

一种基于等效模型电网动态过程状态估计方法

赵亮^{1,2}, 钱玉春², 顾全³, 陈根军³

(1. 华北电力大学, 河北 保定 071003; 2. 唐山供电公司, 河北 唐山 063000;
3. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211100)

摘要: 提出了一种电网动态过程状态估计算法, 利用快速、带时标的 PMU 量测估计电网扰动后的动态过程。该算法以扰动前的静态状态估计结果作为初始断面, 对 PMU 量测不可观测区域的电网模型进行等效处理, 在有限的 PMU 量测条件下可获得电网扰动后动态过程中的连续断面。动态过程状态估计的信息矩阵一次形成后保持恒定, 可对连续的 PMU 量测断面进行计算, 满足电网动态过程实时监视和控制的需要。对七节点系统支路故障后的扰动过程进行动态状态估计, 验证了所提算法的可行性。

关键词: 相量测量单元; 动态状态估计; 动态过程估计; 等效模型; 扰动

State estimation of dynamic process based on equivalent model

ZHAO Liang^{1,2}, QIAN Yu-chun², GU Quan³, CHEN Gen-jun³

(1. North China Electric Power University, Baoding 071003, China; 2. Tangshan Power Supply Company, Tangshan 063000, China; 3. Nanjing Nari-relays Electric CO., LTD, Nanjing 211100, China)

Abstract: This paper proposes a new algorithm of state estimation to get the dynamic process of power grid after disturbance using fast, time-scale PMU measurements. The algorithm uses the results of traditional state estimation before disturbance as the initial state. The unobservable network for PMU measurements is equivalent. Once PMU measurements for generators are obtained, the varied dynamic process of power grid can be estimated. In the algorithm, the gain matrix is kept constant and factorized only once, which is favorable for dispatchers to monitor dynamic process of disturbed power systems. The proposed algorithm has been tested on a 7-bus system with a branch fault and the feasibility of the algorithm is demonstrated.

Key words: phase measurement unit (PMU); dynamic state estimation; dynamic process estimation; equivalent model; disturbance

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)11-0010-05

0 引言

广域测量系统(Wide Area Measurement System, WAMS)是以同步相量测量技术为基础,以电力系统动态过程监测、分析和控制为目标的实时监控。美国NYPA(New York Power Authority)于1992年开始装设相量测量装置,除了用于相量测量外,还用于系统谐波监测、扰动监测。已经证实广域电网监测技术对电力系统的事故分析、低频振荡监测与报警、完善仿真软件有着重要作用,但目前主要用在系统正常监视及事故分析上,用于电力系统稳定控制分析还任重道远^[1-4]。

国内WAMS系统曾多次记录到了电网出现的各种扰动,使分析人员不仅看到了在此过程中整个电网的动态变化情况,而且可直接看到系统各厂站的功角变化情况,为电网的稳定运行提供了有力的支

持,也为事后的稳定分析提供了极为宝贵的现场记录数据。

虽然PMU的覆盖面已大大增加,但是应用PMU信息进行电网在线动态分析尚处于研究阶段,还没有实现真正的应用功能,而对电网的动态变化过程进行状态估计是在线动态分析的前提和基础。

1 应用PMU信息进行状态估计的现状

由于经济和技术等原因,目前还不可能在系统的所有节点均装设PMU,而且PMU数据尽管时标准确,但其功率、电压量测不会超过表计的测量精度,因此仍然需要状态估计。普遍做法是把PMU测量值与SCADA测量值构成混合量测一起用于状态估计^[5-8],从而提高网络的可观性 & 状态估计精度,弥补传统状态估计的不足。

上述是PMU量测在电网静态状态估计中的应

用, 而通常所说的动态状态估计是基于电网静态条件下对未来时刻的状态预测。动态状态估计的主要算法是 EKF 算法^[9-12], 实际应用时, 其预测精度还有待提高, 而把 PMU 信息应用于电网动态过程估计则鲜有报道。将 PMU 测量值与 SCADA 测量值构成的混合量测一起用于静态条件下的电网状态估计, 并没有充分发挥 PMU 数据快速和带时标特点, 由于大部分量测仍然是 SCADA 原有的没有时标的量测, 状态估计不能提供电网扰动过程中的状态, 因而不能实现电网的动态监视和分析。

