

单周控制在有源电力滤波器不同拓扑中的应用比较

莫莉, 谢运祥, 陈兵

(华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

摘要: 单周控制有源电力滤波器由于不需要检测电源电压和负载电流, 不需要使用乘法器, 因而降低了成本, 简化了电路结构。近年来, 基于单周控制的单相、三相有源电力滤波器已受到广泛关注, 在传统控制方法的基础上, 很多改进控制方法能够更好地提高其补偿性能。介绍了单周控制在单相、三相有源电力滤波器中应用的各种拓扑和控制策略, 并对它们的优缺点及应用场合进行了比较。

关键词: 单周控制; 有源电力滤波器; 补偿性能; 拓扑; 控制策略

The comparison of one-cycle control applied in different topologies of active power filter

MO Li, XIE Yun-xiang, CHEN Bing

(Electric Power College, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Active power filter with one-cycle control reduces cost and simplifies circuit structure, because it eliminates the need of detecting AC line voltage, load current, and also no need for multipliers. In recent years, one-cycle control applied to single-phase and three-phase APF has been attracted much attention, and many improved control methods based on the traditional control methods can enhance APF compensation performance better. In this paper, various topologies and control strategies of one-cycle control applied to single-phase and three-phase APF are introduced, and the advantages and disadvantages as well as application occasion are compared.

Key words: one-cycle control; active power filter; compensating performance; topology; control strategy

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2008)14-0042-06

0 引言

有源电力滤波器APF (Active Power Filter)是一种用于动态抑制谐波、补偿无功的新型电力电子装置。传统的APF需要准确、实时地检测有害电流, 需要对电流进行准确地跟踪控制。这就必须使用高速的数字微处理器和高性能A/D转换器, 而跟踪电流几乎全部采用常规的PWM控制法, 这些方法均存在一定的缺陷, 如三角载波的波形畸变, 滞环控制开关频率变化, 定时控制的补偿电流跟踪误差的变化等。这些因素使得系统成本增加, 电路结构复杂, 系统稳定性降低, 补偿性能受到影响。

单周控制法作为一种非线性控制法, 最早由美国学者K.M.Smedley和S.Cuk提出^[1], 其基本思想是: 控制开关的占空比, 使每个周期内开关变量的平均值与控制参考信号相等或成一定比例, 从而消除稳态和瞬态误差。将单周控制应用于有源电力滤波器上时, 控制电路使用带置位的积分器、触发器、比

较器、一些线性元件和若干逻辑电路, 不需要乘法器, 不需要检测电源电压、负载电流, 因此降低了成本, 简化了电路结构。近年来, 不少学者致力于单周控制单相、三相APF的研究, 产生了各种改进的控制方法。本文比较了单周控制单相、三相有源电力滤波器在不同拓扑中应用的优缺点。

1 单周控制在不同拓扑APF中的应用

1.1 单相有源电力滤波器拓扑

单相有源电力滤波器的拓扑分为全桥拓扑和半桥拓扑, 如图1所示。全桥拓扑在双极模式^[2]下的控制目标方程为

$$V_m(1-2D) = R_s i_s \quad (1)$$

式中: $V_m = R_s U_c / R_c$; R_s 为电源输出电流测量电阻; D 为占空比。其中 R_c 为APF和负载电路整体的等效电阻, U_c 为APF直流侧电容电压。每个开关周期开始时, S3、S4导通, 电源电流 i_s 上升, 同时积分复位器开始对 V_m 积分; 当满足式(1)时, RS触发器输出

翻转, 驱使S1、S2导通, i_s 下降并使积分复位器复位。全桥拓扑在单极模式^[3]下的控制目标方程为

$$V_m(1-D) = R_s i_{sc} \quad (2)$$

式中, $V_m = R_s U_d / R_c$; i_{sc} 为 i_s 的绝对值。当 $V_g > 0$ 时, S2持续导通, $0 < t < DT$ 期间S3导通, $DT < t < T$ 期间S1导通; 当 $V_g < 0$ 时, S4持续导通, $0 < t < DT$ 期间S1导通, $DT < t < T$ 期间S3导通。

