

电源送出安全稳定控制系统典型方案及装置主辅运 设置原则分析

李惠军^{1,2}, 汤奕¹, 李雪明², 曹一中²

(1. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096; 2. 国网电力科学研究院/南京南瑞集团公司, 江苏 南京 210003)

摘要: 研究了与不同送出电网相匹配的安全稳定控制系统方案及各方案下安控装置的主辅运原则。分析了单点大电源远距离输电、多电源跨区域输电以及地区小网通过联络线向主网送电等不同送出电网存在的突出稳定问题; 指出了为保证安控措施的恰当性与经济性, 不同电网对安控系统的差别要求。通过对安控方案在拓扑结构、通道组织、站间交互信息、故障决策算法等方面的对比说明, 给出了送出电网各种典型的安控设计方案, 并分析了不同方案不同的主辅运设置原则。针对安控系统运行管理模式, 给各方案提出了厂站间装置接点信号交互、双套装置柜间数据交换等建议。

关键词: 电源送出; 安全稳定控制系统; 配置原则; 主辅运; 接点信号交互; 数据交换

Analysis of the typical schemes for security and stability control systems of electric power transmission and the devices' main and auxiliary operation configuration principles

LI Hui-jun^{1,2}, TANG Yi¹, LI Xue-ming², CAO Yi-zhong²

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. State Grid Electric Power Research Institute, NARI Group Corporation, Nanjing 210003, China)

Abstract: The paper studies two aspects, including the security and stability control programs matching for different transmission networks and the relevant devices' main and auxiliary operation configuration principles. Typical stability issues of three grids have been analyzed. The three grids include grid of single point big power long-distance transmission and grid of multiple power cross regional transmission and grid of small area providing power for main network via tie line. Different grids need different stability control systems to ensure the appropriateness and economy of security and stability control measure. Through contrasting several aspects of different stability control systems, including topological structure, channel organization, information exchange and fault decision algorithm, the paper gives several typical stability control system solutions and analyzes the main and auxiliary operation configuration principles of each solution. According to different management modes, the paper provides several suggestions, including device signal contactor interaction, cabinet data exchange of devices, etc.

Key words: power transmission; security and stability control systems; configuration principle; main and auxiliary operation; contactor signal exchange; data exchange

中图分类号: TM712 文献标识码: B 文章编号: 1674-3415(2011)04-0141-05

0 引言

近些年各国电力系统发生了多起影响较大的大面积停电事故^[1]。事故原因分析说明除加强电网、电源的一次建设外, 合理配置安全稳定控制系统也是防止发生大面积停电和电网崩溃事故的重要手段^[2]。目前我国提出发展“一特四大”电网的新战略: 建设以特高压为骨干网架, 各级电网协调发展的坚强国家电网, 促进大煤电、大水电、大核电、大可再生能源基地集约化开发, 实施更大范围内能

源资源优化配置^[3]。此新战略表明我国电网结构处于快速发展的时期, 因此, 为了保障电网的安全稳定运行, 需要更为重视新的电网发展时期中安全稳定控制系统的作用。

作为保障电网安全稳定的第二道防线^[4], 安全稳定控制系统一般由多个厂站组成, 每套系统都是根据各电网存在的特定问题定制生产的。由于功能的差异性, 安控系统在保障电网安全稳定运行的同时, 也给运行管理部门提出了很高的要求, 因此对安控系统的设计原则尽量做到统一与规范显得尤为

重要。本文介绍了电源送出安控系统的典型设计方案及与之匹配的双套系统主辅运原则，并分析了各方案的优缺点，提出了相应的完善建议。

1 电源送出安控系统典型方案及主辅运方式

我国幅员辽阔，经济负荷中心主要集中在东部沿海地区，而水力、煤炭资源又多集中在中西部地区。随着电网的建设，西部大水电、坑口电厂群通过超高压、特高压交直流通道远距离送电至东部负荷中心，安控系统对于保证系统稳定运行、提高通道送电能力起到了重要作用^[5]。此外，在我国部分地区小水电丰富，但地区可消纳负荷容量小，局部电网与主网联系薄弱，系统抗干扰能力弱，也需要安控系统在紧急情况下保证系统内大部分负荷的正常运行。

