

Sincronização de Registros Oscilográficos em Linhas de Transmissão com Parâmetros Elétricos Desconhecidos

Melinda C. S. da Cruz
Universidade Federal Rural do Semi-Árido
Mossoró, RN, Brasil
melinda@ufersa.edu.br

José T. de Oliveira, Manoel F. de Medeiros Júnior
Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Natal, RN, Brasil
jtavares@ct.ufrn.br, firmino@dca.ufrn.br

Resumo— Algoritmos para localização de faltas em linhas de transmissão são ferramentas indispensáveis na operação de um sistema de energia. Geralmente, esses algoritmos necessitam de *hardware* ou *software* para sincronização de registros oscilográficos, quando dependem de dados oriundos de mais de um terminal. Existem diversos algoritmos na literatura que efetuam a sincronização de registros de falta, sendo que, em sua maioria, baseiam-se em transitórios de alta frequência. Estes nem sempre garantem resultados de sincronização satisfatórios, uma vez que os componentes transitórios dos sinais de falta nem sempre são significativos. Este trabalho apresenta uma nova metodologia para sincronização de registros oscilográficos, baseada em fasores de tensão e corrente pré-falta (regime permanente), e independente dos parâmetros elétricos da linha de transmissão. Assim, a abordagem de sincronização desenvolvida elimina as incertezas decorrentes do não conhecimento ou imprecisão dos parâmetros da linha, ao passo que também não sofre a influência dos perfis transitórios atípicos que podem estar contidos nos registros de falta.

Palavras-chave--Localização de faltas, sincronização de registros oscilográficos, linhas de transmissão, parâmetros elétricos desconhecidos.

I. INTRODUÇÃO

Na literatura, existem muitas abordagens relacionadas ao estudo de localização de faltas em linhas de transmissão (LT) [1]-[3], e a grande maioria delas necessita, para aplicar o método de localização, de ferramentas que identifiquem o instante de ocorrência da falta e realizem a sincronização de dados entre os terminais da linha, sem depender de uma sincronização via GPS (*Global Positioning System*).

Em casos de curto-circuito, o momento de ocorrência da falta está associado ao aumento da corrente em uma ou mais fases e à presença de transitórios eletromagnéticos, os quais podem influenciar diretamente o desempenho dos algoritmos que precisam detectar o instante de início da falta, para sincronizar os dados.

A maioria dos algoritmos que efetuam a sincronização de registros de falta baseia-se em componentes transitórias, destacando-se os que são fundamentados no uso da Transformada Wavelet (TW) [4] e os algoritmos que comparam valores instantâneos de dois ciclos consecutivos do sinal amostrado [5]. Encontra-se também na literatura uma estratégia de sincronização que utiliza fasores de tensão e corrente pré-falta, no entanto, por depender dos parâmetros elétricos da linha, está susceptível aos erros que podem estar contidos nesses parâmetros [6].

Em [7], relata-se que os fenômenos transitórios abrangem uma extensa faixa de frequência e, dependendo das características do sistema e da causa primária da situação transitória, podem ter duração de alguns microssegundos a vários ciclos. Ainda conforme [7], esses transitórios de alta frequência podem influenciar negativamente o desempenho de algoritmos tradicionais de sincronização, visto que podem conter perfis transitórios atípicos.

Cabe ressaltar ainda que os valores dos parâmetros de linhas de transmissão, além de serem susceptíveis a erros grosseiros ou até mesmo estarem computacionalmente indisponíveis para aplicação dos algoritmos, em arranjos práticos, não são constantes durante todo tempo, sendo afetados diretamente por variações climáticas e pelas condições de carregamento do sistema, o que pode influenciar na qualidade da sincronização e, consequentemente, da localização da falta [8].

Este artigo apresenta uma metodologia para determinação do ângulo de sincronização entre registros, que independe das características transitórias dos sinais de falta analisados, uma vez que se baseia no uso de fasores de tensão e corrente pré-falta, e não necessita do conhecimento dos parâmetros elétricos (resistência, indutância e capacitância) da linha de transmissão. O método pode ser aplicado a casos de difícil sincronização, em que, por exemplo, existam parâmetros de linha desconhecidos ou imprecisos, e registros com características transitórias atípicas que influenciariam na detecção do instante de início de faltas, na sincronização dos

dados e, conseqüentemente, na localização de defeitos na linha. Uma análise sobre a eficiência do método desenvolvido de sincronização de registros oscilográficos será ainda realizada neste trabalho.

