

电力系统谐波状态估计研究综述

梁志瑞¹, 叶慧强², 赵飞¹

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071003; 2. 丽水莲都供电局, 浙江 丽水 323000)

摘要: 阐述了电力系统谐波状态估计技术的概念和功能, 指出谐波状态估计对于电力系统谐波监测和治理的重要意义。对现有的谐波状态估计算法进行了评述, 探讨了谐波状态估计的可观性问题, 给出了几种现有的可观性分析方法。介绍了谐波状态估计技术的工程应用情况, 展望了谐波状态估计技术的应用前景, 并讨论了该领域尚待解决的问题。

关键词: 谐波状态估计; 可观性分析; 同步相量测量单元

Overview on power system harmonic state estimation

LIANG Zhi-rui¹, YE Hui-qiang², ZHAO Fei¹

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;
2. Lishui Liandu Power Supply Bureau, Lishui 323000, China)

Abstract: The concepts and functions of power system harmonic state estimation are expounded. It is very important to harmonic monitoring and treatment. The existing algorithms of harmonic state estimation are reviewed. The observability problem of harmonic state estimation is studied and the existing observability analysis methods are proposed. The engineering application of harmonic state estimation is illustrated. The application prospect of harmonic state estimation is forecasted and several problems which require further investigation in this area are discussed.

Key words: harmonic state estimation; observability analysis; synchronous phasor measurement unit

中图分类号: TM561 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)15-0157-04

0 引言

随着国民经济和电力工业的发展, 高压直流输电、柔性交流输电和客户电力技术的不断进入工程应用以及电弧炉、调速电动机等非线性负荷的大量增加, 不仅使得电力系统谐波污染问题越来越严重, 而且谐波源也正在迅速由局部地区向整个电网进行扩散。为了构建绿色电网, 及时解决电网谐波治理难题, 达到准确分清谐波责任, 简单有效的治理目的, 必须先明确电力系统中的谐波分布或谐波状态。若系统中的谐波源是已知的, 电力系统中的谐波分布问题即为谐波的扩散分布问题; 若系统中的谐波源是未知的, 但系统中某些点上的谐波量是可以测量的, 则上述问题即为谐波状态估计问题。

电力系统谐波状态估计技术的根本目标在于建立谐波情况下三相电力系统的数学模型, 进而提出一套适合于电力系统谐波状态估计的计算方法, 根据安装在选定母线和线路上的同步谐波量测设备所提供的的数据, 通过所选择的估计器实现对谐波源位

置、类型和注入电流大小的识别, 从而为电力系统谐波的管理和抑制提供依据^[1]。基于全球定位系统(GPS)的同步相量测量单元(PMU)使得全系统范围内的同步相量测量成为了可能。

1 谐波状态估计算法

传统的电力系统状态估计算法和结论都是建立在异步量测和单相模型的基础上, 量测值也为电压和功率, 而谐波状态估计技术则采用了同步量测和三相模型, 量测值也选择了电压和电流相量, 因此电力系统的谐波状态估计问题不能直接套用传统的状态估计方法, 必须根据谐波测量的特点, 重新选择和研究适合于谐波状态估计的新算法。

1989年Heydt首先提出了谐波状态估计问题并给出了一种利用最小方差估计器的谐波源识别算法^[2]。他选用注入视在功率和线路视在功率作量测量, 利用广义逆求解欠定方程组, 从而获得对状态变量的最优估计。但是, 在波形畸变的情况下, 谐波无功功率的定义存在争议且其测量装置没有统一的标

准,因而采用视在功率的方法没有说服力。

文献[3]提出了一种基于最小方差法的谐波源识别和传感器的优化配置算法。它根据母线的负荷水平和对此母线成为谐波源的先验似然估计,决定了量测变量和状态变量(电压或电流)的方差。然后,采用枚举法,逐次计算在谐波传感器不同配置条件下被估计参量的协方差矩阵,通过寻找使协方差矩阵的迹最小的传感器组合方式,获得谐波传感器的最优配置方案并进而获得状态变量的最优估计。由于这种方法估计结果的准确度对人们的经验依赖较大,因此其应用是受许多条件限制的。

文献[4]提出了以谐波电压作为状态变量,电压和电流为量测量的最小二乘谐波状态估计算法,具有一定的普遍性。该算法将所有的母线电压都选为未知的状态变量,利用了大量的冗余量测数据和状态估计器作为噪声滤波器的优点,但是增益矩阵的求逆运算量会大大增加,对于实际应用来讲,它的监控投资将是巨大的。同时,文章还描述了谐波量测系统的基本结构,指出了谐波状态估计需要研究的基本问题。

