

GRUPO DE ESTUDO DE PROTEÇÃO, MEDIÇÃO E CONTROLE EM SISTEMAS DE POTÊNCIA

**PROTEÇÃO DE DISTÂNCIA PARA LINHAS DE TRANSMISSÃO
COM COMPENSAÇÃO SÉRIE**

José Geraldo Barreto Monteiro de Andrade*

Eduardo Cesar Senger

Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas – PEA
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - USP

RESUMO

Esse artigo apresenta e analisa o desempenho de um algoritmo de proteção digital de distância para linhas de transmissão com compensação série. O algoritmo proposto é capaz de calcular a distância da falta, com precisão e rapidez, a partir das tensões e correntes medidas na barra local. O cálculo é feito considerando a existência de compensação série na linha através de um modelo simplificado do banco de capacitores.

PALAVRAS-CHAVE

Linhas com compensação série. Relés de distância.

1.0 - INTRODUÇÃO

O aumento do consumo de energia nos grandes centros urbanos e os elevados custos envolvidos na ampliação dos sistemas de geração e transmissão têm levado grandes empresas e centros de pesquisa a concentrarem esforços na pesquisa e desenvolvimento de meios para melhorar a eficiência dos sistemas de transmissão já existentes.

Uma grande contribuição nesse sentido foi a utilização de compensação série em linhas de transmissão, uma vez que esta proporciona um aumento da capacidade de transferência de potência sem causar uma diminuição dos limites de estabilidade do sistema. Entretanto, para que sua aplicação seja possível, é necessário um estudo de seus efeitos nos sistemas de proteção de distância.

Atualmente, existem algoritmos para proteção de distância de linhas que permitem detectar a localização da falta com precisão e rapidez satisfatórias. Entretanto, o uso da compensação série introduz erros nesses algoritmos que inviabilizam sua utilização, a citar: perda de direcionalidade e aumento do alcance da primeira zona.

O trabalho apresentado neste artigo propõe um algoritmo para proteção de distância de linhas com

compensação série que utilizam pára-raios de óxido de zinco. O algoritmo baseia-se em uma modelagem do conjunto capacitor – pára-raios através de uma equação diferencial, similar ao proposto na referência (1). A solução dessa equação, a cada instante de tempo, permite calcular a queda de tensão no banco de capacitores e, desse modo, efetuar a correção da tensão medida na barra do relé. A impedância da linha até o ponto de ocorrência do defeito é calculada a partir dos valores da tensão corrigida e da corrente medida na barra, utilizando um modelo de primeira ordem para a linha de transmissão.

2.0 – MODELAGEM DO BANCO DE CAPACITORES

Na Figura 1 é apresentado um esquema simplificado da proteção de sobretensão utilizada atualmente em bancos de capacitores série.

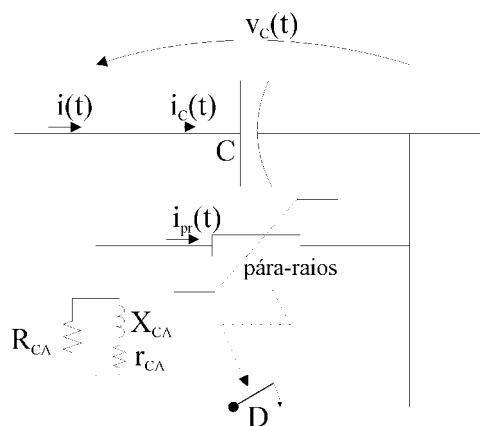


FIGURA 1 – PROTEÇÃO UTILIZADA EM CAPACITORES SÉRIE

onde:

*Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas – PEA
Av. Professor Luciano Gualberto, travessa 3, n. 158 – Cidade Universitária
CEP 05508-900 - São Paulo - SP – Brasil email: jgeraldo@pea.usp.br

- R_{CA} Resistência do circuito amortecedor.
 r_{CA} Resistência do reator do circuito amortecedor.
 X_{CA} Reatância do reator do circuito amortecedor.

