

直流滤波器保护的研究和改进

程江平, 周全

(中国南方电网超高压输电公司检修试验中心, 广东 广州 510663)

摘要: 介绍了中国南方电网高肇、兴安直流的直流滤波器保护原理和配置。通过故障案例, 对直流滤波器 C1 不平衡保护和 C1 电容器过负荷保护进行研究, 发现了保护误动的可能原因。针对 C1 不平衡保护, 提出了 ITD/ITS 实际值与定值对比时考虑正负的改进方案; 针对 C1 过负荷保护, 提出了 U_{dl} 大于 170% 时保护闭锁, 来避免直流线路电压测量系统异常造成的误动。系统仿真结论和现场运行情况证明所提出的改进方案是有效、可行的。

关键词: 高压直流输电; 直流滤波器; C1 电容器不平衡保护; C1 电容器过负荷保护

Study and improvement of DC filter protection

CHENG Jiang-ping, ZHOU Quan

(Test & Maintenance Center, CSG EHV Power Transmission Company, Guangzhou 510663, China)

Abstract: The principle of DC filter protection and configuration of Gaozhao and Xingan HVDC projects in China southern power grid is introduced. Then DC filter C1 unbalance protection and capacitor C1 overload protection are studied through fault cases and the reasons of the maloperation are found. The paper proposes an improved scheme considering positive-negative when the real value of ITD/ITS is compared with setting value aiming at capacitor C1 unbalance protection. With respect to capacitor C1 overload protection, the protection blocking when U_{dl} exceeds 170% is presented to avoid the maloperation caused by abnormality of DC line voltage measurement system. The simulation results and on-site operation show that the improved techniques presented are effective and feasible.

Key words: HVDC; DC filter; capacitor C1 unbalance protection; capacitor C1 overload protection

中图分类号: TM72 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)04-0105-05

0 引言

直流滤波器作为换流站的重要设备, 并联装设在直流高压母线和中性母线之间, 是抑制高压直流输电系统 (HVDC) 直流侧谐波的最有效手段^[1-2]。从国内直流工程运行的情况来看, 直流滤波器故障占直流故障的比例较大。根据上海南桥换流站的事统计, 在 1989 年到 1998 年中直流滤波器故障占首位, 2001 年直流滤波器故障占导致直流系统停运故障的 18%^[3]。自高肇直流工程投运以来, 曾多次出现直流滤波器保护动作使直流滤波器退出运行的情况, 2006 年 1 月 9 日, 高坡换流站直流滤波器 C1 电容器过负荷保护误动导致极 2 闭锁^[4]。由此可见, 直流滤波器对直流输电系统的安全稳定运行具有十分重要的作用, 必须对其提供完善的保护功能。

目前直流滤波器保护在国内外直流工程中的应用还不是十分成熟。这是由于直流系统运行方式的

多样性以及谐波电压、电流的多变性所决定的, 这种特性要求直流滤波器的保护应该能不失真地反映多个频率的电量。此外, 直流滤波器保护采用何种算法、定值与整定原则等来保证其灵敏性和可靠性尚待进行深入研究。

本文主要对目前南方电网高肇、兴安直流工程所采用的直流滤波器保护的原理进行介绍, 通过对其保护动作情况和原因进行详细的分析, 找出其中存在的问题与不足, 有针对性地提出改进方案。

1 高肇、兴安直流滤波器保护原理^[5-6]

高肇、兴安直流每个换流站每极分别装设两组三调谐 TT 12/24/36 无源滤波器, 每组滤波器配置两套完全相同的控制保护装置。其保护功能主要围绕 12 次谐波作为判据, 采用 SIEMENS 的数字式多微处理器系统 SIMADYN D 实现。单极直流滤波器及保护配置如图 1 所示, 图中仅显示系统 1 的保护

功能配置，系统 2 与系统 1 的配置完全相同。其中 ITD 为高压电容器 $C1$ 两个支路电流之差， ITS 为高压电容器 $C1$ 两个支路电流之和； ITx 为电流互感器 Tx ($x=11, 12, 2$) 中的电流。

