

基于主动阻尼电路的LCL型并联有源电力滤波器 谐振抑制方法

陈冬冬^{1,2,3}, 张声淇¹, 肖龙^{2,3}

(1.福州大学 电气工程与自动化学院,福建 福州 350108;

2.闽南理工学院 电子与电气工程学院,福建 泉州 362700;

3.工业自动化控制技术与应用福建省高校重点实验室,福建 泉州 362700)

摘要:由于并联有源电力滤波器(SAPF)的宽控制带宽,LCL输出滤波器的谐振问题已经成为SAPF运行中的关键问题。为了解决LCL滤波器的谐振问题,提出了基于主动阻尼电路的新型阻尼方法,以在不影响SAPF控制的情况下实现阻尼效果。所提方法基于与滤波电容器串联的辅助变换器,在辅助变换器中,谐振电流被检测并反向注入作为变换器的参考信号,从而达到对谐振电流的阻尼效果。所提方法的稳定性通过频率响应分析,并与传统方法进行比较,证明了理论上的可行性。最后,实验结果验证了所提方法的有效性,与传统方法相比,所提方法具有更好的开关谐波抑制效果。

关键词:并联有源电力滤波器;LCL滤波器;主动阻尼电路;谐波补偿

中图分类号:TM28 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd24830

SAPF Harmonic Detection Method Based on Triangle Orthogonal Principle

CHEN Dongdong^{1,2,3}, ZHANG Shengqi¹, XIAO Long^{2,3}

(1.College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, Fujian, China;

2.School of Electronic and Electrical Engineering, Minnan University of Science and
Technology, Quanzhou 362700, Fujian, China; 3.Key Laboratory of Industrial

Automation Control Technology and Application of Fujian Higher
Education, Quanzhou 362700, Fujian, China)

Abstract: Due to the wide control bandwidth of the shunt active power filter (SAPF), the resonance problem of the LCL output filter has become a key problem of the SAPF. To solve the resonance problem of the LCL filter, a novel damping method based on active damping circuit was proposed to achieve the damping effect without affecting the SAPF control. The proposed method was based on an auxiliary converter connected in series with the capacitor branch of LCL filter. In the auxiliary converter, the resonant current was detected and injected inversely as the reference signal of the converter, to achieve the damping effect on the resonant current. The stability of the proposed method was carried out through the frequency response analysis, and compared with the traditional method, which proved the theoretical feasibility of the proposed method. Finally, the effectiveness of the proposed method was verified by the experimental results, and it has better switching harmonic suppression effect compared with the traditional passive damping method.

Key words: shunt active power filter (SAPF); LCL filter; active damping circuit; harmonics compensation

并网电力电子转换器在提高电能质量方面得到了广泛的应用,特别是并联有源电力滤波器(shunt active power filter, SAPF)通常是实现高电

能质量的首选^[1]。SAPF中大多因为较好的开关纹波抑制效果而采用LCL输出滤波器,但是,LCL滤波器存在谐振问题,可能会导致电能质量不佳

基金项目:泉州市科技计划项目(2020C011R, 2019CT003)

作者简介:陈冬冬(1991—),男,博士,副教授,主要研究方向为电力电子系统与控制,Email:cdd1911@qq.com

通讯作者:肖龙(1988—),男,博士,副教授,主要研究方向为电力电子系统,Email:xdragon12015@zju.edu.cn

或导致系统不稳定。为了解决LCL滤波器的谐振问题,学者们研究了谐振阻尼方法,普遍的两种常用方法是无源阻尼^[2]和有源阻尼^[3]。无源阻尼方法是通过在LCL滤波器中额外添加电阻、电感和电容器等无源元件来实现的,而有源阻尼方法是通过修改控制器算法实现的^[4]。然而,无源阻尼方法会因为额外损耗而导致系统效率大幅降低,而有源阻尼方法则会因为控制参数的改变而导致控制器带宽限制。另一方面,在具有LCL滤波器的并网逆变器中,谐振频率和开关频率会影响滤波器和系统控制器的设计,同时,尽管在传统并网逆变器中受控信号的频率为基波频率50 Hz,但对于SAPF来说,该频率通常最高选择25次谐波的1.25 kHz,因此,控制器的截止频率必须高于这个频率,而谐振频率必须保持在控制频率和开关频率之间。由于SAPF应用中谐振频率范围较窄,因此很难设计LCL滤波器和控制器参数^[5]。

