

谐波强度对电容器损耗影响的试验研究

刘书铭^{1,2}, 李琼林^{1,2}, 余晓鹏^{1,2}, 张振安^{1,2}

(1. 河南省电力公司电力科学研究院, 河南 郑州 450052;

2. 国家电网公司电力谐波特性分析评估技术实验室, 河南 郑州 450052)

摘要: 首先简要说明了电容器的损耗计算方法及其谐波耐受能力的判断方法。基于 10 kV 大容量电能质量综合试验平台, 研究谐波强度对电容器的影响。通过串联电抗率不同的电抗器, 使电容器承受不同畸变率、有效值和峰值的电压, 测量电容器容值及介质损耗的变化。试验结果表明: 电容器承受电压的有效值越大, 持续时间越长, 容值减小越多; 电压峰值越高, 谐波电压含量越高, 电容器的容值变化率越大, 老化越快。

关键词: 电容器; 谐波分析; 损耗; 量化分析; 试验; 电能质量

中图分类号: TM 53

文献标识码: B

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.05.027

0 引言

电力电容器作为对电力谐波最为敏感的设备之一, 各类谐波事故已屡见不鲜。据统计由于谐波而损坏的电气设备中, 电容器约占 40%, 而其他损坏的电气设备也有部分与电容器存在很大关系^[1-4]。由于谐波的危害具有隐蔽性和潜在性, 其对电气设备的影响和损伤呈现为一种积累效应, 只有当首次症状或事故发生时才会被注意到。然而, 目前关于谐波对电容器的影响研究主要集中在谐波放大引起电容器事故的机理分析、谐波环境下电容器参数优化设计、电容器投切等方面^[5-10]。谐波对电容器的影响研究尚处于定性分析阶段^[11-12], 关于谐波强度与电容器损耗、寿命之间的对应关系, 谐波对电力电容器影响程度的量化分析等方面的工作尚未有序、全面开展。

国内外关于谐波对电容器损耗及寿命影响的研究较少。文献[13]开展了温度、电压、谐波、涌流等因素对电容器寿命影响的分析, 但主要采用理论计算的方法, 对相关影响因素作了大量简化。文献[14-15]对低压自愈式电容器在室温下进行了老化实验, 研究谐波对金属化膜电容器的影响, 但主要采用信号放大的方法, 试验额定电压仅为 250 V, 远低于电力系统中电容器实际工作电压。波兰学者经过四年半的观测, 研究了介质材料、环境温度、谐波对电容器的影响^[16], 但主要针对矿物油浸纸绝缘的电容器组, 而我国现行的大容量电容器主要采用聚丙烯薄膜和膜纸复合材料为介质, 介质损失和发热已不是主要问题。文献[17]给出了电容器运行 1 a 及 8 a 后, 实测的电容值变化, 但其主要受谐波背景谐波的影响, 而背景谐波含量较低且变化不大。综上所述, 由

于试验手段及系统需求的限制, 传统的电力设备测试往往忽略电能质量问题的影响, 仅仅针对理想工频下的技术指标进行测试, 对于谐波对电容器等电力设备的影响, 缺乏有效的试验研究手段。

本文基于 10 kV 大容量电能质量综合试验平台, 率先开展了谐波强度对电容器损耗影响的试验方法、影响机理量化分析研究, 为电容器制造选型、参数设计、运行管理提供了重要的数据资料。

