

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-mails: jbalj@sc.usp.br

UTILIZAÇÃO DE MEDIÇÃO SINCRONIZADA DE FASORES EM ESTIMAÇÃO DE ESTADO

1. Introdução

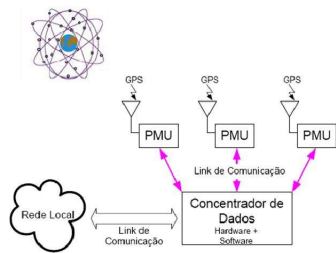
- Dentre as causas dos EGs, pode-se destacar: erros de conversão analógico-digital, erros nos canais de comunicação das telemedidas, e também, **a falta de sincronismo dos dados obtidos pelo sistema supervisório** (SCADA do inglês "Supervisory Control and Data Acquisition"), isto ocorre pela ausência de uma fonte de sincronização das medições realizadas no SEP
- Nas últimas décadas, entretanto, vários trabalhos de pesquisa têm abordado a possibilidade de obtenção de um sistema de medição sincronizada de Fasores (SMSF) e, atualmente, a implantação de equipamentos responsáveis por essas aferições, as Unidades de Medição Fasorial – PMUs (do inglês "Phasor Measurement Units"), já é uma realidade que se apresenta como uma forte tendência de utilização

3

2. Sistema de Medição Sincronizada de Fasores (SMSF)

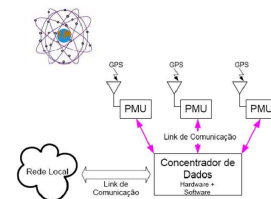
2. Sistema de Medição Sincronizada de Fasores (SMSF)

- O SMSF constitui-se, basicamente, dos seguintes elementos: PMU, que é o elemento base de todo o sistema; estações de recepção do sinal de GPS; concentrador de dados; e canais de comunicação



5

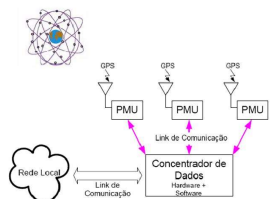
2. Sistema de Medição Sincronizada de Fasores (SMSF)



- As funções da PMU são: aquisição das tensões e correntes nas barras do SEP; processamento e formatação dessas informações e envio ao concentrador de dados

6

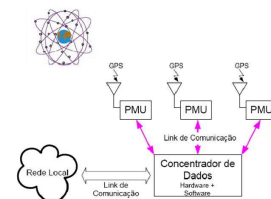
2. Sistema de Medição Sincronizada de Fasores (SMSF)



- O concentrador de dados tem como principal função receber e organizar as medidas fasoriais enviadas pelas PMUs, disponibilizando-as para uso em diversas aplicações (como, por exemplo, estimação de estado)

7

2. Sistema de Medição Sincronizada de Fasores (SMSF)



- Atualmente, os canais de comunicação considerados para uso em SMSF incluem opções de estruturas que operam tanto através de meios físicos específicos (linhas telefônicas, cabos de fibra ótica ou mesmo a rede de baixa ou média tensão), quanto através de tecnologia sem fio, amplamente denominada wireless (canais de microondas ou de sistemas de satélites)

3. Unidades de Medição Fasorial - PMUs

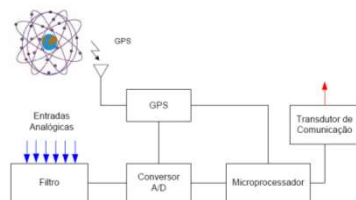
3. Unidades de Medição Fasorial - PMUs

- A PMU é um instrumento de medição desenvolvido em meados da década de 80 (ZHOU et al., 2006) e, como mencionado anteriormente, realiza: aquisição das tensões e correntes nas barras do sistema; processamento dos dados amostrados, efetuando assim a medição das grandezas fasoriais; para, em seguida, enviá-las ao concentrador de dados

10

3. Unidades de Medição Fasorial - PMUs

- A figura a seguir ilustra a estrutura simplificada de uma PMU, que consiste basicamente de um sistema de aquisição de dados (onde se encontram os filtros anti-aliasing, o circuito oscilador - phase-locked oscillator - e o módulo de conversão analógica/digital) e de um microprocessador que realiza o tratamento matemático das amostras



