

基于RTDS的复合电能质量调节装置功能和性能试验研究

朱 静, 李 罗, 王弋飞, 雷 颖, 张长春

(西安高压电器研究院有限责任公司, 西安 710077)

摘要: 笔者概述了无功补偿装置的主要类型及其特点,介绍了西安高压电器研究院有限责任公司研制的复合电能质量调节装置的设计原理及结构。利用基于最新实时数字仿真系统(RTDS)的电力系统实时仿真试验平台研究并验证了该产品的无功调节控制功能和动态性能,对试验结果进行了分析,同时探讨了相关电能质量标准的试验要求。

关键词: 无功补偿; 复合电能质量调节; RTDS; 功能和动态性能试验

中图分类号: TM743

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2014)05-0056-07

Function and Performance Test for the Compound Power Quality Regulation Device Based on RTDS

ZHU Jing, LI Luo, WANG Yifei, LEI Ying, ZHANG Changchu

(Xi'an High Voltage Apparatus Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710077, China)

Abstract: The main types and characteristics of reactive power compensation devices are summarized. The principium and architecture of the compound power quality regulation device developed by Xi'an High Voltage Apparatus Research Institute Co.,Ltd.(XIHARI)are described in detail. The reactive power regulation function and the dynamic performance of the compound power quality regulation device are validated by the electric power system real-time simulation and test platform based on the latest real-time digital simulation test system (RTDS), and the test results are analyzed. Moreover,the test requirements of correlative power quality standard are discussed.

Key words: reactive power compensation; compound power quality regulation; RTDS; function and dynamic performance test

0 引言

无功补偿装置是一种应用广泛的节能产品。一般用电设备都呈感性,工作时从电网吸收大量感性无功功率,增大了线路中的电流、电压降及能耗,降低了配电设备的利用率,如果在用电设备的配电母线处并联接入电容器等容性无功补偿装置,就可以减小供电线路的电流,降低损耗,提高配电变压器的利用率^[1-5]。

低压无功补偿装置目前主要有:固定投入的并联电容器(FC)、利用接触器进行分组自动投切的并联电容器组(MSC)、利用晶闸管进行分组自动投切的并联电容器组(TSC)、晶闸管控制电抗器(TCR)和静止无功发生器 SVG 等。FC 可以提高平均功率因数,

但补偿容量是固定不变的,存在较大欠补偿或过补偿问题;MSC 可以自动分组投切,能阶梯式地自动跟踪负荷无功变化,补偿效果比 FC 好,但是投切延时较长,而且存在投入涌流和切除电弧的问题,接触器和电容器易损坏;TSC 利用晶闸管静止开关,解决了涌流和电弧问题,但仍是阶梯式跟踪;晶闸管可控电抗器 TCR 具有连续快速调节感性无功的功能,但谐波发生量大,需要配置一定数量的滤波装置;SVG 具有连续快速调节感性、容性无功的双向补偿功能,不会产生谐波,必要时还可以对谐波进行补偿,是目前性能最好的无功补偿装置,但相对成本高,性价比较低^[6-12]。

西安高压电器研究院有限责任公司(简称西高院)研制的新型无功补偿装置——复合电能质量调节装置采用了 TSC 分级补偿和 SVG 连续补偿组合

的结构,在满足相同无功补偿容量的情况下,性价比优于同等容量的 SVG 产品,具备共补、分相补偿和滤除谐波功能,同时满足快速连续调节的应用需要,在分析现有电能质量标准及相关试验标准的基础上,西高院利用基于最新实时数字仿真系统(RTDS)的电力系统仿真试验平台对该复合电能质量调节器各项控制功能和参数进行了优化,模拟系统负荷的动态变化和故障对产品各项控制功能和性能进行了测试,验证了电能质量调节装置的快速调节作用。

