大型火电 FCB 机组空充 500 kV 线路试验研究

张文峰[1],苏　宇[2],王　宁[1],曾凯文[2],廖诗武[2],黎嘉明[2],龙　霏[1],文劲宇[2]

(1. 广东电网有限责任公司,广东 广州 510600;

2. 华中科技大学 强电磁工程与新技术国家重点实验室,湖北 武汉 430074)

摘要:广东电网以大型火电快速切回(FCB)机组为黑启动电源,于 2013 年 7 月 4 日成功进行了空充 500 kV 输电线路的试验。高压长距离线路在空充过程中容易产生自励磁、过电压等现象,导致黑启动失败,因此对机组的自励磁特性进行了理论分析,分析结果表明试验过程中机组不会出现自励磁现象。基于理论分析提出了自励磁工程判据;并对线路的过电压特性进行了仿真计算,计算结果表明,试验过程中各测量点的电压均满足国标要求。

关键词:火电机组;黑启动;线路空充;自励磁;过电压;试验;仿真

中图分类号:TM 862　　**文献标识码**:A　　DOI:10.3969/j.issn.1006-6047.2014.11.026

0　引言

近年来国内外电力系统大停电事故频发,给社会生活和生产带来巨大的经济损失和恶劣的社会影响[1-3],研究制定科学、合理、快速的黑启动方案,开展电网黑启动试验,具有非常显著的社会效益和安全意义。

自 20 世纪 80 年代以来,国内外学者对黑启动问题进行了大量的研究[4-5],开展了一系列黑启动试验[6-10],这些试验有 2 个特点:都以小型火电、燃气机组或大型水电机组为黑启动电源,小型火电或燃气机组容量小,大型水电机组往往距离负荷中心较远,这都将导致整个启动过程时间较长,不利于负荷的快速恢复,抽水蓄能机组是一种理想的黑启动电源,但抽水蓄能电站受地理条件限制,难以完全按照整个电网的黑启动需要进行布点;当系统电压等级较高、传输线路较长以及充电变压器容量较大时,容易因为自励磁、过电压等问题导致线路空充失败。

当电网发生严重故障导致大型火电机组与系统解列时,如果火电机组具备不停机不停炉的能力,即发电机组可以仅带厂用电继续运行,则称火电机组具备快速切负荷 FCB(Fast Cut Back)功能,本文称之为 FCB 机组[11-12]。当故障清除后,FCB 机组可以很快重新并网和升负荷,快速恢复供电。而且大型火电 FCB 机组由于容量大,安装位置可以根据需要灵活布置,如果在电网全黑状态下作为黑启动电源,可以快速恢复局部或整个电网。

广东电网以大型火电 FCB 机组为黑启动电源,于 2013 年 7 月 4 日成功进行了空充 500 kV 输电线路的试验,为进一步的电网恢复提供了条件。本文对该试验进行了详细介绍,对试验过程进行了数字仿真分析,重点研究了空充线路过程中容易发生的自励磁和过电压现象,通过与现场实测结果对比,验证了理论研究和仿真分析结果的正确性。

收稿日期:2013-12-15;**修回日期**:2014-07-24

基金项目:广东电网有限责任公司科技项目(K-GD2011-553)

Project supported by Science & Technology Program of Guangdong Power Grid Co. Ltd.(K-GD2011-553)

1　大型火电 FCB 机组空充 500 kV 线路试验介绍

试验采用的 FCB 机组为广东铜鼓 C 厂 6 号机组,额定容量为 1 000 MW,额定电压为 27 kV,采用三机励磁系统,该机组在与大电网脱开后能够带大约 3%~10%的负荷(厂用电)孤岛运行 3 min 至数小时[13]。铜鼓电厂与 500 kV 圭峰变电站之间有 4 回联络线。整个试验包括 3 个部分:甩负荷试验、发变组带线路零起升压试验、发变组空载状态 90%额定电压下空充线路试验。试验涉及的主要设备有铜鼓 C 厂 6 号机组、该机组的升压主变、鼓峰丙线以及相应开关设备,试验单线图如图 1 所示,其中,鼓峰丙线电压等级为 500 kV,长度约为 72 km。

