

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.05.018

三电平 APF 的 LCL 滤波器设计和分析研究*

俞年昌, 杨家强*

(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要:针对有源电力滤波器(APF)补偿谐波电流时纹波较大的问题,对二极管箝位型(NPC)三电平 APF 的 LCL 滤波器设计和分析方法进行了研究。分析了滤波电感、电容和阻尼电阻等各个参数对 LCL 滤波器的影响,给出了 LCL 滤波器的设计原则和约束条件,提出了一种简单实用的 LCL 滤波器设计方法。首先,根据有源电力滤波器需要补偿谐波电流的最高次数和开关频率选定 LCL 滤波器谐振频率;然后,为解决低频谐波电流和高频开关纹波电流互相干扰的问题,同时为了减小电感体积、节约成本,根据设计原则和约束条件对 LCL 的各个参数进行了优化设计;最后,在 5 kVA 三电平并联型有源电力滤波器实验平台上进行了实验验证。实验及研究结果表明,该设计方法在保证有源电力滤波器高补偿带宽的同时可以有效降低其纹波电流。

关键词: LCL 滤波器;有源电力滤波器;三电平逆变器

中图分类号:TM72;TP477

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2014)05-0624-05

Improved design of LCL-filter based active power filters using NPC converter

YU Nian-chang, YANG Jia-qiang*

(School of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Aiming at achieving low switching frequency current for active power filters (APF), the design of LCL-filter for APF using neutral point clamped converter was studied. Affections of different parameters were analyzed. Then, constraints and principles on LCL-filter design were concluded. A simple and practical design procedure of LCL-filter was proposed subsequently. Firstly, the resonant frequency of LCL-filter was set according to the highest harmonic order and switch frequency. Then, the parameters of the LCL-filter were optimized based on the design principles and constraints with smaller volume and lower cost. Finally, the theory was verified by experiment in a 5 kVA shunt APF systems. The results indicate that, the proposed design can effectively eliminate the switching current without reducing the bandwidth of APF.

Key words: LCL-filter; active power filters(APF); NPC converter

0 引 言

随着电力电子设备等非线性负载的广泛应用,谐波和无功问题日益凸显。而有源电力滤波器(APF)正是解决这一难题的有效手段^[1-2]。在当前低压领域 APF 已经日益完善,而大功率电力电子装置的应用使得大功率中高压 APF 的需求日益迫切。对此,学术界

提出了三电平 APF 的方案。相比于传统的两电平 APF,三电平 APF 可以承受更高的电压,具有更低的谐波畸变率、更低的开关频率和更少的损耗,因此更加适用于中高压大功率领域。三电平 APF 要求具有较高的补偿带宽和较低的开关纹波电流。而 LCL 滤波器可以兼顾低频段增益和高频段的衰减,在同样的开关频率下,LCL 所需电感更小,在大功率的场合可以有效地减

收稿日期:2014-01-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51177150)

作者简介:俞年昌(1985-),男,福建龙岩人,主要从事电能质量和多电平逆变器方面的研究。E-mail:ncyu08@163.com

通信联系人:杨家强,男,副教授,硕士生导师。E-mail:yjq1998@163.com

小系统的体积和降低成本,因此 LCL 滤波器在大功率的场合具有广阔的应用前景^[3]。但 LCL 滤波器是一个三阶系统,存在谐振现象,需要增加阻尼环节来抑制谐振,以确保系统的稳定性。LCL 的参数设计和稳定控制是现阶段研究热点,不少学者都对此进行了相关的研究,但大多是关于两电平系统,对于三电平 APF 系统 LCL 的设计和控制的较少,因此对三电平 LCL 滤波器的进一步研究是很有必要的。