Durante o regime permanente a tensão sobre o banco de capacitores série se mantém sempre inferior a um valor máximo especificado $V_{m\acute{a}x}$ e assim não ocorre condução significativa de corrente pelo pára-raios, conforme pode ser observado na Figura 2.

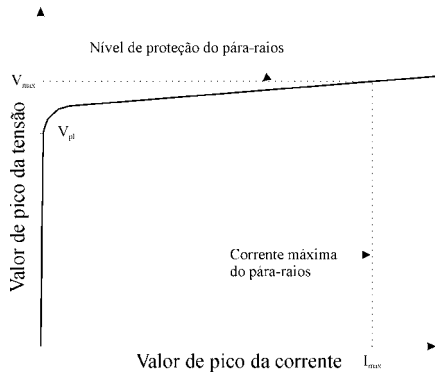


FIGURA 2 – CARACTERÍSTICA DO PÁRA-RAIOS

Por ocorrência de um defeito na linha de transmissão, a tensão sobre o capacitor série pode superar o nível de proteção $V_{m\acute{a}x}$ em alguns instantes do transitório. Nesses instantes, há condução de uma parcela significativa da corrente de defeito através do pára-raios retirando, quase que totalmente, o capacitor do circuito de falta. À medida que o defeito se extingue, o pára-raios reinsere gradualmente o capacitor na linha. Esse tipo de comportamento pode ser modelado com precisão suficiente por (1).

$$i_{pr}(t) = K \cdot \left(\frac{v_c(t)}{V_{pl}} \right)^\alpha \quad (1)$$

O disjuntor D tem a função de proteger o pára-raios nos casos em que sua energia se torne excessiva durante os intervalos de condução. Nessas situações, ele é acionado pelo controle da proteção térmica possibilitando a dissipação de energia através do circuito de amortecimento composto por R_{CA} e X_{CA} . A Figura 3 mostra o modelo usado para curto na linha.

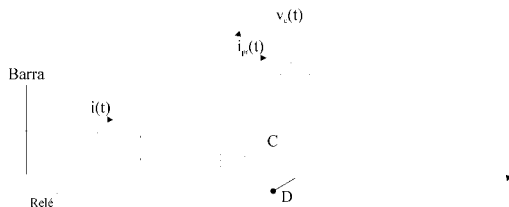


FIGURA 3 – MODELAGEM DA COMPENSAÇÃO SÉRIE

A partir da Figura 3 pode-se escrever (2).

$$\frac{dv_c(t)}{dt} = \omega \cdot X_C \cdot [i(t) - i_{pr}(t)] \quad (2)$$

Substituindo (1) em (2).

$$\frac{dv_c(t)}{dt} = \omega \cdot X_C \cdot \left[i(t) - K \cdot \left(\frac{v_c(t)}{V_{pl}} \right)^\alpha \right] \quad (3)$$

E integrando (3) no tempo.

$$v_c(t) = v_c(0) + \omega \cdot X_C \cdot \int_0^t \left[i(t) - K \cdot \left(\frac{v_c(t)}{V_{pl}} \right)^\alpha \right] \cdot dt \quad (4)$$

A equação (4) relaciona a queda de tensão na compensação série $v_c(t)$ com a corrente que atravessa a linha de transmissão $i(t)$ para as situações em que o disjuntor D está aberto.

Nas situações em que o disjuntor D é acionado, a corrente da linha $i(t)$ é quase completamente desviada para o capacitor e o circuito de amortecimento. Nessa situação, a impedância do banco pode ser aproximada pela resistência do reator de amortecimento r_{CA} .

$$v_c(t) = r_{CA} \cdot i(t) \quad (5)$$

Do exposto, pode-se observar dois estados possíveis de operação do banco de capacitores. O primeiro se caracteriza pela presença do conjunto capacitor pára-raios no circuito de falta e pode ser modelado por (4). Por sua vez, o segundo estado, correspondente ao acionamento do disjuntor D pelo circuito de proteção térmica do pára-raios, pode ser modelado por (5). A distinção entre essas duas condições de operação do banco é realizada por meio do cálculo de energia e potência do pára-raios utilizando os valores de corrente e tensão calculadas respectivamente em (1) e (4). Essas etapas são detalhadas a seguir.

