

## **SEL – 5717 Estimação de Estado em Sistemas Elétricos de Potência**

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

## **Estimação de Estado em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica**

## **Sistemas de Distribuição**

### **Introdução**

#### **Sistemas de Distribuição**

- Composto pelas subestações abaixadoras e circuitos elétricos (chamados de alimentadores), responsável pelo fornecimento de energia elétrica às áreas urbanas, rurais ou grandes empresas consumidoras
- Pode ser subdividido em:
  - ✓ Sistema de Distribuição Primária
  - ✓ Sistema de Distribuição Secundária

## Introdução

### Sistemas de Distribuição

#### ➤ Sistema de Distribuição Primária (ou de Média Tensão)

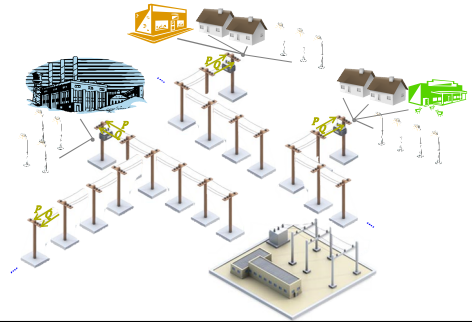
- ✓ Opera geralmente em redes radiais aéreas na tensão de 13,8kV
- ✓ É projetado para possibilitar a transferência de blocos de cargas entre circuitos para o atendimento da operação em condições de contingências ou para manutenção preventiva e/ou corretiva
- ✓ Esse sistema atende aos consumidores primários e aos transformadores de distribuição que, por sua vez, suprem os Sistemas de Distribuição Secundária ou de baixa tensão

#### ➤ Sistema de Distribuição Secundária (ou de Baixa Tensão)

- ✓ Opera em redes radiais ou em malha com tensões de 220/127V ou 380/220V
- ✓ Não é projetado para possibilitar a transferência de blocos de cargas entre circuitos
- ✓ Esse sistema atende aos consumidores de baixa tensão (pequenos comércios e indústrias e, principalmente, os consumidores domésticos)

## Introdução

### Sistemas de Distribuição Primário (ou de média tensão)



## Estimação de Estado em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica

## Introdução

- A maioria dos estimadores de estado desenvolvidos destina-se à aplicação em sistemas de transmissão. Há poucos estimadores para sistemas de distribuição. Isso se deve, principalmente, à pequena quantidade de medidas disponíveis nesses sistemas
- Para tentar suprir essa falta de medida, utilizam-se, geralmente, pseudo-medidas de carga obtidas por diferentes técnicas [SEPPALA (1995); GHOSH et al (1997); MEDEIROS & ALMEIDA (2002); MEDEIROS et al (2002)]
  - Normalmente essas pseudo-medidas são dependentes de modelos extraídos de dados históricos da operação do sistema, podendo ser inadequados para representar as condições de operação que se apresentam em tempo real

## Introdução

- Vale lembrar que a maioria dos alimentadores dispõe apenas de amperímetros e voltímetros na saída do barramento de média tensão da subestação (alimentadores primários)
- Porém, atualmente, com a automação desses alimentadores através da instalação de chaves e religadores telecomandados, que possuem módulos de telemedição, é possível fazer medição em tempo-real de outras grandezas como, por exemplo, fluxos de potência e amplitude de tensão nos pontos de instalação daqueles equipamentos
- Isso vem motivando o desenvolvimento e a implantação de estimadores de estado em sistemas de distribuição

## Introdução

- Além da falta de medidas, outros fatores que dificultam o desenvolvimento de estimadores de estado para sistemas de distribuição (SDs) são os seguintes:
  - são compostos por redes não-transpostas, desbalanceadas por natureza (em virtude da impossibilidade de distribuir uniformemente as cargas nos alimentadores) e com alta relação resistência/reactância
  - são diversas as possibilidades de conexão dos transformadores e das cargas dos SDs
  - A dimensão do problema é muito elevada, pois, mesmo para uma cidade de pequeno porte (de até 50 mil habitantes), o SD pode conter milhares de barras bifásicas e trifásicas

