

直流孤岛运行方式下交流保护装置 频率适应性仿真研究

蔡海青^{1,2}, 黄立滨^{1,2}, 郭琦^{1,2}, 李书勇^{1,2}, 韩伟强^{1,2}, 张勇³, 关红兵^{1,2}

(1. 南方电网科学研究院, 广东 广州 510080; 2. 中国南方电网公司仿真重点实验室, 广东 广州 510080;

3. 中国南方电网电力调度控制中心, 广东 广州 510623)

摘要: 频率适应性是交流保护装置适应直流孤岛方式运行的重要特性, 对直流孤岛稳定运行起到了重要作用。建立直流孤岛运行系统 RTDS 仿真模型, 并将其与实际控制保护装置连接组成闭环实时仿真试验系统。通过设置多种试验项目, 开展不同种类交流保护装置频率适应性试验研究, 发现了直流孤岛运行方式下交流保护装置误动或拒动缺陷, 为交流保护装置适应直流孤岛运行提供了重要的参考依据。

关键词: 直流孤岛运行; 交流保护; 频率适应性; RTDS; 仿真

中图分类号: TM 862

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.03.027

0 引言

随着“两渡”直流工程的投入运行, 目前南方电网已形成 8 交 8 直西电东送的交直流并联输送通道, 输送容量达到 35950 MW, 其中直流占 70%, 主网直流强交流弱的特性较为突出。直流孤岛运行是提高强直弱交并联系统安全稳定运行的重要途径^[1], 在实际工程应用中得到了推广应用。随着直流孤岛方式的运行, 交流保护装置在直流孤岛运行方式下不适应频率越限的缺陷逐渐暴露出来, 云广直流调试过程中就曾出现直流单极闭锁导致交流保护装置误动情况。目前, 国内外检测直流孤岛运行方式下交流控制保护装置频率适应性的仿真模型和仿真平台尚无参考, 对如何试验检测交流控制保护装置频率适应性缺乏行之有效的手段与方法。

RTDS 仿真器具有能接入实际控制保护装置来构成闭环实时仿真系统的优势^[2-4], 南方电网仿真实验室对直流孤岛运行方式下交流保护装置频率适应性开展了 RTDS 仿真试验研究^[5]。

本文首先介绍了项目的研究背景, 分析了直流孤岛运行下交流保护装置存在的风险; 然后建立直流孤岛运行一次系统 RTDS 模型, 并接入实际的控制保护装置, 搭建闭环试验研究系统; 最后通过试验检验了多种类型的交流控制保护装置在直流孤岛运行方式下的频率适应性。

1 研究背景与问题分析

1.1 研究背景

直流系统的输送容量巨大, 对系统的安全稳定性影响较大, 尤其是在交直流并联方式下, 一旦出现直流双极闭锁, 大量的直流功率迅速转移到交流主通道,

主网功率大幅摆动, 导致电网功角失稳, 必须依靠有效的安稳措施才能保证系统的安全稳定。直流孤岛方式运行是防范电网运行安全风险应对措施之一, 解决了大负荷直流双极闭锁后主网出现的功角稳定问题, 同时提高了直流系统的输送能力^[6]。

直流孤岛运行方式将直流系统与送端电网断开连接, 将电源直接送往负荷地区, 由于输送容量较大, 直流发生闭锁相当于系统失去大电源, 系统频率将会出现较大幅度振荡。常规的交流保护装置要求在 (50 ± 2) Hz 范围内满足可靠性要求, 这是国家相关标准的强制性要求, 但直流孤岛运行期间, 异常工况下系统频率可能短时超过 52 Hz, 此情况下交流控制保护装置的可靠性尚未经过严格验证。

1.2 问题分析

2013 年 5 月 26 日 16 点 42 分 02 秒, 云广直流孤岛现场调试, 直流双极功率 5000 MW 运行, 极 1 单极闭锁, 系统频率在 4.67 s 内从 50 Hz 升至 55 Hz, 现场波形如图 1 所示。

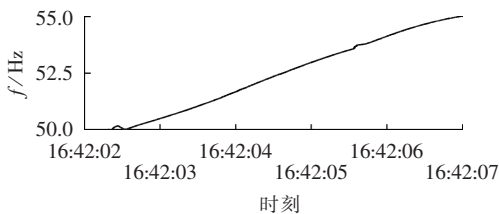


图 1 云广直流孤岛运行单极闭锁现场录波

Fig.1 Wave record of single-pole blocking for islanding operation of Yun-Guang HVDC

