

Um novo método para a proteção de linhas de transmissão com compensação série

A new method for protection of series compensated transmission lines

Rogério W. A. Tuma¹
João Ricardo M. Soares de Souza¹

¹Copel – Companhia Paranaense de Energia

rogerio.tuma@copel.com
joao.soares@copel.com

Abstract: The setting of distance relays for series compensated transmission lines has always been a challenge in power systems protection. In faults close to the capacitor bank, current and voltage inversion phenomena occur, making the impedance measured by the relay similar to those which occur during a backward fault. This paper presents a new method for discriminating the fault location by subtracting the voltage angles measured behind and ahead the capacitor bank, as previously proposed by the authors [12,13].

Keywords: Distance protection, transmission lines, series compensation, directionality.

Resumo: O ajuste dos relés de proteção de distância de linhas de transmissão com compensação série sempre foi um dos desafios da proteção de sistemas elétricos de potência. Em faltas próximas ao banco de capacitores ocorrem os fenômenos de inversão de tensão e de corrente, que fazem com que a impedância vista pelo relé tenha características similares àquelas observadas quando a falta ocorre no sentido inverso. Este trabalho apresenta um novo método para diferenciar a localização das faltas utilizando a diferença entre os ângulos das tensões atrás e na frente do banco de capacitores, como **proposto pelos autores anteriormente [12,13]**.

Palavras-Chave: Proteção de distância, linhas de transmissão, compensação série, direcionalidade.

1 Introdução

A compensação série é utilizada para reduzir a reatância indutiva das linhas de transmissão

longas e, conseqüentemente, aumentar sua capacidade de transporte de energia, além de fornecer diversas outras vantagens [1]. Por outro lado, o uso de capacitores torna-se um problema para os sistemas de proteção, principalmente para a proteção de distância. Os principais problemas que a compensação série introduz são os seguintes [1][2][3][4]:

- Oscilações subsíncronas devidas à ressonância da capacitância do banco de capacitores com a indutância do sistema;
- Necessidade de considerar os varistores e os *gaps*, utilizados para limitar a tensão sobre os capacitores, no cálculo do ajuste dos relés de distância para evitar sobrealcançe em condições de regime permanente ou em faltas de baixo valor;
- Inversões de tensão e de corrente que podem provocar uma mudança na direção da impedância vista por relés de distância durante uma falta, fazendo com que ele não atue durante uma falta próxima ao banco de capacitores;
- Erros de medição da impedância de falta em linhas paralelas compensadas, ocasionados pela influência do acoplamento mútuo de seqüência zero entre as linhas.

As oscilações subsíncronas podem afetar o resultado da localização da falta se o filtro digital utilizado para estimar os fasores de tensão e corrente não levar esse fator em consideração [5].

Os varistores e *gaps* executam o *bypass* do banco de capacitores quando a tensão entre os seus terminais atinge um valor tal que comprometa a sua integridade (em geral, três vezes a tensão de operação normal). Isso altera o lugar geométrico das impedâncias **vistas pelo relé em condições de falta no plano R-X (Resistência x Reatância)**. Há diversas maneiras de resolver esse problema [6]. Esses métodos, de uma maneira geral, parecem não resolver o problema da direcionalidade do relé, tendendo a atuar para faltas atrás do banco de capacitores. Métodos baseados somente em teleproteção também possuem o mesmo problema.

O problema das inversões de tensão e corrente, no entanto, é o mais grave. Esses fenômenos fazem com que a direcionalidade dos relés fique comprometida. Faltas próximas ao banco de capacitores, mais precisamente entre o banco e o ponto onde a reatância indutiva da linha se iguala à reatância capacitiva do banco, são vistas pelo relé da mesma forma que as faltas atrás (nos

equipamentos da subestação ou em uma linha adjacente).

