

±800 kV 特高压直流输电系统运行方式的仿真研究

陈潜¹, 张尧¹, 钟庆¹, 王海军²

(1. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640; 2. 许继集团直流输电系统部, 河南 许昌 461000)

摘要: ±800 kV 特高压直流输电采用双12脉动换流器串联接线方式, 结构非常复杂, 换流器的基本运行方式和控制策略尚没有确定的方案。对其控制系统的结构, 换流器的控制方式和配置, 特别是双12脉动换流器之间如何协调控制等问题进行研究具有十分重要的意义。采用 PSCAD/EMTDC 仿真程序, 以云广特高压直流工程为背景, 建立 ±800 kV 特高压直流输电模型, 对双极全压启动、单个12脉动阀组的投入和退出, 以及逆变侧交流系统发生单相接地故障等情况进行了仿真。仿真结果表明, ±800 kV 特高压直流输电具有良好的动态响应性能, 能够满足长距离大容量输电的需求。传统 ±500 kV 直流输电工程的控制策略仍然可以用于特高压工程, 整流侧采用定电流控制, 逆变侧采用定熄弧角控制可以获得较好的稳态和暂态特性; 提出的控制方式、控制策略以及单个阀组投入和退出逻辑对实际工程具有指导意义。

关键词: 特高压直流输电; PSCAD/EMTDC; 换流器; 控制

Simulation of ±800 kV UHVDC system under different operation modes

CHEN Qian¹, ZHANG Yao¹, ZHONG Qing¹, WANG Hai-jun²

(1. Electrical Power College, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. Department of HVDC System, XJ Group Corporation, Xuchang 461000, China)

Abstract: ±800kV UHVDC is bipolar with two 12-pulse converters in series, and has much more intricate structural arrangement. The basic operation mode and control strategy for the double converters in series are discussed. In this paper, a complete simulation model is built based on the upcoming Yun-Guang ±800kV UHVDC project by PSCAD/EMTDC. The response characteristics of UHVDC transmission system and its controllers are analyzed under the condition such as full-voltage starting in bipolar, taking one of the 12-pulse converters out of/into operation and single-phase ground fault on the inverter side AC system. The test results show that the control strategy of the traditional ±500kV HVDC system can also be used in the UHVDC system. DC current control at rectifier and extinction angle control at inverter can ensure the system to operate steadily during steady state and transient state. Some beneficial results are obtained, such as the control mode, control strategy for the double converter in series, and the operation sequence of taking one converter out of/into operation.

This paper is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50337010).

Key words: UHVDC; PSCAD/EMTDC; converter; control

中图分类号: TM711

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2007)16-0027-06

0 引言

随着西电东送线路的增加, 输电走廊紧张的问题愈发突出, 研究^[1-3]表明, 采用±800 kV 特高压直流输电技术, 不但有利于加大输电规模, 节约大量的输电走廊资源, 还可以限制负荷中心短路容量, 提高电网的安全稳定水平。根据规划, 南方电网将建设世界上第一回±800 kV 特高压直流输电工程,

以满足“十一五”期间云南向广东送电的需要以及“十二五”初小湾、金安桥等电站向广东送电的需要^[4]; 国家电网将先后建设6回±800 kV 特高压直流输电工程, 将金沙江下游乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝4个巨型水电站的电力输送到华东和华中负荷中心^[5]。

国内外对±800 kV 特高压直流输电工程进行了大量的技术和经济的论证, 并在关键技术研究取得了重大的进展, 解决了一系列问题^[1,6-11]。然而在±800 kV 特高压直流输电系统的控制结构, 换流器

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50337010)

基本的控制方式和控制配置方面尚未有确定的方案,还处于论证当中。因此,建立±800 kV特高压直流输电系统模型,研究其控制系统的结构,换流器的控制方式和配置,特别是双12脉动换流器之间如何协调控制等问题具有十分重要的意义。

本文采用PSCAD/EMTDC仿真程序,以云南—广东±800 kV特高压直流输电工程为背景,建立仿真模型。对双极全压启动、双极运行时单个阀组的投入和退出以及交流系统发生故障时直流系统的暂态响应等进行了仿真,分析了特高压直流系统在上述情况下的运行特性和控制策略;对双12脉动换流器的基本控制原理以及单个阀组投入和退出顺序以及换流器的控制策略等进行了探讨。

