

# 相控开关在电网中的应用及关键技术分析

段雄英, 廖敏夫, 丁富华, 邹积岩

(大连理工大学电气工程与应用电子技术系, 辽宁 大连 116023)

Application and Key Technology Analysis of Controlled Switching

DUAN Xiong-ying, LIAO Min-fu, DING Fu-hua, ZOU Ji-yan

(Department of Electric and Electronic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

**摘要:** 电网各类负载的投切操作会引起系统暂态过程并在网内传播,甚至扩大,相控开关技术可以有效地削弱这种暂态过程。首先介绍了选相控制断路器的国内外应用状况与最新动态,然后论述了断路器的机械特性、介质绝缘特性以及控制系统精度等几个关键因素对相控开关技术的影响,并分析了其综合效益与发展趋势,最后探讨了在我国推广相控开关技术的必要性与可行性。

**关键词:** 选相投切; 绝缘强度下降率; 绝缘强度上升率; 机械分散性; 永磁机构真空断路器

中图分类号: TM501; TM561 文献标识码: A

**Abstract:** All switching operations in power system will cause transient process which propagate in network. Phase-control switching technology of circuit breakers has become an increasingly useful method to mitigate the transient process for a range of specific load cases. Firstly, the domestic and oversea application and the latest development of phase-control circuit breaker are introduced. Then several key problems of phase-control switching, including mechanical characteristic, insulation characteristic of dielectric, precision of controller are presented, and its comprehensive benefit and the development trend are also analyzed. Finally, the necessity and feasibility of popularizing phase-control switching technology in our country are discussed.

**Key words:** controlled switching rate of decrease of dielectric strength(RDDS); rate of rise of dielectric strength(RRDS); mechanical scatter; vacuum circuit breaker with permanent magnetic actuator

## 0 引言

电力网是一个动态系统,供需变化与功率平衡问题要求电网各部分能可靠、及时地投入或切除。这些操作可能引起暂态响应并在系统内传播,不仅对断路器本身与用户设备产生危害,还会引起继电

保护装置误动,甚至危及电力系统稳定,这在电能质量要求越来越严格的背景下需引起重视。

相控开关技术又称同步开关技术,从原理上能有效地削弱断路器分合闸时所产生的涌流和过电压,其实质就是根据不同负载(如并联电容器组、架空输电线、空载变压器等)的特性,控制断路器在电压或电流的特定相位角度完成合闸或分闸,实现无冲击的平滑过渡。该技术优于合闸电阻、串联电抗器等传统方法,但其实际动作的准确性与可靠性、使用的经济性一直是争论的焦点,还有待于试验与现场运行的进一步检验。该技术对提高电能质量与断路器电寿命等有重要意义。

相控开关技术抑制涌流和过电压的效果依赖于断路器开合相位的准确度,而这主要受断路器的机械特性、介质绝缘特性以及控制系统精度的影响。笔者首先介绍了国内外选相控制断路器的发展状况与实用效果,进而重点阐述了上述数者之间的关系,并立足于实际,分析了在我国深入研究、推广选相投切技术的必要性与可行性。

## 1 选相控制断路器的发展现状

选相控制断路器并非一个新概念,它最早被提出是在上世纪70年代,限于当时的技术发展水平,并没有成为真正实用的产品。近年来随着断路器制造工艺、现代测控技术的不断提高,日益受到制造部门与用户的关注,成为智能化电器的研究热点。自上世纪九十年代实用化以来,选相控制断路器在欧美市场的使用数量与范围迅速扩大。

### 1.1 国外发展现状

近年来国际大电网会议 CIGRE 工作组 WGA307 多次对选相控制断路器的应用与进展情况进行调查评议,并出版了一系列文献报导<sup>[1-5]</sup>。