O método proposto neste trabalho pretende resolver o problema de direcionalidade dos relés de distância por meio da comparação entre os fasores de tensão calculados nos dois terminais do banco de capacitores, tensões estas obtidas de supostos conjuntos de TPs instalados nestes pontos.

2 Análise do caso monofásico

Para facilitar o entendimento do problema, primeiramente será feita uma análise monofásica do problema que poderá ser facilmente expandida para uma análise trifásica.

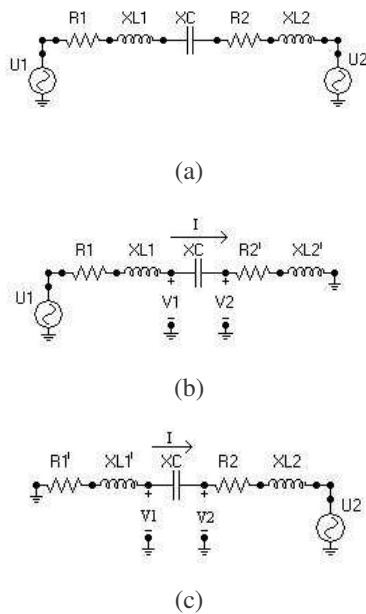


Figura 1: Circuito equivalente monofásico para estudo : a) situação normal, b) curto-circuito à frente do banco de capacitores e c) curto-circuito atrás do banco de capacitores.

O circuito mostrado na figura 1(a) representa uma linha de transmissão com compensação reativa série. U1 e U2 são as fontes equivalentes (1 pu a 0 graus), R1 e R2 são as resistências das impedâncias equivalentes e XL1 e XL2 são as reatâncias indutivas das impedâncias equivalentes vistas pelos terminais do capacitor e XC é a reatância capacitiva do capacitor.

Para uma falta franca na linha à frente do capacitor, o circuito pode ser reduzido ao circuito da figura 1(b).

Os valores dos equivalentes R2' e XL2' são diretamente proporcionais à distância da falta. Nesse caso, o valor da corrente e das tensões são mostradas na equação 1.

$$I = \frac{1}{R_1 + j \cdot X_{L1} - j \cdot X_C + R'_2 + j \cdot X'_{L2}} \quad (1)$$

$$V_1 = \frac{-j \cdot X_C + R'_2 + j \cdot X'_{L2}}{R_1 + j \cdot X_{L1} - j \cdot X_C + R'_2 + j \cdot X'_{L2}}$$

$$V_2 = \frac{R'_2 + j \cdot X'_{L2}}{R_1 + j \cdot X_{L1} - j \cdot X_C + R'_2 + j \cdot X'_{L2}}$$

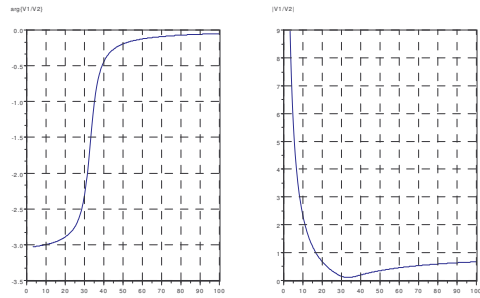
A impedância equivalente R1 + j.XL1 depende de diversos fatores como topologia da rede no instante do curto-circuito. A condição ideal é aquela em que a variável utilizada para definir a direção da falta não dependa desse valor, dependa somente da impedância vista pelo relé. A razão entre V1 e V2, mostrada na equação 2, possui esta característica.

