

紧凑型集合式并联电容器试验问题研究

廖一帆¹, 庞美钦², 顾凤彪², 李锐海¹

(1. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广州 510080; 2. 桂林电力电容器有限责任公司, 广西 桂林 541004)

摘要: 笔者针对紧凑型集合式并联电容器的特点, 对YN接线的集合式电容器本体放电试验、温升试验、装置温升试验、放电线圈的误差试验、感应耐压试验和二次端子对地耐压试验等进行分析。通过对放电试验的分析, 提出放电试验应该分相进行, 不能三相并联进行的结论。通过对本体和装置温升试验的分析, 提出了在目前条件下对电容器本体和装置进行温升试验的可行的试验方法。根据试验结果, 得出放电线圈的误差试验应该在其安装在电容器内部后进行, 对于集合式电容器的二次端子, 应该再次进行对地耐受电压试验, 放电线圈的其他试验可以用其安装前的试验来代替。

关键词: 紧凑型集合式并联电容器; 试验; 内置放电线圈

中图分类号: TM531.5

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2014)09-0041-06

Discussion on the Tests for Compact Assembling Shunt Capacitor

LIAO Yifan¹, PANG Meiqin², GU Fengbiao², LI Ruihai¹

(1. CSG Electric Power Research Institute, Guangzhou 510080, China;

2. Guilin Power Capacitor Co., Ltd., Guangxi Guilin 541004, China)

Abstract: According to the characteristics of the compact assembling shunt capacitor, a series of tests are analyzed, including the discharge test of assembling shunt capacitor body with YN connection, the temperature rise test, the device temperature rise test, the discharge coil error test, the induction withstand voltage test, and the withstand voltage test of capacitor's secondary terminal to the ground. Conclusion is drawn from the analysis of the discharge test that the discharge test should be conducted on separate phase instead of on shunted three phases. Through the analyses on the temperature rise test of the assembling shunt capacitor body and the device, a feasible test method is proposed for the present test condition. According to the test results, it is suggested that the error test of discharge coil should be performed after the discharge coil is installed in the capacitor, and the ground withstand voltage test should be conducted once more for the assembling capacitor's secondary terminals, while the rest tests for discharge coil are conducted before its installation.

Key words: compact assembling shunt capacitor; test; built-in discharge coil

0 引言

集合式电容器起源于日本, 中国在 20 世纪 80 年代开始生产和使用^[1], 而对现有集合式并联电容器的重视不够, 在发展和生产集合式电容器的时候, 没有同时去完善和建立必备的试验装备, 造成试验

能力不足, 连一些最基本的试验如端子间耐压试验、放电试验, 出厂时只能用单元的试验替代了事, 要么就干脆不做。

紧凑型集合式并联电容器, 除具备普通集合式并联电容器的所有特征外, 又与普通集合式并联电容器有所不同, 集合式电容器本体的外形扁平, 盖

收稿日期: 2014-05-11; 修回日期: 2014-05-27

基金项目: 特高压工程技术(昆明、广州)国家工程实验室开放基金资助(NEL201313)。

Project Supported by National Engineering Laboratory for Ultra High Voltage Engineering Technology(Kunming, Guangzhou)(NEL201313).

上部分用于安装串联电抗器、隔离开关等,集合式电容器油箱内部安装了放电线圈。

由于紧凑型集合式并联电容器的这些特征,电容器本体的出线套管数量越少越好,在满足正常使用的情况下,采用YN型接线是不可避免的,为了体现紧凑型的特点,在结构上采用放电线圈内置的设计方案。又由于现有对集合式并联电容器的试验项目和试验方法的研究局限于以前集合式并联电容器型式^[2-6],没有涉及紧凑型集合式并联电容器,因此现有标准的试验项目和试验方法不能满足紧凑型集合式并联电容器的试验要求。文中将对涉及10 kV级YN型接线紧凑型集合式并联电容器的一些不同试验方法进行探讨和分析,以满足紧凑型集合式并联电容器的试验要求。

