

文章编号:1671-251X(2014)02-0068-05 DOI:

巫付专,侯婷婷.基于双调谐滤波的动态电压恢复器设计[J].工矿自动化,2014,40(2):68-72.

基于双调谐滤波的动态电压恢复器设计

巫付专, 侯婷婷

(中原工学院 电子信息学院, 河南 郑州 450007)

摘要:针对储能装置为不可控整流器的动态电压恢复器易造成直流侧电压不稳定以及电网谐波污染的问题,给出了采用低通滤波和电压闭环控制策略稳定直流侧电压的方法;提出了在不可控整流器前并联双调谐滤波器来滤除谐波,降低储能装置对电网的谐波污染的方法,并详细介绍了双调谐滤波器参数的设计原则。仿真和实验结果验证了设计的合理性。

关键词:动态电压恢复器;不可控整流器;双调谐滤波器;电压闭环控制;总谐波畸变率

中图分类号:TD60 文献标志码:A 网络出版时间:

网络出版地址:

Design of dynamic voltage restorer based on double-tuned filter

WU Fuzhuan, HOU Tingting

(School of Electric and Information Engineer, Zhongyuan University of Technology,
Zhengzhou 450007, China)

Abstract: In view of problems of unstable voltage in DC side and harmonic pollution of power grid caused by dynamic voltage restorer with uncontrolled rectifier as energy storage device, a method using low-pass filter and voltage closed-loop control strategy to stabilize DC side voltage was given. Double-tuned filter paralleled before the uncontrolled rectifier to filter harmonic was proposed, so as to reduce the harmonic pollution of power grid from the energy storage device, and design principle of the double-tuned filter parameters was introduced in details. The simulation and experimental results verify rationality of the design.

Key words: dynamic voltage restorer; uncontrolled rectifier; double-tuned filter; voltage closed-loop control; total harmonic distortion

0 引言

动态电压恢复器(Dynamic Voltage Restorer, DVR)是目前解决电能质量的有效方法,也是各国电力研究的热点^[1]。当DVR对瞬时跌落电压进行补偿时,在电网和DVR之间发生有功功率和无功功率的交换,因此需要储能装置。不同的应用场合和不同容量的DVR对储能装置的选择也有不同的要求,DVR直流储能装置可采用蓄电池^[2]、超级电容^[3]、超导储能装置^[4]以及飞轮储能装置^[5]等。此

类储能装置中,能量必须通过DC/DC变流器从储能系统传递给直流环节电容,使直流侧电压基本可以保持恒定,储存能量受时间限制,仅适用于短时间的电压补偿和能量补偿。参考文献[6]中介绍了各种储能装置的额定功率等级和应用场合。

对于电网末端电压补偿储能装置的选取,整流器能满足用户长时间提供能量的要求。整流器有2种形式:PWM整流器与不可控整流器。使用PWM整流器能有效滤除高次谐波,但设备成本增加,且控制复杂,应用于对电能质量要求高的大容量

收稿日期:2013-06-04;修回日期:2013-12-05。

基金项目:河南省教育厅科学技术研究重点项目(13B470299)。

作者简介:巫付专(1965—),男,河南安阳人,教授,硕士,研究方向为电力电子及电能质量调节,E-mail:ljf_812@126.com。

装置中;而使用不可控整流器,成本较低,设计简单。当电网电压跌落超过 9% 时,不可控整流器产生的谐波使电网的谐波畸变率大于 5%,对电网形成污染,且不可控整流器提供的电压有波动,并不是严格的直流电压。

因此,笔者提出在中小容量装置中采用并联双调谐滤波器的方法改善谐波污染,采用低通滤波和电压闭环控制策略,通过 PI 调节,降低直流侧电压波动带来的影响。

1 DVR 工作原理

DVR 主要由能量存储装置、逆变器、滤波器和串联补偿变压器组成,如图 1 所示。其工作原理:利用霍尔电压传感器检测电网电压 u_s ,该检测信号经过调理电路,使其满足 DSP 对输入信号的要求。再经 DSP 高速处理后,根据一定的补偿策略生成指令信号控制逆变器输出补偿电压 Δu ,该补偿电压经串联补偿变压器输出电压 u_c , u_c 叠加到电网和负载 Z_f 之间,从而可以动态、快速地补偿跌落的电网电压,保证负载两端电压 u_f 稳定。