半桥拓扑^[2]只使用了两支开关管, $0 < t < DT$ 期间S3导通, $DT < t < T$ 期间S1导通, 其控制目标方程与式(1)相同。这种拓扑结构降低了开关损耗, 但是由于正常工作的需要, 每个电容电压都要大于电源电压, 这使得直流侧电容总电压大于两倍的电源电压, 导致开关管承受的电压是全桥拓扑的两倍, 因此较适合低压系统的应用。同时由于直流侧两电容的存在, 需要控制两电容电压的平衡。

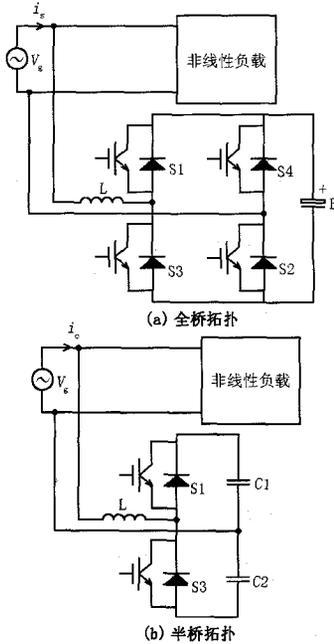


图1 单相有源电力滤波器拓扑
Fig.1 Topology of single-phase APF

1.2 三相三线制有源电力滤波器拓扑

三相三线制有源电力滤波器的拓扑分为全桥拓扑和四支开关管拓扑^[4,5], 如图2所示。全桥拓扑的控制目标方程为

$$\begin{cases} R_s i_a = V_m - V_m d_{an} / K_1 \\ R_s i_b = V_m - V_m d_{bn} / K_1 \\ R_s i_c = V_m - V_m d_{cn} / K_1 \end{cases} \quad (3)$$

式中: $V_m = U_c R_s K_1 / R_c$; i_a 、 i_b 、 i_c 分别为三相输入相电流; d_{an} 、 d_{bn} 、 d_{cn} 分别为三相下桥臂开关管的导通

占空比。每个开关周期开始时, 下桥臂三个开关管全部导通; 随后下桥臂两个管、上桥臂一个管导通; 然后下桥臂一个管、上桥臂两个管导通; 开关周期结束前, 上桥臂三个开关管全部导通。

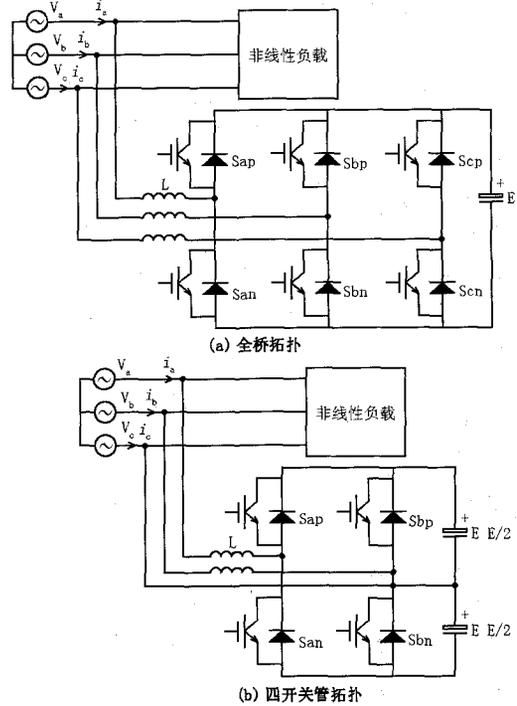


图2 三相三线制有源电力滤波器拓扑
Fig.2 Topology of three-phase three-wire APF

四开关管拓扑的目标方程为

$$V_m \begin{bmatrix} 1-2d_{an} \\ 1-2d_{bn} \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: $V_m = U_c R_s / (2R_c)$ 。可以看出控制方程中没有系数 K_1 , 因此不会因为系数取值的多少而带来直流分量。每个开关周期开始时, 下桥臂开关管都导通; 随后若 A 相电压大于 B 相电压, 则 S_{ap} 、 S_{bn} 导通, 若 A 相电压小于 B 相电压, 则 S_{an} 、 S_{bp} 导通; 开关周期结束前, 上桥臂开关管都导通。在这种拓扑下, 虽然开关损耗降低了, 但是需要平衡两电容电压^[6]。