直流滤波器主要由高压电容器、高压电抗器、低压电容器、低压电抗器等元件组成。从直流滤波器保护的对象来分，针对滤波器整体设置了差动保护和失谐保护；针对高压电容器设置了 $C1$ 不平衡保护、 $C1$ 过负荷保护和 $C1$ 桥差过流保护；针对高压电抗器设置了反时限过流保护；针对低压电阻/电抗器设置了过负荷保护。

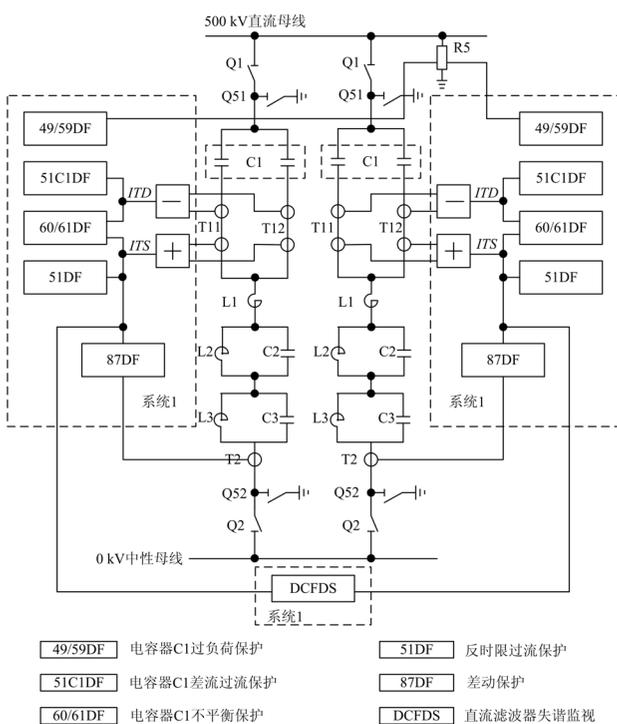


图 1 三调谐滤波器及保护配置

Fig.1 Block diagram of TT 12/24/36 DC filter and DC filter protection configuration

1.1 直流滤波器差动保护 (87DF)

87DF 保护的保护区：高压电容器以下的直流滤波器内的接地或对中性线短路故障。其保护原理为：

$$ABS(ITS - IT2) > \Delta \quad (1)$$

其中：

$$\Delta = MAX\{MIN(ITS, IT2) \times 0.2, 2.0 A\} \quad (2)$$

该保护模拟量取 10 ms 内的平均值来作差。其延时应小于直流中性母线差动保护延时 (50 ms)，并且应能躲过瞬时差动现象。保护动作后果：相应极闭锁，发断开中性母线开关 (HSNBS) 请求，跳交流侧开关，断开直流滤波器。

1.2 直流滤波器失谐监视 (DCFDS)

DCFDS 保护的保护区：监视两组直流滤波器的调谐状态。其保护原理如下：

$$\frac{ITSF1(600 \text{ Hz})}{ITSF2(600 \text{ Hz})} \neq 1 \quad (3)$$

式中： $ITSF1$ 、 $ITSF2$ 分别为每极直流滤波器 1、2 的和电流。该比值的允许范围是 0.92~1.08，超过该范围且延时 10 s，则该保护出口：发 SER 告警信号。当只有一组直流滤波器运行时，该功能被闭锁。

1.3 C1 电容器不平衡保护 (60/61DF)

60/61DF 保护的保护区：保护直流滤波器 $C1$ 电容器免受由于故障电容器单元对完好电容器组造成的过应力而使电容器单元雪崩损坏。

以兴安直流为例， $C1$ 不平衡保护分为暂态和稳态不平衡两段，静态段反应 $C1$ 不平衡电流的累积效应，动态段反应 $C1$ 不平衡电流的快速变化，实际程序中的判据为：