文献[5-6]提出了电力系统连续谐波的状态估计算法。该算法不仅利用关联矩阵的概念建立起谐波量测量与状态变量的数学模型,而且考虑了电力系统中谐波分布的实际情况,将母线分为非谐波源母线和可能的谐波源母线两类,而可能的谐波源母线又分为测量母线和未测母线两类。通过以上两步的处理,不仅估计算法的计算量大为减少,而且谐波估计方程也由欠定变为超定,估计结果的可信度大为增加。

文献[7]提出了一种基于相量量测的电力系统谐波状态估计算法。文中选择节点电压相量作状态量,以节点电压、支路电流和注入电流相量作量测量,分别建立起不同量测配置方案的量测方程,并在此基础上建立起谐波状态估计问题的数学模型。然后,从分析谐波状态估计问题的特点入手,提出了一种新型的谐波状态估计问题分层算法。该算法通过优化量测方程和母线的节点编号,将整个系统的状态估计问题简化为许多单母线的状态估计问题,大大简化了谐波状态估计问题求解的难度。

文献[8-9]提出在冗余量测和基本量测时,采用便于工程实际应用的乔累斯基算法来求解线性谐波状态方程,其计算量只有高斯消元法的一半,且不用考虑选主元,大大减少了计算时间;在量测矩阵欠定时,则可以通过奇异值分解法(Singular Value Decomposition, SVD)来求解,其计算量比正交变换法和混合法要少得多。采用奇异值分解法,不仅

可以为欠定的状态方程提供可靠和稳定的最小二乘解,而且该算法本身具有可观性分析的功能,极大地简化了谐波状态估计的难度。

文献[10]综合考虑了测量误差和参数误差,提出利用总体最小二乘估计法(TLS)进行电力系统谐波状态估计。作者通过IEEE-14节点系统进行仿真计算,从测量和参数误差的概率分布入手,分析了谐波网络参数误差和测量误差的影响。

Ma和Girgis提出了一种应用卡尔曼滤波器识别和寻找谐波源的新算法^[11],主要用于非平衡三相电力系统中谐波测量仪表的优化配置和谐波源位置及其注入电流大小的最优动态估计。通过将谐波电流分解为实部和虚部两部分,并取其作为状态变量,母线谐波电压和注入谐波电流作为测量量。在测量点的数目一定的情况下,通过对不同测量点分布时的误差协方差矩阵迹的计算,得到最优的测量配置以及谐波电流注入的最优估计,然后根据谐波电流的注入来判定含有谐波源的支路。

文献[12]采用自适应卡尔曼滤波算法进行谐波状态估计。文中选择零矩阵和单位矩阵作为两个假定基本白噪声协方差矩阵 Q ,自适应卡尔曼滤波器可以在两种基本的 Q 阵模型之间转换。当系统处于稳态时,将 Q 置为0;系统处于暂态时,将 Q 置为1;系统是处于稳态还是暂态通过假设检验来确定。滤波器的自适应功能考虑到了卡尔曼增益的重新设定,避免了卡尔曼滤波在稳定状态切换到暂态情况不能快速地跟踪系统变化的分歧问题。

2 谐波状态估计的可观性问题

可观性分析就是在给定的网络拓扑结构和量测配置的前提下,判断利用量测数据确定母线状态的能力和程度。当收集到的量测量通过量测方程能够覆盖所有母线的电压幅值和相角(或电流的幅值和相角)时,则通过状态估计可以得到这些值,称为网络是可观的。谐波状态估计问题的可观性依赖于测量值的性质、数量、位置以及网络的拓扑结构。可观性分析是确定状态估计算法是否可行的重要依据。

在传统状态估计问题中,可观性分析主要沿着数值方法和拓扑方法两条路线发展,谐波状态估计技术现有的可观性算法大都延用了传统状态估计的这些基本算法。然而,量测值性质的变化使得谐波状态估计技术的可观性分析问题与传统状态估计明显不同。

文献[13]介绍了基于矩阵初等变换的数值分析法。该算法的优点就是可以调用状态估计算法的子

程序,在可观性分析的同时得出状态估计的结果,缺点就是比较繁琐,需要太大的计算量。

文献[14]不仅将传统状态估计问题的可观性分析算法应用到谐波状态估计领域,而且还根据量测配置的特点和性质提出了基于相关性理论的量测矩阵搜索算法与基于逻辑判断原理的谐波状态估计可观性分析方法,大大简化了算法的难度。

