

华东电网 WAMAP 系统的应用实践

曹 路¹, 张 涛², 汪德星¹, 毕晓亮¹

(1. 华东电网有限公司调度中心, 上海市 200002; 2. 上海东云信息技术有限公司, 上海市 200001)

摘要:介绍了华东电网广域动态信息监视分析保护控制(WAMAP)系统投运以来为调度运行提供的实时动态监测功能和稳定分析、预防控制辅助决策发挥的重要作用,包括电网实时动态信息管理、电网扰动识别和快速故障分析、电网在线稳定评估预警等,提供了实际的工程应用案例分析。

关键词:电网调度自动化;广域测量系统;实时动态监测;预防控制

中图分类号: TM734

0 引言

随着中国国民经济的飞速发展,电网规模不断扩大,用电负荷急剧增加,对电网的安全稳定运行提出了严峻的挑战。国内外众多专家学者研究如何构建电网安全稳定的防御体系,取得了一系列研究成果^[1-7],其中,由原国网南京自动化研究院和华东电网有限公司合作开发的广域动态信息监视分析保护控制(WAMAP)系统有力地支撑了对辖区内电网故障的预警、跟踪和分析。

华东电网覆盖华东地区上海、江苏、浙江、安徽、福建四省一市,供电面积 47.17 万 km²,人口 2.4 亿,2007 年统调最高负荷突破了 120 GW。经多年电网建设,华东电网已经建成了比较坚强的主网架,但仍不足以承受复杂故障的冲击。由于华东地区负荷增长快,一次能源和负荷分布不均衡,大量电力通过输电线路送至长江三角洲负荷中心,造成设备潮流长期重载,发生故障的风险较大;而且华东地区处于台风、龙卷风等自然灾害多发区域,电网每年多次承受严重灾害冲击。因此,实现电网安全稳定的在线分析、预警和电网调度运行控制的辅助决策显得非常重要。

WAMAP 系统不但具备在线电网监视和记录功能,而且能实现在线故障分析和在线功角、频率、电压分析及在线预防控制辅助决策等高级应用功能,将在线分析功能推向实用。WAMAP 系统的建设分 2 期进行,一期工程实现基于相量测量装置(PMU)信息的动态监视,二期工程实现分析、预警和辅助决策功能。2 期工程分别于 2005 年和 2006 年完成,并于 2006 年和 2007 年分别投入华东网调的调度运行。

华东电网 WAMAP 系统自投运以来,在电网实时动态信息管理、电网运行风险评估、预警和预防控制方面发挥了重要作用。

1 电网实时动态信息管理

华东电网 WAMAP 系统目前已在 24 个发电厂和 29 个 500 kV 变电站安装了 PMU,采集 154 回 500 kV 线路和 71 台机组的数据,监视电压、频率、联络线潮流等电网安全运行的关键信息,并监视部分关键的发电机功角和 500 kV 母线电压相角,为运行人员提供电网稳定运行的重要信息。电网实时动态信息通过 WAMAP 系统进行处理。作为动态信息的数据平台,WAMAP 系统汇集了所有 PMU 送来的实时测量信息,经过高速计算机处理后将电网运行状态的分析结果发送到调度台。在已往的调度管理中,调度员需要通过相关厂站的汇报来了解电网异常情况,时间上可能存在较大滞后,内容上可能不够准确,特别是某些周期性电网扰动,例如低频振荡,甚至无法通过现有的数据采集与监控(SCADA)系统准确地记录,从而错过应急处理的最佳时机。通过 WAMAP 系统实现的电网实时动态信息管理,能够帮助调度员在电网发生异常后及时掌握相关信息,不需要完全依赖于厂站的汇报,改变了以往的运行管理模式,从技术和管理上提高了调度应急处理的反应速度。

1.1 动态监视

PMU 实时测量线路的三相电压、电流幅值和相角,以每秒 25 帧的数据传输速度实时上传至主站,当电网发生大的扰动时,能够准确记录扰动过程中各个变电站母线间的电压相角波动情况,为掌握电网的暂态特性、动态特性提供了有力的工具。