1 电容器损耗的理论分析

1.1 电容器损耗计算方法

引起电容器发热的损耗功率包括导体损耗和介质损耗两部分^[12-14]。电容器导体损耗主要是引出线、极板和它们之间的接触电阻产生的损耗, 主要引起电容值的变化; 电容器的介质损耗主要包括极化损耗、漏导损耗和局部放电损耗, 用电容器的损耗角 δ 的正切值 $\tan \delta$ 来表示。如将电介质看成由电阻 R 与理想的无损耗电容 C 并联而成的等值电路(如图 1 所示), 此时损耗角正切值、损耗功率可表示为:

$$\tan \delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{U/R}{U\omega C} = \frac{1}{\omega CR} \quad (1)$$

$$P = \frac{U^2}{R} = U^2 \omega C \tan \delta \quad (2)$$

其中, P 为介质损耗的功率; I 为介质中流过的总电流。

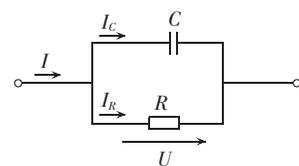


图 1 电力电容器等效电路

Fig.1 Equivalent circuit of power capacitor

可知, 介质损耗功率与外加电压 U 的平方和电源频率 ω 成正比。谐波条件下的电容器介质损耗可表示为:

$$P = Q'_C \tan \delta = Q_C \left[1 + n \sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{U_{Cn}}{U_{C1}} \right)^2 \right] = U_{C1}^2 \omega C \tan \delta + \omega C \tan \delta \sum_{n=2}^{\infty} (n U_{Cn}^2) \quad (3)$$

其中, Q_C 和 Q'_C 分别为正弦条件下和非正弦条件下, 电容器的无功功率损耗。可见, 当电容器组的端电压为非正弦时, 将会在电容器介质中产生附加的有功损耗, 从而产生额外发热, 加剧电容器老化。

1.2 电容器谐波耐受能力

国标规定在额定频率和额定正弦波电压下, 电容器流过电流的有效值不大于 1.3 倍的额定电流。谐波背景下, 不能将该规定简单理解为工频加谐波电流有效值不大于 1.3 倍的额定电流。电容器的过电流受过热条件限制, 谐波条件下, 电容器的 h 次谐波损失 P_{th} 应等值为工频时的损失 P'_{th} , 如下式所示:

$$P_{th} = I_h^2 R_1 (b+1) = I_h^2 R_1 \left(\frac{b}{h} + h^\alpha \right) \quad (4)$$

其中, I_h 为 h 次谐波等值为工频的等温电流; b 为电容器基波介质损失与导体电阻损失比; α 为电阻谐波系数。谐波条件下, 应根据谐波等温电流判断电容器是否超过规定。

国标对电容器过电压的规定为: 如果电容器在不高于 $1.1 U_N$ (U_N 为电容器额定运行电压) 的电压下长期运行, 则包括所有谐波分量在内的电压峰值应不超过 $1.2\sqrt{2} U_N$ 。事实上, 电容器在运行中经常有局部放电存在, 会使电容器的耐压水平降低, 电容器在有谐波的情况下, 比正弦波情况更易发生局部放电。电压波形峰值与各次谐波电压峰值和相位均有关, 而且有很大的随机性, 难以计算, 通常以基波和各次谐波电压的算术和不超过 $1.2U_N$ 作代替计算。

2 电容器谐波损耗试验

2.1 电能质量综合试验平台

为了有效地开展谐波等电能质量问题对电容器影响的定量分析研究, 本文基于国家电网公司电力谐波特性分析评估技术实验室建成的电能质量综合试验研究平台进行试验研究。该平台的额定电压为 10 kV、容量为 1500 kV·A, 可以模拟输出实际电网

各类常见的电能质量现象, 如电压/电流谐波、电压暂升/暂降、电压波动与闪变、三相不平衡等, 为开展电力设备测试和设备性能评价提供了一种新的手段。平台主电路采用了多绕组变压器+全控型变流器+级联型多电平变流器的结构, 由 14 个功率单元级联构成。基本模块采用单相 H 桥结构, 均采用全控型器件, 整流侧采用 PWM 整流, 逆变侧采用级联型多电平结构, 应用单极性倍频 CPS-SPWM 的调制策略。

2.2 试验方法研究

本试验的目的是通过串联不同的电抗器, 使不同组、不同相的电容器承受不同的电压畸变率、电压方均根值、电压峰值, 持续通电一段时间后, 测量电容器容值及介质损耗的变化, 研究其相关性, 分析研究电压方均根值、峰值及波形系数对电容器损耗的影响程度。