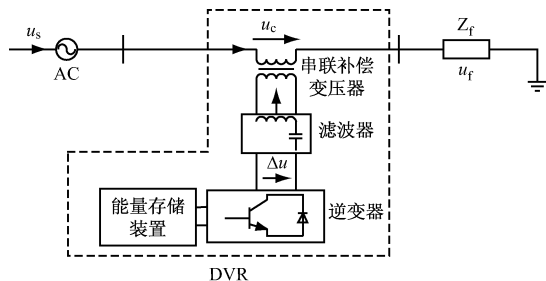


图 1 DVR 原理框图

1.1 DVR 补偿方式

DVR 的电压补偿能力是指其所能提供的最大补偿电压,补偿电压大小将直接影响 DVR 的成本。如何在提高装置容量的前提下获得最大的补偿范围是提高经济性的另一重要内容^[7]。DVR 对电压跌落的补偿方式主要有 3 种:完全补偿方式、同相位补偿方式和最小能量补偿方式。完全补偿方式下,负荷两端电压与发生跌落前完全一致,但此方式需要足够的电压补偿能力和能量支撑,适用于对电压跌落特别敏感的负荷;同相位补偿方式下,负荷两端电压的幅值与跌落前一致,相位有跳变,补偿后电压不连续,所需电压最小,提高了电压利用率,适用于对相位跳变不敏感的负荷;最小能量补偿方式下,DVR 输出有功功率最小,降低储能元件的成本,但相位有跳变和负荷功率摆动,适用于对相位跳变不敏感的负荷。

本文选用同相位补偿方式实现电压补偿,适用于相位波动不敏感的场所,同相位补偿方式的补偿电压与瞬时电压同相位,缺点是只能进行幅值的补偿,不能对相角变化进行补偿。

1.2 DVR 电压闭环控制策略及检测

DVR 对电压检测的实时性要求很高,要求所提供的电压检测方法能快速准确地检测出电压的变化:一是检测电压变化的幅值,二是检测随之出现的相角变化。基于瞬时无功功率理论的检测法是电网畸变电压检测的有效方法^[8],故选用该方法检测电压信号。由于电网电压的波动及不可控整流器本身特性使其无法提供稳定直流电压,影响 DVR 的补偿效果,为解决该问题采用低通滤波和电压闭环控制策略,通过 PI 调节,降低电压幅值波动带来的不利影响。电压闭环控制策略原理如图 2 所示。

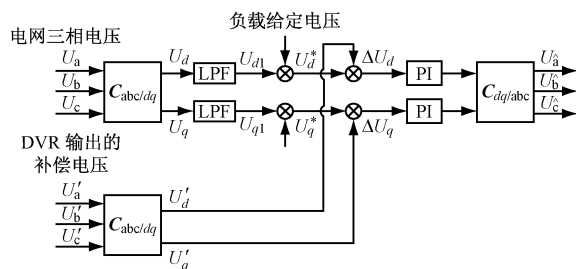


图 2 电压闭环控制策略原理

将三相静止坐标系 abc 下的电网三相电压 U_a, U_b, U_c 转换成两相旋转坐标系 dq 下的两相电压 U_d, U_q ,再经过低通滤波 LPF 得到基波电压 U_{d1}, U_{q1} ,通过与负载给定电压(额定电压)比较,得到补偿指令电压 U_d^*, U_q^* ,同时将 DVR 输出的补偿电压 U'_a, U'_b, U'_c 转换成两相旋转坐标系 dq 下的两相电压 U'_d, U'_q ,分别与 U_d^*, U_q^* 比较,得到补偿电压 $\Delta U_d, \Delta U_q$,经过 PI 调节和 $d-q$ 反变换,可得到三相载波电压 U'_a, U'_b, U'_c 。PI 调节可实时减小 DVR 输出的补偿电压与跌落电压的偏差,降低了不可控整流器造成的电压波动影响。

