

SEL – 5717 Estimação de Estado em Sistemas Elétricos de Potência

Prof. João Bosco A. London Junior
Departamento de Engenharia Elétrica - EESC - USP
E-mails: jbalj@sc.usp.br

1

Fluxo de Potência

- Monticelli, A. J. (1983). "Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica", São Paulo - Brasil: Edgard Blucher.

2

Aspectos Básicos

- ✓ O problema de fluxo de potência (ou fluxo de carga) em uma rede de energia elétrica consiste na obtenção das condições de operação (tensões complexas nas barras e fluxos de potência nas linhas e transformadores) em função da sua topologia e dos níveis de demanda e geração de potência
- ✓ Tal problema pode ser formulado através de um conjunto de equações e inequações algébricas não-lineares correspondendo, respectivamente, às Leis de Kirchhoff e a um conjunto de restrições operacionais do sistema

3

Modelagem

- ✓ No problema de fluxo de potência a modelagem do sistema é estática, significando que a rede é representada por um conjunto de equações e inequações algébricas
 - Representação utilizada em situações nas quais as variações com o tempo são suficientemente lentas para que se possam ignorar os efeitos transitórios
- ✓ A rede trifásica equilibrada é representada somente por uma das fases (modelo unifilar) – formulação básica

4

Modelagem

- ✓ Vale lembrar então que, de uma forma geral, os componentes de um sistema de energia elétrica podem ser classificados em dois grupos:
 - Os que estão ligados entre um nó qualquer e o nó terra, como é o caso de geradores, cargas, reatores e capacitores
 - Os que estão ligados entre dois nós quaisquer da rede, como é o caso de linhas de transmissão e transformadores

5

Aplicações

- ✓ O Fluxo de Potência é uma ferramenta básica para o estudo da rede elétrica, utilizado tanto no planejamento como na operação de redes elétricas (análise de contingências). Em geral é parte de um procedimento mais complexo

Operação

análise de segurança: várias contingências (acidentes, distúrbios) são simuladas e o estado de operação da rede após a contingência deve ser obtido. Eventuais violações dos limites de operação são detectados e ações de controle corretivo e/ou preventivo são determinadas.

Planejamento

planejamento da expansão: novas configurações da rede são determinadas para atender ao aumento da demanda e o estado de operação da rede para a nova configuração deve ser obtido.

Formulação Básica

- ✓ Na formulação básica do problema de FP, a cada barra da rede são relacionadas quatro variáveis, sendo que, dependendo do tipo de barra, duas entram como dados e duas como incógnitas
- ✓ Essas variáveis são: magnitude da tensão nodal (V_k – barra k), ângulo de fase da tensão nodal (θ_k), injeção líquida (geração menos carga) de potência ativa (P_k) e de potência reativa (Q_k)
- ✓ Dependendo de quais variáveis nodais entram como dados e quais são consideradas como incógnitas, definem-se três tipos de barras

7

Formulação Básica

Tipo	Dados	Incógnitas	Características
PQ	P_k, Q_k	V_k, θ_k	Barras de carga
PV	P_k, V_k	Q_k, θ_k	Barras de geração incluindo condensadores síncronos
Referência ($V\theta$, slack, swing)	V_k, θ_k	P_k, Q_k	Barras de geração (geralmente uma unidade geradora de grande capacidade)

- ✓ A barra $V\theta$ (ou referência) possui duas funções:

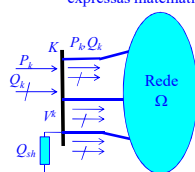
- Fornecer uma referência angular para rede (a referência de magnitude de tensão é a própria terra)
- Fechar o balanço de potência do sistema, levando em conta que as perdas de transmissão não são conhecidas antes de se ter a solução final do problema (daí a necessidade de se dispor de uma barra no sistema na qual não é especificada a potência ativa)

8

Equacionamento

✓ O conjunto de equações é formulado por duas equações para cada barra, cada uma delas representando o fato de as potências ativa e reativa injetadas em uma barra serem iguais à soma dos fluxos correspondentes que deixam a barra através de linhas de transmissão, transformadores, etc.