2008 年 4 月 8 日 15:01,安徽繁涂 5322 线遭雷击,繁昌侧线路电压互感器爆炸,繁昌 500 kV II 母

线短路,引起3回500 kV线路跳闸。根据安装在东善桥变、袁庄电厂、瓶窑变、濉溪变、南桥变、兰溪电厂、乌沙山电厂、宁德变的PMU测量的母线电压相角数据,得到上述变电站、电厂的母线A相电压相角在整个故障过程中相对于参考点武南变母线A相电压相角的电压相角变化曲线如图1所示。

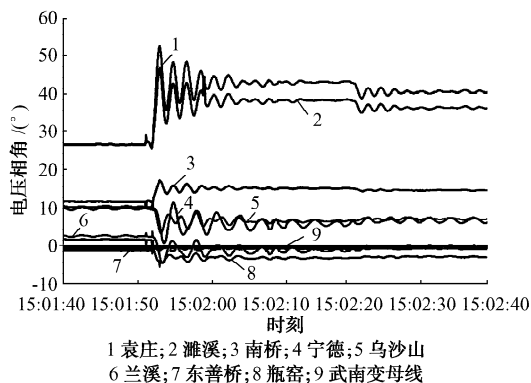


图1 繁昌变故障过程中各变电站、电厂母线电压相角曲线

Fig. 1 Voltage angle of substations and power plants during the fault

从电压相角的动态变化中可以挖掘出很多电网运行信息。例如,作为送端的袁庄电厂和濉溪变,相角迅速增大了约 20° ,但系统阻尼较大,因此相角的振荡很快衰减;在故障后0.5 min左右,调度员发令紧急停安徽送端的2台机组,送出潮流减少,袁庄电厂和濉溪变电压相角随之下降;受此扰动影响,远在福建的宁德变母线相角也发生了波动,而且影响东善桥变等距离故障很近的母线相角,振荡频率约为0.4 Hz,说明福建与华东之间存在一个区间振荡模式;宁德变母线相角振荡的衰减过程较长,说明该振荡模式的阻尼比较小,这与离线的小扰动分析结果吻合。上述信息非常清晰、明确,为电网分析提供了第一手资料,而通过常规的SCADA或故障录波是难以获得的。

1.2 低频振荡监视

WAMAP系统的低频振荡监视功能能够快速监测和分析系统低频振荡特性,帮助电网调度员实时监视系统振荡模式变化,及时发现系统最严重的低频振荡模式,让调度员有充裕的时间采取预防措施,防止振荡进一步恶化,避免大事故的发生,提高大型电网的稳定性。同时,通过程序的离线分析,能够复现历史振荡场景,丰富研究案例,为电网的运行和管理积累经验。

低频振荡监视根据实时的PMU测量数据,采用Prony分析算法,分析发电机功角和线路的有功功率数据,从而分析被监视发电机或线路上是否有

低频振荡发生。当有低频振荡发生时,给出报警并计算出最严重的低频振荡模式,以及振幅、频率和阻尼比等模式特征量。

2007年7月7日至11日,宁德变PMU测量到了一批宁双5906线、德龙5916线的功率波动。通过人为降低低频振荡报警阈值后,WAMAP系统判断其中19次告警为低频振荡。这19次告警有以下特征:功率波形一段时间内呈现等幅或增幅振荡,但持续时间很短,都在1 min以内;振荡频率在0.34 Hz~0.38 Hz之间,与华东电网2007年度小干扰稳定分析报告中计算得到的2007年夏季福建模式0.44 Hz~0.47 Hz的振荡频率接近;最大振幅约为35 MW(最大峰-峰值70 MW),峰-峰值为振荡线路初始潮流的10%左右。通过分析后认为,宁德—双龙断面功率波动频率固定,有一定的持续时间,可以定性为小幅功率振荡。发生该类型振荡的主要原因是福建电网与华东主网的联络薄弱,自然阻尼薄弱。振荡幅度较小的原因是福建电网已经针对该振荡模式大量配置了电力系统稳定器(PSS),从原理上基本杜绝了发生大幅或增幅低频振荡的可能性。

