



Estimação de Estados Generalizada e Identificação de Erros de Topologia

Antonio Simões Costa
GSP – EEL - UFSC

Erros de Topologia

- Causados por erros nos dados sobre *status* de disjuntores repassados ao configurador de redes;
- Menos frequentes que EGs, porém de **grande impacto** no desempenho do estimador (não-convergência, por exemplo);
- Manifestam-se em geral da mesma forma que **EGs múltiplos** em medidas analógicas;
- Dificuldade para identificação em estimadores convencionais: **ausência de "resíduos"** associáveis às medidas digitais.

2

Estimação de Estados Generalizada - I

- Estimação de Estados convencional:
 - Modelo barra-ramo para a rede elétrica;
 - Estados = tensões complexas nas barras.
- Estimação de Estados Generalizada:
 - Representação de ramos de impedância nula;
 - Partes da rede representadas no nível de seção de barra;
 - Estados:
 - tensões complexas nas barras e
 - fluxos de potência nos ramos chaveáveis (disjuntores e chaves).

3

Estimação de Estados Generalizada - II

- Estimação de Estados em dois estágios:
 - 1º estágio: emprega-se modelo barra-ramo;
 - Delimita região que contém o erro;
 - 2º estágio: uso de modelo reduzido para a rede:
 - Subestações suspeitas representadas no nível de seção de barra;
 - Identificação de erros realizada usando-se a rede reduzida.

4

Estimação de Estados Generalizada - III

- Vantagens da Estimação de Estados Generalizada:
 - Facilita o processamento dos status de ramos chaveáveis (disjuntores e chaves);
 - Formulação da EEG via método do Tableau Esparso:
 - Multiplicadores de Lagrange associáveis a chaves e disjuntores;
 - Nova geração de algoritmos para processamento de Erros de Topologia.

5

Estimação de Estados Generalizada - IV

- Modelagem dos ramos chaveáveis:
 - Fluxo de potência nos ramos chaveáveis: novas variáveis de estado;
 - *Status* → Pseudomedidas ou restrições de igualdade:
 - Disjuntor fechado → $\delta_i - \delta_j = 0$ e $V_i - V_j = 0$
 - Disjuntor aberto → $t_{ij} = 0$ e $u_{ij} = 0$

6

Estimação de Estados Generalizada - V

➤ Formulação como problema de otimização com restrições:

- Restrições:

- Modelo de medição → $h_m(\cdot)$
- Restrições Estruturais → info. determinística ($\delta_i=0, P_i=0$): $h_s(\cdot)$
- Restrições Operacionais → *status* dos ramos chaveáveis: $h_o(\cdot)$

➤ Formulação matemática:

$$\begin{cases} \text{Min} & \frac{1}{2} r_m^T R_m^{-1} r_m \\ \text{s. a} & r_m = z_m - h_m(\hat{x}) \\ & h_s(\hat{x}) = 0 \\ & h_o(\hat{x}) = 0 \end{cases}$$

7

Multiplicadores de Lagrange

Tipo	Restrição	Mult. Lagrange
Medidas	$r_m = z_m - h_m(\hat{x})$	λ_m
Estruturais	$h_s(\hat{x}) = 0$	λ_s
Operacionais	$h_o(\hat{x}) = 0$	λ_o

8

Estimação de Estados Generalizada - VI

➤ Solução pelo método do Tableau Esparsa:

$$\begin{pmatrix} 0 & H_m^T & H_s^T & H_o^T \\ H_m & R_m & 0 & 0 \\ H_s & 0 & 0 & 0 \\ H_o & 0 & 0 & R_o \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta \hat{x} \\ \lambda_m \\ \lambda_s \\ \lambda_o \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ z_m - h_m(\hat{x}) \\ -h_s(\hat{x}) \\ -h_o(\hat{x}) \end{pmatrix}$$

➤ Multiplicadores de Lagrange normalizados:

$$\lambda_i^N = \frac{\lambda_i}{\sqrt{V_{ii}}} \quad V \rightarrow \text{matriz de covariância de } \lambda$$

$$\begin{pmatrix} -\Sigma & C^T \\ C & V \end{pmatrix} \Delta \begin{pmatrix} 0 & H^T \\ H & R \end{pmatrix}^{-1}$$

9

Identificação de Erros de Topologia

- Seleção de disjuntores suspeitos baseada em $|\lambda^N|$;
- Em geral, várias combinações de *status* devem ser examinadas, dependendo do número de disjuntores suspeitos;
- Duas classes de métodos:
 - *Enumerativos*;
 - *Não-enumerativos*.