电网安全稳定控制系统装置一般都考虑双套配置。一般安控系统的控制措施针对的不是单一元件，例如同时控制同一电厂的多台机组，为防止一些情况下双套装置决策差异导致实际控制效果失当，必须考虑同一厂站双套装置决策优先权问题。双套装置主辅运行就是基于上述考虑的结果，在一套装置动作后闭锁另套装置。根据安控系统设计功能，主辅运功能可设置在执行站，也可设置在主站，依据是安控系统控制措施所涉及可控电厂顺序是否固定。若涉及切机电厂顺序固定，在各执行站设置主辅运功能；若电厂顺序随机选择，则必须在主站设置主辅运功能。

下面结合实例分别介绍单点大电源送出系统、多电源跨区域送出系统以及孤网小系统的安控方案，并对各方案的特点进行分析。

1.1 单点大电源送出系统方案

我国中西部地区建有众多大型水力枢纽和大型坑口电厂，其中部分电厂甚至是专厂、专线、专供方式跨区域向负荷中心供电。典型的水电站例如三峡水力枢纽、二滩电站，坑口电厂如山西阳城电厂、内蒙托克托电厂等。此类单点大电源送出系统电压等级高，电网结构较清晰，但由于输电通道地域跨度大，一般都存在暂稳问题。对于此类系统，一般在各厂站配置双套安控装置，串行组成安控系统。正常情况下厂站间尽量不交换数据，紧急情况下，各站不结合其他厂站数据即可判别本站出线故障并远切机组。

以阳城电厂送出为例，电厂一、二期共 6 台 350 MW 及 2 台 600 MW 机组，通过三回 500 kV 线路经东明开关站补偿后，送电江苏。与之匹配安控系统包括阳城电厂、东明开关站及三堡变等三厂站，

厂站安控装置间通过 2M 通道互联，主要解决在各种方式下，系统存在的暂态稳定问题。由于电网结构简单，管理人员离线计算好系统在不同方式及断面下，线路故障需切机组量，东明、三堡两站装置与电厂正常情况下无需传递机组信息，变电站出线故障的紧急情况下，东明或三堡变装置依据策略表给定的切机台数，向电厂发送切机台数命令。该系统结构简图见图 1。

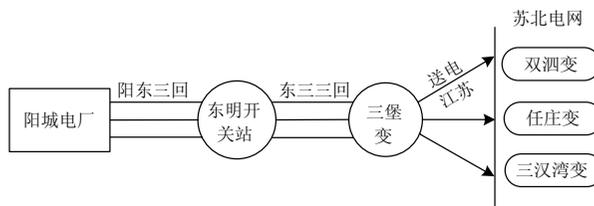


图 1 阳城电厂送出系统结构图

Fig.1 Power structure of Yangcheng power plant

东明、三堡两站双套装置为并列运行，阳城电厂装置为主辅运行。对于电厂而言，两套装置同时收到命令，由于采取了主辅运设计，若主运装置动作，将闭锁辅运装置，避免了采样误差等原因导致双套装置同时动作而过切机。例如：电厂双套装置同时收到切除两台 350 MW 机组命令，双套装置采样存在差异（见表 1），电厂根据切机从大到小原则，若双柜同时出口，则将切 3 台机，措施失当；采取主辅运方式，只有 #1 柜动作，切除 2 台大机，满足要求。

表 1 装置采样数据及决策结果

Tab.1 Devices' sampling data and decision result

#1 柜采样及决策（主运柜）			#2 柜采样及决策（辅运柜）		
#1 机	#2 机	#3 机	#1 机	#2 机	#3 机
354 MW	352 MW	350 MW	355 MW	348 MW	350 MW
切#1 机、#2 机			切#1 机、#3 机		

