

同步关合控制技术的研究及工程应用

张 浩, 郑宇宏, 王 娜

(新东北电气集团高压开关有限公司, 沈阳 110025)

摘要: 同步关合技术能够从根本上抑制断路器随机关合电力设备时产生的涌流和过电压, 因此, 该技术的应用研究, 对提高电力系统稳定性具有重要意义。笔者在国外相关资料的基础上, 通过对断路器在额定工作条件下, 控制电压变化, 操作压力变化, 环境温度变化, 停机时间的不同以及闭锁 SF₆ 气体压力等工况下的机械特性数据整理、分析, 为同步关合控制器提供补偿数据, 并进行了自适应和给定补偿两种模式下的空载验证试验。最后, 介绍了在工程中的成功应用, 取得了该技术应用初步结论, 为日后广泛应用提供技术和经验保障。

关键词: 同步关合技术; 自适应; 断路器

中图分类号: TM561

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2014)05-0076-05

Investigation into Synchronized Closing Control Technology for Circuit Breaker

ZHANG Hao, ZHENG Yuhong, WANG Na

(New Northeast Electric Group High Voltage Switchgear Co., Ltd., Shenyang 110025, China)

Abstract: The synchronized closing control technology can completely restrain the surge and overvoltage generated by a circuit breaker randomly closing a power equipment. So it is very important for the stability of transmission and distribution system. The authors analyzed relevant foreign literatures, and collected the data of circuit breakers' mechanical performances depending on control of voltage, stored spring energy, temperature, idle time, and SF₆ gas blocking pressure, in order to provide compensatory data for the synchronized closing control of the circuit breaker. A no-load test was conducted under two modes of adaptive compensation and given compensation. In addition, the application of the synchronized closing control technology in engineering is described.

Key words: synchronized closing control technology; adaptive compensation; circuit breaker

0 引言

随着中国经济的快速发展, 人们对电能质量提出了更高要求, 同时在国网大力推行智能化变电站的大趋势下, 也对电力设备操作对电力系统的稳定性的影响提出了更高要求。

电力系统中的断路器在关合电力设备的瞬时, 电压的初相角通常都是随机的和不确定的, 在关合容性或感性负载时, 常常产生幅值很高的涌流和过电压, 可能引起系统保护的误动作, 影响电力系统的稳定性, 从而影响社会生产、生活的电能质量^[1-6]。

虽然传统的引入合闸电阻和避雷器方法可以

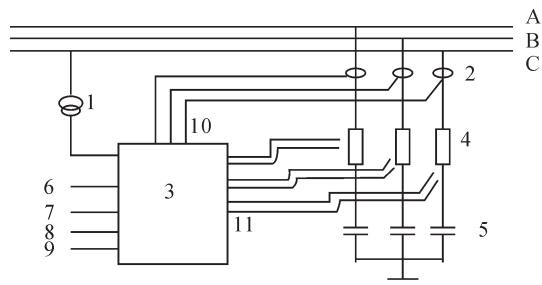
有效地抑制涌流和过电压的幅值, 但是不能从根本上解决其对电力系统的影响^[7-14], 因此于 90 年代末, ABB 提出了同步关合技术作为比较经济的替代合闸电阻和避雷器的解决方案。经过多年来的研究, 该技术得到了快速发展。根据 CIGRE 的调查, 在 2001 年全世界有大约 4 000 套同步关合控制器服务于电网, 其中 67% 应用于电容器组的关合, 18% 应用于电抗器的关合, 14% 应用于空载变压器的关合。在国内该技术主要还是理论层面上的研究, 近年来才逐渐应用于高压领域, 目前有灵宝、锦屏—苏南 550 kV GIS 工程中得到了成功应用^[15]。