11

3. Unidades de Medição Fasorial - PMUs

- Processo de Medição Fasorial
- Em razão de as PMUs utilizarem uma fonte eficaz de sincronização, fornecida pelo sistema GPS, elas viabilizam a realização da medição de grandezas fasoriais a uma taxa de até **60 medidas por segundo** e com **precisão angular adequada** aos requisitos da maioria das aplicações de monitoração e controle em tempo real (EHRENSPERGER, 2004)
- Continuamente, o sistema GPS envia sinal de um pulso por segundo às estações receptoras. Considerando que esse trem de pulsos é enviado com precisão maior do que $1\mu s$ e que pode ser recebido por estações distantes entre si com igual precisão, é possível a sincronização das amostras obtidas por diversas PMUs, instaladas em diferentes pontos de um SEP

12

3. Unidades de Medição Fasorial - PMUs

Processo de Medição Fasorial

- As PMUs disponíveis atualmente têm a capacidade de medir fasores de tensão, corrente e potência, além da frequência e variação da frequência no tempo. Os dados medidos são exteriorizados em grandezas de fase ou grandezas de sequência positiva, em forma polar ou retangular. Em seguida, esses dados são transferidos, através de canais de comunicação, ao concentrador de dados, utilizando um formato de dados padronizado
- O processo de cálculo dos fasores é um ponto chave do desempenho das PMUs, normalmente utiliza-se a Transformada Discreta de Fourier (PHADKE, 1993)

13

3. Unidades de Medição Fasorial - PMUs

Processo de Medição Fasorial

- Vale lembrar que o fasor é uma representação matemática de uma forma de onda senoidal, tomando como referência, para a determinação do ângulo de fase, o instante do início da amostragem e considerando a frequência constante

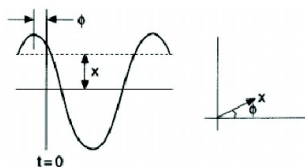
A magnitude do fasor é o valor eficaz da magnitude da onda senoidal, enquanto que seu argumento é a fase da onda para $t = 0$. Fasores são normalmente associados a uma única frequência, sendo mais frequentemente utilizados para análises em regime permanente.

14

3. Unidades de Medição Fasorial - PMUs

Processo de Medição Fasorial

- Representação Fasorial de uma onda senoidal



- Medidas Fasoriais Sincronizadas são basicamente fasores de tensão e corrente obtidos em pontos geograficamente distantes entre si utilizando-se uma mesma referência de tempo

15

3. Unidades de Medição Fasorial - PMUs

Processo de Medição Fasorial

- O conceito de fasor com frequência variável, como ocorre na prática, não é claramente definido e pode gerar diferentes interpretações

➤ Para contornar tal problema, normas definem limites de erros permissíveis, em condições limites, em termos de variação da frequência e magnitude do sinal medido

16

4. Medição Fasorial no Processo de Estimação de Estado

4. Medição Fasorial no Processo de Estimação de Estado

- Justifica-se o interesse crescente pela inclusão de Medidas Fasoriais Sincronizadas (MFSs) no processo de Estimação de Estado em Sistemas Elétricos de Potência (ESEP) não apenas pelo fato de as mesmas apresentarem, em geral, um nível de precisão maior que as medidas obtidas pelo sistema SCADA, mas também pelo fato de variáveis, cuja medição era antes impossível, passaram a ser monitoradas através das MFS, como é o caso dos ângulos de fase das tensões nodais e dos fasores de corrente nos ramos da rede elétrica

18

4. Medição Fasorial no Processo de Estimação de Estado

- Em trabalhos como THORP et al.(1985), PHADKE et al. (1986), ZIVANOVIC; CAIRNS (1996) e ZHOU et al (2006), demonstra-se que quando as medidas fasoriais são adicionadas às medidas convencionais, no processo de ESEP, a precisão deste é aumentada. Além disto, desde que todas as tensões de barra do sistema sejam monitoradas por PMUs, o problema de estimação pode ser resolvido utilizando somente medidas fasoriais (PHADKE, 2002; CEASE; FELDHAUS, 1999)
 - Neste caso o problema tornar-se-ia linear, já que as medidas relacionam diretamente as variáveis de estado, ao contrário das medidas convencionais de potência, as quais relacionam medidas e variáveis através de funções não-lineares