在电网扰动条件下, 系统处于不断变化的过程中, 量测的同时性不可忽视, 传统状态估计的结果不再可用, 需要研究新的状态估计方法。

2 扰动条件下的电网等效模型

在电网发生扰动后的一段时间内, 常规量测无法正确反映电网运行状态, 而 PMU 量测虽可获得电压、功率在扰动过程中的连续变化过程, 但由于布点不多, 不能满足全网可观测的要求。本文以电网扰动发生前的负荷断面为基础, 引入负荷及发电机模型, 扰动过程中依靠有限的 PMU 量测对电网状态进行计算, 并跟踪 PMU 量测变化, 提供电网连续断面, 解决扰动条件下的电网状态监视问题。

PMU 可以采集发电机的功率、电流、频率及功角, 功角 δ 在电力系统稳定问题研究中占有特别重要的位置, 它除了表示发电机电势 \dot{E}_q 和系统电压 \dot{U} 之间的相位角外, 还表明了各发电机转子之间的相对运动空间位置。

发电机电势和机端电压关系可以表示为:

$$\dot{E}_q = \dot{U} + (r + jx_q)\dot{I} \quad (1)$$

其中: \dot{E}_q 为发电机内电势; \dot{U} 为发电机端电压; r 为发电机内电阻; x_q 为发电机暂态电抗; \dot{I} 为发电机电流向量。



图 1 单发电机接线

Fig.1 Diagram of a single generator

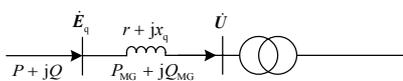


图 2 单发电机等效模型

Fig.2 Equivalent model diagram of a single generator

如图 1 的单发电机接线中, 发电机机端安装了 PMU 量测。在扰动过程中, 该发电机可以等效为图 2 所示模型, 其中发电机机端功率量测 ($P_{MG} + jQ_{MG}$) 表示为发电机内阻抗支路量测。

由图 2 可见, 等效模型相当于在电路上增加了一个虚拟的发电机内节点, 虚拟发电机节点电压就等于发电机内电势, 虚拟发电机节点电压和发电机端电压的相位角就等于发电机的功角。

对扰动前的电网进行静态状态估计, 可以得到扰动前电网各节点的电压幅值和角度, 以及各个节点的负荷大小和发电机出力。在电网扰动过程中, 可以建立各个节点负荷模型和发电机模型。本文假设发电机的暂态电势 \dot{E}_q 不变, 电网负荷水平不发生大的变化, 并引入恒阻抗模型, 这样就可以得到扰动条件下的电网等效模型。

3 电网动态过程估计

按照上述扰动条件下的电网模型等效方法, 图 3 的五节点系统可以等效为图 4 的七节点系统, 其中, 原有的五个节点都有有功和无功零注入伪量测, 两个扩展的发电机节点包含电压幅值量测。等效电网在没有任何量测条件下可以列出五个有功量测方程, 而需要求解六个节点电压角度 (其中一个节点为参考节点), 显然该网络不可观测。但是如果已知一个发电机的有功出力, 就可以列出第六个量测方程, 例如: 节点 1 的发电机有 PMU 量测, 则有:

$$P_{MG1} = f(\theta_6, \theta_1) \quad (2)$$

式中: P_{MG1} 为发电机 PMU 有功量测; $f(\theta_6, \theta_1)$ 为节点 6 和节点 1 电压角度函数。

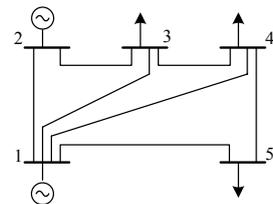


图 3 五节点系统

Fig.3 Schematic diagram for a five-bus system

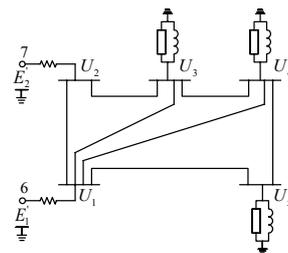


图 4 五节点系统等效模型

Fig.4 Equivalent model diagram for a five-bus system

这样就可以求得各个节点的电压角度。对于无功电压量测方程,共有七个母线节点电压幅值待求,除了可以列出的原来五个节点无功零注入伪量测方程,还有两个发电机暂态电势恒定的电压量测方程,可见等效电网节点电压幅值方程正好可解。

