

有源电力滤波器控制策略综述

李圣清, 何伟华, 罗 飞

(湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412008)

摘要: 有源电力滤波器能否按照其工作原理达到预期的谐波治理效果, 除了谐波检测算法速度快、精度高等以外, 很大程度上还依赖于控制器的控制策略。对有源电力滤波器的控制策略进行了分类, 对其几种常用控制策略的控制效果进行了深入分析, 总结出了它们的优缺点。其中复合控制方式综合了检测负载谐波电流控制方式和检测电网谐波电流控制方式的优点, 是一种比较理想的控制方式。

关键词: 有源电力滤波器; 控制策略; 综述

中图分类号: TM71

文献标识码: A

文章编号: 1673-9833(2007)04-0072-05

The Overview of Control Strategy for Active Power Filters

Li Shengqing, He Weihua, Luo Fei

(College of Electric and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412008, China)

Abstract: Whether the active power filter can reach its expecting controlling results according to working theory or not, it depends on control strategy, fast speed as well as the accuracy of harmonic detecting algorithm. It classifies the control strategies of active power filter and analyses deeply the results of common control strategies, summarizes their advantages and disadvantages. Among them, the combined control strategy is an ideal way, because the advantages of detecting load harmonic current controlling method and the power system harmonic controlling method are summed up.

Key words: active power filter; control strategy; overview

0 引言

为了使有源电力滤波器得到理想的补偿效果, 必须对其进行有效地控制, 它将关系到有源电力滤波器的容量要求、控制系统的稳定性和有效性等, 并能有效地抑制电网电感和无源滤波器电感、电容可能导致的串、并联谐振等。常用的控制策略有以下几种^[1-3]:

1) 检测负载谐波电流, 控制逆变器输出电压; 2) 检测电网谐波电流, 控制逆变器输出电压; 3) 同时检测负载谐波电流和电网谐波电流, 控制逆变器输出电压。其中的控制策略1)通过控制参数 K 值, 增加滤波器支路和电网支路的分流比, 达到减少电网谐波电

流的目的。 K 值越接近滤波器支路谐波阻抗, 滤波器支路的等效谐波阻抗越小, 电网支路的等效谐波阻抗越大, 谐波抑制效果越好。其缺点为: 一是控制的有效性依赖于参数 K 和滤波器支路谐波阻抗的关系; 二是 K 的取值范围较窄。控制策略2)谐波抑制效果只与参数 K 的大小有关, 不再依赖于参数 K 与无源滤波器谐波阻抗之间的关系, 因而 K 的取值范围比较宽, 使得该控制方式的灵活度大大增大。其缺点是当无源滤波器采取较大的电感值和较小的电容值的时候, 无源滤波器在非调谐频率下的阻抗更大。在这些谐波频率下, 有源电力滤波器的补偿效果就十分有限。控制策略3)也称为复合控制方式, 它综合了前2种方式的

收稿日期: 2007-06-29

基金项目: 湖南省科技厅基金资助项目(05GK3022), 中国包装总公司基金资助项目(05ZBKJA014), 株洲市科技局项目(株科200625)

作者简介: 李圣清(1961-), 男, 湖南永兴人, 湖南工业大学教授, 博士, 硕士生导师, 主要从事电力系统谐波的分析与治理, 电力电子技术及新型输变电技术的研究。

优点, 是一种比较理想的控制方式。

1 检测负载谐波电流控制方式

并联混合型有源电力滤波器(Parallel Hybrid Active Power Filter 简称为 PHAPF)的原理如图1所示, 是由无源滤波器和有源滤波器2部分组成的。无源滤波器由5次、7次和高通滤波器组成, 其中5次、7次滤波器均由单调谐滤波器组成, 主要起滤除谐波和实现无功补偿的作用。高通滤波器主要起滤除开关频率附近谐波的作用, 通常采用二阶高通滤波器。有源滤波器由谐波检测、控制和补偿电路等组成, 主要起提高、改善无源滤波器滤波效果作用。由于有源滤波器不是直接抑制和补偿谐波, 由它所产生的补偿电压中不含基波电压, 只含谐波电压, 故其功率容量较小, 因而滤波器的成本得以下降^[3, 4]。