虽然小幅功率振荡本身对电网安全威胁有限,但振荡期间电网承受其他事故的能力将有所下降,为此,在运行中要求调度员充分利用WAMAP系统加强监视,当振荡幅度达到一定程度时,立即降低通道送电功率,提高电网小扰动稳定水平。

1.3 一次调频性能监视

WAMAP系统的一次调频性能监视主要依据安装在发电厂的PMU实时采集的发电机三相电压、电流相量和机端频率等动态数据,计算电网发生大扰动时各个发电机的一次调频特性(通过计算机组的调差系数来评价该机组的一次调频性能),通过各种直观、准确、方便的可视化表现手段为机组参与一次调频的辅助服务功能考核提供依据,从而有助于监视机组一次调频投入情况,有效调动电厂参与一次调频的积极性,提高电网运行的稳定性和安全性。

2008年1月8日11:49,上海外高桥三厂7号机1000 MW机组跳机,跳机前出力为910 MW,电网频率由跳机前的50.005 Hz降至最低为49.918 Hz,最后稳定在49.942 Hz。在此期间,华东电网内机组的一次调频情况被PMU记录并通过WAMAP系统计算获得,发现各调差系数从5.8%到35%不等,差异较大,即使同一电厂不同机组的调差系数也存在较大差异。调差系数越小,说明该机组在频率变化时的有功响应越灵敏,对电网频率

稳定的贡献越大。另一方面,对于调差系数过大的机组,WAMAP 系统为今后的考核提供了量化的依据。

2 电网扰动识别和快速故障分析

2.1 电网扰动识别

电网发生线路短路或机组跳机时,WAMAP 系统的扰动识别程序能够根据 PMU 采集的实时动态数据,根据三相电压幅值和电流幅值的突变情况,进行扰动提取获得相应的特征分量,再根据各特征分量即可识别出相应的故障类型,为调度员迅速、正确地处理事故提供依据。

2007 年 6 月到 2008 年 3 月期间,安装有 PMU 的 500 kV 变电站共发生 500 kV 线路短路扰动 94 次,成功捕获 91 次,成功率为 96.8%;安装有 PMU 的电厂共发生切机 63 次,成功捕获 53 次,成功率为 84.1%。特别是 2008 年 1 月中旬开始的持续雨雪天气对华东电网 500 kV 线路造成较大影响,共造成 500 kV 线路发生短路跳闸故障 60 次,WAMAP 系统全部正确捕获,捕获成功率为 100%。

由于 PMU 测量数据的实时性,电网发生故障后,扰动识别能实时告警,并提供三相电压、电流曲线,通过故障曲线,调度员便能迅速了解故障类型(单相、相间还是三相故障)、故障后是否进行重合闸以及重合闸是否成功等信息。而以前这些信息需要下级调度员或厂站值班人员电话汇报提供,存在反映情况不准确、不及时的现象。现在,WAMAP 系统为调度员提供了即时、准确的信息,为及时处理事故发挥了积极作用。在 2008 年初的冰雪灾害中,WAMAP 系统提供的故障波形和故障信息帮助了调度员判断线路故障后是否强送,在倒塔事故中减少了对系统和设备的冲击,提高了事故处理速度。

2.2 快速故障分析

对于扰动识别的短路故障告警,快速故障分析能自动召唤相关子站的 PMU 录波文件,根据原始录波文件对故障线路进行分析,并给出故障元件、故障类型和相别、故障发生和切除时间、重合闸和分闸时间、故障方向等故障信息,辅助调度员处理事故。

在快速故障分析的在线监视页面上方的列表中显示故障时的概要信息,主要为故障设备、故障相、故障时间、三相的突变量功率方向、重合闸时间以及该设备是否为本线故障等;在线监视页面下方的时间坐标轴则展示了电网故障时的动作序列过程以及短路电流等信息。同时,用户还可以通过点击曲线查看按钮查看电网故障时的暂态数据,更清晰地了解电网故障时的动态过程。