由于结构简单,无源阻尼技术常用来抑制LCL滤波器的谐振。文献[6]比较了具有LCL型SAPF的各种无源阻尼方法的性能和阻尼功率损耗。文献[7]使用基于滤波器的单回路有源阻尼方法来抑制谐振,其中带阻尼滤波器在控制回路中的谐振频率上进行调整,谐振阻尼是通过使用逆变器侧电流作为比例反馈内环控制来提供的,使它具有固有的阻尼特性。另一项关于有源阻尼方法的研究是通过使用带有一阶低通滤波器的采样延迟进行的。文献[8]提出并分析了两种有源阻尼策略,例如电容器电流反馈和基于陷波滤波器的方法。文献[9]提出了一种基于自适应陷波滤波器的有源阻尼方法,用于带有LCL滤波器的SAPF系统,以确保对电网电感变化的灵活谐振阻尼,因此有助于提高阻抗变化下的系统稳定性。无源阻尼方法有增加功率损耗的缺点,而有源阻尼方法有会导致系统控制器带宽降低的缺点。

在本文中,首先提出并研究了一种主动阻尼控制的方法,用于带LCL滤波器的SAPF系统,用以实现在宽控制器带宽下保持低阻尼损耗的系统特性。详细介绍了所提系统的模型和控制策略,进一步分析了所提主动阻尼控制方法的等效电路图和频率特性,并据此通过波特图对所提系统的稳定性进行了深入的分析。通过分析可以看出,本文提出的主动阻尼控制电路比传统无源

阻尼方法具有更低的阻尼损耗,同时比有源阻尼算法具有更高的控制带宽,实现了阻尼损耗和控制带宽的折中。最后,通过综合实验研究验证了所提出的主动阻尼控制系统的有效性。

1 系统模型

本文所提出的带有主动阻尼方法的LCL型SAPF系统框图如图1所示。图中,使用了两个三相半桥变换器,每个变换器都有其控制器。主变换器用于补偿谐波电流,辅助变换器用于抑制LCL滤波器的谐振。辅助变换器通过接口电感连接到滤波电容器。LCL滤波器是根据文献[6]给出的设计方法设计的。主逆变器产生具有开关频率及其倍频的开关纹波谐波(本文取10 kHz)。因此,辅助逆变器的输出滤波器设计为在20 kHz时与滤波电容器具有零电阻,以更好地衰减主逆变器在该频率下的纹波谐波,并防止传递到电网。所提出系统的参数值如下:1)电网:电压 $V_g=380$ V,频率 $f_g=50$ Hz;2)SAPF系统:直流侧电压 $V_{dc}=750$ V,开关频率 $f_s=10$ kHz,逆变器侧电感 $L_i=180$ μ H,滤波电容 $C_f=30$ μ F,网侧电感 $L_g=60$ μ H,直流侧电容 $C_{dc}=25$ mF;3)辅助变换器:直流侧电压 $V_{dcaux}=130$ V,开关频率 $f_{saux}=20$ kHz,滤波电感 $L_{aux}=500$ μ H,直流侧电容 $C_{dcaux}=2$ mF。

