

广域保护系统功能与可行结构分析

徐天奇¹, 尹项根¹, 游大海¹, 王阳光¹, 李程²

(1. 华中科技大学电力安全与高效湖北省重点实验室, 武汉 湖北 430074;

2. 河北保定天威保变电气股份有限公司, 保定 河北 071056)

摘要: 广域保护系统通过收集和分析电力系统广域信息、评估系统的状态, 可以实施针对多种系统扰动的多重系统保护, 比传统特殊保护系统更加灵敏有效。但是广域保护概念的滥用阻碍了该技术的推广和发展, 本文探讨了广域保护的定义, 将其限定于针对系统广域扰动的保护和控制而把对电力设备的保护排除在外, 以突出广域保护在系统保护领域的优势。文中对比了分散式和现有的集中式的广域保护系统结构, 认为前者可以获得较高的可靠性但是不能做到全局最优控制, 后者利于实现全局最优控制, 但是对控制中心设备性能要求很高。因此, 本文提出一种改进型的集中式结构——三层式广域保护系统, 并讨论了在广域测量系统基础上实现三层式广域保护系统的可行性。

关键词: 广域保护; 集中式; 分散式; 三层式广域保护系统

Analysis on functionality and feasible structure of wide area protection system

XU Tian-qi¹, YIN Xiang-gen¹, YOU Da-hai¹, WANG Yang-guang¹, LI Cheng²

(1. Electric Power Security and High Efficiency Lab, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

2. Baoding Tianwei Baobian Electric Co. Ltd., Baoding 071056, China)

Abstract: The Wide Area Protection System (WAPS) can estimate the state of the power system through collecting and analyzing wide area information, so it can implement multiple system protection schemes against various system disturbances. Compared with traditional special protection system, WAPS is more sensitive and effective. But the abuse of Wide Area Protection (WAP) concept has hindered the development of WAP technology. In this paper, WAP is defined as the protection and control against system wide area disturbance, from which the protections of electrical equipment are excluded. The definition highlights the advantages of WAP in system protection. The distributed structure and existing centralized structure of WAPS is compared. With the former, more reliability can be gained but the global optimal control can not be achieved. The later is helpful to realize the global optimal control, but it requires extreme performance of devices in the control center. So an improved centralized structure, namely three-layer WAPS is proposed. The feasibility of implementation of three-layer WAPS based on wide area measurement system is analyzed also.

Key words: wide area protection; centralized structure; distributed structure; three-layer wide area protection system

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)03-0093-05

0 引言

随着电力需求不断增长, 而扩建输电网络日益困难以及电力市场改革的深化, 电力系统逐渐逼近其极限运行, 系统的运行和控制变得越来越复杂, 发生扰动和故障的可能性增大, 后果也更加严重。如何平息系统范围的大扰动、维持电力系统稳定运行对电网运营方是一个巨大的挑战。

对于快速恶化的扰动, 目前电力系统的稳定控制措施常因速度太慢而不能达到预期效果。而现有

的动态仿真软件只能离线分析, 运行人员不得不经常面对极其复杂的局面, 依靠经验和预定策略来决策。

传统的继保装置虽然可以快速动作, 但由于只能获得本地信息, 因此只能用来保护电气设备, 而对广域扰动无能为力。另一方面, 随着互联电网越来越复杂, 继电保护的整定越来越困难, 不恰当的整定可能导致错误动作, 加速扰动的扩散。北美电力可靠性委员会(NERC)在对1984-1988年重大扰动的问卷调查表明, 75%左右的系统扰动或多或少与继电保护有关^[1]。另外, 该委员会发布的有关1988-1996年扰动的详细报告则表明, 两个元件停运

基金项目: 国家科技部863项目(2005AA001200)

(N-2)是初始扰动扩展到系统范围的主要原因,而约达70%的这类情况是由继电器误动尤其是保护系统的隐含故障引起的误动造成的^[2]。

可见,传统的安全稳定控制系统、人工调度系统和传统继电保护系统已经不能满足电力系统安全、稳定、经济运行的要求。另一方面,测量技术、计算机及通信技术的快速发展,为建立更完善的保护控制系统提供了有利条件,广域保护技术在这种背景下应运而生。