类似送出系统电网结构简单，稳定问题单一。安控方案中各站装置功能相对独立，更多的是基于本站元件信息考虑稳措问题，方案易于理解，运行方便，提高了安控系统的可靠性。

1.2 多电源跨区域送出系统方案

中西部一次能源丰富省份电力送出模式更多的是电厂出线汇集至枢纽变电站，通过超高压、特高压交直流通道送出。内蒙火电机群汇集至丰泉 500 kV 变电站，通过若干回 500 kV 线路送电华北；西北黄河上游水电站及各大火电厂出力通过兰州东、平凉、乾县 750 kV 交流通道，再经德宝直流实现与华中电网互连；南方电网六交四直西电东送通道^[6]无不是这种模式。对于此类多点电源送出系统，

系统有如下明显的特点: 互联电网规模大, 大功率远距离输电导致稳定问题突出^[7]; 不同电厂机组参数特性差异大, 电厂至枢纽变电站电气距离差异也较大, 系统送出线路故障, 切机涉及的电厂顺序有严格要求。另外, 系统紧急情况下切机涉及电厂多, 必须保证实际措施的过切量在允许范围内。

解决该类复杂系统的稳定问题, 必须在主站与各执行站双套装置间配置独立通道, 组成星形结构安控系统, 电厂将机组信息分别上送至主站, 主站装置对各电厂可切机组出力进行统计并全局排序, 根据系统全局需切容量, 主站实时匹配切机涉及电厂及各电厂切机台数, 各电厂按出力从大到小切除机组。一般控制措施有两个原则: 第一是电厂按机组出力大小顺序向主站上送机组信息, 第二是各电厂设置优先级顺序, 高优先级电厂机组不够切, 再切除次优先级电厂机组^[8]。安控系统结构见图 2, 其中虚线代表各执行站向主站上送机组信息, 实线代表主站根据需切容量得到切机信息并向各执行站下发切机台数命令。

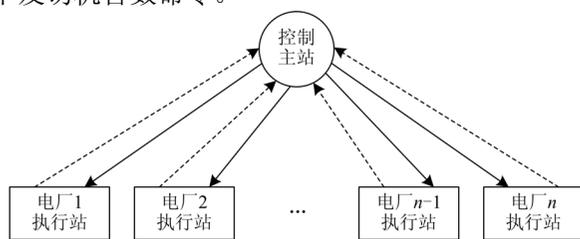


图 2 安控系统拓扑结构图

Fig.2 Topological structure of the security and stability control systems

依据上述总体原则, 主站装置具体实施如下:

1) 设系统共 m 个电厂, 可切机组共 n 台, 各电厂机组出力定义为 P_{ij} (其中 i 代表电厂, j 代表在电厂内机组按出力大小排序号)。定义一数组 A , 存储各电厂机组信息。存储顺序有如下要求: 首先根据电厂优先级排序, 被切优先级高电厂存储在前, 优先级低电厂在后; 其次根据每个电厂可切机组台数分配存储单元, 在给各电厂分配的单元内, 按机组出力大小先后存放机组信息, 出力大机组存储在前, 出力小的存储在后。假设优先级最高和最低电厂各有 2 台机组可切, 则 $P_{11} > P_{12}$ 、 $P_{m1} > P_{m2}$ 。见表 2。

2) 定义另一数组 B , 大小与数组 A 相同, n 台可切机组则 n 个存储单元。其每个单元值如下: $B[k] = \sum A[i]$ ($k > 0, 1 \leq i < (k+1)$), 代表此编号之前优先被切除机组出力之和。见表 2。

系统发生故障, 根据实时决策的系统需切机组

容量 P , 主站装置首先匹配数组 B 中单元值, 当 $B[k] < P < B[k+1]$ 时, 共需切 $(k+1)$ 台机组, 再根据切机总台数匹配数组 A 中涉及电厂及各电厂具体切机台数。假设 $(k+1) = 3$, 则本套装置远切电厂 1 中 2 台大机及电厂 2 中 1 台大机。

表 2 装置决策示例

Tab.2 The device analysis example

存储单元编号	1	2	3	4	5	...	$N-1$	n
电厂优先级排序	电厂 1		电厂 2			...	电厂 m	
A: 各机组出力	P_{11}	P_{12}	P_{21}	P_{22}	P_{23}	...	P_{m1}	P_{m2}
B: $\sum A[i]$	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	...	P_{n-1}	P_n