II. ALGORITMO DESENVOLVIDO PARA SINCRONIZAÇÃO DE REGISTROS OSCILOGRÁFICOS

Considere a Fig. 1, que representa o circuito equivalente de sequência positiva de uma linha de transmissão, no instante pré-falta.

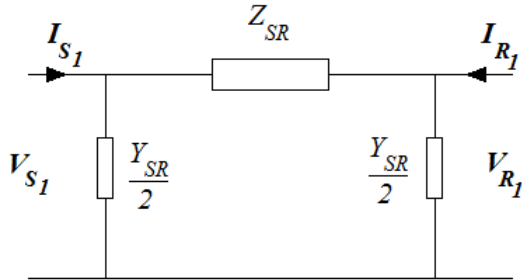


Fig. 1. Representação do circuito equivalente de sequência positiva de uma LT no instante pré-falta.

Na Fig. 1, tem-se que:

Z_{SR} : impedância série da linha de transmissão, sequência positiva.

$Y_{SR} = j b_{shunt}$ representa a admitância *shunt* da linha de transmissão, sequência positiva.

$V_{S1} = V_S e^{j\theta_{V_{S1}}}$, sendo V_S e $\theta_{V_{S1}}$ o módulo e o ângulo da tensão pré-falta no terminal S, respectivamente.

$V_{R1} = V_R e^{j\theta_{V_{R1}}}$, sendo V_R e $\theta_{V_{R1}}$ o módulo e o ângulo da tensão pré-falta no terminal R, respectivamente.

$I_{S1} = I_S e^{j\theta_{I_{S1}}}$, sendo I_S e $\theta_{I_{S1}}$ o módulo e o ângulo da corrente pré-falta no terminal S, respectivamente.

$I_{R1} = I_R e^{j\theta_{I_{R1}}}$, sendo I_R e $\theta_{I_{R1}}$ o módulo e o ângulo da corrente pré-falta no terminal R, respectivamente.

Da Fig. 1, pode-se obter a relação:

$$I_{S1} + I_{R1} e^{j\delta} = \frac{Y_{SR}}{2} (V_{S1} + V_{R1} e^{j\delta}) \quad (1)$$

sendo δ o ângulo de sincronização entre os dois terminais.

A equação (1) é complexa, podendo ser desmembrada em duas equações reais, conforme (2) e (3).

$$I_{S1} \cos(\theta_{I_{S1}}) + I_{R1} \cos(\theta_{I_{R1}} + \delta) = \frac{-b_{shunt}}{2} (V_{S1} \sin(\theta_{V_{S1}}) + V_{R1} \sin(\theta_{V_{R1}} + \delta)) \quad (2)$$

$$I_{S1} \sin(\theta_{I_{S1}}) + I_{R1} \sin(\theta_{I_{R1}} + \delta) = \frac{b_{shunt}}{2} (V_{S1} \cos(\theta_{V_{S1}}) + V_{R1} \cos(\theta_{V_{R1}} + \delta)) \quad (3)$$

Definindo:

$$a = I_{S1} \cos(\theta_{I_{S1}})$$

$$b = I_{S1} \sin(\theta_{I_{S1}})$$

$$c = V_{S1} \sin(\theta_{V_{S1}})$$

$$d = V_{S1} \cos(\theta_{V_{S1}})$$

Pode-se reescrever (2) e (3) conforme (4) e (5).

$$a + I_{R1} \cos(\theta_{I_{R1}} + \delta) = \frac{-b_{shunt}}{2} (c + V_{R1} \sin(\theta_{V_{R1}} + \delta)) \quad (4)$$

$$b + I_{R1} \sin(\theta_{I_{R1}} + \delta) = \frac{b_{shunt}}{2} (d + V_{R1} \cos(\theta_{V_{R1}} + \delta)) \quad (5)$$

Combinando (4) e (5) da forma expressa em (6), obtém-se a equação (7), que possui uma única incógnita, δ .

$$\frac{a + I_{R1} \cos(\theta_{I_{R1}} + \delta)}{b + I_{R1} \sin(\theta_{I_{R1}} + \delta)} = \frac{\frac{-b_{shunt}}{2} (c + V_{R1} \sin(\theta_{V_{R1}} + \delta))}{\frac{b_{shunt}}{2} (d + V_{R1} \cos(\theta_{V_{R1}} + \delta))} \quad (6)$$

$$A = (x_1 + x_2 + x_3 + x_4) \cos(\delta) - (-y_1 + y_2 - y_3 + y_4) \sin(\delta) \quad (7)$$