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{-j \cdot X_C + R'_2 + j \cdot X'_{L2}}{R'_2 + j \cdot X'_{L2}} \quad (2)$$

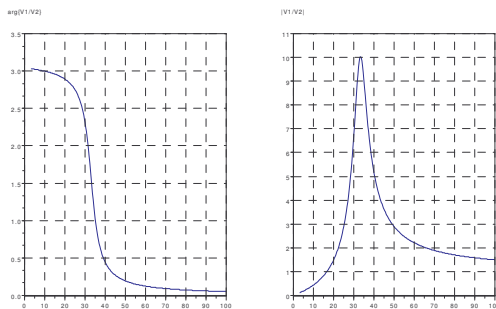
Tabela 1: Relação dos valores de módulo e ângulo da razão entre as tensões atrás e à frente do capacitor

Situação	V1/V2	Arg{V1/V2}
$X'_{L2} \rightarrow \infty$	1	0°
$X'_{L2} > X_C$	>0	Entre -90° e 0°
$X'_{L2} = X_C$	$\frac{ V_1 }{ V_2 } = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + X'^2_{L2}}} \rightarrow 0$	Próximo de -90°
$X'_{L2} < X_C$	>0	Entre -180° e -90°
$X'_{L2} = 0$	∞	-90°

A tabela 1 mostra os diferentes valores do módulo e do ângulo da razão entre V1 e V2 para diferentes valores de XL2' e de XC e considerando R2 << XL2. Os gráficos da figura 2(a) mostram os valores de módulo e ângulo da razão entre V1 e V2 para faltas em diferentes locais da linha para XL2' variando de 0 a 3 pu e R2 10 % de XL2'. Pode-se verificar que independentemente dos valores de XL2' e R2', o ângulo da razão é sempre negativo.



(a)



(b)

Figura 2: Gráficos de módulo e ângulo em radianos da razão V_1/V_2 por distância da falta (em porcentagem do comprimento da linha) para faltas a) à frente e b) atrás do capacitor

Para uma falta atrás do capacitor, o circuito equivalente fica como mostrado na figura 1(c). A corrente de falta e as tensões V_1 e V_2 são mostradas na equação 3.

$$I = \frac{1}{R'_1 + j \cdot X'_{L1} - j \cdot X_C + R_2 + j \cdot X_{L2}} \quad (3)$$

$$V_1 = \frac{R_1 + j \cdot X_{L1}}{R'_1 + j \cdot X'_{L1} - j \cdot X_C + R_2 + j \cdot X_{L2}}$$

$$V_2 = \frac{-j \cdot X_C + R_1 + j \cdot X_{L1}}{R'_1 + j \cdot X'_{L1} - j \cdot X_C + R_2 + j \cdot X_{L2}}$$

Da mesma maneira, a razão entre V_1 e V_2 é mostrada na equação 4.

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{R'_1 + j \cdot X'_{L1}}{-j \cdot X_C + R_1 + j \cdot X_{L1}} \quad (4)$$

Da mesma forma, a tabela 2 mostra os diferentes valores do módulo e do ângulo da razão entre V_1

e V_2 para diferentes valores de X_{L1}' e de X_C e considerando $R_1 \ll X_{L1}$.

Analogamente ao caso anterior, os gráficos da figura 2(b) mostram os valores de módulo e ângulo da razão entre V_1 e V_2 para faltas em diferentes locais da linha para X_{L1}' variando de 0 a 3 pu e R_1 10 % de X_{L1}' .

Tabela 2: Relação dos valores de módulo e ângulo da razão entre as tensões atrás e à frente do capacitor

Situação	$ V_1/V_2 $	$\text{Arg}\{V_1/V_2\}$
$X_{L1} \rightarrow \infty$	1	0°
$X_{L1} > X_C$	>0	Entre 0° e 90°
$X_{L1} = X_C$	$\frac{ V_1 }{ V_2 } = \frac{\sqrt{R_1^2 + X_{L1}'^2}}{R_1} \rightarrow \infty$	Próximo de 90°
$X_{L1} < X_C$	>0	Entre 90° e 180°
$X_{L1} = 0$	0	90°

Como se pode verificar pelas tabelas 1 e 2 e pelas figuras 2(a) e 2(b), o ângulo da razão entre as duas tensões é sempre negativo para uma falta à frente e sempre positivo para uma falta atrás. O ângulo da razão das tensões equivale à diferença dos ângulos de fase das tensões, conforme a equação 5.

$$\left. \begin{array}{l} V_1 = |V_1| \angle \theta_1 \\ V_2 = |V_2| \angle \theta_2 \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{V_1}{V_2} = \frac{|V_1|}{|V_2|} \angle (\theta_1 - \theta_2) \quad (5)$$

onde θ_1 e θ_2 são os ângulos de fase das tensões V_1 e V_2 , respectivamente. Assim, comparando os ângulos θ_1 e θ_2 , pode-se indicar a direção da falta em relação ao capacitor, conforme mostra a tabela 3.