Liserre 等^[4]首次提出了电压源型逆变器(VSI)的 LCL 滤波器设计方法,给出了一般 PWM 整流器的 LCL 滤波器设计和控制系统分析方法。文献[5]对 APF 的 LCL 滤波器各个元素进行了分析比较,给出 LCL 滤波器设计的一般步骤,但该文的电流跟踪方法是开关频率不确定的滞环控制,不能完全适用于其他固定开关频率的电流跟踪控制。文献[6-7]给出了三电平 PWM 整流器的 LCL 设计方法,对于仅考虑基波的常规 PWM 整流器具有良好的效果,但不适用于三电平 APF。常规的 PWM 整流器输出的正弦基波电流,而 APF 需要输出各次谐波电流,这对于 LCL 滤波器提出了更高的要求, LCL 滤波器必须具有更大的带宽和更好的稳定性。

本研究以三电平 APF 为研究对象,对三电平 APF 的开关纹波电流进行详细分析,讨论 LCL 滤波器的各个参数对系统性能的影响;然后,提出基于三电平 APF 的 LCL 滤波器的设计与控制方法;根据所需要补偿的谐波的最高次数来确定 LCL 滤波器谐振频率,进而在设计原则和约束条件下得到 LCL 滤波器的各个参数。

1 LCL 滤波器分析

三电平 APF 系统如图 1 所示。系统主要包括三电平逆变器、LCL 滤波器和非线性负载 3 部分。

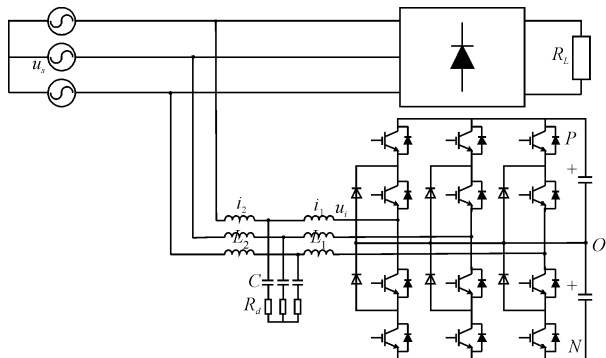


图 1 带 LCL 滤波器的三电平有源电力滤波器结构图

为了设计一个适合的 LCL 滤波器,首先需要给出 LCL 滤波器的设计原则。

1.1 LCL 滤波器设计原则

LCL 滤波器的设计主要从性能、成本、效率、稳定性方面进行考虑,具体包括纹波电流的衰减、电感成本、损耗和抑制谐振等。

1.1.1 开关纹波的最大衰减

忽略阻尼电阻的条件下,根据 LCL 的单相等效电路可以得到相应的传递函数:

$$\begin{cases} G_{1i}(s) = \frac{i_1(s)}{u_i(s)} = \frac{(1/L_1)(s^2 + 1/L_2C)}{s(s^2 + (L_1 + L_2)/L_1L_2C)} \\ G_{2i}(s) = \frac{i_2(s)}{u_i(s)} = \frac{1/L_1L_2C}{s(s^2 + (L_1 + L_2)/L_1L_2C)} \\ H_{21}(s) = \frac{i_2(s)}{i_1(s)} = \frac{1/L_2C}{s^2 + 1/L_2C} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $G_{1i}(s)$ —输出电压 u_i 到逆变器侧电流 i_1 的传递函数, $G_{2i}(s)$ —输出电压 u_i 到网侧电流 i_2 的传递函数, $H_{21}(s)$ —逆变器侧电流 i_1 到网侧电流 i_2 传递函数。

为了消除开关纹波, $G_{1i}(s)$ 、 $G_{2i}(s)$ 和 $H_{21}(s)$ 的幅值应尽可能小。由式(1)可知,对于高频开关纹波, $G_{1i}(s) \approx 1/L_1s$,因此选取合适的逆变器侧电感 L_1 是非常重要的。从等效电路角度分析,对于高频分量,滤波电容相当于短路, C 与 L_2 的并联阻抗接近于零, i_1 由 L_1 自身感抗决定。所以, L_1 的设计主要考虑对 i_1 纹波电流的抑制。