Os sinais de tensão e corrente obtidos da barra local são acondicionados por um filtro analógico passa-baixa com frequência de corte igual a 280 Hz. Uma vez filtrados, esses sinais são amostrados a uma taxa de 16 amostras por ciclo.

Após isso, a queda de tensão no banco de capacitores série é calculada a partir das amostras de corrente da linha utilizando (4). Verificou-se que a integração numérica não atinge precisão suficiente quando é feita usando a frequência de amostragem do relé. Assim, optou-se por interpolar N valores de corrente $i^*(j)$ entre cada duas amostras $i(k-1)$ e $i(k)$ utilizando (6).

$$i^*(j) = \left[\frac{i(k) - i(k-1)}{N+1} \right] \cdot j + i(k-1) \quad (6)$$

A Figura 4 ilustra o erro cometido na interpolação de N valores $i^*(j)$ entre as amostras $i(k-1)$ e $i(k)$.

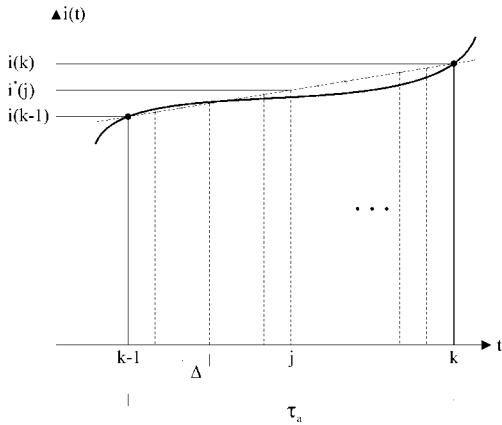


FIGURA 4 – INTERPOLAÇÃO DAS AMOSTRAS DE CORRENTE

Assim, o período de amostragem é dividido por $N+1$, aumentando a precisão no cálculo da tensão sobre o capacitor em (7). No caso, obteve-se uma boa precisão interpolando cinco valores de corrente ($N=5$), perfazendo um total de 96 pontos por ciclo.

$$v_c(j) = v_c(j-1) + \omega \cdot X_c \cdot \left[i(j-1) - K \cdot \left(\frac{v_c(j-1)}{V_{pl}} \right)^\alpha \right] \cdot \Delta t \quad (7)$$

Como as tensões das fases do banco de capacitores no instante inicial $v_c(0)$ não eram conhecidas, optou-se por considerá-las nulas. Devido a isso, cada um das tensões calculadas utilizando (7) apresentou um nível DC em relação ao correspondente valor real. Para eliminá-lo, as tensões foram submetidas a um filtro digital passa-alta com frequência de corte igual a 5 Hz. A Figura 5 mostra a tensão real juntamente com as tensões calculadas usando (7) antes e após o filtro.

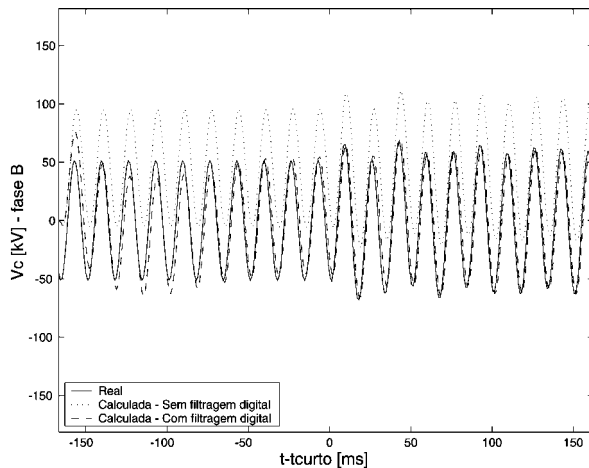


FIGURA 5 – EFEITO DO FILTRO DIGITAL NO CÁLCULO DA TENSÃO DO PÁRA-RAIOS

Observa-se que apesar de introduzir um atraso, o filtro digital diminuiu consideravelmente o erro na estimativa de $v_c(t)$.