➤ Correspondem à imposição da 1ª Lei de Kirchhoff e podem ser expressas matematicamente como segue:



$$\begin{cases} P_k = \sum_{m \in \Omega_k} P_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m) \\ Q_k + Q_k^{sh} = \sum_{m \in \Omega_k} Q_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m) \end{cases} \quad (1)$$

9

Equacionamento

$$\begin{cases} P_k = \sum_{m \in \Omega_k} P_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m) \\ Q_k + Q_k^{sh} = \sum_{m \in \Omega_k} Q_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m) \end{cases} \quad (1)$$

✓ Em que:

- $K=1, \dots, NB$, sendo NB o número de barras da rede;
- Ω_k – conjunto de barras vizinhas da barra k ;
- V_k, V_m – magnitude de tensões nas barras terminais do ramo $k-m$;
- θ_k, θ_m – ângulos de fase das tensões nas barras terminais do ramo $k-m$;
- $P_{km}(Q_{km})$ – fluxo de potência ativa (reativa) no ramo $k-m$;
- Q_k^{sh} – componente da injeção de potência reativa devida ao elemento shunt da barra k ($Q_k^{sh} = b_k^{sh} V_k^2$, sendo b_k^{sh} a susceptância shunt ligada à barra k);

10

Equacionamento

✓ O problema de fluxo de carga é indeterminado nas variáveis θ , sendo necessário adotar uma referência angular (barra $V\theta$)

➤ As equações (1) foram montadas considerando-se a seguinte convenção de sinais:

- As injeções líquidas de potência são positivas quando entram na barra (geração) e negativas quando saem da barra (carga)
- Os fluxos de potência são positivos quando saem da barra e negativos quando entram
- Para os elementos shunt das barras é adotada a mesma convenção que para as injeções

✓ Inequações:

➤ O conjunto de inequações, que fazem parte do problema de fluxo de carga, é formado, entre outras, pelas restrições nas magnitudes das tensões nodais nas barras PQ e pelos limites nas injeções de potência reativa das barras PV

$$V_k^{\min} \leq V_k \leq V_k^{\max} \quad Q_k^{\min} \leq Q_k \leq Q_k^{\max} \quad 11$$

Equacionamento

➤ Procedimento geral de resolução do problema de fluxo de carga:

- Tomar as equações de P_k para as barras dos tipos PQ (carga) e PV (geração), para as quais existem valores especificados de P_k .
- Tomar as equações de Q_k para as barras do tipo PQ (carga), para as quais existem valores especificados de Q_k .
- Supor que existam NPQ barras do tipo PQ e NPV barras do tipo PV.
- Tem-se (NPQ + NPV) equações de P_k e NPQ equações de Q_k . O total de equações é (2NPQ + NPV).
- As incógnitas são V_k e θ_k para as barras PQ e θ_k para as barras PV. O total de incógnitas é também igual a (2NPQ + NPV).
- Tem-se um sistema de (2NPQ + NPV) equações algébricas não-lineares e mesmo número de incógnitas.
- Obter as incógnitas por algum método (que será mostrado adiante).
- Calcular P_k para a barra de referência e Q_k para a barra de referência e barras PV.

12

Equacionamento

► Procedimento geral de resolução do problema de fluxo de carga:

- Tomar as equações de P_k para as barras dos tipos PQ (carga) e PV (geração), para as quais existem valores especificados de P_k .
- Tomar as equações de Q_k para as barras do tipo PQ (carga), para as quais existem valores especificados de Q_k .
- Supor valores para V_k e θ_k para as barras do tipo PV.
- Tem-se um sistema de $(2NPQ + NPV)$ equações algébricas não-lineares e mesmo número de incógnitas.
- Obter as incógnitas por algum método (que será mostrado adiante).
- Calcular P_k para a barra de referência e Q_k para a barra de referência e barras PV.

