

辨识网络拓扑错误的最小绝对值状态估计

吴振华, 王克文

(郑州大学电气工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 采用最小绝对值状态估计算法辨识网络拓扑错误。在传统的最小二乘法状态估计模型中引进扩展变量和量测量, 构成最小绝对值状态估计问题, 进而转化为线性规划的标准形式求解。在一实际测验系统上进行了试算。

关键词: 最小绝对值估计器; 网络拓扑错误; 最小二乘法; 电力系统状态估计; 线性规划

State estimation using the least absolute value approach for topology error identification

WU Zhen-hua, WANG Ke-wen

(School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The least absolute value state estimation algorithm is employed in this paper to identify the network topology errors. Extended variables and measurements are introduced into the conventional state estimation model of least square method, which composes a least absolute value state estimation problem. Correspondingly, the problem can be solved through the linear programming model. The proposed least absolute value state estimation algorithm is tested on an actual testing system.

Key words: least absolute value estimator; network topology error; least square method; power system state estimation; linear programming

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)04-0029-03

0 引言

正确的网络拓扑结构对于状态估计的运行是十分重要的。由于能量管理系统(EMS)采集的开关遥信量会出现错误, 将影响状态估计结果的正确性, 甚至使得程序计算不能收敛。这是状态估计研究和应用中的一个难题。迄今为止, 国内外学者在电力系统网络拓扑检错方面提出了许多方法, 例如: 拓扑处理器^[1,2]、最小信息损失(MIL)拓扑检错法^[3]、新息图法^[4]等。拓扑处理器是以树形搜索算法为基础来检测拓扑错误; MIL拓扑检错法是将最小信息损失(MIL)状态估计理论应用到拓扑错误辨识中, 具有严格的数学基础; 新息图法采用测量值与预报值的差作为新息量, 从而得到扩展新息向量和估计潮流。如果某条线路扩展新息向量元素的绝对值最大而且潮流估计的绝对值最小, 则表明这条线路存在拓扑错误。对于辐射网, 文献[5]通过分析开关两侧相关量测量来确定相应的拓扑结构, 判断开关的状态。

该文将最小绝对值法引入状态估计中确定网络中可疑元件的状态, 通过对电力系统状态估计传统算式中的状态变量和雅可比矩阵进行扩展得到了一

种解决拓扑错误的方法。所建模型转化为线性规划问题(LP)求解。

1 状态估计中网络拓扑辨识的描述

在状态估计中, 量测量可以表达为:

$$z = h_0(x) + \varepsilon \quad (1)$$

式中: z 是 m 维量测向量; x 是 n 维状态向量; ε 是 m 维量测误差向量; h_0 是 m 维非线性测量函数向量。在传统的状态估计中, 仅需计算变量 x 的估计值, 而在考虑网络拓扑辨识时, 还需计及网络参数对 h_0 的影响。

电力网络中, 当且仅当任意两节点 i, j 间存在实际的联系(例如传输线或变压器)时, 它们之间的导纳 y_{ij} 被视为非零的复参数。在较大的网络系统中, 只有一少部分节点间存在实际联系, 所以大部分导纳 y_{ij} 的值为零。因此, 网络中的导纳矩阵是一个稀疏矩阵。在状态估计中, 拓扑错误可以表现为导纳矩阵元素值的错误。

引入实参数 a_{ij} , 在节点 i, j 之间的有效支路导纳可以写为 $a_{ij} \times y_{ij}$ 。其中 a_{ij} 的初值选取如下:

(1) $a_{ij} = 1$, 在给定的运行条件下, 节点 i, j 之间必有联系;

(2) $a_{ij} = 0$, 在给定的运行条件下, 节点 i, j 之间必不存在任何联系;

(3) $a_{ij} = 0.5$, 节点 i, j 之间的联接状态不确定。

2 最小绝对值算式

在最小绝对值 (LVA) 中, 电力系统状态估计问题的量测模型为:

$$\min \|r\|_1 \quad (2)$$

$$\text{s.t. } r = Rz - h(x, a) \quad (3)$$

$$a_i = 0 \text{ or } 1 \quad \forall i = 1, \dots, p \quad (4)$$

其中: m 维量测向量 z 由支路功率、节点注入功率和电压幅值量测值构成; n 维状态向量 x 由电压的实部、虚部构成; R 是 m 维可信度权重对角阵; a 是 p 维参数向量, 表示支路的状态; r 是 m 维的量测误差向量; h 是 m 维量测函数, 计及了支路状态 a 的影响。