A seguir, as correntes nos pára-raios são obtidas substituindo as tensões do banco de capacitores calculadas anteriormente em (1). Desse modo, a energia e a potência no pára-raios podem ser calculadas e comparadas com os valores de projeto. Assim é possível identificar o estado do disjuntor D e corrigir a tensão medida na barra do relé usando (8).

$$v_{\text{corrigido}}(k) = v_{\text{medido}}(k) - v_c(k) \quad (8)$$

Efetuada a compensação das tensões medidas pelo relé, procede-se ao cálculo da impedância aparente da linha envolvida no trecho faltoso. Esse cálculo é abordado no próximo item.

3.0 - CÁLCULO DA DISTÂNCIA DA FALTA

Efetuada a correção da tensão medida na barra, procede-se ao cálculo da resistência e reatância da linha envolvidas no circuito de falta.

Utilizando um modelo de primeira ordem para linha de transmissão pode-se escrever a seguinte equação, cometendo um erro $e(t)$.

$$v(t) = R \cdot i(t) + L \cdot \frac{di(t)}{dt} + e(t) \quad (9)$$

Aplicando (9) para os instantes de amostragem t , variando de 1 até m .

$$\begin{bmatrix} v(1) \\ v(2) \\ \vdots \\ v(m) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i(1) & \bar{i}(1) \\ i(2) & \bar{i}(2) \\ \vdots & \vdots \\ i(m) & \bar{i}(m) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R \\ L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e(1) \\ e(2) \\ \vdots \\ e(m) \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\text{onde: } \bar{i}(k) = \frac{i(k) - i(k-1)}{\tau_a}$$

Adotando uma notação matricial para (10).

$$\underline{v} = \underline{I} \cdot \underline{z} + \underline{e} \quad (11)$$

Resolvendo (11) de forma a minimizar a somatória do quadrado dos erros obtêm-se (12) e (13).

$$R = \frac{\sum_{j=1}^m (v_j \cdot i_j) \cdot \sum_{j=1}^m (\bar{i}_j)^2 - \sum_{j=1}^m (v_j \cdot \bar{i}_j) \cdot \sum_{j=1}^m (i_j \cdot \bar{i}_j)}{\sum_{j=1}^m (i_j)^2 \cdot \sum_{j=1}^m (\bar{i}_j)^2 - \left(\sum_{j=1}^m i_j \cdot \bar{i}_j \right)^2} \quad (12)$$

$$L = \frac{\sum_{j=1}^m (v_j \cdot \bar{i}_j) \cdot \sum_{j=1}^m (i_j)^2 - \sum_{j=1}^m (v_j \cdot i_j) \cdot \sum_{j=1}^m (i_j \cdot \bar{i}_j)}{\sum_{j=1}^m (i_j)^2 \cdot \sum_{j=1}^m (\bar{i}_j)^2 - \left(\sum_{j=1}^m i_j \cdot \bar{i}_j \right)^2} \quad (13)$$

Observa-se em (12) e (13) que o tamanho da janela utilizada para o cálculo da impedância de falta pode ser ajustado a partir do parâmetro m . Nas simulações utilizou-se uma janela de meio ciclo, $m=8$.

A Figura 6 apresenta um fluxograma do algoritmo abrangendo as etapas discutidas anteriormente.