Tabela 3: Localização da falta em função dos valores de θ_1 e θ_2

Relação	Localização da falta
$\theta_1 - \theta_2 < 0 \Rightarrow \theta_1 < \theta_2$	À frente
$\theta_1 - \theta_2 > 0 \Rightarrow \theta_1 > \theta_2$	Atrás

3 Generalização para o caso trifásico

Como a natureza das cargas envolvidas (capacitiva ou indutiva) é a mesma, é de se esperar que o resultado seja semelhante para um sistema trifásico. Para faltas fase-terra, devem ser analisadas as tensões fase-terra e, para faltas entre fases, as tensões fase-fase. Em outras palavras, isso significa que cada unidade de

atuação do relé deve fazer essa análise separadamente (AT, BT, CT, AB, BC e CA). Esta hipótese foi confirmada através de simulações que serão apresentadas posteriormente neste trabalho.

4 Filtro digital para o cálculo do fasor fundamental

O cálculo dos fasores de tensão e de corrente em linhas compensadas requerem um cuidado maior que aquelas não compensadas. Isso porque, conforme mencionado anteriormente, o capacitor e a indutância da linha de transmissão entram em ressonância, gerando uma componente subsíncrona, ou seja, de frequência inferior à fundamental, em geral entre 25 e 30Hz [5]. Isso exige uma maior seletividade dos filtros digitais dos relés de proteção.

Técnicas convencionais de eliminação da componente DC, antes da aplicação do filtro, foram propostas anteriormente [7,8] e parecem não resolver o problema, pois elas partem da suposição de que não existem frequências subarmônicas, o que não ocorre neste caso.

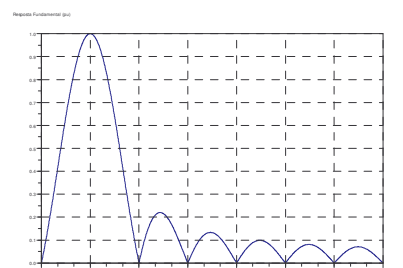
A figura 4(a) mostra resposta em frequência do filtro de Fourier de um ciclo. Pode-se verificar que esse filtro deixa passar uma quantidade considerável de frequências subsíncronas, o que poderia afetar o resultado, se utilizado nessas condições.

Uma maneira de resolver esse problema é aumentar a janela de dados [5]. A figura 3 mostra as respostas para janelas de diversos tamanhos. Como pode ser verificado, quanto maior for a janela, mais seletivo é o filtro e, conseqüentemente, menor será o efeito das frequências subsíncronas no resultado.

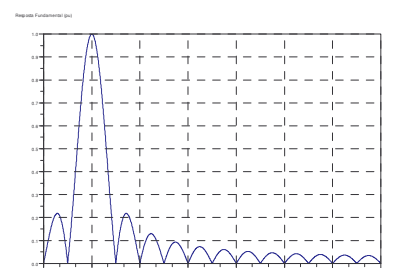
Entretanto, aumentar demais a janela de dados significa atrasar o processamento do algoritmo. Em alguns casos, esse atraso pode ser um impedimento para o uso desta técnica.

Uma forma de resolver esse problema, afetando o mínimo possível a velocidade do algoritmo, é por meio de diferenciações sucessivas [9]. Sabe-se que, quando uma senóide é diferenciada, o resultado é ponderado pela sua frequência conforme a equação 6.