1 广域保护的定义

广域保护WAP (Wide Area Protection)的概念最早由瑞典学者Bertil Ingelsson等于1997年提出^[3],但到目前为止,对广域保护系统还没有一个公认的定义,各种文献给出了不同的定义^[4-6]。从总体上讲,对广域保护系统的定义可以归结为两类:一类仅涉及故障或扰动后的系统保护,即稳定控制;另一类则包含了稳定控制和常规保护。但不同定义有一个共同点,即都是以广域信息收集为基础的。

目前官方对广域保护的定义大都属于第一类,如国际大电网会议(CIGRE)把广域保护定义为基于广域测量系统WAMS (Wide Area Measurements System)及在线动态安全分析ODSA (On-line Dynamic Security Assessment)技术的,位于常规保护与数据采集监测控制系统/能量管理系统(SCADA/EMS)之间的系统稳定控制^[4]。IEEE电力工程协会(PES)电力系统继电保护委员会(PSRC, Power System Relaying Committee)系统保护分委员会(System Protection Subcommittee)的C-6工作组在其报告“广域保护和紧急控制”^[7]中没有明确给出广域保护的定义,但是从内容中可看出该报告所指的广域保护仅限于稳定控制。

一些学者认为,将广域测量技术和传统继电保护结合起来,保护装置不仅可以获得当地信息,还可以得到丰富的临近区域信息,利用丰富信息可以开发出新的保护原理,满足速断性和选择性的要求,并且可以使得保护装置所做决策是局部最优的^[8-10]。这些学者把这种保护称为广域保护,或者把之包含进了广域保护的范畴。

本文认为传统保护对电气设备的保护作用毋庸置疑,近期不可能出现可以完全取代传统继电保护的针对整个电力系统安全的整体性解决方案,虽然不能因此限制广域测量技术在传统保护功能上的应用,但作为定义,把广域保护限制于针对系统扰动的保护有助于体现该技术的优势,有利于该技术被更广泛地接受。对于使用了广域测量技术的传统

保护,可称之为广域继电保护。

因此本文对广域保护系统WAPS (Wide Area Protection System)的定义是:通过现代测量和通信技术,获取电力系统的多点信息,识别出可能给电力系统带来严重后果(包括系统不稳定、过负荷或电压崩溃等)的扰动,并采取相应的措施(如断开一条或多条线路、切机、增加HVDC线路输送功率、主动切负荷等),并且在控制措施实施的过程中不断收集反馈信息并及时调整后继措施,最终消除或减轻扰动带来的后果。该系统不包括普通的线路或设备保护。

2 广域保护的功能

广域保护是针对广域扰动的保护,广域扰动从现象来看可以分为几类:角功失稳、电压失稳、过负荷、电力系统连锁故障等。从本质原因来看,这几种现象分别对应有功功率平衡被破坏,无功功率平衡被破坏,整体或局部有功功率需求大于供给,保护或控制设备故障或其它原因导致的不恰当动作。针对这些扰动,目前可以采取的保护和控制措施有:失步保护,切负荷,可控系统解列,故障清除,快速关断,动态制动,发电机电压控制,电容器/电抗器投切和静态无功补偿,负载控制,关键保护系统的管理和控制,节点电压控制,移相位,联络线重调度,增加储备, HVDC功率调制。这些措施被称为特殊保护措施(Special Protection Scheme),而传统的实施特殊保护措施的系统被称为特殊保护系统SPS (Special Protection System)。

传统的SPS一般只针对某一种特定扰动动作,因此针对不同的扰动需要安装不同的SPS。

另外,传统SPS要么是基于本地测量电量动作的,要么是基于简单的区域电量(电流、电压和频率)和提前制定的策略动作的。由于关键信息的缺乏,对扰动的识别不可能很敏感,因此传统SPS一般只对严重扰动做出反应,采取严厉的措施使系统恢复稳定。但一般代价巨大,因此只能作为对付大扰动的最后防线^[7]。