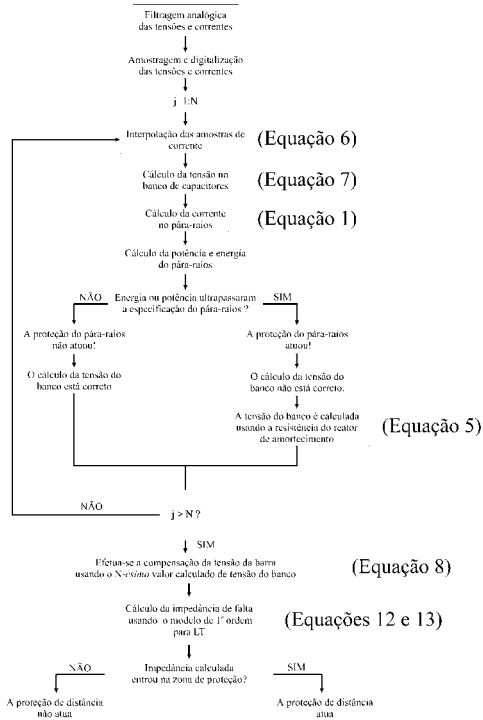


FIGURA 6 – FLUXOGRAMA DO ALGORITMO

4.0 – RESULTADOS

O algoritmo foi implementado em MATLAB e sua zona primária foi ajustada para proteger 85% da linha. As simulações foram realizadas para os dois sistemas de transmissão modelados no ATP, ver Figuras 7 e 8. Os parâmetros dos sistemas são fornecidos no apêndice.

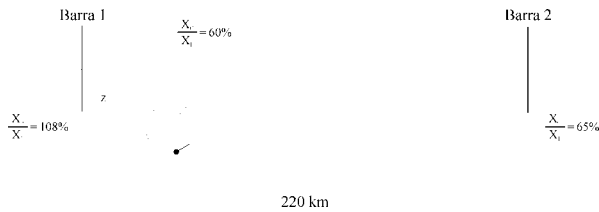


FIGURA 7 – SISTEMA 1: 60% DE COMPENSAÇÃO, RELÉ PRÓXIMO À CARGA



FIGURA 8 – SISTEMA 2: 60% DE COMPENSAÇÃO DISTRIBUÍDA, RELÉ PRÓXIMO À GERAÇÃO

A fim de verificar o funcionamento do algoritmo, 192 situações de curto foram simuladas para cada sistema variando-se: a distância da falta, o tipo de defeito, o ângulo de incidência e a resistência de curto.

- tipo de defeito: fase terra, dupla fase, dupla fase terra e trifásico;
- distância da falta: 30, 60, 110, 180, 200 e 210 km;
- ângulo de incidência: 0° e 90°;
- resistência de curto-circuito: 0, 5 e 10 Ω.

A seguir, apresentam-se tabelas que evidenciam a precisão do algoritmo frente à diferentes situações de falta. Para facilitar a análise dos resultados, as impedâncias teóricas são também fornecidas, em negrito, abaixo das distâncias de curto.

TABELA 1 : CURTOS FASE TERRA - SISTEMA 1

Distância [km]	Ângulo	R _{cc} [Ω]	Impedância [Ω]
60 1.38+j22.80 [Ω]	0°	0	1.65+j23.10
		5	5.83+j22.54
		10	9.90+j21.99
	90°	0	1.65+j23.10
		5	5.83+j22.54
		10	9.90+j21.99
170 3.91+j64.60 [Ω]	0°	0	4.54+j65.34
		5	15.64+j62.32
		10	26.00+j59.48
	90°	0	4.54+j65.34
		5	15.65+j62.32
		10	26.00+j59.48
200 4.60+j76.00 [Ω]	0°	0	5.09+j76.85
		5	25.64+j70.35
		10	43.69+j64.58
	90°	0	5.08+j76.85
		5	25.64+j70.35
		10	43.72+j64.58