为了系统地研究同步关合技术对涌流和过电压的影响, 从 2007 年起, 新东北电气集团高压开关有限公司开始进行同步关合技术应用于断路器的

立项研究。目前,已将该技术成功应用于南方电网公司 500 kV 深圳宝安换流站等多个工程,至今运行情况良好。

1 同步关合控制技术基本原理

同步关合控制器串接于断路器二次分、合闸电气回路中,并通过 PT、CT 随时监视系统的电压、电流波形。当接到主控室分、合闸脉冲指令后,根据系统电压或电流波形,内部进行运算,延时后对断路器分、合闸线圈发出分、合闸指令。使断路器在预先确定的电压(电流)角度三相分别分、合闸^[6]。基本结构见图 1。



1—参考相电压互感器; 2—A、B、C相电流互感器;
3—选相控制器; 4—分相动作断路器; 5—电容器;
6—分闸命令; 7—合闸命令; 8—温度传感器;
9—电压传感器; 10—电流传感器; 11—分、合闸命令输出。

图 1 基本结构图

Fig. 1 Basic structural drawing

技术难点在于预知断路器的分合闸时间的精度,用于准确计算控制器发出分合闸信号的延迟时间。根据相关文献,目前主要采用下述两种补偿模式。

1.1 自适应模式

适用于断路器频繁操作,周围的环境和操作条件没有急剧变化的分合闸时间补偿应用。

自适应原理:假设断路器在上述工作条件下,合闸时间不会发生突变。通过控制器记录最近几次操作时间与设定操作时间的偏差值见式(1),求得偏差的平均值来修正设定的补偿时间,使接下来操作的实际动作点与目标点偏差逐渐减小。

$$T_{n+1-ini} = T_{n-ini} + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_{i-meas} - T_{i-ini}) \quad (1)$$

式(1)中: $T_{n+1-ini}$ 表示下次操作的设定时间; T_{n-ini} 表示最近一次操作的设定时间; T_{i-meas} 表示第*i*次实际操作时间; T_{i-ini} 表示第*i*次操作的设定时间。

1.2 给定补偿模式

给定补偿模式适用于不经常操作的断路器应用。

补偿原理:采用传感器采集周围环境和操作条

件,并已建立各变量与补偿时间的对应关系数据库,通过控制器提取对应的补偿时间,来保证操作的实际动作点与目标点一致。根据文[17-18]可知,分、合闸时间变动量可以与各影响因素的独立函数之和近似等效见式(2)。

$$T_{ini} = T_{std} + \Delta T_{env} + \Delta T_d + \Delta T_y + \Delta T_q + \Delta T_{id} \quad (2)$$

式(2)中: T_{ini} 表示操作的目标设定时间; T_{std} 表示不受其他因素影响的操作时间; ΔT_{env} 表示温度影响的补偿时间; ΔT_d 表示操作电压影响的补偿时间; ΔT_y 表示机构油压影响的补偿时间; ΔT_q 表示 SF₆ 气压影响的补偿时间; ΔT_{id} 表示停机时间影响的补偿时间。

2 数据采集

根据上一节的要求,应用同步关合技术需要采集大量被控制设备空载情况下不同环境和操作条件下的操作时间,需要进行大量的采集和分析工作,下面仅以单个产品的合闸数据为例进行说明。

2.1 试验样机和试验条件

该次数据采集试验采用 LW56-550 罐式断路器单相,配用进口弹簧储能液压操动机构作为试验样机。因受实验室限制没有安装出线套管,见图 2。为了保证采集数据的准确性,选择试验场地为某军工环境实验室,见图 3,提供准确的环境温度条件。

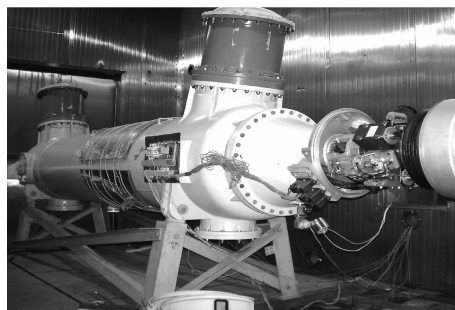


图 2 LW56-550 罐式断路器在实验室布置图

Fig. 2 Arrangement of LW56-550 tank circuit breaker in the lab



图 3 某军工环境实验室全图

Fig. 3 The environmental lab of an army industry

该次数据采集试验需在多个不同试验条件下进行,每次试验条件下仅改变一个影响因素的条件,其他试验条件均按额定试验条件执行。该次试验的额定试验条件为:额定控制电压 220 V,额定油压 44.9 MPa,环境温度 20 °C, SF₆ 气体压力 0.6 MPa。