(1) 节点电压:

$$\dot{V}_i = e_i + jf_i \quad (5)$$

式中: 取直角坐标形式。

(2) 节点注入功率:

$$P_i = \sum_{j=1}^N a_{ij} (G_{ij} e_i e_j - B_{ij} e_i f_j + B_{ij} e_j f_i + G_{ij} f_i f_j) \quad (6a)$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^N a_{ij} (-B_{ij} e_i e_j - G_{ij} e_i f_j + G_{ij} e_j f_i - B_{ij} f_i f_j) \quad (6b)$$

(3) 线路潮流

$$P_{ij} = a_{ij} [(e_i^2 + f_i^2)g - (e_i e_j + f_i f_j)g + (e_i f_j - e_j f_i)b] \quad (7a)$$

$$Q_{ij} = a_{ij} [-(e_i^2 + f_i^2)b + (e_i f_j - e_j f_i)g + (e_i e_j + f_i f_j)b] - (e_i^2 + f_i^2)y_c \quad (7b)$$

(4) 变压器支路潮流 (非标准变比在 j 侧)

$$P_{ij} = a_{ij} [(e_i^2 + f_i^2)g - (e_i e_j + f_i f_j)g/k + (e_i f_j - e_j f_i)b/k] \quad (8a)$$

$$Q_{ij} = a_{ij} [-(e_i^2 + f_i^2)b + (e_i f_j - e_j f_i)g/k + (e_i e_j + f_i f_j)b/k] - (e_i^2 + f_i^2)y_c \quad (8b)$$

尽管式 (2)、(3) 是一个非线性的规划问题, 可以转化为线性规划问题。为了考虑量测模型中的约束 (4), 引进以下额外的约束:

$$a + u = z_0 \quad (9)$$

$$a + v = z_1 \quad (10)$$

其中, z_0 是一个零向量; z_1 是一个全为 1 的列向量。

因此, 扩展的量测向量可以写为 $\tilde{z} = \begin{bmatrix} Rz \\ z_0 \\ z_1 \end{bmatrix}$; 扩展的

$$\text{残差向量为 } \tilde{r} = \begin{bmatrix} r \\ u \\ v \end{bmatrix}。$$

在传统的状态估计中, 变量 x 表示节点电压, 其值可正可负, 但在线性规划求解中要求所有状态变量为正, 所以本文将节点电压扩展为:

$$x_j = x_{1j} - x_{2j} \quad (11)$$

且 $x_{1j}, x_{2j} \geq 0$, 从而状态向量为 $\tilde{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ a \end{bmatrix}$ 。

则线性的 LAV 问题可以写成

$$\min \|\tilde{H}\Delta\tilde{x} - \Delta\tilde{z}\| \quad (12)$$

其中: $\Delta\tilde{z}$ 是 $(m+2p)$ 维残差向量; $\Delta\tilde{x}$ 是 $(2n+p)$ 维对扩展状态向量的修正量; \tilde{H} 是 $(m+2p) \times (2n+p)$ 雅可比矩阵, 其结构是:

$$\tilde{H} = \begin{bmatrix} H & -H & A \\ 0 & 0 & I \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix} \quad (13)$$

其中: $H = \partial h / \partial x, A = \partial h / \partial a, I$ 为单位阵。

在文献[6]中求解 LAV 问题的线性规划目标函数等效为 $\min e^T \rho$ 。然而试算表明, 目标函数中缺乏对电压的约束易引起在计算过程中电压修正量过大, 从而引起收敛性问题。因此, 本文将 LAV 状态估计描述为如下的线性规划问题:

$$\min \left(\sum_{i=1}^n \Delta x_{1i} + \sum_{i=1}^n \Delta x_{2i} + \sum_{i=1}^p \rho_i \right) \quad (14)$$

$$\text{s.t. } [\tilde{H} \quad I] \begin{bmatrix} \Delta\tilde{x} \\ \rho \end{bmatrix} = [\Delta\tilde{z}] \quad (15)$$

$$\Delta\tilde{x}, \rho \geq 0$$

其中: ρ 为人工变量, 用于在式(15)左侧的函数矩阵中引入单位阵, 构成初始基础可行解。然后按单纯形方法进行求解。

在求得最优解 $\Delta\tilde{x}$ 后, 修正 \tilde{x} , 完成一次迭代。继续迭代, 通过一系列的线性规划求解, 逼近原始非线性问题的最终解。

