

并联电容器组中电容器击穿的特征分析与仿真研究

刘文泽, 蔡泽祥, 冯顺萍

(华南理工大学, 广东 广州 510640)

摘要: 并联电容器组是交流电力系统输电环节的主要无功补偿装置, 在变电站中普遍采用 10 kV 框架式高压并联电力电容器组。实际运行中, 电容器内部元件击穿的故障是电容器组故障比例最高的。以常用的 10 kV 并联电容器为研究对象, 分析了电容器组在运行过程中内部元件击穿一串、二串情况的击穿放电量, 故障相电容器的电压暂态变化量, 并估计了放电电流的峰值。在 EMTP 仿真软件中建立了电容器的击穿模型, 计算并分析了击穿元件的等效电路参数对放电电流峰值的影响; 电阻值越大, 则击穿峰值电流越小, 随着电阻值的增加, 击穿电流峰值下降减缓。最后, 将仿真分析与电容器击穿的故障记录进行对比分析, 验证了理论分析的正确性和仿真的有效性, 为电容器击穿的实时监测和快速定位提供参考。

关键词: 并联电容器组; 电容元件击穿; 放电量; 仿真模型; 放电电流; 故障记录

中图分类号: TM835, TP391

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2009)05-0073-04

Characteristic Analysis and Simulation of Power Capacitor Breakdown in Shunt Capacitor Bank

LIU Wen-ze, CAI Ze-xiang, FENG Shun-ping

(South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Shunt capacitor bank is the major reactive power compensation devices in AC power transmission and distribution system, 10 kV frame type high voltage shunt power capacitor bank is commonly used in substation. During the practical operation, the breakdown fault of capacitor internal component is the highest ratio shunt capacitor bank faults. In this paper, according to the widely using 10 kV shunt capacitor, it is analyzed the breakdown discharge quantity during the first serial and second serial capacitor internal component breakdown in the operating shunt capacitor bank. Also, it is calculated the change of breakdown transient voltage, and estimated the peak value of discharge current. The capacitor component breakdown model is built in the EMTP, therefore, it is analyzed the discharge current peak value influenced by the equivalent circuit parameter of the breakdown model. At the end, the comparison is given between the simulation result and the fault record data of the shunt capacitor bank. It is certified that the correction of the breakdown analysis and validity of breakdown simulation. The analysis result could help the real-time supervision and fast location of the fault capacitor.

Key words: shunt capacitor bank; capacitor component breakdown; discharge quantity; breakdown model; discharge current; fault record

0 引言

随着电力负荷的增长, 交流电力系统输送电能容量也迅速增加, 而电容器作为电力系统中功率因数校正的主要设备, 提高功率因数可有效减小变压器和输电线路的功率损耗, 改善电压变化范围和提高电能质量^[1,2], 其安装数量也大幅增长。我国 110 kV 和 220 kV 变电站普遍使用 10 kV 并联电容器组作为无功补偿装置, 一般每段 10 kV 母线装设 1~4 组电容器组。

现役的绝大部分电力电容器内部电介质由聚丙烯薄膜及绝缘油浸渍剂组成, 全膜电容器是低损耗电容器, 其介质损耗低, 固体介质厚度约 30 μm 。电容元件的工作电场强度高达 66 MV/mm, 是工作电场强度最高的电力设备, 当存在过电压时, 则极容易发生电介质击穿^[3], 电力电容器内部电介质击穿后容易引起电容器故障进一步扩大, 甚至造成电容器组的严重事故。因此, 加强电容器的击穿研究, 有助于深入认识故障发展特征, 为及时发现并防止故障扩大有积极意义。

根据并联电容器组的结构形式, 可分为分体框

收稿日期: 2009-06-01; 修回日期: 2009-08-13

作者简介: 刘文泽(1973), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统测量与控制。

架式和集合式，分体框架式电容器组由于更换损坏电容器方便、散热效果好，在各国电力工业中应用最为普遍。在我国的电力电网所使用的电容器组大部分为分体框架式，这种 10 kV 并联电容器组的常见无功补偿容量有 6、8 Mvar，一般由单台容量为 334 kvar 的多台电力电容器组成，考虑到电容器故障的保护，联接方式大多数采单星形或双星形的中性点不接地接法。单台电容器的额定电流约为 52 A，8 只电容器并联的相电流高达 416 A，当某台电容器发生贯穿性损坏时，其他两相的电容器过电流为额定电流的 $\sqrt{3}$ 倍，为了保护余下完好相的电容器，应快速切除故障电容器，避免故障的扩大^[4]。在实际运行中，电容器组中电容器内部元件击穿的故障占电容器组故障的比例最大，根据某供电企业对其所有电容器组在一年半的故障统计，内部元件击穿的故障占电容器组总故障次数的 51%。

