

DOI: 10.7667/PSPC201823

交直流混联受端电网频率紧急协调控制技术及应用

董希建^{1,2}, 罗剑波^{1,2}, 李雪明^{1,2}, 李碧君^{1,2}, 万芳茹^{1,2}, 薛峰^{1,2}, 王忠明^{1,2}, 李志辉^{1,2}

(1. 南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司, 江苏 南京 211106;
2. 智能电网保护和运行控制国家重点实验室, 江苏 南京 211106)

摘要: 交直流混联受端电网大频差事故下的频率稳定控制是个难题, 之前主要依靠电源侧的一次调频响应以及负荷侧的低频减载措施。随着直流功率紧急支援、抽蓄切泵和大规模可中断负荷控制等新型可控资源以及相应新控制技术的出现, 全面提升和拓展频率紧急控制技术成为可能。系统性地分析了实现频率紧急全过程控制需要攻克的关键技术, 重点阐述了频率紧急协调控制技术中的故障可靠识别、功率损失量准确计算、多防线协同、多措施分类协调、系统监视与管理等核心技术。基于上述关键和核心技术构建了华东电网频率紧急协调控制系统, 保障了华东电网的安全稳定运行, 提升了新能源的消纳能力。

关键词: 特高压直流; 交直流混联; 多直流馈入; 大频差; 直流功率紧急支援; 可中断负荷; 多防线协同

Research and application of frequency emergency coordination and control technology in hybrid AC/DC power grids

DONG Xijian^{1,2}, LUO Jianbo^{1,2}, LI Xueming^{1,2}, LI Bijun^{1,2}, WAN Fangru^{1,2}, XUE Feng^{1,2}, WANG Zhongming^{1,2}, LI Zhihui^{1,2}

(1. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China;
2. State Key Laboratory of Smart Grid Protection and Control, Nanjing 211106, China)

Abstract: It is a great challenge to keep frequency stable under the condition of large frequency difference in AC/DC hybrid terminal grid. At present, when it happens, the major measures include primary frequency modulation on the power side and under frequency load shedding on the load side. But now, DC power emergency support, units operating in a pumping condition and large-scale interruptible load can be controlled, and the technologies to control them can also be applied. It is possible to comprehensively upgrade and extend the emergency frequency control technology. This paper systematically analyzes the key technologies that need to be overcome to realize the whole process control of frequency emergency, and emphatically expounds technologies such as fault identification, accurate power loss calculation, multi-line coordination, coordination of many measures, system monitoring and management and so on. Based on the above key and core technologies, the Frequency Emergency Coordination Control System (FECCS) of east China power grid is constructed, which ensures the safe and stable operation of east China power grid and improves the consumption capacity of new energy.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China "Research on Key Technologies of Close-loop Verification for Security and Stability Control System Functions and Reliability of District Grid".

Key words: UHVDC; hybrid AC/DC power grids; multi-infeed DC; large frequency difference; DC power emergency support; interruptible load; multi-line coordination

0 引言

在特高压交直流电网建设过渡期, 电网呈现明

显的“强直弱交”特性^[1], 直流故障大冲击所导致的全网频率、电压及功角稳定问题突出^[2]。华东电网是典型的多直流馈入受端电网, 2015年9月19日, 锦苏直流490万kW双极闭锁, 华东电网频率最低跌至49.56 Hz, 近十年来首次跌破49.8 Hz, 为大电网安全运行敲响了警钟^[3-4]。

基金项目: 国家电网公司总部科技项目资助“分区电网安全稳定控制系统功能及可靠性闭环验证关键技术研究”

随着特高压直流工程的快速发展,在可见的未来,中国将呈现多个大容量多直流馈入受端电网的格局,对于大量接受外部来电的同步电网,面临着频率稳定控制的难题和挑战。之前,多直流馈入受端电网应对大频差事故下的频率稳定,主要是依靠电源侧的一次调频响应以及负荷侧的低频减载措施。在一次调频方面,相关研究集中在一次调频性能分析及评价、控制策略改进^[5-8]等方面;在低频减载方面,相关研究集中在低频减载影响因素分析^[9]、装置技术思路^[10]以及第三道防线低频减载配置方法及方案^[11-13]等方面。但是,直流技术发展迅猛,馈入到受端电网的单回直流输送水平将跃升至1 200万kW^[14]。依靠低频减载措施应对直流闭锁造成的千万千瓦级巨大能量冲击,切负荷量难以承受、社会影响恶劣,存在频率崩溃风险。

