

DOI: 10.7667/PSPC160351

三相电压型 PWM 变流器交流侧 LCL 滤波器的 有源阻尼策略研究

郭利辉¹, 张元敏¹, 李永辉², 张巧展³

(1. 许昌学院电气(机电)工程学院, 河南 许昌 461000; 2. 洛阳铁路信息工程学校, 河南 洛阳 471000;
3. 中国石油天然气第一建设公司技工学校, 河南 洛阳 471000)

摘要: 三相电压型 PWM 变流器是分布式可再生能源发电单元接入传统配电网的主要接口设备。在 PWM 变流器主电路设计中, 采用 LCL 滤波器替代传统的 L 型滤波器已经被广泛地接受。针对含 LCL 滤波器的三相电压型 PWM 变流器, 在系统输入输出模型与传递函数的基础上, 提出了一种新型 LCL 滤波器优化设计方法。与传统 L 型滤波器相比, 该方法具有电感总量小、动态性能好、系统成本低的优点。为了抑制 LCL 滤波器的固有谐振, 在基于同步旋转坐标系的三相电压型 PWM 变流器控制中, 通过在电流环中增加陷波滤波器的方法实现了 LCL 滤波器的有源阻尼。最后通过仿真和实验对所提出方法的正确性和有效性进行了证明。

关键词: PWM 变流器; LCL 滤波器; 优化设计; 陷波滤波器; 有源阻尼

Research on active damping strategy of LCL filter in three-phase voltage source PWM rectifier

GUO Lihui¹, ZHANG Yuanmin¹, LI Yonghui², ZHANG Qiaozhan³

(1. School of Electrical (Electromechanical) Engineering, Xuchang University, Xuchang 461000, China;
2. Luoyang Railway Information Engineering School, Luoyang 471000, China; 3. Technician Training
School of China Petroleum First Construction Corporation, Luoyang 471000, China)

Abstract: Three-phase voltage-mode PWM converter is the main interface device between distributed renewable energy generation unit and traditional distribution network. In the main circuit design of PWM converter, using LCL filter to replace the traditional L filter has been widely accepted. In view of three-phase voltage-mode PWM converter with LCL filter, on the basis of input and output model and system transfer function, a novel LCL filter optimal design method is proposed. Comparing with the traditional L filter, the novel method has advantages on smaller total inductance, better dynamic performance and lower system cost. In order to prevent the inherent resonance of LCL filter, it increases a notch filter in current loop to achieve active damping of LCL filter in synchronous rotating coordinate system. The experimental results verify the correctness and effectiveness of the proposed method.

This work is supported by 2016 Science and Technology Key Research Project of Henan Science and Technology Agency (No. 162102210298), 2015 Science and Technology Key Research Project of Henan Science and Technology Agency (No. 152102210342), 2016 Key Science and Technology Research Project of Henan Higher Institution (No. 16A470024), 2015 Key Science and Technology Research Project of Henan Higher Institution (No. 15A470022), and 2016 Science and Technology Development Planning Project of Xuchang City.

Key words: PWM converter; LCL filter; optimal design; notch filter; active damping

0 引言

与传统二极管不可控变流器相比, 三相电压型

PWM 变流器具有网侧电流对称正弦、单位功率因数运行、能量能够双向流动的优点。研究三相电压型 PWM 变流器的电能质量问题, 有助于提高并网电能的质量, 保证电网自身的安全性和可靠性^[1-2]。

按照 IEEE STD 929-2000 要求, 并网电流总谐波畸变率(THD)和并网发电功率因数(PF)是衡量并网发电质量的两项重要指标。为了控制并网电流的 $THD < 5\%$, 通常在三相电压型 PWM 变流器交流侧

基金项目: 2016 年河南省科技攻关项目(162102210298); 2015 年河南省科技攻关项目(152102210342); 2016 年河南省高等学校重点科研项目(16A470024); 2015 年河南省高等学校重点科研项目(15A470022); 2016 年许昌市科技发展计划项目