19

4. Medição Fasorial no Processo de Estimação de Estado

- Devido aos custos elevados envolvidos para instalação de PMUs, principalmente decorrentes das necessidades de telecomunicação, os atuais sistemas de medição, destinados ao processo de ESEP, não serão completamente substituídos por PMUs em um curto intervalo de tempo
 - Eis a razão de já terem sido propostos estimadores de estado híbridos, que fazem uso de medidas convencionais (medidas de potência e de magnitude de tensão obtidas pelo sistema SCADA) e MFSs, bem como metodologias para análise e restauração de observabilidade considerando sistemas de medição híbridos

20

4. Medição Fasorial no Processo de Estimação de Estado

- Deve-se destacar que uma das dificuldades encontradas para implantação de estimadores de estado híbridos é a determinação da referência de ângulo de fase para as tensões
- Observe que no processo de ESEEP convencional, isto é, sem MFSs, uma das barras do sistema é escolhida como referência angular. Assim, atribui-se zero para o ângulo de fase de tensão dessa barra e os ângulos estimados, para as demais barras, a tomam como referência
 - Tendo em vista que não é usual a monitoração direta dos ângulos de fase de tensão via sistema SCADA convencional, essa prática é apropriada, uma vez que é irrelevante, para o processo de ESEEP, o valor absoluto do ângulo de fase de tensão da barra de referência

4. Medição Fasorial no Processo de Estimação de Estado

- Porém, quando estão presentes medidas convencionais e MFSs, aquela prática não é adequada
 - Isto porque as medidas de ângulo de fase de tensão, fornecidas pelas PMUs, são obtidas a partir de outro referencial, que é determinado pelo instante de tempo fornecido pela recepção do sinal emitido pelo sistema GPS

22

5. Estimadores de Estado Híbridos

5. Estimadores de Estado Híbridos

- Dentre os Estimadores de Estado Híbridos desenvolvidos destacam-se:
 - Estimador de Estado Híbrido de duas Fases Proposto em ZHOU et al (2006)
 - Estimador de Estado WLS híbrido (Zhu e Abur, 2007; Korres e Manousakis, 2011)

24

5. Estimadores de Estado Híbridos

- Estimador de Estado Híbrido de duas Fases Proposto em ZHOU et al (2006)
 - Na primeira fase processa apenas as medidas convencionais, para correspondente parte observável do sistema, obtendo assim as estimativas das variáveis de estado através de um estimador WLS convencional. As estimativas obtidas nessa primeira fase são então utilizadas, na segunda fase do processo, como medidas de ângulo e de magnitude de tensão nas barras do SEP, juntamente com as MFSs. Desta forma, na segunda fase, realiza-se um processo de estimação de estado WLS linear (sem iteração), pois, as medidas que serão processadas relacionam diretamente as variáveis de estado do sistema

25

5. Estimadores de Estado Híbridos

- Estimador de Estado Híbrido de duas Fases Proposto em ZHOU et al (2006)
 - Desvantagens desse Estimador:
 - Para utilizar as variáveis de estado estimadas na primeira fase, como medidas de tensões complexas na segunda fase, são necessárias diversas operações matriciais para obtenção da matriz de ponderação para essas "medidas"
 - São distintas as referências de tensão para as medidas obtidas a partir da primeira fase (utiliza uma das barras do sistema como referência) e as MFSs (referência é o sinal de GPS)

26

5. Estimadores de Estado Híbridos

- Estimador de Estado Híbrido de duas Fases Proposto em ZHOU et al (2006)
 - Desvantagens desse Estimador:
 - O problema de duas referências angulares é resolvido da seguinte forma:
 - ✓ Calcula-se a média da diferença entre os ângulos de fase de tensão medidos pelas PMU (θ_{PMU}) e os estimados na primeira fase (θ_{base1}), para todas as m_{pmu} barras supervisionadas por PMUs – esse valor médio será chamado de $\theta_{correção}$, calculado da seguinte forma:

$$\theta_{correção} = \frac{1}{m_{pmu}} \sum_{i=1}^{m_{pmu}} (\theta_{PMU(i)} - \theta_{fase1(i)})$$