1 RTDS 应用分析

该项工作是国家能源局智能化输配电关键设备研制及工程应用示范项目“智能化输配电设备试验方法研究及试验检测平台的建立”的研究内容之一。

RTDS(real-time digital simulation)最重要的特性是能维持实时条件下的连续运行,能够快速求解电力系统方程并连续地产生输出,输出真实地代表了实际网络的状态^[13-15]。由于计算结果的实时性,仿真系统能直接连到电力系统控制和保护设备上,进行闭环试验。该试验方法使设备能在各种可能发生的工况下进行其他试验方法无法实现或在实际的系统中不允许进行的试验,为评价保护或控制设备的运行提供了条件。

西高院电力电子检测中心配置了加拿大 RTDS 公司基于 PB5 高速处理器的最新实时数字仿真系统软硬件,见图 1。



图 1 RTDS 实时数字仿真系统

Fig. 1 RTDS real-time digital simulation system

2 复合电能质量调节装置原理分析

西高院提出网络化的复合电能质量装置系统结构见图 2,复合电能质量调节装置由 3 部分组成: SVG(static var generator)、多组 TSC(thyristor switched capacitor)和总控制器。通过通信网络将 SVG、TSC 和总控制器联系起来。SVG 具有双向补偿功能,TSC 分为三相共补与分相补偿两种结构,兼备谐波补偿

功能和防止系统谐波放大的功能。

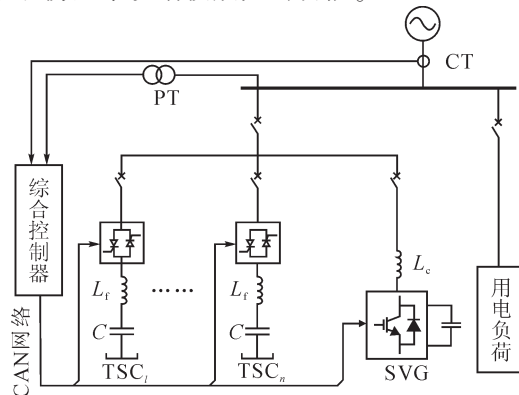


图 2 复合电能质量调节装置系统结构图

Fig. 2 System architecture of compound power quality regulation equipment

复合电能质量控制器补偿原理见图 3,通过 TSC 分级补偿负荷无功变化,级间无功误差则由 SVG 来连续调节,满足快速连续无功功率调节的应用需要。

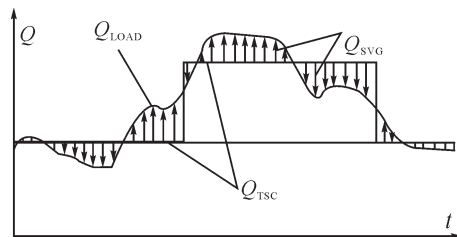


图 3 复合型电能质量调节装置补偿原理图

Fig. 3 Compensation principle of compound power quality regulation equipment

在总控制器的控制下,SVG 与 TSC 可以联合工作或单独工作。总控制器采用触摸屏与液晶显示相结合的人机终端,用户可直观地读取主接线、开关位置、实时数据和工作状态,同时可手动控制投切 TSC 单元和 SVG。综合控制器同时具备网络接口,可上传装置信息,接受调度端控制指令。

2.1 瞬时无功功率理论

SVG 控制基于 Park 算法^[16-19],实现对瞬时无功功率的计算和跟踪补偿。Park 变换见式(1)、(2)。

$$u_{dq} = C_{3s-2r} u_{abc}; \quad (1)$$

$$i_{dq} = C_{3s-2r} i_{abc}. \quad (2)$$

式(1)、(2)中,

$$C_{3s-2r} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \sin \omega t \sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi) \sin(\omega t + \frac{2}{3}\pi) \\ \cos \omega t \cos(\omega t - \frac{2}{3}\pi) \cos(\omega t + \frac{2}{3}\pi) \end{bmatrix}.$$