1.1　试验前运行方式

a. 6 号机组按试验要求的负荷条件正常运行,机组保护、自动励磁调节器、安全稳定装置等均正常投入。

b. 开关 5041 在合闸运行状态,开关 5042、5043、5051、5052 处于热备用状态,其他 500 kV 设备运行方式依调度令正常运行。

c. 厂用电源可靠,备用变压器处于热备用状态,机组跳闸后的保安电源、直流系统均能自动投入,事故应急柴油发电机处于备用状态。

d. 试验前铜鼓 C 厂运行值班员确认上述一、二次设备在规定状态与位置。

1.2　发变组带线路零起升压试验

a. 6 号机组打闸(断开开关 806),厂用电切至 4 号高备变。

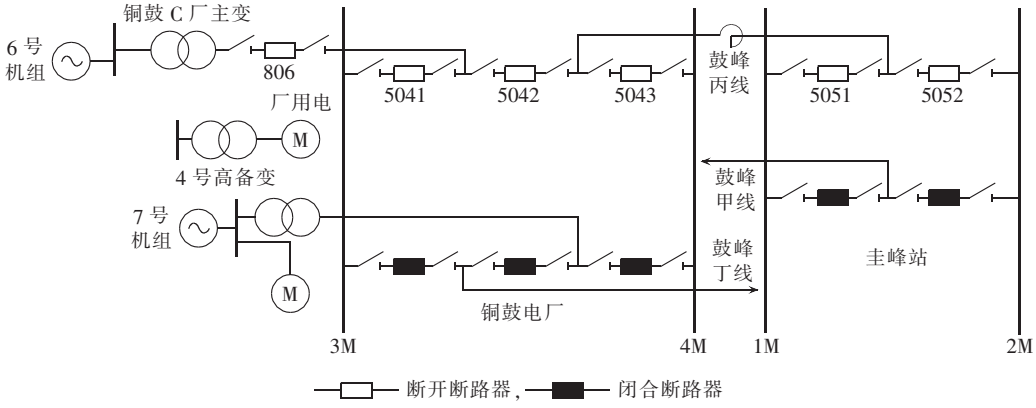

图 1 试验电气主接线图

Fig.1 Primary wiring diagram for test

b. 退出开关 5042、5043 重合闸,手动断开开关 5042、5043。

c. 退出开关 5041、5042 重合闸,手动断开开关 5041、5042。

d. 合上开关 806、5042,6 号发电机励磁调节器置手动调节方式,手动对发电机、主变、线路缓慢升压,直至额定电压。

e. 降发电机电压至最低,断开开关 5042、励磁开关。

1.3 发变组空载状态 90% 额定电压下空充线路试验

a. 将 6 号发电机励磁系统恢复至正常的自动工作方式,合上励磁开关,发电机电压升至 90% 额定电压。

b. 手动合上开关 5042,对鼓峰丙线充电。

c. 断开开关 5042,鼓峰丙线失电。

d. 合上开关 5051,由大电网对鼓峰丙线充电,同期合上开关 5052、5043。

e. 确认发变组系统正常,机组具备并网条件,向中调提出并网申请,经中调同意后,准同期合上开关 5042。

f. 同期合上开关 5041,空充线路试验结束。

2 空充线路过程中自励磁特性分析

2.1 自励磁实用判据

发电机自励磁是指同步电机定子回路由于电枢反应的助磁作用而产生定子电流、电压幅值自发增大的现象,其本质是发电机定子电感与外电路容抗参数配合时发生的参数谐振[14-15]。研究表明,同步发电机组的自励磁可分成反应同步自励磁、推斥同步自励磁以及异步自励磁 3 类,不同类型的自励磁在产生条件和发展过程方面有着显著的区别[16]。