WAPS基于以相量测量单元PMU (Phasor Measurement Unit)的应用为代表的现代测量技术、现代通信技术以及在线动态安全分析,可以根据丰富、及时的广域信息,对系统的状态做出实时判断,因此可以根据需要针对多种系统扰动实施多功能的系统保护。由于WAPS可以检测到较小的系统扰动,而且可以根据具体情况形成实时控制策略,较早地开始控制,而且多种控制措施可以协调动作,因此对维持电力系统的稳定性和完整性有更好的效果。

根据针对的系统扰动种类, WAP实现的功能可以分为几类: 功角稳定保护, 电压稳定保护, 过负荷保护, 连锁故障保护。其中功角失稳属于暂态失稳, 通常认为是对广域保护系统的响应时间最严格的考验^[11], 因此功角稳定保护是实现广域保护系统的难点。

3 广域保护系统的结构

3.1 分散式广域保护系统

分散式WAPS是指把数据分析和决策过程放在分散于电力系统各处的系统保护终端SPT (System Protection Terminal) 上执行的WAPS。SPT放置在不同变电站中, 通过环型通信网络相连。SPT从CT、VT或PMU获得本地测量数据, 并通过网络获得其他SPT数据库的数据, 在丰富信息的基础上, 通过相对简单的算法和判据, 可以实现多功能、可靠、灵敏的系统保护, 如广域电压稳定控制、自动负荷控制、自动汽轮机投入、变压器抽头调节闭锁等。分散式WAPS的SPT结构及其信息交互情况如图1所示。

由于通信系统失效的可能性不能排除, 所以SPT和通信系统应该保持相对独立, SPT应能检测到通信系统的故障, 而且即使通信系统部分或全部失效, 保护终端依旧可以通过本地数据和本地准则执行保护措施。在分散式结构中, 即使一个保护终端失效, 邻近终端也可以作为此终端的后备。该结构可以较好地克服集中控制方式中对控制中心设备要求过高的问题, 但是SPT获得的信息有限, 而且数据分析能力和决策能力有限, 不能做到全局最优的控制。

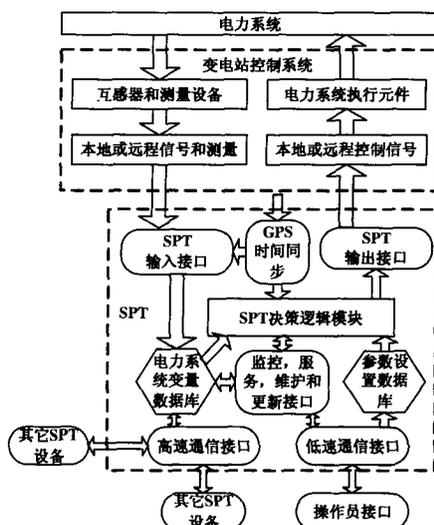


图1. 分散式WAPS的SPT结构及其通信接口

Fig. 1. Structure and interfaces of SPT used in distributed WAPS

3.2 集中式WAPS

集中式WAPS从整个电力系统采集数据, 在控制中心集中进行数据分析和控制决策, 然后把控制命令发给各个SPT以实施控制。由于是从整个系统的角度来分析和决策, 因此可以做到全局最优控制, 更能体现广域保护的优势。在通信系统和分析决策系统的能力能够达到要求的前提下, 集中式结构是优于分散式结构的, 因此集中式WAPS是未来WAPS的发展方向。

从结构上来看, 集中式WAPS应该包含以下几个子系统 (见图2):