在此工况下, 由于系统频率越限, 交流保护装置容易拒动或误动。±800 kV 云广直流孤岛调试中曾发生直流单极闭锁导致系统频率越限, 交流保护装置拒动或误动的情况。随着云广孤岛方式的运行, 交流保护装置不适应直流孤岛方式运行的问题逐渐

暴露出来。

2 频率适应性原理分析

保护装置频率适应性是指保护装置跟踪电力系统的频率变化实时调整采样频率,保证单个周期内采样点数 N 不变,从而能够完整获取实际的电网波形,准确反映当前系统的状态。

目前交流保护装置的算法大多数是建立在在采样频率与电力系统工频频率成正倍数的基础上,即采样频率 f_s 为工频 f_0 的整倍数 N ,但是电力系统受多种因素的影响,频率经常会有波动,为保证任何周期内的电压、电流信号都能正周期均匀分割,需要跟踪信号频率的变化,此时采样频率 f_s 不再是恒定不变的,需要通过动态调整采样周期 T_s 来保证 $f_s/f_0=N$ 的恒定,实现采样频率与信号频率的同步^[7-11]。

综合以上分析,交流保护装置频率适应性校验,需要通过仿真器模拟系统非正常频率运行工况,检验交流保护装置适应不同电网频率运行情况。

3 仿真研究系统介绍

3.1 系统整体架构

本研究采用南方电网仿真重点实验室云广直流试验研究系统,该系统是由 RTDS 实时数字仿真器和直流实际控制保护装置构成的闭环实时仿真系统,通过接入交流实际控制保护装置,组成孤岛运行方式下交流保护装置频率适应性研究系统,其架构如图 2 所示。

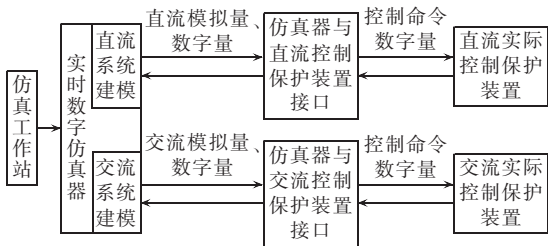


图 2 仿真系统架构

Fig.2 Architecture of simulation system

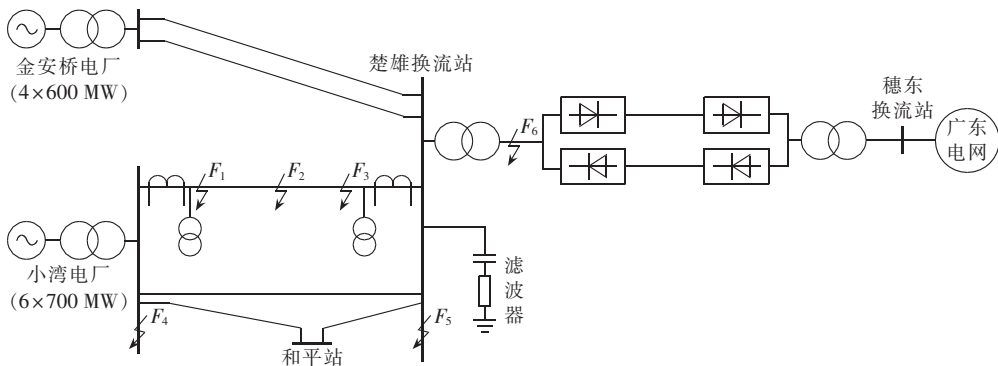


图 4 云广直流孤岛系统结构及故障点分布示意图

Fig.4 Structure of islanded Yun-Guang HVDC system and fault point distribution

3.2 数字建模和故障点设置

3.2.1 数字建模

采用 RTDS 仿真器搭建一次系统数字仿真模型,根据发电机的等值参数,采用仿真器建模软件模型库中的同步发电机模型并输入对应参数,同时根据发电机的调速、励磁、稳定器参数,搭建数字模型;同理,根据其他一次设备参数,选择对应设备模型搭建交流系统数字仿真模型。根据同样方法搭建直流系统模型,然后按电网实际拓扑结构,将上述交流系统模型和直流系统模型相互连接,完成直流孤岛运行下交流控制保护装置频率适应性试验一次系统的数字仿真建模,建模示意图如图 3 所示。

