 24 – Corrente no dispositivo pirotécnico.

Pode-se notar os pontos de descontinuidade nas correntes que são os pontos de entrada da curva resistência x tempo.

Comparando-se a corrente de curto trifásico sem e com o dispositivo pirotécnico tem-se:

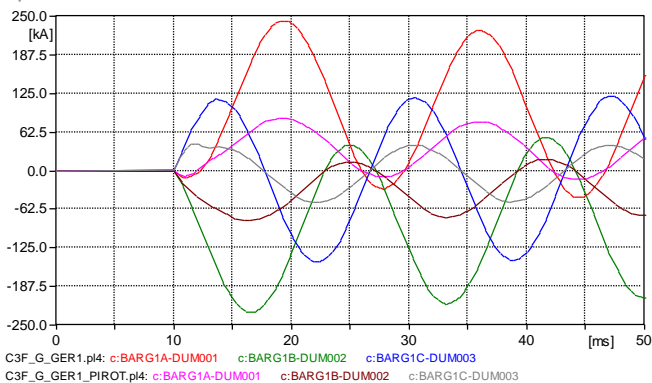


Fig. 25 – Comparação da corrente de curto trifásico na barra do gerador G1 – rede sem limitador e com dispositivo pirotécnico.

A redução da corrente de falta foi de 63,6%.

Os resultados para curto fase-terra são os seguintes:

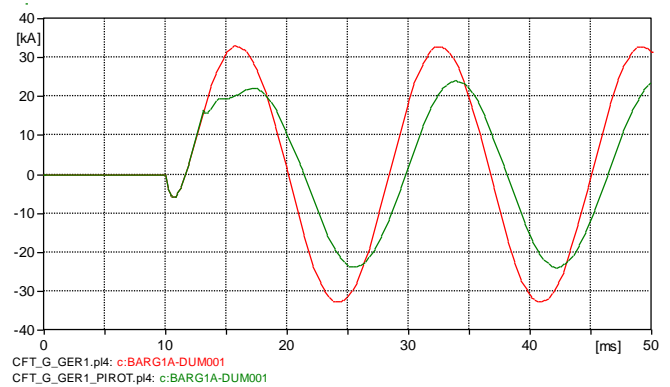


Fig. 26 – Comparação da corrente de curto fase-terra na barra do gerador G1 – rede sem limitador e com dispositivo pirotécnico.

Nesse caso verifica-se que a redução de falta corrente de falta fase-terra é menor (24,3%) pois essa corrente é bastante inferior à de falta trifásica e o ajuste do dispositivo pirotécnico é de 11 kAp, demorando mais para atuar.

F. Rede com limitador supercondutor resistivo

A simulação do limitador supercondutor resistivo apresenta como principal constante a ser ajustada, o expoente n da função exponencial da região de transição entre os estados supercondutor e condutor, de forma que não haja grande descontinuidade na resistividade.

$$E = E_0 \left(\frac{J}{J_{c77}} \right)^n$$

Nesse caso foi utilizado o valor $n = 4$.

Comparando-se a corrente de curto trifásico sem e com o limitador supercondutor resistivo tem-se:

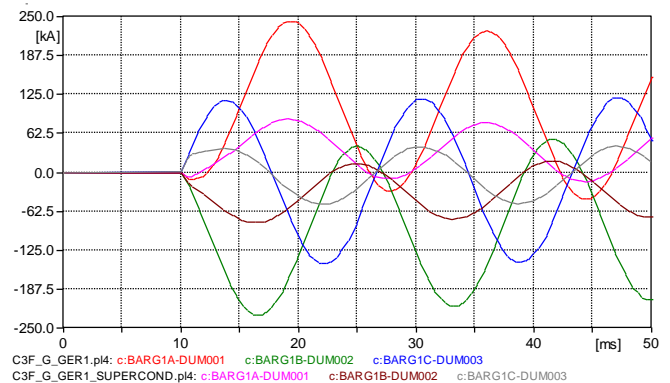


Fig. 27 – Comparação da corrente de curto trifásico na barra do gerador G1 – rede sem limitador e com limitador supercondutor resistivo.