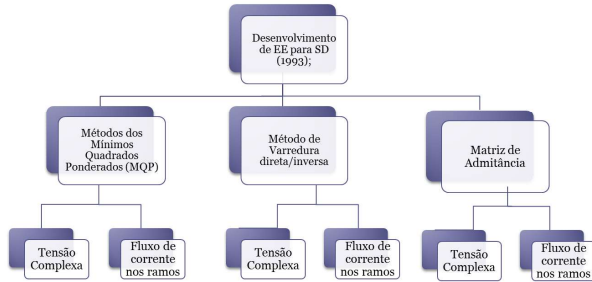
## Introdução

- Além da falta de medidas, outros fatores que dificultam o desenvolvimento de estimadores de estado para sistemas de distribuição (SDs) são os seguintes:
  - normalmente os estados de dispositivos seccionadores e de banco de capacitores, bem como a posição de taps de transformadores, não são monitorados de forma direta
  - utilização de medidas com qualidades bem distintas, pois umas são provenientes de medidores, outras são medidas virtuais e outras são pseudo-medidas de carga obtidas a partir das estruturas avançadas de medição ou de dados históricos da operação do sistema

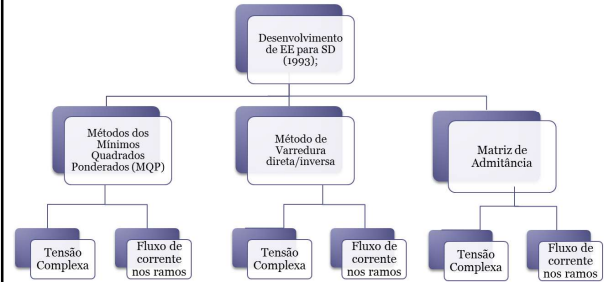
## Introdução

- Ante o exposto, os estimadores de estado tradicionais, desenvolvidos para sistemas de transmissão, não podem ser utilizados para supervisão de sistemas de distribuição

## 1. INTRODUÇÃO



## 1. INTRODUÇÃO



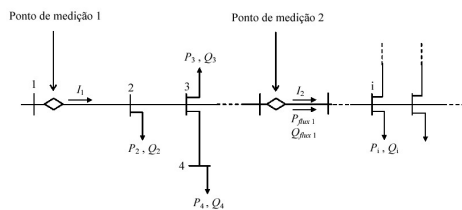
### Estimação de Estado para Sistemas de Distribuição Baseada no Método WLS

### Estimação de Estado para SDs Baseada no Método WLS

- Geralmente são consideradas medidas em tempo real de amplitudes de correntes de ramo e/ou de fluxos de potência em alguns pontos do alimentador, bem como pseudo-medidas de injeções de potências nos nós
- Assim como no Estimador WLS para sistemas de transmissão, as mesmas equações empregadas no estudo de fluxo de carga são também empregadas na construção do modelo, onde as amplitudes e os respectivos ângulos das tensões nodais são tomados como variáveis de estado

## Estimação de Estado para SDs Baseada no Método WLS

- Modelo
- Para apresentar o modelo normalmente utilizado, considerar-se-á o diagrama unifilar de um alimentador genérico, conforme apresentado na figura a seguir (essa figura foi apresentada em [ALMEIDA (2003)])



## Estimação de Estado para SDs Baseada no Método WLS

- Modelo
- Normalmente os nós de um alimentador são classificados em três tipos [MEDEIROS & ALMEIDA (2002).]: nós de transformador de distribuição (nós de distribuição), nós de consumidores do grupo A, isto é, de consumidores ligados em média ou em alta tensão (nós do grupo A) e os nós de passagem ou derivação
- Consideram-se como nós de passagem ou derivação os pontos de derivação de ramais, ou de instalação de chaves ou religadores, que não possuem módulos de telemedicação de injeção de potência
  - Em razão de não existirem cargas instaladas nesses nós (injeção de potências nulas), usualmente criam-se, para esses nós, pseudo-medidas (chamadas usualmente de medidas virtuais) de injeção de potências nulas ( $P = 0$  e  $Q = 0$ ) com pequenos desvios padrão (da ordem de  $10^{-4}$ )

## Estimação de Estado para SDs Baseada no Método WLS

- Modelo
  - As pseudo-medidas de injeção de potências nos nós de distribuição podem ser calculadas a partir das potências ( $S_i$ ), dos transformadores de distribuição, e dos fatores de potência ( $\text{fp}$ ) e de utilização ( $\text{fu}$ ), da seguinte forma:

$$P = S, fp, fu \quad (1)$$

$$Q = S_{\text{sf},fu}, \quad (2)$$

onde  $\text{sfp} = (1 - \text{fp}^2)^{1/2}$  é o seno do ângulo de fator de potência.

- Importa destacar que normalmente os fatores de potência adotados, para os transformadores de distribuição, baseiam-se em critérios de operação do sistema ou em dados históricos de cargas. Tais critérios podem levar em conta a classificação do transformador no que tange ao tipo de carga predominante (comercial, residencial, rural ou mista).