收稿日期: 2006-08-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50537010)。

作者简介: 段雄英(1974-),女,副教授,博士,主要研究方向为智能化电器及智能检测技术。

Berneryd (1988), Reid (1998), Jones(2000), Nordin (2002) 与 Fernandez(2002) 等人先后向 CIGRE 提交了选相控制断路器在丹麦、瑞典、英国、澳大利亚、新西兰、巴西等国家应用情况的调查报告<sup>[6-10]</sup>。2005 年, CIGRE 在东京召开, 其中仍然有选相控制断路器专题讨论。

WG A3.07 的调查报告显示: 1984~2001 年选相控制断路器主要分布在 26.4~800 kV 电压等级, 且大多在日本、欧美等发达国家, 10 kV 配电网及 1000 kV 超高压领域鲜有用例。各应用类型所占比例见表 1<sup>[5]</sup>。从表中可以看出, 选相控制断路器以常规领域(参考信号具有周期性)应用为主, 尤以选相投切电容器组应用最多, 这主要是由于电容器组在电网中应用广泛, 操作频繁, 且相对更容易实现选相投切。架空线自动重合闸应用很少, 短路电流选相开断未见实用报道, 这主要是由于相关的非周期、不对称暂态过程使得目标相位难以有效地预测与控制。

表 1 1984~2001 年选相控制断路器应用的调查结果

应用场合(26.4~800 kV)	所占比例(总数 2500 台)/%
电容器组投切	64
电抗器组投切	17
变压器的投入	17
空载架空线关合与自动重合闸	2

文[11]把选相投切电容器组技术应用于功率因数控制系统, 在减少暂态影响的同时也有效地抑制了谐振现象; 文[12]开发了基于选相投切技术的 400 kV 变电站专家系统, 都是很好的用例。其他最新报道: 2003 年, 匈牙利与法国分别实现 132 kV/15 kV/155 MV·A 与 320 kV/13.8 kV/315 MV·A 空载变压器的选相关合<sup>[13-14]</sup>; 2003 年, 加拿大蒙特利尔的 Notre-Dame 电站成功运行 120 kV 等级的背靠背电容器组同步投切装置<sup>[15]</sup>; 日本东京电力公司首次成功地选相切除 500 kV 并联电抗器<sup>[16]</sup>。

目前在选相控制断路器相关产品的研发方面代表性的公司主要有: 瑞士的 ABB 公司(适用于不同工况的 Switchsync 系列产品), 日本的 Mitsubishi 公司(已经开发出 121, 145, 245, 362 与 550 kV 电压等级的产品), 美国的 Joslyn 公司(主要有 15~230 kV 电压等级投切电容器组的 SynchroTeq 系列产品)与法国的 Alstom 公司(RPH2 系列产品)等。

### 1.2 国内发展现状

近年来, 国内一些高等院校与研究机构对于相控开关技术在理论和可行性方面进行了探讨, 也进行了不同程度的开发尝试, 取得了一些阶段性成果<sup>[17-22]</sup>。国产高压、超高压断路器几乎都配用弹簧或液压操动机构, 动作分散性较大, 难以达到选相投切所要求的精度。新型永磁操动机构自 1997 年问世以来, 经过国内很多单位的不断改进, 动作稳定性与

可靠性有了很大提高, 给中低压领域相控投切技术的实现提供了硬件支持, 因此国内可望在配电网领域首先开发出实用产品。

实际应用方面, 国内还是以试点引进为主。1998 年第 1 次为某 500 kV/350 km 空载输电线安装了选相投切装置, 将过电压限制在 2 p.u. 以下; 2000 年长春市某 500/220/66 kV 变电站选相投切 66 kV 电抗器与电容器时把过电压限制在 1.3 p.u. 以下; 2003 年大朝山水电站为了解决 500 kV 系统内部过电压问题, 引进了 ABB 公司的断路器相控合闸装置 (CAT)<sup>[23]</sup>; 2004 年大唐陕西韩城第二发电有限责任公司 I 期工程为了降低涌流、过电压等不良影响, 引进了法国 Alstom 公司的选相投切装置 RPH2<sup>[24]</sup>, 目前均运行良好。

