

Desenvolvimento e Modelagem de Regulador de Tensão para Fluxo de Potência em Redes de Distribuição de Energia Elétrica

Rodrigo Mendonça de CARVALHO; Antônio Cesar Baleeiro ALVES

Escola de Engenharia Elétrica e de Computação – UFG

Mestrado – Órgão Financiador: CAPES

rodrigo.mendca@gmail.com; abaleeiro@gmail.com

Palavras-chave: distribuição de energia elétrica; fluxo de potência; regulador de tensão.

INTRODUÇÃO

O sistema de distribuição de energia elétrica conecta sistemas de geração e transmissão com as instalações elétricas e equipamentos dos consumidores. A infraestrutura de interface entre a linha de transmissão e a rede de distribuição é a subestação (SE), da qual se originam os alimentadores. Entre as características físicas destacam-se: a topologia radial, as múltiplas conexões, as cargas de diferentes naturezas, e circuitos com baixa relação entre reatância e resistência, entre outras.

À medida que cresce uma rede de distribuição, aumenta a necessidade de dispositivos para a regulação e controle de tensão, auxiliando na monitoração e correção de suas magnitudes. Assim, a utilização de reguladores de tensão e, mais recentemente, aplicação de geração distribuída contribuem para o aperfeiçoamento do processo de distribuição de energia elétrica.

Estes fatos evidenciam a necessidade do desenvolvimento de metodologias específicas de fluxo de potência que possibilitem uma maior eficiência computacional para a análise da operação de sistemas de distribuição. O fluxo de potência é uma ferramenta muito importante e fundamental para a análise de qualquer sistema de potência, seja para aplicações em tempo real ou nas etapas de planejamento da operação e da expansão das redes elétricas, sendo que um dos métodos mais utilizados é o método *Backward/Forward Sweep (BFS)* proposto por Cheng e Shirmohammadi [1] e suas versões modificadas.

A principal finalidade desse trabalho é a elaboração computacional de um fluxo de potência capaz de analisar uma rede de distribuição através de simulação e aplicação de um regulador de tensão automático (*AVR – Automatic Voltage Regulator*), no caso, do tipo B, conforme descrito em [2] utilizando algoritmo com base no método *BFS*.

MATERIAL E MÉTODOS

A rede de distribuição é representada por um grafo com barras, ou nós, e ramos, sendo que as cargas são supridas nas barras como injeções de corrente. A SE é a barra de onde se origina o grafo. O método proposto se baseia em varreduras, das extremidades do grafo para a origem (barra da SE) e da origem para as extremidades, sendo constituído por três etapas básicas. São elas:

1. Calcular a injeção de corrente em cada barra i na iteração k através da equação:

$$I_i^k = \left(\frac{S_i^k}{V_i^k} \right)^* - B_i \cdot V_i^k \quad (1)$$

sendo I é a corrente injetada, S a potência aparente, V a tensão suprida e B a susceptância na barra;

2. Etapa *Backward* - Calcular as correntes nos ramos através da soma das correntes injetadas nas barras até a SE (Lei de Kirchhoff das Correntes);
3. Etapa *Forward* - Calcular as novas tensões nas barras a partir da SE através da subtração da tensão inicial (nominal) pela queda de potencial no ramo utilizando as correntes calculadas na etapa *Backward*;

As etapas citadas são repetidas iterativamente até que a diferença entre as correntes injetadas calculadas seja menor que a tolerância estabelecida para a convergência. Neste trabalho, as etapas 1, 2 e 3 são implementadas para as fases A, B e C da rede trifásica seguindo uma modelagem matricial.

Para a elaboração do modelo do regulador trifásico aplicado nesse algoritmo de fluxo de potência foram utilizados três reguladores de tensão de passo monofásicos do tipo B conectados em estrela aterrado (Y_g). Esses reguladores de passo contêm uma chave de reversão habilitando uma faixa do regulador de $\pm 10\%$, que equivale, usualmente, a 32 passos. Cada passo equivale a $5/8\%$ ou $0,75V$ sobre uma base de 120 volts. Esses valores de proporção de regulação efetiva são como uma função da proporção do número de espiras, mas como a relação de espiras não é conhecida, utilizam-se os passos, chamados de *taps*.

O modelo matemático do regulador é inserido no algoritmo BFS de modo que é efetuada uma verificação a cada iteração para checar se a tensão no centro de carga (*load center*) não atingiu níveis, por exemplo, abaixo de 93% da tensão nominal, ou seja, é aceitável uma queda de tensão de no máximo 7%, como

estabelece [4]. Caso essa condição não seja atendida, o regulador será ativado variando-se seus *taps* em função do acréscimo requerido de tensão.

