

Proposição de uma Técnica de Parametrização Global para o Fluxo de Carga Continuado Baseado na Soma das Tensões Nodais das Equações Não Lineares

Alfredo Bonini Neto

Departamento de Engenharia Elétrica, FEIS, UNESP
15385-000, Ilha Solteira, SP
E-mail: alfredoneto@aluno.feis.unesp.br

Dilson Amâncio Alves

Departamento de Engenharia Elétrica, FEIS, UNESP
15385-000, Ilha Solteira, SP
E-mail: dalves@dee.feis.unesp.br

Enio Garbelini

Departamento de Matemática, UNIFADRA, FUNDEC
15700-000, Dracena, SP
E-mail: dirunifadra@fundec.edu.br

O cálculo de fluxo de carga em um sistema de energia elétrica ou sistemas de potência consiste essencialmente na determinação do estado da rede. Este sistema é composto de uma barra de referência (barra $V\theta$) que fornece a referência angular, as barras de geração (barras PV) que geram energia elétrica, como uma usina hidroeétrica, as barras de carga (barras PQ) que consomem energia, como uma cidade, as linhas de transmissão (LT) que ligam uma barra a outra e os transformadores que elevam e diminuem a tensão. O problema do fluxo de carga pode ser formulado por um sistema de equações e inequações algébricas não lineares que correspondem, respectivamente, às leis de Kirchhoff e a um conjunto de restrições operacionais da rede elétrica e de seus componentes [1]. Na formulação mais simples do problema (formulação básica), a cada barra da rede são associadas quatro variáveis, sendo que duas delas entram no problema como dados e duas como incógnitas. As variáveis são:

V_k (magnitude da tensão nodal), θ_k (ângulo da tensão nodal), P_k (geração líquida de potência ativa) e Q_k (injeção líquida de potência reativa). Dependendo de quais variáveis nodais entram como dados e quais são consideradas como incógnitas, definem-se três tipos de barras:

$PQ_$ são dados P_k e Q_k , e calculados V_k e θ_k , $PV_$ são dados P_k e V_k , e calculados Q_k e θ_k , $V\theta_$ são dados V_k e θ_k , e calculados P_k e Q_k .

O conjunto de equações do problema do fluxo de carga é formado por duas equações para cada barra, embora este trabalho tem por objetivo calcular apenas o subsistema 1, ou seja, calcular V e θ para todas as barras, cada uma delas representando o fato de as potências ativas e reativas injetadas em uma barra serem iguais à soma dos fluxos correspondentes que deixam a barra através de linhas de transmissão, transformadores, etc. Isso corresponde à imposição das Leis de Kirchhoff e pode ser expressa matematicamente como se segue:

$$\begin{aligned} P_k(\theta, V) &= G_k V_k^2 - V_k \sum_{l \in \Omega_k} V_l (g_{kl} \cos \theta_{kl} + b_{kl} \sin \theta_{kl}) \\ Q_k(\theta, V) &= -B_k V_k^2 - V_k \sum_{l \in \Omega_k} V_l (g_{kl} \sin \theta_{kl} - b_{kl} \cos \theta_{kl}) \end{aligned} \quad (1)$$

onde Ω_k é o conjunto de todas as barras diretamente conectadas à barra k . Lembrando que quanto maior forem os números de barras (usinas, cidades) maior é o sistema de equações não lineares e maiores são as equações. Em [1] pode-se ver com maiores detalhes as deduções das equações. O Método de Newton é o mais utilizado para resolução destas equações não lineares e pode ser obtida por meio de sucessivas soluções do método de NR, a partir de um caso base até próximo ao ponto crítico, para incrementos graduais da carga. Em geral a equação do fluxo de carga (FC), pode ser escrita como:

$$G(\theta, V, \lambda) = 0 \quad (2)$$

onde λ é o fator de carregamento. O traçado da trajetória de solução é efetuado através de sucessivos incrementos dessa nova variável. Mas esta técnica não é muito viável para efeitos de

precisão, pois o método diverge próximo ao ponto crítico, devido à singularidade da matriz Jacobiana (\mathbf{J}).

Este trabalho apresenta uma técnica de parametrização global para o fluxo de carga continuado. O objetivo é eliminar a singularidade da matriz \mathbf{J} no ponto de máximo carregamento (PMC), utilizando assim a equação de uma reta no plano formado pelas variáveis soma das tensões nodais e fator de carregamento. O trabalho anterior [2] utilizava varias variáveis para obtenção da curva P-V, no entanto algumas falhavam. Já na metodologia proposta como é utilizado um único plano ($\lambda, \Sigma y$), não mais foi encontrado dificuldades na obtenção das curvas P-V. Uma vez obtido toda a trajetória de solução, todos os dados do sistema é encontrado (todas as variáveis).