与此同时,直流功率紧急支援^[15]、抽蓄切泵^[16]以及可中断负荷^[17-18]为频率稳定控制提供了除低频减载外可快速、精确控制的新资源。综合利用上述可控资源,构建新型频率防控体系,解决特高压直流故障引发的频率稳定问题,成为特高压交直流互联电网背景下非常迫切的重要课题。在此背景下,本文研究了先进适用频率协调控制技术,开发了频率紧急协调控制系统(简称频率协控系统或 FECCS)并在华东电网得到应用,对特高压大受端电网的安全稳定运行具有重要的示范意义。

1 总体思路

通过在目标、时间和空间三个维度上进行拓展,协调解决频率稳定控制难题。在目标维度上,围绕故障演变全过程中的频率稳定、断面越限以及联络线超用等安全稳定问题,协调不同时间尺度和不同空间范围内的各种控制措施,有效防止系统频率崩溃和大功率潮流转移引发的次生灾害;在时间维度上,针对频率稳定形态的时间尺度特征和各类控制资源的时效性,通过毫秒级、秒级和秒级以上的协调控制,实现系统动态过程的全覆盖;在空间维度上,针对特高压直流扰动冲击的高强度和大范围,匹配并整合不同地域、不同电压等级的控制资源,实现大范围立体协同控制。

协调多道防线,掌握直流故障识别、大扰动后系统功率缺额计算以及大频差扰动下多措施协调控制方法。按控制资源模块化设计思路设计交直流混联受端电网频率紧急协调控制系统,如图1所示,并投入工程应用。

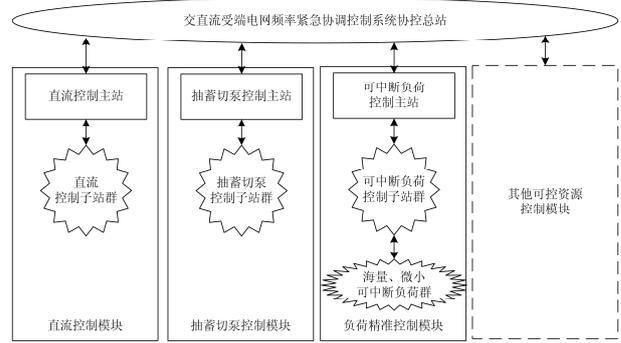


图1 频率紧急协调控制系统架构示意图

Fig. 1 Diagram of FECCS architecture

2 主要研究内容及关键技术

频率协控系统技术研究框架如图2所示,涵盖了故障可靠识别、系统功率缺额准确计算、多防线协同、多措施分类协调、系统监视与管理等事故全过程实时协同监控关键技术。其中,系统监视与管理技术在智能电网调度控制系统上实现;其余关键技术在于电网安全稳定控制装置上实现。

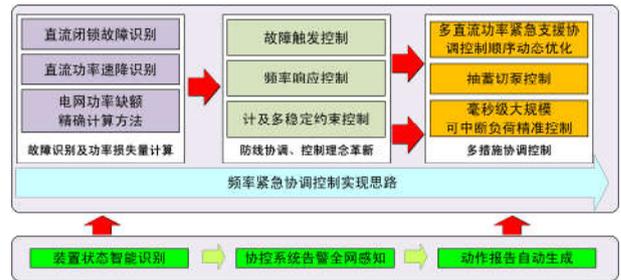


图2 频率紧急协调控制技术研究框架

Fig. 2 Frequency emergency coordination control technology research framework

2.1 故障识别及系统功率缺额计算

2.1.1 故障识别方面

1) 直流闭锁

在电力系统安全稳定导则中^[19],直流输电线路的单、双极故障分别属于第一级、第二级安全稳定标准应考虑的故障扰动。

传统稳控系统依靠直流控保系统(极控或站控)给出的“非正常停运信号”,并结合换流变交流侧电气量识别阀组停运。近年来,已发生多起因网络风暴导致直流控保系统死机事件,由于不能够及时给出“非正常停运信号”,导致稳控系统拒动;另外,在特定的运行方式、直流手动拍停等情况下,传统直流闭锁判也可能无法准确识别。

本文针对信号失效隐患,综合考虑直流紧急拍停、直流换相失败、再启动等工况,研发了如图3

所示的直流闭锁判据。

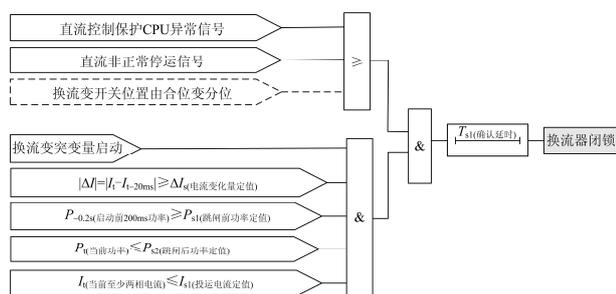


图3 直流换流器故障判据逻辑示意图

Fig. 3 DC converter fault criterion logic diagram

实时数字仿真及现场试验表明, 在接收到相关信号之后, 稳控装置在 10 ms 内即可识别出换流器闭锁故障; 并经受住了直流再启动、连续换相失败和交流系统故障等各种故障形式的考验。新直流闭锁判据快速、准确、可靠。