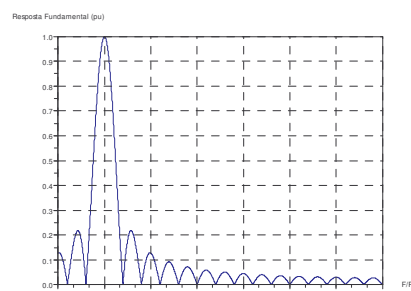
$$f(t) = A \cdot \text{sen}(\omega \cdot t) \Rightarrow \frac{d}{dt} f(t) = \omega \cdot A \cdot \text{cos}(\omega \cdot t) \quad (6)$$



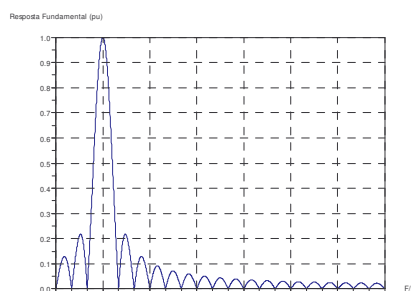
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3: Respostas em frequência dos filtros de Fourier de (a) um ciclo, (b) dois ciclos, (c) dois ciclos e meio e (d) três ciclos.

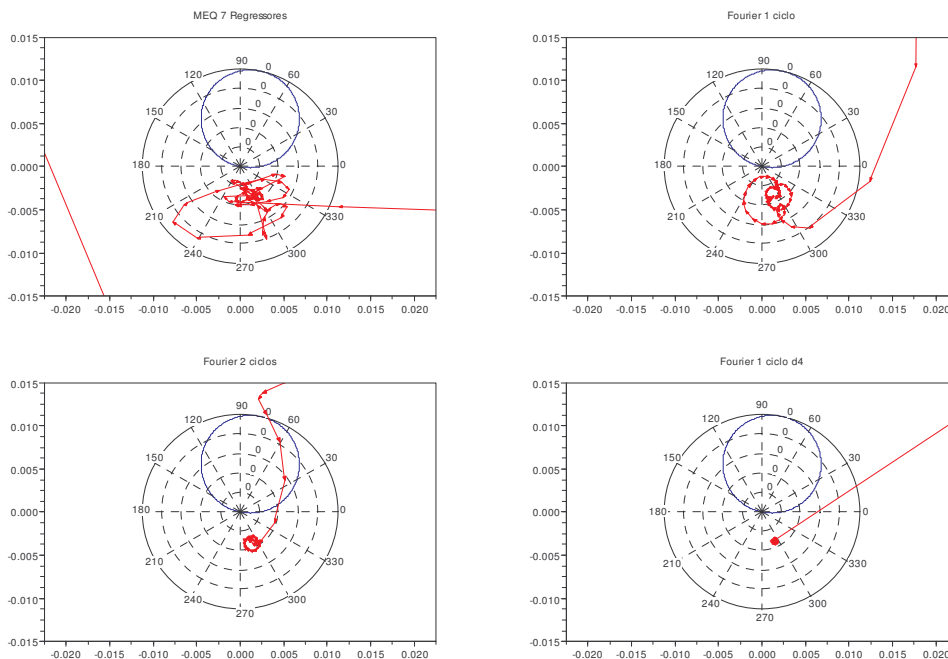


Figura 4: Trajetória da impedância vista durante um curto-circuito em uma LT compensada obtida por quatro filtros distintos (mínimos erros quadrados, Fourier de um ciclo, Fourier de dois ciclos e Fourier de um ciclo com quatro diferenciações)

Isso faz com que as componentes mais baixas sejam mais atenuadas. No entanto, devem-se observar dois aspectos relativos à técnica das diferenciações sucessivas:

Diferenciar um sinal n vezes implica em atrasá-lo em $n/4$ ciclos. Quanto maior for o número de diferenciações, maior será a participação dos harmônicos superiores no resultado.