1.1.2 减小电感成本

过大的滤波电感会导致逆变器输出电压损失、减小低频段增益,而受限于直流母线电压,逆变器输出的最大交流电压是有限的。因此总电感量在实际应用中是一个确定的约束条件。同时考虑到经济成本和系统体积,在满足系统性能的前提下应尽可能地降低电感值。

1.1.3 损耗的最低化

由于系统存在不稳定的谐振峰,LCL 滤波器需要进行谐振抑制,采用电容支路串联阻尼电阻是一种常用的做法。过大的阻尼电阻将导致出现实数极点,从而导致 LCL 对所有频率电流的衰减,影响 APF 电流的补偿性能。较小的阻尼电阻可以减少系统损耗,但过小的阻尼电阻又可能影响系统的稳定性。一般阻尼电阻的大小可根据谐振点电容阻抗选取:

$$R_d = 1/\omega_{res}C = 1/2\pi f_{res}C \quad (2)$$

1.2 设计约束条件

在确定了设计的原则后,还需要对设计的约束条件进行考虑,LCL 滤波器设计约束条件包括电感大小、电感比例、电容、阻尼电阻和谐振频率。

1.2.1 总电感约束条件

LCL 滤波器总电感设计主要考虑到 LCL 滤波器对纹波电流的抑制和电流的跟踪能力。三电平 APF 的 LCL 滤波器设计不同点在于电平的增加带来的电流脉动变化。L 型滤波器的三电平 APF 电压平衡方程可以简化为:

$$L \frac{di_a}{dt} = e_a - \left(\frac{V_{dc}}{2} S_a - \frac{V_{dc}}{6} \sum_{i=a,b,c} S_i \right), (S_i = 1, 0 \text{ or } -1) \quad (3)$$

式中: e_a —a 相电网电压, S_i —开关函数。

为了保证电流的快速追踪能力,电感值不能过大,需要满足:

$$L \leq V_{dc} / 3 I_m \omega_n = V_{dc} / 6 \pi f I_m \quad (4)$$

式中: I_m —APF 的额定电流。

不同电感比率条件下的 LCL 波特图如图 2 所示,从纹波电流来看纹波电流在电流峰值最严重,考虑电流峰值处一个周期内 ($\omega t = \pi/2$) 的电流瞬态过程可以得到:

$$L \frac{di_a}{dt} = \begin{cases} E_m + V_{dc} (S_b + S_c) / 6 \approx L \Delta i / T_{off}, (0 \leq t \leq T_{off}) \\ E_m + V_{dc} (-2 + S_b + S_c) / 6 \approx L \Delta i / T_{on}, (T_{off} \leq t \leq T_{on}) \end{cases} \quad (5)$$

式中: E_m —电网相电压幅值。

合并式(5)可以化简得到:

$$L \frac{\Delta i}{T_s} = \left(\left[\left(E_m + \frac{V_{dc} (S_b + S_c)}{6} \right) - \frac{V_{dc}}{6} \right]^2 - \frac{V_{dc}^2}{36} \right) / \left(-\frac{V_{dc}}{3} \right) \quad (6)$$

式(6)的最大值为 $V_{dc}/12$, 此时纹波电流最大。APF 中的纹波电流一般为额定电流的 10% ~ 25%, 本研究选取纹波电流为额定电流的 20%, 得到 L 的下限:

$$L \geq 5 V_{dc} T_s / 12 I_m \quad (7)$$

当不考虑阻尼电阻时,对于开关纹波电流:

$$G_{2i}(s) = \frac{1}{(L_1 + L_2)s} \cdot \frac{1}{1 + (s/\omega_{res})^2} \leq \frac{1}{5(L_1 + L_2)s} \quad (8)$$