采用滤波装置。最初, 交流侧滤波器采用结构简单的一阶 L 型滤波器。随着工业技术的进一步发展, 高频谐波抑制能力强、硬件体积和成本更小的 LCL 滤波器正逐渐替代传统的 L 型滤波器^[3-8]。LCL 滤波器增加了 PWM 变流器的阶数, 加大了控制和设计难度; 其固有谐振使得控制系统稳定性降低。因此, 三相 PWM 变流器的 LCL 滤波器设计和控制技术的研究得到了广泛关注^[9-11]。

目前, 学术界针对三相 PWM 变流器 LCL 滤波器的研究已取得一定的研究成果^[12-17], 本文在已有研究的基础上, 提出一种新型的 LCL 滤波器优化设计方法及其有源阻尼策略。首先, 推导了含 LCL 滤波器的三相 PWM 变流器的传递函数和数学模型; 其次, 结合传递函数, 提出了 LCL 滤波器的优化设计方法; 再次, 结合数学模型, 研究了 LCL 滤波器的有源阻尼策略; 最后, 在搭建的仿真和实验平台上对所提设计方法和控制策略进行仿真和实验验证。

1 三相 PWM 变流器的数学模型及传递函数

三相 PWM 变流器的主电路拓扑如图 1 所示^[1], 图中 $u_{gx}(x=a,b,c)$ 为电网电压; C 及 u_{dc} 为直流侧电容和其端口电压, u_x 为 PWM 变流器交流侧电压, PWM 变流器与电网采用 LCL 滤波器连接, L_1 、 L_2 和 C_f 分别为滤波电感和滤波电容, i_x 、 i_{cx} 、 i_{gx} 和 i_{dc} 分别为 PWM 变流器交流侧电流、滤波电容电流、入网电流和直流电容电流。

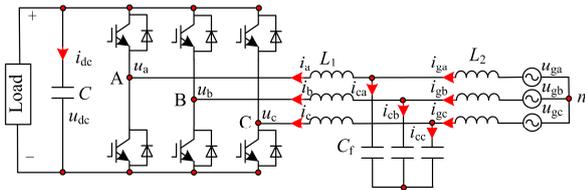


图 1 三相 PWM 变流器的等效模型

Fig. 1 Main circuit of three-phase PWM rectifier

由于 LCL 滤波的滤波电容只对电压电流的高频分量有影响, 在推导系统平均模型时可忽略滤波电容 C_f , 此时 $i_x=i_{gx}$, 并用 $L(L=L_1+L_2)$ 表示系统总电感, 根据基尔霍夫电压电流定律, 并将各参量由三相静止(abc)坐标系转换到同步旋转(dq)坐标系, 得到如下的三相 PWM 变流器平均模型。

$$L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \bar{i}_d \\ \bar{i}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\omega/L & 0 \\ 0 & -\omega/L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{i}_d \\ \bar{i}_q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} d_d \\ d_q \end{bmatrix} \cdot \bar{u}_{dc} \quad (1)$$

$$C \frac{d\bar{u}_{dc}}{dt} = d_d \bar{i}_d + d_q \bar{i}_q \quad (2)$$

式中: d_d 、 d_q 分别为调制比 d_x 在 dq 坐标系下的对

应值; \bar{u}_{gd} 、 \bar{u}_{gq} 和 \bar{i}_d 、 \bar{i}_q 分别为电网电压和入网电流在 dq 坐标系下的对应值。三相 PWM 变流器在 dq 旋转坐标系下的平均模型如图 2 所示。

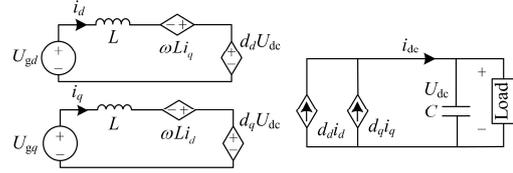


图 2 三相 PWM 变流器在 dq 坐标系稳态模型

Fig. 2 Steady-state model of three-phase PWM rectifier in dq coordinate system

以上分析了 dq 坐标系下三相 PWM 变流器的数学模型, 其中将 LCL 滤波器等效为 L 滤波器。为了进一步分析 LCL 滤波器的传递函数, 可以将系统的滤波环节等效为图 3 所示等效模型。其中, u_{x-1} 和 u_{Hx} 分别为 x 相交流侧的基波分量和谐波分量。根据该图可求得相应参数之间的传递函数如式(3)所示。通过式(3)求得系统的无阻尼振荡频率 ω_{res} 如式(4)所示。