1.3 三相四线制有源电力滤波器拓扑

三相四线有源电力滤波器可以滤除电流中的零序分量, 就主电路而言有三相变流器和四相变流器两种不同的方式^[7], 如图3所示。三相变流器作为主电路^[8,9]时, 三相电源的零线与直流侧母线中点相连, 给零线电流提供通道。在不考虑直流侧两电容电压偏差的情况下, 其控制目标方程为

$$\begin{cases} R_s i_a = V_m (1 - 2d_{an}) \\ R_s i_b = V_m (1 - 2d_{bn}) \\ R_s i_c = V_m (1 - 2d_{cn}) \end{cases} \quad (5)$$

式中: $V_m = R_s U_o / R_c$ 。此种拓扑下开关管的导通顺序与三相三线制全桥拓扑的导通顺序相同。补偿电流中正序、负序分量不会流入零线, 在流经直流侧时, 将同时影响两个电容上的电压。只有零序分量会单独影响一个电容上的电压, 使得直流侧两电容电压必有偏差, 因此需要平衡两电容电压。补偿后, 中线电流大大减小。

四桥臂APF专门用一对桥臂进行零线电流补偿, 直流侧只需要一个电容, 省去了三桥臂拓扑中电容均压的问题。这个系统可以看作四相补偿

装置^[10-12], 其控制目标方程为

$$\begin{cases} R_s i_a = V_m - V_m d_{an} / K_1 \\ R_s i_b = V_m - V_m d_{bn} / K_1 \\ R_s i_c = V_m - V_m d_{cn} / K_1 \\ \frac{1}{3} R_s i_o = V_m - V_m d_{on} / K_1 \end{cases} \quad (6)$$

式中: $V_m = U_c R_s K_1 / R_c$; i_o 为零线电流; d_{on} 为开关管 S_{on} 的导通占空比。在每个开关周期开始时, 下桥臂四个开关管先导通; 随后上桥臂一个开关管、下桥臂三个开关管导通; 接下来上桥臂两个开关管、下桥臂两个开关管导通; 然后上桥臂三个开关管、下桥臂一个开关管导通; 最后上桥臂四个开关管全部导通。

表 1 单周控制单相 APF 性能比较

Tab.1 Comparison of performance in single-phase APF with one-cycle control

控制方式	优点	缺点
双极模式控制	控制电路简单	采用峰值检测, 存在直流分量; 稳定性较差
单极模式控制	把波形负半周变为正半周调制, 电流经过峰值检测时, 其波形均为正半周波形, 消除了直流分量; 每半个工频周期内, 只有二个开关管以开关频率导通, 降低了开关损耗	控制电路增加了变压器, 以进行电压的过零检测; 增加了开关选择器件和逻辑电路, 以实现电源电压正负半周时开关管不同的导通顺序; 稳定性较差
引入纹波法	用电源电流峰值与纹波的差值代替电源电流, 使得电源电流在正弦波上下变化, 消除了直流分量; 稳定性较好	控制电路增加了采样通道检测输入电压; 若用 $v_s = v_c(1-2D)$ 代替输入电压, 则不必检测输入电压, 但需要使用两个带置位的积分器及一些加法器
双环控制	采用电流直流分量负反馈, 通过新增加的闭环措施最终将直流分量调至零, 消除了直流分量	控制电路增加了电流积分环节; 稳定性较差
双向互补控制	电压正半周采用原有控制策略, 负半周改变控制策略, 使负半周电流波形与正半周对称, 迫使电流峰底趋于参考正弦波, 彻底消除了电流直流分量; 全局稳定	控制电路增加了电流选择电路, 根据电流方向选择占空比信号; 增加了两个积分电路以消除交越失真; 增加了电流积分环节, 以消除电流直流分量
双边积分控制	用电源电流平均值跟随电压波形, 消除了纹波引起的直流分量	控制电路增加了电流选择电路; 不使用时钟信号限制开关管的开关频率, 器件开关频率是不断变化的, 不能使用占空比收敛方法判定系统稳定性