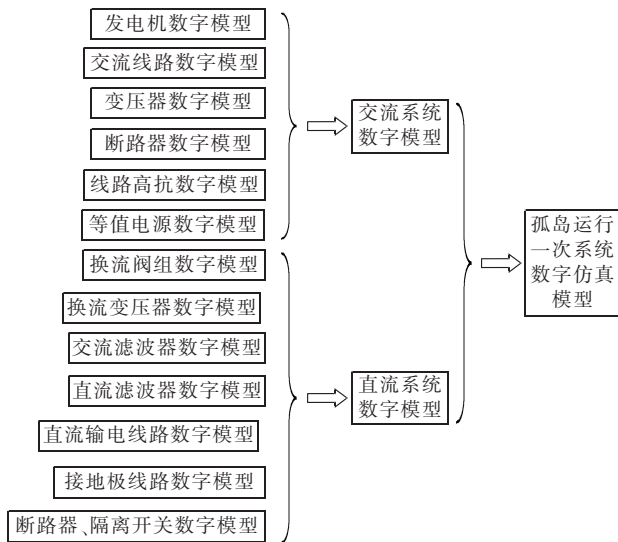


图 3 数字建模示意图

Fig.3 Schematic diagram of digital modeling

3.2.2 故障点设置

检验保护装置的频率适应性,需同时考虑保护区外和区内故障情况。为提高试验效率,线路故障点作为线路保护区内故障点和母差保护区外故障点,母线故障点作为母差保护区内故障点和线路保护区外故障点,线路和母线故障点设置见图 4。另外根据交流滤波器和换流变保护的原理,分别设置其区内和

区外故障点见图 5。图中,TV₁、TV₂、TV₃ 为三相电压互感器;TA₃、TA₄、TA₆、TA₇ 为三相电流互感器。

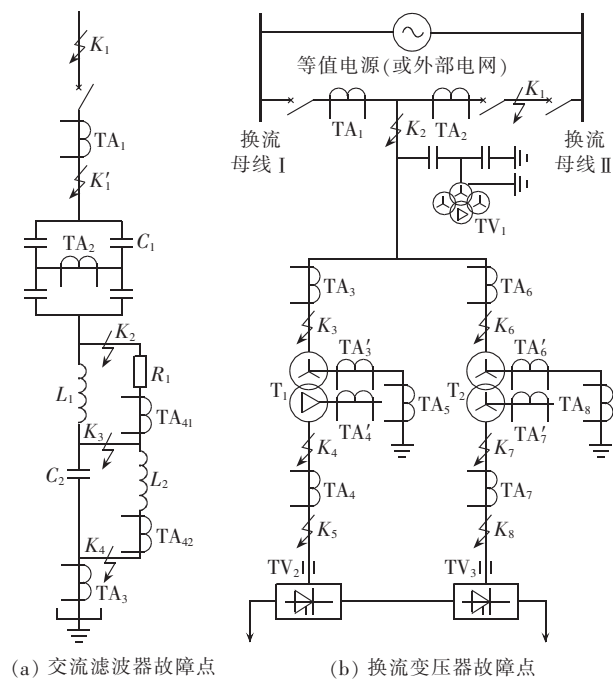


图 5 交流滤波器和换流变压器故障点
Fig.5 Fault points of AC filter and transformer

3.3 交流保护安装点设置和接口搭建

3.3.1 交流保护安装点设置

为全面检验不同类型交流保护装置的频率适应性,该仿真系统接入了交流线路保护、母差保护、交流滤波器保护和换流变保护等 15 套交流保护装置,保护安装位置说明见表 1。

表 1 保护装置安装位置表
Table 1 Allocation of protective equipments

序号	保护类型	安装位置
1	线路保护	小楚甲线两侧
2	母差保护	楚雄站 I 母(母线连接有小楚甲线、金楚乙线、极 1 高低端阀组)
3	交流滤波器保护	楚雄站第一大组的 A 型滤波器 A 相
4	换流变保护	楚雄站极 1 高端换流变

3.3.2 接口搭建

仿真模型分直流部分和交流部分,它们与控制保护装置的接口搭建如下:通过模拟量输出接口板卡向实际控制保护装置输出电压、电流模拟量,同时通过数字量输出接口板卡经端子式继电器向保护装置输出开关位置信号,实际控制保护装置通过数字量输入接口板卡向实时数字仿真器返回控制命令数字量,接口搭建示意图如图 6 所示。

