

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.10.018

基于模型预测控制的SAPF控制策略研究

李治艳¹, 李琛²

(1. 中国民航机场建设集团有限公司机场工程科研基地, 北京 100101; 2. 民航机场规划设计研究总院有限公司, 北京 100101)

摘要: 模型预测控制(model predictive control, MPC)是一种应用于变流器控制领域的新型控制算法。传统的基于PI调节器的指令次谐波补偿方法,控制结构复杂,执行过程繁琐。文中将MPC用于并联型有源滤波器(shunt active power filter, SAPF)谐波电流指令的跟踪控制,该策略可以在三相静止坐标系下直接执行,省略了锁相环和旋转坐标变换,可实现各次谐波的统一控制,控制结构简单。此外,还提出基于谐振型带通滤波器的谐波检测方法,该方法可检测任意次谐波电流,提高了谐波补偿的灵活性。仿真和物理实验结果验证了所提策略能够取得良好的谐波补偿效果。

关键词: 模型预测控制; 有源滤波器; 谐波检测

Research on Control Strategy of SAPF Based on Model Predictive Control

LI Zhiyan¹, LI Chen²

(1. R&D Center, China Airport Construction Group Co., Ltd., Beijing 100101, China; 2. China Airport Planning & Design Institute Co., Ltd., Beijing 100101, China)

Abstract: Model predictive control (MPC) is a novel control method for the field of converter control. For traditional selective harmonic compensation method based PI regulator, its control structure and execution process are both complicated. MPC is used to achieve the tracking of reference current for shunt active power filter (SAPF), which can implement in three-phase stationary frame, remove PLL and rotating coordinate transformation and control every harmonic current. Furthermore, resonant type band pass filter is presented to detect random harmonic current, which improves the flexibility of the harmonic compensation. Simulation and experiment results demonstrate that the proposed control strategy can achieve a good harmonic compensation effect.

Key words: model predictive control (MPC); active power filter (APF); harmonic current detection

0 引言

谐波污染是配电网中较为常见的电能质量问题,若不加以治理,会增加电力设备的附加损耗、损害敏感性的电子仪器、降低电力设备的运行性能。并联型有源电力滤波器(shunt active power filter, SAPF)可以有效消除电流源型非线性负载产生的谐波电流。相比于无源滤波器, SAPF采用的无源器件体积相对较小、占地面积小,并且谐波补偿较为灵活、不会引起串并联谐振问题^[1-5]。

SAPF谐波补偿的效果依赖所用的控制算法,常用的算法包括多旋转坐标系下的比例积分(proportional integrator, PI)控制^[6-7]、静止坐标系下的谐振控制^[8-9]、无差拍控制^[10-11]、重复控制^[12-16]等。多

旋转坐标系下的PI控制方法,其控制结构特别复杂,需要对各次谐波分别做旋转坐标变换和反变换并采用PI调节器分别控制,执行过程较为繁琐。基于谐振调节器的控制方法省略了旋转坐标变换,但仍需对各次谐波分别进行跟踪控制。虽然无差拍控制响应速度快并且易于数字化实现,但对电感参数的变化较敏感。重复控制可以等效多个谐振控制器的并联,因而可以实现多次谐波的统一控制,但其缺点在于响应速度较慢。文中将模型预测控制(model predictive control, MPC)用于SAPF指令电流的跟踪,实现各次谐波的统一控制,并且响应速度较快,控制结构简单,易于数字化实现。为了实现谐波补偿的灵活性,提出采用谐振型带通滤波器对各次谐波分别进行检测,将需要补偿的谐波分量

相加即得到SAPF的指令电流。

文中建立了SAPF的连续数学模型和离散数学模型;提出了基于谐振型带通滤波器的谐波检测方法;详细介绍了MPC的执行过程;最后,搭建仿真和实验平台,给出相应的仿真和实验结果。

1 SAPF数学模型

SAPF典型拓扑结构见图1。根据图1所示的电压和电流参考方向,由KVL可得

$$\begin{cases} L \frac{di_{fa}}{dt} + S_a u_{dc} + u_{No} = e_a \\ L \frac{di_{fb}}{dt} + S_b u_{dc} + u_{No} = e_b \\ L \frac{di_{fc}}{dt} + S_c u_{dc} + u_{No} = e_c \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中, S_x 为 $x(x=a,b,c)$ 相的开关函数,上桥臂导通时为1,下桥臂导通时为0。