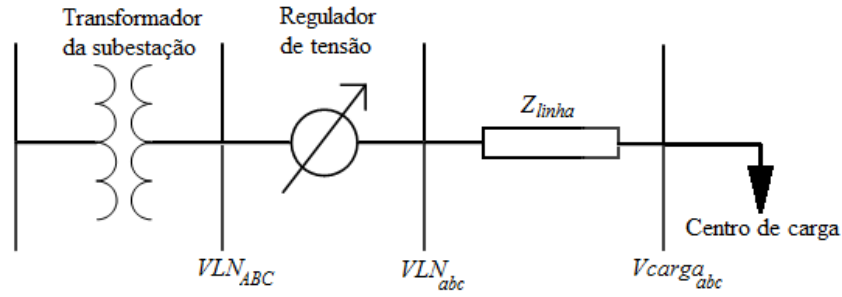


Figura 1 – Diagrama de um sistema de distribuição simplificado com destaque para regulador e barra do centro de carga.

A modelagem, então, é feita pelas seguintes equações referentes ao tipo de regulador sob estudo [2]:

$$[a] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.a) \quad [b] = [Z_{linha}] \quad (2.b)$$

Sendo $[Z_{linha}]$ a matriz impedância de linha entre o regulador e a barra que representa o centro de carga, na qual se pretende regular a tensão.

Calculam-se as tensões de fase nesta barra ($V_{carga_{abc}}$), de acordo com as tensões (VLN_{abc}) e correntes (I_{abc}) na subestação, de forma que:

$$[V_{carga_{abc}}] = [A][VLN_{abc}] - [B][I_{abc}] \quad (3.a)$$

Em que

$$[A] = [a]^{-1} \quad (3.b) \quad [B] = [A][b] \quad (3.c)$$

A partir desses cálculos, as tensões da carga na base 120 volts ($V120_{abc}$) são encontradas dividindo-se as tensões de fase na barra do centro de carga pela constante do regulador N_{pt} , como a seguir:

$$N_{pt} = \frac{|VLN_{nominal}|}{120} \quad (4.a) \quad [V120_{abc}] = \frac{[V_{carga_{abc}}]}{N_{pt}} \quad (4.b)$$

Para o cálculo dos *taps* das fases do regulador efetua-se o cálculo a seguir:

$$\begin{bmatrix} tapA \\ tapB \\ tapC \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{|(V_{nivel} - banda/2) - |V120_a||}{0,75} \\ \frac{|(V_{nivel} - banda/2) - |V120_b||}{0,75} \\ \frac{|(V_{nivel} - banda/2) - |V120_c||}{0,75} \end{bmatrix} \quad (5.a) \quad \begin{bmatrix} a_{Ra} \\ a_{Rb} \\ a_{Rc} \end{bmatrix} = (1 - 0,00625) * \begin{bmatrix} tapA \\ tapB \\ tapC \end{bmatrix} \quad (5.b)$$

Sendo V_{nivel} o nível de tensão desejado e $banda$ a faixa de tolerância para a tensão, na base 120 volts e a_{Ra} , a_{Rb} e a_{Rc} representam as respectivas taxas de

variação de passo do regulador de cada fase. A partir dos *taps* calculados, uma nova tensão é imposta ao sistema a partir dos terminais do regulador:

$$[TAP] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ a_{Ra} & 1 & 0 \\ 0 & a_{Rb} & 1 \\ 0 & 0 & a_{Rc} \end{bmatrix} \quad (6.a)$$

$$\begin{bmatrix} VLN_a \\ VLN_b \\ VLN_c \end{bmatrix} = [TAP] \begin{bmatrix} VLN_A \\ VLN_B \\ VLN_C \end{bmatrix} \quad (6.b)$$

Onde, VLN_{ABC} e VLN_{abc} as tensões antes e depois dos terminais do regulador, respectivamente. Lembrando que, para o modelo proposto, a regulação ocorre entre 90 e 100% do valor nominal, os *taps* de (5.a) são limitados à faixa [-16,16].

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para exemplificar os resultados obtidos, apresenta-se na Tabela 1 o fluxo de potência do sistema de distribuição de energia elétrica de 13 barras do IEEE [5], através do algoritmo proposto, é apresentado a seguir.