针对电容器内部电容元件的击穿过程，理论分析了击穿过程中电压、电流、放电量和击穿电流峰值等特征量，进而在 EMTP 中建立了电容元件击穿的仿真模型，并选择合适的电路参数进行仿真计算，最后以并联电容器组在线监测装置的故障数据记录为依据，验证了理论分析和仿真计算的正确性，指出了研究结果的应用价值。

1 并联电容器组中电容器击穿的特征分析

1.1 并联电容器组的电气接线

选取典型 220 kV 变电站的电容器组进行研究。电能从变电站 220 kV 侧输送进来，通过三绕组主变压器将电能送往 110 kV 侧和 10 kV 侧。主变压器的型号为 SFSZ-180000/220，联结方式为额定容量 180 MV·A。10 kV 侧每段母线上有 10 回出线和 4 组无功补偿并联电容器组，每组容量为 8 016 kvar，由 24 只电容器接成双星型中性点不接地方式，单组电容器组接入系统的接线见图 1。电容器组自 10 kV 三相母线后，主要以真空断路器 S 之后每相接入的串联电抗器 L_s 、并联电容器 C (F 与 C 表示熔断器与电容器串联的电容器支路，A1~4 表示 A 相编号 1~4 的电容器支路并联，其余类推。)、中性线电流互感器 CT 组成。电容器组主要设备的电路参数见表 1。

1.2 电容器击穿的特征量

高压并联电容器作为无功补偿设备，常常运行于额定容量或以上，电力电容器内部电介质的工作场强很高，电容器的过负荷、内部温度过高及过电压等因素极易导致电容器的电介质击穿^[5]。设 A 相

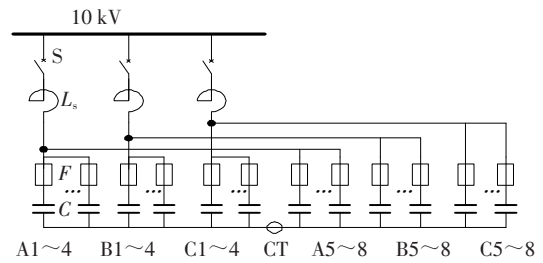


图 1 并联电容器组的接线图

表 1 电容器组主要设备的电路参数

设备名称	型号	参数
串联电抗器	CkSC-480/10-6	$I_c=420$ A, 电抗率 $k=6\%$, $L=2.24$ mH, $R=2.839$ m Ω (单相)
熔断器	BRW-10/79P	$I_n=79$ A, $U_n=10$ kV
并联电容器	BFM11/ $\sqrt{3}$ -334-1W	$C_n=26.36$ μ F, $U_n=11/\sqrt{3}$ kV, $Q_c=334$ kvar, 内部 4 串 12 并

8 只电容器中某一只电容器发生 1 串贯穿性击穿，发生击穿的等效电路见图 2。图 2 中， $C_a=184.8$ μ F，为一相中 7 只并联电容器的等效， $C_g=105.6$ μ F，为一只电容器内部一串电容元件的等效， $C_b=35.2$ μ F，为一只电容器内部 3 串串联电容元件的等效^[6]。

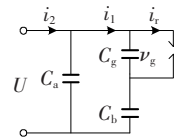


图 2 一相中一只电容器内部一串击穿的等效电路

电容器的内部元件击穿发生在电压最大值附近，即 U 为击穿前瞬间电压，约等于相电压峰值。因此，一串电容元件上击穿电压 v_g 为

$$v_g = \frac{UC_b}{C_g + C_b} \quad (1)$$

计算得 $v_g=2\ 245$ V。击穿后 C_g 上电压迅速降低，电压 v_r 可近似为 0。

C_g 上击穿局部放电量^[6]，根据

$$Q_r = \int_0^\infty i_r dt = (v_g - v_r) \left(C_g + \frac{C_a C_b}{C_a + C_b} \right) \quad (2)$$