静态段：

$$\int ITD / ITS > 67.96\% \text{ 或 } \int ITD / ITS < -67.96\%$$

动态段：

$$\Delta(ITD / ITS - \int ITD / ITS) > 30.3\%$$

$$\text{或 } \Delta(ITD / ITS - \int ITD / ITS) < -30.3\%$$

ITD/ITS 为 $C1$ 电容器两侧桥臂之间的差电流与和电流的比值，取 12 次 (600 Hz) 谐波量。静态段和动态段的出口时间均为 800 ms，动作结果为： $ITS < 100 A$ ，退出该组直流滤波器； $ITS > 100 A$ ，相应极紧急停运，并退出该组直流滤波器。

1.4 C1 电容器过负荷保护 (49/59DF)

49/59DF 保护的保护区：防止高压电容器 $C1$ 过负荷损坏。

其保护原理为：当 $U_{dl} > \Delta$ 时，启动 $C1$ 过负荷保护，其中 U_{dl} 是直流线路电压， Δ 为电容器承受电压与额定电压的比值。当 $\Delta=110\%$ 时，启动软件程序中的积分模块，按反时限电压-时间特性曲线延时出口 (如图 2)。当 $\Delta=193.7\%$ ，无延时出口。动作后果：相应极闭锁，发断开 HSNBS 请求，断开直流滤波器。

1.5 C1 高压电容器差动过流保护 (51C1DF)

51C1DF 保护的保护区：保护 $C1$ 电容器内部的接地或对中性线短路故障。

其保护原理为：当 $ITD(rms) > \Delta$ ，延时 250 ms 后， $C1$ 差动过流保护出口，闭锁相应极，发断开 HSNBS 请求，跳交流侧开关，断开直流滤波器。

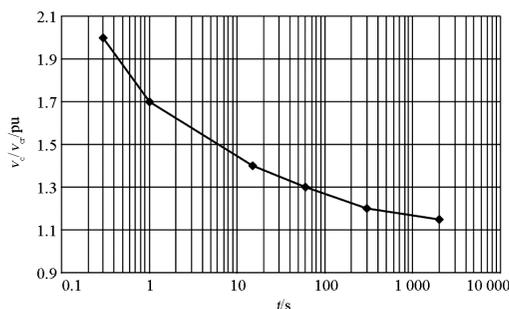


图2 反时限电压-时间特性曲线

Fig.2 Curve of the voltage-time characteristic

1.6 反时限过流保护 (51DF)

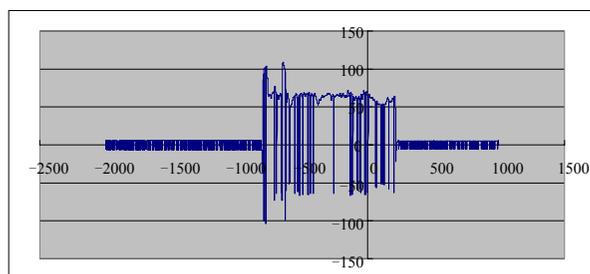
51DF 保护的**保护任务**：防止过量的谐波电流造成高压电抗器过热损坏。

其**保护原理**为： $ITS(rms) > \Delta$ ，定值的大小取决于谐波电流造成电抗器 L1 产生积肤效应时过负荷情况，跳闸时间由滤波器总电流与反时限特性曲线配合来决定。动作后果：相应极紧急停运，跳交流侧开关，断开直流滤波器。

2 C1电容器不平衡保护算法的改进

2.1 高肇、兴安直流电容器不平衡保护动作情况^[7-8]

自高肇直流投运以来，曾多次出现直流滤波器电容器 C1 不平衡保护暂态段动作的情况，其中高坡换流站极 1 直流滤波器 012LB 在 2006 年 5 月 8 日、5 月 24 日和 6 月 5 日连续三次发生电容器 C1 不平衡保护暂态段动作而使该滤波器退出运行。