4 试验方法和项目

RTDS 系统具有实时、闭环、连续、数字仿真的优势,采用 RTDS 开展直流孤岛运行方式下交流保护装置的频率适应性试验可以对交流保护装置的特性

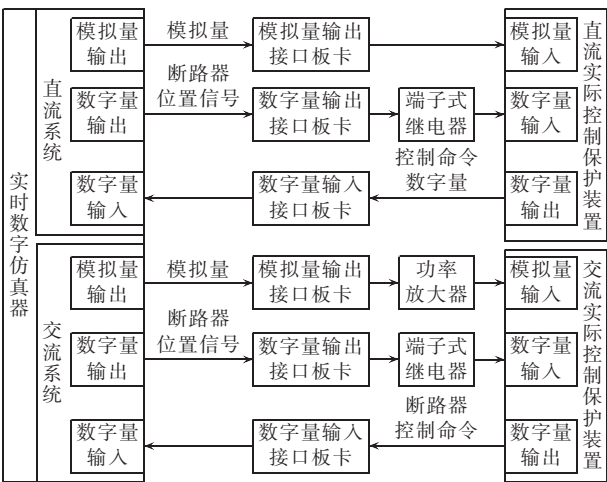


图 6 接口搭建示意图
Fig.6 Schematic diagram of interfacing

进行全面检验,另外 RTDS 系统还可以详细地记录各种装置动作情况、曲线波形,能够有效地帮助分析结果。

4.1 直流闭锁后交流系统相继故障模拟

利用该仿真系统模拟直流孤岛闭锁导致电网频率越限,通过测量直流开始闭锁至需要考核频率越限点的时间,在 RTDS 数字模型中设置好直流闭锁和交流故障的时间间隔,通过在 RTDS 运行界面点击故障启动按钮,即可完成一次直流孤岛闭锁后交流系统相继发生故障的仿真试验。

图 7 为直流闭锁后系统频率越限至 63.8 Hz,交流系统再次发生故障,交流线路电流、电压和系统频率的仿真波形。

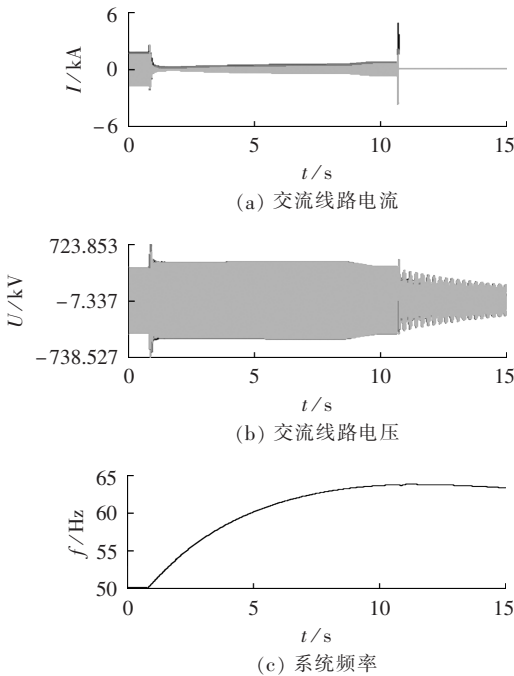


图 7 RTDS 仿真波形
Fig.7 RTDS simulative waveforms

4.2 试验项目

试验重点检验直流孤岛闭锁导致系统频率越限工况下,交流保护装置的频率适应性。通过现场录波和仿真录波的分析,试验选取系统频率为 50 Hz、52 Hz、54 Hz、54.6 Hz、63.8 Hz 时交流系统发生故障,检验交流保护装置的动作情况。试验分为三大类:第一大类是直流系统正常运行、交流系统发生故障,检验交流保护装置的工频动作情况;第二大类是直流系统故障、交流系统无故障,检验交流保护装置的响应情况;第三大类是直流单极闭锁后交流系统相继故障,在不同越限频率下交流保护装置的响应情况。各大类试验项目包括单相/相间金属接地故障、相间/三相短路故障、单相/相间经过渡电阻接地故障、发展性故障、转化性故障等,总计 113 小项试验,试验项目见表 2。