Tabela 1 – Fluxo de potência do sistema IEEE 13 barras

Barra / nº	Tensões nas fases (p.u./graus) sem regulador						Tensões nas fases (p.u./graus) com regulador					
	A		B		C		A		B		C	
	módulo	ângulo	módulo	ângulo	módulo	ângulo	módulo	ângulo	módulo	ângulo	módulo	ângulo
650	1	0	1	-120	1	120	1	0	1	-120	1	120
RG60	1	0	1	-120	1	120	1,0738	0	1,0322	-120	1,1111	120
632	0,9534	-2,83	0,9930	-120,76	0,9274	117,32	1,0290	-2,34	1,0251	-120,77	1,0478	117,74
633	0,9502	-2,92	0,9909	-120,79	0,9247	117,32	1,0260	-2,41	1,0229	-120,81	1,0455	117,73
634	0,9418	-3,17	0,9846	-120,96	0,9179	117,13	1,0182	-2,63	1,0168	-120,97	1,0395	117,58
645			0,9837	-120,93	0,9258	117,35			1,0161	-120,94	1,0463	117,75
646			0,9820	-121,01	0,9238	117,39			1,0146	-121,01	1,0444	117,79
671	0,9171	-6,12	1,0049	-120,38	0,8655	114,83	0,9935	-5,08	1,0362	-120,47	0,9933	115,68
680	0,9171	-6,12	1,0049	-120,38	0,8655	114,83	0,9935	-5,08	1,0362	-120,47	0,9933	115,68
684	0,9136	-5,99			0,8621	114,62	0,9900	-4,94			0,9902	115,48
611					0,8579	114,34					0,9863	115,21
652	0,9080	-6,02					0,9847	-4,97				
692	0,9171	-6,12	1,0049	-120,38	0,8655	114,83	0,9935	-5,08	1,0362	-120,47	0,9933	115,68
675	0,9117	-6,81	1,0089	-120,19	0,8548	114,77	0,9884	-5,66	1,0398	-120,31	0,9839	115,65

Nesse sistema nem todas as barras são trifásicas, espaços em branco significam ausência da fase, e nota-se uma queda do nível de tensão relativamente alta a partir da barra 671 (13% em relação ao valor nominal – 1p.u.), principalmente na fase C. Assim, levando em conta sua localização (centro geométrico da rede), a mesma foi escolhida como centro de carga.

Após 7 iterações, o sistema sem a presença do regulador, converge nos valores apresentados na primeira metade da tabela. Haja vista a necessidade do regulador, na presença deste, logo após a segunda iteração ocorre sua ativação, na qual os *taps* calculados (isto é, 11, 5 e 16 – A, B e C) dão sequência ao fluxo de potência, que converge, então, após 11 iterações.

Observa-se que as tensões se elevam a partir do secundário do regulador, dando condições para que os consumidores adiante recebam energia em níveis adequados. Tomando como exemplo a barra 671 (centro de carga) observa-se desvio de menos de 1% em relação ao valor nominal, o que é aceitável pelo órgão regulador. Com a atuação do regulador, todas as tensões do sistema alcançaram níveis próximos ao valor estipulado.

CONCLUSÕES

Esse trabalho se dedicou à implementação de um modelo matemático computacional de regulador de tensão trifásico aplicado em fluxo de potência com base no método *backward/forward sweep* para sistemas de distribuição de energia elétrica. Reguladores de tensão são de extrema importância para assegurar níveis adequados de tensão para suprimento dos consumidores.

Para esse caso em particular, o modelo se apresentou eficaz e sua aplicação em um sistema de maior porte deve ser implementada para a verificação de sua eficiência em fluxos de potência para estudos de sistemas de distribuição reais. Necessita-se continuar com a pesquisa, ainda, levando em consideração inovações como a geração distribuída.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] C. S. Cheng e D. Shirmohammadi, "A three-phase power flow method for real-time distribution system analysis," IEEE Trans on Power Systems, vol. 10, no. 2, pp. 671-769, May 1995.
- [2] Kersting, W. H. "Distribution system modeling and analysis", CRC Press, USA, Second Edition, 2006.
- [3] W. H. Kersting. "The Modeling and Application of Step Voltage Regulators". Milsoft Utility Solutions, IEEE 2009.
- [4] ANEEL, PRODIST, Módulo 8 – "Qualidade da Energia Elétrica". Resolução Normativa nº 424/2010. Jan. 2011.
- [5] IEEE Distribution Planning Working Group Report. "Radial distribution test feeders," IEEE Trans. on Power Systems, vol. 6, no. 3, pp. 975-985, Ago. 1991.