3 算例分析

该方法通过引入参数 a 来判断某支路是否有拓扑错误, 然而, a 的确定则是通过线性规划算法对

系统进行最小绝对值估计, 求解出 a 的值进而得知该支路的状态。

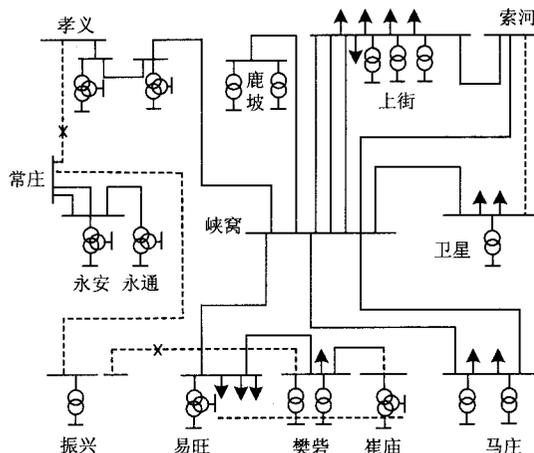


图 1 110 kV 系统 I

Fig.1 The 110 kV power system I

表 2 支路量估计结果

Tab.2 Estimate result of branch powers

	P_{ij}		Q_{ij}	
	量测值	估计值	量测值	估计值
常振线	13.178 9	11.318 8	-2.233 7	-3.201 8
樊崔线	-3.459 60	-2.195 1	0.837 0	1.758 5
I 常永线	0.000 0	-0.000 1	0.000 0	-0.437 0
II 常永线	35.544 6	29.012 9	27.509 4	26.479 31

表 3 110 kV 系统中 a 的估计值

Tab.3 Estimated values of a for the 110 kV power system

未测量 线路	实际 状态	a 的估计值	
		LAV	Least Squares
常孝线	out	0.006	0.506
常振线	in	0.995	0.495
振樊线	out	0.001	0.501
樊崔线	in	0.999	0.499
I 常永线	in	0.990	0.500
II 常永线	in	0.006	0.506

表 4 CPU 时间

Tab.4 CPU time

	LAV	Least Squares
CPU 时间	0.69 s	0.77 s

图 1 为试算系统, 该系统在本文所用的当前系统运行方式下, 共得 3 个子系统, 仅第 1 个子系统代表该系统主运行方式。第 1 个子系统含有 30 个节点, 4 台三绕组变压器, 2 台双绕组变压器, 5 台电容器组。第 3 个子系统含有 3 个节点, 1 台双绕组变压器, 1 台电容器组。

在第 1 个子系统中, 表 2 给出了最小绝对值法

状态估计的估计结果, 并与量测值相比较。并且对 110 kV 系统中的六条可疑测量线路进行状态估计, 取 a 初值为 0.5。表 3 给出了两种方法求解参数 a , 一种是传统的最小二乘法 (Least Squares), 另一种就是本文介绍的最小绝对值法 (LAV), 我们对这两种方法进行比较。传统的最小二乘法求得 a 的值等于 (或者接近于) 0.5, 并不能清楚的判断线路的状态。然而, LAV 方法求解参数 a 的值等于 (或者接近于) 0 或 1, 因此得出常孝线、振樊线的 a 值接近于 0, 进而可以判断它们的实际状态为断开; 而其它四条线路的 a 值都接近于 1, 判断它们的实际状态为闭合。表 4 给出了主频 2.6G 的 PC 上, LAV 算法的计算耗时 0.69 s, 最小二乘法的计算耗时 0.77 s。

4 结论

本文对 110 kV 的系统进行状态估计, 在传统的状态估计问题中引进额外变量和额外量测量, 采用了最小绝对值法来避免网络的拓扑错误。该方法通过求解参数 a , 可以判断哪条线路发生了拓扑错误, 同时剔除了错误量测对确定拓扑结构的影响。算例分析表明了这种方法计算速度快, 是比较实用的方法。

参考文献

- [1] DyLiacco T E, Ramarao K A, Weiner A W. Network Status Analysis for Real Time Systems[A].In:PICA Conference Proceedings [C].1973. 356-362.
- [2] Sasson A M, Ehrman, S T, Lynch P, et al. Automatic Power System Network Topology Determination[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1973, 92: 610-618.
- [3] 孙宏斌, 高峰, 张伯明, 等. 最小信息损失状态估计在拓扑错误辨识中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(18): 1-5.
SUN Hong-bin, GAO Feng, ZHANG Bo-ming, et al. Application of Minimum Information Loss Based State Estimation to Topology Error Identification[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(18): 1-5.
- [4] 周苏荃, 柳焯. 新息图法拓扑错误辨识[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(4): 23-27.
ZHOU Su-quan, LIU Zhuo. An Innovation Graph Approach to Topology Error Identification[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(4): 23-27.
- [5] 阮作伟, 李响. 电力网络拓扑错误辨识的一种新方法[J]. 东北电力技术, 2004, 1(3): 11-13.