2 双调谐滤波器设计

由于本文采用不可控整流器作为储能装置,为降低整流的谐波污染,需并联双调谐滤波器来消除 5、7 次谐波。

2.1 双调谐滤波器原理

双调谐滤波器的滤波效果等效为 2 个单调谐滤波器并联,可以消除 2 个频率的谐波,如图 3 所示。

由 C_1, L_1, R_1 所组成的串联谐振电路的阻抗特性曲线如图 4(a) 所示^[9],串联谐振电路谐振频率为

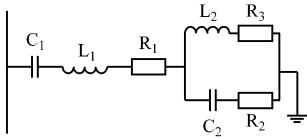
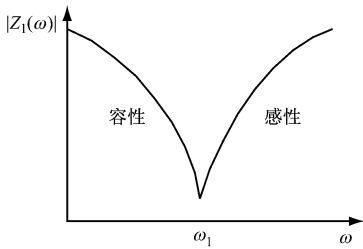
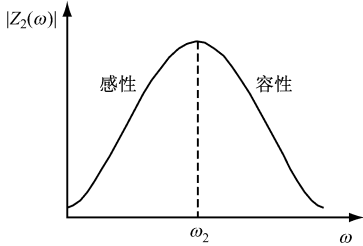


图 3 双调谐滤波器等效电路

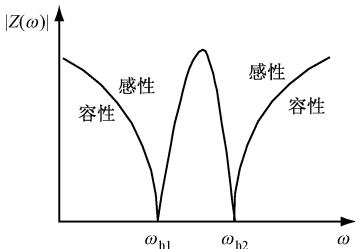
$\omega_1 = 1/\sqrt{L_1 C_1}$, $|Z_1(\omega)|$ 为串联谐振电路的复阻抗。由 C_2, L_2, R_2, R_3 组成的并联谐振电路的阻抗特性曲线如图 4(b) 所示, 并联谐振电路谐振频率为 $\omega_2 \approx 1/\sqrt{L_2 C_2}$, $|Z_2(\omega)|$ 为并联谐振电路的复阻抗。2 个电路有各自的阻抗特性和谐振频率, 当它们串联组合时就构成了新的阻抗特性, 产生了 2 个不同的谐振频率 ω_{h1} 和 ω_{h2} , 如图 4(c) 所示, 其中 $|Z(\omega)|$ 为双调谐滤波器的复阻抗。



(a) 串联谐振电路的阻抗特性



(b) 并联谐振电路的阻抗特性



(c) 双调谐滤波器的阻抗特性

图 4 阻抗特性曲线

由于 2 个电路的阻抗特性曲线相交, 产生了双调谐滤波器的 2 个谐振点, 只有在 2 个电路谐振频率 ω_1 和 ω_2 相等时, 即 $\omega_1 = \omega_2 = 1/\sqrt{L_1 C_1} = 1/\sqrt{L_2 C_2}$ 时, 得出的复合阻抗频率特性最好。

2.2 双调谐滤波器参数设计

在设计元件参数时, 可以将双调谐滤波器等效为 2 个单调谐滤波器。分别计算出 2 个单调谐滤波器的参数, 再根据式(10)一式(13)计算双调谐滤波

器的参数^[10]。

单调谐滤波器可按照最小滤波电容安装容量^[11]来设计, 滤波器电容的容量越小, 其投资就越少, 调谐在第 n 次谐波频率的单调谐滤波器有如下关系^[12]:

$$n\omega_s L_n = 1/(n\omega_s C_n) \quad (1)$$

式中: ω_s 为基波频率; L_n 为单调谐滤波器的电感值; C_n 为单调谐滤波器的电容值。

由于滤波器的谐波电压最终被限制在很小的范围内, 可以忽略不计, 即认为滤波器的交流母线只含有基波分量 $U_{(1)}$, 这样滤波支路流过 n 次谐波电流 $I_{f(n)}$ 外, 还流过由 $U_{(1)}$ 引起的基波电流 $I_{f(1)}$:

$$I_{f(1)} = \frac{U_{(1)}}{\frac{1}{\omega_s C_n} - \omega_s L_n} = \omega_s C_n \frac{n^2}{n^2 - 1} U_{(1)} \quad (2)$$

由于滤波器中既有基波电流 $I_{f(1)}$ 流过, 又有谐波电流 $I_{f(n)}$ 流过, 故其安装容量 $S_{(n)}$ 应为基波无功容量 $Q_{(1)}$ 和谐波无功容量 $Q_{f(n)}$ 之和, 即

$$S_{(n)} = Q_{(1)} + Q_{f(n)} = \frac{1}{\omega_s C_n} I_{f(1)}^2 + \frac{1}{n\omega_s C_n} I_{f(n)}^2 \quad (3)$$