因此仅考虑滤除纹波电流效果时 LCL 的总电感值应为单电感 L_T 的 1/5。考虑到谐振影响总电感的取值会取得大一些,本研究选取 L_T 的 1/3 为参考值:

$$L_T = L_1 + L_2 \geq 5 V_{dc} T_s / 36 I_m \quad (9)$$

1.2.2 电容约束条件

由式(1)中的 $G_{2i}(s)$ 和 $H_{2i}(s)$ 可知,滤波电容 C 越大,LCL 高频衰减能力越强,但同时需消耗的无功越多。为保证系统的高功率因数,一般要求无功不超过 5% 的额定功率:

$$C \leq 5\% P_n / (3 \times 2 \pi f_n U_n^2) \quad (10)$$

1.2.3 电感比例

考虑式(1)中 $G_{1i}(s)$ 包括 2 个零点和 3 个极点(其中 1 个极点是 0):

$$\begin{cases} z = \pm j \sqrt{\frac{1}{L_2 C}}, p = \pm j \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_2 C}} \\ L_2 = \lambda L_1, p = \lambda' z = \sqrt{1 + \lambda} z \end{cases} \quad (11)$$

显然当 λ 变大时,极点会远离零点,这将增大超调幅值,影响 LCL 的稳定性。在确定总电感量后, L_1 和 L_2 的比例关系对滤波效果也有影响。定义 $L_2 = \lambda L_1, L_T = L_1 + L_2$ 可得:

$$G_{2i}(s) = \frac{i_2(s)}{u_i(s)} = \left[1 / \left(\frac{\lambda L_T^2}{(1 + \lambda)^2} \right) \right] / \left[s \left(s^2 + 1 / \left(\frac{\lambda L_T}{(1 + \lambda)^2} \right) \right) \right] \quad (12)$$

当 $\lambda = 1$ 时,取得最小值,即系统的滤波效果最好^[8]。本研究在 L_T 和 C 值不变的条件下,改变 λ 大小,得到不同 λ 的幅频特性图。由图 2 可知,选取 $\lambda = 1$ 时,谐振频率最小,对高频纹波的滤波性能最好。

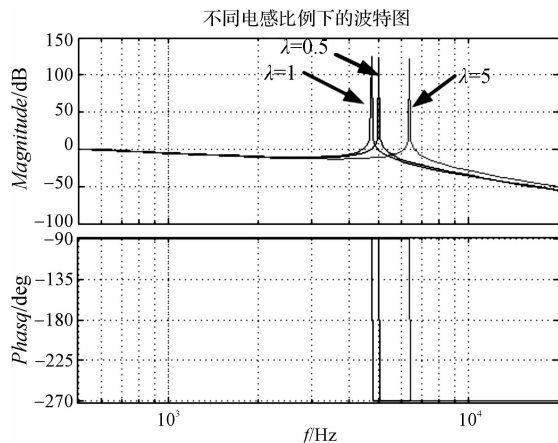


图 2 不同电感比率条件下的 LCL 波特图

1.2.4 谐振频率限制

通过 LCL 滤波器的电流不仅包括了低频谐波电流还包括了高频开关纹波电流。如果选取一个较低的谐振频率 f_{res} , 将影响低频电流的增益,导致补偿效果不佳。为保证谐波补偿的效果,谐振频率 f_{res} 应该尽量取高值,而过高的谐振频率会影响滤波器对纹波电流的抑制能力。因此,与常规的 PWM 逆变器不同,有源电力滤波器的 LCL 谐振频率应该在补偿电流的最高谐波次数对应的频率和 1/2 开关频率之间,从而保证 APF 系统的低频电流增益和对高频开关纹波电流的衰减能力。

2 设计流程

根据前文提出的设计原则和约束条件,LCL 滤波器的设计流程按下面的步骤逐步进行:

步骤一:定义需要补偿谐波的最高次数为 k , 根据文献[3],截止频率 $\omega_c > k \omega_n, \omega_{res} > k \omega_n / 0.3$ (ω_n 是额定基波频率)。考虑谐波补偿和谐振因素一般取:

$$\omega_{res} = k \omega_n / 0.25 = 4k \omega_n \quad (13)$$

同时为了抑制开关纹波和防止低次谐波放大,开关频率应该满足 $\omega_{sw} \geq 2\omega_{res}$ 。更高的开关频率可以获得更好的谐波补偿特性,但会增加更多的损耗,因此一般取谐振频率为 1/2 开关频率。在 ω_{res} 确定以后,参考文献[3]的方法,LCL 的其他值也可以一一确定了。

步骤二:设定好 ω_{res} 后,根据系统的功率,电压,计算系统的基础阻抗,感抗和容抗:

$$Z_b = E_n^2/P_n, C_b = 1/\omega_n Z_b, L_b = Z_b/\omega_n \quad (14)$$

步骤三:根据 1.2.3 节的分析,在 $L_1 = L_2$ 时候,LCL 滤波器的谐振频率最小,抑制纹波能力最强,因此一般采用 $L_1 = L_2$,那么 L_1, L_2, C 可以表示为:

$$L_1 = L_2 = rL_b = rZ_b/\omega_n, C = xC_b = x/\omega_n Z_b \quad (15)$$

此处 r 和 x 为电感和电容的标么值,一般取 $<5\%$,以降低系统成本。根据式(13),式(15)可以化简得到:

$$rx = 2(\omega_n/\omega_{res})^2 = 2(1/4k)^2 \quad (16)$$

步骤四:由于方程式(16)有无数解,为了简化设计过程,一般选取 $r = 2x$,代入式(16),从而得到逆变器侧和电网侧电感 L_1, L_2 :

$$L_1 = L_2 = L_b/4k, C = C_b/2k, R_d = 1/2\pi f_{res} C \quad (17)$$

步骤五:进行参数校验,将设计得到的值代回约束条件中,如果满足设计的约束条件,则设计完毕,否则的话,回到步骤三,更改 r 和 x 的比例关系,直到约束条件满足为止。

设计流程被应用到具体的设计方案中,APF 额定功率 P_n 为 5 kVA,线电压值 E_n 为 150 V,电网频率为 50 Hz。考虑到 APF 主要补偿的谐波电流次数为 5、7、11、13、17、19 次,取最高补偿次数 k 为 25。计算各个基础阻抗值可得:

$$\begin{cases} Z_b = 4.5, C_b = 7.077 \times 10^{-4}, L_b = 1.433 \times 10^{-2} \\ L_1 = L_2 = rL_b = rZ_b/\omega_n = 1.48 \times 10^{-4} \\ C = C_b/2k = 1.54 \times 10^{-5} \end{cases} \quad (18)$$

取 $L_1 = L_2 = 150 \mu\text{H}, C = C_b/2k = 15 \mu\text{F}$,满足 1.2 节中给出的所有约束条件。不同的 λ 和 C 的 LCL 滤波器的谐振频率和 $G_{2i}(s)$ 幅频特性如图 3 所示,标注的坐标为所选的参数,谐振频率满足式(13), $G_{2i}(s)$ 对于开关纹波电流的增益只有 0.015 42,这说明所设计的 LCL 滤波器对纹波的抑制能力很强。

3 实验

本研究为了验证所提出设计方法的正确性,构建了 5 kVA 三电平 APF 系统。三电平 APF 系统由主电路和控制系统构成。控制系统包括电流内环和电压外环。电流跟踪环节采用 dq 同步旋转坐标系下的 PI 和多并联谐振控制器组进行跟踪控制^[9-10]。每一个谐振