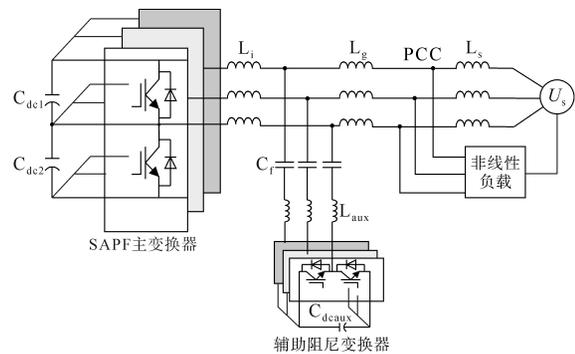


图1 SAPF系统框图

Fig.1 System configuration of shunt active power filter

2 系统控制方法

2.1 主动阻尼变换器的控制方法

有源阻尼变换器的控制算法如图2所示。有源阻尼变换器的直流侧能量由电网提供,因此,类似于SAPF系统,不需要外部能源。此外,系统需要测量电容器电流以产生参考谐振电流。谐振电流是通过使用陷波滤波器获得的,陷波滤波器陷波频率设计在LCL滤波器谐振频率处,然后

通过从电容器电流减去滤波后的电流信号来获得谐振信号。陷波滤波器的传递函数如下:

$$G_n(s) = \frac{s^2 + \omega_n^2}{s^2 + Qs + \omega_n^2} \quad (1)$$

式中: ω_n 为谐振频率; Q 为品质因数,决定了陷波滤波器的抑制带宽和增益。

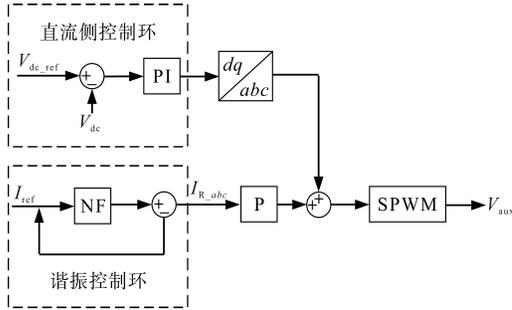


图2 主动阻尼变换器的控制算法

Fig.2 Control algorithm of active damping converter

主动阻尼变换器被控制在对谐振频率显示出阻尼电阻的特性。带有有源阻尼变换器的LCL滤波器的简化电路如图3所示。图中的 $G_d(s)$ 、参数 K 是有源阻尼变换器的传递函数,使它在谐振频率下显示出恒定电阻特性。

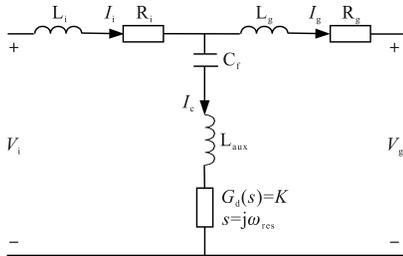


图3 带有主动阻尼装置的LCL滤波器的简化电路图

Fig.3 Simplified circuit diagram of LCL filter with active damping device

调整有源阻尼变换器的电阻在谐振频率下的最佳电阻值为 0.7Ω 。带有有源阻尼变换器的LCL滤波器的传递函数可以通过辅助电感来获得,如下式所示:

$$G_{Vi-lg}(s) = \frac{C_f L_{aux} s^2 + C_f K s + 1}{A s^3 + B s^2 + C s} \quad (2)$$

其中

$$\begin{aligned} A &= C_f (L_{aux} L_i + L_{aux} L_g + L_i L_g) \\ B &= K C_f (L_i + L_g) \\ C &= L_i + L_g \end{aligned}$$