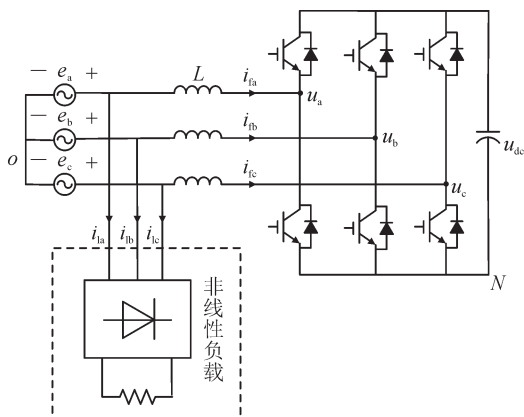


图1 SAPF 结构图

Fig. 1 The structure diagram of SAPF

由式(1)可得

$$u_{No} = \frac{1}{3} \left(\sum_{x=a,b,c} e_x - \sum_{x=a,b,c} S_x \cdot u_{dc} \right) \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)并进行离散化可得SAPF的离散数学模型^[5]为

$$\begin{cases} i_{fa}^{k+1} = i_{fa}^k + \frac{T_s}{3L} \left[(2e_a^k - e_b^k - e_c^k) + (-2S_a^k + S_b^k + S_c^k) u_{dc} \right] \\ i_{fb}^{k+1} = i_{fb}^k + \frac{T_s}{3L} \left[(-e_a^k + 2e_b^k - e_c^k) + (S_a^k - 2S_b^k + S_c^k) u_{dc} \right] \\ i_{fc}^{k+1} = i_{fc}^k + \frac{T_s}{3L} \left[(-e_a^k - e_b^k + 2e_c^k) + (S_a^k + S_b^k - 2S_c^k) u_{dc} \right] \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中,上标 k 代表第 kT_s 时刻的值。

由式(3)可知,根据 kT_s 时刻电压、电流的采样值和开关函数可预测 $(k+1)T_s$ 时刻SAPF输出电流。

2 谐波检测和指令电流跟踪

2.1 谐波检测算法

SAPF的总体控制结构包含了谐波检测和指令

电流跟踪两部分。谐波检测算法检测负载电流中的谐波分量,将需要补偿的谐波电流相加即得到相应的指令电流,然后SAPF采用MPC算法进行指令电流的跟踪。因此,谐波检测是谐波补偿的基础和前提。为了保证能选择性补偿各次谐波,谐波检测算法应能单独检测各次谐波,并且应具有较高的检测精度,各次谐波之间的检测相互不受影响。为此,文中提出采用谐振型带通滤波器进行谐波电流的检测,滤波器的传递函数为

$$G_{BPF}(s) = \frac{\omega_c s}{s^2 + \omega_c s + \omega_r^2} \quad (4)$$

式(4)中: ω_r 为谐振频率; ω_c 为滤波器带宽。

当 $\omega_r=500\pi$ rad/s时对应的谐振频率为250 Hz,带通滤波器的伯德图见图2。滤波带通滤波器在250 Hz处的幅值为0 dB,偏离250 Hz时,滤波器的增益迅速下降。此外,由图2可见滤波器在谐振频率250 Hz处的相位为 0° ,因而250 Hz的谐波经过带通滤波器没有幅值和相位的偏差,检测精度较好。由以上分析,带通滤波器可以具有良好的选择性,能实现指令频率谐波的检测。由图2还可知,通过改变 ω_c 的大小可改变滤波器的带宽进而改变其响应速度。 ω_c 越大,响应速度越快但选择性越差,实际应用中,应根据具体情况在选择性和响应速度之间折衷选择。