滤波支路输出的基波无功容量 $Q_{(1)}$ 为

$$Q_{(1)} = U_{(1)} I_{f(1)} = \omega_s C_n \frac{n^2}{n^2 - 1} U_{(1)}^2 \quad (4)$$

利用式(2)及式(4), 将式(3)改写为

$$S_{(n)} = \frac{n^2}{n^2 - 1} \left(Q_{(1)} + \frac{U_{(1)}^2 I_{f(n)}^2}{n Q_{(1)}} \right) \quad (5)$$

式(5)中对 $Q_{(1)}$ 求偏导, 可得出当 $Q_{(1)} = 1/\sqrt{n}$ 时, $S_{(n)}$ 为最小:

$$S_{(n)\min} = \frac{2}{\sqrt{n}} \frac{n^2}{n^2 - 1} \quad (6)$$

相应地输出最小谐波无功容量为

$$Q_{f(n)\min} = \frac{1}{\sqrt{n}} U_{(1)} I_{f(n)} = \omega_s C_n \min \frac{n^2}{n^2 - 1} U_{(1)}^2 \quad (7)$$

因此, 得出最小滤波电容安装容量所对应的电容容量为

$$C_{\min} = \frac{I_{f(n)}}{U_{(1)} \omega_s} \frac{n^2 - 1}{\sqrt{nn^2}} \quad (8)$$

滤波器的电感值 L_n 为

$$L_n = \frac{1}{n\omega_s C_{\min}} \frac{1}{n\omega_s} = \frac{1}{n^2 \omega_s^2 C_n} \quad (9)$$

若已知 5、7 次谐波电流 I_5 和 I_7 , 则将 $n=5$ 和 $n=7$ 分别带入式(1)一式(9), 可以得到 5 次单调谐滤波器的参数 C_5, L_5 和 7 次单调谐滤波器的参数 C_7, L_7 。在设计双调谐滤波器参数时, 应避免与隔离变压器发生并联谐振, 计算 5 次单调谐滤波器的

参数时,谐振次数 n 应小于 5,选取 $n=4, 7$ 较宜,同理选取 7 次单调谐滤波器谐振次数 $n=6, 7$ 。计算 5、7 次谐波产生的无功功率 $Q_{f(5+7)}$ 。忽略电阻值的影响,可由式(10)一式(13)确定双调谐滤波器的 C_1, L_1, C_2, L_2 ^[10]:

$$C_1 = C_5 + C_7 \quad (10)$$

$$L_1 = \frac{L_5 L_7}{L_5 + L_7} \quad (11)$$

$$C_2 = \frac{C_5 C_7 (C_5 + C_7) (L_5 + L_7)^2}{(L_5 C_5 - L_7 C_7)^2} \quad (12)$$

$$L_2 = \frac{(L_5 C_5 - L_7 C_7)^2}{(C_5 + C_7)^2 (L_5 + L_7)} \quad (13)$$

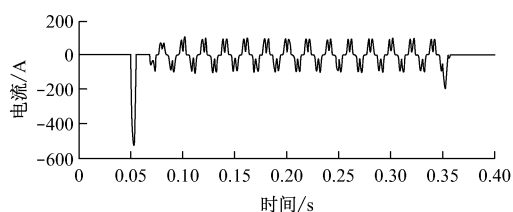
3 仿真结果

在 Matlab 下搭建仿真模型。本文设计的三相 DVR 的额定总容量 Q 为 30 kVA,三相负载的额定总容量 Q_L 为 100 kVA,在短时间内电压发生跌落,跌落值为 30%。储能装置为不可控整流器,按最小滤波电容安装容量设计双调谐滤波器,用来滤除 5、7 次谐波,其连接方法为三角型连接,避免与 DVR 中的元件发生谐振。