1 电容器本体的试验问题分析

1.1 放电试验

为考核电容器内部质量情况,需对电容器进行放电试验考核。由于YN型紧凑型集合式并联电容器带有内置放电线圈,如果分相进行放电试验,频繁的充、放电试验会导致放电线圈绕组发热。下面就对电容器放电试验时放电线圈绕组发热进行分析,看分相进行放电试验是否可行。

电容器电气联接见图1,简化后的电气原理见图2。

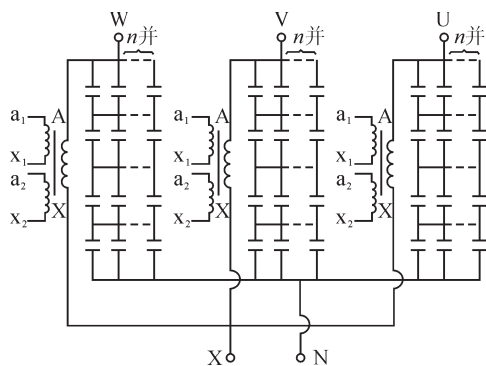


图1 电气原理图

Fig. 1 Electrical principle

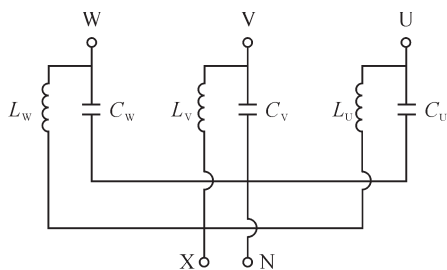


图2 简化后的电气原理图

Fig. 2 Simplified electrical principle

从图2可以看出,YN型接线的电容器,如对W相进行充电,也会通过放电线圈的一次绕组 L_W 、 L_V 和 L_W 、 L_U 对V相、U相进行充电,放电时也通过同样路径进行放电。

根据文[7],对W相进行充电,W相上的充电电压为

$$U_i(t) = U_0(1 - e^{-\frac{t}{RC}}). \quad (1)$$

式(1)中: $U_i(t)$ 为电容上的电压,V; U_0 为充电电压,V; R 为充电回路电阻, Ω ; C 为相电容,F; t 为充电时间,s。

在对W相充电时,通过放电线圈一次绕组 L_W 、 L_V 和 L_W 、 L_U 对V相、U相进行充电,根据文[7],V相、U相的电压和电流为

$$U_i(t) = U_0 - \frac{U_0}{P_2 - P_1} (P_2 e^{-P_1 t} - P_1 e^{-P_2 t}). \quad (2)$$

式(2)中: $p_1 = -\frac{R}{2L} + \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}}$; $p_2 = -\frac{R}{2L} - \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}}$; $U_i(t)$ 为电容上的电压,V; L 为充电回路电感,H。

V相、U相的充电电流为

$$I_i(t) = \frac{U_0}{L(P_2 - P_1)} (e^{-P_1 t} - e^{-P_2 t}). \quad (3)$$

式(3)中, $I_i(t)$ 为充电电流。

以YN型额定电压为 $12/\sqrt{3}$ kV,容量为8 000 kvar产品为例,放电线圈为FDGE (2)-12/ $\sqrt{3}$ -4-1W,放电线圈一次绕组直流电阻约为2.6 k Ω ,根据整流硅堆技术参数,选择串联保护电阻35 k Ω ,采用充电电压20 kV,对W相充电到 $2.5U_N$ 时,V相、U相充电电压也会达到其试验额定值的29.5%。

V相、U相电容上的储能只能通过放电线圈来释放,放电过程使放电线圈产生的温升,根据文[8-9],温升可通过式(4)算出。

$$\Delta\theta = \frac{CU_c^2}{2C_{Cu}m}. \quad (4)$$

式(4)中: $\Delta\theta$ 为温升,K; C_{Cu} 为铜的比热,J/(kg·K); m 为绕组中铜的重量,kg; U_c 为电容器上电压,V。