$$\begin{cases} \frac{I_{gx}(s)}{U_{Hx}(s)} = \frac{1}{L_1 L_2 C_f s^3 + (L_1 + L_2)s} \\ \frac{I_x(s)}{U_{Hx}(s)} = \frac{C_f L_2 s^2 + 1}{L_1 L_2 C_f s^3 + (L_1 + L_2)s} \\ \frac{I_{cx}(s)}{U_{Hx}(s)} = \frac{C_f L_2 s}{L_1 L_2 C_f s^3 + (L_1 + L_2)s} \\ \frac{I_{gx}(s)}{I_x(s)} = \frac{1}{L_2 C_f s^2 + 1} \end{cases} \quad (3)$$

$$\omega_{res} = \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C_f}} \quad (4)$$

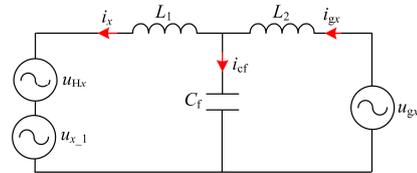


图 3 LCL 滤波器的等效模型

Fig. 3 Equivalent model of the LCL filter

2 三相 PWM 变流器 LCL 滤波器的优化设计

2.1 LCL 滤波器设计中的关键影响因素

如图 4 所示为总电感相同情况下采用两种不同滤波器时入网电流与输出谐波电压传递函数的幅值对比。该图说明 LCL 滤波器较 L 型滤波器确实有更好的滤波效果, 但需要注意的是如果 LCL 滤波器设

计不合理就达不到较好的滤波效果,甚至由于谐振的存在可能导致畸变的增加。因此,LCL滤波器的设计需综合考虑多方面的因素。

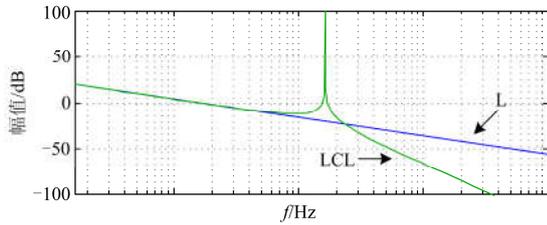


图4 总电感相同情况下两种滤波器 I_{gx}/U_{Hx} 的幅值图

Fig. 4 I_{gx}/U_{Hx} Bode diagram of the two filters

在实际工程中,设计LCL滤波器时要考虑如下的一些限制条件。

1) 滤波电容的要求

在LCL滤波器的设计中,滤波电容参数对系统功率的影响一般要小于10%^[2]。

2) 总电感值的要求

在滤波器设计中,电感越大滤波效果越好,但过大的电感会增加滤波电感上的压降,不利于电流环的控制,同时也会增加安装体积与成本^[2]。

3) 滤波器的滤波效果和谐振频率

为获得较好的滤波效果,同时避免LCL滤波器固有谐振造成的影响,滤波器的谐振频率应该限制在10倍基波频率与0.5倍开关频率之间,同时需采用硬件或软件方法抑制LCL滤波器的固有谐振。

4) 分次谐波的限制和开关纹波的限制

在PWM变流器的LCL滤波器的实际设计中,除了THD以外,往往还要考虑注入电网的分次谐波,特别是开关纹波是否符合相应的国家标准。

2.2 LCL滤波器的优化设计方法

本文提出一种综合考虑限制条件的LCL滤波器优化设计方法,其具体设计步骤如下。

1) 确定滤波电容的最大值

对于LCL滤波器而言,增大两个电感和滤波电容 C_f 的值都将获得更好的滤波效果,相对比较之下,滤波电容在成本和体积上较滤波电感都具有一定的优势,因而在实际设计中,可尽可能地选择较大的滤波电容,根据2.1节中对滤波电容的功率约束条件,可求得滤波电容的上限值为