工程上较常采用速算法或者阻抗法对发电机自励磁进行校验。速算法判据如表 1 所示,表中 Q 为发电机组的万千伏安容量,L 为线路的百千米长度。阻抗法判据如式(1)所示[17]。

表 1 速算法判据

Table 1 Criteria of quick calculation method

线路电压等级/kV	水轮机判据	汽轮机判据
220	$Q>2L$	$Q>4L$
500	$Q>15L$	$Q>30L$

$$X_q<X_C<X_d \tag{1}$$

其中,X_C 为线路容抗;X_d、X_q 分别为发电机 d 轴、q 轴电抗。

速算法判据对线路容抗估算较为粗略,而阻抗法判据则只能针对反应同步自励磁进行判别,且未考虑线路等值电阻的影响,鉴于此,本文提出了更为全面和实用的自励磁工程判据。

设发电机外电路由工频容抗 X_C 和损耗电阻 R 串联组成,其等值电路如图 2 所示,图中,X'_d 为发电机 d 轴瞬变电抗。

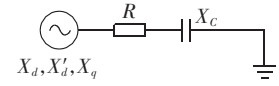

图 2 系统等值电路

Fig.2 Equivalent circuit of system

对于反应同步自励磁,其边界条件如式(2)所示,由式(2)可得自励磁区域如图 3(a)所示。

$$(X_C-X_d)(X_C-X_q)+r^2=0 \tag{2}$$

对于推斥同步自励磁,其边界条件如式(3)所示,由式(3)可得自励磁区域如图 3(b)所示。

$$(X_C-X_q)(X_C-X'_d)+r^2=0 \tag{3}$$

对于异步自励磁,其边界条件如式(4)所示。

$$\left(\frac{X_C}{1-s}-X_q\right)\left[\frac{X_C}{1-s}-(1-s)X'_d\right]+r^2=0 \tag{4}$$

对于每一个特定的转差 s,式(4)均为一个椭圆方程,长轴平行于 R 轴,中心点在 X_C 轴上。转差从 0 到 1 连续取值的过程中,椭圆的中心点向下移至坐标原点,长轴单调减小至 0,所有椭圆覆盖的区域即为异步自励磁区域,如图 3(c)所示。

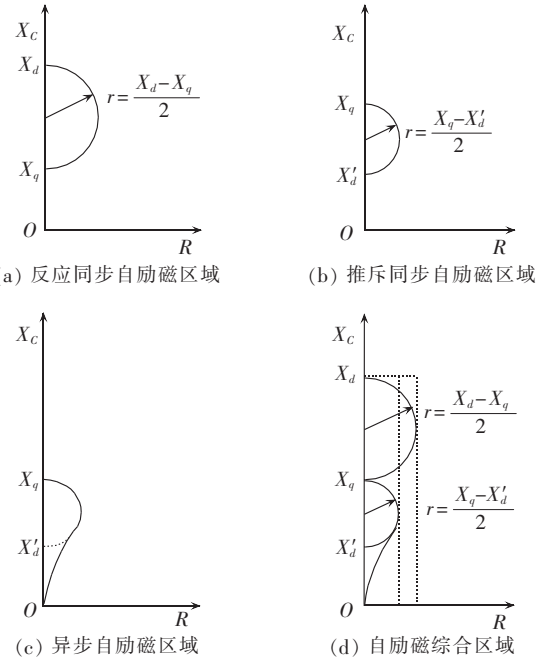

图 3 同步电机的自励磁区域

Fig.3 Self-excitation area of synchronous machine

综合式(2)—(4),可得自励磁区域如图 3(d)所示。

由图 3(d)可知,若发电机组参数和线路参数满足式(5),则机组对线路充电时将不会发生任何形式的自励磁。

$$X_C>X_d \text{ 或 } r>\max\left\{\frac{X_d-X_q}{2},\frac{X_q-X'_d}{2}\right\} \tag{5}$$