## 2 相控开关技术的关键问题

### 2.1 概述

选相控制断路器投入现场前应通过相关的测试项目, CIGRE 推荐的评估测试内容见表 2。

表 2 CIGRE WG13.07 的评估测试推荐

组成	测试项目	特性/备注
断路器所需型式试验	电气	RDDS <sup>①</sup> , RRDS <sup>②</sup> , 电压零点附近最大关合电压, 无重燃、重击穿的最大燃弧时间
	机械	操作时间分散性, 操作环境的影响, 闲置时间的影响
控制器与传感器的型式试验	性能	分合闸指令同步误差 补偿特征以及自检等
	电磁机械环境	绝缘能力, EMI, 摇摆, 震动, 地震寒冷, 干热, 温度/潮湿等
系统联调测试	相控测试	投切相位分布, 关合电压分布, 分断时无重燃与重击穿的验证

注: RDDS<sup>①</sup>为绝缘强度下降率; RRDS<sup>②</sup>为绝缘强度上升率。

表 2 揭示了选相投切技术的几个关键问题, 下面分别予以阐述分析。

### 2.2 机械特性

理论分析与现场数据均表明选相投切负载要想取得理想效果, 断路器分合闸时间的分散性应限制在 1 ms 以内。因此, 动作时间在合理范围内波动是对选相控制断路器的根本要求。

影响断路器动作时间的因素主要有: 储能方式(如弹簧、液压等), 控制电压, 环境温度, 操作次数, 老化效应, 闲置时间等。目前国外高压选相控制断路器普遍采用弹簧机构或者液压机构, 表 3 是 CIGRE TF13.00.1 调查的断路器操作时间统计结果<sup>[1]</sup>。

从表 3 中可以看出弹簧、液压机构在较宽范围的环境温度  $T_c$  与控制电压  $U_c$  下动作比较稳定, 不过有效储能  $N_s$  与操作次数, 特别是闲置时间的影响较大, 这些因素与动作稳定性之间呈复杂的非线性关系, 尚无法建立通用的数学模型, 还应做进一步的研究与改进。

在高压领域, 国外最新研制出一种数字控制的

表 3 CIGRE TF13.00.1 关于断路器操作时间偏差的统计

断路器类型	SF <sub>6</sub> 断路器操作时间偏差/ms			
	液压		弹簧	
机构类型	分闸	合闸	分闸	合闸
T <sub>c</sub> [-40, +40]	±0.03	±0.07	±0.03	±0.07
U <sub>c</sub> [-15%, +10%]	±0.5	±1.5	±0.5	±0.5
N <sub>s</sub> [-5%, +5%]	±0.5	±2.5	±0.5	±2.5
操作次数	±1.0	±2.5	±1.0	±1.0
闲置时间	-	±10	-	±10

伺服电机驱动操动机构。此外,近期出现的永磁机构特性更适合于选相控制断路器的实现<sup>[25]</sup>,并在向高压领域拓展。

当然,既然是选相操作,断路器必须能够三相独立操动,如果三相共用一套操作机构,则应增加适当的机械延时装置。还应权衡降低机械应力冲击与减小预击穿电压、减少触头电磨损的矛盾,选择适当的分合闸速度,一般以 1 m/s 左右为宜。

### 2.3 RDDS 与选相合闸

断路器合闸过程中,当触头间距小于某临界值而无法耐受外施电压时将发生预击穿现象,从而无法在预期目标相位合闸。假设断路器的合闸速度和间隙的平均电场强度保持不变,则预击穿电压与时间的关系曲线,一般称为关合特性曲线,可简化为一直线,其斜率的绝对值即为触头间隙的绝缘强度下降率(RDDS),是影响关合过程的一个重要参数。由于合闸过程中断口间绝缘强度是有一定的分散性的,所以 RDDS 也有分散性,另外断路器的机械合闸时间分散性也会影响到最终的合闸相位,因此相控关合应考虑断路器的机械分散性与预击穿特性,选择最佳目标合闸相位,控制预击穿发生在外施电压的预设相位,提高操作质量。