试验接线原理图如图 2 所示。为了使电容器两端承受不同的畸变电压, 电容器支路串接串抗率不同的电抗器。实际电力系统中串抗率主要有 1%、4.5%、6% 3 种, 由于 4.5% 与 6% 的串抗率较为接近, 为了使试验结果差别明显, 试验时 2 种电容器支路分别选用串抗率为 1% 和 6% 的电抗器。

试验方法的研究主要基于如下几点进行考虑。

a. 为了避免基波叠加多次谐波, 不容易区分各次谐波具体量化影响程度的情况, 试验采用基波电压叠加单次谐波的方法。

b. 由于实际电力系统主要存在 3、5 次谐波电压, 而采用串抗率为 6% 的电容器支路容易和 5 次谐波发生谐振放大现象, 试验选取 3 次谐波为研究对象。为了避免 3 次谐波零序性的影响, 使 A、B、C 三相输出与 A 相基波电压的相位差分别为 180° 、 -60° 和 60° , 从而保证 3 次谐波能顺利通过电容器。

c. 由于目前没有关于电容器谐波耐久性试验的相关标准, 参照相关加速电容器老化的文献^[1-3], 试验持续时间应不小于 192 h。

d. 为了加快电容器老化速度, 缩短寿命试验时间, 同时又保证电容器安全运行, 参照基波情况下电容器耐久性试验中过电压、过电流的国标要求, 计算

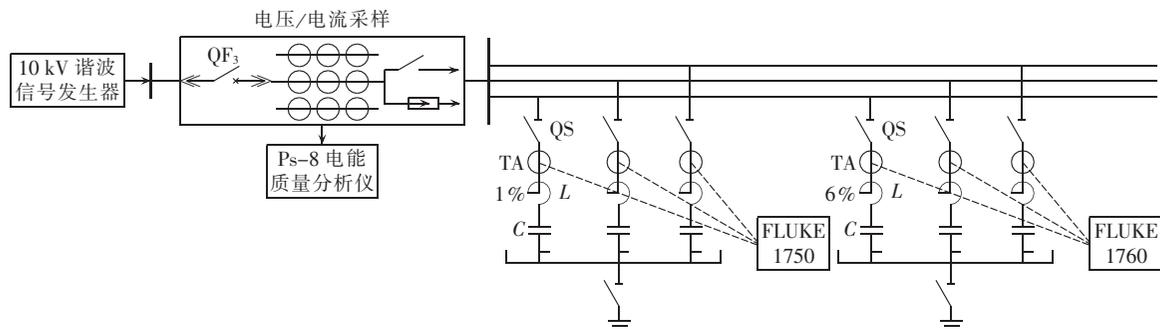


图 2 试验原理接线图

Fig.2 Schematic connection diagram of experiment

得出试验时对电容器施加的谐波电压应不大于 20% 的额定电压。

e. 对比电压幅值、试验时间对电容器的影响程度,考虑试验分 3 个步骤进行;第 1 次试验电压为电容器额定电压加上 15% 的 3 次谐波电压,试验时间

为 192 h;第 2 次试验电压为 1.1 倍电容器额定电压加上 17% 的 3 次谐波电压,试验时间为 192 h;在第 2 次试验的基础上,将试验时间延长 72 h。

试验平台扰动源的具体输出参数及电容器承受的电压情况如表 1 所示。

表 1 10 kV 母线电压背景谐波情况

Tab.1 Background harmonics of 10 kV bus voltage

试验	相别	扰动装置输出			串抗 1% 支路		串抗 6% 支路	
		基波电压/kV	3 次谐波含有率/%	输出相角/(°)	电容器畸变率/%	电容器电压峰值/kV	电容器畸变率/%	电容器电压峰值/kV
第 1 次	A	5.774	15	180	17.17	6.68	32.61	7.580
	B	5.774	15	-60	17.32	8.45	31.89	1.021
	C	5.774	15	60	17.36	8.46	33.95	1.022
第 2 次	A	6.062	17	180	16.88	7.95	31.85	8.810
	B	6.062	17	-60	16.14	9.66	30.37	1.148
	C	6.062	17	60	17.45	9.71	33.03	1.175