式中: $G_{Vi-lg}(s)$ 为LCL滤波器的传递函数。

2.2 SAPF系统控制方法

带有LCL滤波器SAPF的控制框图如图4所示。传统SAPF的控制器可分为3个主要部分:谐波提取、直流母线电压控制和谐波电流控制器。

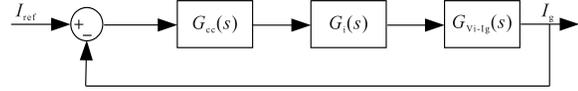


图4 带LCL滤波器的SAPF系统控制框图

Fig.4 Control block diagram of SAPF with LCL filter

参考信号 I_{ref} 由直流母线电流参考 I_{dcref} 和负载的谐波分量 I_{lh} 组成。直流侧控制电流是通过使用PI控制调节直流侧电压获得的。参考电流跟踪在 $d-q$ 坐标系的PR控制中执行。谐波电流参考通过同步参考系方法获取。在同步旋转坐标系方法中,谐波电流分量从 $a-b-c$ 坐标系转换为 $d-q$ 坐标系。基波电流分量被转换为直流信号,而负和正谐波电流分量保持为交流信号,其中, $(6n\pm 1)$ 次谐波在 $d-q$ 旋转坐标系中转化为 $6n$ 次谐波。因此,谐波控制器在 $d-q$ 坐标系中的 $6n$ 次谐波上(50次谐波以内, n 取8以内)。电流控制器的传递函数如下式所示:

$$G_{cc}(s) = K_{pec} + \sum_{n=1}^8 K_{rec} \frac{s}{s^2 + (6n)^2 \omega_1^2} \quad (3)$$

式中: ω_1 为基波角频率; K_{pec} 为比例系数,决定控制器带宽; K_{rec} 为谐振控制器增益,以确保对 $6n$ 次谐波分量的控制。

参数 K_{pec} 确定在电网连接期间需要控制临界频率。另一方面,参数 K_{rec} 用于25次以内谐波分量的控制。

3 控制系统稳定性分析

由以上分析可知,所提出系统的开环传递函数如下式所示:

$$G_{open}(s) = G_{cc}(s) G_i(s) G_{Vi-lg}(s) \quad (4)$$

式中: $G_i(s)$ 为SAPF变换器的传递函数。

电流控制器的开环传递函数 $G_{cc}(s)$ 见式(3),SAPF变换器传递函数 $G_i(s)$ 取为 $V_{dc}/2$ 。对于无阻尼的LCL滤波器,使用简单的电阻器无源阻尼和本文的主动阻尼控制方法检验SAPF系统的稳定性。带主动阻尼变换器的LCL滤波器的传递函数在式(2)中给出。另一方面,无源阻尼情况下, L_{aux} 等于0, K_{is} 是所有频率下的阻尼电阻值,此外,对于没有谐振阻尼的LCL滤波器, K_{is} 为零。

图5展示了无阻尼、有无源阻尼以及所提出的主动阻尼控制方法的开环传递函数的波特图。从图5a中可以看出,无阻尼的LCL型滤波器在 3.87 kHz 有谐振峰,导致系统不稳定。当系统加入无源阻尼和本文的主动阻尼方法后,谐振峰如图5b和图5c所示。当应用 0.7Ω 的电阻进行无

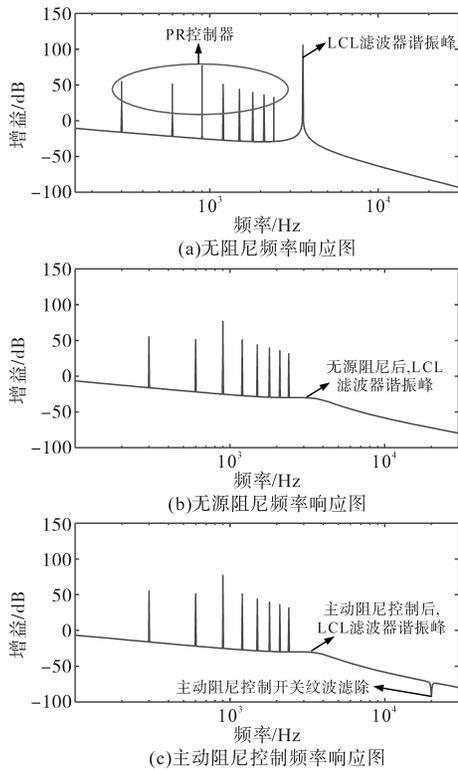


图5 系统的频率响应

Fig.5 Frequency responses of the system

源阻尼后,观察到谐振频率处的幅度为 -13.3 dB,可以确保充分抑制谐振峰。但是一旦应用无源阻尼后,LCL滤波器的抑制性能在高频下会降低,其中在 10 kHz和 20 kHz的开关频率处,幅度分别为 -50 dB和 -60 dB。

