

· 专论与综述 ·

# 大规模源网荷友好互动系统切实试验技术

刘华伟, 李虎成, 袁宇波, 张小易

( 国网江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

**摘要:** 简要介绍了大规模源网荷友好互动系统切实试验, 提出了基于预置指令下发模式的策略验证技术, 基于全局 GPS 时钟同步的切实试验控制指令传输时间测试技术, 以及基于过零点检测和滤波算法的频率分析技术, 实现了对系统控制时间、动态频率的准确测量。试验结果表明, 切实试验的快速切负荷响应时间和直流闭锁故障瞬间电网频率变化满足要求, 有效验证了大规模源网荷友好互动系统的功能设计的可行性。

**关键词:** 源网荷; 切实试验; 时间测试; 频率分析

**中图分类号:** TM732

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2017)06-0001-06

## 0 引言

特高压电网入苏及可再生清洁能源的大规模消纳正在改变江苏电网的现有结构, 电网运行特性也随之发生根本性改变, 逐步形成一个大受端电网。随着区域电网中的发电机等效惯性及稳定调节能力减弱, 面临多直流双极闭锁或换向失败导致的频率、功角、电压等稳定问题<sup>[1-8]</sup>。

## 1 切实试验概况

2015年9月19日21:58:03, 位于江苏落点的特高压锦苏直流故障, 损失功率4900 MW(直流逆变侧), 故障后, 系统频率快速跌落, 经过12 s(21:58:15)后频率达到最低值49.563 Hz, 频率曲线如图1所示。

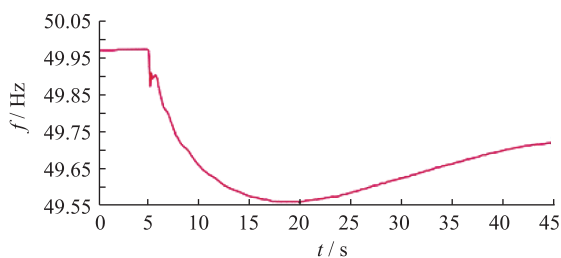


图1 09-19锦苏直流闭锁时电网频率曲线

Fig.1 Frequency curve of "09-19" Jin-Su DC blocking fault

应对大电网风险和平抑清洁能源波动的传统方式是以可控的电源适应不可控的负荷, 在电源调整不能适应负荷变化的情况下, 则采用粗放的方式, 比如拉路、限电等, 调整负荷以实现电源与负荷

的平衡<sup>[7-12]</sup>。2016年, 国内首套“大规模源网荷友好互动系统”(以下简称源网荷系统)在江苏顺利投入试运行, 为大电网安全解决方案提供了新方式。主要是将分散的海量可中断负荷集中起来进行精准实时控制, 从调控电源转变为调控负荷, 实现电网与电源、负荷友好互动, 保障电力供需平衡<sup>[1,2]</sup>。源网荷系统是应对大受端电网故障时快速而有效的切负荷手段, 在预防电网频率波动造成的大面积停电、潮流越限等方面可以发挥更多积极作用, 是一种负荷调控应用创新。通过开展系统切实试验, 可更逼真地验证系统的设计功能和切负荷快速性等效果。

为实际验证华东电网频率紧急协调控制系统的整体功能及应对电网大功率缺额紧急故障下的频率控制效果, 江苏源网荷系统的系统保护快速切负荷功能作为组成部分配合华东频率紧急协调控制系统进行联动, 于2017年5月24日参与锦苏特高压直流闭锁系统冲击试验, 并进行切实负荷功能验证。

### 1.1 切实试验目的

配合华东电网频率紧急协调控制系统的整体功能试验, 验证源网荷系统的控制策略和执行效果是否满足华东电网特高压直流双极闭锁等严重故障时的电网应急处置要求。

(1) 验证源网荷系统接收华东频率紧急协调控制系统指令后负荷切除与恢复控制策略, 以及执行效果的正确性;

