

UM NOVO MÉTODO PARA O CÁLCULO DE FLUXO DE POTÊNCIA TRIFÁSICO PARA REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA RADIAIS OU MALHADAS

Walmeran José Trindade Júnior
Coordenação de Eletrotécnica – CEFET-PB
Av. 1º de maio, 720 Jaguaribe CEP 58.015-430 João Pessoa-PB
E-mail: walmeran@cefetpb.edu.br

RESUMO

A resolução Nº 505 da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) considera como imprescindível a definição dos limites de variação das tensões a serem observadas pelas concessionárias de energia elétrica para a conceituação de serviço adequado e estabelece a conformidade dos níveis de tensão de atendimento em regime permanente, classificando-a em adequada, precária ou crítica. Um problema operacional para essas empresas consiste em monitorar na rede secundária de distribuição a tensão em dezenas de pontos de entrega em milhares de circuitos, de forma a garantir o serviço adequado, conforme essa resolução. Uma forma viável para um primeiro levantamento de áreas críticas é através da simulação digital dessa rede, determinando-se as tensões nodais pelo cálculo do fluxo de potência trifásico. Em sistemas de distribuição de energia elétrica há uma grande predominância de cargas monofásicas, principalmente nos circuitos secundários, e a configuração dos condutores nas linhas de distribuição nunca é eqüilateral simétrica. Portanto, o desbalanceamento da rede trifásica, bem como o acoplamento magnético entre as fases do sistema, mesmo em circuitos secundários de distribuição de energia elétrica, deve ser levado em conta, sob pena de consideráveis erros na determinação das tensões nodais e das perdas elétricas serem cometidos. Neste trabalho apresentamos um novo método para o cálculo de fluxo de potência trifásico em redes de distribuição de energia elétrica, radiais ou malhadas, que considera o acoplamento magnético entre as fases do sistema no cálculo das tensões nodais, através da aplicação do método das fontes fictícias de tensão. Esse novo método consiste na inserção de fontes fictícias de tensão no circuito elétrico equivalente da rede de distribuição, com o propósito de determinar seus valores de tensão, de modo que as correntes residuais nelas sejam nulas ou menores que uma tolerância especificada. A determinação das perdas elétricas com este novo método é também analisada.

PALAVRAS-CHAVE: Distribuição de energia elétrica. Fluxo de potência. Qualidade de energia.

1. INTRODUÇÃO

Motivados pelo problema operacional das empresas concessionárias de energia elétrica para monitorar as tensões da rede secundária de distribuição, quanto aos limites estabelecidos pela resolução N° 505 da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) (ANELL, 2001), que classifica essas tensões como adequada, precária ou crítica, bem como pelo problema da avaliação das perdas técnicas nessas redes de distribuição, apresentamos uma nova técnica de cálculo de fluxo de potência trifásico para contemplar ambas as abordagens dos problemas supracitados, ou seja, que considere o desbalanceamento da rede, o acoplamento magnético entre as fases, e a topologia radial ou malhada.

Programas de cálculo de fluxo de potência tradicionais consideram o sistema trifásico de energia elétrica balanceado e condutores em transposição completa, analisando com isso apenas uma fase e estendendo o resultado para as outras duas com defasagens de 120°. Em sistemas de distribuição de energia elétrica, tais considerações não podem ser assumidas. Neles, há uma grande predominância de cargas monofásicas, principalmente nos circuitos secundários, e a configuração dos condutores nas linhas de distribuição nunca é eqüilateral simétrica. Portanto, o desbalanceamento da rede trifásica, bem como o acoplamento magnético entre as fases do sistema, mesmo em circuitos secundários de distribuição de energia elétrica, deve ser levado em conta, sob pena de consideráveis erros na determinação das tensões nodais e das perdas elétricas serem cometidos.