1) 数据采集系统: 负责WAPS所需数据的收集, 可能包含电流、电压幅值及相位, 频率, 开关位置, 发电机投切状态, 继电器信号等。相量测量单元PMU的引入和大量应用为WAPS的实施创造了条件。PMU可以实时采样电流、电压的幅值和正序功角, 更新速率至少1/30s (额定频率为60Hz的电网) 或1/25s (额定频率为50Hz的电网), 而且带有GPS对时功能, 可以保证不同地点采样数据的同步性。但由于PMU成本较高, 目前不可能在电力系统的所有节点装备PMU, 而实际上也不需要所有节点安装PMU, 关于PMU安装点的选择, 有文献提出了多种方法^[12-15]。

2) 在线数据分析和决策系统: 在收集到大量数据之后, 必须经过处理才能得到需要的系统参数, 例如系统的潮流分布等。数据分析的难点在于从大量的数据中滤掉不正常数据, 并正确估计出电力系统的状态, 从而判定系统是否处于不安全的状态。然后从电力系统状态及不安全状态的诱导因素迅速识别出广域扰动的种类, 并根据扰动激烈程度和现象持续时间把扰动分成不同等级, 以选择相应的保护和控制措施, 并且确定其中调节性措施的控制量大小。多重控制措施可能会被同时选择, 这就需要预测后果并协调各种措施, 以避免控制效果相互抵消。在控制命令发出之后, 还需要根据实时采集数据不断估计系统状态, 以调整控制措施。

3) 执行系统: 执行系统是控制措施的实施者, 由分散于电力系统各处的多个SPT以及相应的电力系统执行元件组成。不同于分散式WAPS的SPT, 此SPT不需要有数据处理和决策功能, 也不需要和其它SPT通信, 只需要接收从控制中心发来的命令, 执行相应控制。SPT及其执行元件的控制速度和精度将直接影响控制措施的效果, 因此是衡量执行系统性能的重要指标。

4) 通信系统: 通信系统需要实现采集数据的上传和控制命令或SPT整定值的下传。由于SPT没有决

策能力, 因此集中式WAPS对通信系统的依赖程度很高, 通信系统的可靠性和实时性对整个WAPS的功能实现与否至关重要。

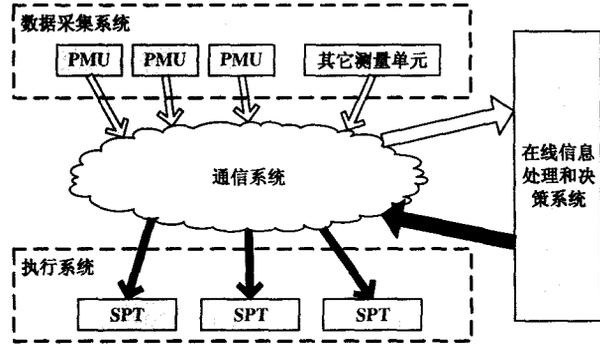


图2. 集中式WAPS的构成

Fig. 2. Components of Concentrated WAPS

3.3 三层式 WAPS

集中式WAPS虽然功能强大, 但是其性能依赖于通信系统的负载能力和实时性以及在线数据分析和决策系统的运算能力。而电力系统的规模越大, 需要的数据采集点就越多, 从而数据量越大, 数据传输距离也越长, 这对通信系统带宽和数据分析及决策系统的运算能力都提出了更高要求。

将集中式WAPS分层, 可以结合分散式和集中式WAPS的优点。比较理想的情况是把WAPS分为三层, 即三层结构, 如图3。底层为大量的PMU和SPT或附带保护功能的PMU; 中间层为几个本地保护中心 (LPC, Local Protection Center), 每个LPC与多个PMU通信, 完成数据收集以及区域控制和保护功能, 多个LPC相互配合共同实现系统保护方案; 上层为一个系统保护中心 (SPC, System Protection Center), 它对各本地保护中心起到协调作用, 实施系统安全防御。三层式WAPS可以把大量原始数据的处理分散在LPC进行, 从而把大量原始数据传输限制在各个有限区域之内。LPC把运算结果和少量的原始数据上传到SPC。SPC的系统控制命令下传到LPC, 再转发给SPT。