1 ±800 kV特高压直流输电系统的建模

云广直流输电工程西起云南楚雄州禄丰县,东至广东增城东部,电压等级为±800 kV,输电线路长度约1438 km,输电规模为5 GW,额定电流3125 kA,2009年6月建成±400 kV或单极,2010年建成±800 kV。送端楚雄换流站通过2回500 kV交流线路与云南主网昆西北500 kV变电站相连,小湾水电站和金桥水电站分别通过3回和2回500 kV线路向楚雄站送电;受端换流站分别以2回500 kV交流出线接入增城、横沥和水乡变电站^[4]。

1.1 PSCAD/EMTDC仿真程序^[12,13]

PSCAD/EMTDC是目前被广泛使用的一种电力系统离线仿真的电磁暂态仿真软件,具有大规模的计算容量、完整而准确的元件模型库、稳定高效的计算内核以及友好的界面,是进行直流系统分析和工程研究的有力工具。此外,PSCAD/EMTDC还具有强大的自定义功能和支持子网嵌套的功能,用户可以根据自己的需要创建具有特定功能的模块。

1.2 系统模型

如图1所示,系统采用每极双12脉动换流器串联接线方式,每一换流单元配备相应的旁通开关,通过对旁通开关的操作可使其退出或投入运行。整流侧交流系统额定电压为500 kV,短路比SCR=6.0∠84°,逆变侧交流系统额定电压为500 kV,短路比SCR=6.0∠75°。整流侧换流变压器额定容量为760 MVA,漏抗为0.18 p.u.,一次侧额定电压为500 kV,二次侧额定电压为170 kV,接线方式为Y/Δ或Y/Y;逆变侧换流变压器额定容量为730 MVA,漏抗为0.18 p.u.,一次侧额定电压为500 kV,二次侧额定电压为163 kV,接线方式为Y/Δ或Y/Y。整流侧交流母线装设4大组无功补偿以及滤波装置,每组配置11次谐波滤波器300 Mvar,13次谐波

滤波器300 Mvar以及高通滤波器110 Mvar。逆变侧交流母线亦装设4大组无功补偿以及滤波装置,每组配置11次谐波滤波器270 Mvar,13次谐波滤波器270 Mvar以及高通滤波器160 Mvar。平波电抗器为0.4 H,直流侧配置了12/24/36次直流滤波器。

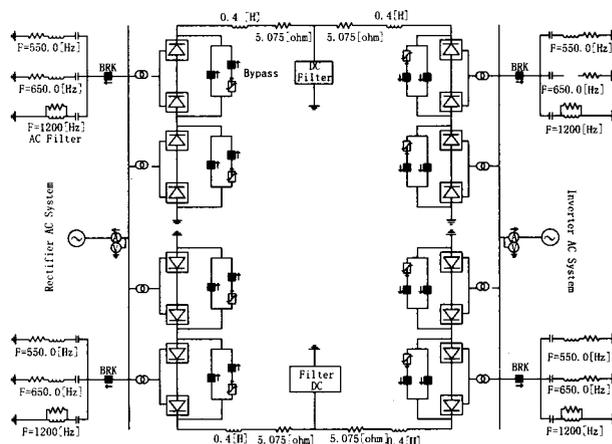


图1 ±800 kV特高压直流输电系统模型

Fig.1 Simulation model of ±800 kV UHVDC

1.3 系统无功需求分析和无功补偿配置

根据换流原理,换流器消耗的无功功率可由下式表示^[14]:

$$Q_{dc1} = P_{d1} \tan \varphi_1 \quad (1)$$

$$Q_{dc2} = P_{d2} \tan \varphi_2 \quad (2)$$

$$\cos \varphi_1 = \cos \alpha - \frac{X_{r1} I_d}{\sqrt{2} U_1} \quad (3)$$

$$\cos \varphi_2 = \cos \gamma - \frac{X_{r2} I_d}{\sqrt{2} U_2} \quad (4)$$

式中: Q_{dc1} 和 Q_{dc2} 分别为整流站和逆变站消耗的无功功率; P_{d1} 和 P_{d2} 分别为整流站和逆变站的直流功率; φ_1 和 φ_2 分别为整流侧和逆变侧的功率因数; α 为整流侧触发角; γ 为逆变侧熄弧角; X_{r1} 和 X_{r2} 分别为整流侧和逆变侧每相的换相电抗; I_d 为直流电压平均值; U_1 和 U_2 分别为整流站和逆变站换流变压器阀侧空载电压有效值, kV。