TABELA 2 : CURTOS DUPLA FASE - SISTEMA 1

Distância [km]	Ângulo	R _{cc} [Ω]	Impedância [Ω]
60 1.38+j22.80 [Ω]	0°	0	1.26+j23.11
		5	5.01+j22.41
		10	8.68+j21.73
	90°	0	1.26+j23.11
		5	5.01+j22.41
		10	8.68+j21.73
170 3.91+j64.60 [Ω]	0°	0	3.86+j66.52
		5	12.73+j63.64
		10	21.11+j60.93
	90°	0	3.86+j66.52
		5	12.73+j63.64
		10	21.11+j60.93
200 4.60+j76.00 [Ω]	0°	0	4.59+j78.60
		5	18.80+j73.49
		10	31.77+j68.85
	90°	0	4.59+j78.60
		5	18.80+j73.49
		10	31.77+j68.84

TABELA 3 : CURTOS FASE TERRA - SISTEMA 2

Distância [km]	Ângulo	R_{cc} [Ω]	Impedância [Ω]
60 1.38+j22.80 [Ω]	0°	0	1.63+j22.86
		5	5.76+j22.29
		10	9.75+j21.73
	90°	0	1.62+j22.86
		5	5.75+j22.29
		10	9.74+j21.74
170 3.91+j64.60 [Ω]	0°	0	4.93+j65.75
		5	12.94+j64.41
		10	20.47+j63.09
	90°	0	4.44+j65.29
		5	14.85+j80.32
		10	20.55+j63.03
200 4.60+j76.00 [Ω]	0°	0	5.51+j77.51
		5	18.41+j75.50
		10	30.05+j73.54
	90°	0	5.00+j76.92
		5	18.59+j75.43
		10	30.21+j73.40

TABELA 4 : CURTOS DUPLA FASE - SISTEMA 2

Distância [km]	Ângulo	R_{cc} [Ω]	Impedância [Ω]
60 1.38+j22.80 [Ω]	0°	0	1.16+j22.64
		5	4.75+j22.11
		10	8.25+j21.60
	90°	0	1.16+j22.64
		5	4.61+j22.19
		10	7.97+j21.75
170 3.91+j64.60 [Ω]	0°	0	3.76+j66.05
		5	11.13+j64.72
		10	17.15+j63.95
	90°	0	5.82+j76.45
		5	13.02+j75.20
		10	19.87+j73.96
200 4.60+j76.00 [Ω]	0°	0	4.50+j78.13
		5	14.49+j76.89
		10	21.64+j76.32
	90°	0	6.44+j88.19
		5	16.84+j86.72
		10	23.50+j75.49

As figuras 9, 10, 11 e 12 apresentam os tempos de atuação obtidos para o algoritmo.