2.3 试验数据

试验过程中,采用 AMSB-30A 型多功能全自动高压电容电桥测试仪测量电容器的容值及介损值,用 FLUKE1760 分别记录电容器各支路电流,电容器两端的电压值可通过拟合或者计算得出。2 个电容器支路的电压、电流波形分别如图 3、4 所示,2 次试验所得的电容器容值变化率、介损值、过电压倍数及波形系数分别如表 2、3 所示。

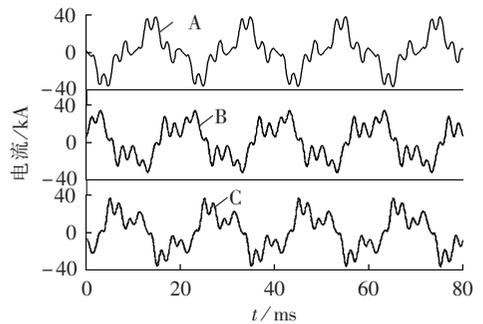
3 试验结果分析

3.1 试验数据有效性分析

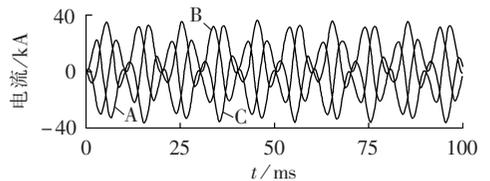
根据表 2、3 的数据可以判断上述试验数据为有效数据,其理由主要有以下几点:

a. 从表 2 数据可以看出,2 组试品电容器的容值变化均为正变化,有一定规律,没有出现或正、或负杂乱无章的变化,这表明了谐波影响的一致性;

b. 串抗率为 6% 的电容器容值变化略大,符合其所承受的谐波状况相对较为严重的情况,表明了谐



(a) 串抗率为 1% 的电容器支路电流



(b) 串抗率为 6% 的电容器支路电流

图 4 电容器支路电流波形

Fig.4 Waveforms of capacitor branch current

表 2 第 1 次试验各组电容器的电压情况

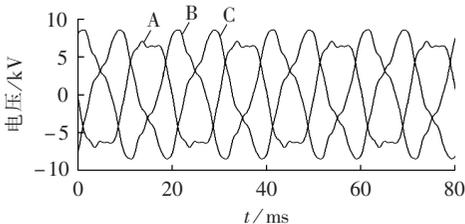
Tab.2 Voltages of different capacitors in experiment No.1

串抗率	相别	电容值/ μF	容值变化率/%	介损值	过电压倍数	波形系数
1%	A	8.076	0.10	3.3×10^{-5}	0.86	1.13
	B	8.038	0.12	2.7×10^{-5}	0.86	1.13
	C	8.058	0.12	1.8×10^{-5}	0.86	1.13
6%	A	8.056	0.14	5.0×10^{-5}	0.94	1.33
	B	8.023	0.15	2.8×10^{-5}	0.95	1.33
	C	8.047	0.15	0.4×10^{-5}	0.94	1.35