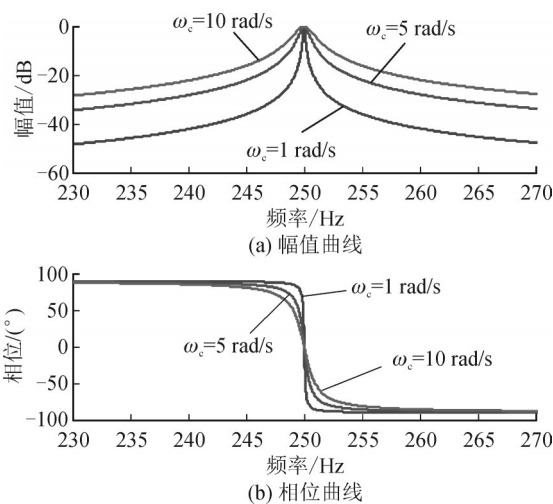


图2 带通滤波器的伯德图

Fig. 2 The bode diagram of band pass filter

采用式(4)所示的带通滤波器可选择性的检测某次谐波,若要补偿多次谐波,可采取多个带通滤波器并联的结构,见图3。

与传统的谐波检测方法相比,该方法可以直接在ABC坐标系下执行,不需要锁相环节和旋转坐标变换,不需要对正、负、零序分别检测。

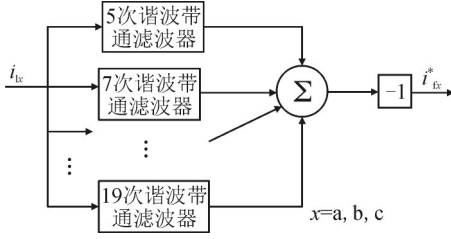


图3 谐波检测原理图

Fig. 3 Schematic diagram of harmonic current detection

2.2 指令电流跟踪策略

为了克服传统的指令电流跟踪策略控制结构复杂,响应速度慢等问题,文中提出采用MPC进行指令电流的跟踪。MPC具有建模直观、动态响应速度快、易于处理约束条件、能实现多目标控制等优点,近年来在变流器控制领域获得了广泛应用^[17-21]。

根据MPC的原理,由相应的控制目标建立与之对应的价值函数。指令电流跟踪策略的控制目标为,SAPF发出的电流完全跟踪上其指令电流,因此,建立如下价值函数

$$g = (i_{fa}^{*k+1} - i_{fa}^{k+1})^2 + (i_{fb}^{*k+1} - i_{fb}^{k+1})^2 + (i_{fc}^{*k+1} - i_{fc}^{k+1})^2 \quad (5)$$

式(5)中,上标“ $k+1$ ”为 $(k+1)T_s$ 时刻的值。

每个开关函数都有两种状态,因此,3个开关函数共有8种可能的组合。根据 kT_s 时刻的电压、电流测量值和8种可能的开关组合,利用预测方程式(3)可计算得到式(5)中 $(k+1)T_s$ 时刻的电流预测值 i_{fa}^{k+1} 、 i_{fb}^{k+1} 、 i_{fc}^{k+1} 。

由文3.1节的谐波检测算法可直接得到 kT_s 时刻及历史时刻的指令电流, $(k+1)T_s$ 时刻的指令电流可采用拉格朗日插值公式得到,即

$$i_{fx}^{*k+1} = 3i_{fx}^{*k} - 3i_{fx}^{*k-1} + i_{fx}^{*k-2} \quad x = a, b, c \quad (6)$$

根据8种开关状态组合和相关的电气测量值,依据式(5)计算出8个价值函数值,最小的价值函数值对应的开关状态组合为最优状态组合,将最优状态组合应用到SAPF中。SAPF的整体控制结构图见图4。

