

面向特高压交直流大受端电网的频率紧急控制特性分析

李虎成¹, 袁宇波¹, 卞正达², 徐伟¹, 周琦¹

(1. 国网江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103;

2. 东北电力大学, 吉林 吉林 132012)

摘要:以特高压交直流混联为特征的大受端电网易发连锁故障,一旦发生直流闭锁,频率稳定问题可能随之出现。针对多直流协调控制、安控抽蓄切泵、精准负荷控制等频率紧急控制方法,开展基于实际电网典型运行方式下电网的频率紧急控制特性仿真,验证现有频率紧急控制方法的有效性。

关键词:特高压交直流;直流闭锁;大受端电网;频率紧急控制;仿真分析

中图分类号:TM732

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2017)02-0027-05

0 引言

构建全球能源互联网,旨在推动以清洁和绿色方式满足全球电力需求。随着电网规模的不断扩大和电力负荷的日益增长,以清洁能源为主导、以电为中心的能源新格局逐步形成,区域电网加快迈进特高压、大电网、高比例清洁能源时代,电网大范围优化配置资源能力显著提升。与此同时,电网一体化特征不断加强,直流跨区输送容量不断增加,交直流、送受端电网间耦合日益紧密,故障对电网的影响由局部转为全局^[1-4]。近几年的电网运行数据表明,特高压直流闭锁故障易引发频率稳定问题。2015年9月19日21:58,锦苏特高压直流双极因直流分压器电路板间隙被击穿导致线路欠压保护动作,发生双极闭锁,损失功率达4900 MW。事故后,系统频率快速跌落,经过12 s,华东电网频率从49.97 Hz跌至最低49.563 Hz(创下近10年来首次跌破49.8 Hz的记录)。最后在机组一次调频和AGC的作用下,全网系统频率得以恢复。由于多馈入直流容量占比越来越大,电网同步转动惯量逐渐减小,系统的稳定调节能力也随之减弱,单回直流闭锁就有可能触发低频减载动作,电网的频率稳定受到严峻考验^[5-10]。本文通过对实际电网典型方式模型进行数值仿真,模拟锦苏特高压直流闭锁故障情况下各种频率紧急控制方法的响应特性,验证特高压直流故障处置体系整体框架,为特高压直流故障大功率冲击所带来的频率稳定问题提供解决方案。

1 频率紧急控制工程实践

华东电网作为国家电网公司最大的受端电网,

收稿日期:2016-12-18;修回日期:2017-02-01

基金项目: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)

拥有复奉、锦苏、宾金三大特高压直流,当前安全形势严峻。一方面,单一直流来电规模不断提高,电网面临更高频率冲击源的威胁;另一方面,随着直流受电规模增大,直流对网内常规电源的置换效应进一步加剧,相同功率缺额导致的电网频率跌落越大。系统运行风险大,亟需保障受端电网的安全稳定运行^[11-17]。

在大受端电网直流闭锁故障的频率紧急控制方面,江苏公司已做了一些初步尝试,建成了大规模源网荷友好互动系统,构建了基于可中断负荷快速响应的特高压故障应急处置体系,以提升大电网安全综合防御能力及省级电网运行弹性。面向特高压交直流大受端电网的频率紧急控制如图1所示,频率紧急控制已延伸到不同电压等级电网的多种控制对象。

为解决特高压直流闭锁后的电网频率稳定问题,华东电网构建了频率紧急协调控制系统,主要由协控运行主站、多直流协调控制系统、精准负荷控制系统、抽蓄切泵控制系统四大部分组成,实现多直流协调控制、安控切抽蓄机组、精准负荷控制等功能,如图2所示。其中,多直流协调控制主站下设±800 kV多直流协调控制子站和±500 kV直流协调控制子站,抽蓄切泵控制主站下设抽蓄切泵控制执行站,精准负荷控制主站下设精准负荷控制子站。

针对华东电网特高压直流故障,采取多时间尺度、多资源协调优化控制。事故前,利用自动发电量控制(AGC)调节、精准负荷常规控制进行预防控制,保持电网稳定裕度,包括足够的旋转备用、联络线及断面潮流控制等;事故发生后300 ms内,频率紧急控制系统采取多直流协调控制、抽蓄切泵及精准负荷紧急控制等多种措施,应对电网频率、电压等稳定问题;事故发生1 min后,利用AGC调节、精准负荷常规控制进行校正和恢复控制,防止断面越限、控制联络线超用、恢复旋转备用等。