(2) 测试源网荷系统通过2M专线和无线4G专网切实负荷的整组动作响应时间;

(3) 优化各分系统间的配合策略, 提高系统的整体运行性能。

### 1.2 切实试验内容

源网荷系统切实试验是在特高压锦苏直流闭

收稿日期:2017-07-05;修回日期:2017-08-08

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YEB0901104);  
国家电网公司科技项目(面向特高压交直流大受端电网的大规模负荷精准协调互动控制技术研究)

锁,产生系统冲击的紧急情况下,接收华东频率协控系统控制指令,完成可中断负荷的快速切除,以验证系统指令执行、控制策略、终端动作和负荷恢复的正确性,并针对不同接入类型的用户(2M 专线和无线 4G),进行整组切除时间测试。

整体功能实切试验前对调度主站、木渎中心站、木渎子站、太仓子站、玉山子站、吴江子站和网荷互动终端之间的通道状态、所有装置和网荷互动终端的压板状态和装置定值进行检查,在正常运行状态下开展整体功能实切试验。

根据华东协控总站下发的切负荷容量和木渎中心站各层级可切负荷容量确定控制策略;根据子站和网荷互动终端动作情况检查实切负荷策略及网荷互动终端响应的正确性;根据各子站上送的实切负荷前后及负荷恢复前后的可切容量信息变化,检查系统接受华东指令后的实切执行效果;验证网荷互动终端的实际动作情况。针对 2M 专线和 4G 无线专网不同接入方式,分别选定 4 个 2M 专线用户、1 个无线 4G 专网用户测试整组切除时间。

### 1.3 实切试验工况

实切试验前,华东全网负荷 170 GW,江苏全省负荷 64 150 MW,苏州地区负荷 17 510 MW,全网频率 50.00 Hz,锦苏直流送电功率 3030 MW,复奉直流送电功率 2536 MW,宾金直流送电功率 2483 MW,灵绍直流送电功率 1922 MW,龙政直流送电功率 970 MW,葛南直流送电功率 740 MW,宜华直流送电功率 1807 MW,林枫直流送电功率 883 MW。

### 1.4 实切试验效果

5 月 24 日 14:04:57,开始实切试验,人工触发苏州换流站直流闭锁故障。华东区域内除锦苏特高压外的 7 回特高压直流均参与直流功率提升,切除华东 7 台抽水运行机组(半岭、仙居、天荒坪、桐柏、宜兴、响水涧、琅琊山抽水蓄能电厂各 1 台),并实际切除部分苏州地区实时可中断负荷。其中,锦苏直流闭锁后,其他直流功率提升总量为 680 MW,抽蓄切除功率 2020 MW。源网荷系统苏州地区毫秒级实时可中断负荷(最大可切容量 1100 MW)全部参与实切验证。

华东频率协控系统向江苏下发切负荷总容量 260 MW,木渎中心站实际下发切除可中断负荷容量 260 MW,均为第一层级,切除用户 233 户,实际切除功率 260 MW。实切过程中,中心站、子站、就近变电站至网荷互动终端各通道信号正常,动作执行正确。控制系统动作后,全网频率波动在预期范围内,源网荷系统对稳定电网频率作用效果显著。

14:20,80%的可中断负荷用户根据负荷恢复提示信息,在驻场人员的指导下自行恢复负荷。14:30,全部负荷恢复。16:55,锦苏直流双极恢复运行。

实切试验前后苏南地区重要断面潮流分布如表 1 所示。由于锦苏直流闭锁,直流落点苏南地区存在大额功率缺失,引起苏南地区相关输电断面功率增大,但未发生越限。

表 1 重要断面实切试验前后潮流值

Table 1 Power flow of important sections before and after real load shedding MW

断面	稳定限额	试验前潮流	试验后潮流
梅里—木渎双线	3000	1020	2390
斗山—常熟南双线	2000	840	1320
陆桥—常熟南单线	800	180	370
东吴—石牌 5681 单线	1350	450	1070
江都—晋陵 5291 单线	2000	1360	1330
泰兴—斗山双线	2800	1730	2230