Em (7), tem-se que:

$$A = ad + bc + V_{R1} I_{R1} \cos(\theta_{V_{R1}} - \theta_{I_{R1}})$$

$$x_1 = -a V_{R1} \cos(\theta_{V_{R1}}); y_1 = a V_{R1} \sin(\theta_{V_{R1}})$$

$$x_2 = -b V_{R1} \sin(\theta_{V_{R1}}); y_2 = b V_{R1} \cos(\theta_{V_{R1}})$$

$$x_3 = -d I_{R1} \cos(\theta_{I_{R1}}); y_3 = d I_{R1} \sin(\theta_{I_{R1}})$$

$$x_4 = -c I_{R1} \sin(\theta_{I_{R1}}); y_4 = c I_{R1} \cos(\theta_{I_{R1}})$$

Fazendo $x = x_1 + x_2 + x_3 + x_4$ e $y = -y_1 + y_2 - y_3 + y_4$, obtém-se:

$$A = x \cos(\delta) - y \sin(\delta) \quad (8)$$

A relação expressa em (8) pode ser representada por meio do triângulo retângulo da Fig. 2.

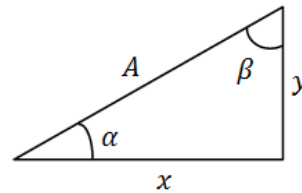


Fig. 2. Representação geométrica da relação entre A, x e y.

A partir da análise da equação (8) e das relações trigonométricas que podem ser extraídas da Fig. 2, tem-se que:

$$\frac{A}{\sqrt{(x^2 + y^2)}} = \sin(\beta) \cos(\delta) - \sin(\delta) \cos(\beta) \quad (9)$$

Portanto,

$$\frac{A}{\sqrt{(x^2+y^2)}} = \text{sen}(\beta - \delta) \quad (10)$$

O ângulo de sincronização determinado pela metodologia proposta é expresso conforme (11).

$$\delta = \text{sen}^{-1}\left(\frac{x}{\sqrt{(x^2+y^2)}}\right) - \text{sen}^{-1}\left(\frac{A}{\sqrt{(x^2+y^2)}}\right) \quad (11)$$

A expressão (11) representa uma forma analítica de calcular o ângulo de sincronização, dependendo unicamente dos fasores de tensão e de corrente pré-falta dos dois terminais da linha. As únicas incertezas que estão presentes no ângulo calculado são, pois, as oriundas dos erros nas medidas das grandezas elétricas de tensão e de corrente.

Vale salientar que, para determinação do ângulo β , uma análise dos sinais de x e y deve elaborar a fim de verificar se β foi calculado no quadrante correto. Assim, o algoritmo implementado para resolver o problema foi o seguinte:

se ($y < 0$)

$$\delta = \left(180 - \text{sen}^{-1}\left(\frac{x}{\sqrt{(x^2+y^2)}}\right) \right) - \text{sen}^{-1}\left(\frac{A}{\sqrt{(x^2+y^2)}}\right)$$

senão

Calcular conforme (11).

fim

Neste trabalho utilizou-se a Transformada Discreta de Fourier para obtenção de fasores, por isso, uma breve descrição sobre os aspectos básicos do método será apresentada na próxima seção.

III. ASPECTOS BÁSICOS DA OBTENÇÃO DE FASORES PELA TRANSFORMADA DISCRETA DE FOURIER

O cálculo de componentes fundamentais de sinais tensão e corrente, bem como de outros harmônicos, pode ser realizado por meio da Transformada Discreta de Fourier. A equação geral do método é dada por [9]:

$$X(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j2\pi kn/N}. \quad (12)$$

Em (12), tem-se que:

$x(n)$: ondas de tensão ou corrente amostradas, com n variando sobre um período de 0 a $N - 1$.

N : número de amostras por ciclo.

$X(k)$: fasores calculados em frequências k múltiplas de f_m/N , sendo f_m a frequência de amostragem e k definida sobre um período de 0 a $N - 1$.

A fim de obter os fasores fundamentais a serem utilizados na expressão (11), admitiu-se que $x(n)$, em (12), representa um único ciclo de dados de tensão ou corrente.

Cabe salientar que, apesar da Transformada Discreta de Fourier atuar como um filtro, extraindo apenas a componente de 60 Hz do sinal analisado, pode inserir erros no cálculo de fasores. Esses erros ocorrem principalmente quando os sinais

não são estacionários (comum em casos práticos), quando a frequência de amostragem é menor que duas vezes a maior frequência contida no sinal, e quando estão presentes no sinal frequências não múltiplas inteiras da frequência fundamental [10]. Neste trabalho, utilizou-se a TDF para estimação de fasores em virtude de seus erros terem se mostrado pequenos para fins de verificação da exatidão do algoritmo de sincronização desenvolvido, baseado em fasores pré-falta.

