

Métodos para Identificação de Medidas Críticas e Conjuntos Críticos de Medidas

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

1

1. Introdução

■ Para possibilitar a detecção e identificação de EGs o nível de redundância local de um conjunto de medidas deve ser tal que, além de garantir a observabilidade do sistema, garanta a ausência de:

- Medidas críticas (MCs)
- Conjuntos críticos de medidas (CCMs)

➤ Isto em razão de não ser possível detectar a ocorrência de erros grosseiros em MCs, nem mesmo identificar tais erros em medidas pertencentes a CCMs

2

1. Introdução

■ Definições:

- MC é a medida que, se retirada do conjunto de medidas de um sistema observável (ou de uma ilha observável), torna o mesmo (ou a ilha) não observável
- CCM é o conjunto de medidas formado por medidas não críticas (redundantes), em que a eliminação de uma medida qualquer, a ele pertencente, torna as demais medidas críticas

3

1. Introdução

■ Métodos para identificação de medidas críticas e de conjuntos críticos de medidas

• Topológicos

Observabilidade Topológica: um sistema de potência é "topologicamente" observável, com relação a um conjunto de medidas, unicamente se existir, associada a tal sistema, uma árvore geradora de posto completo (árvore geradora é uma árvore abrangendo todas as barras da rede; uma árvore de posto completo, ou simplesmente observável, se for possível atribuir-se-lhe a cada ramo, pelo menos uma medida distinta)

Medida Crítica: com base nos conceitos topológicos, uma medida é considerada crítica se a mesma for necessária para construção de uma árvore geradora de posto completo. Ou seja, a sua supressão do conjunto de medidas impede a construção daquela árvore

1. Introdução

■ Métodos para identificação de medidas críticas e de conjuntos críticos de medidas

• Topológicos

- (MC) - CLEMENTS, K. A. ; KRUMPHOLZ, G. R. ; DAVIS, P. W. (1981). Power system state estimation residual analysis: an algorithm using network topology. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, VOL.-PAS 100, N°4, p.1779- 1787, Abril
- (MC) - LONDON Jr., J.B.A. et al (2005). "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

5

1. Introdução

■ Métodos para identificação de medidas críticas e de conjuntos críticos de medidas

• Topológicos

- (MC-CCM) - SIMÕES-COSTA, A.; PIAZZA, T.S.; MANDEL, A. (1990). Qualitative methods to solve qualitative problems in power system state estimation. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 5, N°3, p. 941-949, agosto
- Identificação de MC – topologicamente;
 - Identificação de CCM – iterativamente.

6

1. Introdução

■ Métodos para identificação de medidas críticas e de conjuntos críticos de medidas

• Numéricos

- MC – apresentam resíduo nulo
- MC - são nulos os elementos da diagonal principal da matriz de covariância dos resíduos (sensibilidade dos resíduos), associados às medidas críticas
- CCM - conjunto de medidas formado por medidas não críticas, em que a eliminação de uma medida qualquer, a ele pertencente, torna as demais medidas críticas
- CCM – os resíduos normalizados das medidas de um conjunto crítico são iguais

7

1. Introdução

■ Métodos para identificação de medidas críticas e de conjuntos críticos de medidas

• Numéricos

- (MC - CCM) - KORRES, G.N.; CONTAXIS, G.C. (1991a). A reduced model for bad data processing in state estimation. IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 6, N° 2, p.550-557, maio
- (MC – CCM) - KORRES, G.N.; CONTAXIS, G.C. (1991b). Identification and updating of minimally dependent sets of measurements in state estimation. IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 6, N°3, p.999-1005, agosto
- (MC – CCM) - LONDON Jr., Alberto, L.F., A.S. & Bretas, N.G. (2007). "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

1. Introdução

■ Métodos para identificação de medidas críticas e de conjuntos críticos de medidas