## Estimação de Estado para SDs Baseada no Método WLS

- Modelo
  - Para os nós do grupo A, as pseudo-medidas de injeção de potência podem ser determinadas com base em demandas máximas registradas ( $D_m$ ) e em fatores de potência medidos ( $f_{pm}$ ), obtidos nas contas mensais de energia elétrica, ou seja,

$$P_{Gd} = f u D_m \quad (3)$$

$$Q_{Gd} = f u_{i,Q_m}, \quad (4)$$

onde,  $Q_w = D_w \cdot \tan[\cos^{-1}(fp_w)]$ .

- Medição em tempo real de consumidores do tipo A
- Face ao exposto, o vetor de medidas,  $z$ , é formado pelas medidas de amplitudes de corrente de ramo, e/ou dos fluxos de potência, em conjunto com as pseudo-medidas de injeção de potência nos nós. Assim, tomando como exemplo o alimentador ilustrado na figura anterior, temos:

## Estimação de Estado para SDs Baseada no Método WLS

### > Modelo

$$z = [P_1^{med} \dots P_q^{med} Q_2^{med} \dots Q_q^{med} I_1^{med} \dots I_p^{med} P_{flux1}^{med} \dots P_{fluxq}^{med} Q_{flux1}^{med} \dots Q_{fluxq}^{med}]^T,$$

sendo:  $n_j$  o número de nós à jusante do nó 2;  $p$  o número de pontos de medição de magnitude de corrente em tempo real; e  $q$  o número de pontos de medição de fluxos de potência. Os sobrescritos *med* e *pmed*, que aparecem nos elementos de  $z$ , identificam grandezas medidas e pseudo-medidas respectivamente. Os subscritos *flux* identificam os fluxos de potências medidos.

- Assim como é feito no modelo de medição para sistemas de transmissão, normalmente considera-se que os erros das medidas e das pseudo-medidas são variáveis aleatórias independentes, com distribuição Gaussiana de média zero e matriz de covariância  $R$

## Estimação de Estado para SDs Baseada no Método WLS

### > Modelo

- Vale ressaltar que valores discrepantes para as variâncias das medidas e das pseudo-medidas podem levar a problemas numéricos, pois a matriz *Ganho* pode tornar-se mal condicionada [GHOSH et al (1997)]

- Considerando as amplitudes e os respectivos ângulos das tensões nodais como sendo as variáveis de estado, o vetor de variáveis de estado,  $x$ , para o alimentador apresentado na Figura anterior é o seguinte:

$$x = [\theta_1 \dots \theta_n \ V_1 \dots V_n]^T$$

- onde "n" varia de 2 até o total de número de nós

## Estimação de Estado para SDs Baseada no Método WLS

### > Modelo

- As funções não lineares do modelo de medição,  $h_i(x)$ , correspondentes às medidas e pseudo-medidas de potência, são dadas pelas equações do fluxo de carga. Porém, por se tratar de alimentadores de SDs, aquelas equações são determinadas a partir do circuito equivalente  $\pi$ , de uma linha de transmissão, desprezando a susceptância shunt das mesmas

- Com base nessas equações, constroem-se as funções  $h_i(x)$  correspondentes às medidas de amplitudes de correntes de ramos. Assim, para um trecho genérico  $km$ , teríamos:

$$I_{km}^{med} \rightarrow h_{ikm} = \frac{\sqrt{P_{km}^2 + Q_{km}^2}}{V_k}$$

## Estimação de Estado para SDs Baseada no Método WLS

### > Modelo

- As funções não lineares  $h_i(x)$ , obtidas da forma previamente apresentada, formam um sistema de equações não-lineares que é resolvido normalmente pela equação normal de Gauss

- O algoritmo do modelo desenvolvido para o estimador de estado apresentado nestes slides é praticamente o mesmo do estimador de estado WLS convencional aplicado para sistemas de transmissão

- A única diferença é que para este estimador de estado, o primeiro passo é fazer uma estimativa inicial dos valores de potências ativas e reativas injetadas nos nós de carga

## Estimadores de Estado baseados em Método de Cálculo de Fluxo de Potência

(Estimador de Demanda)

## Estimadores de Estado baseados em Método de Cálculo de Fluxo de Potência

- Baseiam-se no cálculo de fluxo de potência para redes elétricas integrando as medidas disponíveis em tempo real durante as iterações do fluxo de potência
- Tratando-se de SDs, utilizam usualmente o método de varredura direta/inversa para o cálculo de fluxo de potência associado à solução das equações normais nos ramos que possuem medidas
- Além disto, ajustam-se os valores das pseudo-medidas, inicialmente geradas através de um algoritmo de alocação de demanda, para obter resultados de fluxo de potência próximos aos valores monitorados