以在电压零点附近合闸操作为例说明 RDDS、预击穿与选相关合的关系,原理见图 1。图中斜线即为关合特性曲线,由于合闸过程中断口间绝缘强度是有一定的分散性的,所以关合特性曲线会有一定程度的偏斜,即图 1 中的“绝缘分散性”标示线;又由于断路器的合闸时间分散性,会使得关合特性曲线在时间轴上平行移动,即图 1 中的“机械分散性”标示线。考虑到这些分散性的影响,预击穿时刻概率分布区间如图 1 下方所示。为了能让实际目标合闸相位概率分布更接近于电压零点,一般都是以零点后

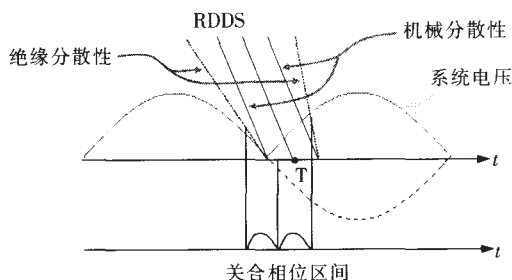


图 1 机械与绝缘分散性对电压零点附近关合相位的影响

某点(如 T)为参考目标相位。

需要说明的是,对在中压配电领域广泛采用的真空断路器,从预击穿的固有特性和概率统计,在合闸过程中的预击穿机会接近等于零,因此相控操作可以不考虑其预击穿的影响,但更高电压等级中则不容忽略。

### 2.4 RRDS 与选相分闸

绝缘强度上升率 RRDS 指的是断路器开断时的断口间耐压水平上升率,其值决定了避免重燃与重击穿的最小燃弧时间。

大量试验表明缩短燃弧时间可以减小电弧释放的能量,从而提高开断能力,并且一定的开断电流对应有一个最佳触头间隙区,即最佳燃弧时间。因此选相分闸的首要目标就是控制断路器的燃弧时间,使得在交流电流过零、电弧自然熄灭时触头间隙能承受系统恢复电压,既防止燃弧时间过短导致的重燃甚至重击穿现象,也防止燃弧时间偏长造成的触头烧损。

设预燃弧时间为  $T_{ac}$  (不同的应用场合有不同的最佳预燃弧时间),以在电流零点分断为例,分析机械分散性与 RRDS 对选相分闸的影响,原理见图 2。

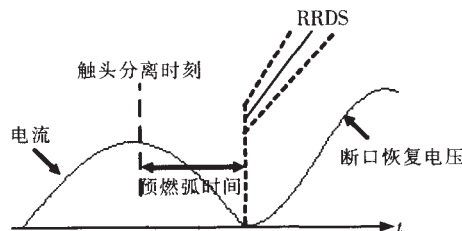


图 2 机械与绝缘分散性对电流零点分断分闸的影响

断路器的开断能力与间隙介质恢复强度及电弧形态综合效应密切相关,电弧熄灭与否取决于介质恢复和电压恢复的动态“竞赛”过程。只要介质恢复强度始终高于断口恢复电压则电弧成功熄灭。

### 2.5 控制系统及其可靠性

高压和大电流信号应能精确可靠地转换成 1~5 V 或者 4~20 mA 的弱电信号,这对电压互感器、电流互感器的相位漂移、幅值偏差、铁心饱和等特性提出了较高要求。此外还应考虑到传输电缆、辅助变压器等因素对进入 A/D 通道的模拟信号的影响。选相控制断路器的可靠性由断路器与控制装置共同决定。虽然各类电子产品功能与精度都有了大幅提高,运行速度也已不是问题,但现场运行表明控制器仍不如断路器本体可靠,是故障的主要原因。目前光缆、光电隔离器件、屏蔽技术、输入输出通道隔离技术的发展,使得控制系统基本能够承受现场恶劣的电磁环境影响。