## 2 基于预置指令下发模式的策略验证技术

为确保实切试验的顺利进行,需提前验证系统通信链路和策略执行的正确性,提出基于预置指令下发模式的策略验证技术。在系统中设定预置模式,从中心站开始只发待测试位的切负荷指令,不执行动作,有预置返回。启动条件为由中心站投入传动试验压板,退出总功能压板,预置选项启用,发送的指令为预置命令。系统实切试验测试内容如图 2 所示。

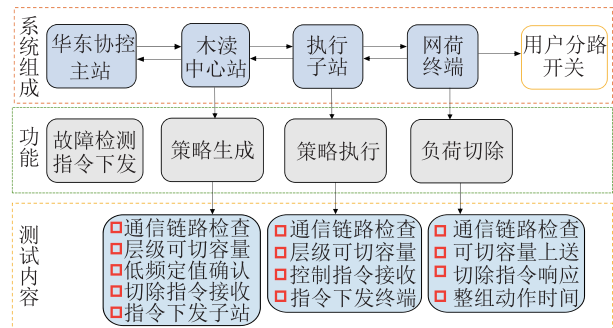


图 2 系统实切试验测试框架

Fig.2 System test framework of real load shedding

为配合实切试验的策略验证,中心站、子站、终端分别设置软硬压板,逻辑实现如图 3 所示。其中,中心站硬压板包括总功能压板和负荷恢复压板;子站包括总功能硬压板和通道硬压板,软压板包括通道软压板和负荷恢复软压板;网荷互动终端包括精准切负荷快切软压板,精准切负荷合闸软压板,用户分路开关跳闸硬压板,用户分路开关合闸硬压板。各阶段压板状态如表 2 所示。