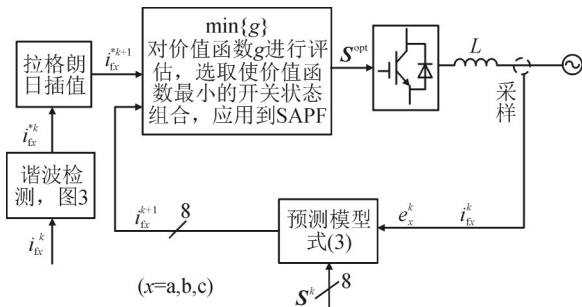


图4 SAPF控制系统框图

Fig. 4 Block diagram of SAPF control system

SAPF控制策略的流程图见图5。具体执行过

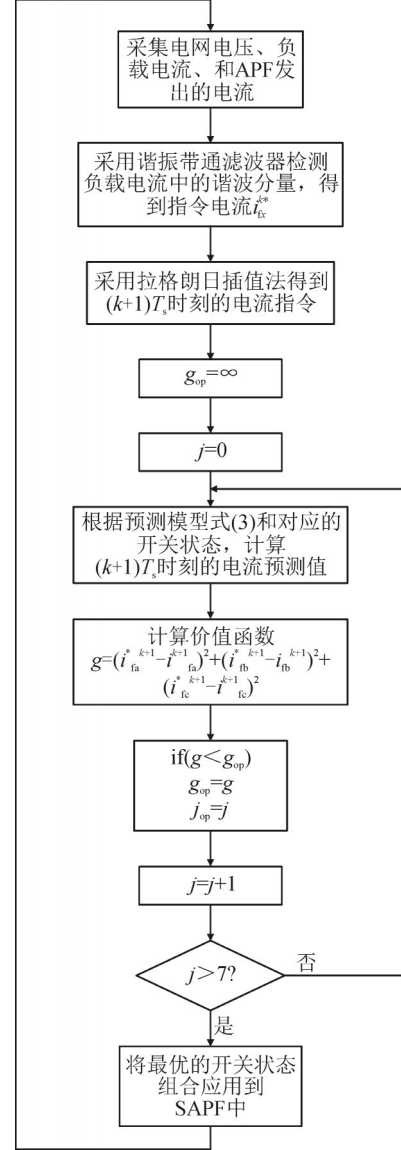


图5 所提控制策略的流程图

Fig. 5 The flowchart of the proposed control strategy

程如下:

- 1) kT_s 时刻对电网电压、SAPF发出电流和负载电流进行采样,得到 e_x^k 、 i_{fx}^k 和 i_{lx}^k 。
- 2)采用文3.1节提出的基于谐振型带通滤波器的谐波检测算法检测负载电流中的谐波,得到当前时刻的指令电流 i_{fx}^* 。
- 3)采用拉格朗日插值法得到 $(k+1)T_s$ 时刻电流指令值 i_{fx}^{*k+1} 。
- 4)根据采样值、8个开关状态组合 $\{(0,0,0), (0,0,1), (0,1,0), (0,1,1), (1,0,0), (1,0,1), (1,1,0), (1,1,1)\}$ 和预测模型式(3),计算得到8个电流预测值 i_{fx}^{k+1} ;图5中 j 从0逐渐递增至7,分别按顺序对应8个开关状态组合。
- 5)将8个电流预测值代入价值函数得到8个价值函数值。

6)对8个价值函数值进行比较,最小的价值函数值对应的开关状态组合选为最优开关状态组合,应用到SAPF中。

MPC实时得到最优开关状态,不需要进行PI参数整定,并且省略了PWM调制环节。

3 仿真和实验验证

为了验证基于谐振型带通滤波器的谐波检测方法和电流指令跟踪方法的可行性,进行时域仿真和物理实验验证。

在PSCAD中搭建三相SAPF仿真平台。仿真参数如下:电网电压380 V,额定频率50 Hz,连接电感0.3 mH, SAPF直流电压800 V,直流电容13 000 μF 。

仅补偿5次谐波时的仿真结果见图6。由图6可知,电网电流中的5次谐波几乎被完全消除, SAPF仅补偿了5次谐波,未影响其他次谐波。因此, SAPF可以进行单次补偿,且补偿精度高。