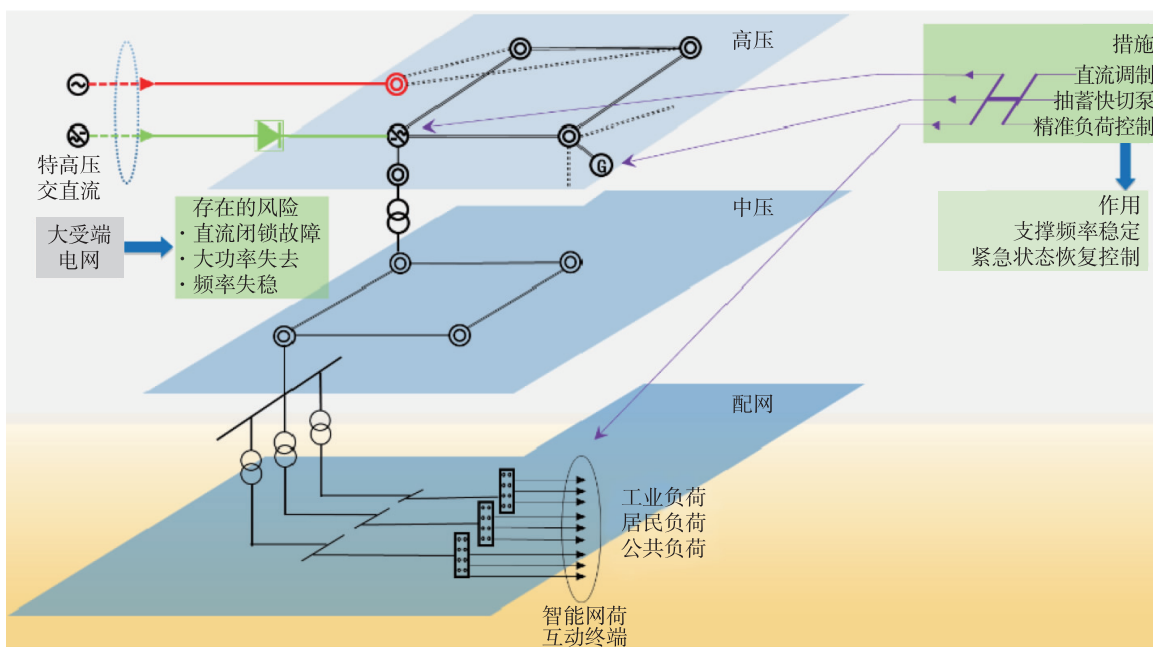


图1 面向特高压交直流大受端电网的频率紧急控制

Fig.1 The frequency emergency control framework of UHV AC/DC large receiving end power grid

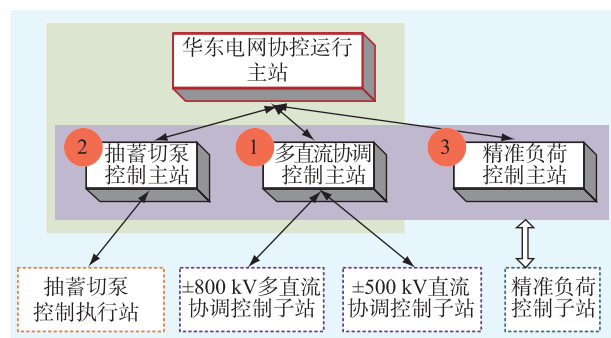


图2 华东电网频率紧急协调控制系统

Fig.2 Frequency emergency coordination control system framework of East China power grid

系统在故障前,考虑直流运行工况及相关交流断面的功率约束,实时计算每回直流可紧急提升/回降的功率。故障后,由控制子站识别直流故障,计算相应直流故障后的损失功率,协控运行主站结合当前电网的交流断面运行工况、抽蓄运行状态以及可控负荷容量等信息,按照优先调制直流,其次控制抽蓄水泵,最后精准负荷控制的顺序进行可控资源的协调控制。频率紧急协调控制系统功能和策略简图如图3所示。