$$C_{f\max} = \frac{0.1P_{\text{rated}}}{\omega_0 U_{\text{line}}^2} \quad (5)$$

式中: P_{rated} 为三相PWM变流器的额定功率; U_{line} 为电网电压有效值; ω_0 为电网电压角频率。

2) 变流器侧电感 L_1 的确定

LCL滤波器可以等效为一个变流器侧LC滤波

器和一个网侧L滤波器的串联结构,其中的变流器侧电感 L_1 将PWM变流器输出的谐波电压转换为谐波电流,而 C_f 和 L_2 对这些谐波电流进行分流从而限制注入电网的各次谐波满足相应的标准。设 α_h 为 h 次谐波经过LCL滤波器后的衰减系数, i_h 为国家标准中允许的 h 次谐波电流含量, u_h 为PWM变流器输出的 h 次谐波电压含量,则变流器侧电感 L_1 需满足

$$L_1 \geq \max\left(\frac{u_h \alpha_h}{h \omega_0 i_h}\right), h = 2, 3, \dots \quad (6)$$

式中: α_h 一般取10%~20%; i_h 可通过相关标准得到;而 u_h 随调制策略的不同而不同。现有的PWM变流器常采用SPWM和SVPWM策略,这两种调制策略的输出电压谐波可通过对其输出相电压PWM脉冲的双重傅里叶级数分析得到^[18-19],这里不再赘述。

3) 网侧电感 L_2 的确定

在确定了变流器侧电感 L_1 之后,需确定网侧电感 L_2 的具体值。若假设电网不含谐波成分,则对谐波电流而言,网侧电感与滤波电容存在并联分流的关系,设 α_s 为开关次谐波经过LCL滤波器后的衰减系数(一般为10%~20%),则可根据式(7)设计网侧电感 L_2 。

$$\left| \frac{I_{gx}(s)}{I_x(s)} \right|_{s=j \cdot 2\pi f_s} = \left| \frac{1}{L_2 C_f s^2 + 1} \right|_{s=j \cdot 2\pi f_s} \leq \alpha_s \quad (7)$$

(4) LCL滤波器固有谐振的抑制

前文的分析表明,LCL滤波器存在谐振问题,如果不对该谐振进行抑制可能会使得系统的电流闭环失控。传统的方法是在滤波器中加入与电感串联、并联或与电容串联、并联的滤波电阻,这样一方面会增加系统的成本,同时滤波电阻上的有功损耗也会降低系统的效率,最后,滤波电阻的发热问题也是限制其实际应用的另一个不利因素。鉴于以上的原因,本文采用有源阻尼的方式抑制LCL滤波器的谐振,具体的有源阻尼策略将在下一节中详细介绍。

5) 滤波器设计值的理论验证

在根据上述方法确定了滤波器的电感电容参数范围后,还需根据市场和工艺的实际情况确定滤波器各元件的具体参数。在大致确定了滤波器参数后,需对其进行进一步的验证以确定该组参数的实用性。

(1) 谐振频率的限定

$$10\omega_0 < \omega_{\text{res}} < \pi f_s \quad (8)$$

式中, f_s 为PWM变流器开关频率。

(2) THD 的最终验证

本文中提出的方法是以各次谐波含量为标准设计 LCL 滤波器参数的。在设计完成之后, 还要进行理论推导和仿真验证入网的谐波电压和谐波电流是否满足相关的国家标准, 在确定无误后, 通过实验对设计进行验证。

3 三相 PWM 变流器 LCL 滤波器的有源阻尼

如图 5 所示为传统三相 PWM 变流器直接电流控制策略的控制框图^[2]。通过对直流电容电压的实时采样得到直流侧电压 U_{dc} , U_{dc} 和给定参考 U_{d_ref} 的误差经过 PI 控制器得到有功参考电流 i_{d_ref} , 无功电流的参考量 i_{q_ref} 由系统实际所需无功电流决定。由实际采样得到的网侧电压 (u_{ga} , u_{gb} , u_{gc}) 通过三相锁相环(PLL)锁相得到网侧电压相位 θ ; 网侧电流 (i_{ga} , i_{gb} , i_{gc}) 通过 abc/dq 坐标系变换可以求得入网的实际瞬时有功电流 i_d 和无功电流 i_q 。有功参考电流 i_{d_ref} 、无功电流参考量 i_{q_ref} 与实际值之间的误差经 PI 控制器输出 dq 坐标系下参考电压 U_{rd} , U_{rq} 。 U_{rd} , U_{rq} 和 θ 经过 dq/abc 坐标系变换得到三相 PWM 变流器调制策略的给定值 U_{ra} , U_{rb} 和 U_{rc} , 再通过调制策略产生三相 PWM 变流器各功率器件的开关信号 S_a , S_b 和 S_c 。

