

Erros grosseiros no processo de Estimação de Estado em SEP

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

1. Erros no processo de estimação de estado

- Erros nas medidas analógicas (Erros Grosseiros- EGs)
- Erros devido a informações erradas quanto aos estados de chaves e/ou disjuntores (Erros Topológicos)
- Erros causados por informações erradas de algum parâmetro do sistema (Erros de Parâmetros)

2

1. Erros no processo de estimação de estado

- Erros nas medidas analógicas (Erros Grosseiros- EGs)
- Erros devido a informações erradas quanto aos estados de chaves e/ou disjuntores (Erros Topológicos)
- Erros causados por informações erradas de algum parâmetro do sistema (Erros de Parâmetros)

3

2. Erros Grosseiros

- Causas
 - Problemas nos canais de comunicação, instrumentos de medição defeituosos, erro na modelagem de pseudo-medidas, falta de sincronismo, etc.
- Tipos de EGs
 - EGs simples (apenas uma medida é portadora de EG)
 - EGs múltiplos (várias medidas são portadoras de EGs)
 - EGs múltiplos não interativos
 - EGs múltiplos interativos

4

2. Erros Grosseiros

■ Erros Não-Interativos

- Ocorrem quando os resíduos das medidas com EGs apresentam fraca interação com os demais resíduos, ou seja, quando os resíduos são fracamente correlacionados. Nessa situação, o EG em uma medida não afeta, ou afeta pouco, o resíduo das demais medidas disponíveis

■ Erros Interativos

- Ocorrem quando as medidas com EGs apresentam resíduos fortemente correlacionados com os resíduos de outras medidas, geralmente na sua vizinhança. Assim, o erro em uma medida influencia muito o resíduo das demais medidas do sistema

- ✓ Os EGs interativos podem ser classificados como conformativos ou não-conformativos

5

2. Erros Grosseiros

■ Erros Interativos Não-conformativos

- São EGs interativos cujo efeito não é “mascarado” nos resíduos das medidas portadoras de EGs. Desta forma, as medidas com EGs irão apresentar resíduos normalizados elevados

■ Erros Interativos Conformativos

- São EGs interativos cujo efeito é “mascarado” nos resíduos das medidas portadoras de EGs, fazendo com que as mesmas ajam “conforme” as medidas sem EGs. Desta forma, as medidas com EGs irão apresentar resíduos normalizados pequenos, e medidas “sadias” (sem EGs) podem ser identificadas como portadores de EGs

6

2. Erros Grosseiros

■ Métodos mais utilizados – Estimador WLS

- Baseados na análise estatística dos resíduos das medidas, ou numa função dos mesmos. Isto porque os resíduos fornecem informações úteis sobre eventuais violações das suposições feitas em relação ao modelo de medição

- ✓ Teste do maior resíduo normalizado

Deteção e identificação de EG

- ❖ Teste- \hat{b} - Processo de Recuperação de medidas

- ✓ Teste do índice $J(\hat{x})$

Deteção de EG

7

2. Erros Grosseiros

■ Processamento de EGs

- Estimador de Estado WLS não linear

- Todas as deduções apresentadas para o caso linear são válidas

✓ **Linear:**
$$\begin{cases} r = z - H.\hat{x} \\ \Omega = W^{-1} - H.G^{-1}.H' \end{cases}$$

- ✓ **Não Linear:**

$$H \rightarrow H(\hat{x}) \quad \begin{cases} r(\hat{x}) = z - h(\hat{x}) \\ \Omega(\hat{x}) = W^{-1} - H(\hat{x}).G^{-1}(\hat{x}).H(\hat{x}) \end{cases}$$

2. Erros Grosseiros

■ Processamento de EGs – Estimação Estática Não Linear

- Resíduo normalizado

$$r_i^N = \frac{r_i}{\sqrt{\Omega_{ii}}}$$

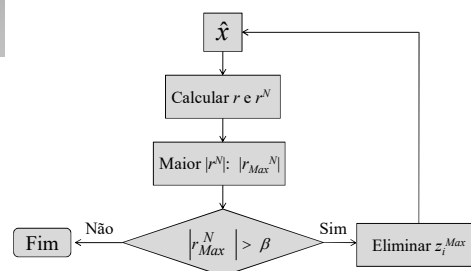
➤ Sendo $\sqrt{\Omega_{ii}}$ o desvio padrão do i-ésimo componente do vetor dos resíduos

