

电厂黑启动方案及其系统试验

严奉军,王 宁

(贵州电力调度通信局,贵州 贵阳 550002)

摘要: 电网全部或部分因故障停运后,采用黑启动方案,通过系统中具有自启动能力的机组带动无自启动能力的机组,可实现整个电网的恢复。介绍了贵州引子渡电厂黑启动方案的理论依据和实施过程。对恢复方式中可能出现的过电压、自励磁等问题进行了分析计算,同时介绍了黑启动过程中为确保黑启动顺利完成应注意的有关负荷调整、频率电压控制、继电保护配合等重要问题,并给出了引子渡电厂黑启动方案具体实施的 4 个具体步骤:试验方式调整、电厂自带厂用电、地区网恢复部分负荷、电网完整性恢复。描述了该电厂 2005 年的具体试验过程及实时运行状况。试验结果表明,该方案具有可操作性,可作为系统全停后快速启动的一种应急预案。

关键词: 电网; 黑启动; 系统恢复

中图分类号: TM732

文献标识码: B

文章编号: 1006-6047(2007)01-0122-03

0 引言

黑启动是指整个电网因故障停运后,不依靠外部网络帮助,通过系统中具有自启动能力机组的启动,带动无自启动能力的机组,逐渐扩大系统恢复范围,最终实现整个系统的恢复^[1]。随着各大区域电网的容量不断增大和系统互联的日趋普遍,电力系统运行、操作、维护的复杂性不断增大,发生大面积停电事故的潜在危险也在增大,并且不乏惨痛的教训,对国民经济和人民生活造成极大损害^[2-5]。近年来,虽然贵州电网随着“西电东送”工程的深入,网架结构和安全稳定水平得到了很大提高,但是遇到严重故障时(例如严重自然灾害、多重复杂故障、受端失去大电源、主要联络线开关不正确动作或继电保护及安全自动装置不正确动作等)仍有可能引发系统的连锁反应,最终导致系统大面积停电。因此,对网内黑启动电源点的研究尤为必要。

引子渡电厂黑启动电源试验是继乌江电厂、东风电厂黑启动试验成功后贵州电网第 3 个黑启动电源点试验,同时也是贵州电网首次接带部分负荷的黑启动电源点试验,所以对引子渡电厂黑启动方案及其系统试验研究十分必要。

1 引子渡电厂黑启动方案依据

进行黑启动,首先保证有可靠的启动电源,水电机组作为启动电源最为方便,与火电机组相比较,水电机组的启动过程较快。从机组启动速度、调节系统特性及可持续供电时间看,引子渡电厂是比较理想的黑启动电源点。

1.1 黑启动范围

引子渡电厂是贵州首批“西电东送”重点项目之

一,于 2003 年 7 月建成投产,总装机 3×120 MW。本次试验主要是检查引子渡电厂柴油机组自启动能力、引子渡电厂机组对引两 I 回和两所电变 1 号变零起升压以及地区电网负荷的恢复。模拟引子渡电厂在全停的情况下通过柴油机自启动来恢复厂用电,继而恢复部分地区负荷。引子渡电厂黑启动带负荷试验地区网架图如图 1 所示。

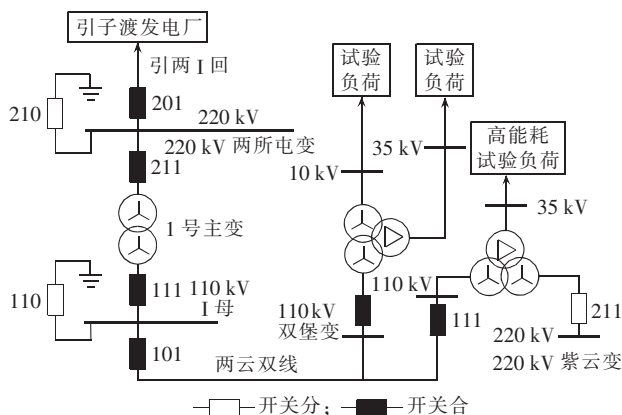


图 1 试验系统图

Fig.1 The power system for experiment

1.2 过电压及自励磁问题

发电机带空载线路,其容性参数与发电机感抗满足系统参数谐振条件时(即线路容抗小于或等于发电机、变压器感抗)就可能引起参数共振,此时发电机励磁电流很小,甚至为零,在发电机剩磁和电容电流助磁作用下,发电机机端电压和电流幅值会急剧上升。这种现象称为发电机自励磁^[6]。当发电厂单机经升压变压器带空载长线时,线路等值阻抗大于发电机与变压器阻抗之和,考虑频率、变比及所取参数的误差,加入安全系数,得出发电机不发生自励磁的判据为^[7]