另一方面,可以看出主动阻尼控制在谐振频率处具有与无源阻尼方法相似的频率响应特性。此外,它同时具有LCL滤波器系统的特性,在谐振频率到2倍开关频率的频率上没有阻尼。此外,它在2倍开关频率处具有陷波特性和更好的开关纹波衰减。

因此,基于上述的分析可以看出,本文所提出的主动阻尼控制电路具有与无源阻尼方法相似的控制带宽,且在2倍开关频率处具有更好的谐波特性,这个控制带宽远远高于有源阻尼方法。同时,由于主动阻尼控制电路采用开关变换电路,其主要损耗为开关器件的开关损耗与导通损耗,而传统的无源阻尼方法采用的为电阻器件,因此在阻尼损耗方面本文所提出的主动阻尼控制电路是优于传统无源阻尼电路的。

4 实验验证

为了验证本文所设计的主动阻尼方法能够有效地消除LCL型SAPF的谐振峰,设计了相应

的SAPF和主动阻尼装置样机,如图6所示,样机的主要参数如第1节所述。

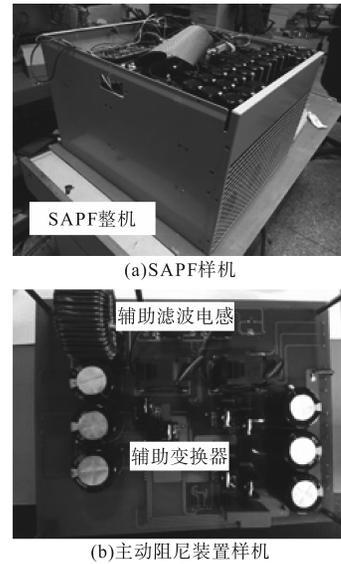


图6 实验样机图片

Fig.6 Picture of experiment prototype

本文首先研究了LCL滤波器对高频谐波的影响,并与单L滤波器进行了比较。通过这种方式,在谐波补偿期间使用SAPF连接单L滤波器和无阻尼的LCL滤波器。SAPF输出电流及其频谱分析如图7所示。

从波形中可以看出,LCL滤波器有效地减轻了高频开关纹波谐波,当使用单L滤波器时,开关频率附近纹波值较大,约为 2 A,而LCL滤波器开关频率 10 kHz附近的开关谐波峰值约为 0.32 A,降低了约 84% 。但是,LCL滤波器在 3.48 kHz自然谐振峰处具有谐振,谐振电流接近 0.44 A。需要注意的是,谐振效应有被电感和线路电阻抑制,这些电阻对系统表现出无源阻尼效应,否则,系统上会出现更高的谐振电流。

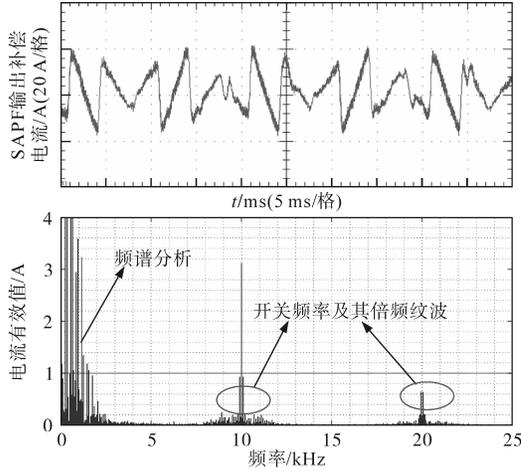
进一步地,本文将所提出的主动阻尼装置加入到系统中,当装置运行时,SAPF系统输出电流波形及其FFT分析结果如图8所示。

结果表明,谐振峰处的谐振电流峰值约为 0.12 A,LCL滤波器的谐振已被所提的主动阻尼方法充分抑制。为了更好地比较主动阻尼方法的有效性,控制主动阻尼装置的关断,观察关断前、后的输出波形变换,如图9所示。