## Estimadores de Estado baseados em Método de Cálculo de Fluxo de Potência

- Os passos gerais do algoritmo deste tipo de estimador são:
  - i. Inicialização das tensões e demandas: assume-se um valor inicial de tensão para todas as barras (flat start ou valores medidos caso disponíveis), e os valores iniciais das pseudo-medidas de injeção de potência obtidos através de um algoritmo de alocação de demanda (como, por exemplo, o processo de agregação de curvas de carga)
  - ii. Varredura Inversa: os fluxos de potência são calculados para todos os ramos partindo dos nós folhas (barras terminais) até o nó raiz (subestação) pela soma das injeções de potência e cálculo das perdas nos ramos

## Estimadores de Estado baseados em Método de Cálculo de Fluxo de Potência

- Os passos gerais do algoritmo deste tipo de estimador são:
  - iii. Em ramos monitorados utiliza-se o modelo de medição (conforme equação do estimador WLS), realizando uma estimação somente para este ramo, considerando como referência a barra a montante. Com o estado estimado através da equação normal (WLS), calcula-se o fluxo de potência equivalente do ramo monitorado
  - iv. Varredura Direta: as tensões nodais são atualizadas partindo do nó raiz (subestação) até os nós folhas (barras terminais) utilizando a Lei de Ohm e os fluxos calculados na Varredura Inversa

### Estimadores de Estado baseados em Método de Cálculo de Fluxo de Potência

- Os passos gerais do algoritmo deste tipo de estimador são:
- v. Ajuste das pseudo-medidas: calcula e aplica fatores de ajuste nas pseudo-medidas de injeção de potência obtidos com base nas diferenças entre os valores medidos e estimados desses fluxos
- vi. Teste de Convergência: se a diferença de potência nas barras entre duas iterações consecutivas for menor que a tolerância pré-estabelecida retorne o estado estimado. Caso contrário, retorne ao passo (ii)

### Estimadores de Estado considerando Fluxos de Corrente como Variáveis de Estado

Estimador BC - do inglês, Branch-Current

### Estimadores de Estado considerando Fluxos de Corrente como Variáveis de Estado

- A formulação deste estimador utiliza também o método WLS para estimar as variáveis de estado da rede. Porém, ao invés da formulação tradicional, que utiliza as tensões complexas nodais como variáveis de estado, neste caso os fluxos de corrente complexa nos ramos da rede de distribuição são utilizados como variáveis de estado em coordenadas retangulares ou polares
- De acordo com seus proponentes, dentre as vantagens desta abordagem, o processo de estimação pode ser desacoplado entre as fases e não apresenta problemas de condicionamento numérico (despreza o acoplamento entre as fases e o defasamento entre elas)

### Estimadores de Estado considerando Fluxos de Corrente como Variáveis de Estado

- O modelo de medição é então construído conforme a equação apresentada para o estimador WLS, porém considerando como vetor de variáveis de estado os fluxos de corrente complexa entre barras expressos em coordenadas retangulares
- O modelo de medição é então construído através de medidas equivalentes de corrente, de acordo com cada tipo de medida, relacionando-as com as variáveis de estado de corrente. Isto é, medidas de fluxo e injeção de potência, de magnitude de tensão ou medidas fasoriais sincronizadas são convertidas em medidas equivalentes de corrente. Com isto utiliza-se a solução da equação normal (WLS) para atualização das variáveis de estado



### Estimadores de Estado considerando Fluxos de Corrente como Variáveis de Estado

- Os passos gerais desse tipo de estimador seguem abaixo:
- i) Através da execução de uma varredura inversa inicializam-se os valores das variáveis de estado (fluxos de corrente nos ramos) e através de uma varredura direta inicializam-se as tensões nodais
  - ii) Obter e atualizar as medidas equivalentes de corrente
  - iii) Obter a correção nas variáveis de estado de corrente através da equação normal (WLS)
  - iv) Com as novas correntes obtidas, atualizar as tensões nodais através do método de varredura direta para redes radiais
  - v) Teste de convergência: se a diferença entre os fluxos de corrente de duas iterações consecutivas for menor que a tolerância pré-estabelecida, retorne o estado estimado. Caso contrário, retorne ao passo (ii)