(下转第 35 页 continued on page 35)

4 结束语

试验中发现装置自身存在的问题是: 装置本身没有自检后的正常/故障信号输出, 另外没有投入后的反馈信号输出。这两个问题不会影响装置的正常调节工作。

经试验证明, 该厂 2 号机组自动电压调节装置 (AVC) 在闭环条件能够正确接收主站下发的调节命令, 在规定时间内提出调节策略并能正确对励磁系统进行增、减磁调节。目前, 该系统正在进行厂内闭环运行, 在中调正式分配网段地址后, 可以根据电网调度的要求投入运行。

表 3 实际调整试验数据

Tab.3 The real value for voltage regulate test

电压指令	有功/MW	无功/Mvar	机端电压/kV	定子电流/A	厂用电 1/kV	厂用电 2/kV	母线电压/kV
245 (上升 0.5 kV)	调节前后	调节前后	调节前后	调节前后	调节前后	调节前后	调节前后
	357	52	20.448	10 332	6.067	6.212	526.92
135 (下降 0.5 kV)	调节前后	调节前后	调节前后	调节前后	调节前后	调节前后	调节前后
	357	63	20.459	10 336	6.101	6.234	527.40
239 (上升 0.9 kV)	调节前后	调节前后	调节前后	调节前后	调节前后	调节前后	调节前后
	357	61	20.432	10 356	6.098	6.189	527.15
139 (下降 0.9 kV)	调节前后	调节前后	调节前后	调节前后	调节前后	调节前后	调节前后
	357	50	20.322	10 364	6.063	6.154	526.66
239 (上升 0.9 kV)	调节前后	调节前后	调节前后	调节前后	调节前后	调节前后	调节前后
	358	45	20.336	10 435	6.056	6.156	526.46
139 (下降 0.9 kV)	调节前后	调节前后	调节前后	调节前后	调节前后	调节前后	调节前后
	357	68	20.563	10 445	6.112	6.243	527.30
139 (下降 0.9 kV)	调节前后	调节前后	调节前后	调节前后	调节前后	调节前后	调节前后
	358	69	20.455	10 321	6.114	6.241	527.81
139 (下降 0.9 kV)	调节前后	调节前后	调节前后	调节前后	调节前后	调节前后	调节前后
	358	43	20.232	10 342	6.055	6.165	526.87

参考文献

- [1] 郭庆来, 孙宏斌, 张伯明, 等. 自动电压控制系统的公共信息模型扩展[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(21): 11-15.
GUO Qing-lai, SUN Hong-bin, ZHANG Bo-ming, et al. Extension of Common Information Model for Automatic Voltage Control System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(21): 11-15.
- [2] 孙阳盛, 郁惟镛, 倪向萍. 改进的变尺度法在自动电压控制 (AVC) 中的应用[J]. 继电器, 2004, 32(6): 27-30.
SUN Yang-sheng, YU Wei-yong, NI Xiang-ping. Application of Modified DFP in the Automatic Voltage Control (AVC)[J]. Relay, 2004, 32(6): 27-30.
- [3] 林晓春. 电网自动电压控制系统在地县级调度的应用

和实现[J]. 自动化技术与应用, 2007, 26(11): 108-109, 104.

LIN Xiao-chun. Voltage Control in the County Level Dispatch[J]. Techniques of Automation and Applications, 2007, 26(11): 108-109, 104.

收稿日期: 2008-04-18; 修回日期: 2008-05-30

作者简介:

唐建惠 (1970-), 女, 高级工程师, 主要从事电力系统自动化方面的研究工作; E-mail: zhang3@dys.hbpc.com.cn

张立港 (1974-), 男, 工程师, 从事继电保护方面的研究工作;

赵晓亮 (1976-), 男, 工程师, 从事继电保护方面的研究工作。

(上接第 31 页 continued from page 31)

- RUAN Zuo-wei, LI Xiang. A New Method of Identifying Power Network Topology Error[J]. Northeast Electric Power Technology, 2004, 1(3): 11-13.
- [6] Singh H, Alvarado F L. Network Topology Determination Using Least Absolute Value State Estimation[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1995, 10(3).

收稿日期: 2008-04-07

作者简介:

吴振华 (1982-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统状态估计; E-mail: wuzhenhua266@yahoo.com.cn

王克文 (1964-), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统稳定性分析与控制。