• Numéricos

Matriz de
Covariância
dos resíduos

- (MC - CCM) - KORRES, G.N.; CONTAXIS, G.C. (1991a). A reduced model for bad data processing in state estimation. [IEEE Transaction on Power Systems](#), Vol. 6, N° 2, p.550-557, maio
- (MC - CCM) - KORRES, G.N.; CONTAXIS, G.C. (1991b). Identification and updating of minimally dependent sets of measurements in state estimation. [IEEE Transaction on Power Systems](#), Vol. 6, N°3, p.999-1005, agosto
- (MC - CCM) - LONDON Jr., Alberto, L.F., A.S. & Bretas, N.G. (2007). "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

1. Introdução

■ Métodos para identificação de medidas críticas e de conjuntos críticos de medidas

• Numéricos

Matriz de
Covariância
dos resíduos

- (MC - CCM) - KORRES, G.N.; CONTAXIS, G.C. (1991a). A reduced model for bad data processing in state estimation. [IEEE Transaction on Power Systems](#), Vol. 6, N° 2, p.550-557, maio
- (MC - CCM) - KORRES, G.N.; CONTAXIS, G.C. (1991b). Identification and updating of minimally dependent sets of measurements in state estimation. [IEEE Transaction on Power Systems](#), Vol. 6, N°3, p.999-1005, agosto
- (MC - CCM) - LONDON Jr., Alberto, L.F., A.S. & Bretas, N.G. (2007). "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

2. Identificação de MCs e CCMs através da matriz H_{Δ}

■ Inicialmente o método permite a identificação:

- Medida crítica
- Par crítico de medidas
- Trio crítico de medidas

11

2. Identificação de MCs e CCMs através da matriz H_{Δ}

- Matriz Jacobiana H
- Um sistema de potência é algebricamente observável se:

$$\text{Posto}(H) = 2n-1 \Rightarrow n = \underline{v}, (n-1) = \underline{v}$$

- Medida crítica
- Par crítico de medidas
- Trio crítico de medidas

12

2. Identificação de MCs e CCMs através da matriz H_{Δ}

Teorema : Modelo P0

$$H_{\Delta} = \begin{bmatrix} 1 & \dots & (n-1) & n \\ \vdots & & & 0 \\ \vdots & & I_{(n-1)} & \vdots \\ (n-1) & \vdots & \vdots & 1 \\ \vdots & & R & \vdots \\ m & \vdots & \vdots & 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{array}{c} \textcircled{Z} \xleftarrow{H} \textcircled{X} \xleftarrow{C^{-1}} \textcircled{X_{eq}} \\ Z = \underbrace{[H][C]^{-1}}_{H_{\Delta}} X_{eq} \end{array}$$

13

2. Identificação de MCs e CCMs através da matriz H_{Δ}

$$H_{\Delta} = \begin{bmatrix} 1 & \dots & (n-1) & n \\ \vdots & & & 0 \\ \vdots & & I_{(n-1)} & \vdots \\ (n-1) & \vdots & \vdots & 1 \\ \vdots & & R & \vdots \\ m & \vdots & \vdots & 0 \end{bmatrix}$$

$I \Rightarrow$ Medidas básicas

$R \Rightarrow$ Medidas suplementares

- Os elementos não nulos, que aparecem em uma coluna da matriz H_{Δ} , indicam as medidas que dão informação da variável de estado equivalente associada àquela coluna
- Identificação dos conjuntos p-críticos que contém apenas uma Medida Básica

14

2. Identificação de MCs e CCMs através da matriz H_{Δ}

$$H_{\Delta} = \begin{bmatrix} 1 & \dots & (n-1) & n \\ \vdots & & & 0 \\ \vdots & & I_{(n-1)} & \vdots \\ (n-1) & \vdots & \vdots & 1 \\ \vdots & & R & \vdots \\ m & \vdots & \vdots & 0 \end{bmatrix}$$

$I \Rightarrow$ Medidas básicas

$R \Rightarrow$ Medidas suplementares

Definição 1: Conjunto p-crítico de medidas é um conjunto de 'p' medidas ($p \geq 1$), associadas a um sistema de potência observável, que caso perdidas tornam tal sistema não observável (a remoção de qualquer conjunto de k medidas, pertencentes a um conjunto p-crítico, com $k < p$, não causa a perda da observabilidade do sistema)