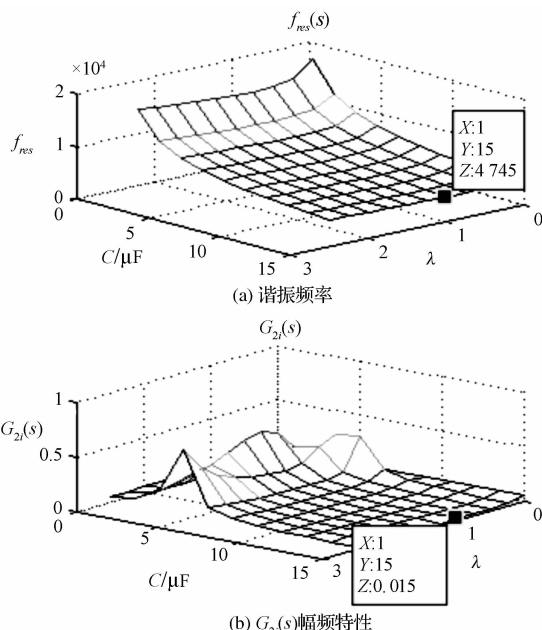


图3 不同的电容和电感比例下的谐振频率和 $G_{2i}(s)$ 幅频特性

控制器可以控制相应的静止坐标下系的两次谐波分量,提高了系统的效率。电压外环使用 PI 调节器维持电压稳定^[11]。实验平台如图 4 所示,负载为三相不控整流 RL 负载,系统参数如表 1 所示。

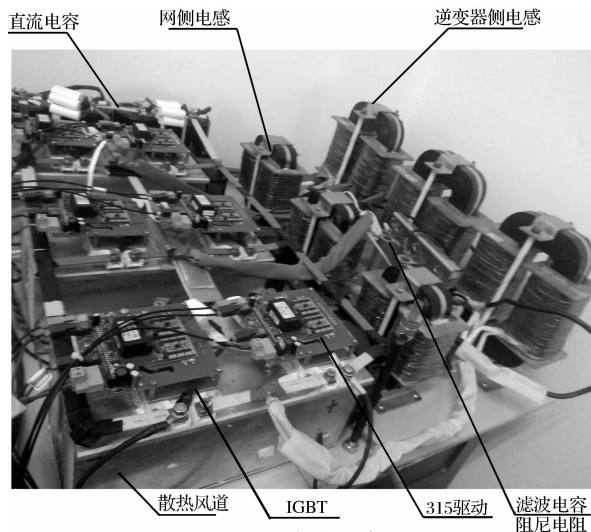


图4 实验平台

表1 APF 系统参数

参数	描述	值
P_n/kVA	容量	5
E_n/V	电网线电压	150
f_s/Hz	开关频率	10k
L_s/mH	电网感抗	0.2
V_{dc}/V	直流侧电压	300
L_1/mH	逆变器侧电感	0.15
$C/\mu\text{F}$	滤波电容	15
L_2/mH	网侧电感	0.15
R_d/Ω	阻尼电阻	2.5
R_l/Ω	直流负载电阻	5.8

谐波补偿实验结果如图 5 所示。

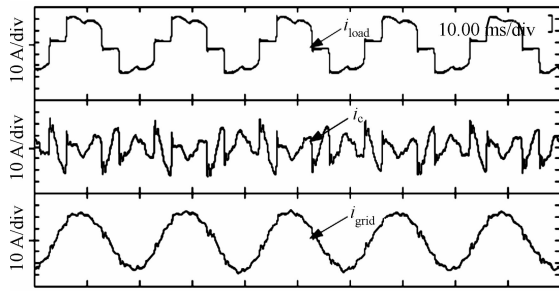


图 5 谐波补偿电流波形

i_{load} —负载电流即补偿前系统电网电流,补偿前电网电流谐波畸变率为 28.2%,电流畸变严重; i_c —有源电力滤波器补偿电流; i_{grid} —补偿后系统电网电流,补偿后系统电网电流谐波畸变率大大减小,变为 5.3%,系统电流接近正弦

系统补偿无功时 LCL 滤波器两侧的电流波形如图 6 所示。 i_1 为逆变器侧输出的电流波形,存在很大的开关纹波; i_2 为经过 LCL 滤波器后的输出无功电流波形,经过 LCL 滤波后,纹波电流大大减小,此时输出的无功电流谐波畸变率为 4.8%。

