

# 高压开关全电压关合试验相关问题研究

范兴明<sup>1,2</sup>, 张 鑫<sup>2</sup>, 邹积岩<sup>1</sup>

(1. 大连理工大学电气工程系, 辽宁 大连 116024; 2. 桂林电子科技大学机电工程学院, 广西 桂林 541004)

**摘要:** 以国际电工委员会(IEC)和我国关于高压断路器合成试验的相关标准为依据, 笔者提出了一种基于真空触发开关(TVS)的电流源快速合闸开关和全电压关合试验回路。分析了全电压关合试验的实施难点以及影响与直接试验等价性的主要因素, 引入短路关合电流是否投入的综合判据, 设计并实现了可进行额定参数为 110 kV/63 kA 电流源主控开关和全电压关合试验系统样机。以进行具有最大预燃弧时间的全电压关合为例, 对所研究的试验系统进行了功能和可靠性现场试验。结果表明, 该系统在大功率试验站强电磁干扰环境下具有较高的控制精度和工作稳定性。

**关键词:** 全电压关合; 综合判据; 主控开关; 试验系统

中图分类号: TM83

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2009)02-0018-04

## Study of Full-voltage Synthetic Making Test for High Voltage Switches

FAN Xing-ming<sup>1,2</sup>, ZHANG Xin<sup>2</sup>, ZOU Ji-yan<sup>1</sup>

(1. Department Electrical and Electronic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

**Abstract:** Taking the IEC and Chinese national standards on synthetic test of high-voltage circuit breaker as the guidance, a closing switch of current source based on triggered vacuum switch (TVS) and a synthetic making test circuit at full rated voltage were presented. The key difficulty to perform a synthetic making test at full rated voltage and the main factors impacting the equivalent condition and performance of synthetic test with direct test were analyzed. The criterion on whether the launching device of current source is to work was also discussed. A prototype of the proposed launching device of current source at rated parameter 110 kV/63 kA and the measurement and control system for synthetic making test were designed and implemented. The functional and reliability tests of the system at the applied peak voltage were carried out in Xi'an High Voltage Apparatus Research Institute. The results indicate that the measurement and control system performs accurately and reliably in high power laboratory condition.

**Key words:** closing at full-voltage; criterion; master switch; test system

## 0 引言

全电压关合试验是指试品在额定电压下进行的关合, 是相对于降低电压下所做的关合试验而言的, 也是 IEC 国际标准近年来新增的试验项目。受到试验容量和技术条件的限制, 具有最大预燃弧时间(最大预燃弧能量)的短路关合试验只能以合成的方式进行, 在世界范围内只有少数几个大功率试验室能够进行该项试验。早在 1977 年, 意大利 CESI 大功率试验室便研制出了高试验参数的专用关合开关并建立起工业性的合成试验回路<sup>[1,2]</sup>, 其采用的合成试验线路被 IEC 采用, 并在 IEC 60427 出版物中作为交流高压断路器试验标准推荐使用。

全电压关合试验的技术瓶颈是电流源主控开关及其控制系统。经过几十年的发展, CESI 针对合成试验已经开发出了系列产品, 主要包括 CHP、SYNTR、SPP 及 OL 等。CESI 用于全电压关合试验的电流源引入装置称作 CHP, 其实际上是一个工作在压缩空气中的有特殊结构的触发间隙, 通过多个基本单元串联实现所需电压等级。文[3]中给出了关于采用自点火串联球隙作为关合装置的报道, 在我国也有学者作过类似的研究<sup>[4]</sup>, 这种关合装置的特点就是利用试品断路器的预击穿直接引燃关合装置。当时可进行试验的最高参数为 110 kV/31.5 kA, 为我国高压断路器进行全电压关合做了非常重要的前期工作, 但是该关合装置和合成关合试验回路没能得到实际应用。

收稿日期: 2008-04-16; 修回日期: 2008-11-21

基金项目: 广西制造系统与先进制造技术重点实验室的主任基金(0842006\_025\_Z)。

作者简介: 范兴明(1978-), 男, 山东省武城县人, 博士, 主要从事智能化电器及高电压新技术研究。

笔者提出了以真空触发开关(TVS)作为电流源主控开关的合成关合试验回路,并给出了电流源是否引入的综合判据,以增加试验的有效性和成功率。最后,实现了可进行额定试验参数为110 kV/63 kA的电流源主控开关和全电压关合试验系统样机。在西安高压电器研究所对电流源主控开关和全电压关合试验测控系统样机做了功能和可靠性试验。试验结果表明,电流源主控开关和试验系统样机具有较高的控制精度和工作稳定性。