2.2 自励磁特性分析

广东铜鼓 C 厂 6 号机组参数:发电机 d 轴同步电抗 X_d=2.614 p.u.,q 轴同步电抗 X_q=2.484 p.u.,d 轴瞬变电抗 X'_d=0.264 p.u.,电枢电阻 $R_a=8.22\times10^{-4}$ p.u.,主变电阻 $R_T=5.59\times10^{-4}$ p.u.,主变电抗 X_T=0.163 p.u.。鼓峰丙线实测参数为:容抗 X_B=27.975 p.u.,线路电阻 $R_L=6.9\times10^{-3}$ p.u.,线路电抗 X_L=0.089 p.u.。不计厂用电的情况下,机端等值阻抗 Z_{in} 为:

$$Z_{in}=R-jX_C=$$
$$R_a+R_T+jX_T+\frac{1}{-\frac{1}{j2X_B}+\frac{1}{R_L+j(X_L-2X_B)}}=$$
$$3.113\times10^{-3}-j13.802\ (\text{p.u.}) \tag{6}$$

式(6)中,$X_C>X_d$,由自励磁判据式(5)可知发电机不存在自励磁危险。

若将充电线路按原型号参数进行等比例延长,外部等值容抗随线路长度变化如图 4 所示,纵轴为标幺值。

从图 4 中可以看出:外部等值容抗随线路增长而下降,理论计算表明当线路长度为原长度的 5.03 倍(362 km)时,机组将开始进入自励磁危险区域,但鼓峰丙线实际长度仅 72 km,因此现场试验时机组不会发生自励磁现象,且留有极大的裕度。

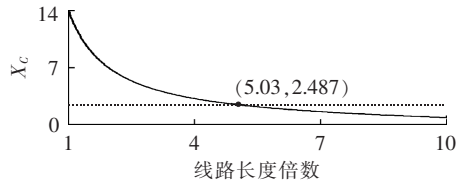

图 4 外部等值容抗与线路长度的关系

Fig.4 Relationship between external equivalent capacitance and line length

当计及厂用电时,其机端等效电阻更大,机端等效容抗也将更大,因此总体上更容易躲开自励磁区域。

为了检验 6 号机组是否会发生机组自励磁,在空充线路试验之前,进行了零起升压试验。零起升压试验中,各测量点的实测数据如表 2 所示,表中,U_G 为额定电压。

表 2 零起升压试验数据

Table 2 Experimental data of voltage boost test

参数	实测值	
	50% U_G	100% U_G
主变高压侧电压/kV	252.33	526.87
线路对侧电压/kV	253.54	529.40
发电机机端电压/kV	12.76	26.76
发电机机端电流/A	953.06	1920.5
发电机有功功率/MW	3.18	6.12
发电机无功功率/Mvar	−21.15	−86.89

试验结果显示,各测量点电压、电流、发电机有功、无功均随时间平稳增加,始终处于安全运行状态。理论分析与试验结果表明,广东铜鼓 C 厂 6 号机组黑启动时不会发生自励磁现象。

3 空充线路过程中过电压特性分析

3.1 FCB 机组空充线路仿真模型

为了校核黑启动试验是否对电网、电厂产生冲击,需要在试验前对本试验可能产生的问题进行校核,确认所有可能冲击均处于设备耐受范围内,才能进行试验。本文在 PSCAD/EMTDC 软件平台上搭建大型 FCB 机组空充 500 kV 线路的仿真模型,如图 5 所示,对试验过程进行了仿真研究。