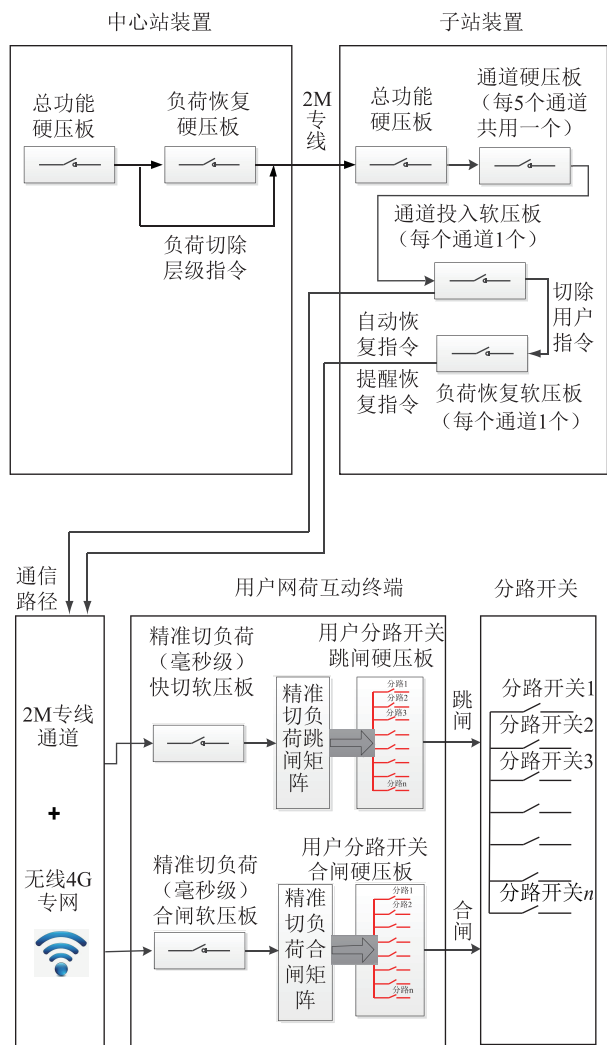


图3 系统压板设置逻辑

Fig.3 System board setting logic diagram

表2 各试验阶段压板状态表

Table 2 Table of board state at each test stage

压板	所在位置	试验前	模拟试验	切实试验
总功能硬压板	中心站	分	合	合
负荷恢复硬压板	中心站	分	合	合
总功能硬压板	子站	分	合	合
通道硬压板	子站	合	合	合
通道投入软压板	子站	分	合	合
负荷恢复软压板	子站	分	分	分
快切软压板	参与终端	分	合	合
合闸软压板	参与终端	分	分	分
跳闸硬压板	参与终端	合	合	合
合闸硬压板	参与终端	分	分	分

### 3 基于全局 GPS 时钟同步的时间测试技术

针对切实演练开展基于全局 GPS 时钟同步技术的控制指令传输时间测试,测试方案如图 4 所示。依次设  $T_0$  为苏州换流站直流子站直流控保发出闭

锁信号的时标;  $T_1$  为华东协控中心站向木渎主站下发控制命令时的时标;  $T_2$  为切负荷控制主站向切负荷子站下发控制命令时的时标;  $T_3$  为切负荷子站向用户下发控制命令时的时标;  $T_4$  为网荷终端向开关下发跳闸指令时的时标;  $T_5$  为开关跳闸信号到达方天网荷终端时的时标;  $T_5 - T_4$  为用户开关动作时延。则整组时延(直流双极闭锁至用户开关跳闸的时延)可表示为  $\Delta T = T_5 - T_0$ 。

其中,  $T_0, T_1, T_2, T_3$  为各控制站系统记录的事件时间,通过站内时间同步装置获得 GPS 时间,时标精度 1 ms;  $T_4, T_5$  分别由高精度时间测试仪的外接 GPS 时钟进行自对时,获得开关空接点动作时间,时标精度 1 ms。所选高精度时间测试仪的对时精度为 1  $\mu$ s,与各控制站系统时间误差在 1 ms 以内。

经测试,参与试验的时间测试仪平均对时误差小于 70  $\mu$ s。同时,各控制站系统均经 GPS 统一对时,整体试验系统满足本次时间测试需求。

在 4 个精准切负荷子站下分别选择一个专用光纤用户,并对每个用户分路支路开关辅助节点进行时间测试。同时,选择玉山子站下的一个无线 4G 用户进行测试。用户终端动作时间测试如表 3 所示。切负荷整体过程无线 4G 专网整组动作时间为 261 ms,光纤专线整组动作时间最快为 212 ms,平均为 226.5 ms。

### 4 基于过零检测和滤波算法的频率分析技术

在吴江子站通过 DEWETRON 数据记录仪对直流闭锁时刻的 500 kV 母线电压波形进行测录,采样频率为 10 kHz,电压测录数据绘制如图 5 所示。在直流闭锁时,电压测录窗中的电压波形发生畸变。

电压频率值可以由电压测录值分析获得。传统的频率测量包括过零点算法、离散傅里叶变换以及递推 DFT 算法等。过零点算法通过相邻过零点时间间隔的计算跟踪电压频率。录波仪记录一系列离线数据序列  $(t_0, v_0), (t_1, v_1), \dots, (t_{N-1}, v_{N-1}), \dots$ 。通过相邻 2 个电压符号不同的数据点进行过零检测计算,求得过零点时间<sup>[10-12]</sup>。