系统主辅运设置仍采用主站两套装置并列运行, 电厂装置主辅运行。各电厂侧双套装置同时收到主站切机命令, 主运柜动作, 同时闭锁另柜。这保证了不论系统大小, 电厂多少, 虽然电厂双套装置上送主站信息存在微小误差, 但经主站统筹, 在切机涉及电厂中, 只有被切优先级最低的电厂双套装置动作结果存在一台机组差异的可能性, 经济可靠。

这种方案优点是: 主站能够很好把握系统状态, 措施精确, 系统故障后也较容易分析安控系统的动作行为。但系统各厂站耦合度高也给工程实现及运行管理带来一定难度。系统厂站间大量交互信息, 对通道实效性有较高要求。载波、微波等通信平台, 传送的信息量少, 可靠性、实时性较差^[9], 基本不能满足要求, 必须使用 2 M 数字通道。另外, 此方案对站间物理通道及装置运行可靠性要求高。由于主站装置并列运行, 任一通道或装置异常都会导致主站双套装置决策依据出现较大差异而措施失当, 因此安控系统任一环节出现问题都必须退出一整套系统而不是某个厂站一套装置, 给调度部门带来了大量的工作量。

1.3 孤网小系统方案

对于一些孤立或者与主网联系薄弱的地区小网, 例如湖北恩施电网、广西百色电网, 网内负荷容量小, 水电丰富, 与外网联系薄弱, 电网可能存在频率电压稳定问题。由于系统惯性小, 系统故障后, 安控系统采取切机 (或切负荷) 措施的同时, 必须保证机组 (或负荷) 切除后网内功率的平衡, 否则将导致系统频率、电压在较大范围内波动, 有时甚至造成切机、切负荷、再切机、再切负荷的恶性循环, 直至系统崩溃。

该类电网配置的安控系统结构与多电源跨区域送出系统相同，主站与各电厂仍是双套配置，依旧是星形结构。但由于电网的差异及存在问题的不同，安控系统方案差别较大。本方案应考虑以下两个关键问题：1) 多电源跨区域送出系统方案可以理解为3级关系：主站、电厂、机组，但本方案中各电厂地位平等，安控主站只关注系统内各机组的信息，而不关注电厂多少及优先级，安控装置只有两级关系：主站、机组。2) 切机不再要求切机台数最少，而是被切机组出力之和要尽量匹配系统富余出力。本方案中，主站将各电厂上送的所有机组出力进行组合与排序。假设系统可切机组共 m 台，则机组出力随机组合后可得到 n 个数值， $n = C_m^1 + C_m^2 + C_m^3 + \dots + C_m^m$ ，将 n 个值按一定算法从小到大排序。故障切机时按最小过切原则匹配最合适的实际量，直接指定切除相应电厂具体编号机组。

安控系统结构见图3，其中虚线代表各执行站向主站上传机组信息，实线代表主站根据需切容量得到切机信息，直接指定切除各电厂具体编号机组。

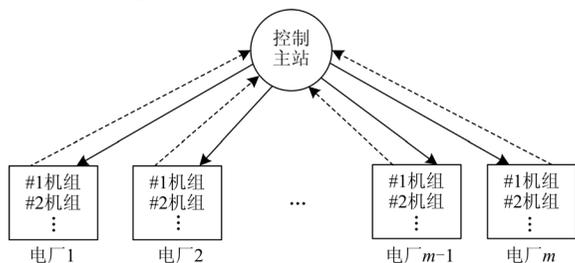


图3 安控系统拓扑结构图
Fig.3 Topological structure of the security and stability control systems

根据此方案，主站两套装置排序的结果可能差异很大。例如：系统元件故障需要切机容量为 P WM，主站A柜决策结果为A电厂#1机与B电厂#2机出力和最匹配 P ，而B柜决策结果为C电厂#2机与D电厂#3机出力和最匹配 P 。若仍采用主站双套装置并列运行，执行站主辅运行方式，则4个电厂均只有一套装置动作，主辅运功能实际未起作用，各电厂均切除一台机组，严重超过预想措施。因此必须在主站采取主辅运方式，执行站并列运行方式，主站一套装置动作，立即闭锁另柜措施。

