Modelagem de Ramos de Impedância Nula

Antonio Simões Costa

Novembro, 1997

1. Introdução

Observa-se hoje uma tendência cada vez mais acentuada no sentido de se aplicar a estimação de estados para a validação de dados ao nível de subestação [3], [2], particularmente para permitir o processamento de erros de topologia oriundos de falhas de modelagem de configurações de subestações [4]. Nestes casos, a modelagem convencional do sistema de potência no nível de barramentos e ramos não é adequada: torna-se necessário utilizar modelos mais detalhados, onde as seções de barras e os disjuntores são também representados. A este nível de detalhamento, ramos com impedância desprezível que correspondem, por exemplo, a disjuntores na posição fechada, devem ser modelados. O artifício relativamente óbvio de se utilizar uma impedância suficientemente pequena para representar um disjuntor fechado sem perda apreciável de precisão não é satisfatória, pois tende a produzir problemas de condicionamento numérico. Torna-se portanto relevante lançar mão de outro método que não deteriore o condicionamento numérico e represente fielmente o status dos disjuntores. Veremos que isto passa pela definição de novas variáveis de estado, em adição às variáveis convencionais (ângulo e módulo das tensões nas barras).

2. Etapas para a Modelagem de Ramos de Impedância Nula

Suponhamos que se deseja modelar o ramo $i-j$, cuja impedância é nula, visando sua representação em problemas de estimação de estados. O principal objetivo da abordagem a ser descrita é evitar o aparecimento da impedância do ramo $i-j$ no modelo matemático da rede, isto é, na matriz Jacobiana. Para isto, faz-se necessário a introdução de algumas alterações na formulação convencional da estimação de estados. Estas alterações são [1]:

1. Definir os fluxos de potência ativa e reativa t_{ij} e u_{ij} no ramo $i-j$ como *variáveis de estado* a serem estimadas;

2. Considerar *nulas* a diferença angular $\theta_i - \theta_j$ e a queda de tensão $V_i - V_j$ relativa às tensões nos extremos da linha $i - j$, e inserir esta informação no modelo matemático, seja sob a forma de pseudo-medidas, seja como restrições de igualdade ao problema de estimação de estados. Matematicamente, estas condições são expressas como:

$$\begin{array}{rcccl} \Delta\theta_{ij} & = & \theta_i - \theta_j & = & 0 \\ \\ \Delta V_{ij} & = & V_i - V_j & = & 0 \end{array} \tag{2.1}$$

Estas informações implicam em que eventuais medidas de fluxo no ramo $i - j$ serão agora expressas unicamente em termos das novas variáveis de estado, e não como funções dos estados convencionais θ_i, θ_j, V_i e V_j, isto é:

$$\begin{array}{l} z_{t_{ij}} = t_{ij} + \eta_{t_{ij}} \\ z_{u_{ij}} = u_{ij} + \eta_{u_{ij}} \end{array} \tag{2.2}$$

Além disso, as expressões relativas às medidas de injeção de potência ativa e reativa nos nós i e j também devem ser modificadas. Estas injeções podem ser expressas como a soma dos fluxosde potência nos ramos que incidem no nó em que a injeção é medida. Para os ramos cuja impedância é não nula, estes componentes de fluxo são calculados na maneira usual, isto é, em termos dos ângulos e magnitudes das tensões nas barras. Para os ramos de impedância nula, entretanto, o componente de fluxo correspondente é expresso diretamente em função das variáveis de estado t_{ij} e u_{ij}. Assim, se Ω_i representa o conjunto de ramos *de impedância não-nula* incidentes na barra i:

$$\begin{array}{rcl} z_{p_i} & = & \sum_{k\in\Omega_i} t_{ik}(\theta_i, \theta_k, V_i, V_k) + t_{ij} + \eta_{p_i} \\ z_{q_i} & = & \sum_{k\in\Omega_i} u_{ik}(\theta_i, \theta_k, V_i, V_k) + t_{ij} + \eta_{q_i} \\ z_{p_j} & = & \sum_{k\in\Omega j} t_{jk}(\theta_j, \theta_k, V_j, V_k) + t_{ij} + \eta_{p_j} \\ z_{q_j} & = & \sum_{k\in\Omega j} u_{jk}(\theta_j, \theta_k, V_j, V_k) + t_{ij} + \eta_{q_j} \end{array} \tag{2.3}$$