2.2 谐波滤波原理分析

复合电能质量调节装置是以无功补偿为主要目的,滤波为辅助目的,因此其滤波效果在特定场

合才比较理想。对于谐波电流源来说,等效电路见图 4。

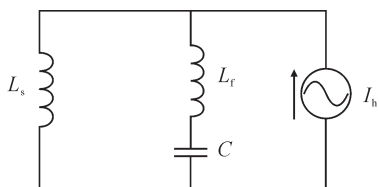


图 4 谐波源等效模型

Fig. 4 Harmonic source equivalent model

滤波器的滤波效果与失谐电抗及电源等效电抗有关,失谐电抗 ΔX_f 定义为

$$\Delta X_f = \omega L_f - \frac{1}{\omega C} \quad (3)$$

滤波效果定义为

$$\eta = \frac{I_{fh}}{I_h} \quad (4)$$

式(4)中: I_{fh} 为滤波器支路吸收的谐波电流; I_h 为谐波支路中的谐波电流。根据谐波源等效模型可推导出

$$\eta = \frac{I_{fh}}{I_h} = 1 - \frac{I_{sh}}{I_h} = \frac{X_s}{X_s + \Delta X_f} \quad (5)$$

式(5)中, X_s 为电源侧阻抗。

3 闭环试验网络的建立

受现场情况限制,在实际系统中往往无法实现检验补偿设备的动态性能参数的各种工况。西高院配置了以实时数字仿真系统(RTDS)、专用功率放大器及相关测试设备构成的电力系统实时仿真试验平台,通过搭建复合电能质量调节装置的闭环试验网络,模拟实际运行的各种工况,验证复合电能质量调节器的动态性能参数,闭环试验网络框图见图 5。

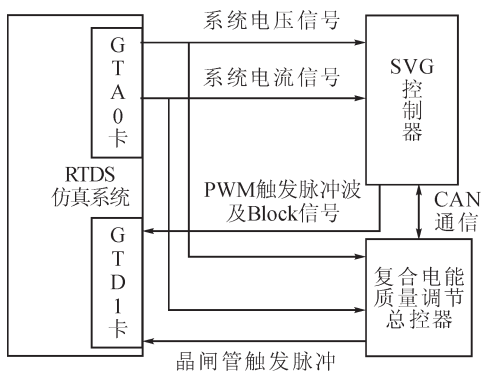


图 5 闭环试验原理图

Fig. 5 Loop test principium diagram

3.1 电源模型

电源等值模型见图 6。

根据配变与等值电源关系选择适当的等值电

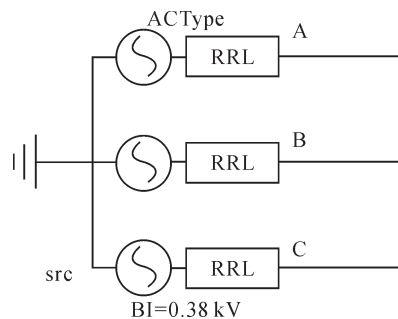


图 6 电源等值模型

Fig. 6 Source equivalent model

源容量 Q , 电源等值阻抗根据式(6)计算

$$Z_{eq} = \frac{U_N^2}{Q} \quad (6)$$

选择如图 7 所示的 $R-R//L$ 电源阻抗模型并设置参数。

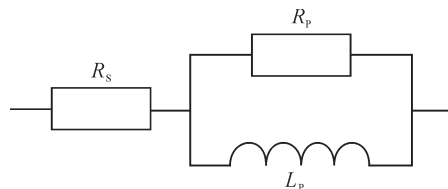


图 7 电源等值阻抗模型

Fig. 7 Source equivalent impedance model

对于 $R-R//L$ 阻抗模型参数计算方法为

$$Z_p = \frac{Z_{eq}}{\omega} \quad (7)$$

$$R_s = (1/3 \sim 1/2) \times Z_{eq} \quad (8)$$

而 R_p 可选择一个比较大的值即可。

3.2 共补电容器组模型

共补电容器组模型见图 8。容抗及串抗的计算式为

$$X_c = \frac{1}{\omega C} \quad (9)$$

$$X_L = \frac{X_c}{h^2} \quad (10)$$

根据实际共补支路的电容器、电抗器计算值设置各次滤波支路模型参数。

3.3 SVG 模型

SVG 模型采用如图 9 所示的试验模型,基于小步长仿真的 rtds_vsc_PH3LEV2 模型, $BR1$ 为直流侧电容, R 为直流侧均压电阻, 1-6 号 IGBT 接收外部控制系统输入的 PWM 信号进行导通或关断。