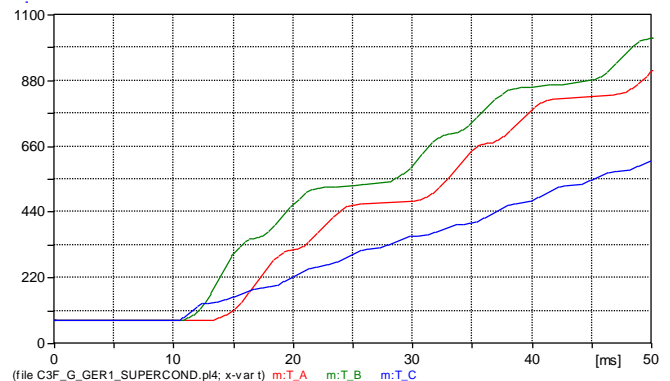


Fig. 28 – Temperatura da resistência supercondutora.

Verifica-se que nesse caso a elevação de temperatura foi grande devendo ser avaliada alguma medida como alteração da geometria do supercondutor para diminuir o aquecimento.

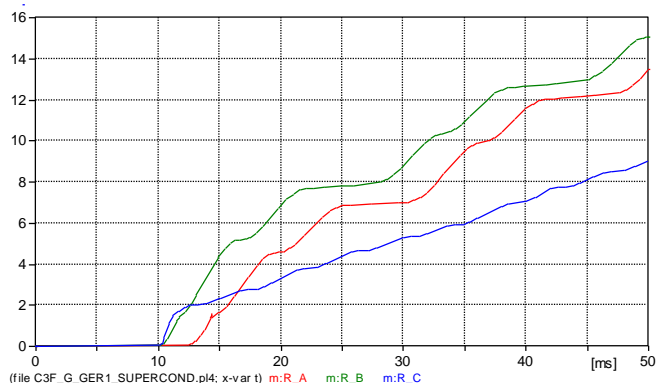


Fig. 29 – Resistência do limitador supercondutor.

A redução da corrente de falta foi de 65,1%.

Verifica-se que o ponto de descontinuidade nas correntes é bastante próximo ao dos casos com dispositivo pirotécnico.

Os resultados para curto fase-terra são os seguintes:

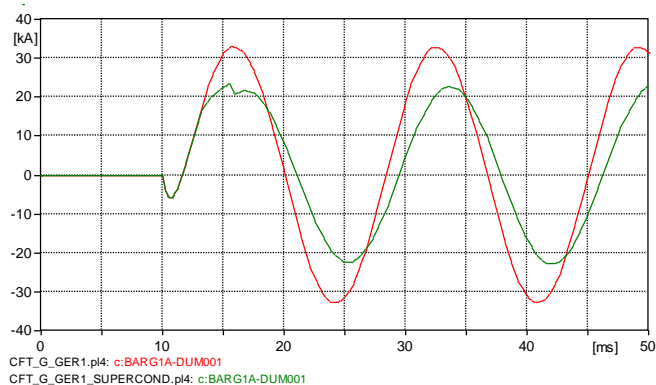


Fig. 30 – Comparação da corrente de curto fase-terra na barra do gerador G1 – rede sem limitador e com limitador supercondutor resistivo.

A redução na corrente de falta fase-terra foi de 29,9%.

G. Comentários

De forma a facilitar a comparação dos resultados obtidos, para a rede estudada, foi elaborada a tabela a seguir que mostra a redução da corrente de curto para cada alternativa.

Enquanto os gráficos anteriores apresentam o comportamento da corrente em regime transitório, nesta tabela são mostrados os resultados obtidos em regime permanente.

Os resultados mostram que o IPC foi o dispositivo que permitiu a maior redução na corrente de curto na barra 3 de 230 kV, se aproximando bastante da situação com seccionamento de barramento. Os demais limitadores de alta tensão (230 kV) tiveram desempenho similar.

Os circuitos ressonantes com uso de resistores ZnO apresentaram problemas de energia nos mesmos, mostrando dificuldades na aplicação prática.

Tipo limitador	barra curto	redução	redução
IPC 120	B3	27,3%	29,9%
IPC 240	B3	27,3%	29,9%
ress. série a)	B3	19,5%	13,5%
ress. série b)	B3	12,2%	4,5%
ress. paral.	B3	23,6%	32,6%
reator ar	B3	18,2%	13,1%
	G1	63,6%	59,6%
secc. barra	B3	33,4%	37,2%
	G1	65,2%	66,6%
pirotécnico	G1	65,1%	27,1%
ins. reator / pirotécnico	G1	63,6%	24,3%
resist. aterr.	G1	-	89,7%
resist. supercond.	G1	65,1%	29,9%

O limitador ressonante paralelo, apesar de reduzir satisfatoriamente a corrente de curto, apresenta correntes elevadas nos elementos em paralelo.