3 谐波状态估计技术工程应用情况

目前,我国的谐波状态估计技术还并没有用于实践,美国、日本等国家已有关于谐波状态估计技术应用的公开报道。

1992年美国纽约供电局和帝国电能研究公司发起在纽约州高压输电系统中应用相量量测技术部署同步量测网络的系统工程,对谐波进行状态估计^[15]。这项工程共包括150个测量量,其中138个是三相测量量,因而需要46个相量量测。目前,谐波量测系统(HMS)的数据采集系统安装在纽约州的6个地点。每一个HMS设备由一个PMU和一台个人计算机组成。PMU单元包括GPS功能,用以提供精度为1 μs的公共时间基准,每秒采样2 880个点,对于频率为60 Hz系统来说,能使直到20次谐波的相位量测精度都控制在1°以内。主机工作站安装在亚特兰大,它通过拨号电话线同前置计算机系统通信并每隔15 min下载其采集的数据。谐波状态估计的软件部分由可观性分析、加权最小二乘法和质量评估3部分构成。谐波状态估计除了用于监测整个系统的波形畸变情况,还可以用于估计传输线参数和变压器不平衡监测。

2005年,日本Hokuriku Electric Power Company (HEPCO)发表了其谐波状态估计实验及数据^[15]。HEPCO电力系统是一个8母线、含7个可疑谐波源负荷的小型供电系统。测量设备每隔30 min测取谐波次数到15次的谐波,其采样频率为3 840 Hz,采样间隔为8个周期(512点),各次谐波的幅值和相角通过FFT变换进行计算。HEPCO公司也采用加权最小二乘法对测量的数据进行谐波状态估计,当系统接线发生改变时,最小二乘法可以很快地重新适应新拓扑结构。

4 研究展望

电力系统谐波状态估计问题随着人们对谐波问题的不断深入了解和重视而被提出来,其研究和应用将为电力系统谐波监测和治理提供有效的支撑。同时,其研究对于电力系统基波状态估计也有重要参考价值。通过以上对电力系统谐波状态估计技术

发展情况的综述,我们认为应尽快开展以下几方面的工作:

(1) 谐波状态估计技术基础工作的进一步研究,包括同步发电机、电力变压器、输电线路、并联补偿装置、负荷等三相谐波模型及谐波源模型的建立和PMU功能单元的研究与推广。

(2) 谐波状态估计算法的进一步深入研究,借鉴已有的研究成果,提出更具实用性和普遍性的新算法。

(3) 提出电力系统谐波状态估计可观性分析的新方法,确定最小的谐波测量集,研究使谐波状态不可观测的网络变为可观测网络的可能性。

(4) 在国内PMU配置较全的小型电网开展电力系统谐波状态估计现场实践研究,开发实用的谐波状态估计软件。

参考文献

- [1] 吴笃贵,徐政. 电力系统谐波状态估计技术的发展与展望[J]. 电网技术, 1998, 22(1): 75-77.
WU Du-gui, XU Zheng. Development of the harmonic state estimation for the power system[J]. Power System Technology, 1998, 22(1): 75-77.
- [2] Heydt G T. Identification of harmonic sources by a state estimation technique[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1989, 4(1): 569-576.
- [3] Farach J E, Grady W M, Arapostathis A. An optimal procedure for placing sensors and estimating the locations of harmonic source in power systems[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1993, 8(3): 1303-1310.
- [4] Meliopoulos A P S, ZHANG Fan, Shalom Zelingher. Power system harmonic state estimation[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1994, 9(3): 1701-1709.
- [5] DU Z P, Arrillaga J, Watson N. Continuous harmonic state estimation of power systems[J]. IEEE Proc on Generation, Transmission and Distribution, 1996, 143(4): 329-336.
- [6] Chakphed M, Suttichai P, Neville R W, et al. An optimal measurement placement method for power system harmonic state estimation[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 20(2): 1514-1521.
- [7] 吴笃贵,徐政. 基于相量量测的电力系统谐波状态估计(I)-理论、模型与求解算法[J]. 电工技术学报, 2004, 19(2): 64-68.
WU Du-gui, XU Zheng. Power system harmonic state estimation based on phasor measurements (I) -theory, model and solution algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(2): 64-68.
- [8] 徐志向,侯世英,周林,等. 基于奇异值分解的电力系统谐波状态估计[J]. 电力自动化设备, 2006, 26