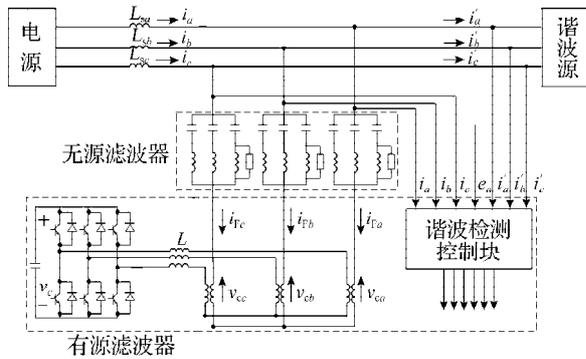


图1 并联混合滤波器原理图

Fig.1 Principle figure of parallel hybrid active power filter

通过检测负载谐波电流, 达到控制逆变器输出电压的控制策略称为检测负载谐波电流控制方式。在该方式中, 逆变器的输出电压 $U_c = Ki_{Lh}$ ^[2, 4]。

图1的单相谐波等效电路如图2所示, 负载等效为一个谐波电流源, 有源电力滤波器等效于一个受控电压源^[2], 忽略电网谐波电压, Z_p 为无源电力滤波器的阻抗。

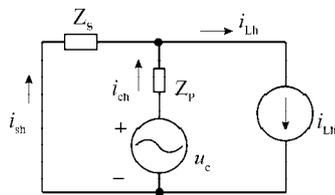


图2 单相谐波等效电路

Fig.2 The equivalent circuits of single harmonic

由图2, 根据基尔霍夫电流定律和电压定律可得:

$$i_{ch} = i_{Lh} - i_{sh} \tag{1}$$

$$i_{ch}Z_p - Ki_{Lh} = i_{sh}Z_s \tag{2}$$

由式(1)和(2)可得该控制方式的数学模型, 如图3所示^[2, 4]。

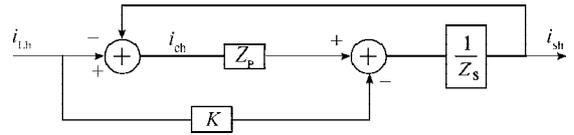


图3 检测负载谐波电流控制方式结构图

Fig.3 Structure figure of control model of detecting load harmonic circuits

还可求得此时电网谐波电流和有源电力滤波器支路谐波电流分别为:

$$i_{sh} = \frac{Z_p - K}{Z_p + Z_s} \cdot i_{Lh} = \frac{Z_p - K}{(Z_p - K) + (Z_s + K)} \cdot i_{Lh} \tag{3}$$

$$i_{ch} = \frac{Z_s + K}{Z_p + Z_s} \cdot i_{Lh} = \frac{Z_s + K}{(Z_p - K) + (Z_s + K)} \cdot i_{Lh} \tag{4}$$

式(3)、(4)中的分母 $Z_p + Z_s = (Z_p - K) + (Z_s + K)$, 因此, 这种控制方式实质上等效于加大电网支路的谐波阻抗, 减小滤波器支路的谐波阻抗, 其等效电路如图4所示。

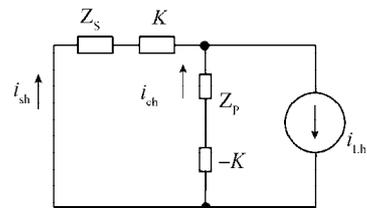


图4 检测负载谐波电流控制方式的等效电路

Fig.4 The equivalent circuits of control model of detecting load harmonic circuits

该控制方式的特点为:

1) 通过控制 K 值, 增加滤波器支路和电网支路的分流比, 达到减少电网谐波电流的目的。 K 值越接近 Z_p , 滤波器支路的等效谐波阻抗越小, 电网支路的等效谐波阻抗越大, 谐波抑制效果越好。参数 K 值满足 $0 < K \leq Z_p$;

2) 当 $K = Z_p$ 时, 滤波器支路的谐波阻抗为零, 谐波电流全部分流至滤波器支路, 电网谐波电流为零, 达到理想工作状态。

该控制方式的缺点是: 1) 控制的有效性依赖于参数 K 和滤波器支路谐波阻抗 Z_p 的关系。由于在实际情况下, 在不同的谐波频率下, Z_p 的大小不同, 且其值随电网频率的变化而变化, 因而 K 的最优值很难在线确定。2) K 的取值范围较窄, 当 $Z_p < K < 2Z_p$ 时, 虽然也能达到减小电网谐波电流的目的, 但是, 此时有源电力滤波器处于过补偿状态, 势必增大了有源电力滤波器的容量, 因此, K 不应在此范围内取值。