2) 直流功率速降判据

现有安全稳定导则与计算标准, 并未考虑直流功率速降故障, 随着特高压直流工程的快速发展, 直流速降故障可对交流断面形成显著的冲击, 逼近现有交流断面的稳定极限, 对电力系统的安全稳定构成极为严重的威胁。要求稳控装置快速、准确识别直流功率速降故障, 并迅速实施紧急控制。

由于直流换相失败、再启动等过程伴随着复杂的电气暂态变化, 要快速区分出直流功率速降, 稳控装置一般也要依靠直流控保系统提供“直流功率速降”信号。针对外部信号可能失效的情况以及直流功率速降不同工况(如绝对最小滤波、保护启动双极平衡、共用接地极降功率等)的控制需求, 辅以交流系统的电气量变化特征, 本文研发了直流功率速降判据。

实时数字仿真及现场试验表明, 直流功率速降判据具有与直流闭锁判据相当的快速性, 在直流功率连续多次速降、直流再启动等情形下, 仍然具有良好的准确性和可靠性。

2.1.2 系统功率缺额准确计算方面

直流闭锁、功率速降等故障都可能会产生受端电网难以承受的功率缺额。受端系统功率缺额的准确计算, 是直流大功率冲击后精准选择控制措施和控制量的重要前提。在直流输电工程配套的稳控系统中, 当直流发生闭锁、需要计算功率缺额时, 由于只涉及单回直流、单一故障形式, 考虑的变量少、计算量小。以频率协控系统的典型应用场景华东电网为例, 2018 年底, 馈入直流将多达 11 回, 容量高达 6 976 万 kW, 如何充分考虑直流健全极在全压

/降压运行模式下的不同功率转带能力、计及多直流闭锁和功率速降的时序耦合关系, 在毫秒时间尺度内快速计算得出受端系统的功率缺额, 这在国内安全稳定控制工程应用中是第一次。

本文研发了稳控装置与直流控制保护系统之间的双向光纤数字接口通信技术, 并以此为基础, 首先解决同一直流连续速降功率、同一直流先闭锁或者首先降功率然后闭锁等相对简单情形下的功率缺额计算问题, 进而解决多直流闭锁和功率速降时序耦合等复杂情形下的系统功率缺额计算难题。

对于同一直流短时间内各种原因导致的连续速降功率, 结合直流控保系统的功率调节逻辑和时间特性, 要求其在每次功率速降量超过一定门槛后, 均发出功率速降信号, 并且最后一次信号展宽 500 ms。以如图 4 所示的连续两次直流速降功率为例, 稳控装置结合速降信号和直流功率速降量, 综合计算出功率缺额。

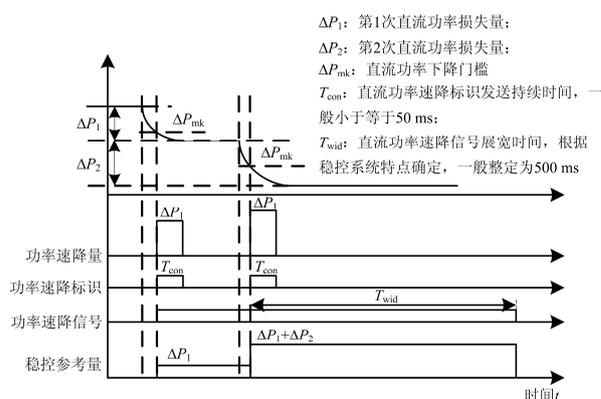


图4 多次直流功率速降判据示意图

Fig. 4 Criterion diagram of several times of DC power drop

对于同一直流先闭锁或者首先降功率然后闭锁, 处理方法是在同一启动周期之内(通常是 5 s)根据闭锁故障和降功率的时序耦合关系、各个换流器的实时状态和功率转带能力, 实时计算得出功率缺额。简化后的工程适用公式为

$$\Delta P = \sum_{i=1}^M P_{i-200\text{ms}} - \sum_{j=1}^N P_{j\text{transferable-max}} - \sum_{k=1}^Q P_{k\text{non-transferable}}$$