表 2 RTDS 试验项目表
Table 2 RTDS test items

序号	试验项目	试验目的
1	直流系统正常运行,交流系统故障(50 Hz)	检验交流保护装置在工频情况下的动作情况
2	直流单极闭锁,交流系统无故障	检验直流闭锁交流保护装置的响应情况
3	直流单极闭锁,交流系统相继故障(交流系统故障时系统频率为 52 Hz、54 Hz、54.6 Hz、63.8 Hz)	线路保护区内和区外故障 母线保护区内和区外故障 滤波器保护区内和区外故障 换流变保护区内和区外故障
		检验交流保护在高频越限情况下交流系统发生区内和区外故障时各保护装置的响应情况

5 试验结果分析

5.1 线路保护

5.1.1 试验结果

系统频率为 50 Hz、52 Hz、54 Hz、54.6 Hz,区内故障时线路保护装置正确动作,区外故障时保护装置不动作。

系统频率为 63.8 Hz 时,区内故障线路保护动作,但存在线路 A 相故障保护三相误动情况;区外三相短路故障时,距离保护 I 段误动作。

5.1.2 问题分析

线路保护装置距离继电器采用正序电压极化方式:当正序极化电压较高时,采用正序电压进行极化;当正序电压低于 10% 时,保护进入三相低压程序,采用正序电压记忆量进行极化。

系统频率为 63.8 Hz 时,由于系统频率偏差过大造成计算的正序电压相位变化较大,从图 8 可以看出保护装置启动前的 1 个周期内正序极化电压相位变化达到了 92°;区外三相短路故障,由于正序电压低于 10%,保护采用记忆的正序电压进行极化,相位差异

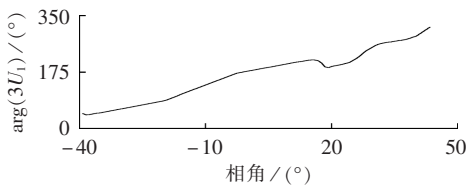


图 8 63.8 Hz 故障时正序极化电压相位
Fig.8 Positive polarization voltage phase when fault occurs at 63.8 Hz

导致低压距离继电器失去方向性,从而造成反方向故障动作。

5.2 母线保护

5.2.1 试验结果

系统频率为 50 Hz 和 63.8 Hz,母线保护装置在区内故障时均正确动作,区外故障均可靠不动作。

系统频率为 52 Hz 和 54.6 Hz,除两相相间短路外母线保护装置在区内故障时正确动作,区外故障不动作;母线两相相间短路故障时,保护只有一相动作,54.6 Hz 时保护动作时间比 50 Hz 和 52 Hz 工况有所延长,54.6 Hz 时合闸角为 0° 情况下母线保护装置存在拒动情况。

5.2.2 问题分析

母线保护有变化量差动保护元件和稳态量差动保护元件。变化量差动保护利用电流工频变化量启动元件自适应地开放加权算法,变化量差动保护的工频变化量启动元件判据为:

$$\Delta i_s > \Delta i_{ST} + 0.5 i_{IN}$$

其中,Δ*i_s* 为制动电流工频变化量瞬时值;0.5*i_{IN}* 为固定门槛;Δ*i_{ST}* 为浮动门槛,随着变化量的输出变化而自动调整。

变化量差动引入浮动门槛是为了在系统频率发生偏移的情况下自动降低变化量差动保护的灵敏度,以提高继电保护装置可靠性。系统频率为 54.6 Hz 时,较大的系统频率偏移导致浮动门槛升高,且故障电流较小,稳态差动电流有效值约为 2 A,加权算法未满足动作条件,变化量差动未动作。

稳态量差动保护依据差流中谐波分量的波形特征检测电流互感器是否发生饱和,由于保护未进行频率跟踪,固定以 1.2 kHz 的采样频率对 54.6 Hz 的电流进行采样,从而差流计算值中含有周期性不衰减的谐波分量,导致稳态量差动保护中的谐波闭锁元件未开放,从而稳态量差动保护未动作。

5.3 换流变保护

5.3.1 试验结果

系统频率为 50 Hz 和 54.6 Hz,区外 *K*₁ 点 A 相接地故障转区内 *K*₃ 点 YD 换流变网侧 A 相 5% 闸间故障时,无论转换时间为 20 ms 还是 200 ms,保护装置均拒动;54.6 Hz 时区内 *K*₃ 点 YD 换流变网侧 A 相 5% 闸间故障和 *K*₆ 点 YY 换流变网侧 A 相 5%