2 检测电网谐波电流控制方式

检测电网谐波电流 i_{sh} , 控制逆变器输出电压 $U_c = K \cdot i_{sh}$, 这种控制策略称为检测电网谐波电流控制方式。那么, 仍然由图2可得^[2, 4]:

$$i_{ch} = i_{Lh} - i_{sh}, \quad (5)$$

$$i_{ch} Z_p - K i_{sh} = Z_s i_{sh} \quad (6)$$

由式(5)、(6)可得该种控制方式的数学模型如图5所示^[2, 4]。

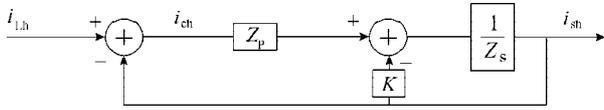


图5 检测电网谐波电流控制方式结构图
Fig. 5 Structure figure of control model of detecting power harmonic circuits

此时, 电网谐波电流和有源电力滤波器支路谐波电流分别为^[2]:

$$i_{sh} = \frac{Z_p}{Z_p + (K + Z_s)} i_{Lh}, \quad (7)$$

$$i_{ch} = \frac{(K + Z_s)}{Z_p + (K + Z_s)} i_{Lh} \quad (8)$$

滤波器安装点处的谐波电压和有源电力滤波器的输出电压分别为:

$$u_{Lh} = -\frac{Z_p Z_s}{Z_p + Z_s + K} i_{Lh}, \quad (9)$$

$$u_c = -\frac{K Z_p}{Z_p + Z_s + K} i_{Lh} \quad (10)$$

这种控制方式的等值电路如图6所示。电网阻抗由原来的 Z_s 增加到 $Z_s + K$, 滤波器支路的谐波阻抗不变。因此, 该控制方式实质上等效于增加电网支路的谐波阻抗, 将有助于减弱电网支路的谐波分流能力, 从而增大了滤波器支路的谐波分流能力, 达到补偿谐波的目的。

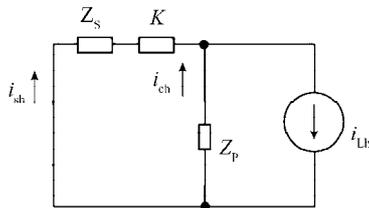


图6 检测电网谐波电流控制方式等值电路

Fig. 6 The equivalent circuits of control model of detecting power harmonic circuits

该控制方式的优点为:

1) 谐波抑制效果只与参数 K 的大小有关, 不再依赖于参数 K 与无源滤波器谐波阻抗 Z_p 之间的关系。由式(7)可知, K 越大, 电网谐波电流越小, 有源电力滤波器的谐波抑制效果越好;

2) 由于谐波抑制效果只与参数 K 的大小有关, 因而 K 的取值范围比较宽, 使得该控制方式的灵活度增大;

3) 当 K 为无穷大时, 混合滤波系统达到理想的滤波特性, 这时有:

$$i_{sh} = 0, \quad (11)$$

$$i_{ch} = i_{Lh}, \quad (12)$$

$$u_{Lh} = u_{sh}, \quad (13)$$

$$u_c = Z_p i_{Lh} + u_{sh} \quad (14)$$

但是, 实际应用中并不是 K 值越大越好, K 值过大, 会加大检测和控制电路引入的延时和惯性对系统稳定性的影响, 因此, 只能根据实际情况取有限值。

这种控制方式的缺点是: 在无源滤波器非谐振频率下, 难以满足 $K \gg Z_p$ 的条件, 尤其是当无源滤波器采取较大的电感值和较小的电容值的时候, 无源滤波器在非调谐频率下的阻抗更大。在这些谐波频率下, 有源电力滤波器的补偿效果就十分有限。通常采用以下2种措施来缓解这个问题:

1) 对不同频率的谐波, 采用不同的 K 值。这样做的优点是分开考虑系统惯性和延时对不同频率谐波补偿的影响; 其缺点是当电网谐波电流组成比较复杂时, 采用这种方法, 谐波检测的计算量较大。

2) 仍对所有谐波频率采用相同的 K 值, 无源滤波器使用多个单调谐滤波器, 分别调谐在电网的主要谐波频率处, 从而大大减小无源滤波器阻抗, 达到满足 $K \gg Z_p$ 的条件。