- Se for identificada alguma medida com EG e a “opção” for eliminá-la do conjunto de medidas, basta refazer as matrizes e reestimar as variáveis de estado

2. Erros Grosseiros

■ Processamento de EGs – Estimação Estática Não Linear

- Processo Iterativo



2. Erros Grosseiros

■ Processamento de EGs – Estimação Estática Não Linear

- Se a “opção” for recuperar a medida com EG, há a necessidade de garantir que na solução final $r_i = 0$
- Para este caso temos:

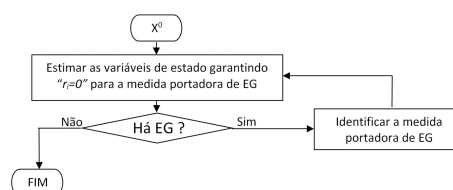
$$z_i^{k+1} = z_i^k - \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_{ri}} \right)^2 \left[z_i^k - h_i(\hat{x}) \right]$$

2. Erros Grosseiros

■ Processamento de EGs – Estimação Estática Não Linear

- Processo Iterativo:

Teste- \hat{b} - Processo de Recuperação de medidas



2. Erros Grosseiros

- Métodos baseados na análise estatística dos resíduos das medidas, ou numa função dos mesmos
- Falham p/ EGs simples
 - Medidas críticas (MCs) - resíduo zero
 - Conjuntos críticos de medidas (CCMs) - resíduos normalizados iguais

13

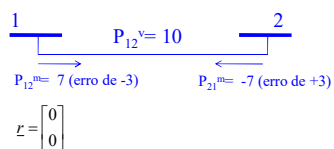
2. Erros Grosseiros

- EGs múltiplos não interativos
 - Uma generalização da análise dos resíduos pode, na maioria das situações, ser suficiente para detectar e identificar corretamente as medidas portadoras de EGs. Entretanto, tal generalização não pode ser realizada para o processamento de EGs múltiplos interativos

14

2. Erros Grosseiros

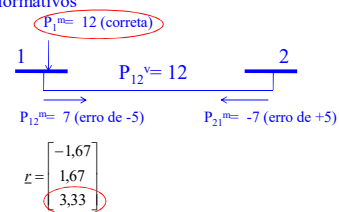
- EGs múltiplos interativos
 - Conformativos



15

2. Erros Grosseiros

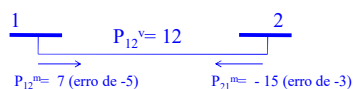
- EGs múltiplos interativos
 - Conformativos



16

2. Erros Grosseiros

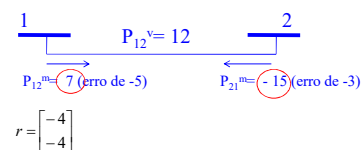
- EGs múltiplos interativos
 - Não Conformativos



17

2. Erros Grosseiros

- EGs múltiplos interativos
 - Não Conformativos



18

2. Erros Grosseiros

- Medidas Pontos de Alavancamento [Mili et al (1996)]
 - Medidas não críticas que possuem a característica de atrair a convergência do processo de estimação de estado (podem apresentar resíduos pequenos mesmo quando são portadoras de EGs)
 - Não é possível identificar EGs quando estes ocorrem em medidas PA

19

3. Métodos para detecção e identificação de EGs

- De uma forma geral os métodos podem ser divididos, em sua maioria, em dois grupos [KORRES & CONTAXIS (1991), ABUR & EXPÓSITO 2004]:
 - Identificação por Eliminação (IPE) [MONTICELLI & GARCIA (1983)]
 - Métodos baseados em critérios não quadráticos (CNQ) [MERRIL & SCHWEPPE (1971)]
- O ponto em comum, dos métodos desses dois grupos, é que eles são dependentes dos resíduos das medidas
 - Limitação: MCs e CCMs

20

3. Métodos para detecção e identificação de EGs

- O procedimento adotado pelos métodos IPE consiste em ciclos sucessivos de eliminação – estimação – detecção, até que o teste de detecção se torne negativo
 - A limitação desses métodos está no esforço computacional exigido, em razão dos ciclos sucessivos mencionados acima, bem como da possibilidade de, após a eliminação de muitas medidas, surgirem medidas críticas, que não possibilitam a detecção de EGs pela análise de resíduos
- Os métodos CNQ por sua vez, ao invés de eliminarem as medidas portadoras de EGs, eliminam o efeito das mesmas, atribuindo a elas os menores pesos na matriz de ponderação
- Em MONTICELLI & GARCIA (1983) elimina-se o efeito da medida com erro calculando-se um novo valor para essa medida (resíduo igual a zero)