- (11): 28-31.
- XU Zhi-xiang, HOU Shi-ying, ZHOU Lin, et al. Power system harmonic state estimation based on singular value decomposition[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26 (11): 28-31.
- [9] 侯世英, 汪瑶, 祝石厚, 等. 基于相量量测的电力系统谐波状态估计算法的研究[J]. 电工电能新技术, 2008, 27 (2): 42-46.
- HOU Shi-ying, WANG Yao, ZHU Shi-hou, et al. Study of phasor measurements based power system harmonic state estimation algorithm[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2008, 27 (2): 42-46.
- [10] 周念成, 谭桂华, 赵渊, 等. 一种计及参数误差的电网谐波状态估计方法[J]. 重庆大学学报, 2009, 32 (2): 146-150.
- ZHOU Nian-cheng, TAN Gui-hua, ZHAO Yuan, et al. A method for considering parameter errors in power system harmonic state estimation[J]. Journal of Chongqing University, 2009, 32 (2): 146-150.
- [11] Ma Haili, Girgis A A. Identification and tracking of harmonic source in a power system using a Kalman filter[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11 (3): 1659-1665.
- [12] Kent K C Yu, Watson N R, Arrillaga J. An adaptive Kalman filter for dynamic harmonic state estimation and harmonic injection tracking[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 20 (2): 1577-1584.
- [13] 徐志向. 基于奇异值分解算法的谐波状态估计及谐波源定位的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2006.
- XU Zhi-xiang. Harmonic state estimation of singular value decomposition-based and harmonic source location research[D]. Chongqing: Chongqing University, 2006.
- [14] 吴笃贵, 徐政. 基于相量量测的电力系统谐波状态估计(II)-可观性、质量评估与算例研究[J]. 电工技术学报, 2004, 19 (3): 76-81.
- WU Du-gui, XU Zheng. Power system harmonic state estimation based on phasor measurements (II) —— observability analysis, quality evaluation algorithm and example studies[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19 (3): 76-81.
- [15] 祝石厚, 侯世英, 吕厚余. 电力系统谐波分析的有效方法-谐波状态估计技术综述[J]. 现代电力, 2007, 24 (3): 6-10.
- ZHU Shi-hou, HOU Shi-ying, Lü Hou-yu. Analysis method for power system harmonics —— review on harmonic state estimation[J]. Modern Electric Power, 2007, 24 (3): 6-10.

收稿日期: 2009-09-04; 修回日期: 2010-05-04

作者简介:

梁志瑞(1959-), 男, 教授, 研究方向为电力系统及其自动化、电力系统广域测量技术与应用;

叶慧强(1971-), 男, 助理工程师, 主要从事配网输电、电网基建、工程管理等工作;

赵飞(1982-), 男, 硕士, 研究方向为电力系统广域测量技术、光伏发电技术。E-mail: zhaofei1982121@163.com

(上接第 126 页 continued from page 126)

- REN Yan-ming, QIN Lin-jun, YANG Qi-xun. Study on IEC 61850 communication protocol architecture[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(8):62-64.
- [2] 国家电网公司. 国家电网公司重点应用新技术目录(2006年第一批)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [3] 高翔, 周健, 周红, 等. IEC 61850 标准在南桥变电站监控系统中应用[J]. 电力系统自动化, 2006, 30 (16): 105-107.
- GAO Xiang, ZHOU Jian, ZHOU Hong, et al. The application of IEC 61850 standard in monitoring system of Nanqiao substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30 (16):105-107.
- [4] 李瑞生, 王锐, 许沛丰, 等. 基于 61850 规约的洛阳金谷园 110 kV 数字化变电站工程应用实践[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37 (10):76-78.
- LI Rui-sheng, WANG Rui, XU Pei-feng, et al. Application practice of Luoyang Jingyuan 110 kV digital substation based on IEC 61850[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37 (10):76-78.
- [5] 张海平, 秦志国. IEC 61850 变电站自动化系统在供电整流系统中的应用与分析[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36 (12):78-82.
- ZHANG Hai-ping, QIN Zhi-guo. Application and analyzing of IEC 61850 system in substation at commutating supply system[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36 (12):78-82.
- [6] 谢文涛. 浅析 500 kV 升压站防误操作系统[J]. 华东电力, 2000(6): 28-29.
- XIE Wen-tao. Analyzing of against misuse system of 500 kV substation[J]. East China Electric Power, 2000(6): 28-29.

收稿日期: 2009-12-18; 修回日期: 2010-04-23

作者简介:

陈希炜(1970-), 男, 硕士, 从事电力保护与自动化项目技术管理及设计工作; E-mail: chen.xiwei@win-power.net

谢文涛(1968-), 男, 硕士, 高级工程师, 从事继电保护与自动化运行与管理的工作。