

文章编号:1671-6833(2022)01-0097-06

LCL 型并网逆变器电流谐波抑制策略研究

刘海洋,董亮辉,高金峰,王要强,黄文剑

(郑州大学 电气工程学院,河南 郑州 450001)

摘要:日益增多的非线性设备使电网电压背景谐波含量增加,并导致逆变器的并网电流畸变。为了抑制并网电流谐波,提出了一种改进电网电压比例前馈控制策略,分析 LCL 型并网逆变器逆变侧电感值以及滤波电容值对电网电压比例前馈控制策略的影响,得到了逆变侧电感和滤波电容的优化选择方法,即根据逆变器的性能需求和设备安全需要,确定 LCL 型并网逆变器逆变侧电感和滤波电容的取值范围,并据此确定合适的电感值,继而通过选取较小的电容值降低并网电流的谐波含量,最后在 LCL 型并网逆变器样机中验证了该控制策略和优化方法的有效性。实验结果表明:采用基于滤波参数优化选择的电网电压比例前馈控制策略后,LCL 型并网逆变器并网电流的总谐波畸变率由 4.04% 降至 2.58%,对于谐波含量较高的 3、5 次低次谐波,均由 2% 降至 1% 以下,提高了逆变器的性能。

关键词:LCL 滤波器;谐振频率;并网逆变器;电网电压前馈控制;参数设计

中图分类号:TM464

文献标志码:A

doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2021.05.023

0 引言

近年来,由于 LCL 型并网逆变器具有更好的高频谐波衰减特性以及更低的成本,被广泛地应用于新能源并网中^[1]。在公共并网点处,非线性设备使得电网电压中存在着背景谐波,导致 LCL 型逆变器并网电流出现明显的畸变^[2-3]。为了抑制这种畸变,Liserre 等^[4]采用比例加多谐振控制器补偿电网电压背景谐波,增大基波增益;Zhong 等^[5]采用重复控制器作为并网电流调节器,补偿电网电压背景谐波,增大基波增益。上述研究采用的 2 种控制策略,控制器结构相对复杂,并且改变了逆变器并网电流环路增益。因此 Qin 等^[6]、Chang 等^[7]、于文倩等^[8]采用电网电压比例前馈控制策略,控制器结构相对简单,在一定程度上能够衰减电压低频谐波,但是对高频谐波的衰减能力十分有限。在此基础上,蔡雨希等^[9]、Lin 等^[10]、Zhang 等^[11]采用电网电压全前馈控制策略,增强了逆变器对并网电流低频谐波的抑制作用,并且对高频谐波的抑制效果显著,但是其前馈环节包含一次微分以及二次微分,会放大高频噪声,容易引起系统的不稳定,同时增加了数字控制

器的实现难度。

因此,本文提出一种基于电网电压比例前馈的改进控制方法,有效抑制 3、5、7、11 次等低频谐波对并网电流的影响。首先构建了 LCL 型三相并网逆变器数学模型,分析电网电压背景谐波对并网电流的影响,其次通过理论分析得到电网电压比例前馈控制策略对并网电流谐波的抑制机理,然后通过优化选择逆变侧电感和滤波电容值,进一步减弱逆变器并网电流的谐波含量和总谐波抑制率,最后通过实验验证其可行性。

1 LCL 型并网逆变器数学模型

1.1 系统拓扑结构

三相 LCL 型并网逆变器及其控制结构如图 1 所示,包含主回路部分和控制回路部分。主回路中的 $Q_1 \sim Q_6$ 采用 IGBT 开关, i_{1_a} 、 i_{1_b} 、 i_{1_c} 为流过逆变器侧电感 L_1 的电流, i_{2_a} 、 i_{2_b} 、 i_{2_c} 为流过电网侧电感 L_2 的并网电流, V_{in} 为直流母线电压, v_{g_a} 、 v_{g_b} 、 v_{g_c} 为三相电网电压, i_{c_a} 、 i_{c_b} 、 i_{c_c} 和 u_{c_a} 、 u_{c_b} 、 u_{c_c} 分别为流过滤波电容上的电流和其两端的电压,忽略电感 L_1 、 L_2 的电阻和滤波电容 C 的寄生电阻。控制回路对并网电流 i_2 进行直接电流闭环控

收稿日期:2021-04-23;修订日期:2021-06-30

基金项目:河南省高等学校青年骨干教师培养计划项目(2019GGJS011)

通信作者:董亮辉(1987—),男,河南洛阳人,郑州大学讲师,博士,主要从事电机驱动控制、电机系统的故障诊断和容错控制、电力电子变换技术研究,E-mail:dlh@zzu.edu.cn。