(1) 多直流协调控制。利用直流短时过负荷能力,在直流闭锁后迅速调整其余直流输送功率,实现对系统频率的快速支撑。利用特高压直流、常规直流的调制能力,实现直流功率紧急调制功能。

(2) 安控抽蓄切泵控制。在华东的直调抽蓄电站建设抽蓄切泵控制子系统,按照主站远方信号或就地频率信号,同时或分多轮切除电厂所有机组功

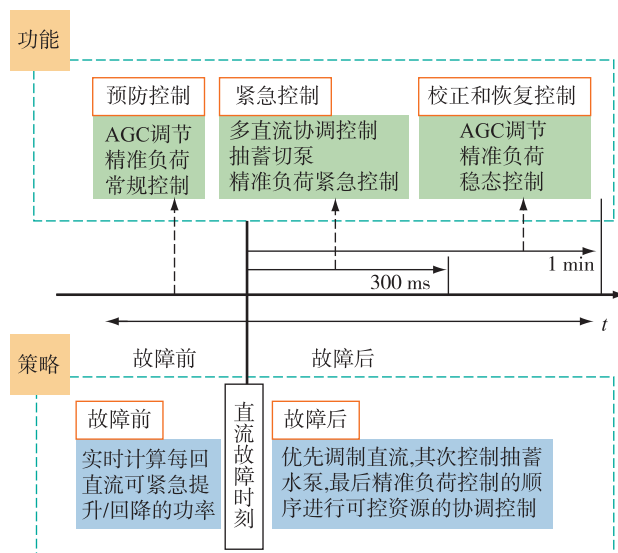


图3 频率紧急协调控制系统功能和策略

Fig.3 Function and strategy diagram of frequency emergency coordination control system

能。通过切除抽蓄水泵,实现释放负荷以提供功率紧急支援。

(3) 精准负荷控制。通过新建专用通道直接控制大用户负控终端,对可中断负荷实施分层级控制,实现毫秒级的负荷快速精准控制。

2 特高压直流闭锁故障时的频率特性

锦苏特高压 ± 800 kV 直流输电工程,实现从四川锦屏至江苏苏州共计2090 km 的长距离直流输电,输电容量达7200 MW,是目前世界上输送容量最大的直流输电工程,其直流输电示意如图4所示。

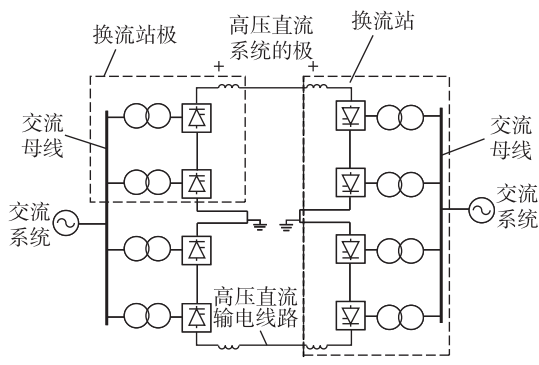


图4 锦苏特高压直流输电示意图

Fig.4 Diagram of Jinsu UHV DC transmission system

本文以锦苏特高压直流为例说明直流闭锁故障时对电网的影响,仿真采用2015年江苏电网夏季某一典型日运行方式模型,晚高峰过后,负荷处于下降阶段, ± 800 kV锦苏直流双极运行5600 MW, ± 500 kV龙政直流双极运行2100 MW。

分别设置锦苏直流单极和双极闭锁故障,根据机组一次调频特性展开锦苏直流闭锁故障时的频率分析。

(1) 一次调频性能良好,均能正常动作。锦苏直流闭锁故障时的系统频率仿真如图5所示。由图可见,单极闭锁时,由于系统的一次调频作用,全网机组调速器有效动作,频率快速维稳至49.9 Hz以上;双极闭锁时,在8 s时刻,系统到达49.57 Hz的最低频率,14.5 s时刻,频率恢复至49.8 Hz以上。