式中: $M = N + Q + 1$; ΔP 是直流故障后损失功率; $P_{i-200\text{ms}}$ 是闭锁故障前 200 ms 第 i 个运行换流器的输送功率; $P_{j\text{transferable-max}}$ 是闭锁故障后第 j 个可转带功率的健全换流器的极限传输功率, 工程上, 通过故障前直流极控制模式来预判故障后健全的换流器能否成功转带功率, 表 1 是健全的换流器可否转带功率的逻辑判断表; $P_{k\text{non-transferable}}$ 是第 k 个不具备功率转带能力的换流器的传输功率, 此值根据该换流器

在整个故障过程中是否发生过功率速降故障决定。即：若同一整组内其已发生过功率速降， $P_{k_{non-transferable}}$ 等于确认闭锁故障后、最新一次功率速降后直流控保系统更新的输送功率指令值；若同一整组内未发生直流功率速降， $P_{k_{non-transferable}}$ 等于不可转带的换流器整组动作前 200 ms 功率。

表 1 健全换流器可否转带逻辑判断表

Table 1 Logical method of whether a normal converter can transfer additional power

健全的运行换流变所在极的 控制模式			与故障换流变 是否同极	健全的运行换流 变是否可转带
双极功率 控制	定电流 控制	定功率 控制		
1	0	0		是
0	1	0	是	否
0	0	1		是
1	0	0		是
0	1	0	否	否
0	0	1		否

多直流闭锁和功率速降时序耦合等复杂情形下的系统功率缺额计算，基于前述的单直流功率缺额计算方法，并结合多直流的闭锁或功率速降故障能否在同一个整组时间内演化完毕，并作为后续采取直流功率紧急提升的基础条件，其逻辑简图如图 5 所示。

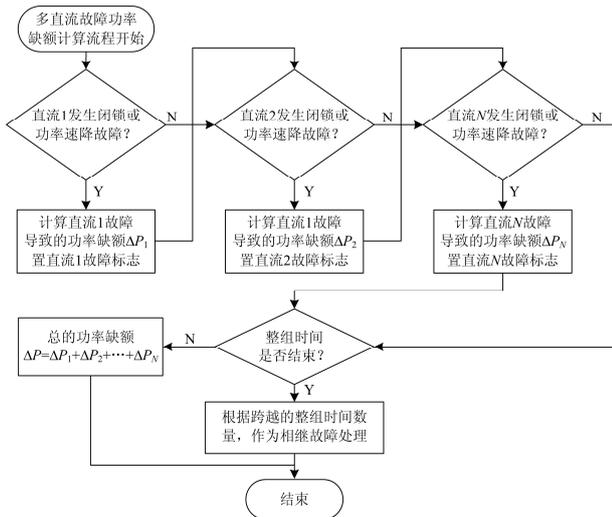


图 5 多次直流故障后的功率缺额计算流程框图

Fig. 5 Diagram of power shortage calculation after multiple DC faults happen

本文研发的考虑直流复杂暂态过程的系统功率缺额计算技术，计及直流功率速降、闭锁和在运换流器功率转带能力，在前述故障判断确认故障之后，能够在 1 ms 之内准确得出电力系统功率缺额，为大

功率缺额后多种措施的功率精确平衡控制提供了基准。

2.2 多防线、多措施协调方面

1) 多防线协调控制方面

如图 6 所示，传统的稳定控制技术在解决频率稳定问题时，一般在二、三道防线分别配置装置。防线间装置孤立，完全依靠离线预先决策，在功能、逻辑以及措施实施等方面的协调性不足。

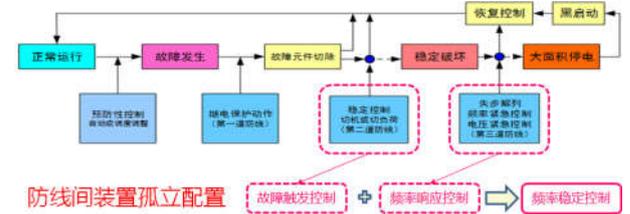


图 6 传统的频率稳定控制思路

Fig. 6 Traditional idea of frequency stability control

本文研究了直流故障触发与频率响应驱动协同的频率稳定协调控制方法，综合运用了基于直流故障触发的紧急控制和频率响应驱动的校正控制。工程上首次实现了直流故障触发与频率响应驱动的一体化集成协调控制。在传统的直流故障触发紧急控制和第三道防线低频减载控制之间，增加配置频率响应驱动的直流紧急提升、抽蓄切泵和快切可中断负荷，作为直流故障触发的紧急控制的后备，提高频率协调控制系统的可靠性。

2) 多措施协调控制方面

特高压直流故障及其引发的系统响应，可能会在毫秒级时间尺度触发多类型、多地点的紧急控制动作，对控制对象的选择和控制时序的确定都有严格要求。图 7 所示为传统局地化控制和本文广域化控制在控制规模方面的直观对比，仅控制数量就已经从数十个发展到数以千计，网络化特征突出。