## 1 高压断路器全电压合成关合试验

### 1.1 全电压关合试验回路设置

合成关合试验回路的总体结构可以分为并联形式和串联形式,笔者所研究的试验回路的总体结构见图1,电流源和电压源对试品来说属于并联形式连接。其中 $QF_1$ 为试品断路器, $SW$ 为电流源主控开关, $QF_a$ 为辅助断路器, $L_c$ 、 $L_v$ 分别为电流和电压回路电抗器, $R_0$ 、 $C_0$ 为调频电阻和电容, $T$ 、 $T_1$ 、 $T_2$ 为变压器,线路1、2、3为控制光纤。图1(a)、(b)中电压源分别采用振荡回路和小容量变压器形式,实际应用中电压源采用图1(a)的形式较为常见,图1(b)的形式必须保证两个电源相位同步。

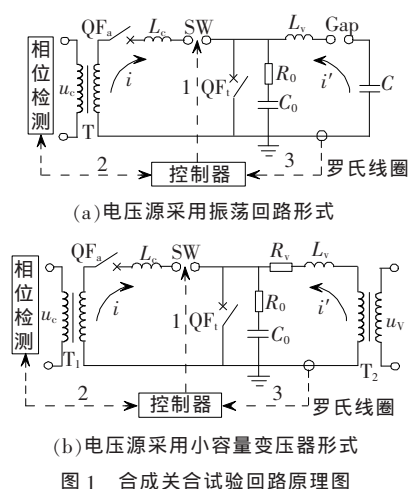


图1 合成关合试验回路原理图

试验前,辅助断路器 $QF_a$ 处于合闸位置,试品断路器 $QF_1$ 处于分闸位置, $SW$ 处于断开状态;试验时 $QF_1$ 接到合闸指令后,触头开始运动并相互靠近,在电压源作用下发生预燃弧击穿,罗可夫斯基线圈(罗氏线圈)用于检测该预击穿电流,当检测到该电流后向控制器发送预击穿电流出现指令。相位检测单元的作用是跟踪电流源电流的相位,控制关合瞬间外施电压与关合电流相位在事先设定的范围之内。试验时,以是否检测到试品预击穿电流以及电压源和电流源相位容差是否满足要求为依据,综合判断电流源主控开关 $SW$ 是否动作。

### 1.2 电流源主控开关

无论电压源采用振荡回路还是小容量变压器,

由图1可以看出,试验前主控开关 $SW$ 两端的电压等于电压源电压与电流源电压的叠加;试验开始后试品断路器 $QF_1$ 在电压源的作用下发生预击穿,随后 $SW$ 导通,短路关合电流流过 $SW$ 和试品断路器 $QF_1$ 。为了满足与直接试验的等价性,从电压源到电流源作用在试品断路器上的转换时间应限制在300  $\mu$ s以内或者更短<sup>[1]</sup>。

由此可见,对电流源主控开关 $SW$ 的特殊要求在于,其断口间应能承受非常高的额定外施电压,能够关合数值很大的短路关合电流,并且要求其导通快速稳定。笔者提出的电流源主控开关由TVS和快速真空断路器(FVCB)构成,由相同耐压等级的TVS和FVCB并联构成基本模块单元<sup>[5,6]</sup>。该主控开关的构成见图2,由一个或多个基本模块单元串联构成整个主控开关,即图1中的 $SW$ 。设计中采用10 kV电压等级(工频耐压45 kV)的TVS和FVCB组成基本模块单元,根据合成试验额定电压等级的要求可将该模块单元进行串联,从而增加整个电流源主控开关的耐压水平。TVS的典型导通时延为25  $\mu$ s;FVCB的稳定合闸时间为8 ms,在TVS支路电流过零熄弧之前合闸到位起到旁路的作用,减少TVS的烧蚀。

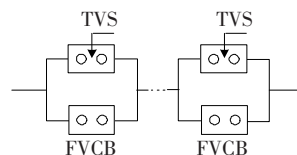


图2 电流源主控开关的构成示意图

## 2 短路关合电流引入的综合判据

采用合成试验方法对断路器性能进行考核时,应重现直接试验的各种负荷条件以满足合成试验与直接试验的等价性。试验时,除了试品开关和电流源主控开关外,还包括电压源投切开关以及一些保护和辅助开关。试验过程中这些开关应合理配合,满足一定的动作次序;另外,试验过程中还有许多需要测量和控制的信号量,主要包括关合电流、外施电压、预击穿电流等。合成试验测控系统比较复杂,而且控制精度和时序配合要求极高,否则很难保证试验的等价性和成功率。