2 不同拓扑单周控制 APF 的性能比较

2.1 单相单周控制 APF 性能比较

单相APF现有的单周控制方法属于传统控制方法, 包括双极模式控制^[2], 单极模式控制^[3,13,14], 引入纹波法^[2]、双环控制^[15,16]、双向互补控制^[17]、双边积分控制^[18]。双极模式控制是最为简单的传统控制方式, 其控制电路就是单周控制有源电力滤波器控制电路的基本组成, 如图4所示。在其控制目标方程式(1)中, 要求三角波积分时间常数为开关周期的一半, 并且在一个开关周期内电源电流 i_s 基本保持不变。但当上述要求无法满足的时候, 就会在电路

中引入电流直流分量^[15]。电流直流分量的存在会引起继电保护装置误操作, 甚至导致变压器饱和等, 因此在传统控制的基础上产生了各种改进方法, 对目标方程或者控制策略进行了改进, 在图4的基础上增加了一些环节, 旨在消除直流分量。根据占空比级数收敛判据分析, 在相同的电路参数下, 双向互补策略的稳定性最好, 能够达到全局稳定, 其次是引入纹波法, 其它方法的稳定性较差^[19]。表1对上述控制方法在单相APF中应用的优缺点做出了比较。

2.2 三相单周控制 APF 性能比较

三相三线制拓扑结构的控制方式有传统控制和矢量控制两种。传统控制电路结构与图4类似,

只是使用了三个比较器和三个 RS 触发器, 将三相电流分别与 V_m 积分后的信号相比较, 驱动开关管。文献[20]指出, 使用单积分器可以自动消除积分时间常数变化对入线端电流的影响, 比三积分器方案具有更好的参数适应性。

矢量控制模式^[21-23]把电压源变换器解耦成并联连接的双升压电路, 在每相电压过零点处划分区间, 把一个工频周期划分为六个区间。在每 60° 区间内, 电压最低(高)的一相对应下(上)桥臂开关管持续导通, 对应的上(下)桥臂开关管持续关断, 其它两相以开关频率互补导通, 这两相的电流为每一区间的控制电流。矢量控制模式的控制目标方程为

$$\begin{cases} V_m \cdot \begin{bmatrix} 1-d_p \\ 1-d_n \end{bmatrix} = R_s \cdot \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_p \\ i_n \end{bmatrix} \\ d_t = 1 \end{cases} \quad (7)$$

式中: p、n 代表两控制相, t 代表该区间内开关状态不变化的一相。矢量控制电路比较复杂, 其结构框图如图 5 所示。图中, 区域选择电路根据线电压把每个工频周期分为六个区间; 电流选择电路根据区间选择对应的等效控制电流 I_p 、 I_n ; 改进单周控制核心用来实现控制目标方程; 输出逻辑电路使等效开关控制信号 Q_p 、 Q_n 应用于对应的开关管。表 2 比较了传统控制和矢量控制的优缺点。