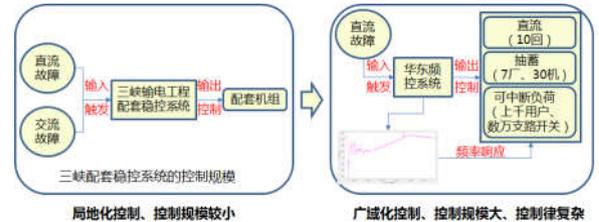


图 7 两种控制模式对比

Fig. 7 Comparison of two control modes

针对广域化控制精准程度高、协调性强等控制需求，本文解决了多种类控制资源的毫秒级控制架构和接口工程实现问题；提出了工程实用的多种类、大数量控制措施毫秒级快速搜索和最优匹配方法，保障了电网故障情况下多种类、多措施量可控资源

的快速、可靠时空协调控制。相关技术问题和控制

逻辑如图 8 所示。

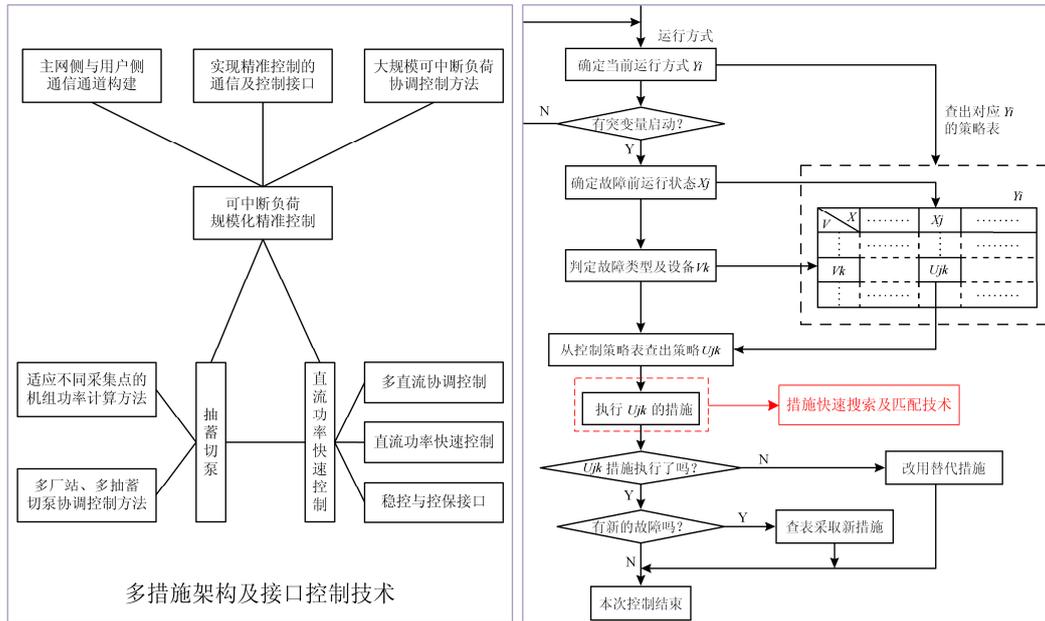


图 8 多资源控制架构、接口及控制量快速搜索及匹配技术

Fig. 8 Technology of multi-resource control architecture, interface and control capacity rapid search and matching

研发的华东电网频率紧急协调控制系统，一期工程于 2016 年 7 月 5 日投运，直流故障情况下可以实现 8 回直流、7 个抽水蓄能电站以及 813 户可中断负荷的紧急控制。如表 2 所示，经二、三期系统扩容，截至 2018 年 5 月，整个系统的控制对象数量接近 2 000，是世界上控制规模最大的电网安全稳定控制系统。该系统可扩展性强，未来 1~2 年，上海、浙江、安徽三省市的大量可中断负荷将陆续接入。

表 2 华东电网频率紧急协调控制系统当前控制规模

Table 2 Current scale of FECCS for east China power grid

资源类型	数量	备注	
直流	6	特高压直流	复奉、锦苏、宾金、灵绍、锡泰、雁淮
	4	常规直流	葛南、宜华、林枫、龙政
抽蓄泵 工况 机组	36	半岭、琅琊山、天荒坪、桐柏、仙居、响水涧、宜兴、溧阳，天荒坪和溧阳各 6 台机，其余站各 4 台机	
可中 断 负荷	1 602	苏南、苏中、苏北 3 大分区的用户负荷终端数量 1 560； 储能电站 2 个、燃煤电站及翻水站约 40 个	