2.2 额定工作条件下空载机械特性试验

在额定试验条件下,进行 200 次空载分合操作,并记录分合闸时间。

对测得 200 次的样本事件进行分析,合闸时间均值 μ 为

$$\mu = \bar{X} = E(X) = \frac{1}{200} \sum_{i=1}^{200} X_{i0} \quad (3)$$

样本方差为

$$\sigma^2 = S^2 = \frac{1}{200-1} \sum_{i=1}^{200} (X_i - \bar{X})^2 \quad (4)$$

经过式(3)、(4)计算,标准偏差 $\sigma = 0.209$ ms,得到 $3\sigma = 0.209 \times 3 = 0.627$ ms,符合国际大电网会议 CIGRE 中规定允许动作偏差 $3\sigma \leq \pm 1.5$ ms 的要求。说明 LW56-550 罐式断路器具备选相合闸操作的基本条件,并确定 μ 作为标准值。

2.3 不同环境和操作条件下空载机械特性试验

根据相关文献资料可知,断路器机械特性中的分、合闸时间受控制电压、操作油压、环境温度、停机时间和 SF₆ 气体压力等因素的影响^[9]。为了采集数据的完整性,分别对上述影响因素进行单一变量变化对操作时间影响的测试、分析。以下为单一变量变化时的操作时间的变化情况的分析、记录。

2.3.1 额定控制电压变化条件下

在额定控制电压的 80%、85%、93%、100%、110%,其他因素在额定试验条件下,各进行 5 次关合操作,并记录操作时间。

对测得的数据分析可以得到操作时间具有随着控制电压的降低逐渐增加、随着控制电压的升高逐渐减少的趋势,见图 4。

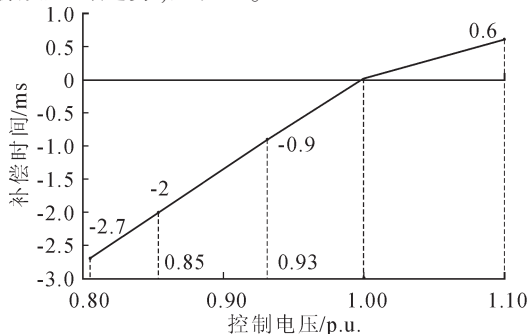


图4 控制电压与补偿时间的对应关系

Fig. 4 Relationship of the control voltage and the compensation time

2.3.2 操作压力变化条件下

通过碟簧压缩量来反映操作压力的变化^[20],在闭锁油压 38.6 MPa 和最高操作油压 44.9 MPa 的范围内平均选取 7 个点作为不同操作压力,其他因素在额定试验条件下,各进行 10 次关合操作,并记录操作时间。

对测得的数据分析可以得到操作时间具有随着油压的降低而逐渐增加的趋势,见图 5。

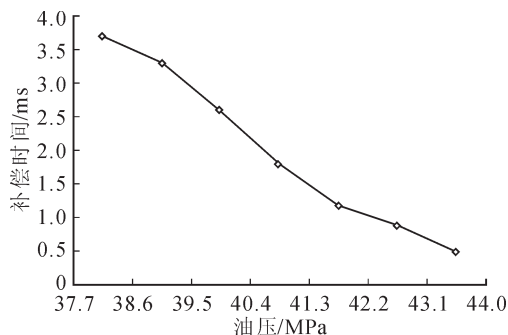


图5 控制压力与补偿时间的对应关系

Fig. 5 Relationship of the stored spring energy and the compensation time

2.3.3 不同温度条件下

在-35~+40 °C范围内,其他因素在额定试验条件下,按照温度每间隔 5 °C各进行 7 次关合操作,并记录环境温度和操作时间。

因 0.6 MPa 的 SF₆ 气体在-25 °C时会发生液化,因此在该温度时投入 2 250 W 伴热带加热等效现场实际工况。

对测得数据进行分析可得到变化趋势,温度低于 20 °C时操作时间会随着温度的降低而增加,低于-25 °C由于伴热带的加热使操作时间逐渐减小,高于 30 °C时操作时间随温度的提高而增加,见图 6。