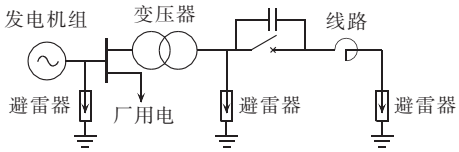

图 5 模型结构图

Fig.5 Model structure

主要元件模型简介如下。

a. 汽轮机模型。

试验涉及的铜鼓 C 厂 6 号机组是 FCB 机组,在与大电网脱开后可带厂用电负荷孤岛运行。传统的

再热凝汽式汽轮机经典模型适用于稳态或者小干扰情况下的汽轮机工况仿真,但不适用于脱网后孤岛运行这种剧烈变化的工况仿真,本文所采用的汽轮机模型如图 6 所示,图中,Q_{IP} 表示中压缸蒸汽流量。在传统模型的基础上,本文采用的汽轮机模型增加了调门快关系统、旁路系统,可用于仿真上述试验过程[18],且汽轮机参数均为实测参数。

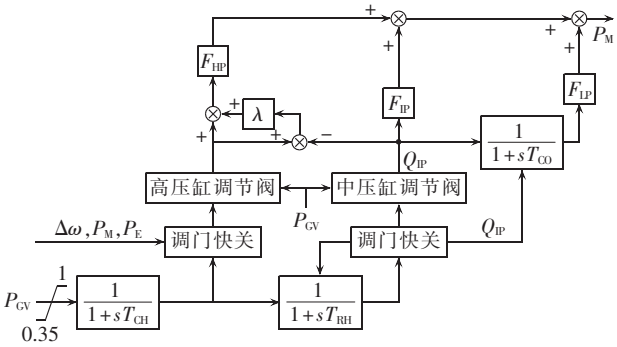

图 6 汽轮机结构图

Fig.6 Turbine structure

b. 励磁系统模型。

铜鼓 C 厂 6 号机组励磁调节器为 ABB 公司的 UNITROL 5000 型,其励磁系统模型采用 FQ 型励磁模型①。

c. 线路模型。

黑启动过程中,给空载输电线路充电的过程属于分布参数电路的电磁暂态过程,即波过程。在仿真模型中,采用小损耗贝杰龙输电线路模型仿真模拟该波过程。在线路首末两端加装避雷器,在断路器两端并联均压电容。

d. 其他元件模型。

发电机采用六阶模型;PSS 采用 IEEE PSS2A 模型;厂用电采用恒功率等效模型;变压器采用 3 个单相双绕组变压器。

充分计及线路分布参数、各部分电容电感、避雷器的影响,考虑励磁系统详细建模,并根据断路器参数设定可能不同期合闸时间范围,结合以最极限合闸相角的选取,可以充分评估黑启动过程所可能产生的最恶劣情况,并在确保模型校核结果准确的前提下不导致仿真模型过于复杂。

3.2　空充线路试验过电压特性分析

500 kV 电压等级操作过电压的国家标准如表 3 所示[19-20]。

表 3　500 kV 电压等级操作过电压国家标准

Table 3 National standard of operating overvoltage of 500 kV power system

操作过电压类型	过电压幅值
相对地 2%统计过电压	2.0 p.u.,实际值 898 kV
相间 2%统计过电压	3.0 p.u.,实际值 1 347 kV
线路设备耐压水平(线路侧)	1.4 p.u.
线路设备耐压水平(变电所侧)	1.3 p.u.

利用图 5 所示模型对空充过程进行数字仿真,仿真时长为 80 s,仿真步长为 100 μs,各测量点仿真试验结果与实际空充线路试验的实测结果数据对比如表 4 所示。

表 4　仿真结果和实测数据对比

Table 4 Comparison between simulative results and measured data

测试点或励磁电压	暂态电压最大值/kV		过电压倍数		持续时间/ms	
	实测	仿真	实测	仿真	实测	仿真
主变高压侧	697.85	700.15	1.81	1.83	86	82
发电机机端	27.01	27.57	1.40	1.41	31	40
励磁电压	190.1	187.2	1.60	1.59	52	58

空充线路过程中,主变高压侧电压、机端电压、厂用电 6 kV 母线电压、励磁电压的试验波形与仿真波形对比分别如图 7—10 所示。

从试验结果可见:主变高压侧暂态过程持续约 4 个周期,发电机机端与 6 kV 侧暂态过程持续约 1.5 个周期,符合国家标准。暂态过程结束后,各侧电压进入稳态,整个过程中各测量点的暂态电压均在正常范围内。同时,实测波形与仿真波形进行对比,曲线吻合良好,证实了仿真校核方法与模型的正确性。