为考核控制系统功能及动态性能, RTDS 闭环试验系统中还建立了动态负荷模型、不平衡负载模型及谐波源模型等, 并可在 Runtime 界面实时运行时调节、控制各种负荷的幅值大小和投切。

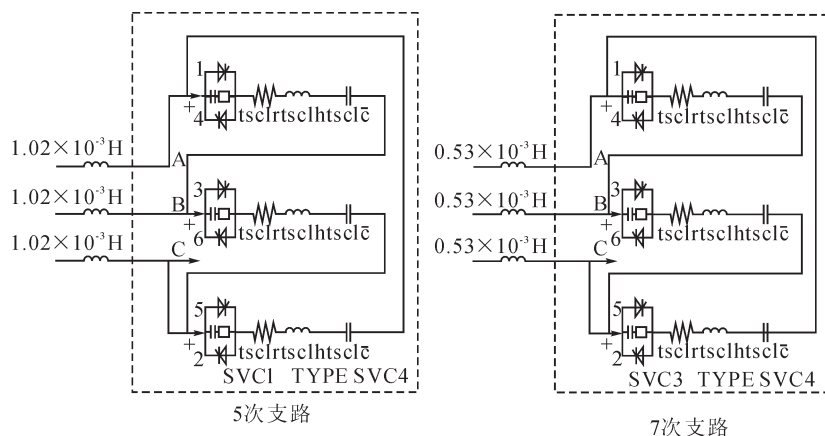


图 8 共补电容器组模型

Fig. 8 Co-compensation capacitors model

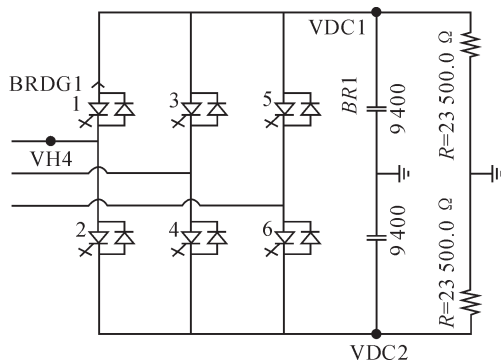


图 9 SVG 试验模型

Fig. 9 SVG test model

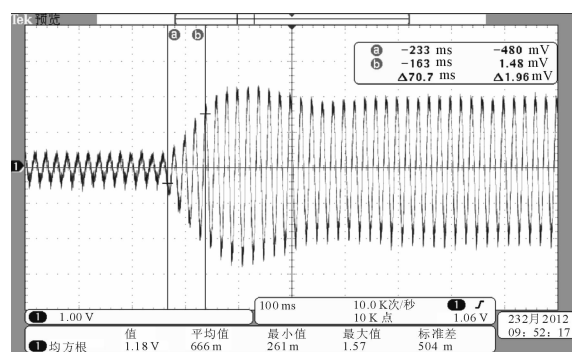


图 11 优化后的动态响应时间

Fig. 11 Dynamic response time after optimization

4 闭环试验结果及分析

4.1 复合电能质量调节装置参数优化

SVG 动态响应时间定义为: 在补偿指令作用下, SVG 从原输出上升到新预期补偿值的 90% 的时间差, 试验中利用 DPO3034 300 MHz 数字示波器测量 SVG 的 A 相电流 ISVGA 的变化来进行, 根据 SVG 的工作原理利用仿真系统优化了 SVG 的动态响应时间, 优化前后的动态响应时间见图 10、11。