按式(1)~(4)可计算出不同运行方式下,两侧换流站无功消耗情况如表1所示。

假设换流器消耗的无功全部由无功补偿装置提供,为适应直流各种运行方式的需要,换流站的无功补偿须分组投切运行。根据表1的计算结果,整流和逆变站在双极全压状态下的无功消耗量分别为2835 Mvar、2794 Mvar;一极全压一极半压状态下的无功消耗量分别为2127 Mvar、2096 Mvar;单

极全压状态下的无功消耗量为 1 418 Mvar、1 397 Mvar。因此在本文进行的仿真中所采用的无功补偿及滤波装置投切策略为：

- 1) 双极全压启动时, 两换流站 4 大组无功补偿及滤波装置一起投入;
- 2) 切除换流器时, 在整流或逆变侧阀组闭锁 40 ms 后切除与之相应的 1 大组无功补偿及滤波装置;
- 3) 投入换流器时, 在整流或逆变侧阀组解锁后同时投入与之相应的 1 大组无功补偿及滤波装置。

表 1 不同直流运行方式下换流站无功消耗量

Tab.1 Reactive power consumption for both converter stations

under different operation modes			
直流运行方式	直流输电功率 /MW	整流站无功消耗量 /Mvar	逆变站无功消耗量 /Mvar
双极全压	5000	2835	2794
一极全压一极半压	3750	2127	2096
单极全压	2500	1418	1397

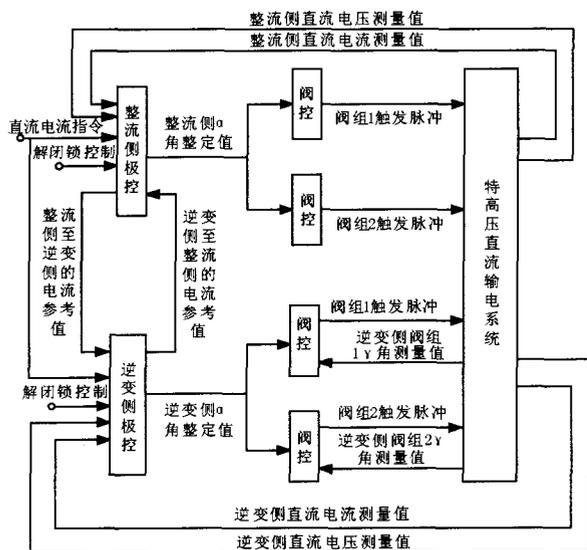


图 2 ±800 kV 特高压直流输电系统整体控制框图

Fig.2 General frame of ±800kV UHVDC control system

1.4 控制系统

图 2 为本文所建立的±800 kV 特高压直流输电系统整体控制框图。控制系统分为极控部分和阀组控制部分。极控部分的主要功能是通过比较设定的电流指令和实际电流的差, 由相应的电流调节器得到触发角指令并将该指令送往阀控。在控制策略上整流侧采用带有 VDCL (Voltage Dependent Current Order Limited) 逻辑的定电流控制, 逆变侧采用定

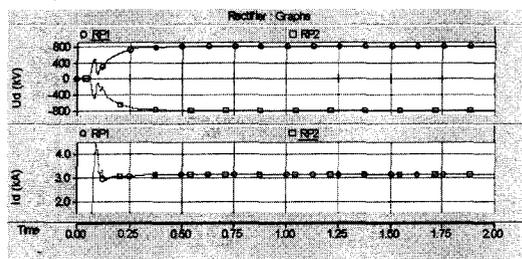
熄弧角控制。另外为了确保正常运行时两个阀组两端的电压相等, 在极控中还加入了电压协调控制, 该控制逻辑通过比较两个阀组的端电压差对输出的触发角进行动态修正。

阀组控制部分的主要功能是单阀组的起停控制, 双阀组的起停控制以及熄弧角控制等逻辑。与±500 kV 高压直流输电控制系统不同, 特高压直流系统每极具有两个阀组, 因此在本模型中, 与之相对应每个极的控制系统中具有两个阀控单元。它们逻辑上互相独立, 可以实现各自阀组的投入退出, 并根据触发角得到各自阀组的触发脉冲。