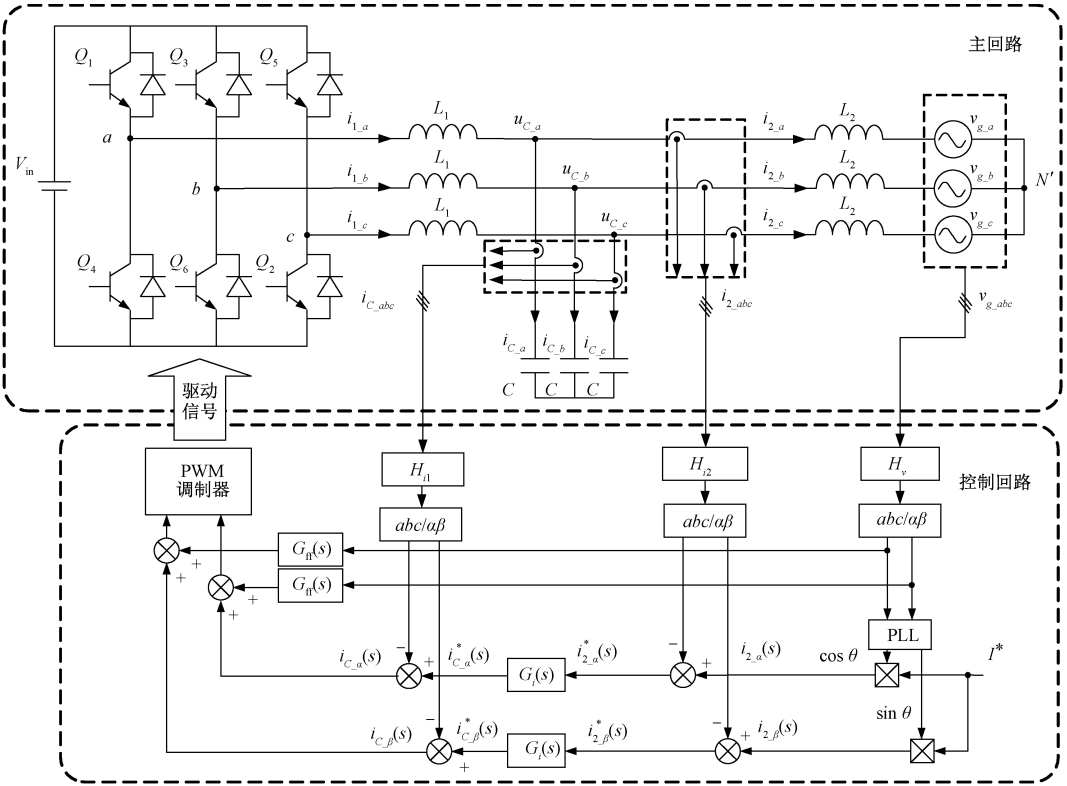


图 1 三相 LCL 型并网逆变器及其控制结构

Figure 1 Three phase LCL grid-connected inverter and its control structure

制,利用锁相环获取电网电压相位,同时 H_{i1} 为电容电流反馈有源阻尼系数,用于消除 LCL 滤波器的谐振尖峰, $G_i(s)$ 为 PI 电流控制器。

1.2 电网电压谐波对并网电流的影响

由于输出滤波器截止频率远低于开关频率,逆变桥的传递函数可以等效成增益为 K_{PWM} 的比例环节,图 2 为 $\alpha\beta$ 静止坐标系下三相 LCL 型并网逆变器数学模型,图 2 中 $G_{ff}(s) = 0$, $G_{inv}(s)$ 为调制电压到逆变桥输出电压的传递函数,可近似表示为

$$G_{inv}(s) = K_{PWM} = \frac{V_{in}}{2V_{tri}} \quad (1)$$

式中: V_{in} 为逆变器直流侧电压; V_{tri} 为载波幅值。

对图 2 所示的数学模型进行等效变换,如图 3 所示,假设 $Z_{L1}(s)$ 、 $Z_{L2}(s)$ 和 $Z_C(s)$ 分别为逆变侧电感 L_1 、并网侧电感 L_2 和滤波电容 C 的阻抗,则有:

$$G_{x1}(s) = \frac{K_{PWM}Z_C(s)}{Z_{L1}(s) + Z_C(s) + H_{i1}K_{PWM}} \quad (2)$$