3 同时检测负载和电网谐波电流控制方式

同时检测负载和电网谐波电流控制方式也称为复合控制方式, 该方式综合了前2种方式的优点, 是一种比较理想的控制方式。这种控制方式中, 指令电流信号主要来自负载电流, 可以对负载中的谐波电流进行很好的补偿。而检测电源谐波电流的作用主要是抑制高通滤波器和电网阻抗之间的谐振, 有利于提高系统的稳定性。

复合控制方式指令信号为

$$u_c = u_{Lh} + K i_{sh}, \quad (15)$$

式中 u_{Lh} 仍为滤波器安装点的谐波电压。

考虑电网谐波电压 u_{sh} 的单相谐波电流等效电路如图7所示。

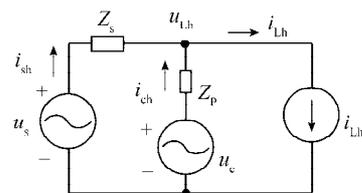


图7 考虑电网谐波电压的单相谐波电流等效电路

Fig. 7 The equivalent circuits of single harmonic circuits of considering power harmonic voltage

由 KCL 和 KVL 定律可得:

$$i_{sh} = i_{Lh} - i_{ch}, \quad (16)$$

$$u_c - u_{Lh} = Z_p i_{ch}, \quad (17)$$

$$u_{Lh} = u_{sh} - Z_S i_{sh} \quad (18)$$

由式(15)~(18)可得复合控制方式的数学模型, 如图8所示。

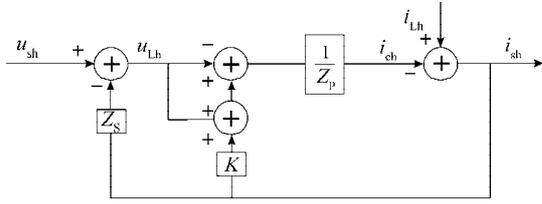


图8 复合控制方式原理图

Fig. 8 Principle figure of combined control model

同时考虑负载谐波电流和电网谐波电压影响时, 电网谐波电流和负载谐波电压分别由下列各式决定:

$$i_{sh} = \frac{Z_p}{Z_p + Z_S + K} i_{Lh} + \frac{1}{Z_p + Z_S + K} u_{sh}, \quad (19)$$

$$u_{Lh} = \frac{Z_p + K}{Z_p + Z_S + K} u_{sh} + \frac{Z_p Z_S}{Z_p + Z_S + K} i_{Lh} \quad (20)$$

由式(19)、(20)可得, 电网谐波电流和负载电

网侧谐波电压均与 K 值有关, 而且 K 值越大滤波效果越好。还可得出以下结论:

1) 当 $K \gg Z_p$ 、 Z_S 时, 由式(19)可知电网谐波电流得到了较好的控制。由式(20)可知右边的第1项也得到了较好的控制;

2) 当 K 值趋近于无穷大时, 电网谐波电流趋近于0, 负载谐波电压得到了有效地控制, 其中由负载谐波电流产生的谐波电压趋近于0, 但却不能有效地抑制电网谐波电压对负载谐波电压的影响;

3) 复合控制方式还能在有源电力滤波器产生的谐波补偿电压转化成谐波补偿电流时, 不再受电网阻抗的影响;

4) 有利于进一步降低有源电力滤波器的容量。

4 仿真结果分析

采用pspice软件进行了仿真, 电源线电压为380 V, 频率为50 Hz, 不可控三相整流桥带电阻性负载, $R_L=10 \Omega$ 。 K 取不同值、采用不同的控制方法时, 并联混合型有源电力滤波器对谐波补偿效果的仿真结果如图9~11示。