IV. SISTEMA ANALISADO

O sistema elétrico utilizado nas simulações para avaliar desempenho do método de sincronização proposto, baseado em fasores de tensão e corrente pré-falta, é representado na Fig. 3, e foi modelado para os níveis de tensão de 138 kV e 230 kV. A linha LT2, na Fig. 3, corresponde ao trecho onde simularam-se as faltas, possuindo esta comprimento de 90 km e 180 km para as tensões nominais de 138 kV e 230 kV, respectivamente. Vale salientar que, em todas as simulações realizadas neste trabalho, consideraram-se faltas do tipo fase-terra, por serem mais frequentes nos sistemas de energia, e taxa de amostragem de 256 amostras/ciclo.

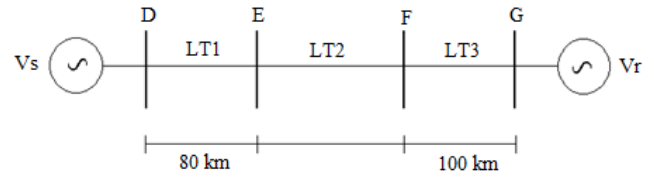


Fig. 3. Configuração unifilar da rede de transmissão analisada.

Os parâmetros de sequência utilizados para modelar as linhas de transmissão são especificados nas Tabelas I e II, e correspondem a dados típicos de linhas de transmissão reais [11]. As simulações foram realizadas no *software* ATP (*Alternative Transients Program*) [12].

TABELA I. PARÂMETROS DE SEQUÊNCIA POSITIVA - LINHAS DE 138 kV E 230 kV.

Tensão	R (Ω/km)	L (mH/km)	C (μF/km)
138 kV	0,11567	1,226	0,00954
230 kV	0,09127	1,376	0,00847

TABELA II. PARÂMETROS DE SEQUÊNCIA ZERO - LINHAS DE 138 kV E 230 kV.

Tensão	R (Ω/km)	L (mH/km)	C (μF/km)
138 kV	0,41638	4,491	0,0055
230 kV	0,44016	4,153	0,0061

V. RESULTADOS

Nesta seção serão apresentados os resultados dos testes efetuados com o algoritmo de sincronização desenvolvido, o qual é baseado unicamente em fasores de tensão e de corrente pré-falta.

É importante ressaltar que os dados de tensão e corrente de ambos os terminais da linha de transmissão sob teste já estão sincronizados pelo ATP. Logo, os testes efetuados consistiram em verificar a exatidão do algoritmo proposto em relação ao

ângulo de sincronização esperado (real), que foi dessincronizado artificialmente. A Tabela III apresenta, para a LT de 138 kV, os ângulos de sincronização calculados pela equação (11), comparados aos ângulos de sincronização reais. Nesta linha, considerou-se uma falta no quilômetro 13, para diferentes ângulos de sincronização, e resistência de falta igual a zero.

TABELA III. ÂNGULOS CALCULADOS PELA METODOLOGIA DE SINCRONIZAÇÃO DESENVOLVIDA - LT 138 kV.

Ângulo de sincronização real (graus)	Ângulo de sincronização calculado através de (11) (graus)	Erro absoluto de sincronização (graus)
-120	-120,0291	0,0291
-90	-90,0291	0,0291
-60	-60,0291	0,0291
-30	-30,0291	0,0291
0	0,0291	0,0291
30	29,9709	0,0291
60	59,9709	0,0291
90	89,9709	0,0291
120	119,9709	0,0291

A Tabela IV apresenta, para a LT de 230 kV, os ângulos de sincronização calculados pela equação (11), comparados aos ângulos de sincronização reais. Nesta linha, considerou-se uma falta no quilômetro 90, para diferentes ângulos de sincronização, e resistência de falta igual a zero.

TABELA IV. ÂNGULOS CALCULADOS PELA METODOLOGIA DE SINCRONIZAÇÃO DESENVOLVIDA - LT 230 kV.