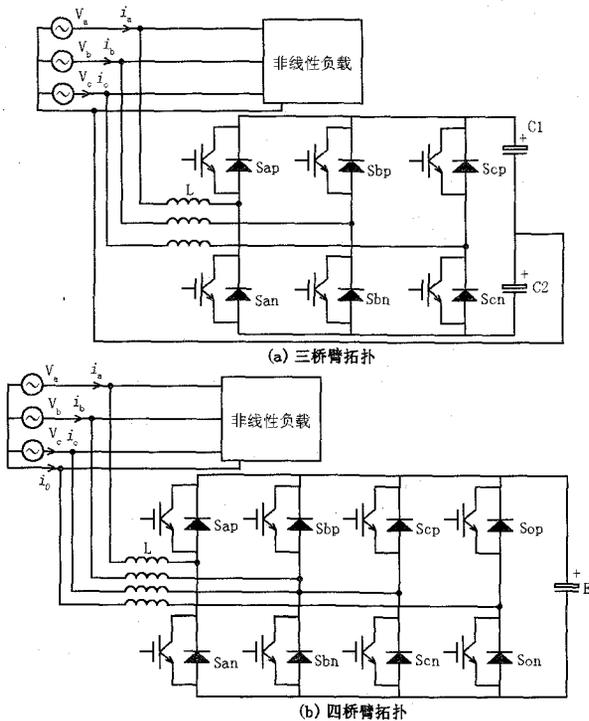


图 3 三相四线制有源电力滤波器的拓扑

Fig.3 The topology of three-phase four-wire APF

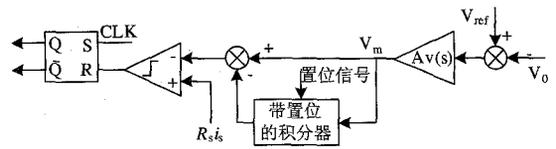


图 4 单周控制 APF 控制电路基本组成

Fig.4 The structure of control circuit in APF with one-cycle control

三相四线制三桥臂的控制方式分为双极控制和单极控制, 双极控制拓扑如图 3(a)所示, 单极控制拓扑^[24]如图 6 所示。单极控制采用三个单相单极控制 APF 分别对三相电流进行补偿, 三相之间相互独立。每个单相 APF 的一个桥臂中点通过滤波电感分别与电网并联, 另一桥臂与中线相连, 直流侧分别接一个电容。表 3 对这两种控制方式做出了比较。

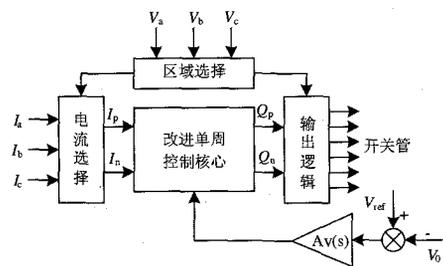


图 5 单周控制三相三线制 APF 矢量控制电路结构框图

Fig. 5 The structure of control circuit in three-phase three-wire APF with one-cycle control vector operation

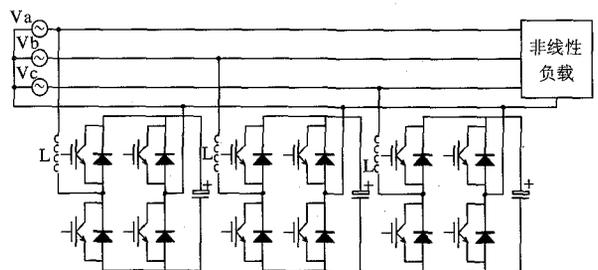


图 6 三相四线制 APF 三桥臂单极控制

Fig. 6 The unipolar operation in three-phase four-wire three-legs APF

3 不同拓扑单周控制 APF 应用场合比较

根据以上分析比较可知, 单相半桥拓扑和三相三线制四开关管拓扑, 相对于各自的全桥拓扑, 开关管电压应力增加了一倍, 这两种拓扑较适合于低压系统; 三相四线制三桥臂拓扑主电路直流侧电容

中点与系统零线相连，零线电流流过直流侧电容，需使用大容量电容，这种拓扑主要用于中、小容量场合；四桥臂拓扑的第四桥臂与系统零线相连，以抑制系统零线电流，这种拓扑一般较适用于负载功率较大的场合。现将单周控制 APF 在单相、三相三线制、三相四线制拓扑中的应用场合总结如表 4 所述。

表 2 三相三线制 APF 传统控制和矢量控制性能比较

Tab.2 The comparison of performance in three-phase three-wire APF with traditional operation and vector operation

控制方式	优点	缺点
传统控制	控制电路简单；采用单个积分器（或者三个积分器的积分时间常数发生相同变化）时，不会引入直流分量	六个开关管都工作在开关频率下，开关损耗较大；采用三个积分器时，若三个积分时间常数发生不同变化，会使电流中引入直流分量
矢量控制	只有四只开关管工作在开关频率下，开关损耗较小；控制目标方程没有系数，不会因为系数取值的多少而带来直流分量	控制电路复杂

表 3 三相四线制三桥臂 APF 双极控制和单极控制性能比较

Tab.3 Comparison of performance in three-phase four-wire three-legs APF with bipolar operation and unipolar operation

控制方式	优点	缺点
双极控制	控制电路简单	需要控制两电容电压平衡；存在直流分量
单极控制	只需控制直流侧总电压稳定；能够消除直流分量	开关管数量多，开关损耗大，控制电路复杂