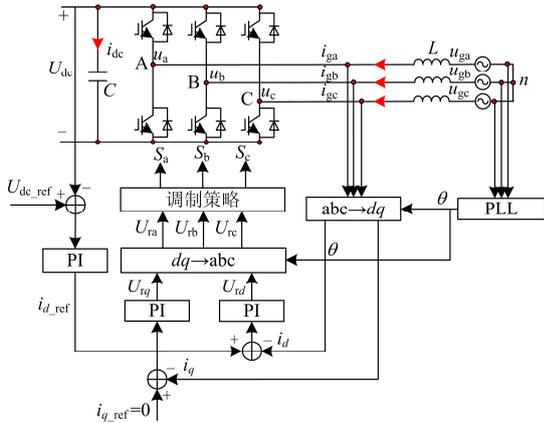


图 5 传统 PWM 变流器双闭环控制策略示意图

Fig. 5 Traditional double closed-loop control strategy of PWM rectifier

与传统 PWM 变流器相比, 当系统采用 LCL 滤波器时, 系统中存在一个固有谐振, 如果不采用阻尼控制, 系统中的谐振频率次谐波将被放大, 导致电流内环的崩溃。本文中采用一种简单的有源阻尼方法对 LCL 滤波器的固有谐振进行抑制, 其基本原理如图 6 所示, 与传统 PWM 变流器的控制策略相比, 本文中的策略在通过直接电流控制策略得到 dq 坐标系下参考电压 U_{rd} , U_{rq} 后对其进行了单一频

率滤波处理, 其基本原理为基波信号在 dq 坐标系下为直流量, 而谐振频率处的干扰信号为高频交流信号, 通过陷波滤波器后可将高频谐振信号滤除并保留其他有用信号, 陷波滤波器的阻带截止频率为谐振频率 ω_{res} , 通带截止频率为 $0.99\omega_{res}$ 和 $1.01\omega_{res}$ 。

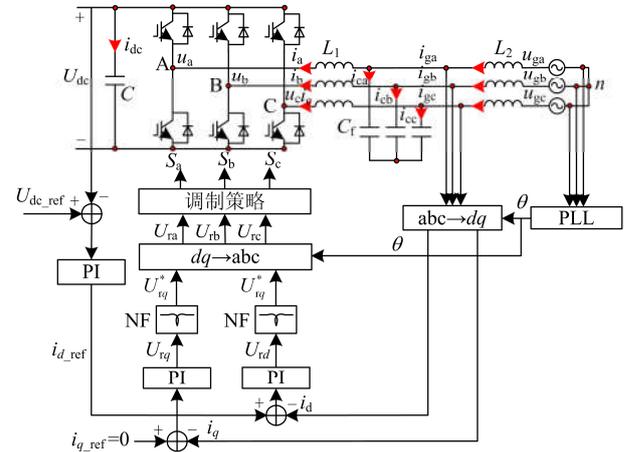


图 6 带 LCL 滤波器的 PWM 变流器双闭环控制策略示意图

Fig. 6 Novel double closed-loop control strategy of PWM rectifier with LCL filter

4 仿真和实验验证

为了验证本文提出方法的正确性, 搭建了仿真和实验平台对其进行验证, 平台参数如表 1 所示, 整个系统的额定功率为 10 kW, 交流侧相电压有效值为 220 V, LCL 滤波器的参数分别为 $L_1=1$ mH, $C_1=18$ μ F, $L_2=0.1$ mH, 功率器件的开关频率为 20 kHz, 电网电压频率为 50 Hz。直流侧电容容值为 1000 μ F, 额定电压为 700 V, 采用 DSP+FPGA 作为主控芯片。