### Estimadores de Estado Baseados na Matriz Admitância

Estimador **AMB** - do inglês, Admittance Matrix-Based

### Estimadores de Estado Baseados na Matriz Admitância

- Assim como o anterior, este tipo de estimador também utiliza o modelo de medição convencional do estimador WLS, porém utilizando somente medidas equivalentes de corrente e de tensão complexas expressas em coordenadas retangulares
- Como o tipo de estimador anterior, as medidas de fluxo e injeções de potência são transformadas em medidas equivalentes de corrente
- Neste tipo de estimador a matriz Jacobiana também se mantém constante e é composta pelos elementos da matriz de admitância nodal do sistema elétrico
- O estado estimado, composto pelas tensões complexas nodais, também é obtido através da solução da equação normal (WLS)

### Estimadores de Estado Baseados na Matriz Admitância

- Os passos gerais desse tipo de estimador seguem abaixo:
- i) Assume um valor inicial de tensão para todas as barras (flat start ou valores medidos caso disponíveis) e os valores disponíveis das pseudo-medidas de injeção de potência
  - ii) Converte as medidas de fluxo e injeção de potência e magnitude de tensão em medidas equivalentes de corrente
  - iii) Calcula as matrizes Jacobiana e Ganho que serão mantidas constantes no processo de estimação
  - iv) Obter a correção nas variáveis de estado de tensões nodais na forma retangular através da equação normal (WLS)
  - v) Teste de convergência: se a diferença entre o vetor de estado de duas iterações consecutivas for menor que a tolerância retorne o estado estimado. Caso contrário, retorne ao passo (iv)

## Desafios

## Desafios

- Apesar de terem se tornado referência, para estimação de estado em SDs, os Estimadores AMB e BC não correspondem exatamente ao modelo estatístico clássico de estimação
- Eles exigem aproximações no processo de solução e no problema original, como, por exemplo, transformações das medidas de potência ativa e reativa em medidas equivalentes de corrente
- ✓ Dessa forma, o problema resolvido é como se fosse uma "réplica" do problema original, mas não o seu equivalente (FENG; YANG; PETERSON, 2012). Destaca-se, ainda, a limitação do Estimador BC de fazer uso de um modelo independente por fase, ao invés do modelo trifásico, dificultando a representação de equipamentos que apresentam acoplamento entre fases

## Desafios

- Em termos de aplicação prática de estimadores de estado em SDs, não se chegou ainda em um consenso sobre o melhor método, em parte pelos poucos relatos de aplicação prática presentes na literatura, como os apresentados em (KANJU, 2016; MASSIGNAN et al., 2018)
- Em termos de estado da arte do problema de estimação de estado em SDs, os pontos destacados a seguir representam desafios cruciais para desenvolvimento de estimadores factíveis para aplicação prática (GÓMEZ-EXPOSITO et al., 2011a; LEFEBVRE, PREVOST, LENOIR, 2014; PRIMADIANTO, A.; LU, C.-N., 2017; AHMAD et al., 2017):

## Desafios

- **Medidas disponíveis**
- O aumento da quantidade de medidas disponibilizadas em tempo real nos SDs contribuiu positivamente para o desenvolvimento de estimadores de estado para esses sistemas, pois redundância de medidas é um requisito fundamental para o sucesso do processo de estimação de estado
- Entretanto, trouxe novos desafios para implantação prática desses estimadores, dentre os quais destacam-se: **(1)** o aumento da quantidade de informações que passarão a ser transmitidas dos diversos equipamentos de medição para os Centros de Operação dos sistemas de Distribuição (CODs); e **(2)** a necessidade de um tratamento adequado para medidas oriundas de diversas fontes, com diferentes precisões e taxas de amostragem.

## Desafios

### > Grande escala das redes de distribuição

- As redes primárias de distribuição (conhecidas também como redes de média tensão ou Medium Voltage – MV – em inglês) já acarretam em redes de larga escala, geralmente compostas por dezenas de milhares de barras
- A necessidade atual de incorporar as redes secundárias (também conhecidas como redes de baixa tensão ou Low Voltage - LV - em inglês), onde estão sendo instalados medidores inteligentes, elevará a escala para centenas de milhares de barras, considerando o processo de estimação desde a rede secundária
- Dessa forma, destaca-se a necessidade de estimadores desenvolvidos para SDs que possibilitem um tratamento eficiente de redes de larga escala

## Desafios

### > Modelagem dos SDs

- Para tratamento do problema de estimação de estado em SD é necessário o emprego de uma modelagem adequada, que possibilite representar as características de assimetria e desequilíbrio das redes de distribuição, a possibilidade de existência de ramais monofásicos, bifásicos e trifásicos, a integração de recursos energéticos distribuídos, bem como as distintas possibilidades de ligação de seus equipamentos e cargas
- Importa destacar ainda que as redes primária e secundária apresentam características elétricas distintas, dificultando a utilização de um único estimador de estado para ambas as redes