通过以上分析,图4等效电网模型中只要已知一台发电机的有功出力就可以求得各个节点电压幅值和角度,这个结论和潮流计算的要求一致。由于等效模型中两个虚拟发电机节点电压已知,相当于一个PV节点,一个平衡节点,也就是说,对于 n_G 个发电机节点的电网,至少需要知道 $n_G - 1$ 个发电机的有功功率,电网才是可观测的。

虽然对于潮流计算而言,等效系统的发电机有功功率是必须的,但是对于状态估计而言,其它类型的量测也可以代替。例如:支路34一端有功无功量测,就可以在量测方程中分别增加有功无功量测方程:

$$P_{M34} = f(\theta_3, \theta_4) \quad (3)$$

式中: P_{M34} 为支路34有功PMU量测; $f(\theta_3, \theta_4)$ 为节点3、4的电压角度函数。

$$Q_{M34} = g(U_3, U_4) \quad (4)$$

式中: Q_{M34} 为支路无功PMU量测; $g(U_3, U_4)$ 为母线3、4的电压幅值函数。

由于有功和无功量测方程都增加了一维,该等效系统是可观测的,可以计算出电网的完整状态。

对于发电机功角和母线相角量测,也可以列出相关的有功量测方程:

$$\begin{cases} \theta_{Mi} = \theta_i \\ \delta_{MG1} = \theta_7 - \theta_2 \\ \delta_{MG2} = \theta_6 - \theta_1 \end{cases} \quad (5)$$

式中: θ_{Mi} 为母线相角量测; θ_i 为母线待求电压相角, $i = 1 \sim 5$; δ_{MG1} 和 δ_{MG2} 为发电机功角量测; θ_7 和 θ_6 为新增虚拟发电机节点待求相角。

根据最小二乘原理可以确定有功无功目标函数为:

$$\min J_p(\theta) = \sum_{i=1}^{m_p} \left[\frac{z_{pi} - f(\theta)}{\sigma_i} \right]^2 = [z_p - f(\theta)]^T R_p^{-1} [z_p - f(\theta)] \quad (6)$$

$$\min J_q(U) = \sum_{i=1}^{m_q} \left[\frac{z_{qi} - g(U)}{\sigma_i} \right]^2 = [z_q - g(U)]^T R_q^{-1} [z_q - g(U)] \quad (7)$$

对于量测矢量 z_p 、 z_q , 状态估计状态矢量 θ 、 U 是使目标函数 $J_p(\theta)$ 和 $J_q(\theta)$ 为最小的值。式(7)、式(8)线性化处理,有功无功量测修正方

程分别为:

$$\Delta z_p = H_p \Delta \theta \quad (8)$$

$$\Delta z_q = H_q \Delta U \quad (9)$$

式中: H 矩阵为有功量测方程和无功量测方程的 $m_p \times (n + n_G)$ 及 $m_q \times (n + n_G)$ 维雅可比矩阵; n_G 为系统中发电机数; m_p 和 m_q 分别为有功无功量测方程数。从而得到PQ解耦的基本加权最小二乘状态估计迭代修正公式:

$$\Delta \theta = [H_p^T R_p^{-1} H_p]^{-1} H_p^T R_p^{-1} \Delta z_p \quad (10)$$

$$\Delta U = [H_q^T R_q^{-1} H_q]^{-1} H_q^T R_q^{-1} \Delta z_q \quad (11)$$

其中: $H_p^T R_p^{-1} H_p$ 和 $H_q^T R_q^{-1} H_q$ 都是 $(n + n_G) \times (n + n_G)$ 维量测增益矩阵即信息矩阵。