Essas diferenciações já foram utilizadas anteriormente em diversos algoritmos, como o PRODAR 70 [10].

Um resultado adequado do ponto de vista da medição de fase pode ser obtido com uma janela de um ciclo (que não permite a passagem de nenhuma harmônica superior) com dezesseis amostras diferenciando o sinal quatro vezes.

As frequências subsíncronas fazem com que os fasores medidos se aproximem da solução através de espirais, que são tão maiores quanto a magnitude dessas componentes [11]. A figura 4 mostra a trajetória percorrida pela impedância vista pela unidade faltosa para um curto-circuito

em uma linha de transmissão compensada usando quatro filtros digitais distintos: mínimos erros quadrados com sete regressores, Fourier de um ciclo, Fourier de dois ciclos e Fourier de um ciclo com quatro derivações. Pode-se verificar que os filtros que convergem com mais exatidão para a solução são o de Fourier de dois ciclos e o de um ciclo com quatro derivações, o que era esperado, uma vez que esses filtros são mais imunes às oscilações subsíncronas, conforme comentado anteriormente.

5 Simulações com o ATP (Alternative Transient Program)

Para verificar a validade da técnica proposta de discriminação do sentido da falta utilizando a relação entre os ângulos das tensões medidas antes e depois do banco de capacitores e testar os diferentes tipos de filtro digital, foram feitas simulações utilizando o programa ATP de um caso hipotético de uma LT, cujo sistema simplificado está mostrado na figura 5 com compensação em um terminal de 30% da reatância indutiva.

O ATP ("Alternative Transient Program") é um programa computacional de simulação digital de

fenômenos eletromagnéticos transitórios derivado do EMTP (“Eletromagnetic Transient Program”), utilizado e reconhecido por toda comunidade científica internacional relacionada a sistemas elétricos de potência. O princípio de operativo do programa é o mesmo do EMTP descrito por Dommel [14].

Foram feitas cinco simulações com faltas fase-terra e fase-fase a diferentes distâncias na frente do banco de capacitores e atrás dele (na LT adjacente, cujos dados também são mostrados na figura 5), totalizando vinte simulações. A tabela 4 mostra os resultados obtidos para as diferentes simulações. De acordo com a tabela 4, os valores obtidos para faltas próximas ao banco de capacitores é da ordem de 2,8 radianos positivos ou negativos, o que equivale a aproximadamente 160°. Esses valores estão coerentes com aqueles esperados conforme as tabelas 1 e 2.

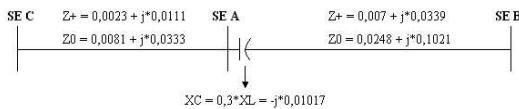


Figura 5: Circuito utilizado nas simulações.

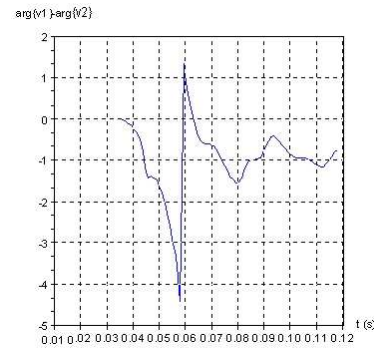
Outro resultado que é bastante interessante de observar é a resposta transitória, que é sensivelmente influenciada pelo tipo de filtro utilizado, como foi mencionado no item 4. O filtro de Fourier na presença de componentes de frequência subsíncrona, tende a se aproximar da solução final no diagrama R-X através de linhas espirais. Dependendo do ponto da solução final e da magnitude da componente subsíncrona, que definirá o raio das espirais, pode ocorrer até mesmo uma inversão transitória do ângulo de fase visto pelo relé.

Tabela 4: Resultados obtidos nas simulações com o ATP.