## Desafios

### > Presença de microrredes

- ✓ Uma microrrede consiste em uma parcela da rede dotada de controle local para possibilitar, sem a necessidade de compartilhamento de uma grande quantidade de informação, a operação conectada com o restante do SD e também a operação ilhada em casos de interrupção no fornecimento de energia elétrica pela distribuidora
  - Dessa forma, a estrutura centralizada usualmente empregada para monitoramento de SDs deve ser repensada em função do aumento da presença de microrredes
- ✓ Vale destacar que essa estrutura centralizada é tradicionalmente empregada em função de as redes de distribuição estarem geralmente localizadas na região de concessão e operação de uma única distribuidora de energia.

## Desafios

### > Erros de topologia

- ✓ Tendo em vista que usualmente os status de dispositivos seccionadores (chaves e disjuntores) não são monitorados de forma direta nos SDs, torna-se necessário o desenvolvimento de métodos para tratamento de erros de topologia causados em função de informações incorretas dos status de dispositivos seccionadores

## Desafios

### > Parâmetros da rede secundária

- ✓ Usualmente os parâmetros das redes secundárias não estão disponíveis nos bancos de dados das concessionárias de energia (em algumas empresas nem mesmo a topologia)
- ✓ Quando estão geralmente não são confiáveis
- ❖ Isso acarretou a proposição de estimadores de estado para redes secundárias que não fazem uso dessas informações, baseados em modelos probabilísticos ou inteligência artificial
- Entretanto, para uma monitoração em tempo real mais confiável dessas redes se faz necessário o desenvolvimento de procedimentos que permitam a

## Estimação de Estado Trifásica

## Estimação de Estado Trifásica

- Embora já tenha sido alvo de inúmeras pesquisas, a maioria das pesquisas desenvolvidas para tratamento do processo EE faz uso do modelo por - fase, ou monofásico
  - Neste modelo considera-se que as cargas são balanceadas e as redes equilibradas, ou seja, admite-se a hipótese de sistema equilibrado
- Esse modelo é adequado para maioria dos sistemas de transmissão em extra-alta e ultra-alta tensão. Entretanto, em muitas situações os desbalanços nas cargas e os desequilíbrios na rede são bastante acentuados, como é o caso dos sistemas de distribuição, inviabilizando a utilização do modelo por-fase
  - Nestes casos, faz-se necessária a utilização de uma modelagem trifásica da rede

## Estimação de Estado Trifásica

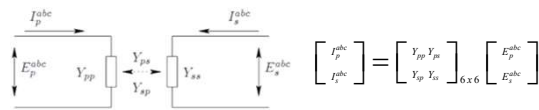
### ■ Modelagem trifásica - Vantagens

- Possibilita um grau de detalhamento maior que a modelagem por-fase, permitindo a obtenção de estimativas mais precisas para as variáveis de estado
- Possibilita o tratamento, sem distinção, dos sistemas de transmissão e distribuição
- Deve-se destacar ainda que, tendo em vista o interesse crescente pela monitoração em tempo-real dos sistemas de distribuição, em razão principalmente do desenvolvimento e implantação das redes inteligentes, tornam-se necessárias pesquisas tratando das diversas etapas do processo de estimação de estado (EE), considerando a modelagem trifásica da rede, tendo em vista que os sistemas de distribuição são usualmente desequilibrados

## Estimação de Estado Trifásica

- Modelagem trifásico (Arrilaga e Arnold, 1990; Mo-Shing e Tsai-Hsiang, 1991)

- Transformador
  - Associação de 3 transformadores monofásicos
  - Parâmetros de suas fases são perfeitamente balanceados

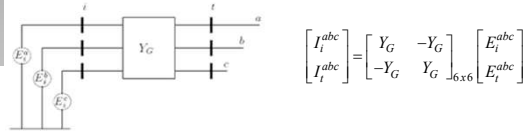


As submatrizes Y são definidas de acordo com o tipo de conexão do transformador

## Estimação de Estado Trifásica

- Modelagem trifásico (Arrilaga e Arnold, 1990; Mo-Shing e Tsai-Hsiang, 1991)

- Gerador Síncrono
  - Reatâncias e tensões internas;
  - Barra interna i e uma terminal t;