图3 012LB 直流滤波器 $ITD_{(600\text{Hz})} / ITS_{(600\text{Hz})}$ Trace 录波图
Fig.3 Curve of ITD/ITS in Trace recorder

2006 年 6 月 5 日，高坡换流站电容器 C1 不平衡保护动作后，现场检修人员用 PG (SIMADYN D 专用调试电脑) 读取了两套直流滤波器保护系统的内部 Trace 文件(系统 1 的 Trace 录波图如图 3 所示，系统 2 的 Trace 录波图与系统 1 一致)。从图中可以看出，直流滤波器保护系统检测到了较大的不平衡电流，持续时间超过 800 ms，导致直流滤波器 C1 不平衡保护动作。现场检修人员对直流滤波器 012LB 进行检查，检查结果是 C1 电容器本身没有

发现问题，测量回路电缆也没有发现问题，不平衡 CT 试验项目结果正常。

兴安直流自投运以来也曾多次发生 C1 电容器不平衡保护暂态段误动作。保护动作后，现场对电容器本体进行检查均未发现异常情况。

2.2 电容器不平衡保护动作原因分析

直流滤波器的不平衡保护用于保护电容器免受由于故障电容器单元对完好电容器组造成的过应力而使电容器单元雪崩损坏。高压电容器是直流滤波器中价格最贵的元件，耐受直流线路上所有的直流电压和大部分谐波压降，因此对不平衡保护的灵敏性要求非常高。一般将电容器分成容量相等的两个支路，以便检测故障，当某一支路中电容器有损坏时，两个支路中的谐波电流就会出现不平衡。但由于直流系统运行方式的多样性以及谐波电压、电流的多变性，导致流过直流滤波器的谐波电流中的谐波分量随时间变化，在电容器损坏相同的情况下，其不平衡电流也不同。此外，在直流滤波器正常情况下，由于制造误差、电容器元件的老化以及温度、阳光等外界环境参数会使电容值发生变化，也会导致不平衡电流的产生。

为了找出电容器 C1 不平衡保护暂态段频繁动作的原因，我们对该保护的定值整定原则、判据原理进行了分析。从历次 C1 不平衡保护误动作的 ITD/ITS 波形可以看出， ITD/ITS 在超过正、负定值两个方向快速不规则跳变，而单个方向超过定值的连续时间均未达到出口时间 800 ms，这些都不是直流滤波器 C1 电容器真正故障时的波形。由于当前版本软件中 800 ms 的保护延时逻辑放在或逻辑之后， ITD/ITS 交替满足正、负定值动作判据，因此造成保护的误动作。当前兴安直流 C1 不平衡保护暂态段的软件逻辑如图 4 所示(高肇直流仅定值不同)，图中功能块 B270、B280 分别为正负定值越限判断逻辑，B270、B280 输出经或逻辑、延时 800 ms 出口。

2.3 C1 电容器不平衡保护的改进^[9-10]

根据 C1 不平衡保护误动作原因的分析，对目前版本的软件逻辑提出改进：将图 4 中大于 30.3% 和小于 -30.3% 两种判据分别进行 800 ms 延时，可以有效避免扰动情况下快速段保护的误动作。改进后的 C1 不平衡保护暂态段的软件逻辑如图 5 所示。

为了对修改后的 C1 不平衡保护逻辑的正确性进行验证，利用南网研究中心仿真实验室的直流滤波器保护系统测试平台进行了历次故障波形回放试验，由于故障波形单个方向超过定值的连续时间均未达到出口时间 800 ms，能够有效避免 C1 不平衡保护的误动作。