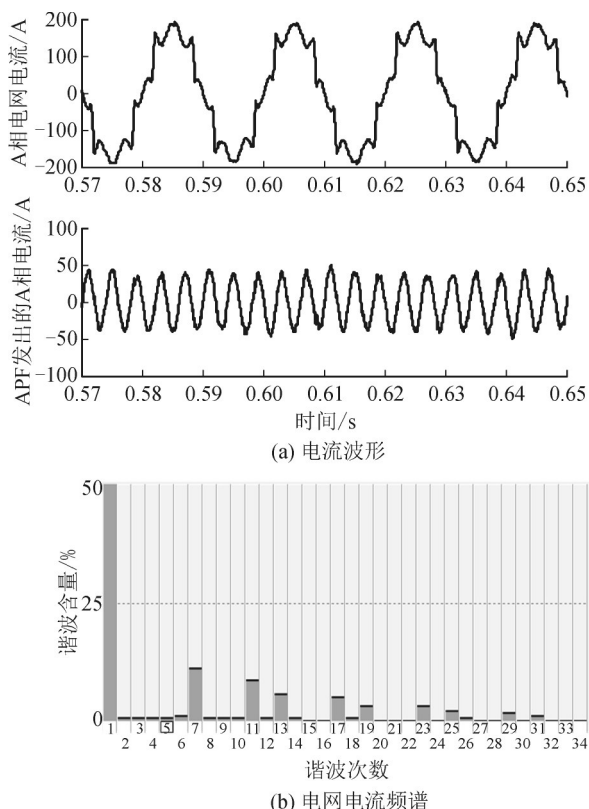


图6 仅补偿5次谐波时的仿真结果

Fig. 6 Simulation results of only 5th harmonic compensated

SAPF谐波补偿效果见图7。图7给出了稳态时的电网电流、非线性负载电流和SAPF发出的电流。由图7可知,负载电流谐波畸变较严重,波形质量差,包含了一系列奇次谐波,若不进行谐波补偿将导致电网电流畸变严重,影响电网的电能质量。

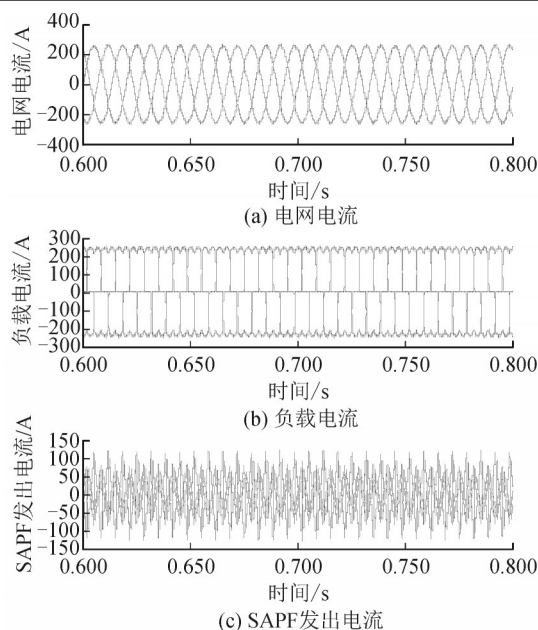


图7 SAPF谐波补偿效果仿真波形

Fig. 7 Simulation waveforms of SAPF harmonic compensation

SAPF发出与非线性负荷幅值相同相位相反的谐波电流,消除了电网电流中的谐波分量,经过SAPF谐波补偿后,电网电流呈现理想正弦波形,谐波补偿效果显著。

为了进一步验证文中所提策略,搭建三相SAPF实验平台,见图8。采用直流侧连接电阻的三相不可控整流器作为非线性负载,三相SAPF通过连接电抗器与电压公共端连接。控制系统采用DSP+CPLD的结构,32位浮点型高性能DSP芯片TMS320F28335作为核心处理器。DSP片上AD外设对三相电网电流、APF三相补偿电流、三相交流电压以及直流电压共10路信号进行采样。采样后的信号经DSP处理后进行相应的运算,主要的控制算法均在DSP中实现,PWM算法在CPLD中实现。