27

5. Estimadores de Estado Híbridos

- Estimador de Estado Híbrido de duas Fases Proposto em ZHOU et al (2006)
 - Desvantagens desse Estimador:
 - O problema de duas referências angulares é resolvido da seguinte forma:
 - ✓ Acrescenta-se, aos valores estimados para os ângulos de fase na primeira fase, o valor médio previamente calculado, da seguinte forma: $\theta_{fase1(i)} = \hat{\theta}_{fase1(i)} + \theta_{correção}$
 - ✓ Dessa forma, todas as medidas de ângulo de fase de tensão (obtidas na primeira fase e as MFSs) estarão na mesma referência e poderão ser processadas simultaneamente na segunda fase

28

5. Estimadores de Estado Híbridos

- Estimador de Estado Híbrido de duas Fases Proposto em ZHOU et al (2006)
 - Desvantagens desse Estimador:
 - Na segunda fase o problema de EESEP é formulado em coordenadas retangulares (ou seja, medidas e variáveis de estado são tratadas em coordenadas retangulares)

29

5. Estimadores de Estado Híbridos

- Estimador de estado WLS híbrido (Zhu e Abur, 2007; Korres e Manousakis, 2011)
 - Não exige muitas mudanças na formulação do processo de estimação de estado convencional por mínimos quadrados ponderados; não requer a escolha de uma barra como referência angular, nem mesmo a criação de uma barra de referência virtual; e, possibilita o processamento de erros grosseiros em medidas fasoriais sincronizadas, desde que a redundância seja adequada

30

5. Estimadores de Estado Híbridos

- Estimador de estado WLS híbrido (Zhu e Abur, 2007; Korres e Manousakis, 2011)
 - Na formulação apresentada em Zhu e Abur (2007), as medidas fasoriais sincronizadas obtidas pelas PMUs são tratadas como se fossem medidas convencionais, e, na existência de pelo menos uma medida de ângulo de fase de tensão, a referência de ângulo vai ser determinada pelo sinal emitido pelo sistema GPS. Porém, na ausência de tais medidas, utilizar-se-á a prática convencional, ou seja, uma das barras do sistema é escolhida como referência angular

31

5. Estimadores de Estado Híbridos

- Estimador de estado WLS híbrido (Zhu e Abur, 2007; Korres e Manousakis, 2011)
 - O modelo de medição e o algoritmo de solução do estimador de estado WLS híbrido proposto em Zhu e Abur (2007) são praticamente os mesmos do estimador convencional WLS
 - A diferença é a inclusão das medidas fasoriais de tensão e corrente

32

5. Estimadores de Estado Híbridos

- Estimador de estado WLS híbrido (Zhu e Abur, 2007; Korres e Manousakis, 2011)
 - Dessa forma, a principal diferença entre as formulações desses estimadores ocorre na matriz Jacobiana, que passa a ter novas linhas relacionadas às medidas fasoriais de tensão e corrente, conforme apresentado na equação a seguir:

33

5. Estimadores de Estado Híbridos

- Estimador de estado WLS híbrido (Zhu e Abur, 2007; Korres e Manousakis, 2011)

$$H_{PMU} = \begin{bmatrix} P_1 & \frac{\partial P_1}{\partial \theta} & \frac{\partial P_1}{\partial V} \\ Q_1 & \frac{\partial Q_1}{\partial \theta} & \frac{\partial Q_1}{\partial V} \\ P_2 & \frac{\partial P_2}{\partial \theta} & \frac{\partial P_2}{\partial V} \\ Q_2 & \frac{\partial Q_2}{\partial \theta} & \frac{\partial Q_2}{\partial V} \\ V^{pmu} & 1 & 1 \\ \theta^{pmu} & 1 & 1 \\ I^{pmu} & \frac{\partial I^{pmu}}{\partial \theta} & \frac{\partial I^{pmu}}{\partial V} \\ g^{pmu} & \frac{\partial g^{pmu}}{\partial \theta} & \frac{\partial g^{pmu}}{\partial V} \end{bmatrix}$$

onde:

P_1 e P_2 — medidas de fluxo e injeção de potência ativa respectivamente;

Q_1 e Q_2 — medidas de fluxo e injeção de potência reativa respectivamente;

V^{pmu} — medida convencional de magnitude de tensão nodal;

I^{pmu} — medida de PMU de magnitude de tensão nodal;

g^{pmu} — medida de PMU de ângulo de fase de tensão nodal;

θ^{pmu} — medida de PMU de ângulo de fase de fluxo de corrente;

θ — ângulo de fase de tensão nodal;

V — magnitude de tensão nodal.