按放电线圈绕组铜重约为2.6 kg,铜的比热 0.39×10^3 J/(kg·K),电容 C 为176.8 μ F,放电线圈每放一次电,按电压 $2.5 \times 29.5\% U_N$ 产生储能计算与W相连接的放电线圈的温升为2.3 K。充电时也产生同样的温升。由于充放电过程比较短,放电线圈产生的热来不及散出去,热量会累积在一起,一个端

子 5 次充放电后, 温升最高可能达到 23 K, 放电线圈绝缘等级一般为 E 级, 3 个端子都全部进行放电试验, 也不会损坏放电线圈, 因此分相放电试验是可行的。

放电试验除了分相放电试验外, 也有三相并联一起进行放电试验, 试验原理图见图 3。

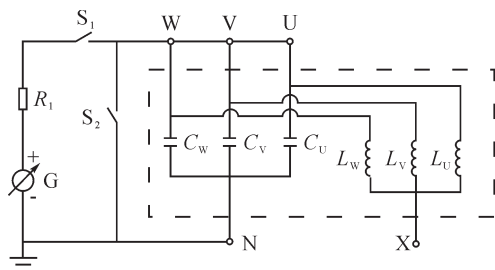


图 3 三相并联在一起进行放电试验原理图

Fig. 3 The three phase shunt together for discharge test principle

从原理图可看出, 充、放电电流都不经过放电线圈的一次绕组, 对放电线圈没有影响。但放电电流从式(5)可知

$$I_c(t) = -\frac{U_c}{R} e^{-\frac{t}{RC}} \quad (5)$$

放电是通过尽量短的路径进行放电, 式(5)中 R 很小, 短路放电的瞬时电流非常大, 因此三相并联一起进行放电试验, 放电电流全部通过中性点套管, 套管需有足够的通流能力才能三相并联一起进行放电试验。根据标准 GB/T 11024.1—2010、GB/T 628—2011、JB/T 7112—2000^[10-12], 电容器短路放电时的冲击电流可能达到 100 倍或更高, 由于集合式电容器的额定容量很大, 这个 100 倍的冲击电流可能会对中性点套管产生不良影响, 因此不建议采用三相并联一起进行放电试验。

1.2 集合式电容器本体的温升试验

根据文[13-14], 温升是电容器的重要指标。进行温升试验, 如有三相试验电源, 直接按标准提供的试验方法进行试验就可以了, 不需要进行过多的分析。但由于集合式电容器的试验条件不够完善, 加上容量一般都比较大, 从 1 000~10 000 kvar, 试验单位也没有如此大容量的三相试验电源, 不具备用三相电源的试验条件, 需要采用单相电源等效进行。下面来讨论采用单相电源进行温升试验的可行性。

采用单相电源进行试验时, 首先让电容器每相承受的电压值和三相试验是所承受的电压值相同, 即让电容器每相无功输出和三相试验时相同, 它的发热量应是相同的。下面对采用单相和三相电源进

行试验的几种方法进行分析。

1.2.1 第 1 种方法

采用单相电源, 把 3 个进线端连在一起, 由于出线端只有 1 个套管“N”, 套管“N”的电流为 3 倍单相电流, 即 1 个套管包括相关的连接线都要承受 3 倍额定电流的作用, 这显然是有问题的, 特别是在电容器容量较大时, 如该次研制的 8 000 kvar 的电容器, 这个电流达到 1 385 A。单个套管显然难以承受这样的电流, 至少发热会比较严重, 因此不建议采用这种试验方法。

1.2.2 第 2 种方法

还是采用单相电源, 在电容器外面并联 1 组电容器 C_s , 让这组电容器的电容等于一相的电容, 见图 4、5 中 C_s 所示。两相先并后串进行试验。试验电压加在两串联段的两端, 施加电压为试验电压的两倍, 即让每相电容器上的试验电压等于采用三相试验电源试验时的电压, 这样每相电容器的发热量就等于按标准试验时的发热量, 完全等效。增加的一组电容应放置远离试验电容器, 防止 C_s 的热辐射影响到试验电容器温升。