按照以上列出的等效网络基本量测方程和PMU量测方程,在整个电网扰动时段内,只要没有新的扰动发生,量测方程维数是固定的,一次性形成信息矩阵后,代入PMU断面量测进行迭代计算,可以获得电网连续的动态过程数据断面。

4 仿真算例

为了验证本文算法的可行性,选择了如图5所示的七节点模型算例,图中显示为基态潮流和电压值,潮流有功单位为MW,无功单位为MVar,电压单位为kV。

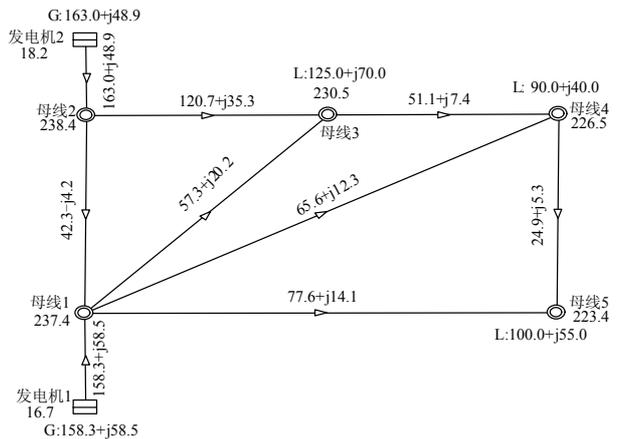


图5 七节点测试系统

Fig.5 Diagram for a 7-bus test system

使用BPA仿真软件对支路13三相短路故障进行仿真,假设第10周波故障,第15周波故障切除,获得的部分仿真结果如表1所示,其中有功功率单位均为MW,无功功率单位为MVar。

利用基态潮流对电网进行等效处理,获得负荷

阻抗模型和发电机虚拟支路模型, 假设只有发电机装设有功无功 PMU 量测, 应用本文的动态过程估计方法, 一次性形成雅可比矩阵, 分别把 35 周波、55 周波、115 周波、175 周波和 235 周波的发电机仿真结果作为量测代入迭代计算, 得到表 1 中的估计值。通过和仿真结果支路潮流的对比发现, 估计结果和仿真结果基本一致, 表明本文的算法是有效可行的。同时也发现, 第 235 周波的支路 23 的估计结果和仿真结果差异较大, 且迭代次数比 175 周波多 3 次。对 235 周波增加节点 1 和节点 2 的电压仿真结果作为 PMU 量测参加动态过程估计, 发现迭代次数减少

3 次, 估计结果如表 1 中含电压估计列, 可见估计结果得到了明显改善。通过分析发现, 其原因在于 BPA 仿真的发电机暂态电势并非恒定, 引入母线电压 PMU 量测可有效考虑发电机励磁效应, 获得更为准确的电网状态。

对测试系统的故障仿真结果表明, 本文所提出的动态过程估计方法仅利用电厂的 PMU 量测就能获得电网的完整状态, 可有效解决当前 PMU 量测布点较少状况下的电网状态估计问题。当负荷节点安装 PMU 量测时, 就可以直接使用量测进行估计, 而不需要采用负荷模型, 从而提高了结果的准确性。