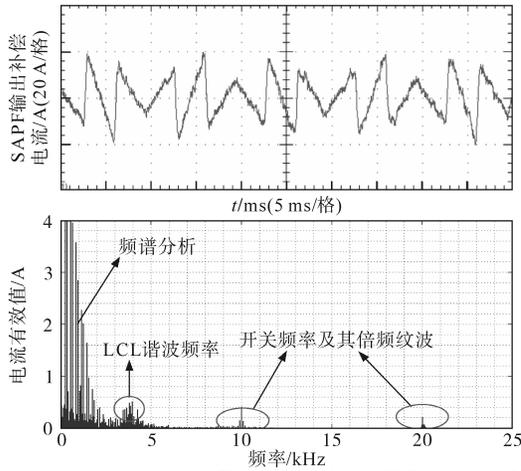
由图9可见,开启主动阻尼装置后,谐振峰值得到了很好的抑制,输出电流波形中的高频毛刺基本消失,电网电流THD也显著降低,而关闭主动阻尼装置后谐振电流分量放大严重,谐振电流

分量逐渐增大,模块输出电流波形出现高频振荡,电网电流波形出现畸变。

图10为加入有源阻尼之后的电网电流、负载电流和补偿电流波形图。



(a)单L滤波器SAPF输出电流波形及其频谱分析图



(b)无阻尼的LCL滤波器SAPF输出电流波形及其频谱分析图

图7 SAPF输出电流波形和频谱分析

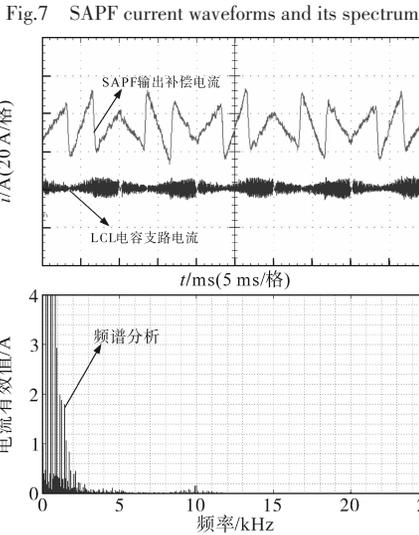


图8 主动阻尼方法SAPF输出电流波形及其频谱分析

Fig.8 SAPF current waveforms and its spectrum with active damping method proposed

从实验结果可以看出,所提的主动阻尼策略可以有效抑制系统谐振,并且不影响SAPF的谐波补偿功能和谐波补偿精度,负载电流的谐波畸变被SAPF的输出电流很好地补偿,使得电网电流呈现正弦化。

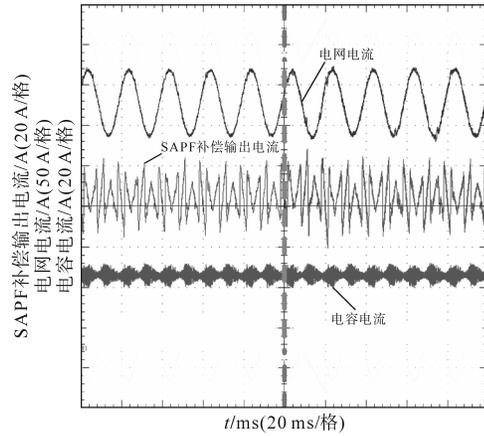


图9 主动阻尼装置关断前、后的电流波形

Fig.9 Waveforms during enabling and disabling damping function with proposed method

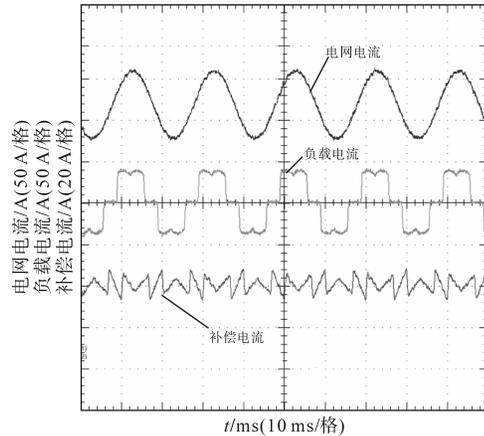


图10 主动阻尼装置运行时电网电流、负载电流和补偿电流波形

Fig.10 Waveforms of grid current, load current and compensation current with proposed method