目前WAMS已经得到广泛应用, 而WAMS一般以PMU为基础, 因此三层结构的广域保护系统可在WAMS的基础上实现。在WAMS应用中, 分布在一个区域的所有PMU设备都连接到一台被称为数据集中器 (DC, Data Concentrator) 的计算机上, DC使用数据库大量储存相量数据。LPC可直接访问DC的数据以获取整个系统的动态行为。也可以直接在DC上增加控制和保护功能, 使DC转化成一个LPC, 再把这些LPC连接到SPC就可以整合成广域保护系统。

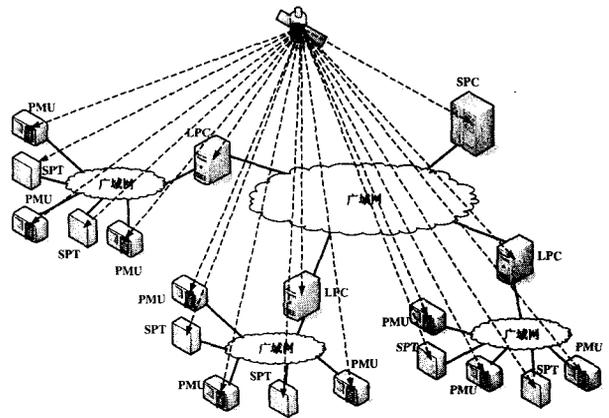


图3. 三层式WAPS结构

Fig. 3. Structure of Three Layer WAPS

4 结语

WAP 是一门新兴的技术, 是电力系统控制复杂化和计算机及通信技术发展的必然产物, WAPS 作为一种新的控制手段, 将为日益复杂的电力系统经济、安全、稳定地运行提供强有力的保障。本文探讨了广域保护的定义及其应用范围, 归纳了它的功能, 并与传统 SPS 比较, 突出了广域保护的优点。对广域保护系统的可行系统结构进行了分析, 阐述了分散式和集中式结构的优缺点, 集中式 WAPS 因为功能更加强大而更有发展前景。改进集中式结构提出了三层式 WAPS。通信系统的可靠性和及时性是三层式 WAPS 有效性的关键因素, 下一步的工作是研究适合三层式 WAPS 的通信系统。

参考文献

- [1] Phadke A G, Thorp J S. Expose Hidden Failures to Prevent Cascading Outages. IEEE Computer Applications in Power, 1996, 9(3): 20-23.
- [2] De La Ree J, Elizondo D C. A Methodology to Assess the Impact of Hidden Failures in Protection Schemes. Proceedings of IEEE PES Power Systems Conference & Exposition, 2004, New York (NY, USA), Vol. 3: 1782-1783.
- [3] Bertil I, Per-Olof L, Daniel K, et al. Wide-area Protection against Voltage Collapse. IEEE Computer Application in Power, 1997, 10(4): 30-35.
- [4] 蔡运清, 汪磊, Kip Morison, 等. 广域保护(稳控)技术的现状及展望. 电网技术, 2004, 28(8): 21-25.
CAI Yun-qing, WANG Lei, Kip Morison, et al. Current Status and Prospect of Wide-area Protection (Dynamic Stability Control) Technologies. Power System Technology, 2004, 28(8): 21-25.
- [5] 易俊, 周孝信. 电力系统广域保护与控制综述. 电网