2.3 多目标控制方面

传统紧急控制技术往往独立处理每个稳定控制问题的实时决策，缺少对全网控制措施的动态统筹，可能无法同时满足送受端电网的多个稳定约束。本文重点研究基于直流实时运行功率及提升能力，计

及送、受端电网多稳定约束的多直流紧急协调控制顺序动态优化方法和大规模可中断负荷灵活控制方法。

本文提出一种多直流紧急协调控制顺序的动态控制方法，利用含直流故障形态组合、断面约束条件和被控顺序的策略表，并结合相关元件(断面)实时状态，采用“离线预先决策，实时匹配计算”方式，实现在不同的特高压直流故障下的动态优化控制，解决传统方法按照固定顺序控制，无法动态地满足直流送(受)端电网各种稳定约束的难题。简化后的工程适用策略表如表 3 所示，表中的“关联约束断面”可以是送端或受端的多个关键约束断面。

表 3 多直流紧急协调控制策略表

Table 3 Strategy table of multi-DC emergency coordination control

故障元件及 关联断面约束		直流 1 控制优先级	...	直流 n 控制优先级
直流 1 故障	关联断面 1 约束	—	...	n
	关联断面 2 约束	—	...	3
	...	—	...	1
直流 2 故障	关联断面 1 约束	1	...	n
	关联断面 2 约束	2	...	1
	...	n	...	1
...				

本文提出一种应对特高压直流故障冲击的可中断负荷灵活控制方法,根据发生故障的直流在电网中的地理和电气位置,灵活选择可中断负荷的控制范围和控制容量,避免大规模控制引发的交流线路过载、断面越限等次生灾害。策略表设计及简化思路与多直流紧急协调控制策略表相似。

本节所述多目标协调控制技术,均已应用到频率协控系统的策略制定和策略实施等环节。比如,当锦苏直流故障时,在切负荷时优先调用江苏特别是苏州地区的可中断负荷资源,最大程度上减少由于采取控制而导致的潮流涌动。

2.4 频率协控系统监视与管理方面

完善的监视和管理手段是保障频率协控系统安全可靠运行的重要基础。本文结合具体需求,开发了装置及系统运行状态智能识别、运行信息各级调度共享及告警信息全景推送、动作报告自动生成等多种功能的监视与管理,其技术框架及关键技术如图9所示。

2.4.1 多级调度间信息共享

特高压直流故障导致的功率损失量大、影响范围广;频率协控系统设备分属网、省、市等多级调度,需要更强的平台和更全面的信息,以便对特高压跨区互联电网和大型控制系统进行监视与管理。

本文基于广域云服务总线开发了新的管理平台和高级应用功能,实现了装置状态和系统运行状态的智能识别以及相关信息的国调、各分中心、各省市调的实时推送,便于各级调度运行人员实时感知掌握全网状态,及时进行相关处置。

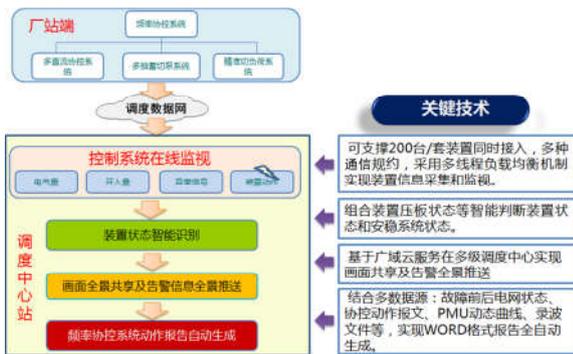


图9 监视与管理系统的技术框架

Fig. 9 Framework of monitoring and management system

2.4.2 动作报告自动生成

以往稳控系统动作,需要设备所属单位人员赶赴各个厂站现场调阅、打印相关信息。信息汇总后,由相关人员基于个人经验整理出系统动作及分析报告。人工整理报告耗费人力多、用时长,不便于快

速准确掌握系统动作情况。

为解决这一问题,本文研发了频率协控系统的动作报告自动生成技术。综合故障前电网运行工况、装置动作报文和录波、PMU记录的动态数据等,运用数据分析挖掘技术,对故障前后电网信息进行分析比对,可以完整展示故障过程中电网关键节点频率的动态变化过程以及频率协控系统的动作行为。

3 系统整体性能

为验证系统整体性能,2017年5月24日,在华东电网进行了大功率冲击功能验证带电试验。在特高压锦苏直流300万kW闭锁后,频率协控系统迅速动作采取功率平衡控制,如图10所示,系统频率仅降低0.05Hz(离线仿真计算表明,如果频率协控系统不动作,系统频率最低跌落可达0.18Hz)。