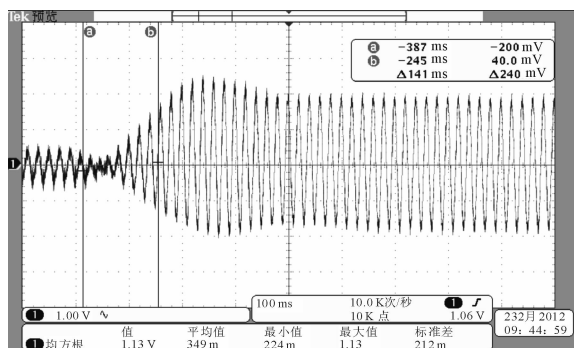


图 10 优化前的动态响应时间

Fig. 10 Dynamic response time before optimization

4.2 闭环试验

根据“GB/T 14549—1995 三相电网允许不平衡

度”、“GB/T 14549—93 公用电网谐波”、“GB/T 22582—2008 电力电容器 低压功率因数补偿装置”、“GB/T 15576—2008 低压成套无功功率补偿装置”等标准利用闭环试验网络进行的试验项目主要包括 TSC 三相共补, 分相补偿性能测试, SVG 功能、性能和保护功能测试, 整机联合试验测试等。

4.2.1 TSC 三相共补性能试验

根据投切阈值设定不同的数据测试点, 考察了综合控制器自动投切 TSC 支路的功能, 根据设计标准电容器组投入补偿后, 系统电源侧剩余的无功功率应小于投切阈值。试验数据见表 1。其中“+”表示感性无功功率, “-”表示容性无功功率。

表 1 共补性能测试数据

Tab. 1 Three-phase co-compensation performance test data

参数	数据					
无功功率设定值/kvar	20	45	70	100	115	135
TSC投入号	1	1-2	1-3	1-4	1-5	1-6
补偿后无功功率/kvar	-5	1	4	14	7	4

4.2.2 TSC 分相补偿性能试验

通过试验测试了综合控制器在三相不平衡情

况下自动投切 TSC 分相补偿支路的功能,根据各组分相负载的投入状况观察分相补偿电容器组的投

入状况,同时计算系统的不平衡度。分相补偿性能测试结果见图 12。

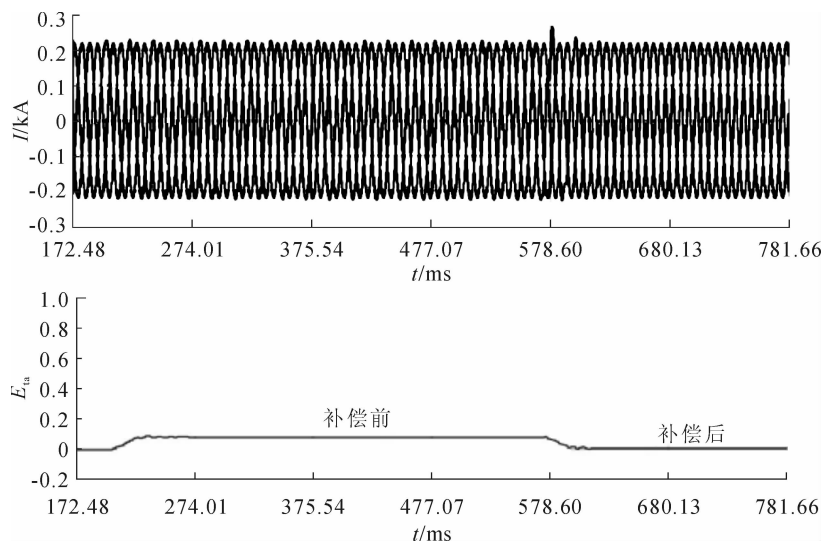


图 12 分相补偿性能试验结果

Fig. 12 Single-phase compensation test result

图 12 为 C 相不平衡负载投入时的试验结果,包括三相电压波形及不平衡度曲线,可知补偿后不平衡度降低到补偿前水平。

4.2.3 SVG 功能试验

通过试验测试了 SVG 控制器无功功率(容性或感性)补偿功能。通过模拟系统侧无功功率的变化,测试 SVG 的无功功率补偿值及补偿后电源侧剩余的无功功率值和功率因数。试验结果见表 2,其中“+”表示感性无功功率,“-”表示容性无功功率。