表 1 仿真平台关键参数

Table 1 Key parameters of the simulation platform

参数	数值
额定电网相电压/V	220
额定容量/kVA	10
电网频率/Hz	50
功率器件开关频率/kHz	20
滤波电感 L_1 /mH	1
滤波电感 L_2 /mH	0.1
滤波电容 C_1 / μ F	18
直流侧电容/ μ F	1000
滤波器阻带截止频率/kHz	3.93
直流侧电容额定电压/V	700
电压环 PI 参数 k_p/k_i	3/3000
电流环 PI 参数 k_p/k_i	5.55/51.32

如图 7 和图 8 所示分别为应用本文提出的 LCL 滤波器的设计方法及有源阻尼策略时 PWM 变流器的电压电流仿真和实验关系图, 图中 4 个波形分别为 a 相电网电压 u_{ga} 、入网电流 i_{ga} 、逆变器侧相电流 i_a 以及流过滤波电容的电流 i_{ca} 。由图 7 和图 8 可知 u_{ga} 与 i_{ga} 相位相差 180° , 表明向电网注入有功, 进一步对机侧相电流和入网电流进行 THD 的仿真和实验结果分析可知, 在仿真中, i_a 的 THD 值为 4.64%, i_{ga} 的 THD 值为 1.30%, 在实验中, i_a 的 THD 值为 6.61%, i_{ga} 的 THD 值为 2.89%, 系统均没有谐振产生, 符合设计需求。仿真与实验结果的电流谐波对比如图 9。

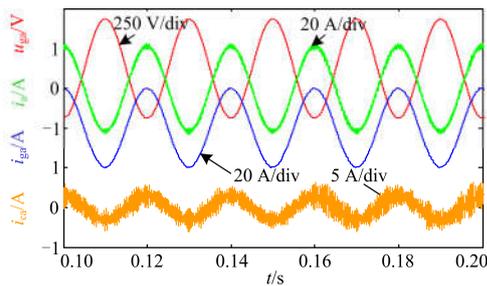


图 7 带 LCL 滤波器的三相 PWM 变流器的仿真结果
Fig. 7 Simulation results of three-phase PWM rectifier with LCL filter

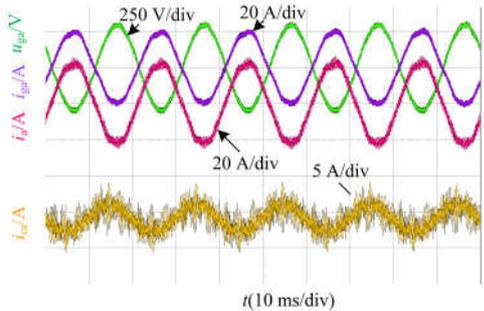
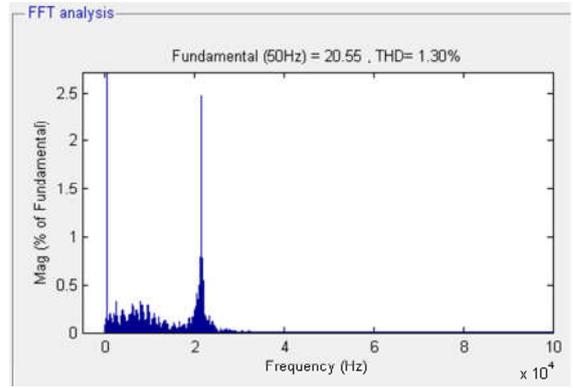
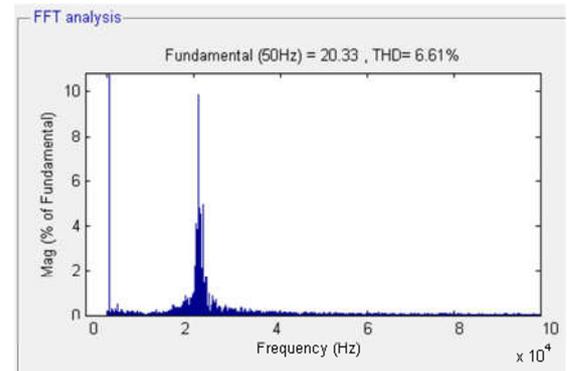