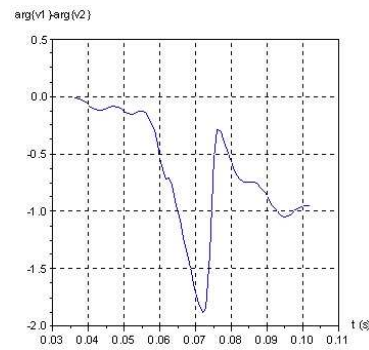
LT sob curto	Local do curto	arg{V1} – arg{V2} (rad)	
		Curto AT	Curto AB
SE A– SE B	0 %	-2,4	-2,3
	5 %	-2,8	-2,8
	10 %	-2,6	-2,8
	15%	-2	-2,7
	20 %	-0,9	-2,5
SE A– SE C	0 %	+2,4	+2,3
	5 %	+2,9	+3,0
	10 %	+2,9	+2,9
	15%	+2,8	+2,9
	20 %	+2,8	+2,8

A figura 6 mostra os gráficos com os diferentes valores de ângulos de fase obtidos para três filtros

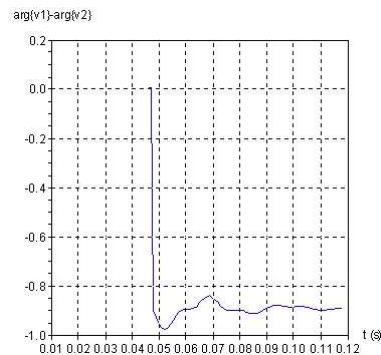
diferentes: o de Fourier de um ciclo, o de Fourier de dois ciclos e o de Fourier de um ciclo com quatro diferenciações. Esses filtros foram aplicados à tensão da fase A para o caso do curto-circuito fase-terra a 20% à frente do comprimento da linha de transmissão SE A – SE B. Esse curto-circuito ocorreu exatamente a 0,03s (30 ms).



(a)



(b)



(c)

Figura 6: Diferença de fase para o curto AT a 20% à frente através dos diferentes filtros: (a) Fourier de um ciclo, (b) Fourier de dois ciclos e (c) Fourier de um ciclo com quatro derivações.

Através de uma análise da figura 6, pode-se verificar que o filtro de Fourier de um ciclo provoca uma inversão do ângulo de fase. Isso ocorre porque a espiral faz com que a tensão calculada mude de quadrante no plano R-X. Isso poderia complicar uma lógica de discriminação de direcionalidade que utiliza este princípio. O filtro de dois ciclos, além de ser extremamente lento (demorou aproximadamente 20ms para atingir um valor que permitisse uma discriminação razoável) provocou uma grande oscilação da fase, o que também poderia ser inconveniente. O filtro de um ciclo com quatro diferenciações, por sua vez, teve uma oscilação desprezível e convergiu para a solução em aproximadamente 18 ms. Isso mostra que esse filtro possui uma boa imunidade a oscilações subsíncronas, o que dá uma segurança quanto a possíveis erros transitórios.

6 Conclusão

Os resultados das simulações mostraram a possibilidade de aplicação da técnica da comparação entre os ângulos das tensões nos dois terminais do capacitor. No entanto, a questão da filtragem digital deve ser avaliada com maior elaboração para que se possa estabelecer uma solução definitiva.

O filtro de Fourier de janela de dois ciclos não é adequado para resolver o problema, pois ele se mostrou instável em algumas situações e tem um tempo de atuação muito longo. Já o filtro de Fourier de janela de um ciclo com quatro diferenciações se mostrou mais adequado e mais eficaz que os demais.

Em um próximo trabalho, o filtro de Fourier com quatro diferenciações será mais detalhado e a sua utilização para melhorar a localização de faltas em linhas compensadas será avaliada.