10

Algoritmo Enumerativo via λ^N [Clements e Simões Costa, 1997]

Deteção:

- **Se** $\lambda_{o_max}^N < \lambda_t$ → *saida='topologia_correta'*
- **Se não** → *saida='erro_de_topologia'*

Identificação:

- **Se** *saida='erro_de_topologia'*
 - **Enquanto** $\lambda_{o_max}^N > \lambda_t$:
 - *status(k) = 1 - status(k)* {modifica *status* disjuntor k}
 - **Se** *configuração já testada* → *processar próximo disjuntor*
 - **Re-estimar estados**
 - **Re-calcular** $\lambda_{o_max}^N$
 - **Se** $\lambda_{o_max}^N < \lambda_t$ → *saida='identif'*

11

Dificuldades do Método Enumerativo

- Exige **sucessivas re-estimações** dos estados, uma para cada configuração de disjuntores visitada;
- Tende a tornar-se computacionalmente ineficiente se o número de disjuntores considerados é elevado (2^{n_d} combinações possíveis).

12

Informações A Priori - I

- É possível levar em conta o **conhecimento prévio** existente sobre as **variáveis de estado** no processo de estimação;
- Igualmente, a **incerteza** associada a esta informação *a priori* pode ser considerada;
- A incerteza é traduzida pela **variância** associada a cada informação;
- O **inverso desta variância** servirá de **fator de ponderação** para a influência das informações a priori.

13

Informações A Priori - II

- Exemplos típicos de informações *a priori*:
 - As **magnitudes das tensões** nas barras são próximas a 1,0 pu, podendo-se admitir que variem, por exemplo, entre 0,85 e 1,1 pu;
 - Os **ângulos de fase das tensões** nas barras não diferem muito de 0 radianos, podendo variar entre -1,0 a +1,0 radianos;
 - Os valores 1,0 pu e 0,0 radianos poderiam ser considerados como **médias**, e os limites associados traduziriam o "espalhamento" em relação à média, e assim **definiriam as variâncias** das info *a priori*.

14

Informações A Priori - III

- O valor médio e a variância da informação *a priori* associada ao estado x_i serão denotados por

$$\bar{x}_i \quad \text{e} \quad \sigma_i^2$$

- O vetor de info a priori para os estados será \bar{x} e a matriz de covariância das info a priori é dada por

$$P = \text{diag}\{\sigma_1^2, \sigma_2^2, \dots, \sigma_n^2\}$$

15

Informações A Priori - IV

- Para levar em conta as informações *a priori* na estimação de estados, o termo abaixo deve ser **adicionado à função-objetivo**:

$$\frac{1}{2}(\hat{x} - \bar{x})^T P^{-1}(\hat{x} - \bar{x})$$

- Note que, caso **nada se saiba** previamente sobre os estados, então

$$P \rightarrow \infty \Rightarrow P^{-1} \rightarrow [0]$$

o que nos leva de volta ao problema de estimação original.

16

Estimação Generalizada com Informações A Priori

- ◆ Estimação de Estados com Informações *A Priori* (Modelo linearizado)

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & \frac{1}{2} r^T R_m^{-1} r + \frac{1}{2} (\hat{x} - \bar{x})^T P^{-1} (\hat{x} - \bar{x}) \\ \text{s.a} \quad & -r + z_m - H_m \hat{x} = 0 \\ & z_s - H_s \hat{x} = 0 \\ & z_o - H_o \hat{x} = 0 \end{aligned}$$

- ◆ Condições de Otimalidade (KKT)

$$\begin{pmatrix} -P^{-1} & H_m^T & H_s^T & H_o^T \\ H_m & R_m & 0 & 0 \\ H_s & 0 & 0 & 0 \\ H_o & 0 & 0 & R_o \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta \hat{x} \\ \lambda_m \\ \lambda_s \\ \lambda_o \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -P^{-1} \bar{x} \\ z_m \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

17

Vantagens de se considerar Informações A Priori

- Durante o processo de identificação de ETs, podem surgir **ilhamentos** devido à abertura de disjuntores ⇒ dificuldades para realizar a estimação;
 - As info *a priori* evitam a necessidade de se definir **múltiplas referências angulares** em cada ilha, pois já trazem esta informação de forma subjacente;
- As info a priori equivalem a um **aumento virtual de redundância** de informação para a estimação, reduzindo problemas de criticidade e observabilidade;
- A presença da matriz P^{-1} **melhora o condicionamento numérico do problema de estimação** via tableau esparso.