断路器开合相位的准确度是选相投切技术应用

成败的关键,操动精度要达到微秒量级。只有正确地检测到参考零点,后续算法才有保障。控制系统应能跟踪断路器动作时间的变化,并采用自适应控制补偿由于环境温度、控制电压、触头烧蚀、累积运行次数等引起的操作时间的变化。自适应控制的目的就是能够检测误差并对下一次操作进行修正。此外还应能自检、异常报警、故障保护,能承受严格的电磁兼容试验。软件方面采取指令冗余、软件陷阱、看门狗等有效的抗干扰技术。尽量采用数字技术提高抗干扰性,如 FIR 数字滤波器提取参考零点等较传统模拟方法有更好的抗干扰性。

### 3 综合效益分析

以加拿大 Notre-dame 电站为例,表 4 是合闸电阻与选相投切设备的经济性、操作效果比较结果统计<sup>[15]</sup>。可以看出仅从成本上选相投切技术较常规方法就节省 30%以上,并且更有效地抑制了重击穿现象。

表 4 Notre-dame 电站经济效益比较分析

类别	合闸电阻/p.u.	选相投切/p.u.
资金总额	1.3	1.0
维修费用	1.6	1.0
无重击穿特性	-	++

在电力系统现有设备基础上,并不需要大规模追加投资。现有断路器有一部分只要做某种程度的修改就能进行选相操作。高性能微处理器的价格越来越低,前期保护装置已经提供了相关的控制、检测电路,只要再增加少量必需的硬件设备,对软件算法进行相应更新即可,操作简便,经济效益显著。

其次,选相投切技术可以提高电能质量与电力系统稳定性,减弱对用户设备的冲击,简化继电保护装置。当然,为了防备偶发故障,一些后备保护(如 ZnO 避雷器)措施还是必要的。

此外,选相投切技术还能改善断路器运行条件,降低灭弧室内部及周围的温度和电位梯度,减轻断路器部件机械应力与触头烧蚀,延长易损件的电寿命和维修周期,提高断路器额定关合/开断能力,降低超高压系统的绝缘水平等。

### 4 发展前景与几点建议

如前所述,选相控制断路器以欧美为主在国际上已经有了一定规模与较长时间的研究与实际应用,国内关注程度与实践力度仍显不足。选相控制断路器的优越性与显著的经济效益值得我国电力部门在改造旧电网或规划新电网时予以关注与推广。建议先选择技术比较成熟、断路器动作分散性小(如新型永磁机构真空断路器)或额定电压较低(如 10~35 kV 领域)的产品试运行,也可将产品装设于过电压不严重的并有足够过电压抑制措施的地点,加强

交流与合作,通过更多的试验与实践来验证其可行性与经济性。下面是几点建议:

(1) 开发新型断路器。就开关本体而言,应该优化操动机构,减小驱动功率,提高动作精度与稳定性。永磁机构具有结构简单、动作稳定可靠、出力特性与真空断路器匹配良好等优点,可以继续改进完善其分闸出力特性。这样在中压领域就会优先实现选相投切。此外,也可以寄希望于发展大功率电力电子技术(如大功率二极管与 IGBT 等),这种“无燃弧”开关方式可以减小基于“电弧等离子体”的传统断路器的机械复杂性及操作功。

(2) 加快理论研究。控制系统硬件已不再是限制因素,不过在系统仿真、数学建模及控制算法等软件方面还需要进一步完善。目前遗传算法、神经网络与模糊推理等现代智能控制技术发展迅速,应用领域不断延伸,在电力系统相关领域已经取得不少成果。继续深入研究电弧各个过程的本质,找到最佳燃弧区间。

(3) 延伸应用领域。随着数字信号处理技术与微电子技术的发展以及对于电力系统与断路器的潜在诱惑,选相控制断路器用于架空线自动重合闸和开断短路电流也引起人们的关注。瑞典等研究所已经做了充分的调研与前期工作,但还应在多相故障类型识别与控制、短路电流测量饱和影响与控制等方面进行深入研究。