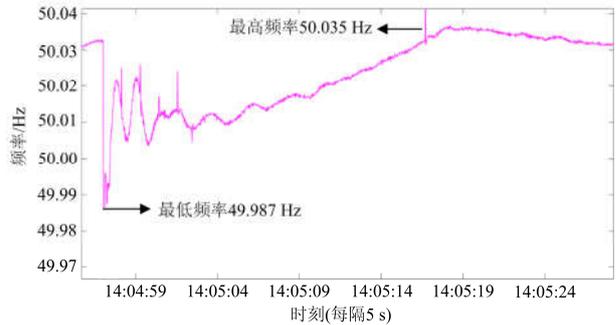


图10 5.24 华东电网频率录波曲线

Fig. 10 Frequency curve of east China power grid on May 24th

各种资源的实际控制量和动作到位时间如表4所示。

表4 三种控制资源的实际动作情况

Table 4 Actual action of three kinds of control resources after DC blocking fault

控制类型	实际动作量/万kW	实际动作时间/ms
多直流紧急控制(7回)	68	230~280
抽蓄切泵(7站、7机)	202	200~240
精准负荷控制(233户)	26	196~245

注:由于直流控制保护系统、开关及关联通信通道等方面特性存在差异,同一种控制资源的控制时间并不完全相同,表中给出了实测时间的最小和最大数值。

可见,虽然控制规模扩大、控制资源数量增多,频率协控系统仍然能够在300ms之内完成多种措施的协同控制,这为其他大型电网频率紧急协调控制系统建设提供了很好的技术储备和应用参考。

4 结语

本文针对大频差扰动下多直流馈入受端电网的

频率稳定控制难题, 面向特高压直流快速发展的工程实际需求, 坚持自主创新, 在多故障场景下的功率损失量精确计算方法、融合事件驱动与响应驱动的频率协调控制方法等方面取得了原创性研究成果, 在国际上引领了大扰动频率稳定性的控制技术发展和工程实践。

结合华东电网频率紧急协调控制系统建设实际, 实现了本文成果的工程实用化, 为应对直流故障冲击情况下的电网频率稳定控制提供了装备和技术支撑, 对大电网安全运行起到了关键保障作用, 在推动能源结构调整、资源优化配置、节能减排、电网输送能力提升等方面具有重要意义。

随着山东、上海、河南等省级电网及所在大区电网频率以及精准负荷控制需求的增加, 本文成果在特高压直流落点电网的安全稳定控制中有较为广泛的应用前景。

参考文献

- [1] 郑超, 马世英, 申旭辉, 等. 强直弱交的定义、内涵与形式及其应对措施[J]. 电网技术, 2017, 41(8): 2491-2498.
ZHENG Chao, MA Shiyong, SHEN Xuhui, et al. Definition, connotation and form of strong HVDC and weak AC and countermeasures for stable operation of hybrid power grid[J]. Power System Technology, 2017, 41(8): 2491-2498.
- [2] 李明节. 大规模特高压交直流混联电网特性分析与运行控制[J]. 电网技术, 2016, 40(4): 985-991.
LI Mingjie. Characteristic analysis and operational control of large-scale hybrid UHV AC/DC power grids[J]. Power System Technology, 2016, 40(4): 985-991.
- [3] 李兆伟, 吴雪莲, 庄侃沁, 等. “9.19”锦苏直流双极闭锁事故华东电网频率特性分析及思考[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(7): 149-155.
LI Zhaowei, WU Xuelian, ZHUANG Kanqin, et al. Analysis and reflection on frequency characteristics of East China Grid after bipolar locking of “9-19” Jinping-Sunan DC transmission line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(7): 149-155.
- [4] 邓晖, 楼伯良, 华文, 等. 特高压直流闭锁后华东电网频率稳定特性研究[J]. 智慧电力, 2017, 45(8): 39-44.
DENG Hui, LOU Boliang, HUA Wen, et al. Frequency stability analysis of East China Power Grid due to HVDC block[J]. Smart Power, 2017, 45(8): 39-44.
- [5] 宣晓华, 尹峰, 张永军, 等. 特高压受端电网直流闭锁故障下机组一次调频性能分析[J]. 中国电力, 2016, 49(11): 140-144.
XUAN Xiaohua, YIN Feng, ZHANG Yongjun, et al. Analysis of unit primary frequency modulation performance under dc closed-lock fault of UHV receiving end grid[J]. Electric Power, 2016, 49(11): 140-144.
- [6] 贺颖, 潘杨, 陶骞, 等. 考虑调频死区的电网一次调频能力评价指标[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(19): 85-90.
HE Ying, PAN Yang, TAO Qian, et al. Evaluation index of power grid primary frequency modulation considering dead zone[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(19): 85-90.
- [7] 陶骞, 贺颖, 潘杨, 等. 电力系统频率分布特征及改进一次调频控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(17): 133-138.
TAO Qian, HE Ying, PAN Yang, et al. Characteristics of power system frequency abnormal distribution and improved primary frequency modulation control strategy[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(17): 133-138.
- [8] 沈丛奇, 归一数, 程际云, 等. 快动缓回一次调频策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(13): 158-162.
SHEN Congqi, GUI Yishu, CHENG Jiyun, et al. A primary frequency regulation control strategy with fast-moving and delayed-returning technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(13): 158-162.
- [9] 樊艳芳, 钟显, 常喜强, 等. 频率的时空分布对低频减载的影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 55-60.
FAN Yanfang, ZHONG Xian, CHANG Xiqiang, et al. Research of the UFLS under the frequency characteristics of temporal and spatial distribution[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 55-60.
- [10] 李祝昆, 宣筱青, 叶振风, 等. 智能变电站架构下的低频低压减载装置技术思路[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(10): 19-22.
LI Zhukun, XUAN Xiaqing, YE Zhenfeng, et al. Technical ideas of low frequency and low voltage load shedding devices in smart substation architecture[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(10): 19-22.
- [11] 黄文涛, 邓长虹, 汪志强, 等. 基于最优频率轨迹的电力系统低频切泵方案[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(11): 14-18.
HUANG Wentao, DENG Changhong, WANG Zhiqiang, et al. Under frequency pump shedding scheme based