18

Métodos Não-Enumerativos

- Visam corrigir as deficiências do método enumerativo;
- Baseiam-se no uso de:
 - **Testes geométricos** de pertinência dos dispositivos errôneos modelados com respeito ao conjunto de dispositivos suspeitos;
 - **Testes Estatísticos de Hipóteses** baseados no Teorema de Bayes.

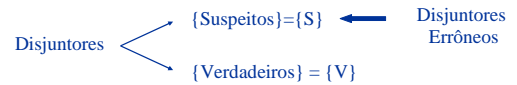
19

Seleção de Disjuntores Suspeitos - I

- ♦ λ^N Associados às Restrições Operacionais

$$\lambda_{o,i}^N = \frac{\lambda_{o,i}}{\sqrt{V_{ii}}} \quad \begin{pmatrix} \bar{C} \\ \bar{V} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -P^{-1} & H^T \\ H & R \end{pmatrix}^{-1}$$

$$|\lambda_{o,i}^N| > \lambda_t \rightarrow \text{Disjuntor } i \text{ selecionado como suspeito}$$



20

Seleção de Disjuntores Suspeitos - II

- Relação entre λ e o vetor de erros ε :

$$\lambda = V\varepsilon$$

- Particionamento de V de acordo com {S} e {V}:

$$\lambda = \begin{bmatrix} V_S & V_V \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_S \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}$$

← Erros
← Informações perfeitas (por hipótese)

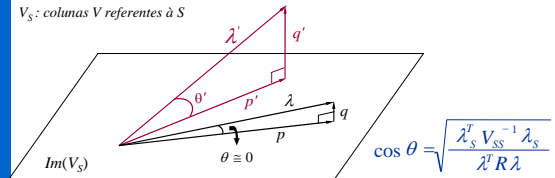
ou

$$\lambda = V_S \varepsilon_S$$

21

Método Geométrico - Teste $\cos \theta$

V_S : colunas V referentes à S



$$\cos \theta = \sqrt{\frac{\lambda_S^T V_{SS}^{-1} \lambda_S}{\lambda^T R \lambda}}$$

Se $\cos \theta > (1 - \varepsilon_{\cos}) \Rightarrow S$ contém todos os disjuntores errôneos → Aplicar Testes de Hipóteses

Se $\cos \theta < (1 - \varepsilon_{\cos}) \Rightarrow S$ não contém todos os disjuntores errôneos → Redefinir conjunto S

$$|\lambda_{o,i}^N| > \lambda_t$$

Método Baseado em Testes de Hipóteses

- ♦ **Hipótese Básica** $\mathcal{H}_0 \rightarrow$ Status correntes dos disjuntores suspeitos
- ♦ **Hipóteses Alternativas** $\mathcal{H}_i \rightarrow$ Demais combinações
- ♦ **Estimação dos Estados** $\mathcal{H}_0 \rightarrow \mathcal{H}_i$
 - Matriz Jacobiana das Restrições Operacionais - H_o
 - Restr. Operacionais Disjuntor Aberto $\rightarrow H_{o,a}$
 - Restr. Operacionais Disjuntor Fechado $\rightarrow H_{o,f}$
- ♦ **Configuração Atual da Rede** (\mathcal{H}_0)
 - Desativar restrições operacionais complementares
 - São transformadas em "pseudomedidas" \rightarrow Variância elevada em R_o

23

Testes de Hipóteses via Teorema de Bayes

- ♦ **Propósito dos Testes de Hipóteses**

• Medidas e Restrições \rightarrow Respaldam \mathcal{H}_0 ou \mathcal{H}_i

- ♦ **Teorema de Bayes** \rightarrow Probabilidades Condicionais

$$P(\mathcal{H}_i | z) = \frac{f(z | \mathcal{H}_i) P(\mathcal{H}_i)}{\sum_{j=1}^{n_{\text{db}}} f(z | \mathcal{H}_j) P(\mathcal{H}_j)}$$