3.1. Métodos IPE e CNQ

- Funcionam bem para EGs simples e EGs múltiplos que não interagem (sem considerar MCs e CCMs)
- Falham no caso de ocorrência de EGs múltiplos que interagem
 - Superação - teste estatístico de hipóteses proposto por MILI et al (1984)
- Incorporando esse teste aos estimadores IPE e CNQ, surgiram estimadores que, de uma forma geral, possibilitam o tratamento de todos os tipos de EGs [SLUTSKER (1989); BALDICK et al (1997)]
- Limitação – medidas Pontos de Alavancamento (PA) [MILI et al. (1991); CELIK & ABUR (1992)]

22

3.1. Métodos IPE e CNQ

- Em MILI et al. (1996) foi apresentado um rigoroso tratamento estatístico para os pontos de alavancamento
- PIRES et al (1999) desenvolveu-se um estimador WLS robusto para EGs em pontos de alavancamento
 - Limitação – certa heurística na identificação de medidas PA

23

3.2. Estimadores WLAV

- Paralelamente ao desenvolvimento dos estimadores WLS, desenvolveu-se o estimador por mínimo valor absoluto ponderado (Weighted Least Absolute Value – WLAV)
- Mais robusto que os WLS para o tratamento de todos os tipos de EGs (simples, múltiplos que interagem e que não interagem)
 - Limitação – Medidas PA

24

3.2. Estimadore WLMS

- Buscando um outro caminho, para contornar os problemas causados pelas medidas pontos de alavancamento com EGs, em Mili (1991) foi proposto o Estimador de Mínima Mediana do Resíduo Ponderado ao Quadrado (Weighted Least Median of Squares -WLMS) para SEP
- Entretanto, tal estimador requer uma busca combinatória, tornando-o inviável para aplicação em tempo real [Falcão & Arias (1994)]

25

4. Métodos para identificação de PAs

- Os métodos desenvolvidos para identificação de PAs ainda não são confiáveis, pois, sempre recorrem a uma análise heurística [CELIK & ABUR (1992); JABR R.A. & PAL B. C. (2003)]

26

5. Estimadores FASE

- Existem alguns trabalhos em que se propõe a análise das medidas, antes do processo de estimação de estado, através de testes estatísticos das inovações (diferenças entre os valores medidos e os previstos) [SOUZA et al. (1996)]
 - Estimadores com capacidade de previsão (FASE)
- Vantagem
 - Detecção e identificação de medidas, com erros grosseiros, realizar-se sem a necessidade de se analisarem os resíduos das medidas
- Desvantagem
 - Dificuldades na determinação da matriz transição de estado

6. Índice UI

- O índice de não detecção de erros UI foi proposto em (BENEDITO, ALBERTO, BRETAS, LONDON JR., 2014)
 - ✓ Faz uso de uma análise geométrica do estimador de estado WLS

A vantagem da análise geométrica é que os problemas estruturais, do processo de estimação de estado, se tornam mais evidentes

- ✓ Permite a classificação das medidas de acordo com as suas características de não refletirem grande parcela de seus erros nos resíduos do processo de estimação de estado por WLS
- ✓ Com a utilização desse índice é possível estimar o erro da medida

28

7. Estimador Resiliente

- Estimador de estado que seja resiliente à presença de medidas com EGs nas informações processadas pelo estimador de estado. Ou seja, que seja capaz de fornecer estimativas de boa qualidade, mesmo na presença de EGs
- Motivação
 - O fato de o processo de estimação de estado ser um aplicativo em tempo real, a inclusão de uma etapa adicional, para processamento de EGs, é um fator negativo que motiva o desenvolvimento de soluções alternativas menos susceptíveis à presença de medidas com EGs

7. Estimador Resiliente

- Estimador de estado resiliente baseado no Critério de Máxima Correntropia (CMC), conforme apresentado em (MIRANDA, SANTOS, PEREIRA, 2009; FREITAS, COSTA, MIRANDA, 2017)
- O CMC tem por finalidade maximizar a extração de informações sobre as variáveis de estado contidas nas medidas disponíveis
- O CMC permite desenhar um procedimento para o processo de estimação de estado em que o tratamento dos EGs não depende da 4ª Etapa, ou seja, não é um pós-processamento
 - Isto é bastante interessante não apenas em função da diminuição do tempo de processamento, mas também por não forçar uma tentativa de identificação de EGs sobre um resultado de estimação provisório, que já está contaminado pelos ruídos