本方案优点是：措施精确，且系统中通道或装置任一节点异常，无需退出其他厂站装置，只需将正常一套系统切换至主运。存在一弊端，主站及执行站装置双套配置，主站双套装置都参与了决策，但任何情况下执行站只有一套装置接收到命令，没有发挥执行站双套配置的目的，增加了拒动的风险。

另外，随着机组的增多，机组组合与排序的计算量急剧增加，要求装置有较高的处理能力^[10]。

2 不同安控方案及主辅运方式下的方案建议

对于单点大电源送出系统方案，系统正常运行，各厂站装置间无需交换数据，只有在紧急情况下厂站间传递切机台数命令。根据此特点，厂站间稳控装置完全可以实现物理隔离，厂站间切机命令可通过接点方式传递。变电站输出切机接点命令，接点信号接至载波机经载波通道，或经专用数字编码装置编码后经2M通道传至电厂，电厂解析后输出接点代表切机台数命令，进一步简化了方案。

对于多电源跨区送出系统方案和孤网小系统方案，可用同一种措施解决各自存在的不足：主站双套装置进行数据交换。即1) 多电源跨区送出系统方案中，装置彼此交换执行站上送的信息。主站双套装置并列运行，均将接收到的执行站信息转发至另柜。主站任一装置一旦判出本套系统内某个节点出现异常，即从另柜数据中截取所需节点的相关信息，参与本柜逻辑判断，双套装置决策的依据保持了一致。采取此方案后，系统任一装置或通道因故退出，本套系统其他节点不必退出，减轻了调度人员的工作量，某些系统牵涉不同管理部门，还可避免不同管理部门间的接口^[11]。2) 对于孤网小系统方案，主站双套装置交换决策的命令信息。紧急状态下若主运装置先动作，主运装置将决策命令向各执行站发送的同时，也向辅运装置转发，辅运装置接收到主柜命令，立即闭锁本柜判断，同时将主柜命令向本套系统各执行站转发，反之亦然。此措施保证了安控系统每套装置在关键时刻均参与措施。

3 结语

我国首个特高压输变电工程“1000 kV 晋东南—南阳—荆门特高压交流试验示范工程”已经投入运行；淮南-上海、锡盟-上海、陕北-长沙三大特高压交流输变电工程及四川向家坝-上海奉贤±800 kV 直流示范工程等若干特高压工程已处于建设阶段^[12]；甘肃、内蒙、苏沪地区将建成3个千万千瓦级大型风力发电基地。大送端、大受端、全国联网的电网雏形已经形成。可靠、规范的安全稳定控制系统将为特高压电网的安全稳定运行提供支撑与保障，将在以特高压为骨干网架的智能电网建设中发挥重要作用。