- on optimal trajectory curve of frequency in power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(11): 14-18.
- [12] 侯玉强, 方勇杰, 杨卫东, 等. 基于多代理技术的低频低压减负荷控制[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(4): 1-5.
HOU Yuqiang, FANG Yongjie, YANG Weidong, et al. A new method of UFLS/UVLS based on multi-agent technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(4): 1-5.
- [13] 赵强, 刘肇旭, 张丽. 对中国低频减载方案制定中若干问题的探讨[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(11): 48-53.
ZHAO Qiang, LIU Zhaoxu, ZHANG Li. Discussions on the several problems of under-frequency load shedding scheme in China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(11): 48-53.
- [14] 杨万开, 印永华, 班连庚, 等. ± 1100 kV 特高压直流系统试验方案研究[J]. 电网技术, 2015, 39(10): 2815-2821.
YANG Wankai, YIN Yonghua, BAN Liangeng, et al. Study on ± 1100 kV UHVDC system commissioning test program[J]. Power System Technology, 2015, 39(10): 2815-2821.
- [15] 郭小江, 马世英, 卜广全, 等. 直流系统参与电网稳定控制应用现状及在安全防御体系中的功能定位探讨[J]. 电网技术, 2012, 36(8): 116-123.
GUO Xiaojiang, MA Shiying, PU Guangquan, et al. Present application situation of DC system participating in power system stability control and discussion on position of its functions in security defense system[J]. Power System Technology, 2012, 36(8): 116-123.
- [16] 李琳, 周霞, 罗剑波, 等. 适用于频率安全稳定的低频切泵及减载协调优化方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(13): 26-31.
LI Lin, ZHOU Xia, SUN LUO Jianbo, et al. A coordination and optimization method for under frequency load shedding and pump shedding suiting frequency safety and stability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(13): 26-31.
- [17] 殷伟, 颜云松, 潘琪, 等. 精准负荷控制系统的快速通信接口方案设计[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(10): 143-149.
YIN Wei, YAN Yunsong, PAN Qi, et al. Design of fast communication interface for precision load control system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(10): 143-149.
- [18] 罗建裕, 李海峰, 江叶峰, 等. 基于源网荷友好互动的精准负荷控制系统[J]. 电力工程技术, 2017, 36(1): 25-29.
LUO Jianyu, LI Haifeng, JIANG Yefeng, et al. Source network load friendly interactive and precise load control system based on stability control technology[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(1): 25-29.
- [19] 电力系统安全稳定导则: DL/T 755—2001[S]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
Guide on security and stability for power system: DL/T 755—2001[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2001.

收稿日期: 2018-01-15; 修回日期: 2018-06-15

作者简介:

董希建(1982—), 男, 通信作者, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统安全稳定控制; E-mail: dongxijian@sgepri.sgcc.com.cn

罗剑波(1963—), 男, 博士, 研究员级高级工程师, 主要研究方向为电力系统安全稳定控制; E-mail: luojianbo@sgepri.sgcc.com.cn

李雪明(1965—), 男, 硕士, 研究员级高级工程师, 主要研究方向为电力系统安全稳定控制, E-mail: lixueming@sgepri.sgcc.com.cn

(编辑 葛艳娜)