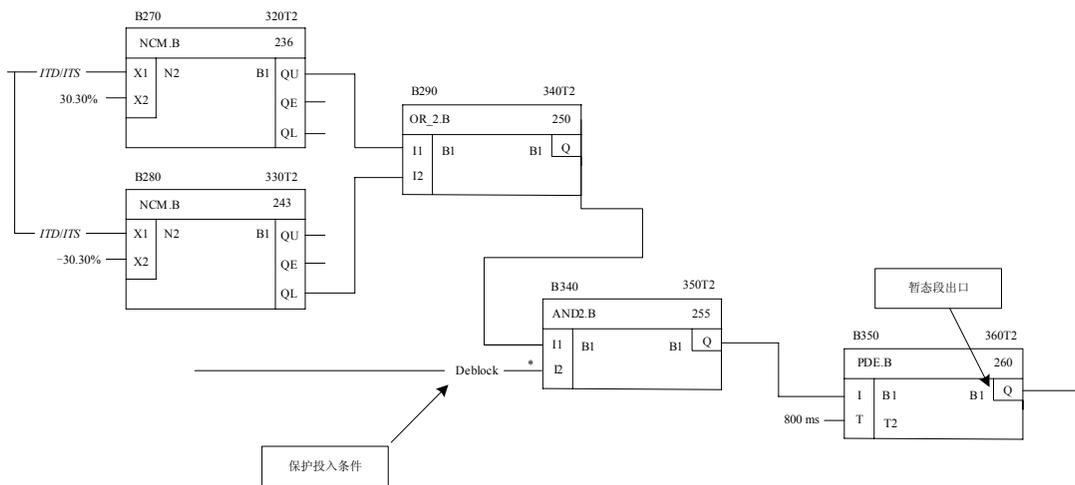


图 4 C1 不平衡保护暂态段逻辑图

Fig.4 Logic of transient stage of C1 unbalance protection

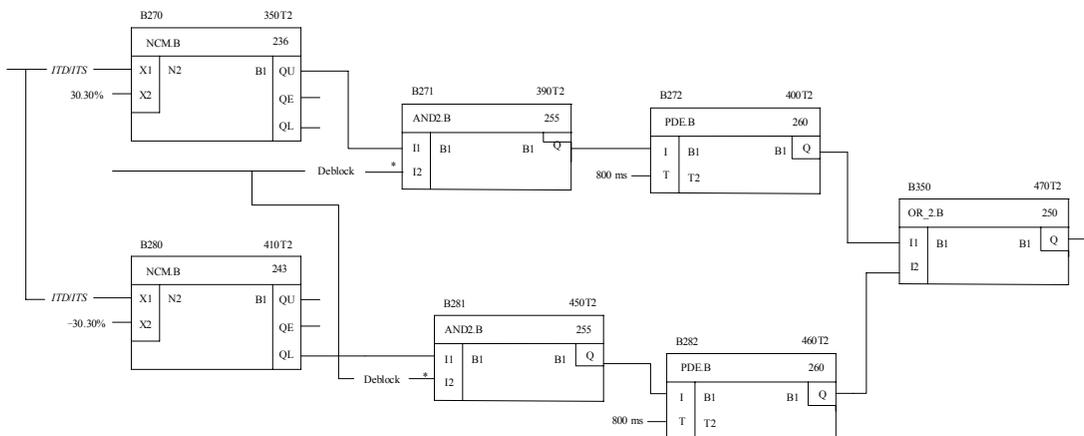


图 5 改进的 C1 不平衡保护暂态段逻辑图

Fig.5 Improved logic of transient stage of C1 unbalance protection

3 C1 电容器过负荷保护逻辑的改进

3.1 高肇直流 C1 过负荷保护动作情况及原因分析

自 2005 年 5 月份以来,高肇直流曾多次发生因直流滤波器 C1 电容器过负荷(49/59DF)保护动作造成单极停运的事件,每次停运的故障现象相同。每次事件发生后,现场人员对直流滤波器电容器进行检查,并未发现异常。从直流滤波器保护内部读取的 Trace 录波图(如图 6 所示)可以看出,跳闸前直流线路电压 U_{dL} 不断地跳变至测量上限值 200%,远大于 C1 电容器过负荷保护反时限特性动作定值,造成保护动作。而通过跳闸时的故障录波来看此时实际系统的直流线路电压并没有发生变化。通过分析,直流线路电压测量系统异常是造成