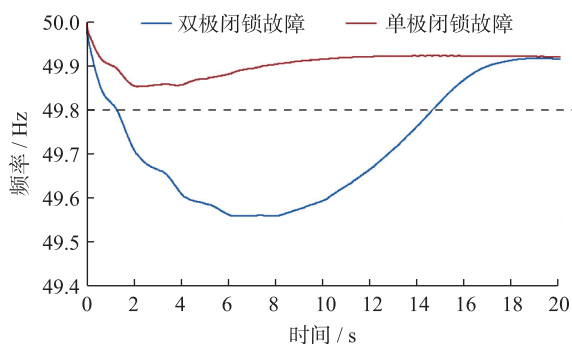


图5 锦苏直流闭锁故障时的系统频率仿真

Fig.5 Frequency simulation diagram in the event of HVDC pole blocking

(2) 一次调频性能不足,部分正常动作。分别按照单极闭锁和双极闭锁故障时,全网40%,60%,80%的有效机组调速器参与一次调频进行仿真。锦苏直流单极、双极闭锁故障时的一次调频效果仿真如图6、图7所示。

由图6和图7可以看出,全网的一次调频能力直接决定了锦苏直流闭锁故障后频率的快速恢复能力;若故障瞬间功率缺额过大,一次调频也难以将频率稳定在能力范围内。一次调频利用系统固

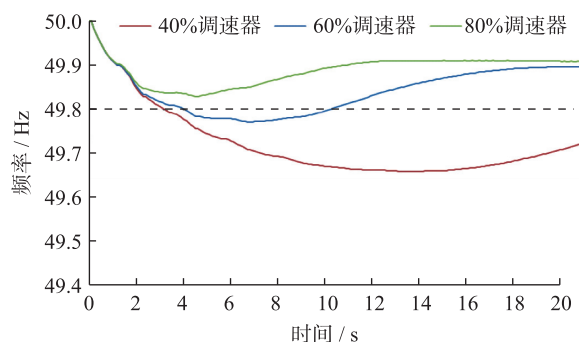


图6 锦苏直流单极闭锁时一次调频效果仿真

Fig.6 Primary frequency regulation simulation diagram in the event of HVDC unipole blocking

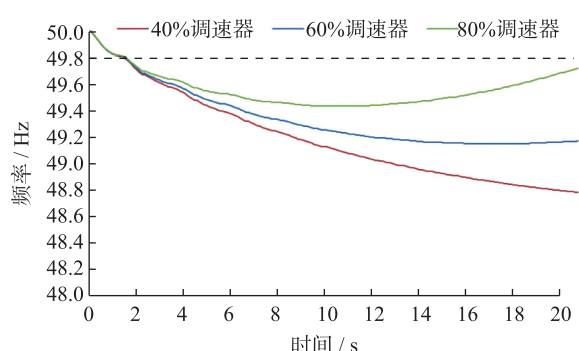


图7 锦苏直流双极闭锁时一次调频效果仿真

Fig.7 Primary frequency regulation simulation diagram in the event of HVDC bipolar blocking

有的负荷频率特性及调速器的作用,通过自动调节功率的增减,阻止系统频率偏离额定值以限制电网频率变化,使频率维持稳定,属于有差调节。

为提高特高压直流闭锁后的频率稳定性,有必要进一步优化现有控制系统中的一次调频逻辑,提高全网的一次调频性能;加强对机组一次调频性能的测试及评价,确保机组一次调频功能的有效动作。

3 特高压直流闭锁故障时不同紧急控制策略仿真

模拟锦苏特高压直流双极闭锁故障,依次对频率紧急控制工程中的直流调制、抽蓄切泵、精准负荷控制等功能的调频特性进行仿真分析,表1为锦苏直流双极闭锁时的不同控制策略。

策略一。锦苏直流发生双极闭锁时,全网瞬间损失5600 MW受进功率,由多直流协调控制主站发直流调制指令,调制龙政直流双极输送功率提高10%,即210 MW,在300 ms左右执行完毕。

策略二。锦苏直流发生双极闭锁时,有2台抽水蓄能机组正处于抽水状态,功率400 MW。在策略一的基础上,由抽蓄切泵控制主站发切泵指令,抽蓄切泵400 MW,在300 ms左右执行完毕。

表 1 锦苏直流双极闭锁时的不同控制策略

Table 1 Different emergency control strategies in the event of HVDC bipolar blocking