一个体现快速故障分析作用的例子是 2007 年 7 月 25 日的 500 kV 盐都—泰兴双线故障处理过程。盐都—泰兴双线是苏北电力南送的重要通道,为提高输送能力,装有安控装置,在双线同时故障(故障间隔 5 s 以内认为是同时故障)时将切除送端机组。2007 年 7 月 25 日 15:47 现场汇报,因雷电、大风天气,盐都—泰兴双线同时故障跳闸,而安控装置没有动作。WAMAP 系统的快速故障分析结果显示,盐都—泰兴双线故障的时间间隔为 48 s,并不是双线同时故障,因此,安控装置不动作是正确的。快速故障分析结果还显示,第 1 次线路故障是 B 相故障,第 2 次线路故障是 C 相故障。由于能够据此判断出这是 2 回线路的 2 个独立故障,华东网调调度员马上组织现场强送,加快了事故处理。在此期间的 16:12,安徽与浙江的一回 500 kV 省际联络通道发生 B 相故障重合不成功跳闸,网调调度员在现场汇报之前就通过 WAMAP 系统的快速故障分析发现了该故障,并通知现场准备强送,提高了电网相继故障下的处理能力。

3 电网在线风险评估预警和预防控制辅助决策管理

WAMAP 系统提供了在线预警和辅助决策管理功能。作为集成创新,WAMAP 系统结合了能量管理系统(EMS)静态数据和 PMU 动态信息,通过高速计算系统,每隔数分钟形成华东全网实时潮流断面并自动进行风险评估,找出可能发生的最严重故障。如果系统出现不安全情况,在线预警和辅助决策管理机制将启动,为调度员提供可行的预防措施,将电网运行方式及时调整回安全范围之内。这种预防性的管理机制能够彻底解决单一事故后的事故扩大问题,使调度员对电网薄弱环节时刻心中有数,并为其从容不迫、有条不紊地处理事故创造了条件。

3.1 电压稳定分析和预警

华东电网长江三角洲地区具有明显的大受端电网的特性,上海、苏南地区是华东电网的负荷中心,对外来电力的需求大,电压稳定性成为电网安全的主要矛盾之一。近年来发生的北美和西欧电网的大停电事故基本上都是由电压稳定破坏所致。因此,电压稳定分析和预警功能成为电网控制中心发展的重点。WAMAP 系统的电压稳定功能采用以电压安全评估工具(VSAT)为核心的静态电压稳定分析方法,具有实用、直观的特点。WAMAP 系统提供 P-V 曲线,向运行人员展现了电网 500 kV 电压稳定控制的裕度。

3.2 暂态稳定分析、预警和辅助决策

随着华东 500 kV 电网的逐步加强,电网暂态稳定破坏事件发生的概率大为降低,但问题依然存在,特别是当阳城电厂、苏北和皖北送负荷中心的长距离输电通道发生故障时,仍存在发生电网暂态稳定破坏的风险。WAMAP 系统给出实时条件下 500 kV 设备 $N-1$ 和部分 $N-2$ 故障时电网的暂态功角、电压、频率稳定裕度。在 2008 年初的冰雪灾害中,仅浙江电网就有 23 回 500 kV 线路因灾相继停电,电网结构遭到严重破坏,稳定水平大幅下降。WAMAP 系统为电网运行人员认识特殊方式下的稳定水平提供了有力的支持,对调度人员了解电网中存在的风险以及防范风险起了重要的作用。此外,WAMAP 系统还给出了在线计算得到的重要输电断面的暂态稳定限额,便于调度员进行运行控制。

4 结语

华东网调建设 WAMAP 系统的目的是为了满足不同复杂大电网的安全、优质、经济运行的要求。利用 WAMAP 系统的动态监视和故障分析功能,能使调度员动态地监视电网全局,及时判断故障类型和故障地点,快速隔离故障,尤其是将以往不易观察、判断的低频振荡也纳入了调度监控范围,扩展了调度员的监视范围,提高了监视的准确性;根据电网在线分析和预防控制辅助决策进行科学调度,能够有效防止电网大面积停电事故的发生。因此,WAMAP 系统大大提高了电网运行和调度管理水平,在保证电网安全性方面取得的经济和社会效益是难以估量的。