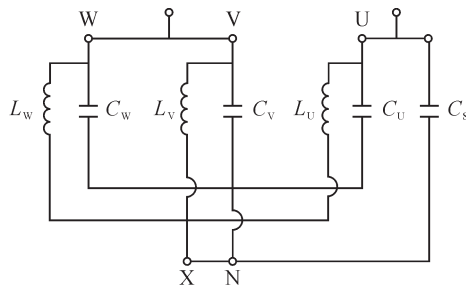


图 4 电气原理图

Fig. 4 Electrical principle

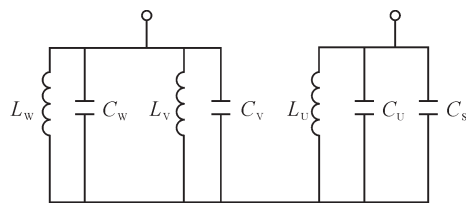


图 5 电气原理图

Fig. 5 Electrical principle

理论分析这个办法是可行的, 实际上这个方法也是可行的。试验结果与计算结果是吻合的。

1.2.3 第 3 种方法

目前仅绍兴试验站具备采用三相电源进行集合式电容器温升试验的条件, 但试验电压只有 $1.0U_N$ 。在这种情况下, 可先在 $1.0U_N$ 电压下测得电容器的温升, 再通过计算得到电容器在 $1.44Q_N$ 下的温升。根据文[15], 电容器温升可按式(6)算出。

$$\Delta\theta' = 0.262q_s^{0.8} \quad (6)$$

式(6)中: $\Delta\theta$ 为电容器外壳表面的温升,K; q_x 为电容器单位表面的热负荷, W/m^2 。

由于电容器在 $1.0U_N \sim 1.2U_N$ 范围内,损耗的变化可忽略不计,同时根据文[16],在环境温度为 $20 \sim 100\text{ }^\circ\text{C}$ 的范围内,空气的导热系数基本不变($20\text{ }^\circ\text{C}$ 时为 0.0259 W/m , $100\text{ }^\circ\text{C}$ 时为 0.031 W/m),根据 $1.0U_N$ 电压下测得电容器的温升通过式(6)计算出 $Q=1.44Q_N$ 下的电容器温升。这个方法应该说也是可行的,但不如方法2的验证来得直观,但在不具备方法2的时候,也可以采用。

1.3 紧凑型集成式电容器装置的温升试验

按规定,电容器装置也应该进行温升试验。但实际上对于电容器装置,目前更不具备试验条件。而且由于串联电抗器等配套件的存在,不可能采用单相电源进行整体试验,这会导致串抗失效,不能模拟使用情况。

为了解决这个问题,经过仔细分析,可以用以下2个方法解决。

1.3.1 方法1

采用三相电源进行,同集合式本体温升试验的第3种试验方法,然后通过等效计算的办法推算电容器装置的等效温升。但由于电抗器部分的热场比较复杂,采用等效计算的方法是不可行的,这个方法只能确定集成式电容器本体的温升,对于上部结构的温升,这个方法很可能是不准确的。

1.3.2 方法2

采用分部等效试验的方法进行。首先根据目前的试验条件,对串抗用三相电源进行温升试验是可行的。因此集合式电容器上部,可以用低压三相电源进行串抗的温升试验,对于集成式电容器本体的温升试验,可以采用本体温升试验中的第2种方法同时进行,这样发热问题与运行时无异,可以用来考验紧凑型集成式电容器装置的温升。

2 放电线圈试验分析

2.1 误差试验

由于放电线圈安装在电容器内部,为了减少返工可能性,放电线圈在安装前需进行相应的试验,包括误差试验。放电线圈装入电容器后是否会导致误差变化呢?这需要通过试验来验证。放电线圈误差试验的测量接线见图6。