名称	控制策略
策略一	直流调制 10%
策略二	直流调制 10%; 抽蓄切泵 400 MW
策略三	直流调制 10%; 抽蓄切泵 400 MW; 精准负荷控制 1000 MW
策略四	直流调制 10%; 抽蓄切泵 400 MW; 精准负荷控制 1000 MW; 秒级负荷控制 1000 MW
策略五	直流调制 10%; 抽蓄切泵 400 MW; 精准负荷控制 1000 MW; 秒级负荷控制 1600 MW

策略三。锦苏直流发生双极闭锁时,全省可参与频率紧急控制的毫秒级精准负荷容量为 1000 MW。在策略二的基础上,由精准负荷控制主站发毫秒级负荷控制指令,按轮次精准切除负荷 1000 MW,500 ms 左右开始,1 min 内执行完毕。

锦苏直流闭锁故障时的不同紧急控制策略的仿真如图 8 所示。其中,策略一中的直流调制功能增加了 210 MW 直流输送功率,为系统提供少量的功率支撑,系统频率曲线有所改善;策略二中的抽蓄切泵功能切除了 400 MW 水泵负荷,适当减少了系统负荷,系统频率显著提升;策略三中的精准负荷控制功能毫秒级切除了 1000 MW 负荷,进一步减少了系统负荷,系统频率加快恢复。可见,直流调制+抽蓄切泵+精准负荷控制的频率紧急控制策略可以在多时间尺度、空间维度为系统提供紧急功率支撑,达到较好的频率紧急控制和恢复效果。

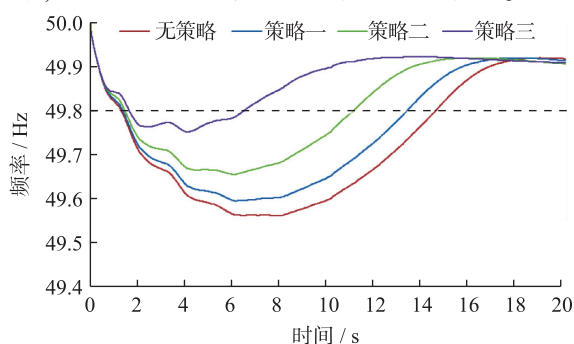


图 8 锦苏直流双极闭锁时不同紧急控制策略仿真

Fig.8 Different emergency control strategies' simulation diagram in the event of HVDC bipolar blocking

策略四。除了用于频率紧急控制的毫秒级精准负荷,还有秒级可控负荷。在策略三的基础上,增加 1000 MW 的秒级可控负荷,8 s 左右开始实施控制,15 s 内控制完毕。

策略五。锦苏直流发生双极闭锁时,在策略三的基础上,增加 1600 MW 的秒级可控负荷,8 s 左右开始实施控制,15 s 内控制完毕。

锦苏直流闭锁故障时秒级可控负荷参与频率

紧急控制的仿真如图 9 所示。其中,策略三、策略四、策略五在 8 s 之前的控制效果是相同的,从 8 s 开始,策略四较策略三增加了 1000 MW 的秒级可控负荷切除量,策略五较策略四增加了 600 MW 的秒级可控负荷切除量。随着可控负荷控制量的增大,系统的频率加快恢复;可控负荷以切除的方式参与调频,可以在系统一次调频的基础上加强调频效果;当可控负荷控制结束,系统的频率变化在 AGC 作用之前继续受一次调频性能的制约。

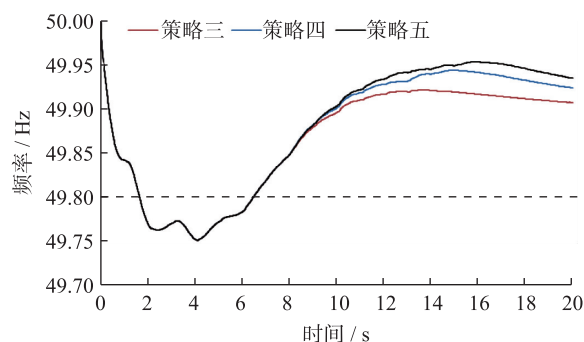


图 9 秒级可控负荷参与频率紧急控制仿真

Fig.9 Frequency emergency control simulation diagram with second level controllable load