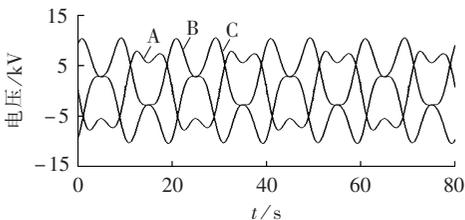
表 3 第 2 次试验各组电容器的电压情况

Tab.3 Voltages of different capacitors in experiment No.2

串抗率	相别	电容值/ μF	容值变化率/%	介损值	过电压倍数	波形系数
1%	A	8.078	0.14	3.1×10^{-5}	0.98	1.13
	B	8.055	0.19	2.8×10^{-5}	0.98	1.13
	C	8.101	0.21	3.4×10^{-5}	0.98	1.14
6%	A	8.060	0.20	1.7×10^{-5}	1.07	1.40
	B	8.040	0.22	2.0×10^{-5}	1.06	1.40
	C	8.078	0.22	2.1×10^{-5}	1.07	1.42



(a) 串抗率为 1% 的电容器支路电压



(b) 串抗率为 6% 的电容器支路电压

图 3 电容器电压波形

Fig.3 Waveforms of capacitor voltage

波严重程度对电容器容值变化的影响;

c. 扰动源输出的 3 次谐波电压与各相基波电压叠加,导致 B、C 两相叠加后的电压峰值高于 A 相, B、C 两相的电容器可能比 A 相电容器受到的影响更大,试验数据也符合上述判断。

3.2 试验数据对比分析

文献[17]给出的电力电容器运行 1 a 后实测的电容器容值变化率,编号 1—8 的电容器对应的容值变化率分别为 0.09%、0.11%、0.11%、0.24%、0.12%、0.08%、0.15%、0.13%。与表 2、3 的数据对比可知,第 2 次试验所得的电容器容值变化率与电容器实际运行 1 a (8760 h) 的容值变化率比较接近,而且电容器容值的变化趋势与现场运行的变化趋势类似。因此可以认为,本试验通过向电容器持续施加畸变程度较大的谐波电压,达到了加速电容器老化的目的。

将 3 次试验所得的电容器容值变化率及介损值进行对比,所得结果如表 4 所示。

表 4 3 次试验电容器容值变化

Tab.4 Capacitance variation of three experiments

串 抗 率	第 1 次试验		第 2 次试验		延长试验	
	容值变 化率/%	介损值	容值变 化率/%	介损值	容值变 化率/%	介损值
1%	0.10	3.3×10^{-5}	0.14	3.1×10^{-5}	0.19	3.4×10^{-5}
	0.12	2.7×10^{-5}	0.19	2.8×10^{-5}	0.27	4.4×10^{-5}
	0.12	1.8×10^{-5}	0.21	3.4×10^{-5}	0.28	2.1×10^{-5}
6%	0.14	5.0×10^{-5}	0.20	1.7×10^{-5}	0.29	0.3×10^{-5}
	0.14	2.8×10^{-5}	0.22	2.0×10^{-5}	0.31	1.6×10^{-5}
	0.15	0.4×10^{-5}	0.22	2.1×10^{-5}	0.29	1.1×10^{-5}

从表 4 可以看出,第 2 次试验 2 组电容器的容值变化率与对应的第 1 次试验容值变化率相比均有提高。同时,第 2 次试验之后进行的延长试验,容值变化率较第 1 次试验变化更为明显。因此,电容器容值受电压有效值影响,且有效值越大,持续时间越长,容值减小越多。

从表 1 可见,串抗率为 1% 的电容器组,A 相峰值最低为 7.95 kV,B、C 相峰值较高,其中 B 相为 9.66 kV,C 相为 9.71 kV,而试验所得电容器容值变化率 B 相为 0.19%,C 相为 0.21%,明显高于 A 相的 0.14%。因此可以认为电压峰值影响电容器容值变化率,峰值越高,变化越明显。

对比表 2、3 数据可以看出,第 2 次试验串抗率为 6% 的电容器组上承受的电压的波形系数达到了 1.4,三相的电压有效值畸变相同,虽然 B、C 相峰值远大于 A 相,但三相最终的容值变化率较为接近。由此可以看出,在电压波形系数较大的情况下,其对电容器容值的影响已经超过了电压峰值的影响。而串抗率为 1% 的电容器组,三相电压波形系数都较小,而 B、C 相峰值大于 A 相,但其容值变化率 B、C 相也明显高于 A 相,即在波形系数较小的情况下,电压峰