($p = 1 \rightarrow$ MC; $p = 2 \rightarrow$ Par Crítico; $p = 3 \rightarrow$ Trio Crítico)

2. Identificação de MCs e CCMs através da matriz H_{Δ}

Identificação de Medidas Críticas

Para identificar as medidas críticas, basta realizar uma busca das linhas de H_{Δ}^t , que possuem apenas um elemento não nulo, uma vez que as medidas correspondentes às colunas desses elementos são críticas

16

2. Identificação de MCs e CCMs através da matriz H_{Δ}

Identificação de Medidas Críticas

Para identificar as medidas críticas, basta realizar uma busca das linhas de H_{Δ}^t , que possuem apenas um elemento não nulo, uma vez que as medidas correspondentes às colunas desses elementos são críticas

$$H_{\Delta}^t = \begin{array}{c|cccccc|cccc} & F_1 & F_2 & I_4 & F_4 & F_5 & I_1 & F_3 & I_5 & I_6 \\ \hline 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 3 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array}$$

17

2. Identificação de MCs e CCMs através da matriz H_{Δ}

Identificação de Medidas Críticas

Para identificar as medidas críticas, basta realizar uma busca das linhas de H_{Δ}^t , que possuem apenas um elemento não nulo, uma vez que as medidas correspondentes às colunas desses elementos são críticas

$$H_{\Delta}^t = \begin{array}{c|cccccc|cccc} & F_1 & F_2 & I_4 & F_4 & F_5 & I_1 & F_3 & I_5 & I_6 \\ \hline 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 3 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \quad \text{medida crítica } I_4$$

18

2. Identificação de MCs e CCMs através da matriz H_{Δ}

Identificação de Conjuntos Críticos de Medidas

➤ Para realizar a identificação dos conjuntos críticos de medidas, as informações mais importantes que se obtêm, através das linhas de H_{Δ}^t , referem-se à identificação das medidas críticas e dos pares críticos de medidas, constituídos por uma Medida Básica e uma Medida Suplementar

✓ Isto porque, para realizar a busca dos CCM, primeiramente se faz necessário saber quais são as medidas críticas, pois, de acordo com a definição de CCM, essas medidas não devem ser consideradas naquela busca

✓ A importância de conhecerem os pares críticos de medidas é que, as duas medidas que constituem um par crítico pertencem ao mesmo conjunto crítico de medidas. Consequentemente, os pares críticos servem para guiar a busca CCMs, minimizando-a

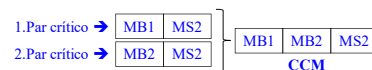
2. Identificação de MCs e CCMs através da matriz H_{Δ}

Algoritmo:

1º Etapa: Mediante as medidas disponíveis, construa a matriz H_{Δ}^t , obtendo a matriz H_{Δ}^t . Em seguida identifique, através das linhas de H_{Δ}^t , as medidas críticas e os pares críticos de medidas, formados por apenas uma Medida Básica (MB)

2º Etapa: Dentre os pares críticos identificados, selecione aqueles que não possuem Medida Suplementar (MS) em comum. As duas medidas, de cada um desses pares críticos, constituem um conjunto crítico formado por apenas duas medidas

3º Etapa: Dentre os pares críticos identificados, selecione grupos que possuem pelo menos uma MS em comum. As medidas pertencentes, a cada um desses grupos, constituem um único conjunto crítico de medidas, formado por mais de duas medidas. Ex.



20

2. Identificação de MCs e CCMs através da matriz H_{Δ}

➤ Algoritmo:

4ª Etapa: Se existir alguma Medida Básica não crítica, não pertencente aos conjuntos críticos já identificados, elimina-se da matriz H'_{Δ} , tal medida. Em seguida, obtém-se a nova matriz H'_{Δ} , e, analisando as linhas desta matriz, as Medidas Básicas, que agora são identificadas como críticas, constituirão, juntamente com a Medida Básica eliminada, um conjunto crítico de medidas

- Esta etapa é finalizada quando todas as Medidas Básicas não críticas, não pertencentes a conjuntos críticos já identificados, tiverem sido analisadas