计算得 $Q_r=0.303C$ 。

C_g 上击穿局部放电时电极间 (C_a 两端) 的电压变化 ΔU 为

$$\Delta U = \frac{C_b}{C_a + C_b} (v_g - v_r) \quad (3)$$

计算得 $\Delta U=359$ V。

在放电过程中，电容器的电压最大，电容器上的工频电流接近零，可认为 i_1 与 i_r 相等。放电处可等效为电阻，则电容元件击穿的局部放电电流波形近似为双指数尖峰波形，利用等腰三角形近似等效局部放电电流波形，根据公式

$$Q_r = \frac{1}{2} i_m \Delta t \quad (4)$$

可计算放电电流的峰值 i_m , 放电电流峰值与放电时间关系见表 2。

放电时间 Δt /ms	放电电流峰值 i_m /kA
0.2	3.03
0.3	2.02
0.4	1.52
0.5	1.21

2 电容器击穿的 EMTP 仿真计算

2.1 电容器击穿的 EMTP 仿真模型

EMTP 是加拿大 H W Dommel 教授首创的电磁暂态分析软件,它具有分析功能多、元件模型全和运算结果精确等优点,可作为电网稳态和暂态的仿真分析及电力系统谐波分析的有力工具,是世界上广泛使用的电磁暂态分析程序之一。它可以模拟复杂网络和任意结构的控制系统^[7,8]。

仿真参照变电站的实际设备参数及输电线路工况,建立的电容元件击穿仿真模型见图 3。仿真模型中的主要参数设置如下:①U 为电源,电压有效值为 174.8 kV,频率为 50 Hz;②变压器为 YN,yn0,d11 接线的三绕组变压器,变比为 220:115:10.5,变压器额定容量为 180 MV·A,中、低压侧额定容量分别为 180 MV·A 和 90 MV·A,中压侧中性点直接接地;③10 kV 母线电压为 10.5 kV,变电站一段 10 kV 母线上的负荷用 6 条恒定负荷的支路来等效,其中支路的功率因数取 0.9;④考虑电容内部元件的击穿时刻,

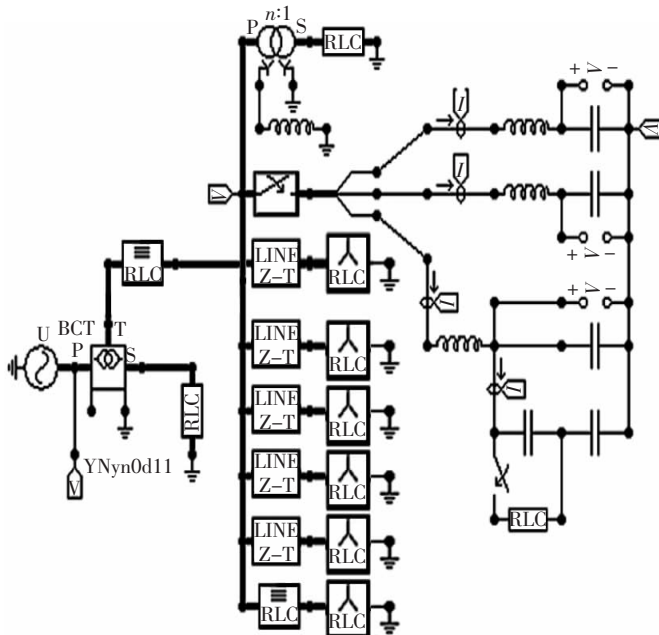
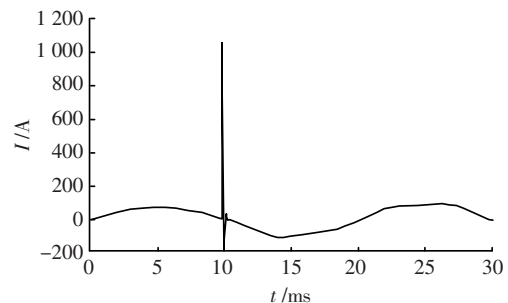