值对电容器容值的影响要大于波形系数的影响。因此,可以认为施加在电容器上的电压畸变程度越大,谐波电压含量越高,电容器的容值变化越大,老化越快。

4 结论与展望

目前有关电容器的谐波损耗分析以及电容器对谐波的耐受力方面的研究尚处于定性分析阶段,电容器在谐波条件下的损耗评估标准以及相关试验规程尚未出台。本文首次从定量分析的角度,通过制定详细的试验方案,开展谐波强度对电容器损耗影响的试验分析研究,得出谐波电压峰值、方均根值以及波形畸变程度对电容器损耗的量化影响程度。试验结果表明,电容器在较大谐波电压畸变率情况下连续运行一段时间(192 h)后,所得容值变化率为 0.14%~0.31%,与电容器正常运行 1 a 的电容器容值变化率较为接近,达到了加速电容器老化的目的,为电容器的寿命预估提供了研究思路。

可以预见,后续研究的深入开展,将为电能质量相关标准的修订和完善提供理论和数据支持,并大力提升我国电力设备结构、参数设计以及制造水平。

参考文献:

- [1] 史承逵. 电网电容器组谐波谐振和谐波放大的研究[J]. 电力自动化设备,2001,21(7):36-39.
SHI Chengkui. Study on harmonic resonance and harmonic enlargement of power network capacitor bank[J]. Electric Power Automation Equipment,2001,21(7):36-39.
- [2] 马亮,钱路江. 谐波对集合式并联电容器内部故障保护的影响[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(15):87-90.
MA Liang,QIAN Lujiang. Impact of harmonic on the internal fault protections of assembling capacitor[J]. Power System Protection and Control,2010,38(15):87-90.
- [3] 刘书铭,李琼林,杜习周,等. 无功补偿电容器组串联电抗器的参数匹配[J]. 电力自动化设备,2012,32(4):145-150.
LIU Shuming,LI Qionglin,DU Xizhou,et al. Research on the parameters matching of series reactor in the reactive compensation capacitor bank[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(4):145-150.
- [4] 夏长根,蔡秀雯,谭伟璞,等. 一起 35 kV 电容式电压互感器爆保险分析[J]. 电力电容器,2006(3):32-35.
XIA Changgen,CAI Xiwen,TAN Weipu,et al. Analysis of a case of fuse burn out of 35 kV capacitor voltage transformer[J]. Power Capacitor,2006(3):32-35.
- [5] 李永强,周勇. 无源滤波电容器参数选择方法[J]. 电力自动化设备,2009,29(7):93-96.
LI Yongqiang,ZHOU Yong. Selection of passive filter capacitor parameters[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(7):93-96.
- [6] 周卫平,吴正国,夏立,等. 基于电容谐波电流抑制的动态电压恢复器控制方法[J]. 电力自动化设备,2013,33(8):64-69.
ZHOU Weiping,WU Zhengguo,XIA Li,et al. Dynamic voltage