Máquinas em perfeita simetria

## Estimação de Estado Trifásica

- Estimador WLS trifásico

- As injeções de potência ativa e reativa trifásicas são dadas pelas seguintes equações:

$$P_i^p = V_i^p \sum_{k=1}^n \sum_{m=1}^3 V_k^m \left( G_{ik}^{pm} \cos \theta_{ik}^{pm} + B_{ik}^{pm} \sin \theta_{ik}^{pm} \right)$$

$$Q_i^p = V_i^p \sum_{k=1}^n \sum_{m=1}^3 V_k^m \left( G_{ik}^{pm} \sin \theta_{ik}^{pm} - B_{ik}^{pm} \cos \theta_{ik}^{pm} \right)$$

## Estimação de Estado Trifásica

- Estimador WLS trifásico

- As injeções de potência ativa e reativa trifásicas são dadas pelas seguintes equações:

$$P_i^p = V_i^p \sum_{k=1}^n \sum_{m=1}^3 V_k^m \left( G_{ik}^{pm} \cos \theta_{ik}^{pm} + B_{ik}^{pm} \sin \theta_{ik}^{pm} \right)$$

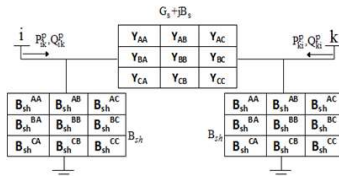
$$Q_i^p = V_i^p \sum_{k=1}^n \sum_{m=1}^3 V_k^m \left( G_{ik}^{pm} \sin \theta_{ik}^{pm} - B_{ik}^{pm} \cos \theta_{ik}^{pm} \right)$$

- sendo: n o número de barras do SEP; i e k são barras do SEP; p e m representam duas fases distintas,  $\theta_{ik}^{pm} = \theta_i^p - \theta_k^m$  a diferença entre o ângulo da fase p da barra i e o ângulo da fase m da barra k
- As equações acima são válidas também para linhas que sofrem os efeitos dos acoplamentos mútuos com outras linhas

## Estimação de Estado Trifásica

### ■ Estimador WLS trifásico

- Para obtenção das equações de fluxos de potência ativa e reativa utiliza-se o modelo equivalente  $\pi$  ilustrado na figura a seguir (Almeida et al, 2009)



## Estimação de Estado Trifásica

### ■ Estimador WLS trifásico

- Dessa forma, os fluxos de potência ativa e reativa são dados, respectivamente, pelas seguintes equações:

$$P_{ik}^p = \sum_{m=1}^3 \{ V_i^m V_k^p [ G_{s_{ik}}^{pm} \cos \theta_{ii}^{pm} + (B_{s_{ik}}^{pm} + B_{sh_{ik}}^{pm}) \sin \theta_{ii}^{pm} ] - V_k^m V_i^p [ G_{s_{ik}}^{pm} \cos \theta_{ik}^{pm} + B_{s_{ik}}^{pm} \sin \theta_{ik}^{pm} ] \}$$

$$Q_{ik}^p = \sum_{m=1}^3 \{ V_i^m V_k^p [ G_{s_{ik}}^{pm} \sin \theta_{ii}^{pm} - (B_{s_{ik}}^{pm} + B_{sh_{ik}}^{pm}) \cos \theta_{ii}^{pm} ] - V_k^m V_i^p [ G_{s_{ik}}^{pm} \sin \theta_{ik}^{pm} - B_{s_{ik}}^{pm} \cos \theta_{ik}^{pm} ] \}$$

- onde o índice  $s$  representa admitância série enquanto o índice  $sh$  representa admitância shunt

## Estimação de Estado Trifásica

### ■ Estimador WLS trifásico

- A partir das derivadas parciais das equações acima se obtém então a matriz  $H_{3\theta}$ :

$$H_{3\theta} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{ik}^p}{\partial \theta_j} & \frac{\partial P_{ik}^p}{\partial V_j} \\ \frac{\partial Q_{ik}^p}{\partial \theta_j} & \frac{\partial Q_{ik}^p}{\partial V_j} \end{bmatrix}$$

- com  $i$  e  $k$  variando de 1 até  $n$

## Estimação de Estado Trifásica

### ■ Estimador WLS trifásico

- Assim como na versão monofásica, a dimensão da matriz jacobiana é determinada de acordo com o número de medidas e de variáveis de estado a serem estimadas
- Para o modelo trifásico o número de variáveis de estado ( $N_{3\theta}$ ) é dado pela equação:

$$N_{3\theta} = 6nb + 2ng - 1$$

- Sendo  $nb$  o número de barras de carga (incluindo as barras terminais dos geradores) e  $ng$  o número de geradores do sistema, respectivamente