对1台额定电压 $12/\sqrt{3}\text{ kV}$,容量 $8\,000\text{ kvar}$ 内部装有放电线圈的电容器进行误差试验,所测误差试验数据见表1。

从表1可以看出,安装前后的误差试验数据存

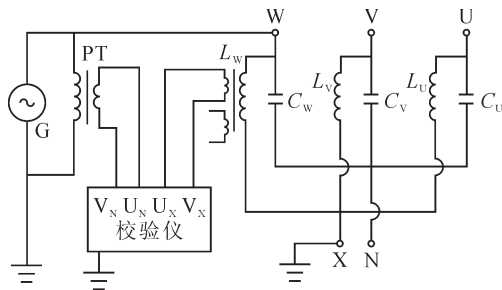


图6 误差试验接线图

Fig. 6 Error test principle

表1 放电线圈安装前后的误差试验数据

Tab. 1 Data error test before and after the installation of discharge coil

测量相	测量绕组	负荷		比值差/%	角差/(')	备注
		a_1X_1	a_2X_2			
U相	a_1X_1	0	0	+0.387	+1.3	安装前
		50	0	-0.326	-4.0	
V相	a_1X_1	0	0	+0.402	+1.1	
		50	0	-0.344	-5.1	
W相	a_1X_1	0	0	+0.381	+1.3	安装后
		50	0	-0.357	-5.4	
U相	a_1X_1	0	0	+0.384	+1.4	
		50	0	-0.399	-4.1	
V相	a_1X_1	0	0	+0.400	+1.4	安装后
		50	0	-0.396	-3.7	
W相	a_1X_1	0	0	+0.389	+1.5	
		50	0	+0.380	-2.6	

在一定的差异:无负荷时基本无变化,随着负荷增加,误差变大,在100%负荷情况下,比值差变小约 $0.03\% \sim 0.07\%$,不能忽略;角差变化最大达到 $2.8'$ 。所以放电线圈安装在电容器内部后,应该进行误差试验,以免影响保护的可靠性。

2.2 感应耐压试验

感应耐压等效电路图见图7,标准DL/T 653—2009^[7]中按要求需施加试验电压为 $2.5U_{IN}$,为防止放电线圈磁饱和出现过流,一般采用工频的整倍频率电压。现假设所用设备的频率为 150 Hz ,电容器对地的杂散电容 C_s 约为 60 nF ,容抗约为 $17\,680\text{ }\Omega$,按 U_{IN} 为 $12/\sqrt{3}\text{ kV}$,杂散电容所消耗的容量达到 $17\text{ kV}\cdot\text{A}$,也就是放电线圈需具备这个容量电压才升得上,而放电线圈的额定容量一般只有 $2\text{ kV}\cdot\text{A}$ 左右,无法升压。除非使用大容量的中频试验设备从放电线圈的高压端施加电压。所以此项试验尽可能在放电线圈装入电容器之前进行。

2.3 二次端子耐压试验及其他试验

当放电线圈安装到集合式电容器内部后,其二

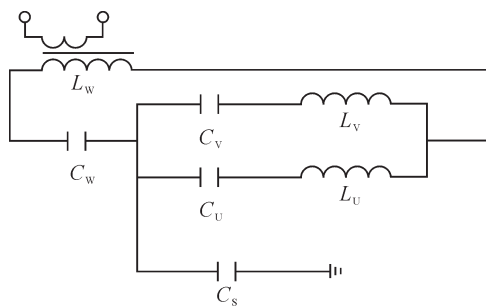


图7 感应耐压等效电路图

Fig. 7 Equivalent circuit of the induction withstand voltage

次端子需要引出到集合式电容器外面, 供保护使用。但从放电线圈的二次端子到集合式电容器外部的二次端子之间还有很长的距离, 需要较长的引线。这个引线对地的绝缘强度也应该满足标准对二次端子的耐压要求, 所以这个试验应对集合式电容器上的二次端子再次进行, 以验证其满足标准规定的 3 kV 耐受电压的要求。试验表明, 这种引出结构可以满足 3 kV 的耐受电压要求。