4 结语

结合特高压交直流大受端电网的现状,介绍了华东电网在应对特高压直流闭锁故障方面开展的频率紧急控制工程实践,并依次对锦苏直流闭锁故障时的频率特性及多直流协调控制、安控抽蓄切泵、精准负荷控制等频率紧急控制效果进行仿真。根据仿真结果可以得出以下结论和启示:(1) 直流闭锁对受端电网的频率易造成较大冲击,大功率缺额引发频率下降,严重时可导致受端电网频率失稳;(2) 推进电厂一次调频优化提升工作,全面提升全网的一次调频性能,有助于直流闭锁故障时系统的频率稳定和恢复;(3) 优化多直流协调控制、安控抽蓄切泵、精准负荷控制等频率紧急控制策略,可提升多时间和空间尺度的功率紧急支撑效果;(4) 开展大电网安全综合防御体系建设,完善系统频率紧急控制功能,综合利用全网各种可控资源,可减小大功率冲击下的系统频率、电压波动,阻断连锁故障路径,降低稳定破坏风险,保障电网安全运行。

参考文献:

- [1] 刘盛松,秦旭东,汪志成,等. 计及潮流断面稳定限额的分区电网最大供电能力研究[J]. 江苏电机工程,2015,34(5):5-9.
- LIU Shengsong, QIN Xudong, WANG Zhicheng, et al. Study on total supply capability of zone grids considering interface flow limits[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2015,34(5):5-9.

- [2] 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.
- [3] 卫鹏,刘建坤,周前,等. 大规模区外来电失去背景下电网响应机制的研究[J]. 江苏电机工程,2016,35(3):13-16.
WEI Peng, LIU Jiankun, ZHOU Qian, et al. Study on grid response mechanism to large-scale outer power loss[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2016, 35(3):13-16.
- [4] 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 Weiyuan, WANG Chenggen. Analysis of interaction between UHVAC and UHVDC for Jiangsu power grid[J], 2016,35(2):39-42.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 胡伟,刘金官,刘华伟. 区外来电对江苏电网的影响及对策[J]. 华东电力,2006,34(1):52-56.
HU Wei, LIU Jinguan, LIU Huawei. Influence of power from outside on Jiangsu power grid and the countermeasures[J]. East China Electric Power, 2006, 34(1):52-56.
- [8] 赵强,张丽,王琦. 系统负荷频率特性对电网频率稳定性的影响[J]. 电网技术,2011,35(3):69-73.
ZHAO Qiang, ZHANG Li, WANG Qi, et al. Impact of load frequency characteristics on frequency stability of power systems[J]. Power System Technology, 2011, 35(3):69-73.
- [9] 卢睿,潘武略,李晓珂,等. 多馈入直流对华东电网稳定性影响研究[J]. 华东电力,2005,33(11):3-8.
LU Rui, PAN Wulue, LI Xiaoke, et al. Impacts of multi-infeed HVDC on East China Power Grid stability[J]. East China Electric Power, 2005, 33(11):3-8.
- [10] 李新年,刘耀,朱艺颖,等. 华北电网直流多馈入系统动态特性实时仿真[J]. 电网技术,2011,35(8):75-80.
LI Xinnian, LIU Yao, ZHU Yiyang, et al. Real-time simulation of dynamic performance of multi-infeed UHVDC transmission system to be connected to North China Power Grid before 2015[J]. Power System Technology, 2011, 35(8):75-80.
- [11] 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.
- [12] Kundur P. Power system stability and control[M]. New York: McGraw Hill, 1994:617-623.
- [13] 黄河,吴小辰,侯君,等. 2004年南方电网直流故障安全稳定控制策略的探讨[J]. 广东输电与变电技术,2004(5):1-7.
HUANG He, WU Xiaochen, HOU Jun, et al. Discussing the 2004 HV DC fault safety-stabilization control policies of CSG[J]. Guangdong Power Transmission Technology, 2004(5):1-7.
- [14] 赵强,王丽敏,刘肇旭. 全国电网互联系统频率特性及低频减载方案[J]. 电网技术,2009,33(8):35-40.
ZHAO Qiang, WANG Limin, LIU Zhaoxu. Study on dynamic frequency characteristic and coordinative under-frequency load shedding scheme for nationwide interconnected power grid of China[J]. Power System Technology, 2009, 33(8):35-40.
- [15] IEEE Committee Report. Load representation for dynamic performance analysis load representation for dynamic performance analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1993, 8(2):472-482.
- [16] 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.
- [17] 卢锦玲,蔡红艳,周明. 交直流混合系统可用输电能力评估[J]. 电网技术,2011,35(4):29-34.
LU Jinling, CAI Hongyan, ZHOU Ming. Available transfer capability evaluation for AC/DC hybrid system[J]. Power System Technology, 2011, 35(4):29-34.