表 2 SVG 功能试验数据

Tab. 2 Function test data of SVG

参数	数据				
无功功率设定值/kvar	-30	-10	0	10	30
补偿前电源无功功率	-31	-11	0	8	29
SVG 补偿值	-31	-11	-1	9	29
补偿后电源无功功率	-1	-1	-1	-1	0
补偿后功率因数	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

由该试验结果可见,SVG 即可发出容性无功,也可发出感性无功,能实现额定容量范围内的连续补偿。

4.2.4 复合电能质量调节装置联合试验

通过试验测试了综合控制器的无功调节功能,试验时将仿真系统实时运行在额定电压下,分别设定平衡负载无功功率及分相负载水平,观测 TSC 投切情况、SVG 补偿情况及补偿后电源侧的无功功率和功率因数。其中一组试验结果见图 13,可见补偿前电网中无功功率数值较大,补偿后无功功率明显减小,功率因数接近 1.0。

4.2.5 其他功能性试验

利用该闭环试验系统,还对 SVG 过流保护、欠压、过压、过热、缺相保护功能及 SVG 自启动功能进行了试验。

5 结语

笔者以复合电能质量调节装置为例,介绍了基于 RTDS 的电力系统实时仿真试验平台,提出了无功补偿装置功能和动态性能闭环试验方法。分析了复合电能质量调节装置的结构设计及工作原理;根据闭环试验原理搭建了闭环试验网络并完成了复合电能质量调节装置的各项功能考察。

该项研究工作的完成进一步证明,利用 RTDS 实时仿真试验平台建立的基于实际电力系统和特定结构及参数的无功补偿装置闭环仿真试验网络,可以全面验证装置的各种功能和性能,为进行新型无功补偿装置的研发提供了重要的技术手段和试验平台。

参考文献:

- [1] CASAZZA J, DELEA F. Understanding electric power systems[M]. Wiley: Wiley-IEEE Press, 2003.
- [2] HINGORANI N G, GYUGYI L. Understanding FACTS[M]. New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineer, 2005.
- [3] 陆安定. 功率因数与无功补偿[M]. 上海: 上海科学普及出版社, 2004.
LU Anding. Power factor and reactive power compensation[M]. Shanghai: Shanghai Popular Science Press, 2004.