图 3 并联电容器组中电容元件击穿仿真模型

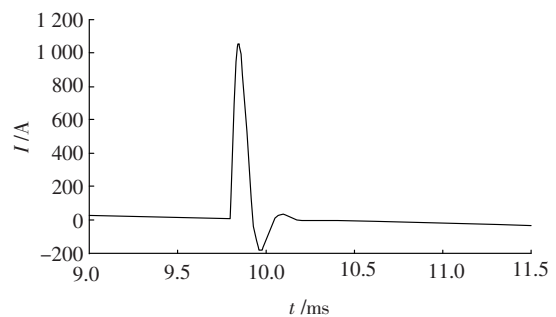
在相电压峰值附近,仿真中设定击穿发生在 9.8 ms。

2.2 电容器击穿一串时的仿真计算

电容器内部的固体介质是仅有几十微米的薄膜,电容器内部电容元件的击穿属于电压击穿^[9,10]。因此,仿真模型对 C 相电容器击穿进行仿真计算,电容元件击穿发生在 C 相承受峰值电压的时刻。由于电容上正弦交流电流的相位超前于电容两端的电压相位 90°,击穿时击穿相的电流近似为 0。在仿真计算中,设定 C 相在 9.8 ms 时,电容两端电压接近相电压峰值,击穿过程模拟为控制开关合上,电容的一串元件击穿处用小电阻及小电感串联支路进行等效。主要观测的量有击穿电容所在支路的电流、三相电容电路的电压与电流。图 4 是击穿过程中击穿电容支路上的电流波形,图 5 是三相电容上的电压波形,图中的电压正峰值波形分别为 B、C、A 相电容器上的,C 相电容上的电压出现快速的电压降落,电压降为 392 V。



(a) 击穿电流波形



(b) 击穿电流放大图

图 4 击穿电容支路上的电流波形

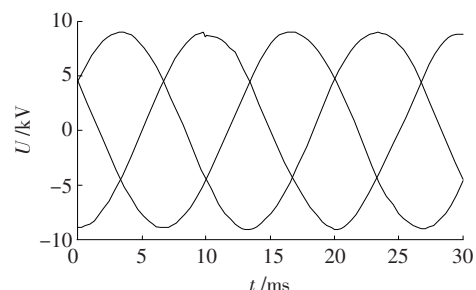


图 5 击穿过程中三相电容上的电压波形

2.3 电容器击穿元件的等效电阻与放电电流的关系

在仿真计算中,击穿放电电流为高频量,考虑外导线及引线的电感,击穿处等效电路的电感取值为 9 μ H,通过改变击穿等效电路的电阻值,可得击穿电容器支路的击穿电流峰值受电阻值影响很大。仿真中,电阻取表 3 中的数值,相对应的击穿电流峰值见表 3。可见,电阻值越大,则击穿电流峰值越小,随着电阻值的增加,击穿电流峰值下降减缓。

表 3 击穿电流峰值与等效电阻值的关系

等效电阻值/ Ω	放电电流峰值 i_m /kA
0.10	1 450
0.15	1 293
0.20	1 164
0.25	1 025
0.30	967
0.35	890
0.40	825

3 仿真结果与监测装置记录的故障数据对比分析

广东某供电局为了监测电容器组的故障过程,在故障频繁的几组电容器组上安装了高压并联电容器在线监测装置,可以及时记录电容器组中多种故障数据,包括各电容器支路上的电流、相电压等数据^[1]。该监测装置的数据采样频率为 10 kHz,能快速记录击穿过程的各种波形。图 6、7 是监测装置记录的 C 相某一电容器内部电容元件击穿的故障录波,电容器内部发生了两次击穿。图 6 为电容器 C_8 电流有效值由 55.2 A 上升到 83.4 A,并联电容器在线监测装置显示其故障并报警,其他各台电容器电流大小没有明显变化,电容器组在此工作状态维持了大约 75 min 后,电容器 C_8 电流有效值再次增大到 134.4 A,其他各台电容器电流大小基本不变,电容器组在这种状态持续约 200 ms 后,从系统中切除电容器组。电容器组故障发生后,经检测,故障电容器 C_8 的电容量变值为 53.6 μ F。由各电容器支路的故障电流记录及故障后检测结果可推知: C_8 第一次电流增大为其内部四串中的一串电容元件击穿的表现,第二次电流增大为其内部余下三串的一串电容元件击穿的表现。此时中性线不平衡保护检测到不平衡电流,约经过保护整定值 220 ms 后,电容器组继电保护动作,使该电容器组的真空断路器在 740 ms 开断电容器组。