线性化过零时刻计算公式:

$$t = t_k - v_k \frac{t_{k-1} - t_k}{v_{k-1} - v_k} \quad (1)$$

式中:  $v_k, t_k$  为电压数据的第  $k$  个采样值、采样时间;  $t$  为计算的过零点时刻。

通过过零点算法对所测电压波形的频率进行

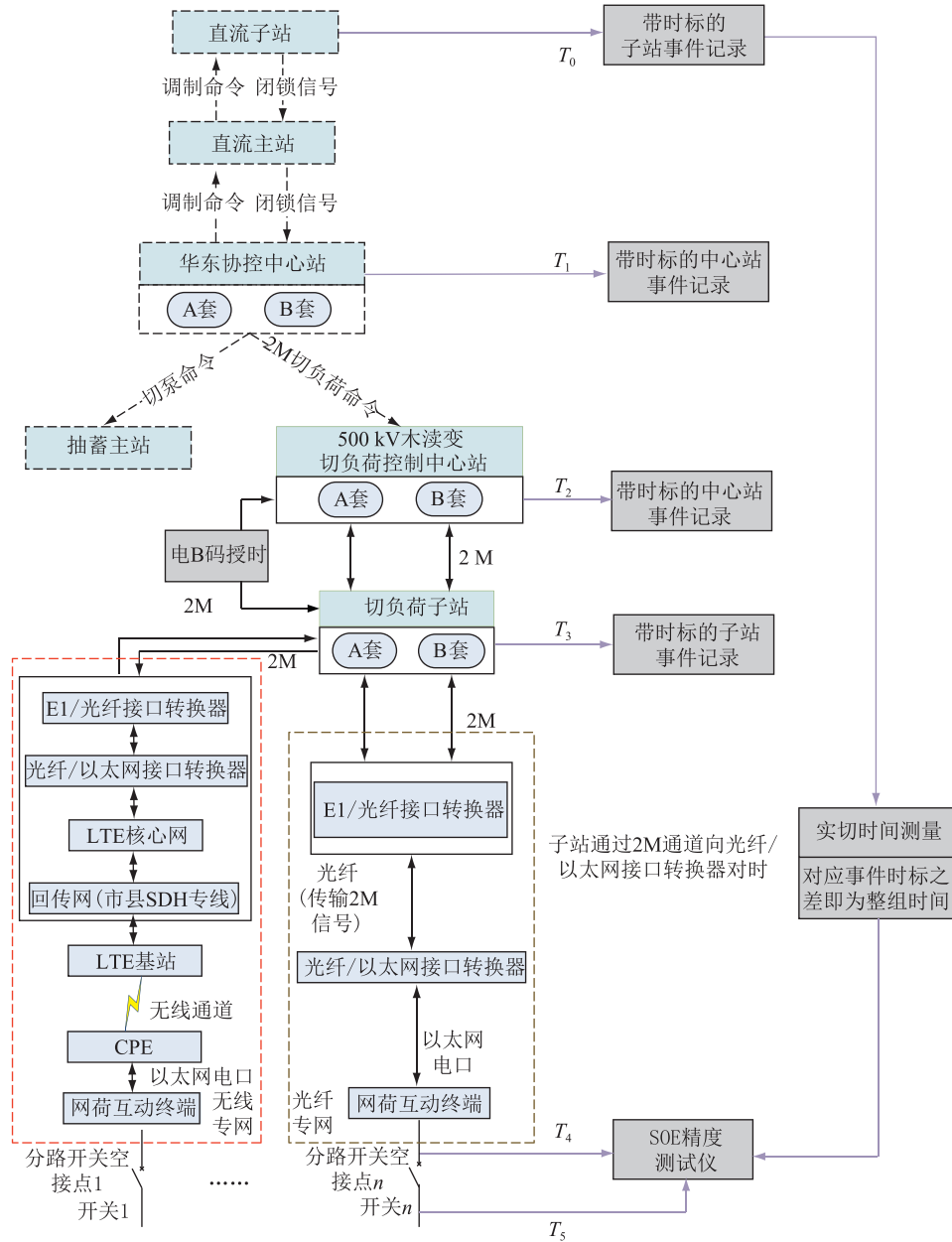


图4 源网荷系统精准负荷控制时间测试  
Fig.4 Precision load control time test of “Source-Grid-Load” system