作者简介:



李虎成

李虎成(1987—),男,湖北十堰人,工程师,从事电网调度自动化和运行控制技术研究;

袁宇波(1975—),男,江苏丹阳人,高级工程师,从事继电保护试验和研究;

卞正达(1996—),男,江苏扬州人,电力系统自动化专业本科在读;

徐伟(1982—),男,江苏宿迁人,高级工程师,从事电力系统稳定分析与控制技术研究;

周琦(1992—),男,山东菏泽人,工程师,从事电网调度自动化技术研究。

calculation of power cable conductor in real time[J]. High Voltage Technology, 2005,31(5):52-54.

[17] 刘畅. 电力电缆载流量与温度场计算软件设计[D]. 杭州:浙江大学, 2015.

LIU Chang. Calculation software design on ampacity and temperature field of power cables[D]. Hangzhou: Zhejiang university, 2015.

[18] 罗涛. 电力电缆温度场及载流量计算方法研究[D]. 重庆:重庆大学, 2009.

LUO Tao. The study on the temperature field and ampacity calculation of power cables [D]. Chongqing: Chongqing University, 2009.

作者简介:



黄涛

黄涛(1986—),男,湖北崇阳人,博士,从事高电压绝缘技术、特高压工程建设管理方面工作;

文珊(1987—),女,江西萍乡人,工程师,主要从事变电经济性分析方面工作;

王庭华(1967—),男,江苏江都人,高级工程师,主要从事变电土建方面工作;

范逸斐(1989—),男,江苏无锡人,工程师,主要从事变电二次方面工作;

王颖(1991—),女,江苏泰州人,工程师,主要从事电网智能化规划方面工作;

万鹭(1992—),女,江西南昌人,助理工程师,主要从事主网规划方面工作。

Research on Applicability of Different Material Cable Brackets to Cable Operation

HUANG Tao¹, WEN Shan², WANG Tinghua¹, FAN Yifei¹, WANG Ying¹, WAN Lu¹,

(1. State Grid JiangSu Electric Power Company Economic Research Institute, Nanjing 210008, China;

2. State Grid Nanjing Power Supply Company, Nanjing 210019, China)

Abstract: Under the effect of high current, the conductivity of the cable bracket will change the magnetic field distribution around the cable, affecting the operation and leading to changes in temperature. Conventional electricity standards and regulations has not given a clear explanation of the selection cable support. In this paper, we take NanXu 220 kV substation as an example, the effects of different current carrying capacity and cable materials on the temperature rise of cable are studied by using two-dimensional electromagnetic-fluid-temperature field coupling finite element analysis method. Analysis showed that the temperature rise of cable support due to eddy currents of different materials will not endanger the safety of human and equipment, whether uses a non-magnetic material depends on eddy currents and economy. This article breaks through the limitations of traditional cable temperature calculation, taking into account the impact of cable support, given the theory and practical application foundation when selecting the material, it has important significance in improving the construction's economy and the operational reliability.

Key words: cable support; multi-physics coupling field; different material; eddy currents; temperature

(编辑 刘晓燕)

(上接第31页)

The Frequency Emergency Control Characteristic Analysis for UHV AC/DC Large Receiving End Power Grid

LI Hucheng¹, YUAN Yubo¹, BIAN Zhengda², XU Wei¹, ZHOU Qi¹

(1. State GridJiangsu Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China;

2. Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China)

Abstract: The large receiving end power grid with characteristics of UHV AC/DC mixed was prone to a cascading failure. In the event of HVDC pole blocking, frequency stability problem may occur. For multiple dc coordination control, pumped storage control, accurate load control and other frequency emergency control methods, this paper conducted frequency emergency control characteristic simulation based on the actual power grid model. The simulations verified the effectiveness of the existing frequency emergency control methods. And specific improvement measures were also put forward.

Key words: UHV AC/DC; HVDC pole blocking; large receiving end power grid; frequency emergency control; simulation analysis

(编辑 刘晓燕)