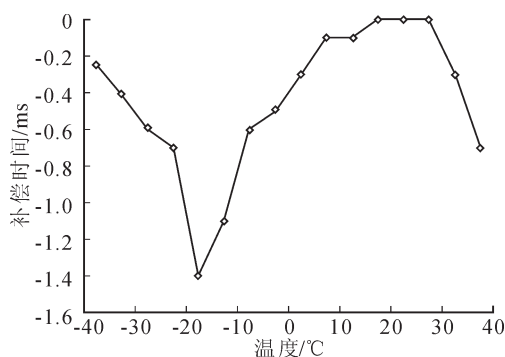


图6 温度与补偿时间的对应关系

Fig. 6 Relationship of the temperature and the compensation time

经分析认为,由于温度变化会对本体摩擦力和阻力产生相反的影响见图 7,并且上述两种力的变化也并不是线性变化,主要取决于在该温度时

哪种变化占主导地位。因此,造成操作时间的阶段性变化。

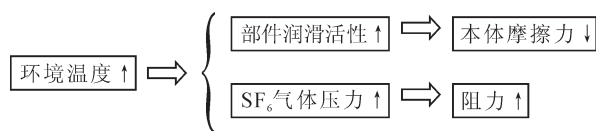


图7 温度变化对摩擦力、阻力的影响

Fig. 7 Influence of the temperature to the friction force and the resistance

2.3.4 不同停机时间条件下

在额定试验条件下,停机时间按1、2、4、8、16、32、64 h时间间隔每种状态下进行5次操作,并记录环境温度和操作时间。

对测得的数据分析可以得到操作时间具有随着停机时间的增加而逐渐增加的趋势,见图8。

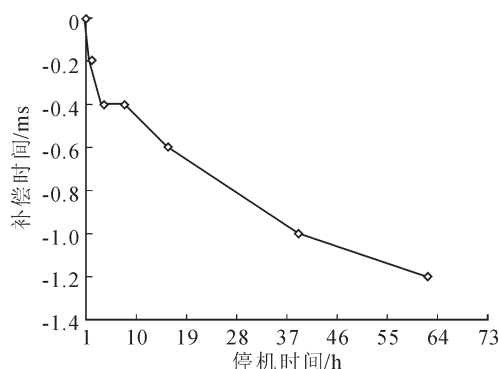


图8 停机时间与补偿时间的对应关系

Fig. 8 Relationship of the idle time and the compensation time

2.3.5 在闭锁 SF₆ 气体压力下

在断路器 SF₆ 气体压力 0.5 MPa(表压)状态下,其他因素在额定试验条件下,分别进行5次操作,并记录操作时间。

通过与 0.6 MPa 时的合闸时间对比,最大补偿时间为 0.897 ms。

3 验证试验

在对上述数据的收集、分析的基础上,并进行了断路器与同步关合控制器的配合验证试验。验证试验分别在自适应模式和给定补偿模式下进行。

该验证试验的判定准则选取模拟断路器关合电容器组的操作。以断路器关合到电压零点附近为合格判据。

3.1 给定补偿模式试验验证

将上述得到的补偿数据录入同步关合控制器,并在几种条件下组合试验:分别在-10、+10℃时单独对温度进行补偿;再在-10、+10℃时,控制电压设

置为 200 V 时,对温度和控制电压进行综合补偿,在每种状态下进行两次分、合闸操作。

通过实测数据分析,同步关合控制器根据外部条件的变化对于断路器的合闸时间均进行了补偿动作。同时均能使断路器关合到系统电压零点(与理想值的最大偏差为 0.8 ms),因此,可以认为同步关合技术在电力系统中的应用具备了必要基础条件。