O tempo de 18ms (pouco mais de um ciclo) pode parecer excessivo. Entretanto, por se tratar da proteção de linhas compensadas, onde as técnicas convencionais existentes não são eficazes (têm que esperar os *gaps* e varistores atuarem) e imprecisas (a direcionalidade fica comprometida para faltas muito próximas), esse tempo pode ser adequado, além de poder ser aperfeiçoado com a realização de novos estudos. Além disso, este método possibilita a detecção de faltas de alta impedância próximas ao capacitor, característica esta que os métodos convencionais podem não apresentar.

Há diversas maneiras de aplicar a técnica proposta. Uma forma bastante eficiente seria utilizá-la como uma unidade de bloqueio da

proteção de distância juntamente com um esquema de teleproteção convencional qualquer.

Para a implementação desse método, no entanto, seriam necessários dois conjuntos de transformadores de potencial por terminal de linha, enquanto o usual é utilizar apenas um. Isso, obviamente, resultaria em um maior custo para o sistema de proteção. Entretanto, para que seja feita uma análise de viabilidade econômica mais criteriosa, deve ser levada em conta a robustez da técnica proposta, que dificilmente irá permitir que o relé atue indevidamente e dificilmente deixará de atuar para uma falta à frente do banco de capacitores. Somando-se isso ao advento da parcela variável, é razoável aceitar esse pequeno incremento no investimento total de uma obra de uma linha de transmissão compensada.

Ressalte-se que simulações efetuadas em sistemas mais complexos apresentaram resultados similares a estes e que serão objeto de um trabalho futuro.

7 Referências

- [1] Anderson, P. M., **Power system Protection**, Mc Graw Hill e IEEE Press, 1999.
- [2] Alexander, G. E., Rowe, S. D., Andrachak, J. G., Wikinson, S. B., Tyska, W. Z.. **Series Compensated Line Protection: Evaluation & Solutions**, GE MULTILIN, GER-3736.
- [3] Tarlochan, S. S. et al. Series Compensated Line Protection Enhancement by Modified Pilot Relaying Schemes. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 21, n. 3, July, 2006.
- [4] Puppi, L. V. S. **Linhas de Transmissão com Compensação Série, Análise dos Problemas de Proteção**, UNIFEI, 2002.
- [5] Lambert, J. et al. Accurate Voltage Phasor Measurement in Series-compensated Network. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 9, n. 1, January, 1994.
- [6] Mandour, M. E. et al. Swivelling Characteristic for the Protection of Series Compensated Lines. **Electric Power Systems Research**, v. 18, 1990.
- [7] Yu, S. L. et al. Removal of Decaying DC in Current and Voltage Signals Using Modified Fourier Filter Algorithm. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 16, n. 3, July, 2001.
- [8] Guo, Y., et al. Simplified Algorithms for Removal of the Effect of Exponentially Decaying DC-Offset on the Fourier Algorithm. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 18, n. 3, July, 2003.

- [9] Phadke, A. G., Thorp, J. S. **Computer Relaying for Power Systems**, John Wiley & Sons Inc, 1988.
- [10] Gilcrest, G. B., Rockfeller, G. D., Udren, E. A. et al. High-speed Distance Relaying Using a Digital Computer – Parts I and II. **IEEE Transactions on PAS**, v. 91, n. 3, May/June, 1972.
- [11] McLaren, P. G., Redfern, M. A. et al. Fourier – Series Techniques Applied to Distance Protection. **Proc IEE**, v. 122, n. 11, July, 1975.
- [12] Tuma, R. W. A., Soares De Souza, J. R. M. Um Novo Método para a Proteção de Linhas de Transmissão com Compensação Série. **XII Encontro Regional Iberoamericano do CIGRE**, Foz do Iguaçu, Maio, 2007.
- [13] Tuma, R. W. A., Soares De Souza, J. R. M. Um Novo Método para a Proteção de Linhas de Transmissão com Compensação Série. **EletroEvolução – Sistemas de Potência**, Revista ISSN 1806-1877, n. 47, Junho, 2007.
- [14] Dommel, H. W. Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single- and Multiphase Networks. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. PAS-88, n. 4, April, 1969.