- restorer control based on capacitor harmonic current suppression [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(8):64-69.
- [7] 吴祎琼,黄宝莹,燕立. 1000 kV 变电站主变 110 kV 侧并联电容器装置的参数选择[J]. 电网技术, 2009, 33(10):42-47.
WU Yiqiong, HUANG Baoying, YAN Li. Parameters selection of shunt capacitor device at 110 kV side of main transformer in 1000 kV substation[J]. Power System Technology, 2009, 33(10): 42-47.
- [8] 鞠非. 无功补偿电容器串联电抗器的选择[J]. 电力电容器, 2006 (6):4-7.
JU Fei. Parameters selection of series reactor in shunt reactive compensation installation[J]. Power Capacitor, 2006(6):4-7.
- [9] 曹建设. 谐振引起的牵引变电所无功动补投切故障分析[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(3):94-97.
CAO Jianshe. Analysis of dynamic reactive compensator switching fault induce by resonance[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(3):94-97.
- [10] 曾锦松. 电容器组单相断线故障继电保护拒动行为分析[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(3):149-150.
ZENG Jinsong. Behavior analysis for relay protection during single-phase wire-breaking fault of capacitor bank[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(3):149-150.
- [11] 李建强. 电容型设备带电测试介质损耗研究[J]. 高电压技术, 2000, 26(6):34-38.
LI Jianqiang. Study on the on-line measurement of tans of capacitive equipment[J]. High Voltage Engineering, 2000, 26(6): 34-38.
- [12] 刘尔宁. 电容器损耗测量误差及其分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2010, 31(6):29-31.
LIU Erning. Loss measurement error and analysis of capacitor [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2010, 31 (6):29-31.
- [13] 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.
SHEN Wenqi. Influence of temperature, voltage, harmonic and inrush transient current on power capacitor life expectancy[J]. Power Capacitor, 2005(2):6-8.
- [14] 段乃欣,宁凤辉,邱毓昌. 金属化膜电容器受谐波影响的寿命模型[J]. 电力电容器, 2002(5):16-19.
DUAN Naixin, NING Fenghui, QIU Yuchang. Influence of voltage harmonics on aging of metallized capacitor[J]. Power Capacitor, 2002(5):16-19.
- [15] 宁凤辉,段乃欣,邱毓昌. 电力系统谐波对金属化膜电容器老化的影响[J]. 绝缘材料, 2002, 35(5):21-23.
NING Fenghui, DUAN Naixin, QIU Yuchang. Life model of metallized capacitor considering the effect of harmonic[J]. Insulating Materials, 2002, 35(5):21-23.
- [16] 程浩忠. 电网谐波对并联电容器组的影响[J]. 电力电容器, 1996 (3):19-21.
CHENG Haozhong. Influence of power grid of shunt capacitor banks[J]. Power Capacitor, 1996(3):19-21.
- [17] 潘志文,崔桂梅. 电力电容器的电容值测量及失效分析[J]. 物理测试, 2011(6):17-20.
PAN Zhiwen, CUI Guimei. Measurement of capacitor value and failure analysis of power capacitors[J]. Physics Examination and Testing, 2011(6):17-20.

作者简介:



刘书铭

刘书铭(1984-),男,河南安阳人,工程师,硕士,主要从事电力系统电能质量分析与控制等方面的研究工作(E-mail:losuwing@126.com);

李琼林(1980-),男,湖北英山人,高级工程师,博士,主要从事电能质量分析与控制、无功电压等方面的研究工作;

余晓鹏(1974-),男,河南信阳人,高级工程师,硕士,主要从事电力系统分析方面的研究工作;

张振安(1974-),男,河南郑州人,高级工程师,硕士,主要从事电力系统分析方面的研究工作。

Experimental research of harmonic intensity effect on capacitor loss

LIU Shuming^{1,2}, LI Qionglin^{1,2}, YU Xiaopeng^{1,2}, ZHANG Zhen'an^{1,2}

(1. HAEPIC Electric Power Research Institute, Zhengzhou 450052, China;

2. Harmonic Characteristic Analysis and Evaluation Technology Laboratory of State Grid Power Corporation of China, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: The calculation of capacitor loss and the determination of its harmonic tolerance capability are briefly explained and the effect of harmonic intensity on capacitor is researched based on the 10 kV large-capacity comprehensive test platform of power quality. By connecting different reactors with respective reactance in series, voltages of different distortion rates, square root values and peak values are exerted on the capacitor tested and the corresponding capacitance and dielectric loss are measured. Experimental results show: the capacitor capacity decreases along with the increase of the RMS or duration of capacitor voltage, while its variation rate or aging speed increases along with the increase of its peak value or harmonic content.

Key words: capacitors; harmonic analysis; losses; quantitative analysis; experiments; power quality