闸间故障,保护装置拒动;其他试验项目,保护装置动作正确。

5.3.2 问题分析

保护装置依据现场定值励磁涌流识别方式整定为采用波形比较原理闭锁,2次谐波制动系数整定为0.15,即2次谐波相比于基波含量大于15%时,闭锁差动保护及增量差动保护。在进行区外单相接地转区内星角变绕组匝间短路故障时,尽管星角变差流大于差动最小动作定值,但2次谐波含量一直大于15%,闭锁差动保护,因此保护装置未能动作出口,仿真波形见图9。

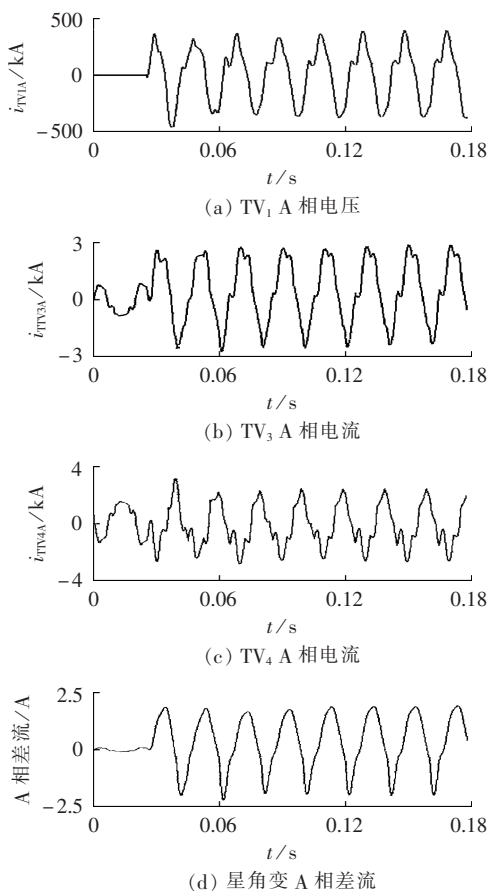


图9 星角变仿真波形

Fig.9 Simulative waveforms of star-angle transformer

5.4 交流滤波器保护

5.4.1 试验结果

系统频率为50 Hz,区内故障时,交流滤波器正确动作,区外故障不动作;系统频率大于54 Hz时,基波过流保护频繁启动,区内故障时保护正确动作,但在无交流系统故障或区外故障时基波过流保护动作。

5.4.2 问题分析

交流滤波器过流保护采用工频电流分量作为判据,无复压、方向等闭锁元件,当系统频率大于54 Hz时,电容器计算阻抗减小,同时母线电压升高,导致交流滤波器电流达到过流保护定值,保护装置误动。

6 结论

a. 建立直流孤岛运行一次系统RTDS仿真模型,并与实际控制保护系统形成一个闭环仿真试验系统,较为精准地仿真了验证直流孤岛运行方式下交流保护装置频率适应性;

b. 设置多个试验项目,在不同类型故障下检验多种类型交流保护装置的频率适应性,通过试验项目发现交流保护装置在直流孤岛频率越限情况下存在拒动或误动风险;

c. 试验为交流保护装置在直流孤岛方式下的运行提供了科学依据。

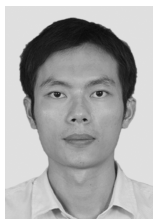
参考文献:

- [1] 中国南方电网有限责任公司. 中国南方电网二〇一四年运行方式[R]. 广州:中国南方电网有限责任公司,2013.
- [2] GUO Q, HAN W Q, RAO H, et al. Study on the reliability of real-time simulation[C]//The Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies. Nanjing, China: [s.n.], 2008: 1708-1711.
- [3] 中国南方电网公司. 交直流电力系统仿真技术[M]. 北京:中国电力出版社,2007:48-62.
- [4] 南方电网科学研究院. 南方电网2013年典型方式数据220 kV及以上系统RTDS实时仿真平台仿真建模研究报告[R]. 广州:南方电网科学研究院,2013.
- [5] 黄立滨,蔡海青,李书勇,等. 楚穗直流孤岛运行交流保护对频率适应性的RTDS仿真试验[R]. 广州:南方电网科学研究院,2013.
- [6] 中国南方电网有限责任公司电网技术研究中心. 楚穗直流孤岛运行专题分析报告[R]. 广州:中国南方电网有限责任公司电网技术研究中心,2010.
- [7] 张世平,赵永平,张绍卿,等. 一种基于自适应陷波器的电网频率测量新方法[J]. 中国电机工程学报,2003,23(7):81-83.
ZHANG Shiping, ZHAO Yongping, ZHANG Shaoqing, et al. A novel approach to measurement of power system frequency using adaptive notch filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(7): 81-83.
- [8] 张瑛,牟龙华,刘军. 电力系统频率测量及跟踪[J]. 电力系统及其自动化学报,2003,15(3):35-36.
ZHANG Ying, MU Longhua, LIU Jun. Frequency measuring and tracking of power systems[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2003, 15(3):35-36.
- [9] 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.
- [10] 徐长波,鲁伟,李春文. 基于超稳定理论的自适应控制在单相有源滤波器中的应用[J]. 电力自动化设备,2014,34(1):163-167.
XU Changbo, LU Wei, LI Chunwen. Application of adaptive control based on hyperstability theory in single-phase active power filter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(1):163-167.
- [11] 李杨,计荣荣,沈扬,等. 特高压交流单相接地故障过电压计算及限制方法[J]. 电力自动化设备,2014,34(8):147-154.

LI Yang,JI Rongrong,SHEN Yang,et al. Calculation and suppression of single-phase grounding overvoltage in UHVAC system [J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(8):147-154.

作者简介:

蔡海青(1984—),男,海南万宁人,工程师,硕士,主要从事电力系统仿真应用方面的工作(E-mail:caihq@csg.cn);



蔡海青

黄立滨(1974—),男,江西赣州人,高级工程师,硕士,从事电力系统仿真、保护研究和管理工作(E-mail:haunglb@csg.cn);

郭琦(1979—),男,广西河池人,教授级高级工程师,博士,从事电力系统仿真及直流输电技术研究和管理工作(E-mail:guoqi@csg.cn)。

Simulation of frequency adaptability for AC protective equipment in islanding mode of HVDC operation

CAI Haiqing^{1,2},HUANG Libin^{1,2},GUO Qi^{1,2},LI Shuyong^{1,2},
HAN Weiqiang^{1,2},ZHANG Yong³,GUAN Hongbing^{1,2}

(1. Electric Power Research Institute, CSG, Guangzhou 510080, China;

2. CSG Key Laboratory for Power System Simulation, Guangzhou 510080, China;

3. CSG Power Dispatch Control Center, Guangzhou 510623, China)

Abstract: The frequency adaptability of AC protective equipment is an important performance in the islanding mode of HVDC operation, which plays an important role in the stable operation of islanded HVDC system. An RTDS simulation model of HVDC system operating in islanding mode is built and connected with an actual control-protection device to form a real-time closed-loop simulation-test system. A variety of test items are set to research the frequency adaptability for different types of AC protective equipment and different defects of AC protective equipment in the islanding mode of HVDC operation are revealed, which provides an important reference for the operational adaptability of AC protective equipment to the islanded HVDC system.

Key words: HVDC islanding operation; AC protection; frequency adaptability; RTDS; computer simulation

(上接第 158 页 continued from page 158)

Measuring of distributed parameter and its application for dual-loop HVDC transmission lines on same tower

DENG Jun^{1,2},XIAO Yao²,HAO Yanpeng¹

(1. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangdong 510640, China;

2. EHV Maintenance & Test Center, China Southern Power Grid, Guangzhou 510663, China)

Abstract: In order to improve the measurement accuracy of distributed parameters for the dual-loop HVDC transmission lines on same tower, a physical distributed parameter model is established and different combinations of the dual-loop HVDC transmission lines on same tower are set to deduce the corresponding mathematical equations for calculating the distributed parameters, which is applied in Niuzhai-Guangdong HVDC project and the results show that, for the dual-loop HVDC transmission lines on same tower from Niuzhai to Guangdong, the single-conductor self-inductance and grounding capacitance are lower than the inter-line coupling inductance and capacitance respectively, and the inter-line coupling capacitances are basically same; for the dual-loop transmission lines on same tower of the grounding polar of Niuzhai converter station or Congxi converter station, the single-conductor self-inductance is greater than the inter-line coupling inductance and the single-conductor grounding capacitance is lower than the inter-line coupling capacitance.

Key words: HVDC power transmission; distributed parameters; coupling parameters; open-circuit impedance; short circuit impedance; positive-sequence; zero-sequence