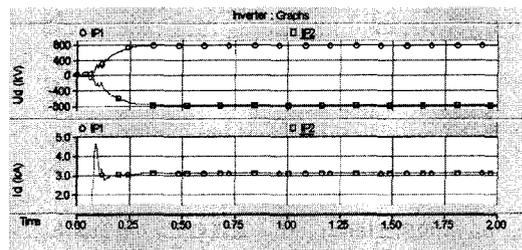
2 ±800 kV 特高压直流输电系统的仿真

2.1 双极全压启动

±800 kV 特高压直流输电采用双 12 脉动换流器串联的接线方式, 每个换流器还配备了旁通开关, 运行方式较为灵活, 主要有以下几种: (1)双极全压; (2)双极半压; (3)双极一极全压一极半压; (4)单极全压金属回线; (5)单极全压大地回路; (6)单极半压金属回线; (7)单极半压大地回路。本文对双极全压启动进行了仿真, 波形如图 3 所示。逆变侧先解锁, 整流侧在检测到逆变侧解锁信号后解锁, 系统在经过约 0.3 s 后进入稳态运行。图中无论整流侧还是逆变侧, 极 1 和极 2 直流电压几乎是对称的, 直流电流几乎是一致的, 可见各个 12 脉动换流器的运行与控制保持了良好的一致性。



(a) 整流侧波形



(b) 逆变侧波形

U_d : 直流电压; I_d : 直流电流; RP1: 整流侧极 1; RP2: 整流侧极 2; IP1: 逆变侧极 1; IP2: 逆变侧极 2。

图 3 双极全压启动时直流电压、电流波形

Fig.3 DC voltage and current waves when full-voltage starting

2.2 投切换流器

当串联的换流器主回路发生故障（如换流器交流侧和直流侧各个接线端间短路、换流器载流元件及接线对地短路）或由于绝缘问题需要降压运行时，可只停运相应的 12 脉动换流单元，该极直流电压变为正常运行时的一半，直流电流不变，健全极的运行不受影响。这样可提高设备的可靠性和可用率，极大地降低单极停运的概率。当故障排除或绝缘水平恢复时，可将切除的换流器重新投入运行。

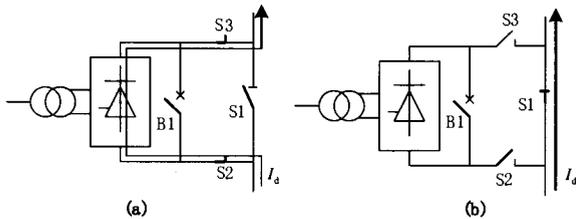
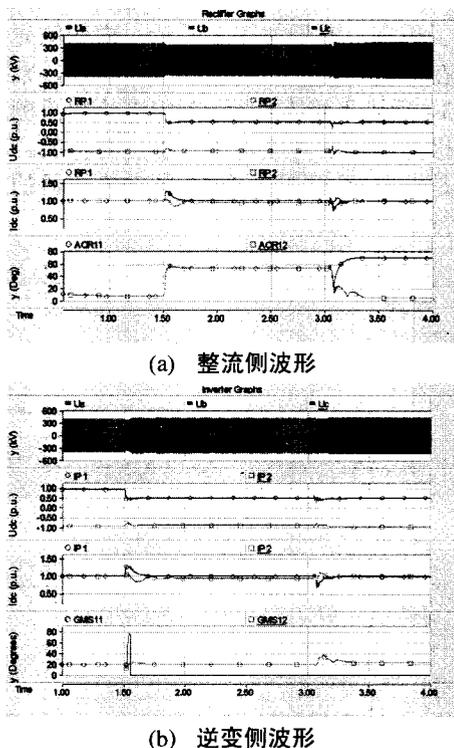


图 4 投切换流器控制示意图

Fig.4 Controlled sequence when taking one converter into/out of operation

2.2.1 切除换流器



U_a, U_b, U_c : 交流侧三相电压; U_{dc} : 直流电压; I_{dc} : 直流电流; RP1: 整流侧极 1; RP2: 整流侧极 2; IP1: 逆变侧极 1; IP2: 逆变侧极 2; AOR11、AOR12: 整流侧极 1 两个 12 脉动换流器的触发角指令; GMIS11、GMIS12: 逆变侧极 1 两个 12 脉动换流器的熄弧角测量值 (图 6、图 7 中各物理量与此相同)。