Tal procedimento pode ser decomposto em dois subsistemas de equações algébricas conforme apresentado a seguir

13

Equacionamento

► Procedimento geral de resolução do problema de fluxo de carga:

- Tomar as equações de P_k para as barras dos tipos PQ (carga) e PV (geração), para as quais existem valores especificados de P_k .
- Tomar as equações de Q_k para as barras do tipo PQ (carga), para as quais existem valores especificados de Q_k .
- Supor que existam NPQ barras do tipo PQ e NPV barras do tipo PV.
- (1) Tem-se $(NPQ + NPV)$ equações de P_k e NPQ equações de Q_k . O total de equações é $(2NPQ + NPV)$.
- As incógnitas são V_k e θ_k para as barras PQ e θ_k para as barras PV. O total de incógnitas é também igual a $(2NPQ + NPV)$.
- Tem-se um sistema de $(2NPQ + NPV)$ equações algébricas não-lineares e mesmo número de incógnitas.
- Obter as incógnitas por algum método (que será mostrado adiante).
- (2) Calcular P_k para a barra de referência e Q_k para a barra de referência e barras PV.

14

Equacionamento

✓ Procedimento de solução de fluxo de potência:

► Subsistema 1 (dimensão $2NPQ+NPV$)

Dados (equações) $\left\{ \begin{array}{l} P_k \text{ e } Q_k \text{ nas barras PQ} \\ P_k \text{ nas barras PV} \end{array} \right.$

Total = $2NPQ + NPV$

Incógnitas $\left\{ \begin{array}{l} V_k \text{ e } \theta_k \text{ nas barras PQ} \\ \theta_k \text{ nas barras PV} \end{array} \right.$

Total = $2NPQ + NPV$

✓ As incógnitas podem ser agrupadas no vetor \underline{x} , dado a seguir:

$$\underline{x} = \begin{bmatrix} \theta \\ V \end{bmatrix} \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{NPV+NPQ} \\ \text{NPQ} \end{array} \right. \quad (2)$$

Equacionamento

✓ Procedimento de solução de fluxo de potência:

► Subsistema 1 (dimensão $2NPQ+NPV$)

Assim temos um sistema de $2NPQ+NPV$ equações algébricas não lineares com o mesmo número de incógnitas, ou seja:

$$P_k^{\text{esp}} - P_k^{\text{cal}} = 0 \quad \rightarrow \text{Para as barras PQ e PV}$$

$$Q_k^{\text{esp}} - Q_k^{\text{cal}} = 0 \quad \rightarrow \text{Para as barras PQ}$$

- ✓ esp (especificado) valor dado no problema
- ✓ cal – valor calculado pelas equações do fluxo de carga

Essas equações podem ser reescritas da seguinte forma:

$$\Delta P_k = P_k^{\text{esp}} - P_k^{\text{cal}}(\underline{V}, \underline{\theta}) = 0 \quad \rightarrow \text{Para as barras PQ e PV}$$

$$\Delta Q_k = Q_k^{\text{esp}} - Q_k^{\text{cal}}(\underline{V}, \underline{\theta}) = 0 \quad \rightarrow \text{Para as barras PQ}$$

16

Equacionamento

✓ Procedimento de solução de fluxo de potência:

➤ Subsistema 1 (dimensão $2NPQ+NPV$)

▪ As equações ΔP_k e ΔQ_k podem ser colocadas na forma vetorial:

$$\Delta P = P^{esp} - P^{cal}(V, \theta) = 0 \quad \rightarrow \text{Para as barras PQ e PV} \quad (3)$$

$$\Delta Q = Q^{esp} - Q^{cal}(V, \theta) = 0 \quad \rightarrow \text{Para as barras PQ} \quad (4)$$

em que $\underline{P}(Q)$ é o vetor das injeções de potência ativa (reativa)

▪ Seja $\underline{g}(\underline{x})$ a função vetorial dada por:

$$\underline{g}(\underline{x}) = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad \left. \begin{array}{l} \text{NPV+NPQ} \\ \text{NPQ} \end{array} \right\}$$