## Estimação de Estado Trifásica

### ■ Estimador WLS trifásico

$$N_{3\phi} = 6nb + 2ng - 1$$

- Em cada barra de carga da rede (incluindo as barras terminais dos geradores) há seis variáveis de estado
- As tensões nas barras internas dos geradores são equilibradas, sendo assim, tais barras são responsáveis por mais duas variáveis de estado, sendo o módulo e o ângulo da tensão de apenas uma das fases da barra interna
- Da mesma forma que no processo de estimação de estado monofásica, deve-se escolher uma das barras do sistema como referência angular. Eis a razão do termo "-1" que aparece na equação acima, pois o ângulo de uma das fases de uma das barras é escolhido como referência angular

## Estimação de Estado Trifásica

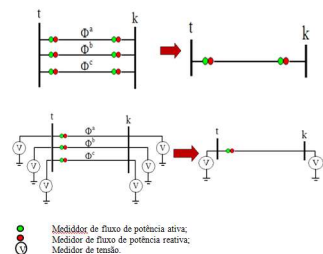
### ■ Observabilidade e Redundância

- A análise de observabilidade e de redundância de medidas para modelagem trifásica apresenta algumas particularidades em relação à abordagem monofásica do problema
  - Isto em razão, principalmente, do acoplamento entre as fases e do acoplamento entre linhas paralelas (Hansen e Debs, 1995)
  - Dessa forma, medidas em fases distintas podem ser redundantes
- Interessante verificar também que na análise de observabilidade trifásica é possível classificar uma medida de fluxo como irrelevante, o que não ocorre no problema de observabilidade monofásica

## Estimação de Estado Trifásica

### ■ Observabilidade e Redundância

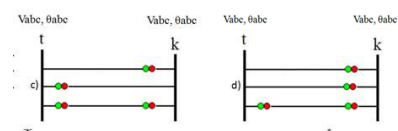
- Equivalente monofásico



## Estimação de Estado Trifásica

### ■ Observabilidade e Redundância

- Sem equivalente monofásico



- As medidas de fluxo disponíveis são irrelevantes para a observabilidade da rede

## Estimação de Estado Trifásica

### ■ Observabilidade e Redundância

- A partir da matriz  $H_{3\phi}$  apresentada anteriormente, os métodos numéricos desenvolvidos para o modelo monofásico podem ser aplicados ao modelo trifásico

## Referências

- ALMEIDA, M. A. D. (2003). Um algoritmo para estimação de estado em alimentadores de distribuição de energia elétrica com base no método da soma de potências. Tese (Doutorado) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Nº p.134, Dezembro
- BARAN, M.; JUNG, J.; MCDERMOTT, T.E. (2009). "Including Voltage Measurements in Branch Current State Estimation for Distribution Systems". Proceedings of the IEEE Power Engineering Society General Meeting (CD; Artigo número PESGM2009-001033 ; 5 páginas)
- GHOSH, A. K., LUBKEMAN, D. L., DOWNEY, M.J.; JONES, R. H. (1997). "Distribution circuit state estimation using a probabilistic approach", IEEE Trans. Power Syst., 1997, 12, (1), pp. 45-51
- MEDEIROS JR., M. F.; ALMEIDA, M. A. D. (2002). Estimação de Estado em Redes de Distribuição de Média Tensão com Base no Algoritmo da Soma de Potências – Parte II: Modelo Não Linear. XIV CBA, 2 a 5, set. 2002, Natal/RN – Brasil

## Referências

- MEDEIROS JR., M. F.; ALMEIDA, M. A. D.; SILVEIRA, D. B. F. (2002). Estimação de Estado em Redes de Distribuição de Média Tensão com Base no Algoritmo da Soma de Potências - Parte I: Modelo Linearizado. V INDUSCON, 3 a 5, Julho, Salvador/BA – Brasil
- SEPPALA, A. (1995). 'Statistical distribution of customer load profiles', in Proc. IEEE Int. Conf. on Energy Management and Power Delivery, 21-23 November, 2, pp. 696-701
- J. Arrillaga e C. P. Arnold. (1990), "Computer analysis of power systems". John Wiley & Sons.
- Mo-Shing Chen; Tsai-Hsiang Chen (1991), "Application of three-phase load flow to power system distribution automation". Proceedings of the International Conference in Advances in Power System Control, Operation and Management 1991 (APSCOM-91), vol. 2, pp.472-478, 5-8 November

## Referências

- Almeida, M. C.; Asada, E. N. & Garcia, A. V. (2009), "A new method for analysis of measurements applied to three-phase state estimation". Electrical Power Systems Research, Vol. 79, pp.234-238.





## **SEL – 5717 Estimação de Estado em Sistemas Elétricos de Potência**

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