根据前述合成关合试验回路和电流源主控开关的具体形式,提出了全电压关合试验系统的控制策略及实现方法<sup>[6,7]</sup>,主要解决试验过程中涉及到的信号采集、数据处理及同步控制等问题。为了保证试验的有效性、增加试验的成功率,研究中采用以下措施作为短路关合电流是否引入的综合判据。

判据1: 外施电压与短路关合电流之间相位差是否满足 $90^\circ \pm 27^\circ$ 的范围,即要求 $|\Delta t| \leq 1.5$  ms。

判据2: 是否检测到试品开关中出现预燃弧击穿电流。

如果在以上两个条件不能同时满足的情况下,将短路关合电流引入试品,这时对试品开关施加的负荷情况不能满足标准推荐的试验条件,不能正确反映试品开关的性能,所以此次试验应判为无效。

增加电流源是否投入判据的意义在于:①在进行具有最大预击穿燃弧的关合试验时,额定短路关合电流数值上等于额定短路开断电流交流分量有效值的 2.5~2.7 倍<sup>[8]</sup>,如不能保证试验有较高的成功率和有效性将会给试品带来不必要的烧蚀甚至是致命的损伤;②可避免 TVS 主电极和触发极不必要的烧蚀,从而延长电流源主控开关的使用寿命;③保证试验的有效性、提高了试验的成功率,从而避免不必要的人力和物力资源的浪费。

### 3 全电压关合试验系统的设计

该研究设计的全电压关合试验测控系统框图见图 3,主处理器采用美国 TI 公司生产的 DSP,型号为 TMS320LF2407A。试验前,控制室通过光纤传输相关参数到主控制器 DSP 进行参数预设;主控制器上电复位后便进入工作状态,其主要功能包括:实时探测电流源电流过零时刻、等待接收主控制器的预设参数、监测试品开关预燃弧击穿信号以及控制各个开关量的输入输出等操作。因为试验电压等级很高,为了增加安全性、提高系统电磁兼容性能,该系统所有控制信号和通信线路均采用光纤传输。控制室到主控制器 DSP 通过光纤 RS485 进行通信。

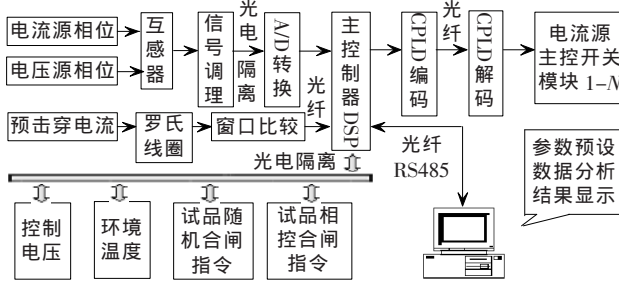


图 3 合成关合试验测控系统的硬件结构图

全电压关合试验系统包括以下功能:①试验前试品开关相关参数的预先设置,主要包括试品合闸时间  $t_{closing}$  和预燃弧时间  $t_{arcing}$  的设置;②电流源是否投入的判据之一:试品开关预击穿燃弧电流的检测;③电流源是否投入的判据之二:外施电压与短路关合电流相位容差的检测与控制;④外施电压关合相位的控制;⑤试验过程中涉及到的输入、输出开关量的控制,包括试品开关合闸、电流源主控开关触发,保护和辅助开关的控制指令发送以及试品开关随机合闸(开始试验)指令等;⑥试验主控制器与控制室计算机的通信以及试验结果的显示和处理等功能。

前面已经提到电流源主控开关是否动作是由两个判据决定的,而试品预燃弧击穿电流的出现就是

判据之一。预燃弧击穿电流的检测必须快速、准确。考虑到该电流信号的用途,没有必要精确测量预燃弧击穿电流的大小,只要检测到其出现时刻并且电流值在一定范围即可。系统设计中去掉了 A/D 采样环节及后续的处理单元,该信号的检测流程见图 4。