从故障波形记录图 8 可见,电容器内部击穿一

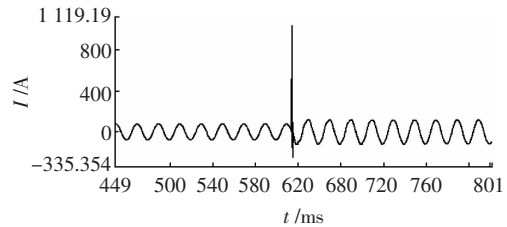


图 6 C_8 电容器内部击穿一串电容元件的电流波形

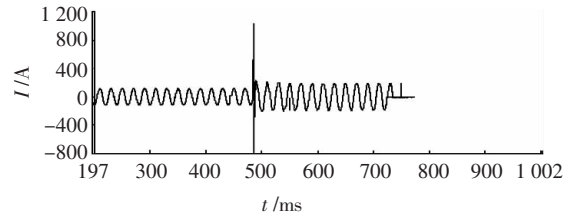


图 7 C_8 电容器内部击穿第二串电容元件的电流波形

串电容元件时,所在电容支路击穿前电流约为 0,随后有一高频放电振荡维持约 2 ms。放电的前沿非常陡,第一峰值达到 1 050 A 左右。在击穿电流峰值、振荡频率、过渡时间方面,前述的理论及仿真分析与故障波形记录非常吻合。

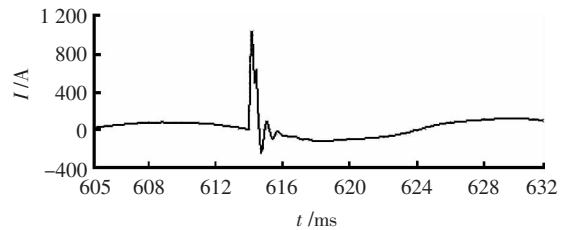


图 8 C_8 击穿一串电容元件的电流波形局部图

4 结论

根据应用广泛的电容器组中全膜电容器为研究对象,对电容器内部元件击穿的电气特征进行了理论分析与仿真计算,得到了击穿时的电压、电流、放电量和击穿电流峰值等特征参数。仿真模型的等效电路在选择合适参数时,与实际电容器运行的故障波形记录很相似,证明了前述的内部元件击穿的理论分析合理,仿真计算正确。深入研究分析电容器的击穿故障特征,可为电容器的实时监测、快速保护、保护定值设置和故障快速定位提供有价值的参考。

参考文献:

- [1] 倪学锋,盛国钊,林浩.我国电力电容器的运行与改进建议[J].电力设备,2004(9):10-13.
- [2] RAMASAMY NATARAJAN.电力电容器[M].徐政,译.北京:机械工业出版社,2007.
- [3] 张星海,张血琴,吴广宁.无功补偿电容器绝缘保护技术的研究

(下转第 79 页)

在公式(2)中, $P(A|B_i)$ 表示干扰源 B_i 出现时微机保护装置发生故障的概率, $P(B_i)$ 表示干扰源 B_i 出现的概率, $P(A|B_i B_j \cdots B_m)$ 表示多个干扰源同时出现时微机保护装置发生故障的概率, $P(B_i B_j \cdots B_m)$ 表示多个干扰源同时出现的概率。

按照上述方法, 求出每一个网格交叉点处微机保护装置发生故障的概率, 然后应用数值拟合的方法预测变电站整体空间的电磁环境。笔者提出的预测与分析变电站中电磁环境的数据挖掘算法, 不仅能够预测变电站中电磁环境的未来趋势, 还能够与电磁兼容分析相结合, 制定改善变电站中电磁环境的电磁干扰抑制措施。改善变电站中的电磁环境应从以下两个方面着手: 抑制电磁干扰源; 切断电磁干扰的耦合途径。

根据贝叶斯公式, 在点 $z(x, y)$ 处微机保护装置发生的故障是由干扰源 B_i 引起的, 概率为

$$P(B_i|A) = \frac{P(A|B_i)P(B_i)}{P(A)} \quad (3)$$

根据公式(3)计算变电站中每一个电磁干扰源在 $z(x, y)$ 处引起微机保护装置发生故障的概率, 然后采取有效措施对概率大的电磁干扰源进行抑制, 同时采取电磁隔离措施切断它们到点 $z(x, y)$ 的主要耦合途径。