De uma forma geral a equação a ser acrescida a equação (2) é a seguinte:

$$R(\mathbf{y}, \lambda, \alpha, \beta) = \alpha(\lambda - \lambda^0) - \beta([\mathbf{y}] - [\mathbf{y}^0])/n = 0 \quad (3)$$

onde α e β são coeficiente angulares que definem a reta a ser utilizada, $[\mathbf{y}]$ é a medida escalar do vetor $\mathbf{y} = [y_1, \dots, y_n]^T$, n é o número de barras. Onde \mathbf{y} é igual à equação: [3]

$$[\mathbf{y}] = \|\mathbf{y}\|/n = (y_1 + y_2 + \dots + y_n)/n = \sum V_k / n \quad (4)$$

A figura 1 apresenta resultados para um sistema de 552 equações não lineares. Na figura 1(a) mostra a obtenção da trajetória de soluções formada pelo plano soma das tensões nodais e fator de carregamento. Na figura 1(b) mostra o resultado de uma dessas equações (variável V da barra 526) e na figura 1(c) e (d) o número de iterações e o tempo computacional para obtenção da curva da figura 1(a).

Com isso pode-se observar que utilizando o mesmo plano foi possível eliminar a singularidade da matriz \mathbf{J} no PMC.

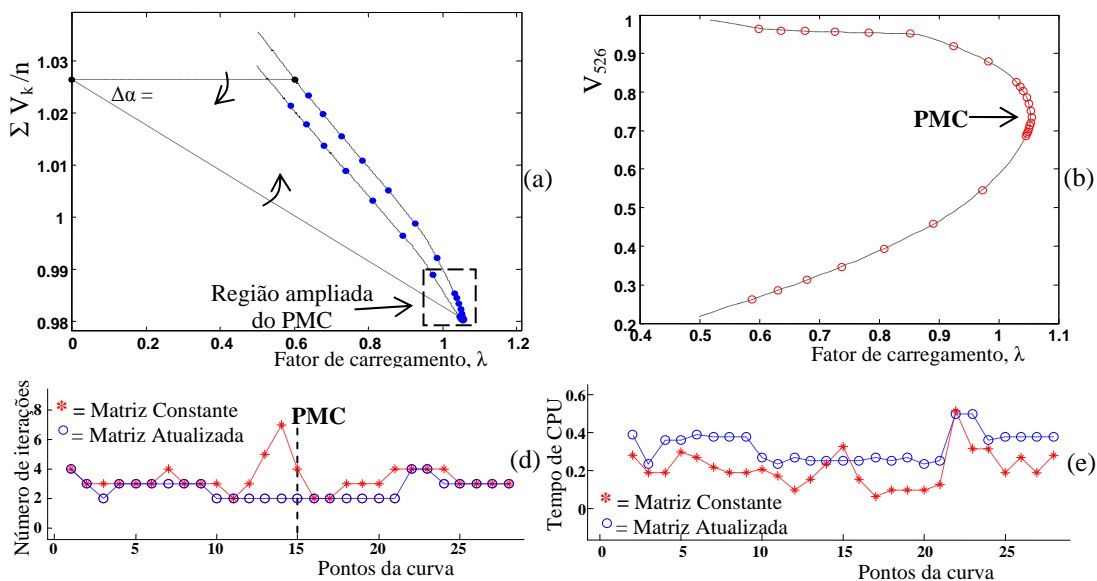


Figura 1. Desempenho para o sistema IEEE-300 barras: (a) curva $\lambda - \Sigma V_k / n$, (b) curva P-V da barra crítica, (c) número de iterações do método proposto com matriz atualizada e com matriz constante, (d) tempo computacional de cada iteração para obtenção da curva P-V do sistema IEEE-300 barras pelo método proposto com matriz atualizada e com matriz constante.

REFERÊNCIAS

- [1] A. Monticelli, "Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica", Edgard Blücher, São Paulo, 164p., 1983
- [2] Bonini Neto, A. ; Garbelini, E. ; Alves, D. A., Técnicas de Parametrizações na Solução de Sistemas de Equações Não Lineares do Fluxo de Carga Continuado. In: XXXI Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional, 2008, BELÉM - PA, 2008. p. 1-7.
- [3] Seydel R., From Equilibrium to Chaos: Practical Bifurcation and Stability Analysis, 2ª ed., Springer - Verlag, New York, 1994, 407p.