- 技术, 2006, 30(08): 7-12.
- YI Jun, ZHOU Xiao-xin. A Survey on Power System Wide-Area Protection and Control. Power System Technology, 2006, 30(08): 7-12.
- [6] 丛伟, 潘贞存, 丁磊, 等. 满足“三道防线”要求的广域保护系统及其在电力系统中的应用. 电网技术, 2004, 28(18): 29-33.
- CONG Wei, PAN Zhen-cun, DING Lei, et al. Wide Area Protection System to Defend Three Different Types of Power System Stability Problems and its Application. Power System Technology, 2004, 28(18): 29-33.
- [7] Alex Apostolov, Ernest Baumgartner, Bob Beckwith, et al. Wide Area Protection and Emergency Control. IEEE Power Engineering Society Report, 2004, <http://www.pes-psrc.org/>.
- [8] Farhad Namdari, Sadegh Jamali, Peter A Crossley. Differential Protection of Busbars and Transmission Lines Based on the Energy Conservation Law for Wide Area Protection. Automation of Electric Power System, 2007, 31(3): 35-40.
- [9] 丛伟, 潘贞存, 赵建国. 基于纵联比较原理的广域继电保护算法研究. 中国电机工程学报. 2006, 26(21): 8-14.
- CONG Wei, PAN Zhen-cun, ZHAO Jian-guo. A Wide Area Relaying Protection Algorithm Based on Longitudinal Comparison Principle. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(21): 8-14.
- [10] Tan J C, Crossley P A, McLaren P G, et al. Application of a Wide Area Back-up Protection Expert System to Prevent Cascading Outages. Proceedings of IEEE Power Engineering Society Summer Meeting Conference, 2001, Vol. 1-3: 903-908.
- [11] Adamiak M G, Apostolov A P, Begovic M M, et al. Wide Area Protection-Technology and Infrastructures. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(2): 601-609.
- [12] 彭疆南, 孙元章, 王海风. 考虑系统完全可观性的 PMU 最优配置方法. 电力系统自动化. 2003, 27(04): 10-16.
- PENG Jiang-nan, SUN Yuan-zhang, WANG Hai-feng. An Optimal PMU Placement Algorithm for Full Network Observability. Automation of Electric Power System, 2003, 27(04): 10-16.
- [13] 沙智明, 郝育黔, 郝玉山等. 电力系统 PMU 安装地点选择优化算法的研究. 继电器. 2005, 33(07): 31-36.
- SHA Zhi-ming, HAO Yu-qian, HAO Yu-shan, et al. A New Algorithm for PMU Placement Optimization in Power System. RELAY, 2005, 33(07): 31-36.
- [14] 罗毅, 赵冬梅. 电力系统 PMU 最优配置数字规划算法. 电力系统自动化. 2006, 30(09): 20-24.
- LUO Yi, ZHAO Dong-mei. Optimal PMU Placement in Power System Using Numerical Formulation. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(09): 20-24.
- [15] 邢洁, 韩学山, 武鹏. 使潮流方程直接可解的 PMU 配置方法的改进. 电网技术. 2006, 30(11): 30-34.
- XING Jie, HAN Xue-shan, WU Peng. Improvement of Optimal PMU Placement for Analytical Solution of Power Flow Node by Node. Power System Technology, 2006, 30(11): 30-34.

收稿日期: 2008-03-27; 修回日期: 2008-04-15

作者简介:

徐天奇 (1978-), 男, 博士研究生, 从事变电站自动化系统及其通信系统、基于信息网络综合传输的电力系统运行与控制、继电保护方面的研究工作; E-mail: xu.tianqi@gmail.com

尹项根 (1954-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统继电保护及安全自动控制、故障仿真与状态监测等;

游大海 (1957-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 从事电力系统继电保护和电力系统综合自动化方面的研究工作。

我国首个特高压交流输电试验示范工程建成投运

国家电网公司 2009 年元月 16 日在京正式宣布: 我国自主研发、设计和建设的百万伏交流输变电项目——晋东南—南阳—荆门特高压试验示范工程正式建成投运。

这是迄今为止世界上运行电压最高、输送能力最大、技术水平最先进的特高压交流输变电工程。

我国首个特高压交流试验示范工程于 2006 年底开工建设。工程北起山西的晋东南变电站, 经河南南阳开关站, 南至湖北的荆门变电站, 线路全长 640 km, 变电容量 2×300 万 kVA, 连接华北、华中电网, 横贯山西、河南、湖北三省。工程投运后, 将充分利用充足的山西煤电、湖北水电资源, 形成南北互济的跨区域经济协调发展, 将有效缓解国内电力运输难问题。