对于放电线圈的其他试验, 考虑到这些试验不会因安装而发生改变, 而且试验比较困难, 甚至难以进行, 可以用安装前的试验来代替, 不必重复进行。

3 结论

1) 内部装有放电线圈的 YN 接线的紧凑型集合式并联电容器, 其放电试验应该分相进行, 对放电线圈的性能不会产生很大的影响; 不能采用三相并联进行, 这会对中性点出线套管及其引出线产生很大的影响。

2) 集合式电容器的温升试验可以采用单相电源等效进行, 在集合式外部补一相电容器进行陪试, 也可以在 1.0 倍电压下进行温升试验, 通过发热推算集合式电容器在 $1.44Q_N$ 下的温升。

3) 紧凑型集成式电容器装置的温升试验在目前情况下, 只能采用分部进行的方法进行验证, 对于位于集合式电容器上部的电抗器, 采用低压三相电源进行, 同时采用高压单相电源对集合式电容器进行温升试验(补相法)。

4) 放电线圈的误差试验在安装前后有变化, 因此安装在集合式电容器内部的放电线圈应该再进行一次误差试验, 以免影响集成式电容器装置保护的可靠性。

5) 考虑到电容器和放电线圈组合后, 没有办法对放电线圈进行感应电压试验, 感应电压试验应该

在放电线圈安装前进行。

6) 放电线圈的二次端子的耐压试验应该在安装后再次进行, 以考核相关连接线的绝缘是否达到标准规定的要求, 保证二次端子的使用安全。放电线圈的其他试验, 可以用安装前的试验来代替, 不必重复进行。

参考文献:

- [1] 宋 森. 并联电容器装置技术及应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [2] 姚恩祥, 王德茂, 刘全峰, 等. 集合式高电压并联电容器设计探讨[J]. 电力电容器与无功补偿, 2013, 34(4): 30-34. YAO Enxiang, WANG Demao, LIU Quanfeng, et al. Discussion on the design of integrated high voltage shunt capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2013, 34(4): 30-34.
- [3] 丘文千, 周 浩. 并联电容器装置的参数优化[J]. 南方电网技术, 2011, 5(6): 101-105. QIU Wenqian, ZHOU Hao. Optimization of the shunt capacitor device's parameters[J]. Southern Power System Technology, 2011, 5(6): 101-105.
- [4] 谢明华, 王洪朋, 张祝平, 等. 电力电容器用内熔丝有关试验问题探讨[J]. 电力电容器与无功补偿, 2013, 34(4): 40-45. XIE Minghua, WANG Hongpeng, ZHANG Zhuping, et al. Discussion on testing issues of internal fuses used in power capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2013, 34(4): 40-45.
- [5] 曲 雷, 杨小冬, 刘 瑜. 集装箱式 35 kV 直挂 SVG 在电力系统中的应用[J]. 电力电容器与无功补偿, 2012, 33(5): 1-5. QU Lei, YANG Xiaodong, LIU YU. Application of container type 35 kV straight hanging SVG to power system[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2012, 33(5): 1-5.
- [6] 沈文琪. 集合式并联电容器的过负荷能力[J]. 电力电容器, 1997, 18(3): 13-16. SHEN Wenqi. Overload capability of assembling shunt capacitor[J]. Power Capacitor, 1997, 18(3): 13-16.
- [7] 邱关源. 电路[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999.
- [8] 周国良, 金涌涛, 汪 科, 等. 高压并联电容器用放电线圈的温升特性研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2011, 32(1): 45-49. ZHOU Guoliang, JIN Yongtao, WANG Ke, et al. Research on the temperature rise characteristics of discharge coils for HV shunt capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2011, 32(1): 45-49.
- [9] 周国良. 高压并联电容器用放电线圈放电性能试验研究[J]. 浙江电力, 2000(5): 7-10. ZHOU Guoliang. Test and research on characteristics of