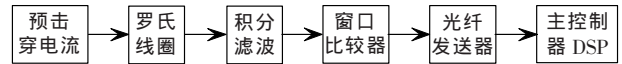
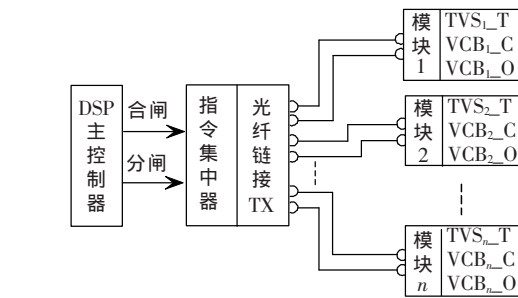


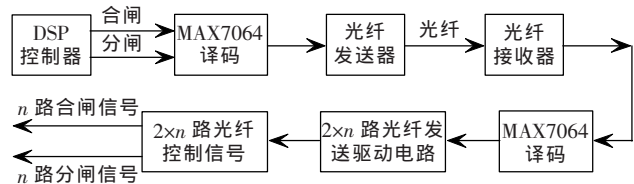
图 4 试品开关预燃弧击穿电流的检测

由前面叙述可知,电流源主控开关由 TVS 和 FVCB 并联构成基本模块单元,这些基本模块单元再经过串联来满足电流源主控开关的耐压要求。由于电流源主控开关安装位置的特殊性,同时操动机构和真空断路器的动铁心处于等电位,这就决定了该模块单元的控制方式的特殊性。

文中使用光纤控制技术在低电位端对真空开关的电子操动机构进行控制。主控制器通过光纤发送分、合闸指令到指令集中器,再由指令集中器发各个模块单元的分、合闸指令;每个基本模块单元的分闸指令、合闸指令各由一根光纤控制。图 5 为电流源主控开关的控制和光控信号传输系统原理图。TVS 和 FVCB 的分、合闸指令采用编码形式传输,以增加控制系统的抗干扰性能,保证在大功率试验站恶劣的电磁环境下主控开关不发生误触发。



(a) 电流源主控开关控制原理图



(b) 电流源光控信号传输系统原理图

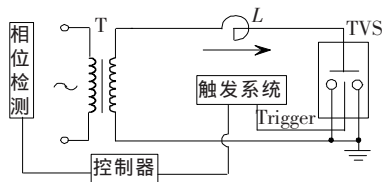
图 5 电流源主控开关控制及光纤传输系统

### 4 现场试验

在做具有最大预燃弧的全电压关合实验时,要求外施电压(电压源)与短路关合电流(电流源)相位容差满足  $90^\circ \pm 27^\circ$  的范围,即要求控制试品开关在外施电压峰值发生预燃弧击穿,随后引入短路关合电流。笔者研究的测控系统采取实时跟踪外施电压和短路关合电流的相位的策略,对试品的关合相位和相位容差进行控制。为了验证全电压关合实验系统和电

流源主控开关的控制精度和动作稳定性,在学校高电压试验室作了基本的功能和可靠性验证试验。

图6为TVS在外施电压峰值触发时的试验回路设置和现场实验照片,其中T为220V/10kV升压变压器,L为27μH电感。图7为典型试验结果示波图,图7(a)为TVS触发时延测量结果,其中CH<sub>1</sub>为触发信号,CH<sub>2</sub>为TVS两端施加的电压;图7(b)中CH<sub>1</sub>为TVS的触发信号,CH<sub>2</sub>为TVS两端施加的电压波形,可以看出TVS的导通时延为25μs,且TVS在外施电压波形峰值触发导通,具有较高的控制精度。