Função Densidade de Probabilidade:

$$f(z | \mathcal{H}_i) = 2\pi^{-\frac{m}{2}} |V_i|^{-\frac{1}{2}} \exp\left\{-\frac{1}{2} z^T V_i^{-1} z\right\}$$

- ♦ **Máxima Probabilidade Condicional** \rightarrow Combinação Correta

24

Algoritmo Geométrico-Estatístico

0. Definir limiar λ_l , tolerância $\epsilon_{\cos\theta}$ e prob. falso alarme α
1. Determinar λ_o e calcular λ_o^N . Estabelecer $\lambda_{o_max}^N = \max|\lambda_o^N|$
 - Se $\lambda_{o_max}^N < \lambda_l$, pare.
 - Se não Existem erro(s) topológico(s). Vá para o Passo 2.
2. Seleccionar disjuntores suspeitos:
 - Se $|\lambda_{o,i}^N| > \lambda_l$, selecione disjuntor i como suspeito.
3. Calcular $\cos\theta$ para o conjunto suspeito S
 - Se $\cos\theta > (1-\epsilon_{\cos\theta}) \Rightarrow S \supset \{\text{todos disj. errôneos}\}$. Vá para passo 4.
 - Se $\cos\theta < (1-\epsilon_{\cos\theta})$, reduza λ_l e volte para Passo 2.
4. Calcular as probabilidades condicionais usando Teorema Bayes
 - Máxima Probabilidade $\rightarrow \mathcal{H}_i$: status correto dos disjuntores suspeitos
5. Aplicar o Pós-Processamento (FIM)

25

Abordagem Alternativa: Método Puramente Geométrico

- Baseada exclusivamente no teste geométrico de pertinência, prescindindo dos testes de hipóteses;
- Consiste em **decrecer gradativamente o limiar λ_l** do teste do cosseno até que o conjunto de restrições suspeitas se reduza ao conjunto de disjuntores com status errôneo;
- **Vantagens:** simplicidade, desempenho em geral satisfatório;
- **Desvantagens:** mais sensível à presença de conjuntos críticos.

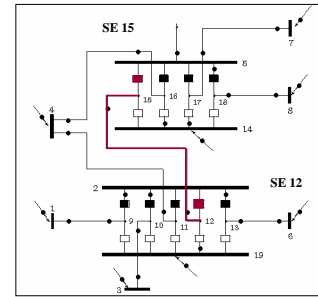
26

Resultados de Simulações

27

Resultados IET – Sistema IEEE 30 barras

- ◆ Sistema Reduzido \rightarrow SEs 12 e 15 (OC1 e EM1)



28

Erro de Inclusão \rightarrow Linha 12-15

Disjuntor Errôneo	Disjuntores Suspeitos $\lambda_o^N > 3,0$	Status Correto	Status Simulado	cos θ	
				DC	AC
2-12	2-12	1	1	1,0000	0,9986
5-15	5-15	0	1		
	5-16	0	1		
	5-16	1	1		

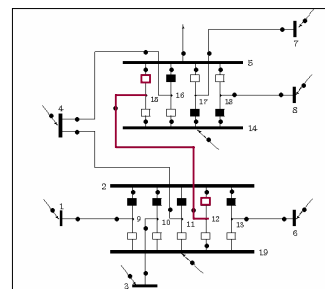
1 - Disjuntor fechado
0 - Disjuntor aberto

Combinções Status (\mathcal{H}_i)	Probabilidade $P(\mathcal{H}_i z)$	
	DC	AC
$\mathcal{H}_8 : \{1001\}$	0,99996	1,00000
$\mathcal{H}_{13} : \{1101\}$	0,00002	0,00000
$\mathcal{H}_{14} : \{1011\}$	0,00002	0,00000

29

Sistema IEEE 30 barras

- ◆ Sistema Reduzido \rightarrow SEs 12 e 15 (OC2 e EM2)



30

Erro de Exclusão → Linha 12-15

Disjuntores Errôneos	Disjuntores Suspeitos $\lambda_o^N > 3.0$	Status Correto	Status Simulado	cos θ	
				DC	AC
2-12	5-18	1	1	0,2043	0,2051
5-15	5-17	1	1		