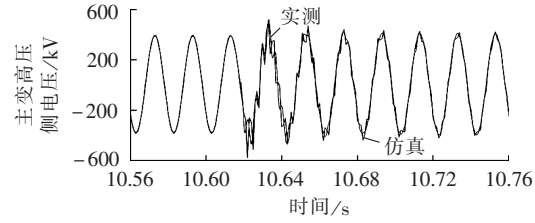

图 7 主变高压侧电压波形

Fig.7 Waveforms of voltage at high-voltage side of main transformer

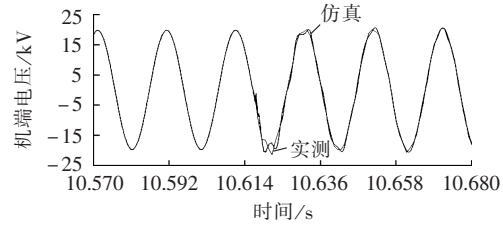

图 8 发电机机端电压波形

Fig.8 Waveforms of generator terminal voltage

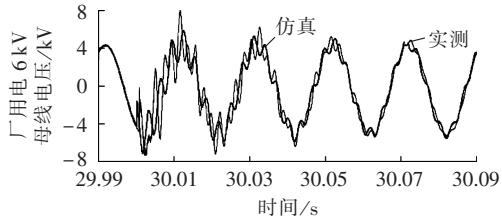

图 9 厂用电母线电压波形

Fig.9 Waveforms of auxiliary power bus voltage

① 汤涌,卜广全,印永华,等. 中国版 BPA 暂态稳定程序用户手册(3.0 版). 2004.

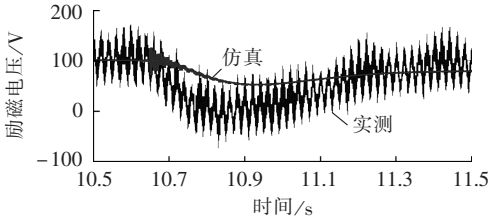

图 10 励磁电压波形

Fig.10 Waveforms of excitation voltage

4 结语

以大型火电机组作为黑启动电源有2个重要的优点:机组容量大、机组安装位置可以根据需要进行配置,这可以大幅加快系统的黑启动过程。广东电网以一台1000 MW的火电FCB机组为黑启动机组,对一条500 kV线路进行了空载充电,结果表明FCB机组可以作为黑启动机组。本文详细介绍了试验过程,对试验过程中可能出现的自励磁和过电压等问题进行了理论分析和数字仿真,现场试验的实测结果证明了理论分析与数字仿真结果的正确性。

参考文献:

[1] US-Canada Power System Outage Task Force. Final report on the August 14,2003 blackout in the United States and Canada: causes and recommendation[EB/OL]. (2004-04-15). http://www.nerc.com.

[2] Enquiry Committee. Report of the enquiry committee on grid disturbance in northern region on 30th July 2012 and in northern,eastern & north-eastern region on 31st July 2012[EB/OL]. [2012-08-16]. http://www.powermin.nic.in/pdf/GRID_ENQ_REP_16_8_12.pdf.

[3] 李铁,金世军,鲁顺,等. 辽宁电网"3.4"事故处理过程及分析[J]. 电网技术,2007,31(11):38-41,58.
LI Tie,JIN Shijun,LU Shun,et al. Treatment process and analysis of blackout occurred in Liaoning Power Grid on March 4,2007[J]. Power System Technology,2007,31(11):38-41,58.

[4] ADIBI M,CLELLAND P,FINK L,et al. Power system restoration-a task force report[J]. IEEE Transactions on Power Systems,1987,2(2):271-277.