参考文献

[1] 薛禹胜, 费圣英, 等. 极端外部灾害中的停电防御系

- 统构思[J]. 电力系统自动化, 2008, 32 (9): 1-6.
- XUE Yu-sheng, FEI Sheng-ying, et al. Upgrading the blackout defense scheme against extreme disasters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32 (9): 1-6.
- [2] 陈兴华, 吴烈鑫, 吴国丙, 等. 安全稳定控制系统切负荷量分配算法[J]. 继电器, 2007, 35 (11): 26-29. CHEN Xing-hua, WU Lie-xin, WU Guo-bing, et al. Distributing algorithm of load-shedding for security and stability control system[J]. Relay, 2007, 35 (11): 26-29.
- [3] <http://www.sgcc.com.cn/qywh070813/zonglan/fzzl/>.
- [4] 电力系统安全稳定控制技术导则[S].
- [5] 杨海涛, 丁茂生, 等. 电力系统动态稳定机理和稳定措施分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32 (14): 35-39. YANG Hai-tao, DING Mao-sheng, et al. Analysis on power system dynamic stability mechanisms and stabilizing measures[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32 (14): 35-39.
- [6] 李大志, 孙宏斌, 等. 南方电网交直流混合实时状态估计的应用[J]. 电力系统自动化, 2009, 33 (19): 106-110. LI Da-zhi, SUN Hong-bin, et al. Application of an AC/DC hybrid real-time state estimator in China southern grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33 (19): 106-110.
- [7] 高宗和, 陈刚, 等. 特高压互联电网联络线功率控制[J]. 电力系统自动化, 2009, 33 (15): 51-55. GAO Zong-he, CHEN Gang, et al. Active power control for tie-lines in UHV interconnected power grid part one AGC control strategies[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33 (15): 51-55.
- [8] 李惠军, 李邦峰, 等. 海口电厂“大代小”技改工程安全稳定控制系统的设计与实施[C]. //中国电机工程学会 2006 年学术年会. 郑州: 2006.
- [9] 宋锦海, 李惠军, 李雪明, 等. 安全稳定控制系统通讯及其测试技术. 电力系统保护与控制, 2008, 36 (12): 74-77, 78. SONG Jin-hai, LI Hui-jun, LI Xue-ming, et al. Telecommunication technology and its test of security and stability control system[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36 (12): 74-77, 78.
- [10] 桂勋, 姚兰, 等. 海量 COMTRADE 数据并行解析算法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33 (15): 62-66. GUI Xun, YAO Lan, et al. A massive COMTRADE data parallel parsing algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33 (15): 62-66.
- [11] 刘有飞, 熊建华. 江西电网 1.21 事故分析及启示[J]. 华中电力, 2008, 21 (6): 28-31. LIU You-fei, XIONG Jian-hua. Discussion on Jiangxi power grid 1.21 accident and suggestions[J]. Central China Electric Power, 2008, 21 (6): 28-31.
- [12] <http://economy.enorth.com.cn/system/2009/01/19/003869118.html>.

收稿日期: 2010-03-10; 修回日期: 2010-05-22

作者简介:

李惠军 (1978-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统安全稳定控制; E-mail: njgllhj@126.com

汤奕 (1977-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为智能电网及电力系统稳定分析与控制;

李雪明 (1965-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统安全稳定控制。

(上接第 109 页 continued from page 109)

- [5] Siemens. Guizhou-Guangdong ± 500 kV DC transmission project: DC filter protection C/P software design report[R]. Germany: Siemens, 2002.
- [6] XJ-SIMENS. Guizhou-Guangdong II line ± 500 kV DC transmission project: DC filter protection parameters and settings[S]. XJ-SIMENS, 2007.
- [7] 朱韬析, 王宁宁, 郭卫明, 等. 交流滤波器电容器不平衡保护在南方电网直流输电系统中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(20): 102-105. ZHU Tao-xi, WANG Ning-ning, GUO Wei-ming, et al. The application of AC filter C1 unbalance protection in CSG DC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(20): 102-105.
- [8] 李慧杰, 李啸骢, 刘超, 等. 高压直流输电系统交流侧谐波分析及滤波配置的探讨[J]. 继电器, 2005, 33(6): 70-72. LI Hui-jie, LI Xiao-cong, LIU Chao, et al. Analysis of harmonics on the AC side of HVDC power transmission system and discussion of the filter configuration[J]. Relay, 2005, 33(6): 70-72.
- [9] 朱韬析. 提高南方电网直流保护动作可靠性的建议[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(5): 64-67. ZHU Tao-xi. Suggestions to improve the reliability of HVDC protection in CSG[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(5): 64-67.
- [10] 辛晋渝, 刘念, 郝江涛, 等. 故障电流中衰减直流分量的滤波算法研究[J]. 继电器, 2005, 33(13): 10-12. XING Jin-yu, LIU Nian, HAO Jiang-tao, et al. Research of decaying DC removal algorithms in fault current[J]. Relay, 2005, 33(13): 10-12.

收稿日期: 2010-03-10; 修回日期: 2010-05-29

作者简介:

程江平 (1976-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事高压直流输电系统运行分析与管理工作. E-mail: cjp7876@sina.com.cn