34

5. Estimadores de Estado Híbridos

- Estimador de estado WLS híbrido (Zhu e Abur, 2007; Korres e Manousakis, 2011)
 - As expressões para as derivadas parciais relativas às medidas convencionais e às medidas fasoriais de magnitude de tensão obtidas pelas PMUs são as mesmas do estimador convencional WLS, lembrando apenas que agora vão existir derivadas parciais relativas a todos os ângulos de fase de tensão, pois nenhuma das barras será escolhida como referência angular
 - As medidas fasoriais de ângulo de fase de tensão obtidas pelas PMU são tratadas da mesma forma que as medidas de magnitude de tensão, pois essas quantidades tratam-se das variáveis de estado a serem estimadas

35

5. Estimadores de Estado Híbridos

- Estimador de estado WLS híbrido (Zhu e Abur, 2007; Korres e Manousakis, 2011)
 - **Problema** — o processo de inicialização do algoritmo torna-se difícil, quando medidas fasoriais sincronizadas de corrente estão presentes. Isto porque algumas derivadas na matriz Jacobiana, correspondentes aos fasores de corrente, serão indefinidos na primeira iteração, pois, partindo do flat start a potência aparente S , que aparece nas equações das derivadas, será igual a zero
 - **Soluções** — (i) trabalhar com coordenadas retangulares ao invés de coordenadas polares; ou (ii) não incluir as medidas fasoriais de corrente na primeira iteração, desde que as mesmas não sejam críticas

36

5. Estimadores de Estado Híbridos

- Estimador de estado WLS híbrido (Zhu e Abur, 2007; Korres e Manousakis, 2011)
 - Questões relativas à Observabilidade para o Estimador de Estado WLS Híbrido proposto em Zhu e Abur (2007)

37

5. Estimadores de Estado Híbridos

- Estimador de estado WLS híbrido (Zhu e Abur, 2007; Korres e Manousakis, 2011)
- In according to that estimator, there are two cases to be considered:
- **CASE I: the system is already completely observable considering only conventional measurements**
 - Situation 1: There is no voltage phase angle measurement available: This is the conventional state estimation process, that is, an arbitrary bus voltage phase angle will be selected as reference bus

38

5. Estimadores de Estado Híbridos

- Estimador de estado WLS híbrido (Zhu e Abur, 2007; Korres e Manousakis, 2011)
- **CASE I: the system is already completely observable considering only conventional measurements**
 - Situation 2: There is only one voltage phase angle measurement: The reference bus voltage phase angle is provided by that measurement. The corresponding H_{p0} matrix, that is, the Jacobian matrix associated to the P0 model, will have rank equal to "n", being "n" the number of system buses. In terms of bad data processing, errors in that voltage phase angle measurement will not affect the estimation results (equivalent to the conventional formulation with an assigned reference bus). Also, the loss of that voltage phase angle measurement does not turn the system unobservable (that measurement is not critical)

39

5. Estimadores de Estado Híbridos

- Estimador de estado WLS híbrido (Zhu e Abur, 2007; Korres e Manousakis, 2011)
- **CASE I: the system is already completely observable considering only conventional measurements**
 - Situation 3: There is more than one voltage phase angle measurement: The reference bus voltage phase angle is provided by those measurements and errors in voltage phase angle measurements can affect the estimation results. In order to detect and identify errors in those measurements, their redundancy must be high, that is: (i) two voltage phase angle measurements will ensure bad data detectability; and (ii) three or more voltage phase angle measurements will ensure both bad data detectability and identifiability, associated to those voltage phase angle measurements