Neste trabalho apresentamos um novo método para o cálculo de fluxo de potência trifásico em redes de distribuição de energia elétrica, radiais ou malhadas, que considera o acoplamento magnético entre as fases do sistema no cálculo das tensões nodais, através da aplicação do método das fontes fictícias de tensão. Esse novo método consiste na inserção de fontes fictícias de tensão no circuito elétrico equivalente da rede de distribuição, com o propósito de determinar seus valores de tensão, de modo que as correntes residuais nelas sejam nulas ou menores que uma tolerância especificada.

2. O MÉTODO PROPOSTO

O método proposto para calcular o fluxo de potência trifásico em redes de distribuição, aplica o método das fontes fictícias de tensão para calcular as tensões nodais da rede, método este desenvolvido originalmente para a análise transitória ou em regime permanente de circuitos elétricos com elementos não-lineares e/ou com parâmetros variantes no tempo (NAIDU & TRINDADE, 1998) (NAIDU & TRINDADE, 1999) (NAIDU et al, 1999).

A Figura 1 apresenta um sistema de distribuição de energia elétrica contendo duas barras, sendo uma fonte e outra de carga.

No nó onde desejamos determinar a tensão, conectamos uma fonte fictícia de tensão $\bar{V}_{r(abc)}$. O objetivo é determinar o valor de $\bar{V}_{r(abc)}$ (módulo e fase), a partir de uma estimativa inicial, de modo que a corrente residual $\delta \bar{I}_{r(abc)}$ nela seja nula ou menor que uma tolerância especificada. Assim, a corrente residual é calculada como:

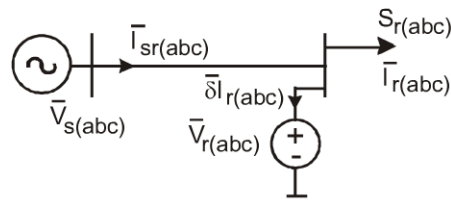


Figura 1: Trecho de uma rede de distribuição de energia elétrica

$$\delta \bar{I}_{r(abc)} = \bar{I}_{sr(abc)} - \bar{I}_{r(abc)} \quad (1)$$

$$\bar{I}_{sr(abc)} = [Z_{abc}]^{-1} [\bar{V}_{s(abc)} - \bar{V}_{r(abc)}] \quad (2)$$

$$\bar{I}_{r(abc)} = \left(S_{r(abc)} / \bar{V}_{r(abc)} \right)^* \quad (3)$$

sendo,

$\bar{I}_{sr(abc)}$ e $\bar{I}_{r(abc)}$ as correntes no trecho da rede e na carga, respectivamente, para as fases existentes;

$\bar{V}_{s(abc)}$ e $\bar{V}_{r(abc)}$ as tensões de fase nos nós fonte e carga, respectivamente, para as fases existentes;

$[Z_{abc}]$ a matriz impedância do trecho da rede determinada pelas fórmulas de Carson (KERSTING & PHILLIPS, 1995) (ANDERSON, 1973);

$S_{r(abc)}$ a potência aparente da carga (P+jQ).

Se o resíduo $\delta \bar{I}_{r(abc)}$ for não nulo ou maior que a tolerância especificada, a tensão $\bar{V}_{r(abc)}$ deve ser então corrigida.

A correção da tensão $\bar{V}_{r(abc)}$ consiste na determinação da diferença de potencial através da fonte de corrente $\delta \bar{I}_{r(abc)}$, $\Delta \bar{V}_{r(abc)}$, que injeta a corrente residual no circuito elétrico equivalente da rede de distribuição, substituindo-se a fonte de tensão conhecida por um curto-circuito e a carga por sua impedância equivalente para a tensão $\bar{V}_{r(abc)}$, $Z_{r(abc)}$ (Fig. 2).