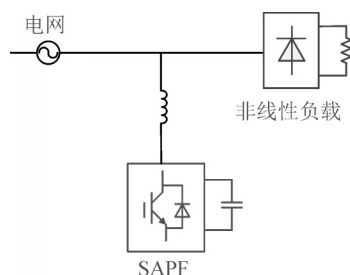


图8 实验平台单相视图

Fig. 8 Single-phase view of the experimental platform

仅补偿5次谐波时的实验波形见图9。实验结果进一步验证了SAPF选择性补偿某次谐波,并且补偿精确较高,验证了谐波检测算法的正确性。

SAPF补偿非线性负载电流各次谐波的实验波

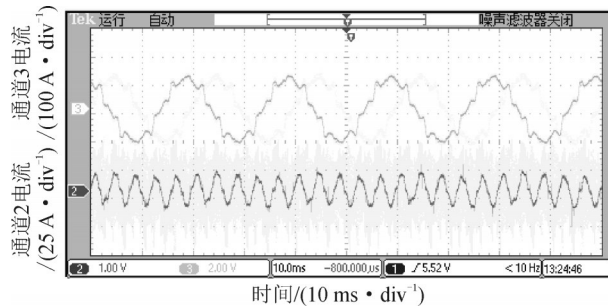


图9 仅补偿5次谐波时的仿真结果

Fig. 9 Experiment results of only 5th harmonic compensated

形见图10。由图10所示,非线性负载电流波形较差,经SAPF补偿后,电网电流波形接近理想正弦波形,SAPF的补偿效果较好。

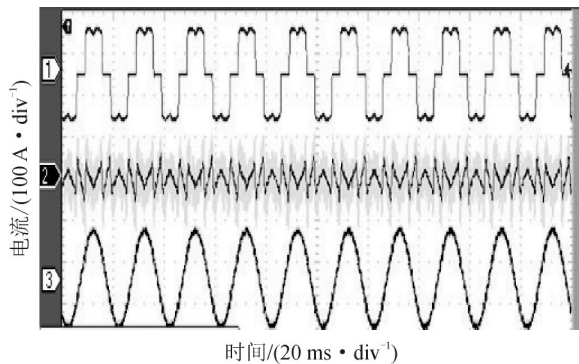


图10 SAPF谐波补偿效果实验波形

Fig. 10 Experiment waveforms of SAPF harmonic compensation

4 结语

谐波是配电网中典型的电能质量问题,SAPF是解决配网中谐波问题的一个重要手段。为了保证谐波补偿的灵活性,提出基于谐振型带通滤波器的谐波检测算法,该方法可以精确检测各次谐波,无需锁相环和旋转坐标变换。为了实现SAPF谐波电流指令的高精确跟踪控制,将MPC应用于电流指令跟踪环节,并详细给出了MPC执行过程。该方法响应速度快,控制结构简单,易于数字化实现。仿真和实验结果验证了文中所提控制策略的有效性。

参考文献:

[1] AKAGI H. Active harmonic filters[J]. Proceedings of the IEEE, 2005, 93(12): 2128-2141.
[2] 陈继开, 马修伟, 李江, 等. 并联双APF交互影响分析[J]. 电网技术, 2017, 41(3): 956-961.
CHEN Jikai, MA Xiuwei, LI Jiang, et al. Analysis on interaction of two-parallel APF[J]. Power System Technology,

2017, 41(3): 956-961.

[3] 汪玉凤, 王旭, 刘存国, 等. 基于下垂系数模糊自适应的APF直流侧电压控制策略[J]. 高压电器, 2017, 53(1): 39-44.
WANG Yufeng, WANG Xu, LIU Cunguo, et al. APF DC voltage control strategy based on adaptive fuzzy droop control[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(1): 39-44.
[4] 杨泽洲, 李尚盛, 孙建军, 等. 基于载波频率优化的级联型APF源性谐波能量不均抑制方法[J]. 高电压技术, 2017, 43(1): 104-113.
YANG Zezhou, LI Shangsheng, SUN Jianjun, et al. Source-type harmonic energy unbalance suppression method based on carrier frequency optimization for cascaded multilevel APF[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(1): 104-113.
[5] XIE C, ZHAO X, SAVAGHEBI M, et al. Multirate fractional-order repetitive control of shunt active power filter suitable for microgrid applications[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2017, 5(2): 809-819.
[6] 张树全, 戴珂, 谢斌, 等. 多同步旋转坐标系下指定次谐波电流控制[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(3): 55-62.
ZHANG Shuquan, DAI Ke, XIE Bin, et al. Selective harmonic current control based on multiple synchronous rotating coordinates[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(3): 55-62.
[7] 许胜, 费树岷, 赵剑锋. 同步旋转坐标系中谐波电流分次控制策略[J]. 电工技术学报, 2016, 31(16): 154-162.
XU Sheng, FEI Shumin, ZHAO Jianfeng. Harmonic current frequency dividing control strategy based on synchronous rotating frame[J]. Transactions of China Electro Technical Society, 2016, 31(16): 154-162.
[8] 吴振兴, 邹旭东, 黄清军, 等. 应用低次谐波无静差消除策略的三相并联型APF[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(12): 67-71.
WU Zhenxing, ZOU Xudong, HUANG Qingjun, et al. A three-phase shunt APF adopting low-order harmonics zero-steady-error control strategy for parallel active power filters[J]. Automation of Electric Power System, 2010, 34(12): 67-71.
[9] COSTA B L, BACON V D, DA SILVA S A, et al. Tuning of a PI-MR controller based on differential evolution meta-heuristic applied to the current control loop of a shunt-APF[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(6): 4751-4761.
[10] 姜卫东, 汪磊, 马伟程, 等. 一种电流跟踪误差补偿的三相有源电力滤波器的无差拍控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(20): 5605-5615.
JIANG Weidong, WANG Lei, WANG Weicheng, et al. A control method based on current tracking error compensa-