40

5. Estimadores de Estado Híbridos

- Estimador de estado WLS híbrido (Zhu e Abur, 2007; Korres e Manousakis, 2011)
- **CASE II: the system is electrically connected but it is not completely observable considering only conventional measurements**
 - Situation 1: There is no voltage phase angle measurement available: Each observable island will be treated as one observable system, as Situation 1 - Case I
 - Situation 2: There is only one voltage phase angle measurement: The system continues to be not completely observable. The observable island containing the voltage phase angle measurement will be equivalent to a system that is already observable considering only conventional measurements, with one voltage phase angle measurement (Case I - Situation 2)

41

5. Estimadores de Estado Híbridos

- Estimador de estado WLS híbrido (Zhu e Abur, 2007; Korres e Manousakis, 2011)
- **CASE II: the system is electrically connected but it is not completely observable considering only conventional measurements**
 - Situation 3: There is more than one voltage phase angle measurement: Depending on the distribution of those measurements in the system, there are the following possibilities:
 - (i) If there is only one voltage phase angle measurement to each observable island, the system will be completely observable and the voltage phase angle measurements will be critical measurements. That is, it is not possible to detect bad data in any one of the voltage phase angle measurements and the loss of any one of those measurements will turn the system unobservable

42

5. Estimadores de Estado Híbridos

- Estimador de estado WLS híbrido (Zhu e Abur, 2007; Korres e Manousakis, 2011)
- **CASE II: the system is electrically connected but it is not completely observable considering only conventional measurements**
 - Situation 3: There is more than one voltage phase angle measurement: Depending on the distribution of those measurements in the system, there are the following possibilities:
 - (ii) If there is more than one voltage phase angle measurement to each observable island, the system will be completely observable and the voltage phase angle measurements will not be critical measurements. In terms of bad data processing, detection, and identification of errors in voltage phase angle measurements require an adequate local redundancy level in each observable island, as described in Situation 3 - Case I

43

5. Estimadores de Estado Híbridos

- Estimador de estado WLS híbrido (Zhu e Abur, 2007; Korres e Manousakis, 2011)
- **CASE II: the system is electrically connected but it is not completely observable considering only conventional measurements**
 - Situation 3: There is more than one voltage phase angle measurement: Depending on the distribution of those measurements in the system, there are the following possibilities:
 - (iii) If there are observable islands without any voltage phase angle measurement, the system continues to be not completely observable and the islands with phase angle measurements will be coalesced in just one observable island

44

5. Estimadores de Estado Híbridos

- Estimador de estado WLS híbrido (Zhu e Abur, 2007; Korres e Manousakis, 2011)
- Análise de Observabilidade P0, a partir das metodologias previamente apresentadas

Analisando a estrutura da matriz jacobiana, do estimador de estado híbrido proposto por ZHU; ABUR (2007b), apresentada no slide 34, verifica-se que o tratamento dado à medida de ângulo de fase de tensão é análogo ao da medida de magnitude de tensão, pois essas quantidades referem-se às variáveis de estado a serem estimadas. Na presença de medidas fasoriais de corrente, o desacoplamento do problema de observabilidade $P\theta-QV$ não é imediato. Para verificar isto, basta analisar as derivadas do fasor de corrente, na matriz jacobiana do estimador híbrido proposto por ZHU; ABUR (2007b)

45

5. Estimadores de Estado Híbridos

- Estimador de estado WLS híbrido (Zhu e Abur, 2007; Korres e Manousakis, 2011)
- Análise de Observabilidade P0, a partir das metodologias previamente apresentadas

Face ao exposto, conclui-se que são necessárias considerações e/ou aproximações adicionais, para viabilizar a utilização do desacoplamento $P\theta-QV$, visando à análise de observabilidade na presença de medidas convencionais e fasoriais sincronizadas. Consideremos que uma dada PMU possua um número de canais para medição, tal que a mesma possibilite a medição do fasor de tensão, na barra onde está instalada, bem como dos fasores de corrente nos ramos incidentes àquela barra (CHEN; ABUR, 2006; LONDON et al., 2009).