➤ Na pior situação em termos de processamento, o algoritmo supracitado exigiria no máximo $(n-1)$ fatorações parciais, acompanhadas de contagens de elementos não nulos em $(n-1)$ matrizes. Tal situação ocorreria quando nenhum conjunto p-crítico, com $p \leq 2$, fosse identificado nas Etapas 1 e 2. O algoritmo topológico proposto por Simões-Costa et al (1991) exigiria, para mesma situação, que o algoritmo de identificação de medidas críticas, que se baseia numa busca por árvores de posto completo, fosse processado em torno de $(m-N)$ vezes, sendo m o número de medidas disponíveis e N o número de variáveis de estado a serem estimadas

2. Identificação de MCs e CCMs através da matriz H_{Δ}

➤ Exemplo:

– Etapa 3:

M4 - medida crítica

	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
1	1	0	0	0	0	3	0
2	0	1	0	0	0	2	0
3	0	0	1	0	0	1	-1
4	0	0	0	1	0	0	0
5	0	0	0	0	1	1	-1
6	0	0	0	0	0	0	0

→ [M1;M6]
→ [M2;M6]

22

2. Identificação de MCs e CCMs através da matriz H_{Δ}

➤ Exemplo:

– Etapa 3:

M4 - medida crítica

	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
1	1	0	0	0	0	3	0
2	0	1	0	0	0	2	0
3	0	0	1	0	0	1	-1
4	0	0	0	1	0	0	0
5	0	0	0	0	1	1	-1
6	0	0	0	0	0	0	0

→ [M1;M2; M6] - formam um conjunto crítico

Obs.: se os pares críticos não possuísem medidas suplementares em comum, seriam dois CCMs distintos (Etapa 2)

23

2. Identificação de MCs e CCMs através da matriz H_{Δ}

➤ Exemplo:

– Etapa 4: Consideram-se apenas as medidas Básicas não críticas e não pertencentes ao conjunto crítico já identificado

	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
1	1	0	0	0	0	3	0
2	0	1	0	0	0	2	0
3	0	0	1	0	0	1	-1
4	0	0	0	1	0	0	0
5	0	0	0	0	1	1	-1
6	0	0	0	0	0	0	0

M4 - medida crítica
[M1;M2;M6] - conjunto crítico de medidas

24

2. Identificação de MCs e CCMs através da matriz H_{Δ}

➤ Exemplo:

- Etapa 4: Consideram-se apenas as medidas Básicas não críticas e não pertencentes ao conjunto crítico já identificado

$$H_{\Delta} = \begin{array}{c|ccccccc} & M1 & M2 & M3 & M4 & M5 & M6 & M7 \\ \hline 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 0 \\ 2 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 3 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 4 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & -1 \\ 6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array}$$

M4 - medida crítica
[M1;M2;M6] - conjunto crítico de medidas

25

2. Identificação de MCs e CCMs através da matriz H_{Δ}

➤ Exemplo:

- Etapa 4: Consideram-se apenas as medidas Básicas não críticas e não pertencentes a nenhum conjunto crítico já identificado

$$H_{\Delta} = \begin{array}{c|ccccccc} & M1 & M2 & M6 & M4 & M5 & M7 \\ \hline 1 & 1 & 0 & 3 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 1 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ 4 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 5 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & -1 \\ 6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array}$$

M4 - medida crítica
[M1;M2;M6] - conjunto crítico de medidas

2. Identificação de MCs e CCMs através da matriz H_{Δ}

➤ Exemplo:

- Etapa 4: Consideram-se apenas as medidas Básicas não críticas e não pertencentes a nenhum conjunto crítico já identificado

$$H_{\Delta} = \begin{array}{c|ccccccc} & M1 & M2 & M6 & M4 & M5 & M7 \\ \hline 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3 \\ 2 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 2 \\ 3 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ 4 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array}$$

M4 - medida crítica
[M1;M2;M6] - conjunto crítico de medidas
→ [M3;M5] - conjunto crítico de medidas

27

Métodos para Identificação de Medidas Críticas e Conjuntos Críticos de Medidas

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

28