- tion of deadbeat control for a three-phase active power filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(20): 5605-5615.
- [11] 张 晓, 李新宇, 周 睿. 三相四桥臂并联型 APF 无差拍控制策略的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(20): 78-83.
- ZHANG Xiao, LI Xinyu, ZHOU Rui. Study on a deadbeat control scheme for three-phase four-leg shunt active power filter[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(20): 78-83.
- [12] ZOU Z, ZHOU K, WANG Z, et al. Frequency-adaptive fractional-order repetitive control of shunt active power filters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(3): 1659-1668.
- [13] ZHAO Q, YE Y, XU G, et al. Improved repetitive control scheme for grid-connected inverter with frequency adaptation[J]. IET Power Electronics, 2016, 9(5): 883-890.
- [14] 张学广, 马 彦, 李 瑞, 等. 两相静止坐标系下并网逆变器的重复控制策略[J]. 电工技术学报, 2016, 31(9): 85-91.
- ZHANG Xueguang, MA Yan, LI Rui, et al. Repetitive control strategy for grid-connected converters in stationary frame[J]. Transactions of China Electro Technical Society, 2016, 31(9): 85-91.
- [15] ZHOU K, YANG Y, BLAABJERG F, et al. Optimal selective harmonic control for power harmonics mitigation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(2): 1220-1230.
- [16] 武 健, 何 娜, 徐殿国. 重复控制在并联有源滤波器中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(18): 66-72.
- WU Jian, HE Na, XU Dianguo. Application of repetitive control technique in shunt active power filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(18): 66-72.
- [17] 王从刚, 何凤有, 曹晓冬. 三相电压型 PWM 整流器有限开关序列模型预测电流控制[J]. 电工技术学报, 2013, 28(12): 182-190.
- WANG Conggang, HE Fengyou, CAO Xiaodong. Finite switching sequence model predictive current control of a three-phase voltage source PWM rectifier[J]. Transactions of China Electro Technical Society, 2013, 28(12): 182-190.
- [18] 杨兴武, 雷 彪, 欧阳武, 等. 单相 H 桥级联型 APF 模型预测控制方法研究[J]. 电网技术, 2017, 41(3): 962-968.
- YANG Xingwu, LEI Biao, OUYANG Wu, et al. Model predictive control of single-phase cascaded h-bridge active power filter[J]. Power System Technology, 2017, 41(3): 962-968.
- [19] RODRIGUEZ J, KAZMIERKOWSKI M P, ESPINOZA J R, et al. State of the art of finite control set model predictive control in power electronics[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2013, 9(2): 1003-1016.
- [20] CORTES P, KAZMIERKOWSKI M P, KENNEL R M, et al. Predictive control in power electronics and drives[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(12): 4312-4324.
- [21] QUEVEDO D E, AGUILERA R P, PÉREZ M A, et al. Model predictive control of an AFE rectifier with dynamic references[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(7): 3128-3136.
- 李治艳(1990—), 女, 硕士, 工程师, 主要从事机场配电优化设计及电能质量治理方向的研究。

(上接第 104 页)

- ment and structure design of electric actuator for grounding switch[J]. High Voltage Apparatus. 2013, 49(12): 31-36.
- [13] 哈尔滨工业大学理论力学教研室. 理论力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2016.
- Department of Theoretical Mechanics, Harbin Institute of Technology. Rational mechanics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2016.
- [14] 丁 源, 李秀峰. UGNX8.0 中文版从入门到精通[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.
- DING Yuan, LI Xiufeng. UGNX8.0 Chinese version, from entry to mastery[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013.
- 赵 斐(1969—), 男, 工程师, 主要从事船用中压电器产品的研发工作。
- 戴道立(1982—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事船用电器产品的研发工作。
- 陆 旻(1968—), 男, 高级工程师, 主要从事船用中压电器产品研发工作。