在提出的数据挖掘算法中, 耦合途径可以看作是电磁干扰源的属性。按耦合途径划分的样本空间 $X = \{X_1 \cup X_2 \cup X_3 \cup X_4\}$, 根据贝叶斯公式, B_i 通过 $X_j (j=1, 2, 3, 4)$ 耦合到点 $z(x, y)$ 的概率为

$$P(X_j|B_i) = \frac{P(B_i|X_j)P(X_j)}{P(B_i)} \quad (4)$$

式(4)中, $P(X_j|B_i)$ 表示干扰源 B_i 通过耦合路径 X_j 到点 $z(x, y)$ 的概率; $P(B_i)$ 表示干扰源 B_i 出现的概率; $P(X_j)$ 表示耦合路径 X_j 出现的概率; $P(B_i|X_j)$ 表示耦合路径 X_j 出现时, 干扰源 B_i 出现的概率。

根据公式(4)可以计算出干扰源 B_i 通过耦合路径 X_j 耦合到 $z(x, y)$ 处的微机保护装置的概率, 进而分析得出干扰源 B_i 的主要耦合方式, 然后结合电磁干扰源的特点采取科学有效的电磁隔离措施, 从而可以改善变电站的电磁环境。

3 结论

应用数据挖掘技术预测与分析变电站中的电磁环境是可行和有效的。但是, 目前结合数据挖掘算法的变电站中电磁环境的测量工作还没有开展, 只是做了初步的、探索性的研究工作, 实际的验证以及应用于实际问题的发现与解决将是下一步的研究课题。

参考文献:

- [1] 梁志成, 傅静波, 李富同, 等. 微机保护装置的电快速瞬变脉冲群抗扰度研究[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(11): 65-68.
- [2] 肖保明, 王泽忠, 卢斌先, 等. 微机保护装置对开关瞬态干扰的敏感度研究[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(3): 61-64.
- [3] 李清泉, 李彦明, 牛亚民. 变电站开关操作引起的瞬变电磁场及其防护[J]. 高电压技术, 2001, 27(4): 35-37.
- [4] WIGGINS C M, WRIGHT S E. Switching Transient Fields in Substations[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1991, 6(2): 591-600.
- [5] 文武, 贾俊, 阮江军. 电力系统电磁兼容问题综述[J]. 长沙电力学院学报, 2003, 18(3): 42-46.
- [6] 潘祖金, 赵厚奎, 程远国. 数据挖掘技术在军事指挥控制系统中的应用[J]. 应用安全, 2006, 60-61.
- [7] MEHMED KANTARDZIC. 数据挖掘-概念、模型、方法和算法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [8] 邵峰晶, 于忠清. 数据挖掘原理与算法[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
- [9] 区健昌, 林守霖, 吕英华. 电子设备的电磁兼容性设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [10] CLAYTON R PAUL. 电磁兼容导论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.

(上接第76页)

- [1]. 高电压技术, 2005, 31(12): 18-20.
- [4] MARTIN BISHOP, TIM DAY, ARVIND CHAUDHARY. A Primer on Capacitor Bank Protection[J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 2001, 37(4): 1174-1179.
- [5] CYGAN P AND, LAGHARI J R. Models for Insulation Aging under Electrical and Thermal Multistress [J]. IEEE Trans. Dielectrics Electrical Insulation, 1990, 25(5): 923-934.
- [6] 施围, 邱毓昌, 张乔根. 高电压工程基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [7] GREBE T E, GUNTHER E W. Application of the EMTP for Analysis of Utility Capacitor Switching Mitigation Techniques [C]//the 8th ICHQP'98, 1998: 583-589.
- [8] Working Group 3.4.17 of IEEE. Impact of Shunt Capacitor

- Banks on Substation Surge Environment and Surge Arrester Applications[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1996, 11(4): 1798-1806.
- [9] 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(2): 6-8.
- [10] MICHAEL L GASPERI. Life Prediction Modeling of Bus Capacitors in AC Variable Frequency Drives [J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 2005, 41(6): 1430-1435.
- [11] CHANG GW, SHIH M H, CHU S Y. An Efficient Approach for Tracking Transients Generated by Utility Shunt Capacitor Switching[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2006, 21(1): 510-512.