表 4 不同拓扑单周控制 APF 的应用场合比较

Tab.4 Comparison of application occasion in different topologies of one-cycle controlled APF

拓扑类型	应用场合	负荷类型	
单相	全桥	中低压	电力配电网中的单相用户，如家庭、办公室、
	半桥	低压	电脑负荷、小型工厂等。
	三桥臂	小功率场合	
三相三线制	全桥	中高压	三相三线制负荷，如电
	四开关	大功率场合	机，三相整流桥等。
	管拓扑	低压	
三相四线制	三桥臂	中、小容量	三相四线制负荷，如工厂
	四桥臂	较大场合	供电、民用住宅、城市供
	四桥臂	负载功率	电等。

4 结束语

本文在整理众多国内外参考文献的基础上，总结了单周控制 APF 单相和三相多种拓扑结构类型，并通过列表的形式重点对各种控制方法的优缺点及各种拓扑的应用场合进行了详细比较。由比较可知，在 APF 的应用中，应根据实际的应用场合和负荷类型，来选择相应的拓扑结构和控制方式，通过对不同拓扑单周控制 APF 优缺点的比较，给从事这方面的工程技术人员提供一个参考平台。

参考文献

- [1] Smedley K M, Cuk S. One-cycle Control of Switching Converters[A]. In: PESC'91 Record, 22nd Annual IEEE[C]. 1991.888-896.
- [2] Smedley K M, Zhou L, Qiao C. Unified Constant-Frequency Integration Control of Active Power Filters-Steady-state and Dynamics[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2001, 16(3): 428-436.
- [3] QIAO Chong-ming, Smedley K M, Maddaleno F. A Single-phase Active Power filter with One-cycle Control Under Unipolar Operation[J]. IEEE Trans on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2004, 51(8): 1623-1630.
- [4] Qiao C M, Smedley K M. Three-phase Active Power Filters with Unified Constant-frequency Integration Control[A]. In: IPEMC[C]. 2000. 698-705.
- [5] QIAO Chong-ming, Smedley K M. Three-phase Bipolar Mode Active Power Filters[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2002, 38(1): 149- 158.
- [6] Bala S, Patel N, Femandes B G. Reduced-switch Three-phase Active Power Filter with one Cycle Control[A]. In: 2004 IEEE 35th PESC Annual Meeting[C]. 2004. 2333-2339.
- [7] 卓放, 杨君, 胡军飞, 等. 三相四线制有源电力滤波器主电路的结构形式与控制[J]. 电工电能新技术, 2000, 19(2): 1-6.
- [8] ZHUO Fang, YANG Jun, HU Jun-fei, et al. Main Circuit Structure and Control of Active Power Filter for Three-phase Four-wire System[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2000, 19(2): 1-6.
- [9] 余凤兵, 梁冠安, 钟龙翔. 单周控制三相四线制有源电力滤波器的补偿性能研究[J]. 电气传动自动化, 2006, 28(5): 23-27.
- [10] YU Feng-bing, LIANG Guan-an, ZHONG Long-xiang. Research on the Compensation Performance of Three-phase Four-wire Active Power Filter with One-cycle Control[J]. Electric Drive Automation, 2006, 28(5): 23-27.
- [11] 周林, 蒋建文, 周维维, 等. 基于单周控制的三相四线制有源电力滤波器[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(3):