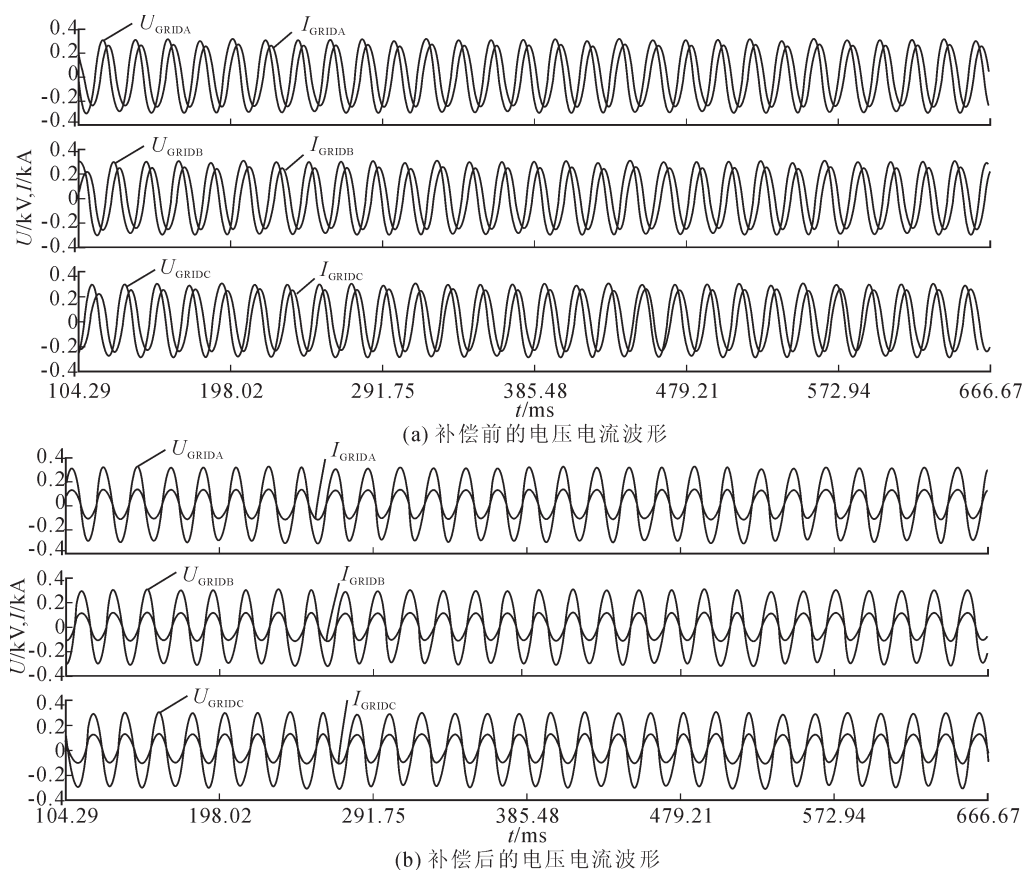


图 13 复合电能质量调节装置联合试验结果

Fig. 13 Cooperating test data of compound power quality regulation equipment

- [4] 王兆安, 杨 君, 刘进军. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 第 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2006.
WANG Zhao'an, YANG Jun, LIU Jinjun. Harmonic control and reactive power compensation[M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2006.
- [5] 米勒 T J E. 电力系统无功功率控制[M]. 北京: 水利水电出版社, 1982.
MILLER T J E. Reactive power control of power system [M]. Beijing: Hydraulic and Hydro-power Press, 1982.
- [6] 金立军, 安世超, 廖黎明, 等. 国内外无功补偿研发现状与发展趋势[J]. 高压电器, 2008, 44(5): 463-465.
JIN Lijun, AN Shichao, LIAO Liming, et al. Present situation and development of reactive power compensation both at home and abroad[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(5): 463-465.
- [7] 任丕德, 刘发友, 周胜军. 动态无功补偿技术的应用现状[J]. 电网技术, 2004, 28(23): 81-83.
REN Pide, LIU Fayou, ZHOU Shengjun. Application situation of dynamic reactive compensation technique[J]. Power System Technology, 2004, 28(23): 81-83.
- [8] 罗 安. 电网谐波治理和无补偿技术及装备[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
LUO An. Grid's harmonic control, reactive compensation technology and devices[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2006.
- [9] 吴文辉, 刘会金. 静止同步补偿器(STATCOM)技术的研究现状与发展[J]. 华东交通大学学报, 2005, 22(2): 89-94.
WU Wenhui, LIU Huijin. Research status and development of static synchronous compensator[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2005, 22(2): 89-94.
- [10] 何一浩, 王树民. TSC 动态无功补偿技术评述[J]. 中国电力, 2004, 37(10): 22-25.
HE Yihao, WANG Shumin. TSC dynamic reactive power compensation technology review[J]. Electric Power, 2004, 37(10): 22-25.
- [11] 巩 庆. 晶闸管投切电容器动态无功补偿技术及其应用[J]. 电网技术, 2007, 31(S2): 118-122.
GONG Qing. Thyristor switched capacitor var compensation technology and its application[J]. Power System Technology, 2007, 31(S2): 118-122.
- [12] 何俊正, 申凌云, 李 静, 等. 静止无功补偿装置在 35 kV 配电系统中的应用. 高压电器[J]. 高压电器, 2008, 44(4): 17-21.
HE Junzheng, SHEN Lingyun, LI Jing, et al. Applications of static var compensation devices in 35 kV distribution power system[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(4): 17-21.
- [13] DUCHEN H, LAGERKVIST M, KUFFEL R, et al. HVDC simulation and control system testing using a realtime