$$X_C > 1.2(X_d + X_T)$$

式中 X_C 为线路等值容抗; X_d 为发电机感抗; X_T 为变压器漏抗。

220 kV 引两 I 回线路长度为 43 km,对引子渡电厂至两所电主变自励磁离线计算结果如下:引两 I 回线路等值容抗 X_C^* 为 16.3 p.u.,引子渡电厂发电机感抗 X_d^* 为 0.613 p.u.,引子渡电厂主变漏抗 X_{T1}^* 为 0.086 p.u.,两所电主变漏抗 X_{T2}^* 为 0.132 p.u.。

因此,满足 $X_C > 1.2(X_d + X_T + X_{T1})$,利用引子渡发电机对 220 kV 引两线及两所电变主变零起升压或对全电压对线路、变压器充电不会产生自励磁。如考虑两所电变电站变压器带电后继续对 110 kV 线路(线路长度按 34 km 计算)充电,则 X_C^* 为 13.57 p.u.,仍然满足 $X_C > 1.2(X_d + X_T + X_{T1})$,不会产生自励磁。从 110 kV 变电站再向 35 kV 线路变电站充电,线路容抗很小,可忽略不计。实际试验中恢复地区负荷方案为通过 110 kV 两云双线(42.79 km)恢复双堡变负荷,与计算依据误差不大,由此可见,在试验过程中不会产生过电压和发电机自励磁问题。研究末端空充或带小负荷时,末端过电压倍数和发电机进相深度。引子渡启动 1 号 120 MW 机组,假设小负载值取为 $P_L = 9.72$ MW。计算结果见表 1。

表 1 过电压的计算结果

Tab.1 The calculative results of over-voltage

类型	末端电压倍数	机组出力/MW
不带负荷	1.098	1.92
带负荷	1.095	9.72

由计算结果可知,在末端空充和末端带小负载时,末端暂态工频过电压倍数均不大于 1.1,满足工频过电压限制不超过 1.3 倍的要求^[8],不会对过电压保护和绝缘配合产生影响。

2 黑启动过程中应注意的问题

2.1 负荷调整和频率电压控制

由于黑启动是一个单机带厂用电负荷的简单系统过渡成为一个两机接带部分负荷的系统,因而负荷的调整应引起注意。为了使启动电源能在最低负荷水平下稳定运行,并保持电压有合适的水平,开始时需要及时适当地接通一定容量的负荷,然后再增加少量负荷,允许接入的最大负荷量,不应使系统频率较接入前下降 0.5 Hz^[9],国外的经验为每一次增加的负荷不应超过发电容量的 5%,以保证运行频率在合理的允许范围内,维持有功平衡。两所电变 110 kV 两云双线总试验负荷约为 30 MW,负荷每次增加 2~6 MW,每次间隔 5 min,保证了频率和电压的稳定运行。

在黑启动过程中,无功功率平衡也是一个很重要的问题,应控制无功负荷大小,防止在空充时,末端电压过高,而带上负荷后,末端电压又过低的情况发生。可以采取一定的措施,如带负荷前将发电机进

相运行于低电压水平,只对单回线路进行充电,在变电站投补偿装置等。此外,启动机组的调速器、励磁调节器的特性应该能够适应一定的负荷变化,使机组运行保持稳定。

2.2 继电保护的配合

黑启动过程中继电保护的作用是减轻或消除启动过程中发生的故障对电力设备的损害和确保系统稳定运行^[10]。为确保黑启动试验过程中设备的安全,在试验过程中,对继电保护有以下要求:

- a. 参与试验的元件和线路保护投入运行按照恢复情况合理调整保护配置;
- b. 重合闸应退出运行;
- c. 过电压保护必须投入;
- d. 低电压和低周保护停用。