3.2 自适应模式试验验证

试验顺序按表1中进行,评价准则如下:

1) No1 根据额定合闸时间(指额定电压、额定油压下的合闸时间),调整同步关合控制器的时间设置。使最后3次合闸操作,断路器均在电压零点合闸(允差范围 ± 1 ms);最后3次合闸操作期间不允许调整同步关合控制器的时间设置。

No2、No3、No4、No5、No6 按表1依次进行合闸操作,使每个方式的最后2次合闸操作断路器均在电压零点合闸(允差范围 ± 1 ms),各个方式的合闸操作期间不允许调整同步关合控制器的时间设置。

表1 自适应模式验证试验顺序

Tab. 1 Test sequence of the adaptive compensation pattern

顺序	试验条件	次数	备注
No1	额定电压,额定油压	5次合闸操作	所有合闸脉冲信号均为随机。
No2	最高电压,额定油压	4次合闸操作	
No3	最低电压,额定油压	4次合闸操作	
No4	额定电压,合闸闭锁油压	4次合闸操作	
No5	最高电压,合闸闭锁油压	4次合闸操作	
No6	最低电压,合闸闭锁油压	4次合闸操作	

2)对于以上所有的操作,同步关合控制器的同步延迟时间在 10 ms 之内。

试验结果表明:断路器在电压零点合闸距零点偏差均可满足 $\leq \pm 1$ ms,机械工业高压电器产品质量检测中心(沈阳)对于以上试验进行了试验监督。

4 工程应用

在 550 kV 深圳宝安换流站,ZF15-550 HGIS(见图9)和 PCS9830 选相合、分闸装置配合,进行开合空载变压器操作,应用目的:抑制开合过程中的涌流及过电压,防止变压器保护装置误操作,影响供电质量^[21]。

投运现场共进行了6次关合操作联机调试,同步关合装置进行联机调试见图10。

同步关合控制器选用自适应功能,经过6次调试后,最大的励磁涌流为 700 A,最大的过电压为 486.6 kV,有效地抑制了开合过程中的涌流及过电压,满足用户的工程需要,至今运行情况良好。



图9 ZF15-550 HGIS 现场布置

Fig. 9 Spot arrangement of ZF15-550 HGIS



图10 同步关合装置调试现场

Fig. 10 Debug of the synchronization equipment

5 结语

目前,同步关合技术研究和应用得到了一些初步结论,为该技术在新东北电气集团高压开关有限公司各电压等级的广泛应用做了一个好的开端。随着相关国家标准的日益完善和研究工作的进一步深入,必将为日后提高产品质量,延长产品的使用寿命和降低产品绝缘成本提供可靠的理论依据。

通过该课题的研究,使得参与的技术人员对同步关合技术有了进一步认识,同时积累了大量的现场调试和技术应用经验,能够更好地为电力系统提供更加可靠的电力设备,保证设备运行安全。

参考文献:

- [1] CIGRE WG13.04. Shunt capacitor bank switching-stresses and test methods(1st Part)[J]. Electra, 1999(182):164-189.
- [2] CIGRE WG13.07. Controlled switching of HVAC circuit-breakers-guide for application lines, reactors, capacitors, transformers(1st Part)[J]. Electra, 1999(183):43-47.
- [3] BOEHNE E W, LOW S S. Shunt capacitor energization with vacuum interrupters-A possible source of overvoltage[J]. IEEE Trans. on PAS, 1969, 88(9):1424-1443.
- [4] FROELICH K, HOELZL C, STANEK M, et al. Controlled closing on shunt reactor compensated transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(2):734-740.
- [5] TSIREKIS C D, HATZIARGYRIOU N D, PAPADIAS B C. Synchronized energization of three-phase shunt reactor[J]. WSEAS Transactions on Circuits, 2002(1):27-32.
- [6] ANDERSEN A, BERNERYD S, LINDAHL S. Synchronous energization of shunt reactors and shunt capacitors [C]// Proceedings of 32nd CIGRE Session. [S.l.]: CIGRE, 1988: 13-12.
- [7] CARVAHLO A C, HOFBAUER W, HÖGG P, et al. Controlled switching as a reliable mean to reduce stresses imposed to the circuit-breaker and to the network[Z]. Florianópolis, Brazil: CIGRE SC 13 Colloquium, 1995.
- [8] TSUTADA H. Development of synchronous switching controller for gas circuit breakers[J]. Transactions of the Institute of Electrical Engineers of Japan, 2001, 121-B(7):822-829.
- [9] KOHYAMA, WADA, ITO, et al. Study on controlled closing of 550 kV gas circuit breaker[J]. Transactions of the Institute of Electrical Engineers of Japan, 2001, 121-B(7): 860-866.
- [10] KOHYAMA, ITO, ASAI, et al. Control of switching surge in controlled switching of gas circuit breaker[J]. Transactions of the Institute of Electrical Engineers of Japan, 2004, 124-B(2):267-273.
- [11] PATEL J J, GUPTA M. Controlled switching of capacitor bank-enhancing power quality[C]//Proc. of the 5th International Conference on Switchgear and Controlgear. Hyderabad, India: [s.n.], 2000:13-18.
- [12] ALEXANDER R W. Synchronous closing control for shunt capacitors[J]. IEEE Trans. on PAS, 1985, 104(9):233-238.
- [13] O'LEARY R P, HARNER R H. Evaluation of methods for controlling the overvoltages produced by the energization of a shunt capacitor bank[C]//Proc. of 30th CIGRE Session. Paris: [s.n.], 1988:5-13.
- [14] GRIJP M D, HOPKINS R A, FRANCOCCI E, et al. Controlled switching in the south african power network[Z]. Florianópolis, Brazil: CIGRE SC 13 Colloquium, 1995.
- [15] 吴军辉, 金立军. 选相合闸技术在切合空载线中的应用[J]. 电气开关, 1998(5):33-34.
WU Junhui, JIN Lijun. The application of synchronization control technology in cutting no-load line[J]. Electric Switching, 1998 (5):33-34.
- [16] HOLM A, ALVINSSON R, AKESSON U, et al. Development of controlled switching of reactors, capacitors, transformers and lines[C]//Proc. of the 33rd CIGRE Session. Paris: [s.n.], 1990:13-201.
- [17] ITO H. Factory and field testing of controlled switching systems and their service experience[J]. CIGRE A3-114, 2004(3):456-460.
- [18] TSIREKIS C D, HATZIARGYRIOU N D, PAPADIAS B C. Optimum switching instants calculation for synchronized switching applications[C]//Proc. of the International Conf..

(下转第86页)