Já para os casos de curto na barra do gerador 1 (13,8 kV), o desempenho dos diferentes tipos de limitadores foi muito próximo, dessa forma a escolha do limitador em casos reais devendo recair em critérios de custo.

IV. APLICATIVO PARA ANÁLISE DE LIMITADORES DE CURTO

O aplicativo foi desenvolvido para o ambiente Windows na linguagem Delphi, usando a versão livre Turbo Delphi, o programa faz a leitura dos dados de um arquivo do programa e apresenta uma interface para inserção de dispositivos limitadores de curto verificando a redução na corrente de curto por meio dos resultados calculados pelo Anafas.

O aplicativo tem os seguintes recursos básicos:

- Leitura do arquivo de entrada do Anafas
- Inserção de elementos limitadores de curto no arquivo Anafas
- Execução do Anafas com o arquivo alterado
- Comparação dos resultados com e sem alterações (aplicação de limitadores)
- Fornecimento de modelos de limitadores para o programa ATP.

O aplicativo foi desenvolvido de forma a facilitar o controle dos dispositivos utilizados de forma simples e intuitiva e fornecendo o modelo de limitadores para utilização no programa ATP.

		curto trifásico	curto fase terra
--	--	-----------------	------------------

A. Tela inicial

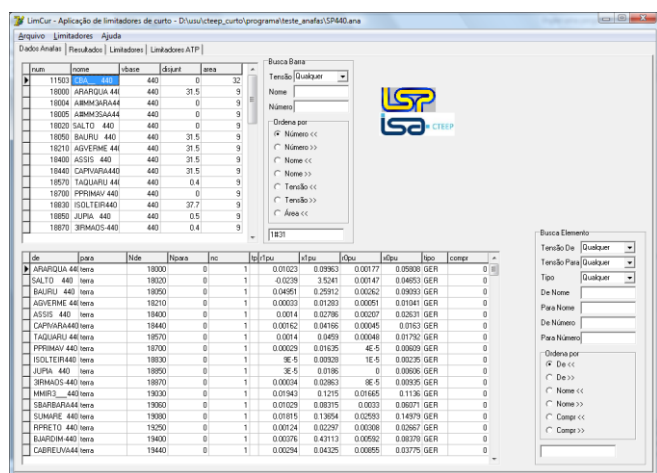


Fig. 31 – Tela inicial do programa.

O programa faz a leitura do arquivo de Anafas e converte para tabelas de banco de dados.

Na tela inicial é possível fazer busca de barras e linhas usando os campos específicos de busca por nome, tipo de ligação, número e nome de barra, etc.

B. Tela de visualização de resultados

A segunda tela do programa é para visualização de resultados.

Nessa tela podem ser selecionadas as barras que se deseja ver os resultados de curto.

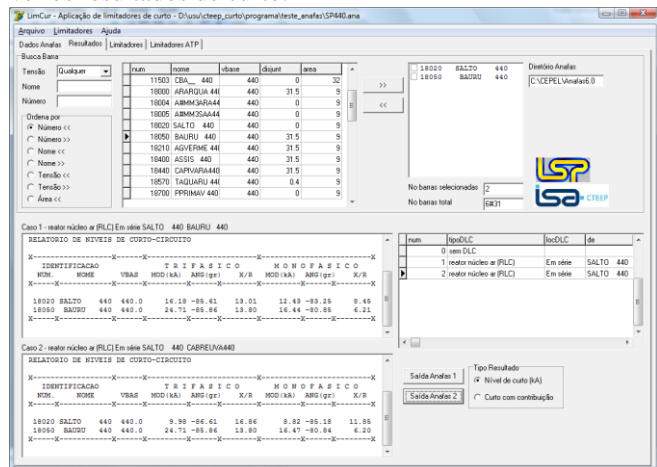


Fig. 32 Tela de comparação de resultados.

Para auxiliar a escolha das barras, pode ser feita a pesquisa por tensão, nome ou número.

C. Tela de inserção de limitadores de curto

Nessa tela são escolhidos os limitadores a serem inseridos na rede, sendo feita a escolha do tipo, do modo de instalação (em série ou seccionando barra), os parâmetros do limitador e do local de instalação.