[5] 高远望,顾雪平,刘艳,等. 电力系统黑启动方案的自动生成与评估[J]. 电力系统自动化,2004,28(13):50-54.
GAO Yuanwang,GU Xueping,LIU Yan,et al. Automatic derivative and assessment of power system black-start schemes[J]. Automation of Electric Power Systems,2004,28(13):50-54.

[6] 林济铿,么莉,孟宪朋,等. 天津电网黑启动试验研究[J]. 电网技术,2008,32(5):55-58.
LIN Jikeng,YAO Li,MENG Xianpeng,et al. Test research of black start of Tianjin Power Grid[J]. Power System Technology,2008,32(5):55-58.

[7] 蔡剑青,刘勇,杨勇. 湖北电网首次黑启动试验[J]. 华中电力,2002,15(5):51-54.
CAI Jianqing,LIU Yong,YANG Yong. First black-start test of Hubei Power Net[J]. Central China Eletric Power,2002,15(5):51-54.

[8] 阮前途,王伟,黄玉,等. 基于燃机机组的上海电网黑启动系列试验[J]. 电网技术,2006,30(2):19-22.
RUAN Qiantu,WANG Wei,HUANG Yu,et al. Shanghai Power Grid black start series test based on gas turbine generator[J]. Power System Technology,2006,30(2):19-22.

[9] 逯怀东,郭志红,王辉,等. 基于500 kV网架的电网黑启动试验分析[J]. 电网技术,2013,37(7):1895-1901.
LU Huaidong,GUO Zhihong,WANG Hui,et al. Power system black-start analysis based on 500 kV power grid[J]. Power System Technology,2013,37(7):1895-1901.

[10] 周剑,曾勇刚,李建设,等. 南方电网黑启动系统试验[J]. 南方电网技术,2008,2(3):12-16.
ZHOU Jian,ZENG Yonggang,LI Jianshe,et al. Experiments of "black start" system in China Southern Power Grid[J]. Southern Power System Technology,2008,2(3):12-16.

[11] 刘皓明,丁帅,卢恩,等. 含快速切负荷功能火电机组的电力系统黑启动策略[J]. 电力系统自动化,2013,37(9):23-28.
LIU Haoming,DING Shuai,LU En,et al. A power system black-start strategy considering thermal power units with FCB function[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(9):23-28.

[12] 刘麒,刘麟. FCB功能相关的发变组保护逻辑改造[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(4):146-154.
LIU Qi,LIU Lin. Improvements for generator-transformer protection logic relating to FCB function[J]. Power System Protection and Control,2011,39(4):146-154.

[13] 姚金环. 对FCB若干问题的探讨[J]. 中国电力,2007,40(5):59-62.
YAO Jinhuan. Discussion on several issues concerning FCB[J]. Electric Power,2007,40(5):59-62.

[14] SINGH G K. Self-excited induction generator research:a survey[J]. Electric Power Systems Research,2004,69(2):107-114.

[15] 李志民,马丽华,张玉,等. 基于精细积分法的电力系统自励磁仿真[J]. 电力系统及其自动化学报,2008,20(3):90-94.
LI Zhimin,MA Lihua,ZHANG Yu,et al. Simulation of self-excitation for power system based on precise integration algorithm[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2008,20(3):90-94.

[16] 刘福生,江荣汉. 同步电机自励磁的向量分析[J]. 中国电机工程学报,1987,7(6):69-75.
LIU Fusheng,JIANG Ronghan. Vector analysis of self-excitation of synchronous generators[J]. Proceedings of the CSEE,1987,7(6):69-75.

[17] 许有方. 发电机自励磁实用判据及现场实例分析[J]. 电网技术,1993(1):1-6.
XU Youfang. Generator self-excitation practical criteria and practical examples analysis[J]. Power System Technology,1993(1):1-6.

[18] 郭钰锋,赵晓敏,于达仁,等. 用于汽轮机甩负荷动态计算的数学模型[J]. 汽轮机技术,2006,48(2):104-107,140.
GUO Yufeng,ZHAO Xiaomin,YU Daren,et al. Dynamic model of steam turbine for load rejection[J]. Turbine Technology,2006,48(2):104-107,140.