Disjuntores Suspeitos $\lambda_o^N > 0,5$		Status Correto	Status Simulado	cos θ	
DC	AC			DC	AC
2-12	2-9	1	1		
5-15	2-12	1	0		
5-17	5-15	1	0	0,9998	0,9687
5-18	5-17	0	0		
5-18	5-18	0	0		
14-16	14-16	0	0		

31

Erro de Exclusão → Linha 12-15

DC	
Combinções	$P(\mathcal{H}_{i(z)})$
$\mathcal{H}_{15}: \{111000\}$	0,14159
$\mathcal{H}_{21}: \{111100\}$	0,00018
$\mathcal{H}_{24}: \{111010\}$	0,00032
$\mathcal{H}_{25}: \{111001\}$	0,00018
$\mathcal{H}_{28}: \{111110\}$	0,01654
$\mathcal{H}_{29}: \{111101\}$	0,00802
$\mathcal{H}_{30}: \{111011\}$	0,01314
$\mathcal{H}_{31}: \{111111\}$	0,82002

AC	
Combinções	$P(\mathcal{H}_{i(z)})$
$\mathcal{H}_6: \{1111000\}$	0,00011
$\mathcal{H}_{22}: \{111100\}$	0,00078
$\mathcal{H}_{18}: \{1111011\}$	0,00038
$\mathcal{H}_{45}: \{111111\}$	0,99812
$\mathcal{H}_{54}: \{1111101\}$	0,00061

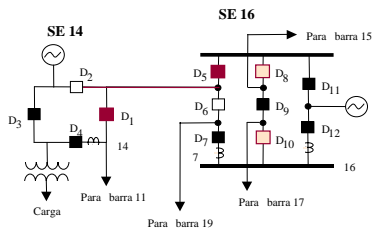
Pós-Processamento DC / AC	
5-17 aberto	
5-18 aberto	
14-16 aberto	

Configuração Final	
DC	AC
{11000}	{111000}

32

Resultados IET – IEEE 24 barras

♦ Sistema Reduzido → SEs 14 e 16 (Caso A)



33

IEEE 24 barras → Caso A

Tipo de Erro	Disjuntores Errôneos	Status Correto	Status Simulado
Inclusão	D ₁	0	1
	D ₅	0	1
By-Pass	D ₈	1	0
	D ₁₀	1	0

Tipo de Erro	Disjuntores Suspeitos $\lambda_o^N > 3.0$	Combinção \mathcal{H}_i	Probabilidade $P(\mathcal{H}_{i(z)})$
DC	{D ₁ D ₂ D ₅ D ₈ D ₉ D ₁₀ D ₁₁ D ₁₂ }	$\mathcal{H}_{219}: \{00011111\}$	0,99999
AC	{ D ₁ D ₅ }	$\mathcal{H}_2: \{00\}$	0,99999
DC/AC	{D ₈ D ₉ D ₁₀ }	$\mathcal{H}_{22}: \{111\}$	1,0000

34

Conclusões Gerais

35

Conclusões - I

➤ Abordagem proposta para identificação de erros de topologia:

- ❑ **Uso de informações a priori:**
 - Melhor condicionamento numérico do problema de estimação;
 - Melhor desempenho do método de identificação.
- ❑ **Pré-seleção de disjuntores suspeitos** ⇒ Redução esforço computacional
- ❑ **Teste geométrico de pertinência (teste do cosseno):**
 - Associado aos dos testes de hipóteses, proporciona melhor desempenho;
 - Por si só, pode embasar algoritmo de identificação (prescindindo dos THs).
- ❑ **Testes de Hipóteses** ⇒ Identificação **sem re-estimação** de estados.

36

Conclusões - II

➤ Identificação de Erros de Topologia via Testes de Hipóteses

- ❑ Identificação em iteração intermediária do estimador AC:
 - Contorna os problemas de convergências causados pela presença de ET.
- ❑ Resultados obtidos:
 - Eficácia dos testes de hipóteses;
 - Importância do teste do cosseno;
 - Possibilidade de identificação mesmo em casos de conjuntos críticos.

37

Extensões e Possíveis Desdobramentos

- Extensões do método proposto:
 - ❑ Possibilitar o processamento de erros grosseiros e erros em restrições estruturais.
- Utilizar métodos ortogonais na versão não-linear do método:
 - ❑ Maior robustez numérica.

38

FIM

39