(4) 制定相关标准。现有高压交流断路器国际标准 IEC 62271-100 与 ANSI C37.06 都是针对非同步断路器的,不包括选相控制断路器的特殊设计与测试要求;CIGRE 虽曾推荐过评估测试步骤与程序,但尚不够完善,因此有必要为选相控制断路器制定一个专门的工业标准。

### 5 结语

选相投切技术能有效地抑制涌流和过电压等暂态过程,可以单独或与合闸电阻等常规方法配合使用,已在不同领域获得越来越广泛的应用。选相投切效果主要受断路器的机械特性、介质绝缘特性及控制系统精度的影响,目前还不足以确定其长期性能与可靠性,但其潜在价值与发展前景是无庸置疑的。相对而言,国内相关研究与应用规模还不够,但可以从中低压领域动作分散性小的永磁机构真空断路器加以突破与推广。此外,选相投切技术还有很大的拓展空间,如发展新型断路器、开断短路电流等。

### 参考文献:

- [1] CIGRÉ Task Force 13.00.1 of Study Committee 13. Controlled Switching-a State-of-the-art Survey (Part1/Part2). Electra No. 162/164[R]. Paris: CIGRÉ, 1996.

- [2] CIGRÉ Working Group 13.07. Controlled Switching of HVAC Circuit Breakers: Guide for Application Lines, Reactors, Capacitors, Transformers (1st Part/2nd Part). Electra No 183/185[R]. Paris: CIGRÉ, 1999.
- [3] CIGRÉ Working Group A3.07. Controlled Switching of HV AC Circuit Breakers: Guidance for Further Applications Including Unloaded Transformer Switching, Load and Fault Interruption and Circuit-breaker uprating [R]. Paris: CIGRÉ, 2004.
- [4] CIGRÉ Working Group A3.07. Controlled Switching of HVAC Circuit Breakers: Benefits & Economic Aspects [R]. Paris: CIGRÉ, 2004.
- [5] CIGRÉ Working Group A3.07. Controlled Switching: Non-conventional Applications. Electra No 214 [R]. Paris: CIGRÉ, 2004.
- [6] Berneryd S, Andersen E, Lindahl S. Synchronous Energizing of Shunt Reactors and Shunt Capacitors [C]// Paris: CIGRÉ, 1988: 13-22.
- [7] Reid J F, Tong Y K, Waldron M A. Controlled Switching Issues and the National Grid Company's Experiences of Switching Shunt Capacitor Banks and Shunt Reactors [C]// Paris: CIGRÉ, 1998: 13-112.
- [8] Jones S, Gardner K, Brennan G. Switchgear Issues in de-regulated Electricity Industries in Australia and New Zealand [C]// Paris: CIGRÉ, 2000: 13-102.
- [9] Nordin R, Holm A, Norberg P. Ten Years of Experience with Controlled Circuit Breaker Switching in the Swedish Regional Network [C]// Paris: CIGRÉ, 2002: 13-204.
- [10] Fernandez P C, Esmeraldo P C V, Fihlo J A, et al. Use of Controlled Switching Systems in Power System to Mitigate Switching Transients. Trends and Benefits-brazilian Experience [C]// Paris: CIGRÉ, 2002: 13-207.
- [11] Tinggren R, Yi Hu, Le Tang, et al. Power Factor Controller -an Integrated Power Quality Device [J]. IEEE Transmission and Distribution Conference, 1999(2): 572-578.
- [12] Cipcigan L, Chindris M, Smith K S, et al. Expert System for Voltage Control and Synchronised Switching Command in a 400 kV Power Substation [C]// Power Tech Proceedings, 2001: 10-13.
- [13] Laszlo P, Gyorgy B, Gabor B, et al. Reducing the Magnetizing Inrush Current by Means of Controlled Energization and De-energization of Large Power Transformers [C]// International Conference on Power Systems Transients, New Orleans, USA, 2003.
- [14] Portales E, Bui-van Q. New Control Strategy of Inrush Transient During Transformer Energization at Toulustouc Hydropower Plant Using Double-break 330 kV Circuit Breaker [C]// International Conference on Power Systems Transients, New Orleans, USA, 2003: 1-6.
- [15] Filion Y, Isbister R, Coutu A. Experience with Controlled Switching Systems (CSS) Used for Shunt Capacitor Banks: Planning, Studies and Testing Accordingly with CIGRE A3-07 Working Group Guidelines [C]// IEEE PES International Symposium Quality and Security of Electric Power Delivery Systems, 2003(8): 80-85.
- [16] Kobayashi T, Tsukao S, Ohno I, et al. Application of Controlled Switching to 500 kV Shunt Reactor Current Interruption [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2003, 18(4): 480-486.
- [17] 段雄英, 邹积岩, 顾丕冀, 等. 相控真空断路器同步关合电容器组的研究 [J]. 高压电器, 2003, 39(4): 28-30.
- [18] 方春恩, 段雄英, 邹积岩. 基于自适应神经元的短路电流参数提取 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(8): 115-118.
- [19] 丁富华, 邹积岩, 方春恩, 等. 相控真空断路器投切空载变压器的应用研究 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(3): 89-93.
- [20] 丁富华, 段雄英, 邹积岩. 基于同步真空断路器的智能无功补偿装置 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(6): 30-35.
- [21] 丁富华, 邹积岩, 段雄英, 等. 采用数字信号处理器的永磁机构同步控制系统 [J]. 电网技术, 2005, 29(19): 39-42.
- [22] 丁富华, 邹积岩, 段雄英. 相控开关的最佳投切相位研究 [J]. 高压电器, 2005, 41(6): 408-411.
- [23] 何善庆. 采用断路器同步合闸装置解决大朝山 500 kV 系统内过电压问题 [J]. 高压电器, 2003, 39(5): 78-80.
- [24] 程战斌. 法国阿尔斯通公司的 Point-on-Wave Controller [J]. 西北电力技术, 2004, 32(6): 42-45.
- [25] ZOU Ji-yan, DUAN Xiong-ying, DONG En-yuan. Permanent Magnetic Actuator and Electronic Drive for Vacuum Switches [C]// Proc. 5th Inter. Conf. on Elec. Machines and Systems, 2001: 1323-1326.

