

基于降阶雅可比矩阵的电力系统状态估计可观测性分析方法

王珍意, 周良松, 张步涵

(华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 提出了一种新的基于降阶网络雅可比矩阵的电力系统状态估计可观测性分析方法。该方法利用潮流岛内未知状态量最多是一个复电压的特性, 提出了潮流岛状态变量的概念, 在降阶网络雅可比矩阵基础上成功地实现了基于潮流定解条件的潮流岛合并。该方法减少了未知状态变量的数量, 从而简化了循环判断过程和便于程序设计。并通过实例对所提出的方法进行了有效性检验。

关键词: 状态估计; 可观测性分析; 潮流岛; 降阶网络雅可比矩阵

中图分类号: TM712 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2005)10-0001-04

0 引言

在电力系统状态估计中, 如果远动数据丢失或者不可用, 就有可能出现局部量测不足的情况, 从而使系统不可观测, 无法进行状态估计, 所以应在状态估计之前先进行可观测性检验。利用现有量测配置确定能够计算出的电网状态变量的范围是电力系统状态估计可观测性分析^[1]的主要功能之一。现有可观测性分析方法主要有 3 类: 拓扑法^[2,3]、数值法^[4-6]和混合法^[7,8]。拓扑方法是在量测网络中搜寻满秩的生成树, 如果存在, 则认为网络拓扑可观测。但是构造满秩生成树的过程具有组合特性, 计算比较复杂。数值算法计算过程易受舍入误差的影响, 辨识零主元困难, 配置伪量测一般需要叠代过程。传统的拓扑数值混合方法, 首先通过拓扑分析处理支路量测形成若干潮流岛, 潮流岛之间用联络线连接, 形成降阶网络, 对降阶网络用数值可观测性分析方法处理潮流岛的边际注入量测和边界节点电压幅值量测。

但是事实上在形成潮流岛以后, 仍然可以采用拓扑分析的方法, 利用边际节点的注入量测合并潮流岛。文献[9]在充分分析了支路量测岛的可观测条件的基础上, 对潮流岛间可合并条件进行了理论分析。文献[10]在对量测岛的合并进行判断之前, 对没有注入量测的边界节点做节点分裂处理, 形成一个个待并网络, 同时给出了几个基于潮流定解条件的待并网络合并的判定规则。但是该方法分裂节点增加了系统状态变量的数量, 而且在分析网络整体潮流可解而局部网络潮流不可解问题时, 组合项过多, 实施起来很困难。甚至, 节点分裂有可能导致本来可以合并的量测岛因量测岛重叠的原因误判为

不可合并。

本文利用潮流岛内未知状态量最多是一个复电压的特性^[9], 提出了潮流岛状态变量的概念, 用潮流岛的状态变量代替岛内所有节点的状态变量, 大大减少了可观测性分析中的状态变量数量。再对降阶网络建立拓扑模式的雅可比矩阵, 依据潮流定解条件就可以方便地进行量测岛的合并, 同时能够克服前面方法的不足。

1 量测岛间可合并的理论分析

文献[9]给出了潮流岛(支路量测岛)、量测岛、活岛、死岛和吸入岛的详细定义, 本文定义度 n 的注入量测, 是指该注入量测所在的节点通过量测岛间的联络线仅与另外 n 个量测岛相连。

从可观测节点(对有功可观测分析为相角参考节点, 对无功为有电压量测的节点)沿着有量测的支路进行节点合并, 形成潮流岛。然后从潮流岛之外的节点仍沿着有量测的支路进行合并, 直到整个系统不存在支路量测为止。至此, 整个系统就简化成一个个潮流岛和岛间联络线组成的降阶网络。一个潮流岛内未知状态量最多是一个复电压, 如果给定潮流岛上某节点的复电压, 岛上所有节点的复电压皆可求出。也就是说潮流岛内的全部状态量都是某一个复电压的单元函数, 记该复电压为 $U(U, \cdot)$, 称其为该岛的状态变量。基于潮流岛这个特性, 本文作出用潮流岛的状态变量代替岛内所有节点的状态变量的简化处理。作这样的简化处理, 减少了状态变量的数量和简化了合并潮流岛的循环判断过程。利用边际节点上的注入量测可以列写出关于不同潮流岛状态变量的方程, 再列写所有注入量测函数对潮流岛状态变量的偏导数, 即得到降阶网络的