Com,

$$Z_{r(abc)} = \bar{V}_{r(abc)} / \bar{I}_{r(abc)} \quad (4)$$

Desse modo, a nova tensão $\bar{V}_{r(abc)}$, será

$$\bar{V}_{r(abc)}^{(k+1)} = \bar{V}_{r(abc)}^{(k)} + \Delta \bar{V}_{r(abc)} \quad (5)$$

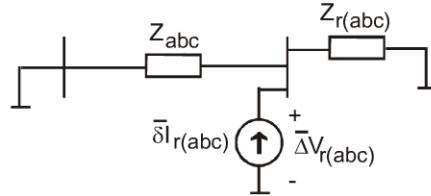


Figura 2: Correção da fonte fictícia de tensão

O processo iterativo continua com o cálculo da nova corrente residual, utilizando o valor de $\bar{V}_{r(abc)}$ corrigido. Assim, o algoritmo desse procedimento alternativo seria:

- i. Assumir um valor inicial para a fonte de tensão $\bar{V}_{r(abc)}^{(k)}$ ($k = 0$);
- ii. Determinar a corrente residual $\delta \bar{I}_{r(abc)}^{(k)}$;
- iii. Verificar convergência. Se convergir, pare.
- iv. Caso não convergiu, montar o circuito equivalente linearizado;
- v. Determinar a correção da fonte de tensão $\Delta \bar{V}_{r(abc)}^{(k)}$;

vi. Corrigir a fonte de tensão $\bar{V}_{r(abc)}^{(k)}$;

vii. Voltar ao passo (ii).

Para uma rede de distribuição radial ou malhada com mais barras, segue o procedimento sugerido considerando-se no cálculo do resíduo as contribuições de corrente de outros trechos da rede, bem como considerar a topologia completa da rede no cálculo das correções das tensões das fontes fictícias, injetando simultaneamente as correntes residuais nos seus respectivos nós.

3. APLICAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Como aplicação do cálculo do fluxo de potência trifásico utilizando o método proposto, apresentamos um sistema teste radial de baixa tensão (rede secundária), de 20 barras, cujos dados de linha e de barra são mostrados nas Tabelas I e II. A solução deste sistema, perfil de tensão, fluxos de potência e perdas totais (ver Tabelas III, IV e IX), é confrontada com os resultados obtidos através do método soma de potências convencional (MSP) (CESPEDES, 1990) (RUDNICK & MUNOZ, 1990) (RAJAGOPALAN, 1978) (ver Tabelas V, VI e IX) e do método soma de potências modificado (MSPM) (TRINDADE, 2005) (ver Tabelas VII e VIII e IX).

Tabela I: Dados de linha do sistema radial teste

De	Para	Config.	Cabo	Dist.(km)
0	1	3#	1/0 CAA	0,001
1	2	3#	1/0 CAA	0,040
2	3	3#	1/0 CAA	0,040
3	4	3#	1/0 CAA	0,040
4	5	3#	4 CAA	0,040
5	6	3#	4 CAA	0,040
4	41	3#	4 CAA	0,040
41	42	3#	4 CAA	0,040
4	43	3#	4 CAA	0,040
43	44	3#	4 CAA	0,040
1	7	3#	1/0 CAA	0,040
7	8	3#	1/0 CAA	0,040
8	9	3#	1/0 CAA	0,040
9	91	3#	4 CAA	0,040
91	92	3#	4 CAA	0,040
9	93	3#	4 CAA	0,040
93	94	3#	4 CAA	0,040
9	10	3#	4 CAA	0,040
10	11	3#	4 CAA	0,040

Obs: $d_{ab}=d_{bc}=0,20m$, $d_{ca}=0,40m$, $d_{an}=0,20m$, $d_{bn}=0,40m$ e $d_{cn}=0,60m$.