3 具体实施步骤

- 引子渡电厂黑启动方案分 4 个阶段完成。
- a. 第 1 阶段,电网方式调整阶段。这个阶段主要保证黑启动实验范围与主网要有明显的断开点,隔离试验系统和运行系统,保护和重合闸做相应的调整。首先,要保证引子渡电厂具备黑启动实验条件,3 台机在停机备用状态。其次,地调瞬停倒负荷至两所电变 2 号变供电时应保证与主网系统有明显断开点,开口点为两所电 220 kV 母联和 110 kV 母联,防止发生与主网非同期并列。两所电 220 kV 母线母差保护改投 2 组母线分裂运行方式。另外,引两双回的重合闸也要退出运行,主变中性点做调整。
 - b. 第 2 阶段,引子渡电厂厂内柴油机组启动带厂用电阶段。在引子渡电厂全停的情况下,装于坝区的柴油机可以作为电源点来带厂用电,操作柴油发电机带 400 V 厂用电 I 段运行,继而开出 2 号机组带厂用电,并将柴油机退出运行。
 - c. 第 3 阶段,引子渡电厂完成开机自带厂用电后进行对引两 I 回线路、两所电变 1 号主变的零起升压及接带负荷试验阶段。在带负荷试验中,每次恢复 110 kV 两云紫的负荷在 2~6 MW 之间,确保母线频率和电压在正常范围内。
 - d. 第 4 阶段,负荷及电网完整性恢复阶段。接带部分负荷试验结束并且稳定运行以后,在 220 kV 引两 II 回引子渡电厂侧与主网并列,再用 220 kV 引两 I 回合环,恢复两所电 220 kV 母联和 110 kV 母联运行。引两双回的重合闸投入运行,相应的保护调整到正常方式,使电网进入正常的运行方式。
- 通过以上的负荷调整,引子渡电厂完成黑启动带负荷试验,电网进入正常的运行状态。

4 黑启动试验过程

- a. 2005 年 11 月 30 日 13:03,电网方式调整好,引子渡电厂启动位于坝区的柴油机组(150 kW),开

始接带厂用电系统;13:12,引子渡电厂柴油机组启动正常,带厂用电系统试验正常。

b. 13:40,引子渡电厂 2 号机利用厂用电系统开机正常,接带厂用电系统;14:13,柴油机组退出运行。

c. 14:46,引子渡电厂 1 号机开机正常,待转速稳定后,手动调整 1 号机的励磁,缓慢升高机端电压,对 220 kV 引两 I 回等试验设备零起升压,按额定电压的 25%、50%、75%、100% 各稳定 5~10 min,直至以两所电 220 kV 母线电压达到 220 kV 停止加励。

d. 14:59,引子渡电厂 1 号机开始进行带负荷试验,两所电对 110 kV I 母和 110 kV 两云紫线充电正常后(见图 1),110 kV 两云紫线负荷每次依次恢复 1 MW、2 MW、3 MW、4 MW、5 MW、6 MW,每次间隔 5 min,共恢复负荷为 35 MW,此项试验于 17:00 结束。试验数据生成的曲线如图 2 与图 3 所示,图中 U_L 为母线电压, P_r 为恢复负荷。在试验过程中,引子渡电厂频率最高为 50.06 Hz,最低为 49.79 Hz,频率最大波动为 0.27 Hz。从试验数据可看出,220 kV 和 110 kV 母线电压以及试验电网频率都在正常范围内波动。

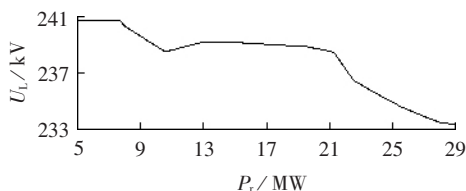


图 2 220 kV 母线电压与负荷恢复试验曲线

Fig.2 The curve of 220 kV busbar voltage and load restoration

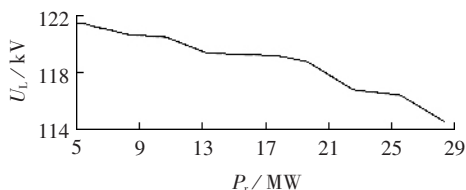


图 3 110 kV 母线电压与负荷恢复试验曲线

Fig.3 The curve of 110 kV busbar voltage and load restoration

e. 17:05,试验系统与运行系统经 220 kV 引两 II 回 202 开关同期并列成功。

f. 17:05,试验结束,系统开始恢复正常运行方式,至 18:28 试验系统与运行系统之间断开的开关、相关的继电保护定值、主变中性点以及相关的安全自动装置全部调整为正常方式。