高肇直流滤波器 C1 电容器过负荷保护误动的原因。

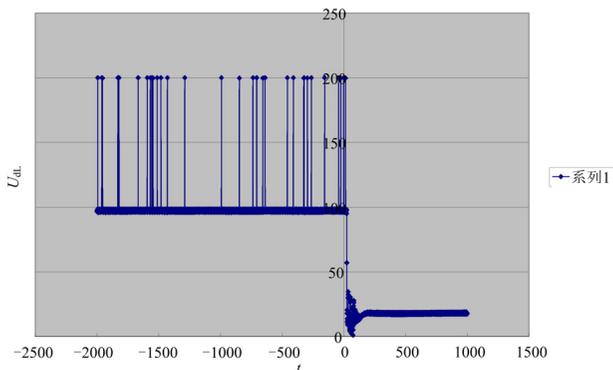


图 6 直流滤波器保护 Trace 录波图

Fig.6 Curve of U_{dL} in the Trace recorder

3.2 改进方案及仿真验证

为防止由于上述原因造成直流滤波器 C1 电容器过负荷保护误动, 提出如下修改方案: 直流滤波器保护软件判断直流线路电压 U_{dL} 出现很高数据 (170%) 时, 认为光纤通道故障, 闭锁直流滤波器 C1 电容器过负荷 (49/59DF) 保护功能, 同时发通道故障告警信号。将 170% 作为 49/59DF 保护功能的闭锁值, 主要是根据每次测量系统异常后, 从直流滤波器保护系统内读取的典型内部录波数据而取的经验值, 同时考虑与直流保护系统中直流过电压保护 3 段相配合。

为了验证上述方案的可行性, 我们将闭锁 C1 电容器过负荷保护的定值设为 170%, 利用现场故障录波数据通过 RTDS 模拟输出直流电压至直流滤波器保护系统, 保护正确闭锁。试验波形如图 7 所示。此外, 我们还分别从 RTDS 向直流滤波器保护系统施加不同直流电压量, 观察保护动作行为, 当施加 8 V (1.6 p.u.) 直流电压, 保护 1.8 s 动作, 试验波形如图 8 所示; 当施加 8.5 V (1.7 p.u.) 直流电压, 保护正确闭锁。试验波形如图 9 所示。

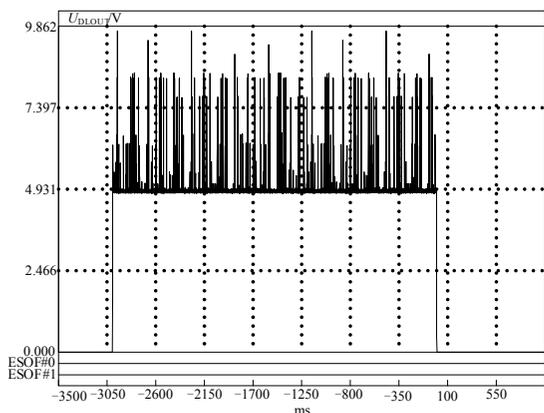


图 7 电容器过负荷保护故障波形回放

Fig.7 Fault playback curve of the 49/59DF protection

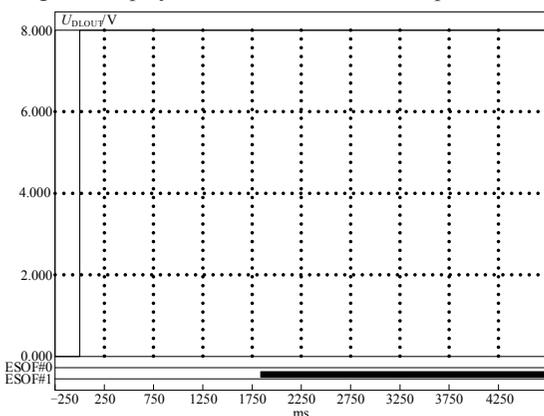


图 8 1.6 p.u. 直流电压试验波形

Fig.8 Test curves when $U_{dL}=1.6$ p.u.