Para ilustrar o efeito das modificações introduzidas em decorrência da introdução das novas variáveis de estado na matriz Jacobiana, a estrutura desta matriz é representada abaixo. Por conveniência, somente a matriz Jacobiana para o problema ativo (considerando um estimador desacoplado) é mostrada. Os vetores-linha h_{p_i} e h_{p_j} representam as linhas da matriz Jacobiana correspondentes às medidas z_{p_i} e z_{p_j}escritas na forma convencional, exceto pelo fato de que o fluxo t_{ij} no ramo de impedância nula não é incluido. $H_{p\theta}$ é a submatriz da matriz Jacobiana correspondente às medidas usuais que não incidem no ramo de impedância nula, e $\mathbf{z}$ é o vetor das medidas usuais. $\overline{H}_{p\theta}$ é a matriz Jacobiana modificada, considerando a nova formulação.

$$\overline{H}_{p\theta} = \begin{array}{c|cc|c|}
 & \theta_i & \theta_j & t_{ij} \\ \cline{2-4}
\mathbf{z} & \multicolumn{2}{c|}{H_{p\theta}} & \mathbf{0} \\ \cline{2-4}
z_{p_i} & \multicolumn{2}{c|}{h_{p_i}} & 1 \\
z_{p_j} & \multicolumn{2}{c|}{h_{p_j}} & -1 \\ \cline{2-4}
z_{t_{ij}} & 0 & 0 & 1 \\
\Delta\theta_{ij} & 1 & -1 & 0 \\ \cline{2-4}
\end{array} \tag{2.4}$$

3. Extensões

A metodologia descrita acima para a modelagem de ramos de impedância nula que representam disjuntores fechados pode ser estendida para tratar também os casos de disjuntores com *status* desconhecido ou disjuntores abertos [2].

3.1. Disjuntores com Status Desconhecido

Caso a posição do(s) disjuntor(es) a ser(em) modelado(s) de acordo com a metodologia acima não seja previamente conhecida, excluem-se as condições (2.1) que traduzem o status de disjuntor fechado. São mantidas as equações (2.2) e (2.3), resultando na seguinte estrutura para a matriz Jacobiana:

$$\overline{H}_{p\theta} = \begin{array}{c|cc|c|}
 & \theta_i & \theta_j & t_{ij} \\ \cline{2-4}
\mathbf{z} & \multicolumn{2}{c|}{H_{p\theta}} & \mathbf{0} \\ \cline{2-4}
z_{p_i} & \multicolumn{2}{c|}{h_{p_i}} & 1 \\
z_{p_j} & \multicolumn{2}{c|}{h_{p_j}} & -1 \\ \cline{2-4}
z_{t_{ij}} & 0 & 0 & 1 \\ \cline{2-4}
\end{array} \tag{3.1}$$

3.2. Disjuntores Abertos

Neste caso, a condição de operação para os ramos respectivos pode ser representada através das pseudomedidas:

$$\begin{aligned} z_{t_{ij}} &= t_{ij} = 0 \\ z_{u_{ij}} &= u_{ij} = 0 \end{aligned} \tag{3.2}$$

A estrutura da matriz Jacobiana permanece a mesma indicada pela Eq. (3.1).

4. Comentários Finais

Na metodologia descrita acima, as equações que refletem o status de disjuntores, Eq. (2.1) ou Eq. (3.2), foram tratadas como pseudomedidas. Entretanto, a maneira mais adequada de representar esta informação, em princípio determinística (a menos que erros de topologia estejam presentes no problema), é através de restrições de igualdade. A única alteração na formulação apresentada é a de que as citadas relações deixam de fazer parte da matriz Jacobiana e passam a integrar o conjunto de restrições de igualdade às quais o problema de estimação de estados está sujeito [1], [4].

Deve também ser mencionado que, embora não sendo tratadas nestas notas, questões relativas à observabilidade na representação no nível de subestação podem ser relevantes, dependendo não apenas do plano de medição utilizado, como também do próprio *status* dos disjuntores [3], [2], [4]. Conforme indicado nestas referências, a abordagem convencional para análise de observabilidade não se aplica diretamente ao presente caso em que fluxos de potência são considerados variáveis de estado, sendo necessárias algumas adaptações e mesmo a reavaliação de alguns conceitos relativos à observabilidade de sistemas de potência.

Referências

[1] Monticelli A. e Garcia A., "Modeling Zero Impedance Branches in Power System State Estimation", IEEE Trans. on PWRS, Vol. 6, Nov. 1991, pp. 1561-1570.

[2] Monticelli A., "Modeling Circuit Breakers in Weighted Least Squares State Estimation", IEEE Trans. on PWRS, Vol. 8, No. 3, Ago. 1993, pp. 1143-1149.

[3] Monticelli A., "The Impact of Modeling Short Circuit Branches State Estimation", IEEE Trans. on PWRS, Vol. 8, No. 1, Fev. 1993, pp. 364-370.

[4] Clements K.A. e Simões Costa A., "Topology Error Identification Using Normalized Lagrange Multipliers", apresentado no IEEE Summer Power Meeting, Berlin, Jul. 1997.