表3 用户终端动作时间测试

用户类型	直流功率失去时刻时标	用户侧开关辅助节点动作时标	整组动作时间/ms
光纤用户 1	14:04:57:530	14:04:57:768	238
光纤用户 2	14:04:57:530	14:04:57:759	229
光纤用户 3	14:04:57:530	14:04:57:742	212
光纤用户 4	14:04:57:530	14:04:57:757	227
无线 4G 用户	14:04:57:530	14:04:57:791	261

跟踪分析,得到如图6所示频率波形。由图6可知,频率最低点发生在波形畸变的周期,最低点频率为49.528 Hz,判断该点数据为电压畸变引起的频率测量误差,如果考虑电压畸变给过零点算法带来的影

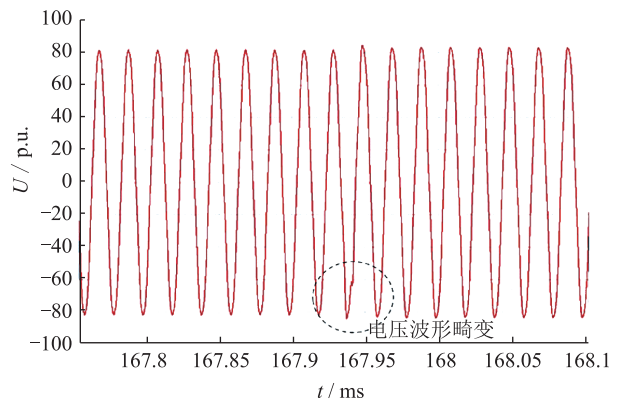


图5 直流闭锁时吴江变母线电压测录曲线  
Fig.5 Busbar voltage curve of Wujiang substation when “09-19” Jin-Su DC blocking fault

响,最低点频率为 49.988 Hz,稳态阶段系统频率为 50.03 Hz,频率跌幅为0.042 Hz。

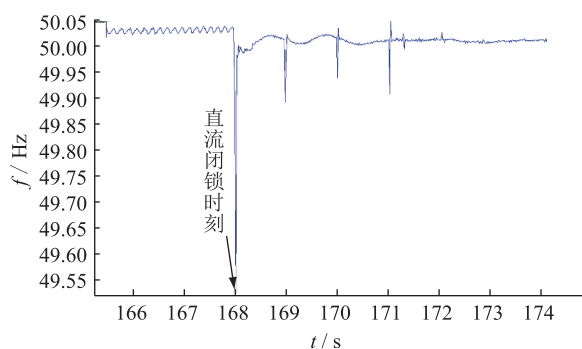


图6 过零点算法频率计算曲线

Fig.6 Frequency calculation curve by zero-crossing algorithm

从上述实验结果中可以看出,在锦苏直流闭锁时,系统电压会发生 1~2 个周波的畸变,这种电压的畸变会对常见的频率跟踪算法产生影响,造成频率波形的振荡,使得频率在畸变周波范围内出现较大幅度的下跌。

为了降低电压畸变对频率测量的影响,采用滤波算法先对电压波形进行滤波,然后使用过零点算法对电压频率进行跟踪计算,可以得到图 7 所示波形<sup>[13-15]</sup>。从仿真结果中可以看出,经过滤波之后再行频率跟踪可以减小电压畸变对频率测量的影响,但并不能完全消除。