图 5 切除换流器时的仿真波形

Fig.5 Waves at both converters when taking a converter out of operation

如图 4(a)所示，保护动作后换流器切除的控制顺序如下：(1)接收跳闸信号后逆变侧首先投入旁通对，然后相应阀组的旁路开关 B1 闭合对故障阀组进行隔离；(2)故障阀组切换至切除控制逻辑，待阀电流下降到 0 后闭锁；(3)阀组闭锁后闭合开关 S1，相继打开开关 B1, S2, S3；(4)闭合整流侧相应的旁路开关 B1 并闭锁该阀组。

模拟极 1 逆变侧单阀组故障跳闸的录波波形如图 5 所示，仿真从稳态运行开始，1.5 s 时将逆变侧极 1 要切除的换流器闭锁，此时极 1 直流电压随即下降为 400 kV，3 s 时将整流侧极 1 相应的换流器闭锁。仿真结果表明，切除一个阀组会引起直流电压和电流的波动，并且整流侧两个换流器的角度非常大(接近 60°)，但这种波动是系统能够承受的，随着两侧阀组的退出，系统能够很快恢复正常。

2.2.2 投入换流器

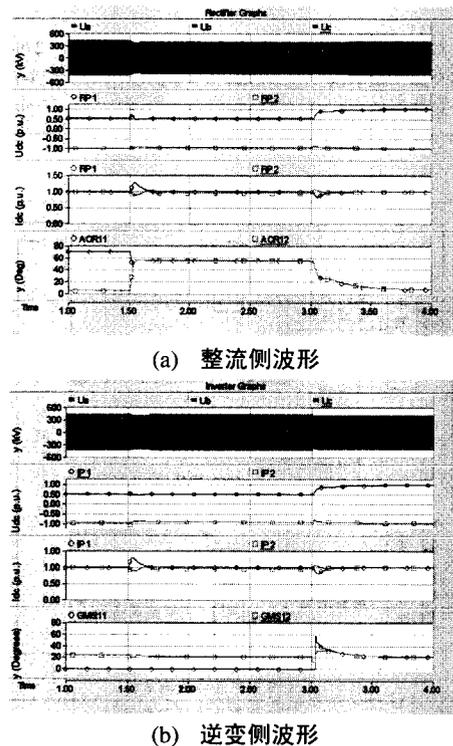


图 6 投入换流器时的仿真波形

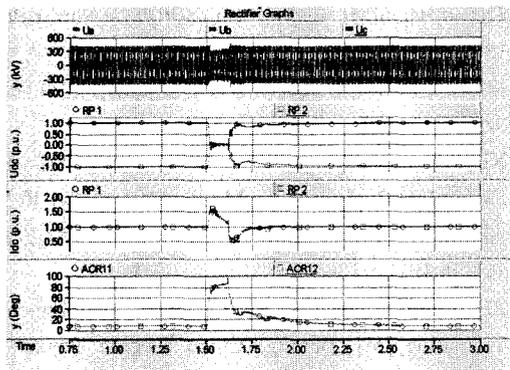
Fig.6 Waves at both converters when taking a converter into operation

如图 4(b)所示，投入换流器的控制顺序如下：(1)闭合开关 S2、S3 和断路器 B1，打开开关 S1，将直流电流转移至 B1 所在的支路上；(2)将整流侧要投入的换流器解锁，待其阀电流升至额定值 I_d 后，跳开 B1；(3)将逆变侧要投入的换流器解锁，待其阀电流升至额定值 I_d 后，跳开断路器 B1 并将换流

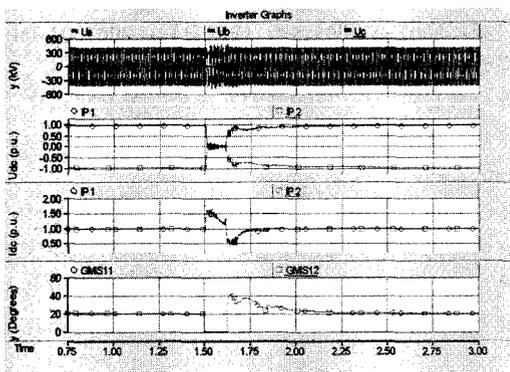
器转为逆变运行。

整个过程的仿真波形如图 6 所示, 仿真从稳态运行开始, 1.5 s 时将整流侧极 1 要投入的换流器解锁, 3 s 时将逆变侧极 1 要投入的换流器解锁, 此时极 1 直流电压立即阶跃上升, 随后达到 800 kV。仿真结果表明, 投入换流器的过程直流电压和直流电流也会有比较大的波动, 随着两侧阀组的投入, 系统很快恢复正常。