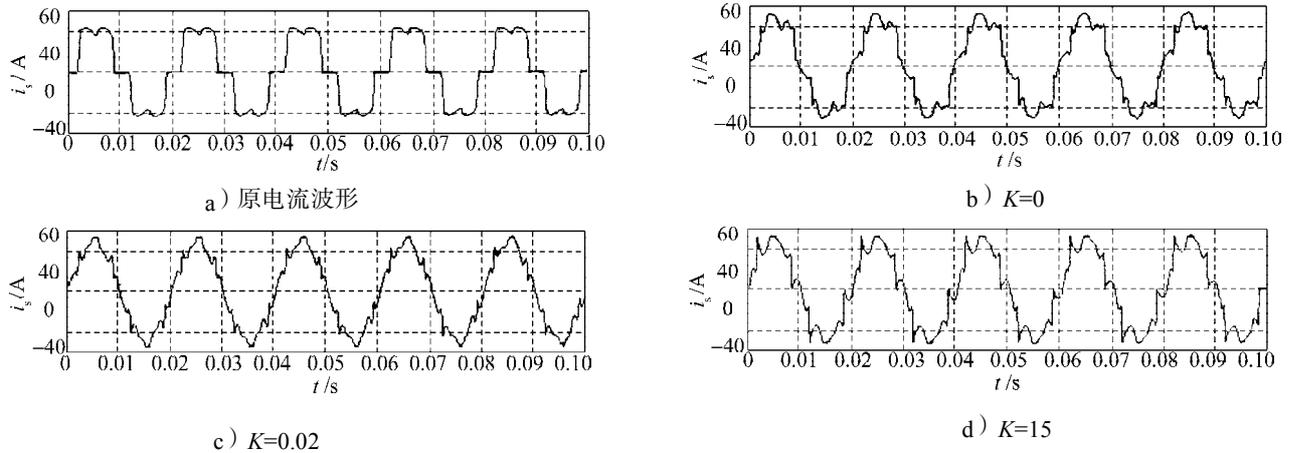


图9 检测负载谐波电流控制方法的补偿效果

Fig. 9 Compensation result of control model of detecting load harmonic circuits

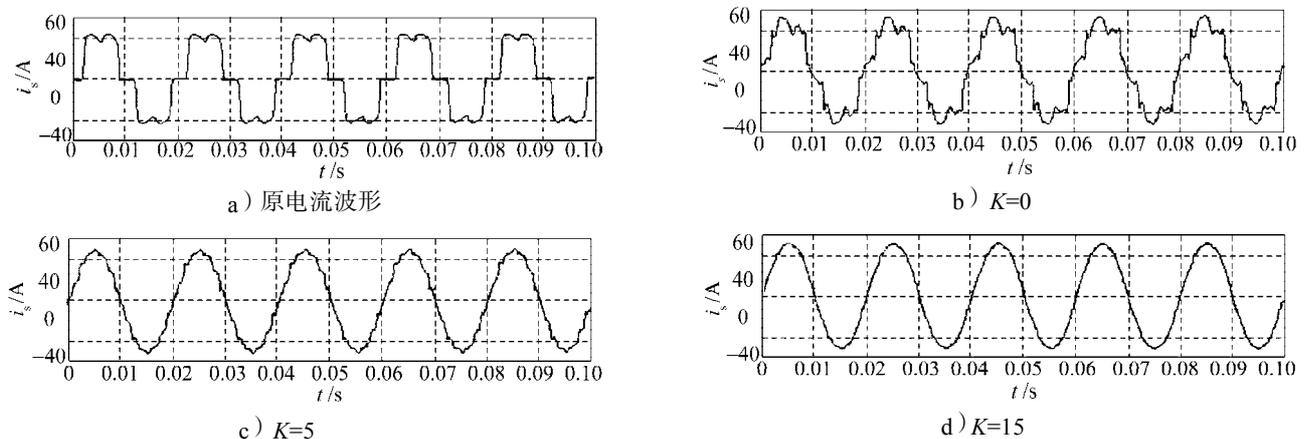


图10 检测电网谐波电流控制方法的补偿效果

Fig. 10 Compensation result of control model of detecting power harmonic circuits