[19] 中华人民共和国电力工业部. DL/T620—1997交流电气装置的过电压保护和绝缘配合[S]. 北京:中国电力出版社,1997.

[20] 中华人民共和国质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. GB/T18481—2001电能质量暂时过电压和瞬态过电压[S]. 北京:中国标准出版社,2001.

作者简介:

张文峰

张文峰(1967—),男,江西广昌人,高级工程师,硕士,从事电力系统安全管理工作(**E-mail**:zhangwf@csg.cn);

苏　宇(1988—),男,辽宁北票人,硕士研究生,研究领域为黑启动技术等(**E-mail**:suyu.hust@qq.com);

王　宁(1984—),男,山西运城人,工程师,硕士,长期从事电网调度运行策划工作(**E-mail**:wangn84@gmail.com);

曾凯文(1986—),男,广东普宁人,博士研究生,主要研究方向为大电网安全防御、黑启动等(**E-mail**:hust_kevin@foxmail.com);

廖诗武(1989—),男,湖南郴州人,博士研究生,主要从事电力系统运行与控制研究(**E-mail**:liaoshiwu@gmail.com);

黎嘉明(1989—),男,广东广州人,博士研究生,研究方向为新能源并网技术、电网大面积故障恢复策略等(**E-mail**:Jiaming_li@hust.edu.cn);

龙　霏(1985—),女,广东广州人,工程师,硕士,主要研究方向为电力系统保护、控制与自动化(**E-mail**:longfeil98505@126.com);

文劲宇(1970—),男,湖南长沙人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统稳定分析与控制、人工智能、柔性交流输电和储能技术在电力系统中的应用(**E-mail**:jinyu.wen@hust.edu.cn)。

Research of 500 kV unloaded line energization by large-scale thermal FCB unit

ZHANG Wenfeng[1], SU Yu[2], WANG Ning[1], ZENG Kaiwen[2], LIAO Shiwu[2], LI Jiaming[2], LONG Fei[1], WEN Jinyu[2]

(1. Guangdong Power Grid Co. Ltd., Guangzhou 510600, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: With a large-scale thermal FCB (Fast Cut Back) unit as the black-start power source, a test of 500 kV unloaded line energization is carried out successfully on July 4, 2013. Since long high-voltage line may easily grow the self-excitation and overvoltage during the unloaded line energization, resulting in unsuccessful black-start, the self-excitation characteristics of that unit are analyzed and the analytical results show that the self-excitation will not occur during the test, based on which, an engineering criterion of self-excitation is proposed. The over-voltage characteristics of that line are simulated and calculated, and the calculative results show that the voltage of each measuring point will be within the national standard range during the test.

Key words: thermal units; black start; unloaded line energization; self-excitation; overvoltage; testing; computer simulation

(上接第 160 页 continued from page 160)

用于分析现代电力系统中电力和通信耦合的分布式联合仿真平台

李伟林[1,2],张晓斌[1]

(1. 西北工业大学 自动化学院,陕西 西安 710072;2. 亚琛工业大学 电气与信息技术学院,德国 亚琛 52074)

摘要:联合仿真存在仿真执行时间过长的问题,因此提出了一种分布式的联合仿真平台,该平台利用 MATLAB 的并行运算工具箱 PCT 以加快仿真运行。该分布式联合仿真平台包括图形用户界面、MATLAB 工作站、控制器主机和 OPNET 主机 4 个部分,介绍了各部分的原理和功能,并且建立了 2 种不同的硬件平台以实现所提出的联合仿真方法。最后,分析和仿真了该联合仿真平台在微电网的控制中的应用。

关键词:分布式联合仿真平台;协同分析;电力系统;通信;仿真

中图分类号:TM 73　　**文献标识码**:A　　DOI:10.3969/j.issn.1006-6047.2014.11.024