2.3 逆变侧交流系统单相故障



(a) 整流侧波形



(b) 逆变侧波形

图 7 逆变侧交流系统发生单线接地故障时的仿真波形

Fig.7 Waves when phase A in inverter side AC system applies a fault to neutral

交流系统故障对直流系统的影响是由于加在换流器上的换相电压的变化而引起的。单相故障是交流系统常见的故障, 一般形式为对地闪络。单相故障是不对称性故障, 对不同的换流变压器接线方式, 对换相电压的影响也不同^[15,16]。因此, 研究 ± 800 kV 特高压直流输电系统换流站交流侧发生单相故障时, 换流器的运行特性及系统恢复过程的控制是非常有必要的。本文对逆变侧换流站交流母线发生单相接地故障的情况进行了仿真。仿真从稳态运行开始, 在 1.5 s 时逆变侧交流母线 a 相发生接地故障, 故障持续时间为 100 ms。

由图 7 可知, 当逆变侧交流系统发生单相接地故障时, 逆变侧换流器发生换相失败, 持续时间约为 120 ms, 故障恢复后, 系统在逆变侧定熄弧角、整流侧定电流控制下, 经过约 120 ms 后恢复正常运行, 在恢复过程中, 整流侧和逆变侧两极双 12 脉动换流器运行仍能保持较好的一致性。

3 结论

本文以云广特高压直流工程为背景, 采用 PSCAD/EMTDC 仿真程序建立仿真模型, 仿真结果表明: (1) 特高压直流输电系统仍可采用与 ± 500 kV 高压直流系统相同的控制策略, 即整流侧采用定直流电流控制, 逆变侧定熄弧角控制或定电压控制; (2) 特高压每极采用了两个 12 脉动阀组串联, 所以换流器的投切过程要依照一定的操作顺序, 旁通开关和解锁闭锁控制需要时间上的紧密配合; (3) 由于特高压工程的运行方式比较灵活所以在控制逻辑中需要特别的单阀组投入退出逻辑; (4) 单阀组的投入退出会造成直流电压、电流比较大的波动, 触发角可能会短时运行在 60° 左右, 但这种波动不会造成直流系统停运。

参考文献

- [1] 李立溇. 特高压直流输电的技术特点和工程应用[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(24): 5-6.
LI Li-cheng. Technical Characteristics and Engineering Applications of UHVDC Transmission System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(24):5-6.
- [2] 袁青云. 特高压直流输电技术现状及在我国的应用前景[J]. 电网技术, 2005, 29(14): 1-3.
YUAN Qing-yun. Present State and Application Prospect of Ultra HVDC Transmission in China[J]. Power System Technology, 2005, 29(14):1-3.
- [3] 伍文城, 李新, 丁君, 等. 云广 ± 800 kV 直流输电工程输电容量探讨[J]. 电力设备, 2006, 7(5): 27-30.
WU Wen-cheng, LI Xin, DING Jun, et al. Discussion on Transmission Capacity of ± 800 kV Yunnan-Guangdong UHVDC Power Transmission Project[J]. Electrical Equipment, 2006, 7(5):27-30.
- [4] 中国南方电网公司. ± 800 kV 直流输电技术研究[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006. 2-60.
China Southern Power Grid. Investigation on ± 800 kV UHVDC Transmission Technology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2006.2-60.
- [5] 舒印彪, 刘泽洪, 高理迎, 等. ± 800 kV 6400 MW 特高压直流输电工程设计[J]. 电网技术, 2006, 30(1): 1-8.
SHU Yin-biao, LIU Ze-hong, GAO Li-ying, et al. A