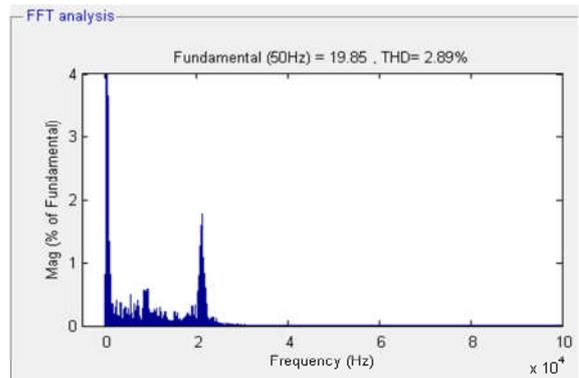
图 8 带 LCL 滤波器的三相 PWM 变流器的实验结果
Fig. 8 Experiment results of three-phase PWM rectifier with LCL filter



(b) 网侧电流仿真值



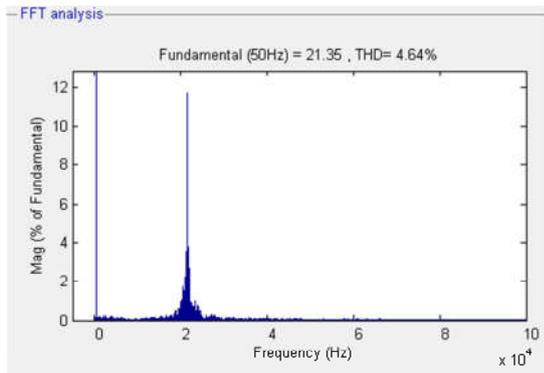
(c) 机侧电流实验值



(d) 网侧电流实验值

图 9 仿真与实验结果的电流谐波对比

Fig. 9 Contrast of current harmonic on simulation and experimental results



(a) 机侧电流仿真值

5 结论

本文在 PWM 变流器数学模型的基础上, 分析了其滤波器的滤波机理并对比了 L 型和 LCL 滤波器的特点。在分析数学模型和传递函数的基础上, 本文以滤波效果为第一目标, 结合无功功率、滤波效果和电流跟踪快速性, 提出了一种新型 LCL 滤波器优化设计方法。为了抑制 LCL 滤波器的固有谐振, 同时避免无源阻尼策略在成本、体积和效率上的缺