▪ Por meio dessa função o subsistema 1, dado pelas equações (3) e (4), pode ser colocado da seguinte forma:

$$\underline{g}(\underline{x}) = \underline{0}$$

17

Equacionamento

✓ Procedimento de solução de fluxo de potência:

➤ Subsistema 1 (dimensão $2NPQ+NPV$)

$$\underline{g}(\underline{x}) = \underline{0}$$

▪ Para resolver esse sistema de equações algébricas não lineares existem diversos métodos sendo que um dos mais eficientes é o método de Newton (que será apresentado na sequência)

▪ Uma vez resolvido o subsistema 1, e portanto já sendo conhecidas V_k e θ_k para todas as barras, deseja-se calcular P_k e Q_k na barra de referência e Q_k nas barras PV ➔ Subsistema 2

18

Equacionamento

✓ Procedimento de solução de fluxo de potência:

➤ Subsistema 2

▪ Trata-se de um sistema com $NPV+2$ equações algébricas não-lineares com o mesmo número de incógnitas, no qual as incógnitas aparecem de forma explícita, o que torna trivial o processo de resolução

19

Solução do Subsistema 1

20

Fluxo de Carga Pelo Método de Newton – caso unidimensional

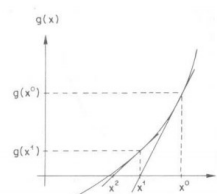
$$g(x) = 0$$

- ✓ Pretende-se encontrar um valor de x para o qual a função $g(x)$ se anula
- ✓ A ideia central do método é, a partir de uma aproximação inicial para a raiz da função em análise (x^0), o que em inglês denomina-se *start point*, para, em sequência “refinar” essa aproximação através de processo iterativo

21

Fluxo de Carga Pelo Método de Newton – caso unidimensional

- ✓ A ideia central do método é, a partir de uma aproximação inicial para a raiz da função em análise (x^0), o que em inglês denomina-se *start point*, para, em sequência “refinar” essa aproximação através de processo iterativo



22

Fluxo de Carga Pelo Método de Newton – caso multidimensional

- ✓ O método de Newton é empregado para resolução do Subsistema 1:
- ✓ Como mostrado anteriormente, aquele subsistema pode ser representado de uma forma genérica por $\underline{g}(\underline{x})$, onde \underline{x} é o vetor incógnitas (equação (2)) e $\underline{g}(\underline{x})$ é o vetor de funções não-lineares
- ✓ Expandindo $\underline{g}(\underline{x})$ em torno de um ponto inicial, \underline{x}^v , e desprezando termos de ordem superior, temos:

$$\underline{g}(\underline{x}) \cong \underline{g}(\underline{x}^v) + J(\underline{x}^v) \Delta \underline{x}^v$$

- ✓ Onde a matriz Jacobiana J é dada por:

$$J(\underline{x}^v) = \frac{\partial \underline{g}(\underline{x})}{\partial \underline{x}}$$

23

Fluxo de Carga Pelo Método de Newton – caso multidimensional

- ✓ O método de Newton é empregado para resolução do Subsistema 1:
- ✓ Forçando $\underline{g}(\underline{x}) = 0$, obtém-se a correção $\Delta \underline{x}^v$, resolvendo-se o sistema linear:

$$J(\underline{x}^v) \Delta \underline{x}^v = -\underline{g}(\underline{x}^v) \quad (5)$$

- ✓ Considerando a partição:

$$\underline{x} = \begin{bmatrix} \theta \\ V \end{bmatrix} \quad \left. \begin{array}{l} \text{NPV+NPQ} \\ \text{NPQ} \end{array} \right\} \quad \underline{g}(\underline{x}) = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad \left. \begin{array}{l} \text{NPV+NPQ} \\ \text{NPQ} \end{array} \right\}$$

- ✓ A equação (5) pode ser escrita como:

24

Fluxo de Carga Pelo Método de Newton – caso multidimensional

✓ O método de Newton é empregado para resolução do Subsistema 1:

✓ Forçando $g(x) = \underline{0}$, obtém-se a correção Δx^v , resolvendo-se o sistema linear:

✓ A equação (5) pode ser escrita como:

$$\begin{matrix} \text{NPQ+NPV} \\ \text{NPQ} \end{matrix} \left[\begin{array}{cc} \frac{\partial(\Delta P)}{\partial \theta} & \frac{\partial(\Delta P)}{\partial V} \\ \frac{\partial(\Delta Q)}{\partial \theta} & \frac{\partial(\Delta Q)}{\partial V} \end{array} \right] \begin{bmatrix} \Delta \theta^v \\ \Delta V^v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P(\theta^v, V^v) \\ \Delta Q(\theta^v, V^v) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$J(x^v)$

Nota: Lembrar que as derivadas parciais dos valores especificados P^{esp} e Q^{esp} são nulas

25

Fluxo de Carga Pelo Método de Newton – caso multidimensional

✓ O método de Newton é empregado para resolução do Subsistema 1:

✓ O esquema geral do processo iterativo de solução é:

- i) Escolher os valores iniciais para \underline{L}^0 e $\underline{\theta}^0$; $v = 0$;
- ii) Calcular $\Delta P(\underline{\theta}^v, \underline{V}^v)$ para as barras PV e PQ e $\Delta Q(\underline{\theta}^v, \underline{V}^v)$ para as barras PQ;
- iii) Testar convergência: Se $\text{Max}\{|\Delta P_k^v|\} \leq \epsilon_p$ e $\text{Max}\{|\Delta Q_k^v|\} \leq \epsilon_q$, o processo iterativo se encerra. Vá para (vii). Caso contrário, vá para o próximo passo (ϵ_p e ϵ_q são tolerâncias pré-estabelecidas);
- iv) Montar e fatorar a matriz Jacobiana $J(x^v)$;
- v) Obter as correções $\Delta \underline{\theta}^v$ e $\Delta \underline{V}^v$ (equação (6)) e a nova solução ($\underline{\theta}^{v+1}$ e \underline{V}^{v+1}):

$$\begin{cases} \underline{\theta}^{v+1} = \underline{\theta}^v + \Delta \underline{\theta}^v \\ \underline{V}^{v+1} = \underline{V}^v + \Delta \underline{V}^v \end{cases}$$
- vi) $v \leftarrow v+1$ e voltar para o passo (ii);
- vii) Calcular as demais incógnitas do problema (Subsistema 2); Fim.

26

Fluxo de Carga Pelo Método de Newton – caso multidimensional

➤ Exercício número 5.2 da página 108 (“o primeiro exercício 5.2”) do livro intitulado “Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica” do professor Alcir José Monticelli (determine todas as quatro variáveis – P, Q, V e θ – para as três barras do sistema e os fluxos de potência ativa e reativa nos ramos da rede – pelo método de Newton – Convergência (tolerância) = 0,0001)

27

Fluxo de Carga Linearizado ou Fluxo de Carga CC

▪ Monticelli, A. J. (1983). “Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica”, São Paulo - Brasil: Edgard Blucher.

28

Fluxo de Carga Linearizado

- O fluxo de potência ativa em uma linha de transmissão é aproximadamente proporcional à abertura angular na linha e se desloca no sentido dos ângulos maiores para os ângulos menores
- As relações entre os fluxos de potência ativa e as aberturas angulares é do mesmo tipo da existente entre os fluxos de corrente e as quedas de tensões em circuito de corrente contínua
 - ✓ Essa propriedade possibilita o desenvolvimento de um modelo aproximado, chamado de **fluxo de potência CC**, que permite a obtenção, com baixo custo computacional e precisão aceitável para muitas aplicações, da distribuição dos fluxos de potência ativa em uma rede de transmissão
 - ✓ Esse modelo aproximado tem sido aplicado para análise de SEP, tanto em planejamento como na operação