表 1 仿真结果和动态过程估计值

Tab.1 Simulated and dynamic process state estimation results

发电机功率 或支路潮流	基态功率/ (MW+jMvar)	第 35 周波		第 55 周波		第 115 周波		第 175 周波		第 235 周波		含电压估计
		仿真值	估计值	仿真值	估计值	仿真值	估计值	仿真值	估计值	仿真值	估计值	
G1	158.3+	183.3+	188.3+	95.4+	96.4+	191.8+	193.4+	189.7+	189.9+	177.3+j	165.1+	179.2+
	j58.5	j66.4	j67.8	j58.3	j59.7	j33.9	j34.4	j26.2	j51.2	26.9	j26.2	j27.5
G2	1.6+j	116.1+	121.1+	210.4+	211.3+	140.3+	139.9+	152.1+	152.3+	165.5+	153.3+	167.4+
	48.9	j47.1	j48.6	j65.3	j70.4	j93.2	j93.5	j105.4	j84.1	j104.4	j103.6	j104.5
12	-42.2	17.0+	16.6+	-53.7+	-53.7+	11.7-	12.3-	6.7-	5.1-	-3.5-	-2.9-	-3.8-
	-j3.8	j5.9	j6.3	j12.7	j11.8	j20.9	j21.1	j26.8	j7.5	j24.1	j24.6	j24.1
13	57.3+	0+j0	0+j0	0+j0	0+j0	0+j0	0+j0	0+j0	0+j0	0+j0	0+j0	0+j0
	j20.3											
14	65.6+	81.5+	84.3+	69.9+	70.6+	87.8+	82.4+	89.2+	89.9+	87.7+	80.2+	88.7+
	j12.3	j19.8	j21.1	j20.0	j20.6	j16.5	j16.0	j15.8	j20.0	j16.2	j15.3	j17.1
15	77.6+	85.0+	88.1+	78.9+	79.7+	92.1+	86.4+	94.1+	95.0+	93.3+	85.4+	94.5+
	j14.1	j18.9	j20.3	j18.6	j19.4	j17.6	j17.4	j17.4	j20.0	j17.6	j17.0	j18.7
23	120.7+	133.1+	138.3+	156.4+	157.5+	152.0+	141.8+	158.6+	157.4+	161.9+	148.1+	163.8+
	j35.3	j51.4	j54.1	j53.9	j55.7	j66.4	j63.8	j70.4	j65.6	j70.1	j66.3	j71.9
34	51.1+	17.4-	18.3-	37.9-	38.2-	22.1+	20.5+	24.4+	24.5+	27.4+	25.2+	27.8+
	j7.4	j1.8	j1.7	j4.6	j4.0	j5.7	j6.4	j7.3	j1.3	j6.4	j7.2	j6.7
45	24.9+	12.4+	13.0+	20.1+	20.2+	14.6+	13.6+	15.6+	15.8+	16.7+	15.3+	17.0+
	j5.3	j2.1	j2.4	j1.0	j1.4	j5.1	j5.3	j5.8	j3.5	j5.4	j5.6	j5.7

5 结语

电网在平稳状态下, 常规状态估计方法能够满足实时控制的需要; 当扰动发生后, 由于电网处于变化过程中, 常规量测不能正确反映电网状态, 需要利用 PMU 量测并采用动态过程估计方法对电网进行动态过程估计。本文提出的电网动态过程估计方法, 以扰动前状态估计断面为基础对电网模型进行等效处理, 充分发挥了 PMU 量测优势, 特别是使用了发电机转子角及母线相角量测, 得到电网完整动态过程; 该方法一次性形成信息矩阵, 对连续 PMU

量测断面直接代入迭代计算, 可获得电网扰动过程中的状态断面, 实现电网动态过程状态监视。

参考文献

- [1] Phadke A G. Synchronized phasor measurement in power system[J]. IEEE Compute Applications in Power, 1993, 6(2): 10-15.
- [2] 卢志刚, 郝玉山, 康庆平, 等. 电力系统相角测量和应用[J]. 电力系统自动化, 1997, 21(4): 41-44.
LU Zhi-gang, HAO Yu-shan, KANG Qing-ping, et al. Power system phase angle measurement and application[J]. Automation of Electric Power Systems, 1997, 21(4): 41-44.

[3] 罗建裕, 王小英, 鲁庭瑞, 等. 基于广域测量技术的电网实时动态监测系统应用[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(24): 78-80.
LUO Jian-yu, WANG Xiao-ying, LU Ting-rui, et al. An application of power system real-time dynamic monitoring system based on wide-area measurement[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(24): 78-80.