- 85-88.
ZHOU Lin, JIANG Jian-wen, ZHOU Luo-wei, et al. Three-phase Four-wire Active Power Filter with One-cycle Control[J]. Proceedings of the CSEE, 2003,23(3): 85-88.
- [10] 周小军,周林,沈小莉. 单周控制四桥臂三相四线制有源电力滤波器[J]. 重庆大学学报, 2004, 27(3): 77-80.
ZHOU Xiao-jun, ZHOU Lin, SHEN Xiao-li. One-cycle Control Three-phase Four-wire Active Power Filter with Four-arm[J]. Journal of Chongqing University, 2004, 27(3): 77-80.
- [11] LI Cheng, ZOU Yun-ping. One-cycle Control Active Power Filter for Three-phase Four-wire Systems[A]. In: Power Electronics Systems and Applications Proceedings[C]. 2004.61-65.
- [12] WANG Yong, SHEN Song-hua, CAO Yu. Study on the Three-phase Four-legs Active Filter Based on One-cycle Control[A]. In:ICEMS[C]. 2005.1301-1304.
- [13] 余凤兵,梁冠安. 单极调制单周控制有源电力滤波器[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(2): 43-46.
YU Feng-bing, LIANG Guan-an. Unipolar Modulation Active Power Filter with One-cycle Control[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(2): 43-46.
- [14] 邹荣盛,刘会金,陈允平,等. 一种新型有源电力滤波器控制方法——单周控制[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(7): 75-77.
ZOU Rong-sheng, LIU Hui-jin, CHEN Yun-ping, et al. One cycle Control—a New Control Method of APF[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(7): 75-77.
- [15] 钱挺,吕征宇,胡进,等. 基于单周控制的有源电力滤波器双环控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(3): 34-37.
QIAN Ting, Lü Zheng-yu, HU Jin, et al. Dual-loop Scheme for Unified Constant-Frequency Integration Control of Active Power Filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(3): 34-37.
- [16] 钱挺,吕征宇,胡进. 新型单周控制有源电力滤波器的直流分量抑制策略[J]. 浙江大学学报(工学版), 2003, 37(2): 231-234.
QIAN Ting, Lü Zheng-yu, HU Jin. Novel Control Scheme of DC Current Suppression Used for UCI-APF[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2003, 37(2): 231-234.
- [17] 费万民,吕征宇,钱挺. 基于互补策略的新型单周控制有源电力滤波器[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(3): 50-53.
FEI Wan-min, Lü Zheng-yu, QIAN Ting. A Novel One-cycle Control Active Power Filter Based on Compleme-
ntary Control Strategies[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(3): 50-53.
- [18] Serena S, QIAO Chong-ming, Smedley K M. A Single-Phase Active Power Filter with Double-edge Integration Control[A]. In:The 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society[C]. 2001.949-953.
- [19] 徐明,周林,王伟,等. 单相有源电力滤波器的单周控制策略综述[J]. 电网技术, 2006, 30(22): 81-86.
XU Ming, ZHOU Lin, WANG Wei, et al. A Survey on One-cycle Control Strategy for Single-phase Active Power Filter[J]. Power System Technology, 2006, 30(22): 81-86.
- [20] 杜雄,周维维,罗全明,等. 单周控制三相 PFC 中积分时间常数的影响[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(9): 120-125.
DU Xiong, ZHOU Luo-wei, LUO Quan-ming, et al. The Effect of Integration Time Constant of One Cycle Controlled Three-phase Power Factor Correction[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(9): 120-125.
- [21] QIAO Chong-ming, JIN Tao-tao, Smedley K M. One-cycle Control of Three-phase Active Power Filter with Vector Operation[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2004, 51(2): 455-463.
- [22] CHEN Guo-zhu, Smedley K M. Steady-state and Dynamic Study of One-cycle Controlled Three-phase Active Power Filter[A]. In:38th IAS Annual Meeting[C]. 2003. 1075-1081.
- [23] JIN Tao-tao, LI Li-hua, Smedley K M. A Universal Vector Controller for Four-Quadrant Three-Phase Power Converters[J]. IEEE Trans on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2007, 54(2) : 377- 390.
- [24] 余凤兵,梁冠安,钟龙翔. 新型单周控制三相四线制有源电力滤波器[J]. 电气应用, 2006, 25(1): 90-93.
YU Feng-bing, LIANG Guan-an, ZHONG Long-xiang. A Novel Three-phase Four-wire Active Power Filter with One-cycle Control[J]. Electrotechnical Application, 2006, 25(1): 90-93.

收稿日期: 2007-10-29; 修回日期: 2007-12-04

作者简介:

莫莉(1982-), 女, 硕士研究生, 研究方向为有源电力滤波器, 电力电子在电力系统的应用; E-mail: jasmine_moli@yahoo.com.cn

谢运祥(1965-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力电子与电力传动, 电力电子在电力系统的应用等方面的研究;

陈兵(1977-), 男, 博士研究生, 研究方向为电力电子在电力系统的应用。