Na Fig. 33 a seguir é mostrado o caso de um reator com núcleo de ar a ser instalado na linha Salto-Bauru (no terminal Salto) com valor de 20 Ω, X/R=50 e Vnom=440 kV.

Nessa tela é mostrado o arquivo de alteração do caso base (.alt) sendo também atualizada a lista de limitadores inseridos.

A seguir um exemplo com inserção um reator na linha

Salto-Cabreuva em Cabreuva após a inserção de um reator na linha Salto-Bauru (no terminal Salto) com valor de 20 Ω, X/R=50 e Vnom=440 kV.

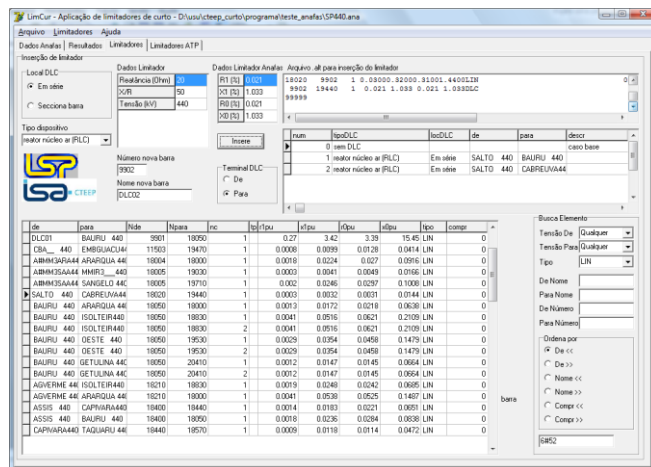


Fig. 33 – Tela de inserção de DLC's (Salto-Bauru)

As alterações são acumulativas ou seja, o caso 2 consiste na instalação de 2 reatores com núcleo de ar cada um em 1 linha.

Para o caso de inserção de limitadores seccionando barras a tela é a seguinte, mostrando uma situação em que foi selecionada a barra S.Bárbara 440 colocando as linhas S.Bárbara-Araraquara e S.Bárbara Sumaré na barra nova correspondente ao DLC escolhido.

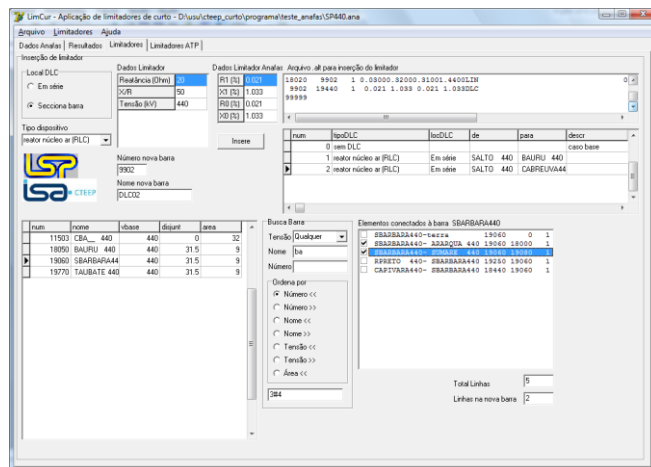


Fig. 34 – Definição do seccionamento de barra para instalação de DLC.

Verifica-se que nas telas do programa sempre existe a opção de busca por nome, número, tensão, etc.

D. Tela de modelos para simulação no ATP

Nessa tela são fornecidos os modelos de limitadores a serem usados no programa ATP.

O usuário escolhe o tipo de limitador, o nome das barras entre as quais ele será instalado e os parâmetros.

Na Fig. 35 um caso de circuito ressonante série com disparo via gap.

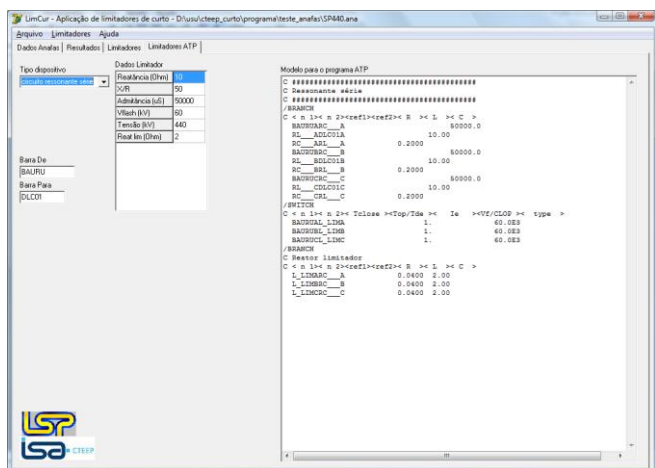


Fig. 35 – Modelo ATP circuito ressonante série com disparo via gap.