- [11] KONIG D, NARAYANA R Y. Partial discharge in electrical apparatus[M]. Berlin, Germany: VDEVERLAG, 1993.
- [12] KUFFEL E, ZAENGL W S, KUFFEL J. High voltage engineering fundamentals[M]. London, Great Britain: Butterworth, 2000.
- [13] ANSI/ICEA standard for partial discharge test procedure [S]. New York, USA: IEEE Power Engineering Society, 2007.
- [14] 万伟江, 王伟, 李成榕, 等. 超高频法在发电机局部放电检测中的应用[J]. 高电压技术, 2004, 30(9): 38-40.
WAN Weijiang, WANG Wei, LI Chengrong, et al. Application of UHF in PD detection in generator[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(9): 38-40.
- [15] 陈宏福, 黄成军, 钱勇, 等. 发电机局部放电评估方法[J]. 高电压技术, 2007, 33(8): 155-159.
CHEN Hongfu, HUANG Chengjun, QIAN Yong, et al. Preliminary investigation of the assessing method for PD in generator[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(8): 155-159.
- [16] 满玉岩, 高文胜, 高凯, 等. 发电机局部放电的统计特征识别[J]. 电工技术学报, 2006, 21(4): 41-45.
MAN Yuyan, GAO Wensheng, GAO Kai, et al. Statistical recognition of discharge patterns in power generator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(4): 41-45.
- [17] 魏燕飞, 曹海翔, 孙旭东, 等. 基于 PEEC 法的发电机定子绕组线棒高频电路模型[J]. 电工电能新技术, 2007, 26(3): 6-10.
WEI Yanfei, CAO Haixiang, SUN Xudong, et al. HF circuit model of generator stator bar based on PEEC[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2007, 26(3): 6-10.
- [18] QIN Shaozhen, BIRLASEKARAN S. The study of PD propagation phenomenon in power network[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(3): 1083-1091.
- [19] VENEZUELA C J. Experiences in identification of partial discharge patterns in large hydrogenerators[C]//IEEE 2006 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition Latin America.[S.l.]: IEEE, 2006: 1-6.
- [20] 李宪栋, 唐新文, 石月春, 等. 发电机局部放电在线监测系统现场应用探讨[J]. 水电能源科学, 2011, 29(10): 150-154.
LI Xiandong, TANG Xinwen, SHI Yuechun, et al. Discuss on site application of generator partial discharge on-line monitoring[J]. Water Resources and Power, 2011, 29(10): 150-154.
- [21] 程养春, 李成榕, 王伟. 发电机局部放电脉冲沿定子绕组传播规律的研究[J]. 电网技术, 2005, 29(8): 65-70.
CHENG Yangchun, LI Chengrong, WANG Wei. Research on propagation rule of partial discharge pulses inside generator along stator windings[J]. Power System Technology, 2005, 29(8): 65-70.
- [22] 李新, 孙才新, 李剑, 等. 从放电能量分布特征量识别 PD 类型的方法[J]. 高电压技术, 2002, 28(11): 26-27.
LI Xin, SUN Caixin, LI Jian, et al. Research on PD pattern recognition based on extracting features from PD energy distribution[J]. High Voltage Engineering, 2002, 28(11): 26-27.
- [23] 王伟, 李成榕, 孟庭荣, 等. 发电机定子局部放电在不同检测频段下的统计特性[J]. 高电压技术, 2002, 28(z1): 3-4.
WANG Wei, LI Chengrong, MENG Tingrong, et al. Study on PD statistic characteristics of generator stator winding insulation under the different frequency domain[J]. High Voltage Engineering, 2002, 28(z1): 3-4.
- [24] 王伟, 李成榕, 孟庭荣, 等. 基于传感器阈值法的局部放电信号自消噪[J]. 高电压技术, 2008, 34(8): 1578-1582.
WANG Wei, LI Chengrong, MENG Tingrong, et al. Method for PD signal self-denoising based on sensor threshold[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(8): 1578-1582.

贾少磊(1970—), 男, 研究生, 高级工程师, 研究方向为机电设备的设计及检测。

(上接第 80 页)

Bursa, Turkey: [s.n.], 2001: 26-31.

- [19] IEC/TR 62271-302:2010 High-voltage switchgear and controlgear-Part302: Alternating current circuit-breaker with intentionally non-simultaneous pole operation[S]. 2010.
- [20] SUGIYAMA K T, HIRANO Y. Development of new hydraulic drive and its application for circuit breaker [C]//1988 National Convention of IEE of Japan. [S.l.]: IEEE, 1988: 1546-1547.
- [21] RAJOTTE R J, CHARPENTIER C, BRAULT S, et al. Field tests of a circuit-breaker synchronous control[J]. IEEE PES Winter Meeting on PWRD, 1995, 13(2): 472-479.
- 张浩(1981—), 男, 工程师, 硕士, 从事高压开关设备的工程设计及新产品研发。
- 郑宇宏(1970—), 男, 高级工程师, 硕士, 从事高压开关设备的研制及管理工作。
- 王娜(1981—), 女, 工程师, 硕士, 从事高压电器设计及高电压绝缘技术的研究工作。