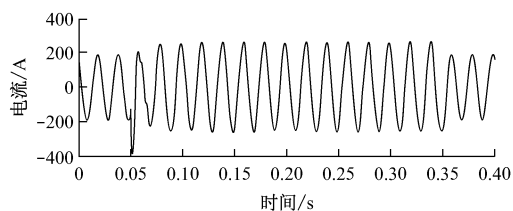
由 $Q = I_{dc} U_{dc}$, $U_{dc} = 2.34 \times U_p (1 - 30\%)$ (其中 U_p 为电网相电压, U_{dc} 为直流侧电压),可得电压跌落时直流电流 I_{dc} 为 83.25 A,由于 U_{dc} 的实际值比较小,可以取较大 I_{dc} 值为 90 A。由傅里叶变换可以求出单相的 5、7 次谐波电流大小 $I_5 = 14$ A, $I_7 = 10$ A,计算出 5、7 次谐波滤波电容安装总容量 $Q_c = 3(I_5 + I_7)U_L = 20$ kVA, U_L 为电网发生跌落时的线电压。由式(4)一式(13)可计算出双调谐滤波器的参数: $C_1 = 38.76 \mu\text{F}$, $L_1 = 7.67$ mH, $C_2 = 333 \mu\text{F}$, $L_2 = 0.846$ mH。以实际市场上常用的电容、电感值为基础,可得到滤波效果较好的一组双调谐滤波器的参数: $C_1 = 47 \mu\text{F}$, $L_1 = 7.7$ mH, $C_2 = 330 \mu\text{F}$, $L_2 = 0.6$ mH,并联电阻 $R = 5.5 \Omega$ 。

带有双调谐滤波器的 DVR 仿真效果如图 5—图 6 所示。由图 5 可见,加入双调谐滤波器的 DVR 的网侧电流波形谐波含量更少,网侧电流波形更接近正弦波。由图 6 可见,加入双调谐滤波器的 DVR 的补偿性能不会受到影响。

滤波前后电流总谐波畸变率(Total Harmonic Distortion, THD)如图 7 所示。对比图 7(a)和图 7(b)可见,滤波前不可控整流器中电流 THD 为 47.79%,加入双调谐滤波器后电网电流 THD 为 4.21%。滤波后电流中 5、7 次谐波含量大大减小,且

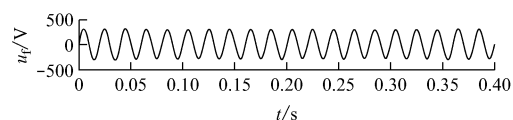


(a) 滤波前网侧电流波形

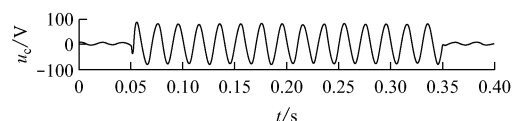


(b) 滤波后网侧电流波形

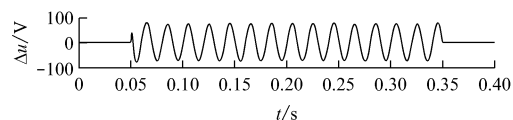
图 5 双调谐滤波器的滤波效果



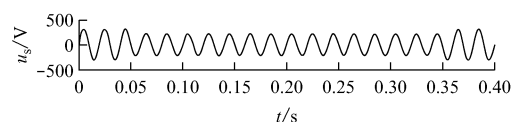
(a) 补偿后负载两端电压波形



(b) 补偿变压器输出侧电压波形



(c) 逆变器输出电压波形



(d) 电网电压波形

图 6 双调谐滤波器的 DVR 补偿效果

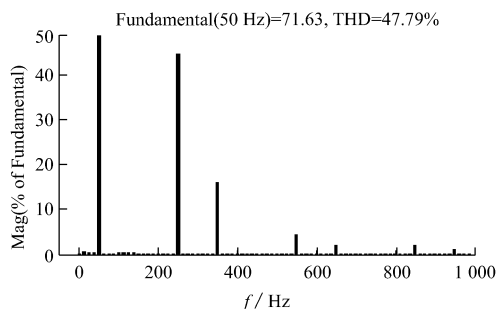
滤波后电流 THD 满足国家标准要求。

4 实验结果

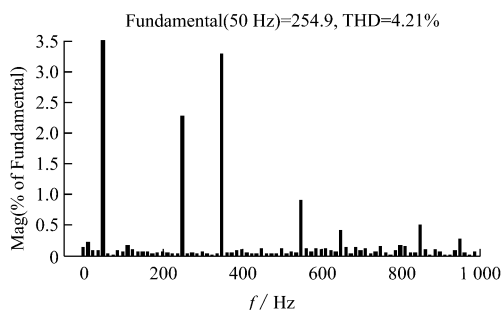
在 Matlab/Simulink 仿真的基础上,搭建 DVR 实验平台,测试在电网电压跌落 10%时 DVR 的补偿效果,实验结果如图 8 所示。