雅可比矩阵。

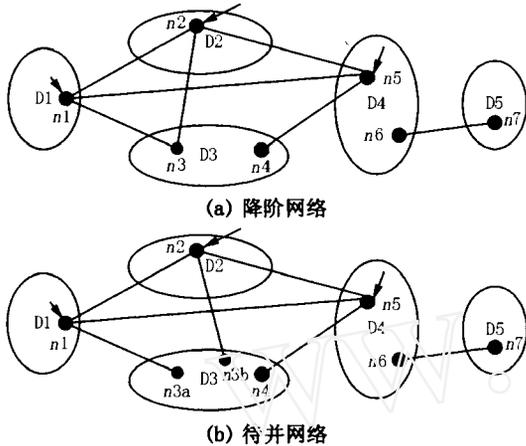


图 1 5潮流岛示意图

Fig 1 Diagram of five flow island system

在如图 1(a)所示的由 5 个潮流岛组成的降阶网络中,按照文献 [9, 10]中所述,对没有配置注入量测的节点 3 进行节点分裂,得到如图 1(b)所示的待并网络。显然有如下关系:

$$\overset{g}{U}_{n3a} = \overset{g}{U}_{n3b} = f(\overset{g}{U}_{n4}) \quad (1)$$

边界节点 n_1, n_2, n_5 上存在注入量测,其度均是 3,由于它们处于不同的节点上,彼此独立。对这 3 个复数量测可列写如下方程:

$$\begin{aligned} \overset{g}{S}_1 &= \overset{g}{S}_1(\overset{g}{U}_{n1}, \overset{g}{U}_{n2}, \overset{g}{U}_{n3a}, \overset{g}{U}_{n5}) \\ \overset{g}{S}_2 &= \overset{g}{S}_2(\overset{g}{U}_{n1}, \overset{g}{U}_{n2}, \overset{g}{U}_{n3b}, \overset{g}{U}_{n5}) \\ \overset{g}{S}_5 &= \overset{g}{S}_5(\overset{g}{U}_{n1}, \overset{g}{U}_{n2}, \overset{g}{U}_{n4}, \overset{g}{U}_{n5}) \end{aligned} \quad (2)$$

联立方程组 (1)、(2) 得到 5 个独立的方程。如果再给定平衡节点,则其中包含的未知量正好为 5 个,则方程组可解,潮流岛 D1 ~ D4 可以合并。

用潮流岛的状态变量代替岛内所有节点的状态变量,则以上方程组可简化成:

$$\begin{aligned} \overset{g}{S}_1 &= \overset{g}{S}_1(\overset{g}{U}_1, \overset{g}{U}_2, \overset{g}{U}_3, \overset{g}{U}_4) \\ \overset{g}{S}_2 &= \overset{g}{S}_2(\overset{g}{U}_1, \overset{g}{U}_2, \overset{g}{U}_3, \overset{g}{U}_4) \\ \overset{g}{S}_5 &= \overset{g}{S}_5(\overset{g}{U}_1, \overset{g}{U}_2, \overset{g}{U}_3, \overset{g}{U}_4) \end{aligned} \quad (3)$$

假定潮流岛 D1 ~ D4 至少有一为活岛,则选该活岛为吸入岛,假定吸入岛为 D1,即在方程组

(3) 中 $\overset{g}{U}_1$ 已知,未知状态变量为 3 个复数,方程个数等于未知量个数,因此可求解出 $\overset{g}{U}_2, \overset{g}{U}_3, \overset{g}{U}_4$, 即潮流岛 D1 ~ D4 可合并。如果潮流岛 D1 ~ D4 均为死岛,同样可以进行合并,只不过合并后形成的新量测岛依然为死岛。

如果列写这 3 个量测函数对潮流岛状态变量 $\overset{g}{U}_1, \overset{g}{U}_2, \overset{g}{U}_3, \overset{g}{U}_4$ 的偏导数,则可得到该降阶网络的雅可比矩阵 W_C 。本文约定在对由潮流岛和连接潮流岛之间的联络线组成的降阶网络建立边际注入量测的雅可比矩阵时,所有电压幅值设为 1 p.u., 所有线路电抗均为 $0 + j1$ 。则有:

$$W_C = \begin{bmatrix} 3 & -1 & -1 & -1 & 0 \\ -1 & 3 & -1 & -1 & 0 \\ -1 & -1 & -1 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_5 \end{bmatrix} \quad (4)$$

显然其阶 $\text{rank}(W_C) = 3$, 雅可比矩阵秩相对于潮流岛数 5 亏 2, 潮流岛 D1 ~ D5 不可以合并。但是考察该雅可比矩阵前 4 列组成的子矩阵,其秩是 4, 潮流岛 D2 ~ D4 可以并入岛 D1, 因潮流岛 D1 已假定为吸入岛,合并以后的新岛 D1 仍是吸入岛。方程组 (3) 可解,雅可比子矩阵秩亏 1 和对应潮流岛 D1 ~ D4 可合并是等价的概念。

基于潮流定解条件的量测岛合并有如下几条规则^[10]:

规则一,度 1 的注入量测所直接关联的两个量测岛可以合并。

规则二,若存在 2 个度 2 的注入量测,且与它们直接相关联的量测岛的数量仅为 3,则这 3 个量测岛可合并。

规则三,假定存在 n ($n=3, 4, 5, \dots$) 个量测,且与它们直接相关联的量测岛的数量仅为 $n+1$ 个,则这 $n+1$ 个量测岛可以合并。

应用潮流岛状态变量的概念,以上几条规则可以更方便地得到证明。现只对规则一做简要证明。在如图 2 所示的降阶网络中,节点 n_1 上注入量测的度是 1,选取 D1 为吸入岛。对节点 n_1 可列出下面的注入量测方程:

$$\overset{g}{S}_1 + \overset{g}{S}_1(\overset{g}{U}_1) - \overset{g}{S}_{1,2}(\overset{g}{U}_1, \overset{g}{U}_2) = 0 \quad (5)$$

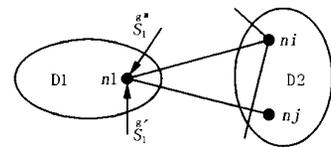


图 2 2潮流岛合并判定图例

Fig 2 Judging rule for two flow islands combination

式 (5) 中 $\overset{g}{S}_1$ 是节点 n_1 的注入量测值, $\overset{g}{S}_1$ 是节点 n_1 的内网支路等值注入。假定岛 D1 是吸入岛,则 $\overset{g}{U}_1$ 是已知量。所以式 (5) 可写成如下形式:

$$h(\overset{g}{U}_2) = 0 \quad (6)$$

此方程可解。因此两潮流岛可合并。如果岛 D1和 D2均为死岛,仍然可以合并,只不过合并以后的新岛仍是死岛,因其仍含有 1 个未知复电压。至此,就可以在降阶雅可比矩阵基础上实现基于潮流定解条件的潮流岛合并了。

2 基于降阶雅可比矩阵的潮流岛合并方法

在降阶雅可比矩阵的基础上可以方便地实现基于潮流定解条件的潮流岛合并。每当利用 n 个量测将 $n+1$ 个量测岛合并成一个新量测岛之后,这 n 个量测已成为内部量测,其度变成 0,而其它量测的度也可能发生变化,因而需重新计算各边际量测的度。

潮流岛的具体合并步骤为:

第一,根据支路量测形成潮流岛,建立初始的边际节点注入量测雅可比矩阵及其索引表。

第二,根据规则一,在索引表中搜索是否存在度 1 的注入量测,如存在则合并度 1 注入量测所关联的两个超节点(量测岛),再重新计算各个量测的度,此过程要循环进行,直到不存在度 1 的注入量测为止。

第三,依据规则二,在索引表中搜索度 2 的注入量测,循环检测是否存在有 2 个度 2 的注入量测,且与他们直接相关联的超节点数仅为 3。如存在则将这 3 个超节点合并,再转到步骤 2;如果不存在则转到步骤 4。

第四,依据规则三,在索引表和雅可比矩阵中循环搜索,是否存在有 n ($n=3, 4, 5, L$) 个注入量测,且与他们直接相关联的超节点数仅为 $n+1$ 。如存在则将这 $n+1$ 个超节点合并,再转到步骤 2;如果不存在则转到步骤 5。

第五,计算降阶网络雅可比矩阵 W_c 的阶,如有 $\text{rank}(W_c) = \text{num_supemodes} - 1$,则全网可观测;否则不可观测,则在边际节点上添加伪量测或者虚拟量测,以恢复系统的可观测性(num_supemodes 指网络超节点数量)。

在程序设计时,边际注入量测度的索引表采用动态链表存储结构,降阶雅可比矩阵采用双链表存储结构,再加以灵活的编程技巧,简化了合并量测岛的循环判断过程。

3 算例分析

电力系统的状态量通常取为各结点的复电压,当它用极坐标表示时,为系统中所有节点电压幅值和相角。电力系统的量测量一般是结点或支路的有

功、无功功率量测和电压幅值量测。当电力系统状态估计采用快速解耦算法时,可观测性分析问题也分解成有功-相角、无功-电压幅值两个子问题。在每一子问题中,状态变量的个数均为系统节点数,只不过参考节点的状态变量是已知量。

为验证本文所提出的基于降阶网络雅可比矩阵的可观测性分析方法,在 IEEE14 和电科院 EPR I (China) 36-Bus System 系统上进行了测试。测试系统的量测配置信息如表 1 所示。表 2 和表 3 分别给出了 IEEE14 和 EPR I(China) 36-Bus System 系统在两种方法下每一步循环过程当中未知变量的数量。

表 1 测试系统及测量配置信息

Tab 1 Configuration of test system and measurements

系统	IEEE14	EPR B6-Bus System
节点数	14	36
支路数	17	45
电压量测数	3	5
有功注入量测数	8	17
无功注入量测数	8	17
有功支路量测数	12	31
无功支路量测数	12	31