O modelo apresentado pode ser selecionado e copiado para inserção em arquivo de entrada do ATP no modo texto.

V. CONCLUSÕES

Nesse projeto foram desenvolvidos modelos de dispositivos limitadores de curto para aplicação no programa de transitórios eletromagnéticos e também para aplicação no programa de cálculo de curto em regime permanente.

Com os modelos de limitadores de curto, o efeito destes dispositivos podem ser avaliados em transitórios, utilizando o programa ATP.

O aplicativo para avaliação dos DLC's em regime permanente facilita a tarefa de avaliação dos pontos de instalação de limitadores utilizando o programa Anafas, através da leitura, alteração e execução de casos de curto.

VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. Amon F., P. C. Fernandez, E. H. Rose, A. D'Ajuz, A. Castanheira, "Brazilian Successful Experience in the Usage of Current Limiting Reactors for Short-Circuit Limitation," International Conference on Power Systems Transients (IPST'05), Montreal, Canada, June 19-23, 2005, Paper No. IPST05 - 215
- [2] C. Machado, Jr. N. Fukuoka ; E.A.Rose ; A. Violin ; M.L.B. Martinez; C.A.M. Saraiva, "Switching a series reactor - a concept developed to limit the level of short circuit currents," IEEE Power Tech Proceedings, 2001, Porto, Vol.3, 10-13 Sept. 2001, p. 6
- [3] ABB Calor Emag Mittelspannung GmbH, Limitador IS, Folheto n.º DECMS 2243 02 PT, Alemanha.
- [4] A. D'Ajuz, "Limitação de Curto-Circuito em Sistemas de Potência," IEEE PES 2007, Brasília, palestra.
- [5] N. Ottosson, L. Kjellin, "Modular Back-to-Back HVDC, with capacitor commutated converters (CCC)," AC-DC Power Transmission, 28-30 Nov 2001, Conference Publication no. 485, IEE, p. 55-59
- [6] ABB, HVDC Ligth, <http://www.abb.com/hvdc>
- [7] J. Brochu; P. Pelletier; F. Beauregard;G. Gaston "The Interfase Power Controller- A New Concept for Managing Power Flow Within AC Networks" IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, No. 2, April 1994.
- [8] J. Brochu E Beauregard G. Morin J. Lemay P. Pelletier S. Khair "The IPC Technology - A New Approach for Substation Uprating with Passive Short-circuit Limitation", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, No. 1, January 1998.
- [9] Kamal Habashi Jean-Jacques Lombard Sami Mourad, "The Design of a 200 MW Interphase Power Controller", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, No. 2, April 1994.
- [10] J. Bmhu E Beauregard J. Lemay. "Steady-State Analysis of Power Flow Controllers using the Power Controller Plane", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, No. 3, July 1999.