Tabela II: Dados de barra do sistema radial teste

Barra	TipCarga	KVA (a)	KVA (b)	KVA (c)	FP
0	-	-	-	-	-
1	-	-	-	-	-
2	3#	1,0	3,0	2,0	0,83
3	3#	2,0	4,0	1,0	0,83
4	3#	2,0	4,0	2,0	0,83
5	3#	1,0	5,0	3,0	0,83
6	3#	3,0	3,0	1,0	0,83
41	3#	1,0	2,0	2,0	0,83
42	3#	2,0	4,0	3,0	0,83
43	3#	3,0	7,0	4,0	0,83
44	3#	2,0	8,0	1,0	0,83
7	3#	3,0	5,0	3,0	0,83
8	2#ab	1,0	6,0	-	0,83
9	-	-	-	-	-
91	2#bc	-	6,0	1,0	0,83
92	3#	1,0	5,0	2,0	0,83
93	3#	2,0	4,0	3,0	0,83
94	3#	2,0	3,0	2,0	0,83
10	3#	2,0	3,0	3,0	0,83
11	3#	1,0	4,0	2,0	0,83

Obs: $V_{sc}=380V$.

Tabela III: Resultados (Perfil de Tensão)
Método Proposto

Nó	Tensões Nodais		
	a (V)	b (V)	c (V)
1	219,3	219,0	219,3
2	217,1	210,7	217,7
3	214,9	203,1	216,4
4	213,2	196,2	215,0
41	212,5	193,9	213,6
42	212,0	192,5	212,8
43	211,7	190,3	214,5
44	211,0	187,1	214,8
5	212,0	193,3	214,2
6	211,0	192,3	214,0
7	217,9	211,6	218,1
8	217,1	205,0	217,2
9	216,4	199,7	216,0
91	216,2	195,3	215,9
92	215,9	193,4	215,6
93	215,3	197,3	214,7
94	214,7	196,2	214,2
10	215,7	197,2	214,7
11	215,5	195,6	214,3

Tabela IV: Resultados (Fluxos de Potência)
Método Proposto

Da barra 4 para a barra 5:					
Fase a		Fase b		Fase c	
(KW)	(Kvar)	(KW)	(Kvar)	(KW)	(Kvar)
3,364	2,232	6,769	4,514	3,336	2,236
Da barra 4 para a barra 41:					
Fase a		Fase b		Fase c	
(KW)	(Kvar)	(KW)	(Kvar)	(KW)	(Kvar)
2,509	1,671	5,078	3,378	4,190	2,806
Da barra 4 para a barra 43:					
Fase a		Fase b		Fase c	
(KW)	(Kvar)	(KW)	(Kvar)	(KW)	(Kvar)
4,213	2,770	13,007	8,614	4,159	2,794

Tabela V: Resultados (Perfil de Tensão)
MSP

Nó	Tensões Nodais		
	a (V)	b (V)	c (V)
1	219,2	218,9	219,2
2	215,5	209,4	215,1
3	212,0	200,4	211,4
4	208,9	192,3	208,7
41	207,8	189,8	205,9
42	207,0	188,1	204,8
43	207,0	185,9	205,9
44	206,3	182,4	205,5
5	207,4	189,0	206,3
6	206,3	187,7	205,9
7	216,7	210,6	215,8
8	214,7	203,3	212,9
9	213,0	197,4	210,1
91	212,6	192,8	208,9
92	212,3	190,8	208,2
93	211,5	194,5	208,2
94	210,8	193,3	207,4
10	211,9	194,5	208,2
11	211,5	192,9	207,4

Tabela VI: Resultados (Fluxos de Potência)
MSP

Da barra 4 para a barra 5:					
Fase a		Fase b		Fase c	
(KW)	(Kvar)	(KW)	(Kvar)	(KW)	(Kvar)
3,364	2,247	6,783	4,533	3,347	2,244
Da barra 4 para a barra 41:					
Fase a		Fase b		Fase c	
(KW)	(Kvar)	(KW)	(Kvar)	(KW)	(Kvar)
2,512	1,680	5,084	3,393	4,202	2,814
Da barra 4 para a barra 43:					
Fase a		Fase b		Fase c	
(KW)	(Kvar)	(KW)	(Kvar)	(KW)	(Kvar)
4,204	2,805	13,055	8,666	4,189	2,809