陷, 本文提出了一种添加陷波滤波器抑制固有谐振的有源阻尼策略。仿真和实验结果充分证明了本文理论的正确性和方法的有效性。

参考文献

- [1] 王兆安, 黄俊. 电力电子技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [2] 张崇巍, 张兴. PWM 整流器及其控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [3] 刁倩, 陆康. 差模有源阻尼在 PWM 变流器中的应用分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 108-114.
DIAO Qian, LU Kang. Analysis of differential mode active damping application in PWM converter[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 108-114.
- [4] 曾宪金, 李大为, 胡立坤, 等. 基于自然坐标与功率前馈的三相电压型 PWM 变流器控制[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(11): 13-20.
ZENG Xianjin, LI Xiaowei, HU Likun, et al. Natural coordinate and power feedforward control of three-phase voltage-source PWM converter[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(11): 13-20.
- [5] 彭咏龙, 朱劲波, 李亚斌. 基于电感电压反馈和输入整形技术的 LC 滤波器混合阻尼控制[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 103-107.
PENG Yonglong, ZHU Jinbo, LI Yabin. Hybrid damping control based on the LC filter inductor voltage feedback and input shaping techniques[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 103-107.
- [6] 庄超, 叶永强, 赵强松, 等. 基于分裂电容法的 LCL 并网逆变器控制策略分析与改进[J]. 电工技术学报, 2015, 30(16): 85-93.
ZHUANG Chao, YE Yongqiang, ZHAO Qiangsong, et al. Analysis improvement of the control strategy of LCL grid-connected inverter based on split-capacitor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(16): 85-93.
- [7] 杨仁增, 张光先. LCL 并网滤波器的非线性阻尼控制[J]. 电工技术学报, 2015, 30(24): 152-159.
YANG Renzeng, ZHANG Guangxian. Nonlinear damping controller for grid-connected LCL filters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(24): 152-159.
- [8] 阳同光, 桂卫华. 电网不平衡情况下并网逆变器控制策略综述[J]. 电工技术学报, 2015, 30(14): 241-246.
YANG Tongguang, GUI Weihua. An overview on control strategies of grid-connected inverter under unbalanced voltage conditions[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(14): 241-246.
- [9] 陈瑶, 金新民, 童亦斌. 三相电压型 PWM 整流器网侧 LCL 滤波器[J]. 电工技术学报, 2007, 22(9): 125-129.
CHEN Yao, JIN Xinmin, TONG Yibin. Grid-side LCL-filter of three-phase voltage source PWM rectifier[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(9): 125-129.
- [10] 孙蔚, 伍小杰, 戴鹏, 等. 基于 LCL 滤波器的电压源型 PWM 整流器控制策略综述[J]. 电工技术学报, 2008, 23(1): 90-96.
SUN Wei, WU Xiaojie, DAI Peng, et al. An overview of current control strategy for three-phase voltage-source rectifier with LCL-filter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(1): 90-96.
- [11] 许津铭, 谢少军, 张斌锋. 分布式发电系统中 LCL 滤波并网逆变器电流控制研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2015, 43(16): 4153-4166.
XU Jinming, XIE Shaojun, ZHANG Binpeng. Overview of current control techniques for grid-connected inverters with LCL filters in distributed power generation systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 43(16): 4153-4166.
- [12] 王逸超, 罗安, 金国彬, 等. 单相 LCL 型并网逆变器新型谐波阻尼策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(33): 5803-5810.
WANG Yichao, LUO An, JIN Guobin, et al. New harmonic damping strategy for single grid-connected inverter with LCL filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(33): 5803-5810.
- [13] LISERRE M, DELL' AQUILA A, BLAABJERG F. Genetic algorithm based design of the active damping for a LCL-filter three-phase active rectifier[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19(1): 76-86.
- [14] TWINING E, HOLMES D G. Grid current regulation of a three-phase voltage source inverter with an LCL input filter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2003, 18(3): 888-895.

- [15] SERPA L A, KOLAR J W, PONNALURI S. A modified direct power control strategy allowing the connection of three-phase inverter to the grid through LCL filters[C] // Fourtieth IAS Annual Meeting Conference Record, 2005: 565-571.
- [16] WISEMAN J C, WU Bin. Active damping control of a high-power PWM current-source rectifier for line-current THD reduction[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2005, 52(3): 758-764.
- [17] SHEN Guoqiao, XU Dehong, XI Danji. An improved control strategy for grid-connected[C] // Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2006: 1067-1073.
- [18] 葛兴来, 冯晓云, 刘柏思, 等. PWM 整流器谐波特性分析[J]. 电力电子技术, 2009, 43(4): 67-69.
GE Xinglai, FENG Xiaoyun, LIU Baisi, et al. Analytical solution to harmonic characteristics of PWM converter[J]. Power Electronics, 2009, 43(4): 67-69.
- [19] 陈瑶, 童亦斌, 金新民, 等. 基于 PWM 整流器的 SVPWM 谐波分析新算法[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(13): 76-80.
CHEN Yao, TONG Yibin, JIN Xinmin, et al. A novel algorithm of SVPWM harmonic analysis based on PWM rectifier[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(13): 76-80.
-
- 收稿日期: 2016-03-16; 修回日期: 2016-06-18
- 作者简介:
郭利辉(1981-), 女, 通信作者, 硕士, 讲师, 主要研究方向为新能源发电并网技术; E-mail: gloriagordon@163.com
张元敏(1963-), 男, 教授, 研究方向为新能源发电并网技术;
李永辉(1970-), 男, 讲师, 研究方向为电气化铁路牵引供变电。
- (编辑 葛艳娜)