- [11] G. Sybille, Y. Haj-Mahani, G. Morin, E. Beauregard, J. Brachu J. Lemay P. Pelletier "Simulator Demonstration of the Interfase Power Controller Technology", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 4, October 1996.
- [12] F. Beauregard Jacques Brochu Gaston Morin Pierre Pelletier "Interphase Power Controller with Voltage Injection", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, No. 4, October 1994.
- [13] J. Brochu, F. Sirois, L. Garant, J. Allard "Comparison of Substation Uprating Techniques Using a Novel Graphical Method Based on System Planning Constraints", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 22, no. 3, July 2007.
- [14] J. Brochu, J. Lemay. "Optimization of the fault-current limiting transformer (FCLT)", IEEE Power Engineering Letter, Jan 2001.
- [15] C. Gama, L. Ängquist, G. Ingeström, M. Noroozian, "Commissioning and Operative Experience of TCSC for Damping Power Oscillation in the Brazilian North-South Interconnection," Cigre Session 2000, 14-104, Paris.
- [16] R. Orizondo, R. Alves, "UPFC Simulation and Control Using the ATP/EMTP and MATLAB/Simulink Programs," Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America, 2006. TDC '06. IEEE/PES, 15-18 Aug. 2006 p.1 - 7
- [17] M.L. Kothari, N. Tambey, "Design of UPFC controllers for a multimachine system, Power Systems Conference and Exposition," IEEE PES2004, 10-13 Oct. 2004, p. 1483 - 1488, vol. 3.
- [18] L.C. Zanetta Jr., M. Pereira, "Limitation of Line Fault Currents with the UPFC," International Conference on Power Systems Transients (IPST'07), Lyon, France, June 4-7, 2007.
- [19] F. Mumford, "Superconducting fault current limiters," IEE Colloquium on a Look at Tomorrow, 8 Jun 1995, p. 6/1 - 6/7.
- [20] Adelwitz Technologiezentrum GmbH (ATZ), High Temperature Superconductors (HTS), <http://www.atz-gmbh.com/HTS/hts.html>
- [21] J. Langston, M. Steurer, S. Woodruff, T. Baldwin, J. Tang, "A generic real-time computer Simulation model for Superconducting fault current limiters and its application in system protection studies," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 15, No. 2, Part 2, June 2005, p. 2090 - 2093.
- [22] S.S. Kalsi, A. Malozemoff, HTS fault current limiter concept, IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2004, 10-10 June 2004, p. 1426 - 1430, vol. 2.
- [23] S. Kozak, T. Janowski, "Physical and numerical models of superconducting fault current limiters," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 13, no. 2, Part 2, June 2003, p. 2068 - 2071.
- [24] H. Kado, M. Shibuya, T. Matsumura, M. Ichikawa, "Inductive type fault current limiter with Bi-2223 thick film on a MgO cylinder," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 13, no. 2, part 2, June 2003, p. 2004 - 2007
- [25] B.W. Lee, K.B. Park, J. Sim, I.S. Oh, H.G. Lee, H.R. Kim, O.B. Hyun, "Design and Experiments of Novel Hybrid Type Superconducting Fault Current Limiters," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 18, no. 2, June 2008, p. 624 - 627.
- [26] K. Furushiba, T. Yoshii, Y. Shirai, K. Fushiki, J. Baba, T. Nitta, "Power System Characteristics of the SCFCL in Parallel With a Resistor in Series With a ZnO Device," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 17, no. 2, part 2, June 2007, p. 1915 - 1918.
- [27] G.G. Karady, "Concept of a combined short circuit limiter and series compensator [power lines]," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 6, no. 3, July 1991, p. 1031 - 1037.
- [28] X. Zhang; L. Ming, "Using the Fault Current Limiter With Spark Gap to Reduce Short-Circuit Currents," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 23, no. 1, Jan. 2008, p. 506 - 507.
- [29] H.G. Sarmiento, "A fault current limiter based on an LC resonant circuit: Design, scale model and prototype field tests," Bulk Power System Dynamics and Control - VII. Revitalizing Operational Reliability, 2007 iREP Symposium, 19-24 Aug. 2007, p. 1 - 5.
- [30] M.M. Lanes, H.A.C. Braga, P.G. Barbosa, "Limitador de Corrente de Curto-Circuito Baseado em Circuito Ressonante Controlado por Dispositivos Semicondutores de Potência," IEEE Latin America Transactions, vol. 5, no. 5, September 2007, p. 311-320.
- [31] S. Sugimoto, J. Kida, H. Arita, C. Fukui, T. Yamagiwa, "Principle and characteristics of a fault current limiter with series compensation," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 11, no. 2, April 1996, p. 842 - 847.
- [32] EPRI Electric Power Research Institute, Solid-State Fault Current Limiters (SSFCL), 2008, http://www.sandia.gov/ess/Publications/Conferences/2008/PR08_Presentations/sundaram_epri.pdf

- [33] R. Strumpler, J. Skindhoj, J. Glatz-Reichenbach, J.H.W. Kuhlefeld, F. Perdoncin, "Novel medium voltage fault current limiter based on polymer PTC resistors," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 14, no. 2, April 1999, p. 425 – 430.
- [34] L. Ye, K.P. Juengst, "Modeling and Simulation of High Temperature Resistive Superconducting Fault Current Limiters," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 14, No. 2, June 2004, p. 839 – 842.