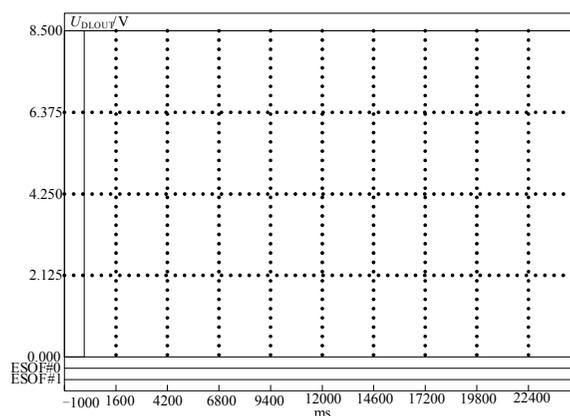


图 9 1.7 p.u. 直流电压试验波形

Fig.9 Test curves when $U_{dL}=1.7$ p.u.

3.3 现场应用

兴安直流直流滤波器 C1 电容器过负荷保护运行版本与高肇直流修改前的版本完全相同, 因此同样存在测量系统异常造成 C1 电容器过负荷保护误动的隐患, 因此根据上述方案对高肇、兴安直流直流滤波器 C1 电容器过负荷 (49/59DF) 保护软件进行升级, 运行至今未发生因 U_{dL} 测量值不断跳变造成 C1 电容器过负荷保护动作的情况。

4 结语

本文从国内投运的直流工程运行情况入手, 通过分析直流滤波器保护动作的情况和原因, 找出目前高肇、兴安直流滤波器保护算法与逻辑存在的问题和不足, 提出了改进方案, 并予以实施, 仿真结果及现场运行情况表明改进方案是有效、可行的。

参考文献

- [1] 浙江大学发电教研组直流输电教研组. 直流输电[M]. 北京: 中国电力工业出版社, 1985.
- [2] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [3] 文继锋, 陈松林, 李海英, 等. 超高压直流系统中的直流滤波器保护[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(21): 69-72.
WEN Ji-feng, CHEN Song-lin, LI Hai-ying, et al. DC filter protection in HVDC systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(21): 69-72.
- [4] 陈明俊, 禹晋云, 徐华平. 高肇直流高坡换流站极 II 闭锁原因分析[J]. 高电压技术, 2006, 32(9): 168-172.
CHEN Ming-jun, YU Jin-yun, XU Hua-ping. Analysis of the reason of pole II trip in the Gui-guang HVDC transmission system[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(9): 168-172.

(下转第 145 页 continued on page 145)