由于 WAMAP 系统中的动态实时监控、扰动在线识别、快速故障分析、机组一次调频和区域频率响应特性在线监视与分析、低频振荡在线监视与分析、电压和频率动态安全在线评估、计及 PMU 数据的状态估计等功能的充分发挥依赖于充足的 PMU 数据,为此,华东网调已制定了《华东电网动态监控系统数据共享管理办法》,在省(直辖市)动态监控系统建设和应用过程中,实现网、省(直辖市)之间 PMU 数据的共享,提高了应用水平。

WAMAP 系统各项静态和暂态稳定分析功能的应用强烈依赖于对电网模型和参数维护的及时性,及 SCADA 系统和 PMU 实时数据的准确性,因此,这部分的工作质量还需进一步提高。

WAMAP 系统的远期目标是实现计及 PMU 信息的系统保护和控制,目前,国际上对这方面的应用还处于研究阶段,华东电网也要积极跟踪并开展

研究,推进控制技术的应用。

参考文献

- [1] 薛禹胜,徐伟,DONG Zhaoyang,等.关于广域测量系统及广域控制保护系统的评述.电力系统自动化,2007,31(15):1-5.
XUE Yusheng, XU Wei, DONG Zhaoyang, et al. A review of wide area measurement system and wide area control system. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(15): 1-5.
- [2] 徐泰山,许剑冰,鲍颜红,等.互联网预防控制和紧急控制在线预决策系统.电力系统自动化,2006,30(7):1-4.
XU Taishan, XU Jianbing, BAO Yanhong, et al. On-line pre-decision based preventive and emergency control system for interconnected power grids. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(7): 1-4.
- [3] 韩祯祥,甘德强,薛禹胜.2004 年国际大电网会议系列报道:大会主题报告及 3 个热点讨论.电力系统自动化,2005,29(1):3-5.
HAN Zhenxiang, GAN Deqiang, XUE Yusheng. A review of 2004 CIGRE and 3 important issues. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(1): 3-5.
- [4] 薛禹胜.综合防御由偶然故障演化为电力灾难:北美“8·14”大停电的警示.电力系统自动化,2003,27(18):1-5,37.
XUE Yusheng. The way from a simple contingency to system-wide disaster: lessons from the eastern interconnection blackout in 2003. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(18): 1-5, 37.
- [5] 薛禹胜.时空协调的大停电防御框架:(一)从孤立防线到综合防御.电力系统自动化,2006,30(1):8-16.
XUE Yusheng. Space-time cooperative framework for defending blackouts: Part I from isolated defense lines to coordinated defending. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(1): 8-16.
- [6] 吴文传,张伯明,孙宏斌,等.在线安全预警和决策支持系统的软件构架与实现.电力系统自动化,2007,31(12):23-29.
WU Wenchuan, ZHANG Boming, SUN Hongbin, et al. A software framework of an early warning and security countermeasure system for electric power control centers. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(12): 23-29.
- [7] 李碧君,许剑冰,徐泰山,等.大电网安全稳定综合协调防御的工程应用.电力系统自动化,2008,32(6):25-30.
LI Bijun, XU Jianbing, XU Taishan, et al. Engineering application of integrated and coordinated defense technology of large power system security and stability. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(6): 25-30.

曹 路(1971—),男,通信作者,博士,高级工程师,主要研究方向:电力系统运行分析。E-mail: cao_l@ec.sp.com.cn

张 涛(1975—),男,硕士,工程师,主要研究方向:电力系统自动化开发和维护。

汪德星(1951—),男,高级工程师,主要研究方向:电力调度技术和管理。

Application of Wide Area Monitoring Analysis Protection and Control System in East China Power Grid

CAO Lu¹, ZHANG Tao², WANG Dexing¹, BI Xiaoliang¹

(1. Dispatching Center of East China Grid Company, Shanghai 200002, China;

2. Shanghai Dongyun Information Technology Development Company, Shanghai 200001, China)

Abstract: The application of wide area monitoring analysis protection (WAMAP) and control system in East China Power Grid is introduced. The functions of power grid dynamic information management, disturbance identification, instant fault analysis, and online stability assessment and warning are described, which greatly improve the power grid dispatching and operating management on the aspects of real-time dynamic performance monitoring, online stability analysis and pre-decision based preventive control. Application cases are provided.

Key words: dispatching automation; wide area measurement system; real-time dynamic performance monitoring; preventive control