Tabela VII: Resultados (Perfil de Tensão)
MSPM

Nó	Tensões Nodais		
	a (V)	b (V)	c (V)
1	219,3	219,0	219,4
2	216,8	210,6	218,5
3	214,4	202,8	217,9
4	212,4	195,7	217,2
41	211,6	193,5	216,0
42	211,1	192,0	215,3
43	210,8	189,8	217,0
44	210,1	186,6	217,4
5	211,1	192,8	216,6
6	210,1	191,8	216,5
7	217,7	211,4	218,8
8	216,6	204,7	218,5
9	215,7	199,4	217,7
91	215,5	194,9	217,8
92	215,3	193,0	217,6
93	214,6	196,9	216,6
94	214,0	195,8	216,1
10	215,0	196,8	216,6
11	214,7	195,2	216,3

Tabela VIII: Resultados (Fluxos de Potência)
MSPM

Da barra 4 para a barra 5:					
Fase a		Fase b		Fase c	
(KW)	(Kvar)	(KW)	(Kvar)	(KW)	(Kvar)
3,366	2,232	6,771	4,514	3,333	2,234
Da barra 4 para a barra 41:					
Fase a		Fase b		Fase c	
(KW)	(Kvar)	(KW)	(Kvar)	(KW)	(Kvar)
2,510	1,672	5,081	3,377	4,186	2,804
Da barra 4 para a barra 43:					
Fase a		Fase b		Fase c	
(KW)	(Kvar)	(KW)	(Kvar)	(KW)	(Kvar)
4,215	2,771	13,014	8,615	4,153	2,791

Tabela IX: RESULTADOS (PERDAS TOTAIS)

Perdas Totais	Fase a	Fase b	Fase c
---------------	--------	--------	--------

(Mét. Prop.)			
(kW)	1,156	7,546	0,568
Sistema	8,829 kW		
Perdas Totais (MSP)	Fase a	Fase b	Fase c
(kW)	1,206	7,776	0,132
Sistema	9,114 kW		
Perdas Totais (MSPM)	Fase a	Fase b	Fase c
(kW)	1,172	7,564	0,112
Sistema	8,848 kW		

Muito embora o método proposto para o cálculo de fluxo de potência trifásico em redes de distribuição de energia elétrica contemple as topologias radial e malhada, os resultados apresentados referem-se a uma rede radial para possibilitar a comparação deles com outros dois métodos de cálculo de fluxo de potência, quais sejam: o método soma de potências (MSP) e o método soma de potências modificado (MSPM).

Percebemos pelos resultados apresentados, que os mesmos são satisfatórios quando em comparação com os obtidos pelos outros métodos (MSP e MSPM), sendo que no caso do MSP a não consideração do acoplamento magnético entre as fases da rede de distribuição conduz a um perfil de tensão com valores menores quando comparados aos obtidos pelo MSPM e pela técnica proposta, ou seja, quando consideramos o acoplamento magnético entre as fases na determinação das tensões nodais, obtemos assim níveis de perdas totais superiores no procedimento convencional em relação ao modificado e ao proposto.

Como consequência disto e uma vez adotado o cálculo do fluxo de potência pelo método da soma de potências convencional como parâmetro inicial para a observação dos limites de variação de tensão para a conceituação de serviço adequado por parte das concessionárias de energia elétrica, observado pela Resolução N° 505 da ANEEL, pode haver a inclusão de trechos da rede de distribuição com nós cujas tensões não atendam a esta resolução, aumentando assim a necessidade de inspeção com medição de tensão no local, majorando também os custos operacionais por parte da concessionária.