- digital simulator(RTDS)[C]// First International Conference on Digital Power System Simulators.[S.l.]:IEEE, 1995:213.
- [14] 缪勇,王伟岸. 用于 SVC 控制系统闭环测试的 RTDS 建模[J]. 上海电气技术, 2010, 3(3):6-9.
- MIAO Yong, WANG Wei'an. Modelling of SVC control system in RTDS for closed loop system test[J]. Journal of Shanghai Electric Technology, 2010, 3(3):6-9.
- [15] 马巍巍,石新春,付超. 基于 RTDS 的 SVC 控制器闭环试验平台的实现[C]//中国高等学校电力系统及其自动化专业第二十四届学术年会论文集(下册). 北京:北京农业大学, 2008:1.
- MA Weiwei, DAN Xinchun, FU Chao. Realization of SVC controller loop test platform based on RTDS[C]// The Collected Papers (part3) of 24th Chinese Universities Power System and Automation Academic Annual Meeting. Beijing:China Agricultural University, 2008:1.
- [16] 王兆安,李民,卓放. 三相电路瞬时无功功率理论的研究[J]. 电工技术学报, 1992(3):55-59.
- WANG Zhao'an, LI Min, ZHUO Fang. Study about three-phase circuit instantaneous power theory[J]. Journal of Electrician Technique, 1992(3):55-59.
- [17] 唐杰,罗安,盘宏斌,等. 基于瞬时功率平衡和负序前馈控制的 DSTATCOM 电压控制策略方法[J]. 高压电器, 2008, 44(5):392-394.
- TANG Jie, LUO An, PAN Hongbin, et al. A voltage control strategy for DSTATCOM based on balance of instantaneous power and negative sequence feedforward control[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(5):392-394.
- [18] 刘进军,王兆安. 基于旋转空间矢量分析瞬时无功功率理论及其应用[J]. 电工技术学报, 1999, 14(1):49-54.
- LIU Jinjun, WANG Zhao'an. Analysis of theory and applications of instantaneous reactive power based on space vector method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1999, 14(1): 49-54.
- [19] 盘宏斌,张佳佳,肖业伟,等. 基于改进的同步旋转参考坐标变换的静止无功补偿装置[J]. 高压电器, 2008, 44(6):493-496.
- PAN Hongbin, ZHANG Jiajia, XIAO Yewei, et al. An improved susceptance calculation method for static var compensator[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(6):493-496.
- 朱静(1970—),女,高级工程师,主要从事电力电子在新能源技术中的应用研究及实时数字仿真研究。
- 李罗(1984—),男,助理工程师,主要从事动态无功补偿技术仿真研究及装置开发工作。
- 王弋飞(1981—),男,助理工程师,主要从事动态无功补偿技术仿真研究及装置开发工作。
- 雷颖(1970—),女,高级工程师,主要从事动态无功补偿装置开发工作。
- 张长春(1985—),男,助理工程师,主要从事电力电子设备检测技术研究及装置试验。

(上接第 55 页)

- pollution testing of HVDC insulators:Analysis of factors influencing performance[J]. Electra, 1992(140):99-113.
- [25] Task Force 04.04 of Study Committee 33.Artificial pollution testing of HVDC insulators[J]. Transmission and Distribution, 2001, 148(4):269-274.
- [26] SUZUKI Y, ITO S, AKIZUKI M, et al. Artificial contamination test method on accumulated contamination conditions[J]. Eleventh International Symposium on High Voltage Engineering, 1999(4):192-195.
- [27] 吕建红,周年光,彭继文,等. 基于大气环境质量的电网绝缘污秽等级划分[J]. 电瓷避雷器, 2012(4):14-15.
- LYU Jianhong, ZHOU Nianguang, PENG Jiwen, et al. The classification of insulator pollution severity of electric power grid based on atmospheric quality[J]. Insulators and Surge Arresters, 2012(4):14-15.
- 彭波(1981—),男,博士,工程师,主要从事高电压新技术的研究。
- 汤美云(1962—),男,高级工程师,主要从事电力系统运行维护管理相关工作。