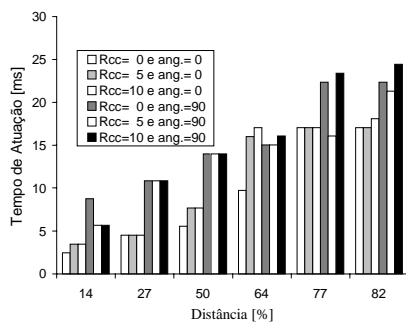


FIGURA 9 – TEMPOS DE ATUAÇÃO PARA OS CURTOS FASE TERRA - SISTEMA 1

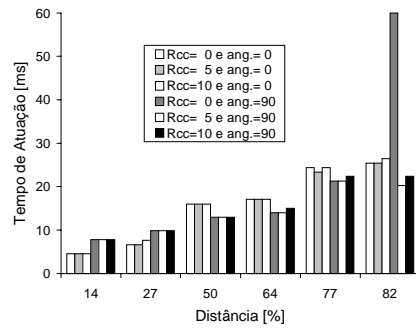


FIGURA 10 – TEMPOS DE ATUAÇÃO PARA OS CURTOS DUPLA FASE - SISTEMA 1

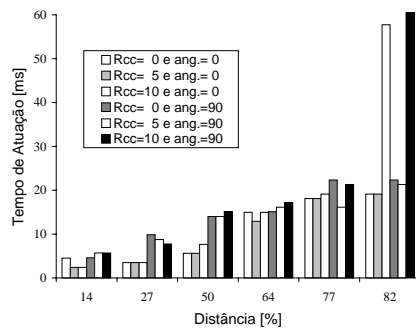


FIGURA 11 – TEMPOS DE ATUAÇÃO PARA OS CURTOS FASE TERRA - SISTEMA 2

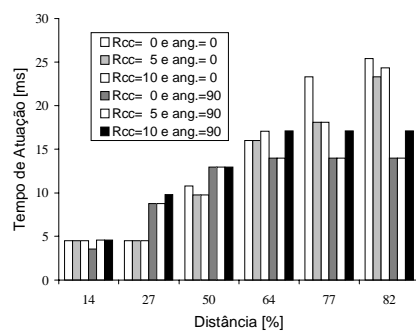


FIGURA 12 – TEMPOS DE ATUAÇÃO PARA OS CURTOS DUPLA FASE - SISTEMA 2

Conforme pode ser observado nas Tabelas 1, 2, 3 e 4 o algoritmo calculou a distância da falta com precisão satisfatória para os curtos simulados, inclusive nas situações em que a distância do defeito se encontrava próxima ao limite (190 km) ajustado para zona 1. Convém ressaltar que essa performance somente é atingida para curtos nos quais o capacitor se encontra entre o ponto de defeito e o relé.

Nas figuras 9 a 12, observa-se que o tempo de atuação do algoritmo foi inferior a 30 ms (1.8 ciclos) para a grande maioria dos curtos simulados. Percebe-se ainda que este superou 50 ms (3 ciclos) em apenas 3 casos dos 144 resultados fornecidos. Em todos eles os curtos se localizavam muito próximos à distância limite ajustada para a zona 1 (85%) e, por isso não devem ser considerados exemplos graves de erro de atuação do algoritmo.

As Figuras 13 a 15 mostram resposta do algoritmo para um curto dupla fase AB no sistema 2, localizado a 170 km do relé, com resistência de curto 10Ω e ângulo de incidência 90° .