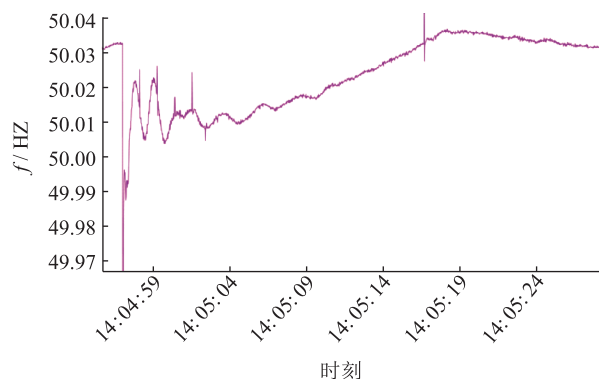


图7 滤波后过零点算法频率计算曲线

Fig.7 Frequency calculation curve by Fourier filter and zero-crossing

综合分析:全网频率在闭锁故障后最低跌落至 49.97 Hz,500 kV 吴江变电站(距离特高压苏州换流站约 1.8 km)母线电压频率如图 7 所示。其中,在直流闭锁瞬间,由于换流站的无功补偿滤波器大组未能快速切除,吴江站母线电压瞬间升高,电压波形略有畸变,导致频率测量算法的数据窗产生瞬间频率测量误差,实际电网的真实频率应忽略直流闭锁故障时刻前 3 个周波的暂态测量误差。

## 5 结语

围绕大规模源网荷友好互动系统切实试验,展开介绍了预置模式的策略验证、切实试验控制指令时间测试和系统动态频率计算等技术,为系统调试试验提供了技术手段和有效分析方法。无线 4G 专网整组动作时间为 261 ms,光纤专线整组动作时间最快为 212 ms,平均为 226.5 ms,满足了系统保护快速切负荷的时间要求。围绕母线电压录波数据,开展了不同算法的频率分析,实现了切实试验故障时刻电网频率的精确测录和计算,验证了源网荷系统对大电网故障应急处置的频率控制效果。

### 参考文献:

- [1] 尹积军. 支撑特高压互联电网安全运行的供需友好互动技术研究[J]. 中国电机工程学报,2016,36(21):5715-5724.  
YIN Jijun. Research on load friendly interactive technology for safe operation of UHV interconnected power grid [J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(21):5715-5724.
- [2] 韩冰,姚建国,於益军,等. 负荷主动响应对特高压受端电网直流闭锁故障的探讨[J]. 电力系统自动化,2016,40(18):1-6.  
HAN Bing, YAO Jianguo, YU Yijun, et al. Discussion on active load response at receiving end power grid for mitigating UHVDC blocking fault [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(18):1-6.
- [3] 庄侃沁,武寒,黄志龙,等. 龙政直流双极闭锁事故华东电网频率特性分析[J]. 电力系统自动化,2006,30(22):101-106.  
ZHUANG Kanqin, WU Han, HUANG Zhilong, et al. The east china power grid frequency characteristic analysis in the event of Long-Zheng DC bipolar blocking [J]. Automation of Electric Power Systems,2006,30(22):101-106.
- [4] 王莹,刘兵,刘天斌,等. 特高压直流闭锁后省间紧急功率支援的协调优化调度策略[J]. 中国电机工程学报,2015,35(11):2695-2702.  
WANG Ying, LIU Bing, LIU Tianbin, et al. Coordinated optimal dispatching of emergency power support among provinces after UHVAC transmission system block fault [J]. Proceedings of the CSEE, 2015,35(11):2695-2702.
- [5] 周坚,黄志龙,祝瑞金,等. 大受端电网稳定分析和安全控制策略研究[J]. 华东电力,2009,37(10):1661-1665.  
ZHOU Jian, HUANG Zhilong, ZHU Ruijin, et al. Stability analysis and security control strategies for large receiving end grids [J]. East China Electric Power, 2009, 37(10):1661-1665.
- [6] 姚建国,杨胜春,王珂,等. 智能电网“源-网-荷”互动运行控制概念及研究框架[J]. 电力系统自动化,2012,36(21):1-6.  
YAO Jianguo, YANG Shengchun, WANG Ke, et al. Concept and research framework of smart grid “source-grid-load” inter-