46

5. Estimadores de Estado Híbridos

- Estimador de estado WLS híbrido (Zhu e Abur, 2007; Korres e Manousakis, 2011)
- Análise de Observabilidade P0, a partir das metodologias previamente apresentadas
- Considerando que a impedância de todos os ramos seja igual a 1, a parte real de um fasor de corrente pode ser representada da seguinte forma (Chen; Abur, 2006):

$$\text{real}(I_{ij}) \cong \theta_i - \theta_j$$

Sendo θ_i e θ_j os ângulos de tensão das barras i e j , respectivamente. Dessa forma, as linhas da matriz H , correspondentes às medidas de uma PMU instalada na barra i , podem ser representadas da seguinte forma:

47

5. Estimadores de Estado Híbridos

- Estimador de estado WLS híbrido (Zhu e Abur, 2007; Korres e Manousakis, 2011)
- Análise de Observabilidade P0, a partir das metodologias previamente apresentadas
- Considerando que a impedância de todos os ramos seja igual a 1, a parte real de um fasor de corrente pode ser representada da seguinte forma (Chen; Abur, 2006):

$$H'_{\theta PMU} = \begin{matrix} & \theta_i & \theta_j & \theta_{GPS} \\ \begin{matrix} \vdots \\ \theta_i \\ I_{ij} \\ \vdots \end{matrix} & \begin{bmatrix} \dots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ \dots & 1 & \dots & \vdots & \dots & -1 \\ \dots & \vdots & \dots & -1 & \dots & \vdots \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Observe que θ_{GPS} indica a referência de GPS para obtenção das medidas de ângulo de fase de tensão.

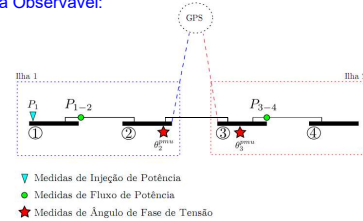
48

5. Estimadores de Estado Híbridos

- Estimador de estado WLS híbrido (Zhu e Abur, 2007; Korres e Manousakis, 2011)
- Análise de Observabilidade $P\theta$, a partir das metodologias previamente apresentadas
- As medidas de ângulo de fase de tensão são modeladas como se fossem medidas de fluxo de potência em ramos fictícios, com impedância unitária, que conectam as barras onde as medidas foram realizadas com uma barra fictícia, representando a referência de GPS
- Vale lembrar que as MFSs são obtidas utilizando como referência o sinal de GPS
- Considerando a barra de GPS, um sistema com "n" barras passa a ter, para análise de observabilidade $P\theta$, "n+1" barras, e será observável se a correspondente matriz H tiver posto igual a "n"

5. Estimadores de Estado Híbridos

- Estimador de estado WLS híbrido (Zhu e Abur, 2007; Korres e Manousakis, 2011)
 - Análise de Observabilidade $P\theta$, a partir das metodologias previamente apresentadas
- Sistema Observável:



5. Estimadores de Estado Híbridos

- Em (Korres e Manousakis, 2011) foi apresentada uma versão modificada do estimador de estado híbrido proposto em (Zhu e Abur, 2007), que trata as medidas fasoriais de corrente de uma forma mais adequada

51

6. Estimadores de Estado considerando apenas PMU

- Existem algumas novas propostas de Estimadores de Estado que processam apenas medidas de PMU com a preocupação de filtrar erros causados por problemas de sincronização de PMUs (YANG et al, 2013)

52

6. Estimadores de Estado considerando apenas PMU

- Apesar de tratar ambos os tipos de medidas, as abordagens de estimação de estado híbrida não fornecem um método direto para tratar a falta de sincronismo (relacionada com as diferentes taxas de amostragem) entre medidas PMU e medidas convencionais SCADA
- Para lidar com este desafio de lidar com medidas de diferentes taxas de amostragem, algumas técnicas especiais tem sido associadas a estes estimadores híbridos, como técnicas de Fusão de Dados (COSTA; ALBUQUERQUE; BEZ, 2013) e técnicas de estimação de estado associadas à modelos de previsão (FILHO; SOUZA, 2009)

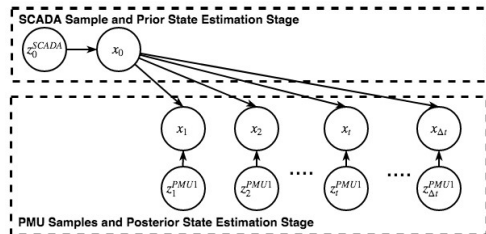
53

6. Estimadores de Estado considerando apenas PMU

- **Proposta do grupo:** um método de estimação híbrida em dois estágios que consiga tratar a falta de sincronismo e diferentes taxas de amostragem entre medidas de PMUs e medidas convencionais SCADA:
 - **O primeiro estágio** é basicamente o processo de estimação de estado tradicional baseado no modelo de medição não linear (WLS)
 - **O segundo estágio** é baseado em um método de Inferência Bayesiana que utiliza um modelo em espaço de estados (modelo de previsão) para relacionar diferentes instantes de tempo e suas respectivas variáveis de estado, caracterizando assim um novo método para incluir PMUs no processo de estimação de estado