[4] 许树楷, 谢小荣, 辛耀中. 基于同步相量测量技术的广域测量系统应用现状及发展前景[J]. 电网技术, 2005, 29(2): 44-49.
XU Shu-kai, XIE Xiao-rong, XIN Yao-zhong. Present application situation and development tendency of synchronous phasor measurement technology based wide area measurement system[J]. Power System Technology, 2005, 29(2): 44-49.

[5] Thorp J S, Phadke A G, Karimi K J. Real time voltage-phasor measurements for static state estimation[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1985, 104 (11): 3098-3107.

[6] Slutsker I W, Mokh tari S, Jaques L A et al. Implementation of phasor measurements in state estimator at sevillana de electricidad[C].//Proceedings of IEEE Power Industry Computer Application Conference. Salt Lake City (USA):1995.392-398.

[7] 彭疆南, 孙元章, 王海风. 考虑系统完全可观测性的PMU 最优配置方法[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(4): 10-16.
PENG Jiang-nan, SUN Yuan-zhang, WANG Hai-feng. An optimal PMU placement algorithm for full network observability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(4): 10-16.

[8] 李强, 周京阳, 于尔铿, 等. 基于混合量测的电力系统状态估计混合算法[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(19): 31-35.
LI Qiang, ZHOU Jing-yang, YU Er-keng, et al. A hybrid algorithm for power system state estimation based on PMU measurement and SCADA measurement[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(19): 31-35.

[9] 卫志农, 李阳林, 郑玉平. 基于混合量测的电力系统线性动态状态估计算法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(6): 39-43.
WEI Zhi-nong, LI Yang-lin, ZHENG Yu-ping. A mixed measurement-based linear dynamic state estimation algorithm for power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(6): 39-43.

[10] 刘辉乐, 刘天琪, 黄志华. 基于 Kalman 滤波原理的电力系统动态状态估计的研究综述[J]. 继电器, 2004, 32(20): 62-66.
LIU Hui-le, LIU Tian-qi, HUANG Zhi-hua. Research on dynamic state estimation based on Kalman theory in power system[J]. Relay, 2004, 32(20): 62-66.

[11] 刘辉乐, 刘天琪, 彭锦新. 基于 PMU 的分布式电力系统动态状态估计新算法[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(4): 34-39.
LIU Hui-le, LIU Tian-qi, PENG Jin-xin. New distributed power system dynamic state estimation algorithm based on PMU[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(4): 34-39.

[12] 丁军策, 蔡泽祥, 王克英, 等. 基于广域测量系统的状态估计研究综述 [J]. 电力系统自动化, 2006, 30(7): 98-103.
DING Jun-ce, CAI Ze-xiang, WANG Ke-ying, et al. An overview of state estimation based on wide-area measurement system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(7): 98-103.

收稿日期: 2009-03-31; 修回日期: 2010-05-13

作者简介:

赵亮 (1970-), 男, 硕士, MBA, 在读博士, 高级工程师, 从事供电企业管理工作;

钱玉春 (1974-) 男, 高级工程师, 工程硕士, 多年从事电力系统继电保护及自动化工作;

顾全 (1970-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向: 状态估计、电网安全分析. E-mail: guq@nari-relays.com

(上接第 9 页 continued from page 9)

PAN Chong, CHEN Wei-gen, YUN Yu-xin, et al. Fault diagnosis of power transformers based on genetic algorithm evolving wavelet neural network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(13): 88-92.

[9] 臧小刚, 宫新保, 常成, 等. 一种基于免疫系统的 RBF 网络在线训练方法[J]. 电子学报, 2008, 36(7): 1396-1399.

ZANG Xiao-gang, GONG Xin-bao, CHANG Cheng, et al. An online training RBF network based on immune

system[J]. Acted Electronic Arnica, 2008, 36(7): 1396-1399.

收稿日期: 2009-07-29; 修回日期: 2009-09-03

作者简介:

任静 (1983-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统自动化控制, 电力系统继电保护; E-mail: renjing617@163.com

黄家栋 (1961-), 男, 副教授, 主要研究方向为电力系统自动化控制, 计算机技术在电力系统中的应用。