图 8(a)中曲线 1 为跌落后电压波形,其值为 197 V,曲线 2 为电网电压波形,其值为 220 V。

图 8(b)为 DVR 输出的补偿电压波形,其值为 23.3 V。补偿后电压值为 220.3 V,精度为 0.3 V,电网电压 THD 为 1.01%,电流 THD 为 4.9%,可见本文设计的电路参数合理。

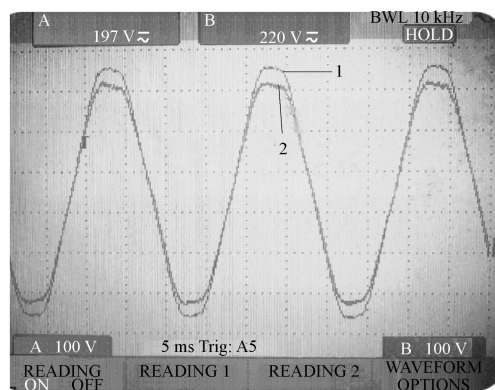


(a) 滤波前不可控整流器中电流 THD

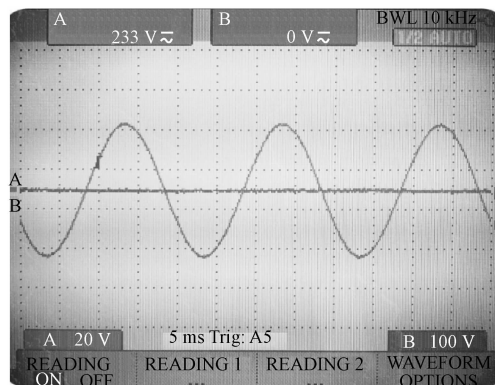


(b) 滤波后电网电流 THD

图7 滤波前后电流 THD



(a) 电网电压与跌落电压波形



(b) 补偿电压波形

图8 实验结果

5 结语

针对采用不可控整流器作为储能装置的 DVR, 采用低通滤波和电压闭环控制策略, 能有效抑制整流桥所提供的直流电压的波动, 得到较好的电压补偿效果; 在不可控整流器前并联双调谐滤波器, 能有效滤除 5、7 次谐波, 减少不可控整流器对电网的谐波污染。仿真和实验结果验证了设计的合理性。

参考文献:

- [1] 王晶, 徐爱亲, 翁国庆, 等. 动态电压恢复器控制策略研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(1): 145-151.
- [2] RAMACHANDARAMURTHY V K, FITZER C, ARULAMPALAM A, *et al.* Control of a battery supported dynamic voltage restorer [J]. IEEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution, 2002, 149(5): 533-542.
- [3] 钟云, 张建成. 基于超级电容器储能的电压暂降补偿分析[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(6): 43-45.
- [4] 刘逊, 朱晓光, 褚旭, 等. 基于超导储能的瞬时电压跌落补偿[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(3): 40-45.
- [5] ANDRADE R, FERREIRA A C, SOTELO G G, *et al.* Voltage sags compensation using a superconducting flywheel energy storage system[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2005, 15(2): 2265-2268.
- [6] 张雪莉, 刘其辉, 李建宁, 等. 储能技术的发展及其在电力系统中的应用[J]. 电力系统, 2012, 31(12): 50-57.
- [7] 周晖, 齐智平. 动态电压恢复器检测方法和补偿策略综述[J]. 电网技术, 2006, 30(6): 23-29.
- [8] 韦钢, 陈森环, 蔡阳, 等. 基于瞬时无功功率理论的三相不平衡负荷补偿[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(2): 59-62.
- [9] 余春燕. 两种双调谐滤波器设计与保护[D]. 南京: 南京理工大学, 2009.
- [10] ARRILLAGA J, WATSON N R. Power System Harmonics[M]. 2nd edition. Hoboken: John Wiley and Sons, 2003.
- [11] 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.
- [12] 王兆安, 杨君, 刘进军, 等. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2006.