Consequência também ocorre na avaliação das perdas elétricas (perdas técnicas) quando se adota o procedimento do cálculo de fluxo de potência pelo método soma de potências convencional (MSP). Com um perfil de tensão com valores mais baixos, repercute no aumento das perdas, pois as cargas são modeladas como potência constante. Assim, há nesta situação uma indicação de um nível de perdas elétricas maior, levando à adoção de procedimentos para a redução das mesmas, não sintonizados com valores mais próximos do real, repercutindo também em aumento de custos.

Esses resultados também evidenciam a necessidade da consideração do acoplamento magnético entre as fases da rede de distribuição na determinação das tensões nodais, mesmo na rede secundária. Em (KERSTING & PHILLIPS, 1995). este fato é chamado à atenção para a rede primária, clamando para uma melhor representação das linhas de distribuição para o cálculo de fluxo de potência trifásico.

4. CONCLUSÕES

Diante do exposto neste trabalho, podemos concluir que o método proposto para o cálculo de fluxo de potência trifásico para redes de distribuição de energia elétrica leva a obtenção de valores de tensão nodais mais próximos do real, por se considerar o acoplamento magnético entre as fases da rede de distribuição na determinação dessas tensões, semelhante ao obtido pelo MSPM com a vantagem de contemplar a topologia malhada, repercutindo assim em uma melhor avaliação preliminar quanto à adequação do serviço, em observação à Resolução N° 505 da ANEEL, caso seja adotado o procedimento do cálculo de fluxo de potência para isso, bem como numa avaliação mais realista dos níveis de perdas elétricas (perdas técnicas) na rede de distribuição. Outra evidência é a necessidade de uma melhor representação das redes trifásicas secundárias, considerando o acoplamento magnético entre as suas fases no cálculo de fluxo de potência trifásico.

Como continuação deste trabalho de pesquisa, está em andamento a implementação de reguladores de tensão e a consideração de geração distribuída ao longo da rede de distribuição. Outro aspecto relevante é a possibilidade da inclusão, da representação de fontes de harmônicos, na implementação do método proposto, podendo ser calculado o fluxo de potência harmônico em redes de distribuição de energia elétrica.

5. REFERÊNCIAS

- ANDERSON, M.P. "Analysis of Faulted Power Systems". Ames, Iowa State Univ. Press, 1973.
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica – Resolução N° 505, novembro 2001.
- CESPEDES, R. "New Method for the Analysis of Distribution Networks". IEEE Transactions on Power Delivery, V. 5, n.1, pp.391-396, Jan. 1990.
- KERSTING, W.H. & PHILLIPS, W. H. "Distribution Feeder Line Models". IEEE Transaction on Industry, V. 31, n.4, pp. 715-720, Jul./Aug., 1995.
- NAIDU, S. R. & TRINDADE, W. J. "A Rapidly Convergent Technique for Determining the Response of AC/DC Converters". ICHQP VIII, Atenas, 1998, pp. 958-963.
- _____. "An Efficient Technique for Determining the Responses of Nonlinear Circuits". IPST99, Budapest, 1999, pp. 590-595.
- NAIDU, S. R., LIMA, A. M. N. & TRINDADE, W. J. "Methodology for Simulating the Response of Nonlinear Power Circuits". IEE Proceedings of Generation Transmission Distribution, vol. 146, n. 6, November 1999, pp. 568-572.
- RAJAGOPALAN, S. "A New Computacional Algorithm for Load Flow Study of Radial Distribution Systems". Computer and Electr. Eng., V.5, pp.225-231, Pergamon Press, 1978.
- RUDNICK, H. & MUNOZ, M. "Three Phase Load Flow Analysis in Radial Power Systems". I SIDE, 1990.
- TRINDADE, W. J. "Cálculo de Fluxo de Potência Trifásico para Redes de Distribuição de Energia Elétrica Utilizando o Método Soma de Potências Modificado". In: VI SBQEE, Belém-PA, agosto, 2005.