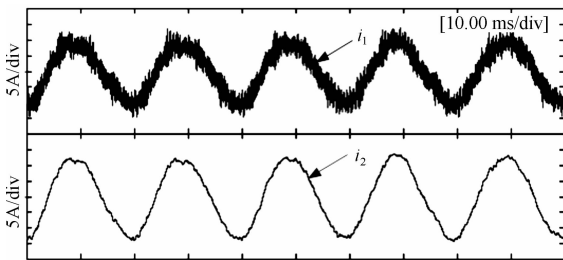


图 6 无功补偿 LCL 逆变器侧和网侧电流波形

实验结果证明,所提出的 LCL 滤波器不仅在治理谐波同时无功补偿在方面都能很好地消除纹波电流。

4 结束语

本研究提出了一种三电平 APF 的 LCL 滤波器设计方法。该设计方法简单实用,针对二极管箝位式三电平 APF 特点,笔者分析了由于电平增加带来的纹波电流变化对滤波电感的影响,先选定谐振频率后进行参数的优化,设计流程清晰,适用于三电平 APF 的 LCL

滤波器设计。实验结果证明,设计的 LCL 滤波器在谐波抑制和无功补偿方面都可以很好地抑制开关纹波同时保证补偿增益。

本研究采用无源阻尼方式进行控制,这将产生一定的损耗,采用有源阻尼可以解决这一问题,这也是本研究下一阶段的研究方向之一。

参考文献 (References):

- [1] 王兆安,杨君,刘进军,等. 谐波抑制和无功补偿[M]. 北京:机械工业出版社,1998.
- [2] 季瑞锋,周明,沈广. 基于同步旋转坐标系下 DFT 谐波检测方法在 APF 中的应用[J]. 机电工程,2012,29(12):1480-1484.
- [3] VODYAKHO O, MI C C. Three-level inverter-based shunt active power filter in three-phase three-wire and four-wire Systems[J]. **IEEE Transactions on Power Electronics**, 2009,24(5):1350-1363.
- [4] LISERRE M, BLAABJERG F, HANSEN S. Design and control of an LCL filter-based three-phase active rectifier[J]. **IEEE Transactions on Industrial Application**, 2005,41(5):1281-1291.
- [5] BINA M T, PASHAJAVID E. An efficient procedure to design passive LCL-filters for active power filters[J]. **Electric Power Systems Research**, 2009,79(4):606-614.
- [6] 刘超,赵争鸣,鲁挺. 三电平 PWM 整流器网侧 LCL 滤波器设计[J]. 电工电能新技术,2012,31(1):56-59.
- [7] 王付胜,邵章平,刘萍. 三电平逆变器电流分析和 LCL 滤波器设计[J]. 电力电子技术,2010,44(11):36-38.
- [8] 仇志凌. 基于 LCL 滤波器的三相三线并网变流器若干关键技术研究[D]. 杭州:浙江大学电气工程学院,2009.
- [9] TANG Y, CHIANG P, LO H, et al. Generalized design of high performance shunt active power filter with output LCL filter[J]. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 2012,59(3):1443-1452.
- [10] 倪建洵,许明夏,张涛,等. 有源电力滤波器重复控制的实验研究[J]. 机电工程,2013,30(9):1118-1122.
- [11] 周娟,张勇,耿乙文,等. 四桥臂有源滤波器在静止坐标系下的改进 PR 控制[J]. 中国电机工程学报,2012,32(6):113-120.

[编辑:洪炜娜]

本文引用格式:

俞年昌,杨家强. 三电平 APF 的 LCL 滤波器设计方法和分析研究[J]. 机电工程,2014,31(5):624-628.

YU Nian-chang, YANG Jia-qiang. Improved design of LCL-filter based active power filters using NPC converter[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2014,31(5):624-628.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>