Ângulo de sincronização real (graus)	Ângulo de sincronização calculado através de (11) (graus)	Erro absoluto de sincronização (graus)
-130	-130,2501	0,2501
-110	-110,2501	0,2501
-80	-80,2501	0,2501
-50	-50,2501	0,2501
-20	-20,2501	0,2501
0	0,2501	0,2501
20	19,7499	0,2501
50	49,7499	0,2501
80	79,7499	0,2501
110	109,7499	0,2501
130	129,7499	0,2501

Uma análise conjunta das Tabelas III e IV mostra que a metodologia de sincronização desenvolvida é muito eficiente na determinação do ângulo de sincronização, até nos casos em que este ângulo é bastante elevado. Na verdade, nos testes realizados, verificou-se que a metodologia desenvolvida é eficaz na determinação de ângulos de sincronização que variam de 0 a 360°. No entanto, preferiu-se apresentar nas Tabelas III e IV situações de ângulos de sincronização mais compatíveis com situações reais.

Simulações também foram realizadas para os casos que constam nas Tabelas III e IV, no entanto, considerando

resistência de falta igual a 100 Ω . Para essa análise, considerando resistência de falta igual a 100 Ω , obtiveram-se resultados idênticos àqueles apresentados nas respectivas tabelas.

VI. CONCLUSÕES

Neste trabalho apresentou-se um novo equacionamento capaz de realizar a sincronização de registros de falta, através do uso unicamente de fasores fundamentais de tensão e corrente em regime permanente pré-falta. A metodologia diferencia-se de outras existentes na literatura, tanto por não depender dos parâmetros elétricos de linhas de transmissão, quanto por não depender das características transitórias no momento da incidência de falta, fatores que podem inserir erros no processo de sincronização de registros oscilográficos. Os testes realizados mostraram que a metodologia de sincronização desenvolvida é bastante eficaz na determinação do ângulo de sincronização, apresentando bom desempenho em situações em que o ângulo variou de 0° a 360°, e sendo independente da resistência de falta.

REFERÊNCIAS

- [1] A. A. Girgis, D. G. Hart, e W. L. Peterson, "A new fault location technique for two and three-terminal lines", IEEE Transactions on Power Delivery, v.7, n.1, p.98-107, 1992.
- [2] C. E. M. Pereira e Luiz C. Zanetta Jr, "Fault Location in Transmission Lines Using One-Terminal Postfault Voltage Data", IEEE Trans. Power Deliv., vol. 19, no. 2, p. 570-575, 2004.
- [3] C. Y. Evrenosoglu e A. Abur, "Travelling wave based fault location for teed circuits", IEEE Trans. Power Deliv., vol. 20, no. 2, p. 1115-1121, 2005.
- [4] M. C. S. Cruz, M. A. D. Almeida et al, "Localização de Falhas em Linhas de Transmissão de Múltiplos Terminais a partir de Registros Oscilográficos Sincronizados via Transformada Wavelet", IEEE/PES T&D 2010, São Paulo, Brasil.
- [5] D. V. Coury, M. Oleskovicz, R. Giovanini, Proteção Digital de Sistemas Elétricos de Potência: dos Relés Eletromecânicos aos Microprocessados Inteligentes, São Carlos, EESC-USP, 2007.
- [6] M. C. S. Cruz, S. P. Ramos, M. F. de Medeiros Jr, J. J. A. L. Leitão e S. G. A. Cauponi, "Metodologia para Sincronização de Registros de Falta baseada em Equações de Circuito Equivalente de Linhas de Transmissão", IEEE/IAS International Conference on Industry Applications, 2012, Fortaleza, Ceará, Brasil.
- [7] M. C. S. Cruz, J. J. A. L. Leitão, S. Cauponi, E. Oliveira, M. F. Medeiros Jr, "Experiência com um Algoritmo baseado em Componentes Transitórias para Sincronização de Registros de Falta – Um Estudo de Caso", Congresso Brasileiro de Automática (CBA) 2012, Campina Grande, Paraíba, Brasil.
- [8] Y. Liao e N. Kang, "Fault-Location Algorithms Without utilizing Line Parameters Based on the Distributed Parameter Line Model", IEEE Trans. Power Deliv., vol. 24, no. 2, p. 579-584, 2009.
- [9] M. R. Spiegel, "Análise de Fourier", São Paulo: McGraw-Hill, 1976.
- [10] A. Girgis, W. Chang, E. Makram, "A Digital Recursive Measurement Scheme for On-line Tracking of Power System Harmonics", IEEE Transactions on Power Delivery, v. 6, n. 3, p. 1153 –1160, 1991.
- [11] C. C. B. Camargo, "Transmissão de energia elétrica: aspectos fundamentais", 4. ed., Florianópolis: UFSC, 2009.
- [12] W. H. Dommel, Electro-magnetic transients program (EMTP) theory book, Portland: Bonneville Power Administration, 1996.