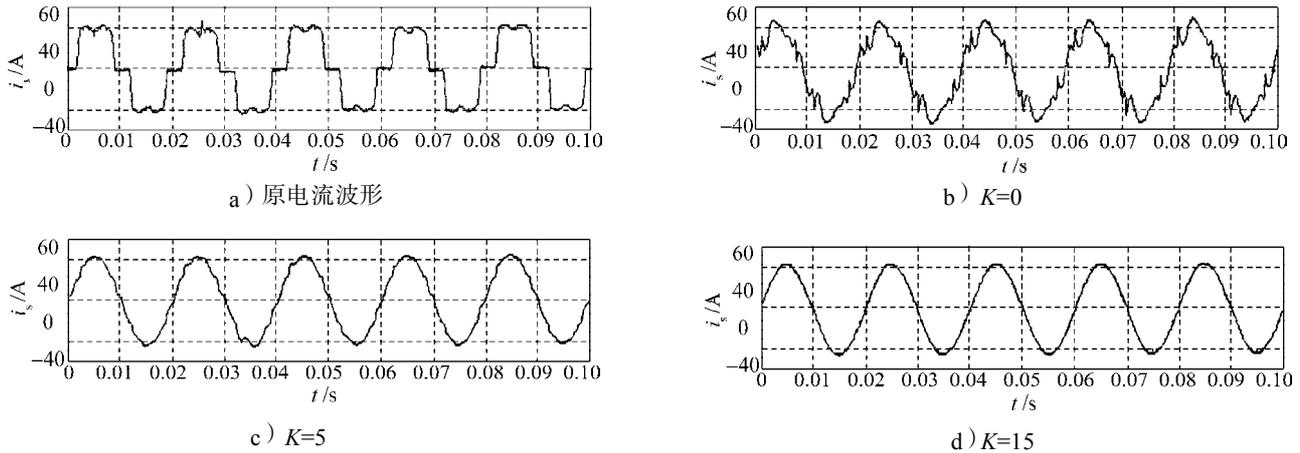


图 11 复合控制方法的补偿效果

Fig. 11 Compensation result of combined control model

图 9 给出了检测负载谐波电流控制方法的补偿效果。图 9a) 为补偿前电网电流波形, 图 9b)、c)、d) 分别为 $K=0$ 、 $K=0.02$ 和 $K=15$ 时的补偿效果。由图可知, 当 $K=0.02$ 时, 整套有源滤波系统的滤波效果比 $K=0$ 时有些改善; 当 $K=15$ 时, 整个滤波系统的滤波效果不但没有得到改善, 反而比只投入无源滤波器, 即 $K=0$ 时的滤波效果更差了, 说明电网谐波被放大, 电网谐波状况反而变差。

图 10 给出了检测电网谐波电流控制方法的补偿效果。在图 10 中, 给出了补偿前电网电流波形, 以及 $K=0$ 、 $K=5$ 和 $K=15$ 时的仿真结果。由图可知, 当 $K=5$ 时, 整套有源滤波系统的滤波效果比 $K=0$ 时有比较明显的改善。当 $K=15$ 时, 整个滤波系统的滤波效果得到进一步改善。

图 11 给出了复合控制方式的补偿效果。在图 11 中, 给出了 $K=0$, 以及 $K=5$ 和 $K=15$ 电网电流波形, 由图可知, 其补偿效果均优于前面的 2 种方法。

5 结论

本文的理论分析和仿真结果均表明了有源电力滤波器会因采用不同的控制策略而有不同的谐波补偿效果。检测负载谐波电流控制方式的有效性依赖于参数 K 和滤波器支路谐波阻抗 Z_p 的关系, K 值取值范围较窄, 因而滤波效果欠佳。检测电网谐波电流控制方式, K 的有效值域明显扩大, 还能显著改善无源滤波器在所有频段的谐波抑制效果, 因而滤波效果较好。但是,

在无源滤波器非谐振频率下, 难以满足 $K \gg Z_p$ 的条件, 这时有源电力滤波器的补偿效果就十分有限。复合控制方式综合了前 2 种方式的优点, 是一种比较理想的控制方式。

参考文献:

- [1] 王兆安, 杨君, 刘进军. 谐波抑制功率和无功功率补偿 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [2] 李圣清. 有源电力滤波器滤波技术及其补偿特性的研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2005.
- [3] 王莉娜. 产矿企业配电网谐波治理控制策略和工程应用研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2003.
- [4] 姚为正, 王群, 刘进军, 等. 串联型有源电力滤波器控制方式的研究 [J]. 电工技术学报, 1999 (12): 47-51.
- [5] 叶忠明, 董伯藩, 钱照明. 串联有源电力滤波器的控制策略 [J]. 浙江大学学报, 1998, 7: 437-443.
- [6] Bose B K. An adaptive hysteresis-band current control technique of a voltage-fed PWM inverter for machine drive system [J]. IEEE Trans. on Ind. Electron., 1990, 37 (5): 402-409.
- [7] Bhattacharya S, Divan D M. Hybrid series active/parallel passive power line conditioner with controlled harmonic-injection: USA, 5465203 [P]. 1995-07-26.
- [8] 朱鹏程, 李勋, 康勇, 等. 统一电能质量控制器控制策略研究 [M]. 中国电机工程学报, 2004, 24 (8): 67-73.
- [9] 李圣清, 朱英浩, 周有庆, 等. 基于瞬时无功功率理论的四相输电谐波电流检测方法 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24 (3): 12-17.