54

6. Estimadores de Estado considerando apenas PMU



55

8. Referências

- A. G. Phadke, J. S. Thorp, and K. J. Karimi, "State Estimation with Phasor Measurements", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 1, No. 1, pp. 233-241, February 1986.
- J. Chen, and A. Abur, "Placement of PMUs to enable Bad Data detection in State Estimation", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 21, No.4, pp. 1608-1615, November 2006.
- BALDWIN, T.L.; MILI, L.; BOISEN, M.B.; ADAPA, R. (1993). "Power System Observability With Minimal Phasor Measurement Placement". IEEE Transactions on Power Systems, Vol.8, No. 2, pp. 707-715, maio.
- BORBA, et al (2007), "Sistema de medição sincronizada de fasores". Anais do IX EDAO – ENCONTRO PARA DEBATES DE ASSUNTOS DE OPERAÇÃO, 25 a 29 de março, Rio Quente – Goiás - Brasil.
- J. Zhu, and A. Abur, "Effect of Phasor Measurements on the Choice of References Bus for State Estimation", in Proc. of the IEEE General Meeting 2007

56

8. Referências

- EHRENSPERGER, J.G. (2004), "Sistemas de medição fasorial sincronizada: análise do estado da arte e aplicações no monitoramento de sistemas de energia elétrica". Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Elétrica, Santa Catarina – Florianópolis – Brasil
- NUQUI, R.F. (2001). State Estimation and Voltage Security Monitoring Using Synchronized Phasor Measurements. Doctor Thesis. Virginia Polytechnic Institute and State University. Blacksburg, Virginia, Julho
- PHADKE, A.G. (2002). Synchronized phasor measurements—a historical overview. in Proc. IEEE Power Eng. Soc. Asia Pacific Transmission Distribution Conf. Exhib., Oct. 6–10, 2002, vol. 1, pp. 476–479
- PHADKE, A.G.; THORP, J.S.; KARIMI, K.J. (1986). State estimation with phasor measurements. IEEE Trans. Power Syst., vol. 1, no. 1, pp. 233–240, fevereiro
- THORP, J.S.; PHADKE, A.G.; KARIMI, K.J. (1985). Real time voltage-phasor measurements for static state estimation. IEEE Trans., Power App. Syst., vol. PAS-104, no. 11, pp. 3098–3104, Novembro

8. Referências

- ZHOU, M.; CENTENO, V.A.; THORP, J.S.; PHADKE, A.G. (2006). An Alternative for Including Phasor Measurements in State Estimators. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 21, N°4, p. 1930-1937, novembro
- ZIVANOVIC, R.; CAIRNS, C. (1996). Implementation of PMU technology in state estimation: an overview. in Proc. IEEE 4th AFRICON, Sep. 24–27, 1996, vol. 2, pp. 1006–1011
- XU, B.; ABUR, A. (2004). "Observability analysis and measurement placement for systems with PMU". Proc. IEEE Power Eng. Soc. Power Systems Conf. Expo., Nova York, pp. 10-13, outubro
- London Jr. et al (2009), "Redundancy and Observability Analysis of Conventional and PMU Measurements", IEEE Transactions on Power Systems, Volume: 24, Issue:3, pp. 1629-1630
- Korres, G. N.; Manousakis, N. M. (2011). "State estimation and Bad Data processing for systems including PMU and SCADA measurements", Elsevier - Electric Power Systems Research, 81, pag. 1514-1524.

58

8. Referências

- P. YANG, Z. TAN, A. WIESEL, AND A. NEHORAI (2013). "Power system state estimation using PMUs with imperfect synchronization," IEEE Trans. Power Syst., vol. PP, no. 99, pp. 1–11

59

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-mails: jbalj@sc.usp.br