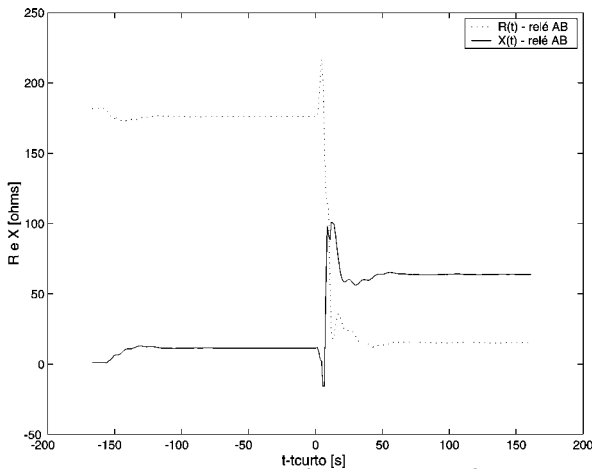


FIGURA 13 – RESISTÊNCIA E REATÂNCIA VERSUS TEMPO

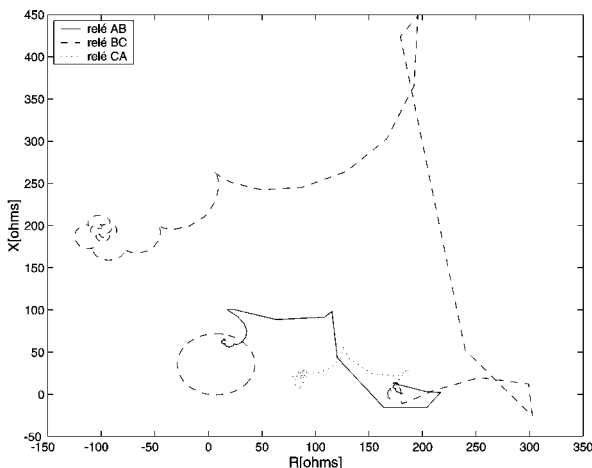


FIGURA 14 – PLANO RX – RELÉS DE FASE

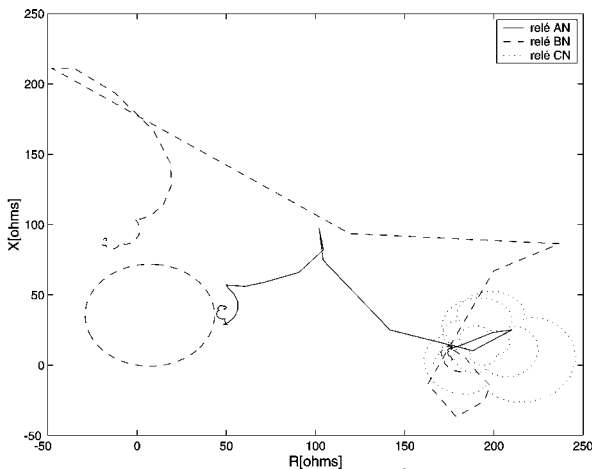


FIGURA 15 – PLANO RX – RELÉS DE TERRA

5.0 - CONCLUSÕES

Um algoritmo para proteção de distância de linhas de transmissão com compensação série foi apresentado. O algoritmo analisado calcula corretamente a distância da falta através de uma modelagem simples da proteção usada nos bancos de capacitores série. Respostas do algoritmo para diversas condições de defeito foram obtidas a partir de simulações em ATP para dois sistemas de transmissão. Baseado em tais respostas, uma avaliação de sua performance foi feita analisando a precisão no cálculo da distância da falta e o tempo de atuação na zona primária.

6.0 - APÊNDICE

Na tabela 5 são apresentados os parâmetros dos dois sistemas simulados em ATP.

TABELA 5 : DADOS DOS SISTEMAS SIMULADOS

Equivalentes de Thévenin	Barra 1 $550\angle-0^\circ$ [kV] (60Hz)	
	Sist. 1 [Ω /km]	Sist. 2 [Ω /km]
	$Z_{0cc} = 0.1+j20$	$Z_{0cc} = 0.1+j7.0$
	$Z_{1cc} = 0.1+j18.5$	$Z_{1cc} = 0.1+j10.7$
Equivalentes de Thévenin	Barra 2 $550\angle-20^\circ$ [kV] (60Hz)	
	Sist. 1 [Ω /km]	Sist. 2 [Ω /km]
	$Z_{0cc} = 0.1+j7.0$	$Z_{0cc} = 0.1+j20$
	$Z_{1cc} = 0.1+j10.7$	$Z_{1cc} = 0.1+j18.5$
Linha	Transposta, param distribuídos	
	$Z_0 = 0.1+j1.2$ [Ω /km]	
	$Z_1 = 0.023+j0.38$ [Ω /km]	
Banco de Capacitores	Pára-raios	$V_{pl} = 147.5$ [kV]
		$K = 1$ [kA] $\alpha = 40$
		$P_{m\acute{a}x} = 1$ [GW]
	Circuito de Amortecimento	$E_{m\acute{a}x} = 9$ [MJ]
		$R_{CA} = 200$ [Ω]
		$X_{CA} = 0.23$ [Ω]
	$r_{CA} = 5$ [Ω]	

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Novosel, D.; Bachmann, B.; Hart, D.; Hu, Y.; Saha, M. S. Algorithms for locating faults on series compensated lines using neural network and deterministic methods. IEEE Transactions on Power Delivery, V. 11, No. 4, 1996.
- (2) Goodarzi, J.; Ghassemi, F.; Johns, A. T. Method to improve digital distance relay impedance measurement when used in series compensated lines protected by metal oxide varistor. IEEE Pro. – Gener. Trans. Distrib., V. 145, No. 4, 1998.
- (3) Goldsworthy, D. L. A linearized model for MOV-protected series capacitor. IEE Transactions on Power Delivery, Vol. PWRS-2, No. 4, novembro de 1987.
- (4) IEE, Series Capacitor Bank Protection. IEE Power Engineering Society, Publicação Especial, 1998.