8.Referências

- ABUR, A.; EXPÓSITO, A. G. (2004). Power system state estimation: theory and implementation. Nova York: CRC Press, 2004.
- BALDICK, R.; CLEMENTS, K.; PINJO-DZIGALZ & DAVIS, P. (1997). "Implementing non-quadratic objective functions for state estimation and bad data rejection". *IEEE Transaction on Power Systems*, Vol. 12, N. 1, pp.376-382
- BENEDITO, RAPHAEL A. S.; ALBERTO, LUÍS FERNANDO C.; BRETAS, NEWTON G.; LONDON JR., J. B. A. (2014). "Power system state estimation: Undetectable bad data". *International Transactions on Electrical Energy Systems*, v. 24, p. 91-107.
- CELIC, M.K. & ABUR, A. (1992). "A robust WLA state estimation using transformations". *IEEE Transactions on Power Systems*, VOL. 7, N°1, pp.106- 113, Fevereiro
- FALCÃO & ARIAS (1994). "State estimation and observability analysis based on echelon forms of the linearized measurement model". *IEEE Transaction on Power Systems*, Vol. 9, N. 2, pp.979-987
- FREITAS, V.; COSTA,A.S.; MIRANDA, V. (2017). Robust State Estimation Based on Orthogonal Methods and Maximum Correntropy Criterion, IEEE Manchester PowerTech 2017 Conference, Manchester, UK, Jul.

8.Referências

- GARCIA, A.; MONTICELLI, A.; ABREU, P. (1979). Fast decoupled state estimation and bad data processing. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-98,N°5, p. 1645-1652, setembro/outubro
- JABR R.A. and PAL B. C. (2003). "Iteratively re-weighted least absolute value method for state estimation", *IEE Proc. Gener. Transm. Distrib.* Vol 150, 4, July
- KORRES, G.N.; CONTAXIS, G.C. (1991). A reduced model for bad data processing in state estimation. *IEEE Transaction on Power Systems*, Vol. 6, N° 2, p.550-557, maio
- LONDON Jr., J.B.A.; ALBERTO, L.F.C.; FÁBIO, L.C. & BRETAS, N.G. (2006). "Topologyc analysis of undetectable errors in power system state estimation". *Proceedings do X Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica (SEPOPE'2006)*, Florianópolis, Santa Catarina, Maio (CD, Papaer n.:SP-022)
- LONDON Jr., J.B.A. et al., "A topological approach to the identification of critical measurements in power system state estimation". *IEEE Transactions on Circuits and Systems - Part I*, Vol.52, Issue:1, pp. 139- 147, January 2005

8.Referências

- LONDON Jr., J.B.A. ; ALBERTO, L.F.C. & BRETAS, N.G., "Analysis of Measurement Set Qualitative Characteristics for State Estimation Purposes". IET Generation, Transmission & Distribution (formerly IEE Proceedings. Generation, Transmission & Distribution), v. 1, p. 39-45, January, 2007
- MERRIL, H.M.; SCHWEPPE, F.C. (1971). Bad data suppression in power system static state estimation. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-90, N°6, p. 2718-2725, novembro/dezembro
- MILI L., MICHAEL. G. CHEANIE, AND PETER J. ROUSSEAU (1991). "Least Median of Squares State Estimation of Power Systems" IEEE Transaction on Power System, Vol.6, No. 2, Maio, Page(s) 511-523
- MILI L., MICHAEL. G. CHEANIE, N.S. VICHARE AND PETER J. ROUSSEAU (1996). "Robust State Estimation Based On Projection Statistics" IEEE Transaction on Power System, Vol.11, No.2, May

8.Referências

- MIRANDA, V., SANTOS, A. AND PEREIRA, J. (2009). State estimation based on correntropy: a proof of concept, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 24, N. 4, pp. 1888-1889
- MONTICELLI, A. & GARCIA (1983). "Reliable Bad Data Processing for Real-Time State Estimation" IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, No.5, May Page(s) 1126-1139
- PIRES, C.P.; SIMÕES COSTA, A. & MILI, L. (1999). "Iteratively reweighted least-squares state estimation through givens rotations. IEEE Transactions on Power Systems, VOL. 14, N°4, pp.1499-1507, Novembro

34

Erros grosseiros no processo de Estimação de Estado em SEP

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