(上接第 108 页)

## 4 结论

(1) 结合特高压等级电器产品标准绝缘水平分析了西高所高电压试验室目前实施特高压电器产品绝缘试验及相关试验的能力。

(2) 探讨了五个难度较大的试验项目: 联合电压试验、隔离开关开合容性(感性)小电流试验、换流阀单阀的冲击试验、套管的介质损耗及电容量测量试验、套管的局部放电测量试验, 阐述了各个项目试验中的难度所在及应注意的问题。

## 参考文献:

[1] 1000 kV 系统用交流 SF<sub>6</sub> 断路器技术规范 [Z]. 国家电网公司,

2005.

- [2] 1000 kV 系统用气体绝缘金属封闭开关设备技术规范 [Z]. 国家电网公司, 2005.
- [3] 1000 kV 系统用隔离开关技术规范 [Z]. 国家电网公司, 2005.
- [4] 1000 kV 系统用交流户外棒形支柱绝缘子技术规范 [Z]. 国家电网公司, 2005.
- [5] 1000 kV 系统用交流高压套管技术规范 [Z]. 国家电网公司, 2005.
- [6] 1000 kV 系统用 SF<sub>6</sub> 电流互感器技术规范 [Z]. 国家电网公司, 2005.
- [7] 1000 kV 系统用金属氧化物避雷器技术规范 [Z]. 国家电网公司, 2005.
- [8] GB 7354. 局部放电测量 [S]. 2003.