29

Fluxo de Carga Linearizado

- O fluxo de carga CC baseia-se no acoplamento entre as variáveis P e θ (potência ativa e ângulo de fase da tensão) e apresenta resultados tanto melhores quanto mais elevado o nível de tensão
 - ✓ O mesmo tipo de relação válida para linhas de transmissão pode ser estendido também para transformadores em fase e defasadores
 - ✓ Não se aplica para sistemas de distribuição em baixa tensão, nos quais os fluxos de potência ativa dependem também, e de maneira significativa, das quedas de tensão
- Observe que o Modelo CC não leva em conta as magnitudes das tensões nodais, as potências reativas e os taps dos transformadores
 - ✓ Dessa forma, não pode substituir por completo os métodos não-lineares de fluxo de carga, mas tem, todavia, grande utilidade em fases preliminares de estudos que exigem a análise de um grande número de casos

30

Fluxo de Carga Linearizado

- Linearização
 - ✓ Aproximações
 - As perdas são desprezadas
 - $V_k \cong V_m \cong 1 \text{ p.u.}$
 - $\text{sen } \theta_{km} \cong \theta_{km}$
- Em função destas aproximações, calcula-se o fluxo de potência ativa entre duas barras genéricas k e m , bem como a injeção de potência ativa na barra k , respectivamente, pelas seguintes expressões

$$P_{km} = \frac{\theta_k - \theta_m}{x_{km}} \quad P_k = \sum_{m \in \Omega_k} \left(\frac{\theta_k - \theta_m}{x_{km}} \right)$$

sendo: θ_k e θ_m os ângulos de tensão nas barras k e m , respectivamente; x_{km} a reatância da linha de transmissão que liga as barras k e m ; e Ω_k o conjunto das barras vizinhas à barra k

31

Observações

32

Observações

- Os métodos tradicionais para cálculo de fluxo de carga, em sistemas de transmissão são: Newton-Raphson, Newton-Raphson desacoplado rápido e versões modificadas
- De acordo com a literatura, métodos convencionais para o cálculo de fluxo de carga em redes de transmissão de energia elétrica, tais como o método de Newton-Raphson, Desacoplado Rápido e versões modificadas dos mesmos, podem apresentar problemas numéricos quando aplicados em **sistemas de distribuição**. Principalmente para redes radiais e com um grande número de barras. Isso se deve às características particulares desses sistemas, dentre as quais podemos citar: baixa relação X/R (reatância/resistência) dos parâmetros dos alimentadores, trechos com impedâncias relativamente baixas associados a trechos com impedâncias altas e grande número de barras de carga distribuídas

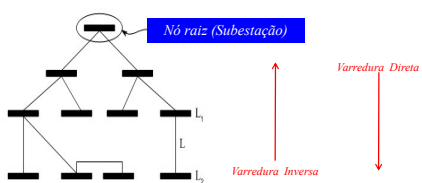
33

Observações

- Os métodos mais aplicados em sistemas de distribuição são denominados Métodos de Varredura Direta e Inversa (do inglês "Backward/Forward"), dentre os quais podemos citar os métodos da soma de potência, soma de correntes e soma de impedâncias
- ✓ Em todos esses métodos o algoritmo segue duas direções de cálculo ao longo das barras do alimentador: das barras terminais para os alimentadores e dos alimentadores para as barras terminais. Eis a razão de os mesmos serem conhecidos como métodos de Varredura Direta/Inversa

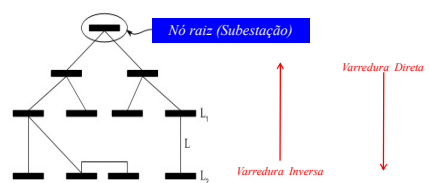
34

Observações



35

Observações



36



SEL – 5717 Estimação de Estado em Sistemas Elétricos de Potência

Prof. João Bosco A. London Junior
Departamento de Engenharia Elétrica - EESC - USP
E-mails: jbalj@sc.usp.br

37