本次试验从 11 月 30 日 13 点 03 分正式开始,至 14 点 59 分引子渡电厂机组接带地区负荷正常共耗时 1 小时 56 分。带地区负荷试验因涉及停电倒负荷的操作耗时 2 小时 6 分,整个试验为 4 小时 2 分。

5 结论

引子渡电厂黑启动试验过程中,零起升压试验

220 kV 及 110 kV 线路首末端电压基本一致,容升效应很小,试验结果和计算结果基本一致,在带负荷过程中,试验电网的频率和电压都保持在正常波动范围内,没有出现大的波动。本次黑启动试验的成功,说明引子渡黑启动方案的可行性,黑启动试验达到了预期效果,同时也说明引子渡电厂可以作为贵州电网的第 3 个黑启动电源点。

参考文献:

- [1] 熊惠敏,房鑫炎,郁惟楠,等. 电力系统全网停电后的恢复——黑启动综述[J]. 电力系统及其自动化学报,1999,11(3):12-17.
XIONG Hui-min, FANG Xin-yan, YU Wei-yong, et al. The summary of black start-restoration of electrical power system after blackout[J]. Proceedings of the EPSA, 1999, 11(3):12-17.
- [2] 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[J]. 电力系统自动化,2003,27(18):1-5,37.
XUE Yu-sheng. The way from a simple contingency to system-wide disaster-lessons from the eastern interconnection blackout in 2003[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(18):1-5,37.
- [3] 雷晓蒙. 台湾省 7 月 29 日大停电事故的教训和启示[J]. 中国电力,1999,32(12):55-57.
LEI Xiao-meng. Lessons and enlightenment from the blackout in Taiwan province in July 29 th[J]. Electric Power, 1999, 32(12):55-57.
- [4] 王梅义,吴竟昌,蒙定中. 大电网系统技术[M]. 北京:中国电力出版社,1995.
- [5] 程云志,房鑫炎. Petri Nets 算法在电力系统恢复中的应用[J]. 电力自动化设备,2003,23(5):12-15.
CHENG Yun-zhi, FANG Xin-yan. Application of PN algorithm to power system restoration[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(5):12-15.
- [6] 王满意,冯贵明,辛绍平,等. 电网调度运行实用技术问答[M]. 北京:中国电力出版社,2000.
- [7] 刘隽,李兴源,许秀芳. 互联电网的黑启动策略及相关问题[J]. 电力系统自动化,2004,28(5):93-97.
LIU Jun, LI Xing-yuan, XU Xiu-fang. Strategies and problems in black start of interconnected power grids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(5):93-97.
- [8] 胡炳荣,范本鑫,陈冠南,等. SDJ 161-85 电力系统设计技术规程(试行)[S]. 北京:水利电力出版社,1985.
- [9] 湛军,曾勇刚,杨晋柏,等. 南方电网黑启动方案[J]. 电力系统自动化,2006,30(9):80-83,87.
CHEN Jun, ZENG Yong-gang, YANG Jin-bai, et al. Black-start scheme for China southern power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(9):80-83,87.
- [10] 李阳波,顾雪平,刘艳. 电力系统黑启动过程中线路继电保护的配置与整定[J]. 电力系统自动化,2006,30(7):89-92,107.
LI Yang-bo, GU Xue-ping, LIU Yan. Determination of line protection scheme and settings during power system black-start[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(7):89-92,107.

(责任编辑:康鲁豫)

作者简介:

严奉军(1977-),男,湖南华容人,硕士,主要从事电网调度工作(E-mail:yanfengjun01@163.com);

王宁(1975-),男,重庆人,工程师,主要从事电网调度工作。

Power plant black - start scheme and its experiment

YAN Feng - jun, WANG Ning

(Guizhou Electric Power Dispatching & Communication Bureau, Guiyang 550002, China)

Abstract: Under the condition of total or partial power net breakdown, system recovery can be realized by black - start scheme, in which units with self - start ability are used to bring others to start up. The principle of Yinzidu power plant black - start scheme and its implementation are introduced, and the analysis and calculation of self - excitation and over - voltage during power system recovery are put forward. Some important points about load adjustment, frequency / voltage control and protection configuration, that ensure the success of black - start, are also presented. Four detailed implementation steps are: power network operation mode adjustment, self - provided auxiliary power system startup, partial load restoration and whole power network restoration. Procedures and actual operation conditions of the black - start experiment in 2005 are described. The success of Yinzidu power plant black - start experiment validates the practicability of the emergency startup scheme.

Key words: power network; black-start; system recovery