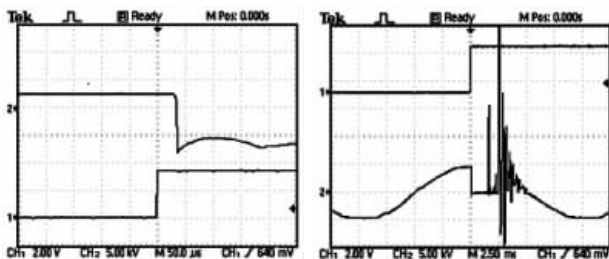


(a) 试验回路设置



(b) 现场实验照片

图6 在交流电压峰值触发时的试验回路和照片



(a) TVS 触发时延测量结果

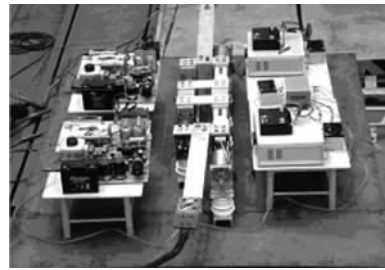
(b) TVS 在外施电压波形峰值触发导通

图7 TVS 在交流电压峰值触时的实验结果

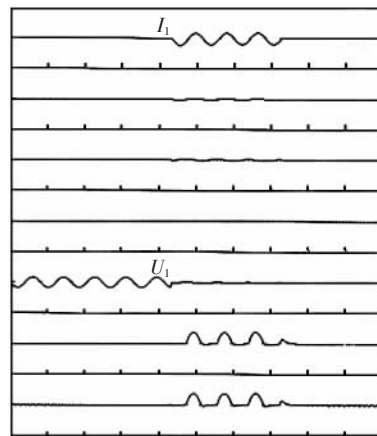
为了进一步对电流源主控开关的通流和耐压性能以及全电压试验测控系统的控制精度展开考核,在我国西安高压电器研究所进行了现场验证试验。图8(a)为由两个基本模块单元构成的电流源主控开关的实物照片;图8(b)所示为典型的试验示波图,其中I<sub>1</sub>为40kA,U<sub>1</sub>为16kV。试验结果表明,笔者提出的电流源主控开关具有较高的通流、耐压能力和触发稳定性。在做具有最大预燃弧关合试验时外施电压与短路关合电流的相位容差典型值在±800μs,满足IEC和国标中规定的±1.5ms容差要求。

### 5 结语

全电压关合试验时,试品开关在外施电压的作



(a) 实物照片



(b) 试验示波图

图8 主控开关和全电压关合试验示波图

用下发生预击穿燃弧,电流源主控开关在满足关合条件的前提下应该尽快触发导通,使试品开关由电压源作用下“无间歇”地转入电流源作用。该研究提出的全电压关合试验回路由真空触发开关与快速旁路开关并联构成电流源主控开关。根据所提出的电流源主控开关和合成关合试验回路,以相控开关技术为基础制定全电压关合试验系统的控制策略。

以外施电压与短路关合电流相位差是否满足90°±27°的范围和是否检测到试品开关中出现预燃弧击穿电流作为短路关合电流是否引入的综合判据,保证试验的有效性、增加试验的成功率。重点介绍了全电压关合试验系统的构成和实现,该系统以美国TI公司生产的TMS320LF2407A数字信号处理器为核心,其强大的数字信号处理能力和丰富的片内资源大大简化了系统软、硬件设计。通过现场试验,对电流源主控开关和全电压关合试验系统的性能进行了验证。试验结果表明,电流源主控开关具有较高的通流、耐压性能及触发可靠性;全电压关合试验系统在强电磁干扰环境下具有很高的控制精度及工作稳定性,在做具有最大预燃弧的关合试验时外施电压与短路关合电流的相位容差典型值在±800μs,满足IEC和国标中规定的±1.5ms容差要求。

### 参考文献:

[1] ALDROVANDI G, BONFANTI I, KUHNHARDT G, et al. New Application of Synthetic Circuit Development in CESI and IPH [C]// CIGRE Session, Paris, 1992: 201. (下转第26页)

(3)建立 EMTP 模型,仿真计算了可控电抗器抑制潜供电流的效果。结果表明,由于容量可以调节,对于不同容量下发生单相接地故障时,对应潜供电流的大小也不同,但均比无高抗时潜供电流要低得多。因而,选择合适的小电抗值,可控电抗器能显著地限制潜供电流,可以采用单相快速自动重合闸。

(5)研究的结论验证了超高压可控电抗器抑制潜供电流的有效性。

**参考文献:**

[1] AL-RAWI A, DEVANEY M. Measurement of Secondary Arc Current in Transmission Lines Employing Single Phase Switching [C]// Proceedings of the IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, 1997: 297-301.

[2] BAN G, PRIKLER L, BANFAI G. Testing EHV Secondary Arcs[J]. Power Tech. Proceedings, 2001, 4(10-13): 6.

[3] 陈亚伦,李志国,伊敏-冯屯 500 kV 同塔双回线路不平衡度感应电流及潜供电流研究[J]. 电网技术, 1995, 19(6): 13-17.

[4] ATMURI S R, THALLAM R S, GERLACH D W, et al. Neutral Reactors on Shunt Compensated EHV Lines[C]// Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference, 1994: 121-128.

[5] 田翠华,陈柏超.可控电抗器在 750 kV 系统中的应用 [J]. 电工技术学报, 2005, 21(1): 31-37.

[6] 周勤勇,郭强,卜广全,等.可控电抗器在我国超/特高压电网中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(7): 1-6.