- 统构思[J]. 电力系统自动化, 2008, 32 (9): 1-6.
- XUE Yu-sheng, FEI Sheng-ying, et al. Upgrading the blackout defense scheme against extreme disasters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32 (9): 1-6.
- [2] 陈兴华, 吴烈鑫, 吴国丙, 等. 安全稳定控制系统切负荷量分配算法[J]. 继电器, 2007, 35 (11): 26-29.
- CHEN Xing-hua, WU Lie-xin, WU Guo-bing, et al. Distributing algorithm of load-shedding for security and stability control system[J]. Relay, 2007, 35 (11): 26-29.
- [3] <http://www.sgcc.com.cn/qywh070813/zonglan/fzzl/>.
- [4] 电力系统安全稳定控制技术导则[S].
- [5] 杨海涛, 丁茂生, 等. 电力系统动态稳定机理和稳定措施分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32 (14): 35-39.
- YANG Hai-tao, DING Mao-sheng, et al. Analysis on power system dynamic stability mechanisms and stabilizing measures[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32 (14): 35-39.
- [6] 李大志, 孙宏斌, 等. 南方电网交直流混合实时状态估计的应用[J]. 电力系统自动化, 2009, 33 (19): 106-110.
- LI Da-zhi, SUN Hong-bin, et al. Application of an AC/DC hybrid real-time state estimator in China southern grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33 (19): 106-110.
- [7] 高宗和, 陈刚, 等. 特高压互联电网联络线功率控制[J]. 电力系统自动化, 2009, 33 (15): 51-55.
- GAO Zong-he, CHEN Gang, et al. Active power control for tie-lines in UHV interconnected power grid part one AGC control strategies[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33 (15): 51-55.
- [8] 李惠军, 李邦峰, 等. 海口电厂“大代小”技改工程安全稳定控制系统的设计与实施[C]. //中国电机工程学会 2006 年学术年会. 郑州: 2006.
- [9] 宋锦海, 李惠军, 李雪明, 等. 安全稳定控制系统通讯及其测试技术. 电力系统保护与控制, 2008, 36 (12): 74-77, 78.
- SONG Jin-hai, LI Hui-jun, LI Xue-ming, et al. Telecommunication technology and its test of security and stability control system[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36 (12): 74-77, 78.
- [10] 桂勋, 姚兰, 等. 海量 COMTRADE 数据并行解析算法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33 (15): 62-66.
- GUI Xun, YAO Lan, et al. A massive COMTRADE data parallel parsing algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33 (15): 62-66.
- [11] 刘有飞, 熊建华. 江西电网 1.21 事故分析及启示[J]. 华中电力, 2008, 21 (6): 28-31.
- LIU You-fei, XIONG Jian-hua. Discussion on Jiangxi power grid 1.21 accident and suggestions[J]. Central China Electric Power, 2008, 21 (6): 28-31.
- [12] <http://economy.enorth.com.cn/system/2009/01/19/003869118.html>.

收稿日期: 2010-03-10; 修回日期: 2010-05-22

作者简介:

李惠军 (1978-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统安全稳定控制; E-mail: njgllhj@126.com

汤奕 (1977-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为智能电网及电力系统稳定分析与控制;

李雪明 (1965-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统安全稳定控制。

(上接第 109 页 continued from page 109)

- [5] Siemens. Guizhou-Guangdong ± 500 kV DC transmission project: DC filter protection C/P software design report[R]. Germany: Siemens, 2002.
- [6] XJ-SIMENS. Guizhou-Guangdong II line ± 500 kV DC transmission project: DC filter protection parameters and settings[S]. XJ-SIMENS, 2007.
- [7] 朱韬析, 王宁宁, 郭卫明, 等. 交流滤波器电容器不平衡保护在南方电网直流输电系统中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(20): 102-105.
- ZHU Tao-xi, WANG Ning-ning, GUO Wei-ming, et al. The application of AC filter C1 unbalance protection in CSG DC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(20): 102-105.
- [8] 李慧杰, 李啸骢, 刘超, 等. 高压直流输电系统交流侧谐波分析及滤波配置的探讨[J]. 继电器, 2005, 33(6): 70-72.
- LI Hui-jie, LI Xiao-cong, LIU Chao, et al. Analysis of harmonics on the AC side of HVDC power transmission system and discussion of the filter configuration[J]. Relay, 2005, 33(6): 70-72.
- [9] 朱韬析. 提高南方电网直流保护动作可靠性的建议[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(5): 64-67.
- ZHU Tao-xi. Suggestions to improve the reliability of HVDC protection in CSG[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(5): 64-67.
- [10] 辛晋渝, 刘念, 郝江涛, 等. 故障电流中衰减直流分量的滤波算法研究[J]. 继电器, 2005, 33(13): 10-12.
- XING Jin-yu, LIU Nian, HAO Jiang-tao, et al. Research of decaying DC removal algorithms in fault current[J]. Relay, 2005, 33(13): 10-12.

收稿日期: 2010-03-10; 修回日期: 2010-05-29

作者简介:

程江平 (1976-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事高压直流输电系统运行分析与管理工作。E-mail: cjp7876@sina.com.cn