- active operation and control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(21): 1-6.
- [7] 李碧君,侯玉强. 紧急负荷调节用于安全稳定紧急控制的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(11): 104-110.  
LI Bijun, HOU Yuqiang. Research of emergency load regulation for security and stability control[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(11): 104-110.
- [8] 罗建裕,李海峰,江叶峰,等. 基于稳控技术的源网荷友好互动精准负荷控制系统[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.
- [9] 李虎成,袁宇波,卞正达,等. 面向特高压交直流大受端电网的频率紧急控制特性分析[J]. 电力工程技术, 2017, 36(2): 27-31.  
LI Hucheng, YUAN Yubo, BIAN Zhengda, et al. The frequency emergency control characteristic analysis for UHV AC/DC large receiving end power grid[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(2): 27-31.
- [10] 朱鑫要,汪惟源,汪成根. 江苏特高压交直流输电交互影响研究[J]. 江苏电机工程, 2016, 35(2): 39-42.  
ZHU Xinyao, WANG Weiyan, WANG Chenggen. Analysis of interaction between UHVAC and UHVDC for Jiangsu Power Grid[J], 2016, 35(2): 39-42.
- [11] 熊小伏,周永忠,周家启. 计及负荷频率特性的低频减载方案研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(19): 48-51.  
XIONG Xiaofu, ZHOU Yongzhong, ZHOU Jiaqi. Study of underfrequency load shedding scheme based on load frequency characteristics[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(19): 48-51.
- [12] 王建国,孙华东,张健,等. 锦屏—苏南特高压直流投运后电网的稳定特性及协调控制策略[J]. 电网技术, 2012, 36(12): 66-70.  
WANG Jianming, SUN Huadong, ZHANG Jian, et al. Stability characteristics and coordinated control strategy of interconnected grid integrated with UHVDC transmission line from Jinping to Sunan[J]. Power System Technology, 2012, 36(12): 66-70.
- [13] 吴笃贵,贺春,易永辉. 一种新颖的频率跟踪算法[J]. 电网技术, 2004, 28(14): 39-43.  
WU Dugui, HE Chun, YI Yonghui. A novel frequency tracking algorithm[J]. Power System Technology, 2004, 28(14): 39-43.
- [14] 牟龙华,邢锦磊. 基于傅里叶变换的精确频率测量算法[J]. 电力系统自动化, 2018, 32(23): 67-70.  
MU Longhua, XING Jinlei. An accurate frequency measuring algorithm for power systems based on fourier transform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 32(23): 67-70.
- [15] 禹永植,张忠民,席志红. 基于傅里叶变换的高精度频率及相量算法[J]. 电网技术, 2007, 31(23): 83-86.  
YU Yongzhi, ZHANG Zhongmin, XI Zhihong. A high-precision algorithm for frequency and phasor based on fourier transform[J]. Power System Technology, 2007, 31(23): 83-86.

---

作者简介:



刘华伟

刘华伟(1966—),男,江苏宜兴人,高级工程师,主要研究方向为电网运行与控制、智能电网技术、电力企业管理等(E-mail:hwliu@jsgcc.com.cn);

李虎成(1987—),男,湖北十堰人,工程师,主要研究方向为电网运行与控制、调度自动化;

袁宇波(1975—),男,江苏丹阳人,高级工程师,主要研究方向为电网运行与控制、继电保护试验和研究;

张小易(1978—),男,河南许昌人,高级工程师,主要研究方向为继电保护、调度自动化相关技术研究。

## The Actual Load Shedding Verification Test Technology of Large-scale “Source-Grid-Load” Friendly Interactive System Introduction

LIU Huawei, LI Hucheng, YUAN Yubo, ZHANG Xiaoyi

(State Grid Jiangsu Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China)

**Abstract:** The actual load shedding verification test of large-scale “source-grid-load” friendly interactive system is introduced. A strategy validation technique based on preset instruction release mode is proposed. A time test method of actual load shedding control command transmission according to global GPS clock synchronization technology, and a frequency measurement method according to zero-crossing detection and digital filter technology are also proposed. The system’s control time and dynamic frequency can be accurately measured. Results show that quick load shedding time and frequency changes when DC blocking fault happens meet system requirements. The feasibility of the system function design is validated.

**Key words:** source-grid-load; real load shedding verification; time test; frequency analysis

(编辑 钱悦)