- discharge coils for high voltage shunt capacitors[J]. Zhejiang Electric Power, 2000(5):7-10.
- [10] GB/T 11024.1—2010 标称电压 1 000 V 以上交流电力系统用并联电容器[S]. 2010.
- GB/T 11024.1—2010 Power systems having a rated voltage above 1 000 V[S]. 2010.
- [11] DL/T 628—2011 集合式高压并联电容器订货技术条件[S]. 2011.
- DL/T 628—2011 Specification of collective high-voltage shunt capacitor for order[S]. 2011.
- [12] JB/T 7112—2000 集合式高电压并联电容器[S]. 2000.
- JB/T 7112—2000 High voltage shunt capacitor of the assembling type[S]. 2000.
- [13] 黄玲, 黄有祥. 温度对集合式全膜并联电容器使用寿命影响的研究[J]. 电力电容器, 2006, 27(2):35-39.
- HUANG Ling, HUANG Youxiang. Research for influence of temperature on the operation life of assembled all-film shunt capacitor[J]. Power Capacitor, 2006, 27(2):35-39.
- [14] 沈文琪. 温度、电压、谐波、涌流等对电容器寿命的影响[J]. 电力电容器, 2005, 26(2):6-8.
- SHEN Wenqi. Influence of temperature, voltage, harmonic and inrush transient current on power capacitor life expectancy[J]. Power Capacitor, 2005, 26(2):6-8.
- [15] 机械工程手册机电工程手册编辑委员会. 电机工程手册第五卷输变电设备, 变压器[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.
- [16] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [17] DL/T 653—2009 高压并联电容器用放电线圈使用技术条件[S]. 2009.
- DL/T 653—2009 Specification of discharge coils for high voltage shunt capacitor for order[S]. 2009.
- 廖一帆(1987—), 男, 工程师, 从事高电压技术的试验研究工作。
- 庞美钦(1964—), 男, 工程师, 从事电力电容器研究设计工作。
- 顾凤彪(1981—), 男, 助理工程师, 从事高电压试验方面工作。
- 李锐海(1964—), 男, 高级工程师, 从事特高压输电技术方面的研究和管理。

(上接第 40 页)

- [18] 吴大正. 信号与线性系统分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 1986:123-128.
- WU Dazheng. Signal and linear system analysis[M]. Beijing: Higher Education Press, 1986:123-128.
- [19] 马宏忠. 电机学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.
- MA Hongzhong. Electrical machines[M]. Beijing: Higher Education Press, 2009.
- [20] CASADEI D, FILIPPETTI F, ROSSI C, et al. Magnets faults characterization for Permanent magnet synchronous motors [C]/IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines. France: [s.n.], 2009:1-6.
- [21] WIEHAN L R, RONALD G H, THOMAS G, et al. Detecting rotor faults in low power permanent m-agnet synchronous machines[J]. IEEE Transaction on Power Electronics, 2007, 22(1):322-328.
- [22] EBRAHIMI B M, FAIZ J, ROSHTKHARI M J. Static, dynamic, and mixed-eccentricity fault diagnoses in permanent-magnet synchronous motors[J]. IEEE Transaction on Industrial Electronics, 2009, 56(11):4727-4739.
- [23] 李景灿, 廖勇. 考虑饱和及转子磁场谐波的永磁同步电机模型[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(3):60-66.
- LI Jingcan, LIAO Yong. Model of permanent magnetsynchronous motor considering saturation and rotor flux harmonics[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(3):60-66.
- 钟钦(1989—), 男, 硕士, 研究方向为电气设备状态监测与故障诊断、永磁同步电机故障诊断等。
- 马宏忠(1962—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电气设备状态监测与故障诊断、新能源发电等。