表 2 IEEE14 系统测试结果

Tab 2 Test results of IEEE14 system

循环次数	1	2	3	4
节点分裂方法	19	13	8	5
本文简化方法	9	6	4	3

表 3 EPR B6-bus System 系统测试结果

Tab 3 Test results of EPR B6-bus system

循环次数	1	2	3
节点分裂方法	23	12	4
本文简化方法	5	3	1

本文由于用潮流岛的状态变量代替岛内所有节点的状态变量,大大减少了循环过程中未知状态变量的个数,从而大大简化了合并循环判断过程,便于程序设计。而在程序设计方面,注入量测度索引表和降阶雅可比矩阵数据结构采用动态存储方式,合并量测岛就更加方便。

4 结论

本文所提出的基于降阶网络雅可比矩阵的可观测性分析方法,属于拓扑数值混合法,推导思路简洁,编写程序简单,计算速度快。而且本文所提出的方法在系统不可观测的时候,添加伪量测方便。按

照本文算法所编制的可观测性分析程序在 IEEE14 节点典型系统、EPR I(China) 36 - Bus Test System 和 New England 39 - Bus System 中的运行结果表明, 本文所提出的可观测性分析方法是正确且有效的。

参考文献:

- [1] 李碧君, 薛禹胜, 顾锦汶, 等. 电力系统状态估计问题的研究现状和展望 [J]. 电力系统自动化, 1998, 22 (11): 57-58
LI Bi-jun, XUE Yu-sheng, GU Jin-wen, et al Status and Prospect of Power System State Estimation [J]. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22 (11): 57-58
- [2] 邓佑满, 张伯明. 网络可观测性的拓扑分析 [J]. 清华大学学报 (自然科学版), 1993, 4 (2): 8-13.
DENG You-man, ZHANG Bo-ming Network Observability Topological Analysis [J]. Journal of Tsinghua University, Natural Science, 1993, 4 (2): 8-13.
- [3] Mori H, Tsuzuki S A Fast Method for Topological Observability Analysis Using a Minimum Spanning Tree Technique [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1991, 6 (2): 491-500.
- [4] Gou B, Abur A A Direct Numerical Method for Observability Analysis [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15 (2): 625-630.
- [5] CHEN Rong-liang A Fast Integer Algorithm for Observability Analysis Using Network Topology [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1990, 5 (3): 1001-1008.
- [6] Korres GN, Katsikas PJ Numerical Observability Analysis Based on Network Graph Theory [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18 (3): 1035-1045.
- [7] Concaxies G C, Korres GN. A Reduced Model for Power System Observability Analysis and Restoration [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1988, 3 (4): 1411-1417.
- [8] 汤振飞, 单渊达. 线性相关环及其在电力系统可观测性分析中的应用 [J]. 电力系统自动化, 1999, 23 (4): 35-38
TANG Zhen-fei, SHAN Yuan-da Associated Linear Loop and Its Application to Power System Observability Analysis [J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23 (4): 35-38
- [9] 张伯明. 电力系统状态估计可观测性分析中关于量测岛合并的理论分析 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23 (2): 16-19.
ZHANG Bo-ming Theory Analysis about Measurement Islands Combination in Observability Analysis in Power System State Estimation [J]. Proceeding of the CSEE, 2003, 23 (2): 16-19.
- [10] 张海波, 张伯明, 孙宏斌, 等. 基于潮流定解条件的电力系统状态估计可观测性分析 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23 (3): 54-58
ZHANG Hai-bo, ZHANG Bo-ming, SUN Hong-bin, et al Observability Analysis of Power System State Estimation Based on the Solvability Condition of Power Flow [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23 (3): 54-58

收稿日期: 2004-09-15; 修回日期: 2005-01-03

作者简介:

王珍意 (1980 -), 男, 硕士研究生, 从事电力系统状态估计的研究工作; E-mail: adm in hust@163. com

周良松 (1967 -), 男, 博士, 副教授, 从事电力系统安全稳定控制的研究开发和教学工作;

张步涵 (1950 -), 男, 教授, 从事电力系统分析方向的研究。

Observability analysis of power system state estimation based on reduced Jacobian matrix

WANG Zhen-yi, ZHOU Liang-song, ZHANG Bu-han

(College of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: A new observability analysis algorithm for power system state estimation based on reduced network Jacobian matrix is proposed. Based on the fact that there is not more than one unknown complex voltage in a flow island, this method puts forward the idea of state variable of flow island, and realizes combining flow islands successfully according to the reduced Jacobian matrix. It reduces the amount of unknown variables and simplifies the recycling process of judgement, and it is easy to be programmed. Its effectiveness is proved with examples.

Key words: state estimation; observability analysis; flow islands; reduced network Jacobian matrix