5 结论

在本文中,针对具有LCL型SAPF提出了一种新型主动阻尼方法。所提出的阻尼方法基于带阻尼控制的辅助变换器,详细介绍了该辅助变换器的结构和控制算法,并通过波特图分析了所提方法的稳定性。所提方法与传统的无源阻尼方法相比,具有更低的阻尼损耗;另一方面,与有源阻尼方法相比,具有更宽的控制带宽;同时理论上,所提方法在开关频率和2倍开关频率处的纹波处具有比无源阻尼更好的抑制效果。

对所提出的系统进行了实验测试,以验证主动阻尼装置的稳定性和性能。实验结果表明,所

提方法显示出与传统无源阻尼方法具有几乎相同的谐振抑制性能,可以保证SAPF的稳定运行。

参考文献

- [1] 陈冬冬,肖龙,李智敏,等.一种APF直流侧电压波动分析及其吸收电路设计[J]. 电力电子技术,2021,55(2):40-44.
CHEN Dongdong, XIAO Long, LI Zhimin, et al. An APF DC-link voltage ripple analyses and absorbing circuit design[J]. Power Electronics, 2021, 55(2): 40-44.
- [2] 胡中功,吴彬,邓晓虹,等. 并联型有源电力滤波器输出滤波器的阻尼控制[J]. 武汉工程大学学报,2014,36(5):59-63.
HU Zhonggong, WU Bin, DENG Xiaohong, et al. Damping control of filter based on shunt active power filter[J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2014, 36(5): 59-63.
- [3] 张国荣,吴飞翔,解润生,等. LCL有源电力滤波器单电流反馈有源阻尼方法[J]. 电力电子技术,2018,52(9):112-115.
ZHANG Guorong, WU Feixiang, XIE Runsheng, et al. A single-current-feedback active damping method for active power filter with LCL filter[J]. Power Electronics, 2018, 52(9): 112-115.
- [4] 孙强. 多参数影响的有源阻尼LCL变换器控制系统及稳定性研究[D]. 天津:天津大学,2017.
SUN Qiang. The study on control system with its stability of active damping LCL converter considering multi-parameters effect [D]. Tianjin: Tianjin University, 2017.
- [5] SUN Y, LIU Y, SU M, et al. Review of active power decoupling topologies in single-phase systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(7): 4778-4794.
- [6] BÜYÜK M, TAN A, BAYINDIR K C, et al. Analysis and comparison of passive damping methods for shunt active power filter with output LCL filter[C]//2015 Intl Aegean Conference on Electrical Machines & Power Electronics (ACEMP), 2015 Intl Conference on Optimization of Electrical & Electronic Equipment(OPTIM)& 2015 Intl Symposium on Advanced Electromechanical Motion Systems (ELECTROMOTION), 2015: 434-440.
- [7] 许晓笛,李子欣,楚遵方,等. 三相四线三电平APF并联运行有源阻尼方法[J]. 电工电能新技术,2017,36(7):12-19.
XU Xiaodi, LI Zixin, CHU Zunfang, et al. Active damping method of three-phase four-wire three-level multi-APF system [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2017, 36(7): 12-19.
- [8] GE H, ZHEN Y, WANG Y, et al. Research on LCL filter active damping strategy in active power filter system[C]//2017 9th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC), 2017:476-481.
- [9] BÜYÜK M, TAN A, TUMAY M. Improved adaptive notch filter-based active damping method for shunt active power filter with LCL-filter[J]. Electrical Engineering, 2018, 100(3):2037-2049.

收稿日期:2022-12-02

修改稿日期:2023-01-13