- Preliminary Exploration for Design of $\pm 800\text{kV}$ UHVDC Project with Transmission Capacity of 6400MW[J]. Power System Technology, 2006,30(1):1-8.
- [6] 吴冬. 特高压直流输电外绝缘设计[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(24):7-8.
- WU Dong. Design of the Insulation for UHVDC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(24):7-8.
- [7] Cigre Workshop Group 14.32. HVDC Converter Stations for Voltage Above $\pm 600\text{kV}$ [R].2002.
- [8] Graham J,Kumar A,Biletdt G.HVDC Power Transmission for Remote Hydroelectric Plants[A].In:23rd-24th Cigre SC B4 Colloquium on Role of HVDC FACTS and Emerging Technologies in Evolving Power System[C]. Bangalore(India):2005.
- [9] Paulo Cesar Vaz Esmeraldo.New HVDC Projects Under Study in Brazil[R].New Delhi: Power Grid India HVDC Workshop, 2005.
- [10] Wu D, Hartings R, Astrom U. Investigations on the Outdoor Insulation of $\pm 800\text{kV}$ DC Transmission System[A].In: ICPST'94[C]. Beijing(China):1994.
- [11] 范建斌, 于永清, 刘泽洪, 等. $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电标准体系的建立[J]. 电网技术, 2006, 30(14):1-6.
- FAN Jian-bin, YU Yong-qing, LIU Ze-hong, et al. Introduction of $\pm 800\text{kV}$ HVDC Transmission Standards System[J]. Power System Technology, 2006, 30(14):1-6.
- [12] 林良真, 叶林. 电磁暂态分析软件包 PSCAD/EMTDC[J]. 电网技, 2000, 24(1):65-66.
- LIN Liang-zhen, YE Lin.An Introduction to PSCAD/EMTDC[J]. Power System Technology, 2000, 24(1):65-66.
- [13] 任震, 欧开健, 荆勇, 等. 基于 PSCAD/EMTDC 软件的直流输电系统数字仿真[J]. 电力自动化设备, 2002, 22(9):11-12.
- REN Zhen, OU Kai-jian, JING Yong, et al. Digital Simulation of HVDC Transmission System Based on PSCAD/EMTDC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2002,22(9):11-12.
- [14] 浙江大学发电教研组直流输电教研组. 直流输电[M]. 北京:电力工业出版社,1982.
- Zhejiang University HVDC Research Team. HVDC Transmission[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1982.
- [15] 徐政. 交直流电力系统动态行为分析[M]. 北京:机械工业出版社, 2004. 36-51.
- XU Zheng. Dynamic Analysis of AC/DC Power System[M].Beijing: China Machine Press,2004.36-51.
- [16] 赵晓君. 高压直流输电技术[M]. 北京:中国电力出版社, 2004. 122-136.
- ZHAO Wan-jun. HVDC Transmission Engineering Technology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.122-136.

收稿日期: 2007-01-26; 修回日期: 2007-04-06

作者简介:

陈潜(1979-), 男, 硕士研究生, 实习研究员, 主要研究方向为电力系统分析、运行与控制; E-mail:paschen@163.com

张尧(1948-), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统运行与稳定、电力市场、电网规划;

钟庆(1978-), 男, 博士, 主要研究方向为电力系统及其自动化、电力电子技术在电力系统中的应用及其控制技术。

关于征集“继电保护应用技术”研讨会论文的通知

继电保护是一门技术含量高、涉及范围广, 对制造、安装、运行和管理工作要求标准非常高的专业。为了推动我国继电保护技术的发展, 提高继电保护设备的研发、制造和运行水平, 加深本专业的广泛交流和深入探讨, 促进与世界先进水平接轨, 《继电器》杂志社与清华大学电机工程与应用电子技术系、华中科技大学电气与电子工程学院、华北电力大学电气与电子工程学院定于2007年四季度召开“继电保护应用技术”研讨会, 征文内容如下: (1) 超(特)高压交直流输电技术研究与应用; (2) 电力系统保护与控制的新原理、新技术; (3) 电力系统安全稳定控制; (4) 保护及自动装置运行经验与事故分析; (5) 继电保护设备的电磁兼容; (6) 继电保护标准的制定与应用; (7) 继电保护制造技术与工艺; (8) 继电保护检测与试验技术; (9) 配电网自动化; (10) 电能质量控制; (11) 电力系统通信技术; (12) 其他。详情请访问继电器杂志社网站 <http://www.dlwg.net/repress/>。