[7] 周孝信,郭剑波,胡学浩,等.提高交流 500 kV 线路输电能力的实用化技术和措施[J]. 电网技术, 2001, 25(3): 1-6.

[8] 李达义,陈乔夫,贾正春.基于磁通可控的可调电抗器的新原理[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(2): 116-120.

[9] 陈柏超,陈维贤.超高压可控电抗器限压特性及谐波分析[J]. 中国电机工程学报, 1997, 17(2): 122-125.

[10] TAVARES M C, PORTELA C M. Transmission System Parameters Optimization-sensitivity Analysis of Secondary Arc Current and Recovery Voltage[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004(19): 1464-1471.

[11] SHI Wei, LI Fan, HAN Yan-hua, et al. The Effect of Ground Resistance on Secondary Arc Current on an EHV Transmission Line [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005(20): 1502-1506.

[12] 张丽,徐玉琴.并联电抗器在超(特)高压电网中应用及发展[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(4): 75-78.

[13] ДОРОЖКОЛИ. Compare Analysis with Different Structure of Control lable Reactors [J]. Электрическч Естанцич (Power Plant), 1988(4): 19-24.

[14] 清华大学工业自动化系.饱和电抗器原理与设计 [M]. 北京:清华大学出版社,1977.

[15] FENG Gui-hong, WANG Feng-xiang, ZHANG Bing-yi. Modeling and Characteristics of a Novel Magnet Saturation Controllable Reactor[C]// The Fifth International Conference on Power Electronics and Drive System, 2003: 313-315.

[16] 陈柏超.新型可控饱和电抗器理论及应用 [M]. 武汉水利电力大学出版社, 1999.

[17] 刘涤尘,陈柏超,田翠华,等.新型可控电抗器在电网中的应用与选型分析[J]. 电网技术, 1999, 23(2): 52-58.

[18] 陈禾,陈维贤.并联电抗器中性点小电抗的选择 [J]. 高压电压技术, 2002, 28(8): 9-10.

[19] SDJ 161-85. 电力系统设计技术规程[S].

(上接第 21 页)

[2] MANGANARO S, ROVELLI S. A New Circuit for Synthetic Auto-reclosing Test Duties under Short Circuit Condition on High-power Circuit-breakers [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1977, 96(5): 1620-1630.

[3] SHENG B L. Design Consideration of Weil-dobke Synthetic Testing Circuit for the Interrupting Testing of HV AC Circuit Breakers [C]// Power Engineering Society Winter Meeting, IEEE, 2001: 295-299.

[4] 庄稼人,党晓鹰.在最大预燃弧条件下进行合成关合试验的合成关合回路[J]. 高压电器, 1992, 28(3): 14-20.

[5] 范兴明,邹积岩,丛吉远.基于真空触发开关的合成关合试

验回路及其控制策略[J]. 高压电器, 2005, 41(6): 434-437.

[6] FAN Xing-ming, QIU Hong-hui, LIAO Min-fu, et al. Verification of a Fast Making Switch Based on Triggered Vacuum Switch and Vacuum Circuit Breaker [C]// Proceedings 22th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Matsue, Japan, 2006: 240-243.

[7] 范兴明,邹积岩,丛吉远.全电压关合试验控制策略及其实现[J]. 电网技术, 2005, 29(17): 8-13.

[8] VANDER S L, DAMSTRA G C, KEMPEN H W, et al. Synthetic Test Methods: Experiences and Future Developments[C]// CE/SC: 13, Paris, 1992: 13-203.

**简 讯**

**陕西省电工技术学会第四次会员代表大会召开**

陕西省电工技术学会第四次会员代表大会于 2009 年 3 月 20 日在西安市召开。参加会议的有陕西省科协副主席刘亚光、中国电工技术学会高工王天虹、西安交通大学电气工程学院副院长荣命哲、西北电网有限公司副经理李新建、西安电力机械制造公司副总经理裴振江、西安高压电器研究院有限责任公司经理郑军以及来自陕西省电器设备制造、电力建设和运行、大专院校、科研院所等 36 个单位的 85 位代表。

会议由郑军常务副理事长主持,裴振江理事长做了“陕西省电工技术学会第三届理事会工作报告”,元复兴秘书长和姚君瑞副秘书长分别介绍了陕西省电工技术学会换届方案及其说明和“陕西省电工技术学会章程”修改的说明。会议选举产生了陕西省电工技术学会第四届理事会。