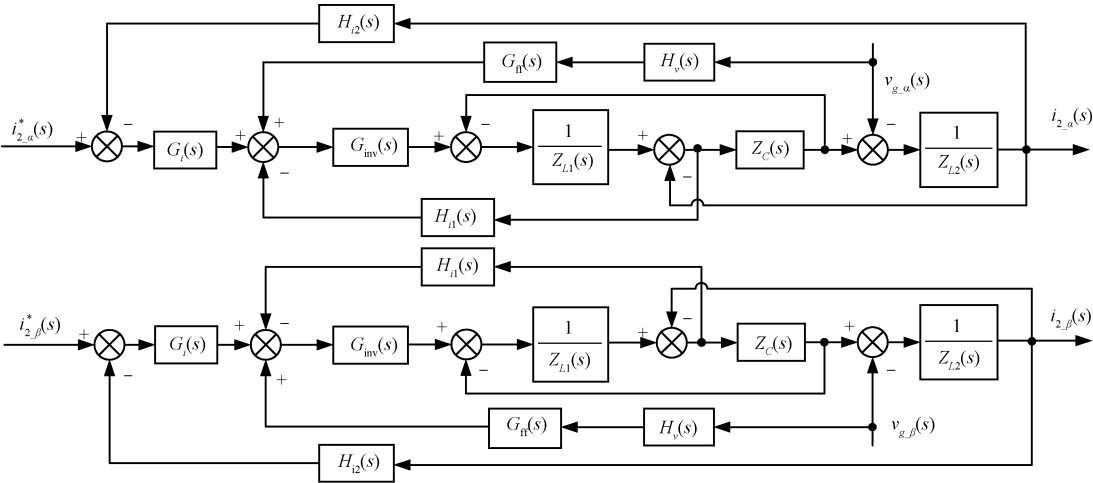


图 2 三相 LCL 型并网逆变器数学模型

Figure 2 Mathematical model of three phase LCL grid-connected inverter

$$G_{x2}(s) = (Z_{L1}(s) + Z_C(s) + H_{i1}K_{PWM}) / [Z_{L1}(s)Z_{L2}(s) + (Z_{L1}(s) + Z_{L2}(s)) \cdot Z_C(s) + H_{i1}K_{PWM}Z_{L2}(s)]; \quad (3)$$

$$G_{x3}(s) = \frac{G_{ff}(s)H_v(s)}{G_i(s)}. \quad (4)$$

式中: $G_{ff}(s)$ 为电网电压前馈函数。

根据图 3 中的等效变换模型可得该逆变器的环路增益表达式 $T_A(s)$ 和并网侧电流 $i_2(s)$ 为

$$T_A(s) = G_{x1}(s)G_{x2}(s)H_{i2}; \quad (5)$$

$$i_2(s) = i_{21}(s) + i_{22}(s); \quad (6)$$

$$i_{21}(s) = \frac{1}{H_{i2}} \frac{T_A(s)}{1 + T_A(s)} i_{21}^*(s); \quad (7)$$

$$i_{22}(s) = -\frac{G_{x2}(s)}{1 + T_A(s)} v_g(s). \quad (8)$$

由式(6)、(7)、(8)的表达式可以直观地看出,并网电流 $i_2(s)$ 的值由并网电流指令值 $i_{21}(s)$ 决定,并受到电网电压引起的扰动量 $i_{22}(s)$ 的影响。因此,并网电流质量受到电网电压谐波的影响。

表 1 计算参数

Table 1 Calculation parameters

额定容量/ (kVA)	直流侧 电压/V	并网额定 电压/V	电网频 率/Hz	开关频 率/kHz	采样频 率/kHz	调制 方式	逆变侧 电感/mH	滤波电 容/ μ F	并网侧电 感/mH	载波 幅值
2	650	220	50	15	30	SPWM	6.6	2	2	0.5

电网电压比例前馈控制策略和数学模型分别如图 1、2 所示,此时:

$$G_{ff}(s) = \frac{1}{K_{PWM}}. \quad (9)$$

图 3 所示的等效模型可变换为基于电网电压前馈控制策略的通用三相 LCL 型并网逆变器等效模型,如图 4 所示。由于 $\alpha\beta$ 轴无耦合,所以此处以 α 轴模型为例进行分析。 $v_{g-\alpha}(s)$ 为并网实际电压值的 α 轴分量, $v'_{g-\alpha}(s)$ 为采用电网电压比例前馈控制策略时的等效并网电压值的 α 轴分量,利用等效并网电压的概念,将电网电压前馈控制策略对逆变器的影响全部作用于电网电压上,以便分析与计算。根据图 4 可得等效电网电压分量 $v'_{g-\alpha}(s)$ 为

$$v'_{g-\alpha}(s) = v_{g-\alpha}(s)(1 + F(s)); \quad (10)$$

$$F(s) = -\frac{1}{K_{PWM}} \frac{1}{\frac{1}{K_{PWM}} + H_{i1}Cs + \frac{L_1C}{K_{PWM}}s^2}. \quad (11)$$

当 $v'_{g-\alpha}(s) = v_{g-\alpha}(s)$ 时,可以得到临界频率 f_t 为

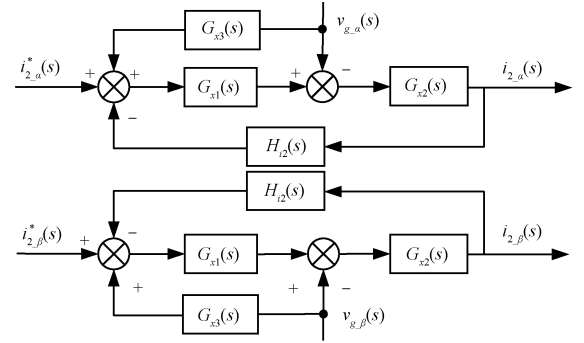


图 3 三相 LCL 型并网逆变器等效模型

Figure 3 Equivalent model of three phase LCL grid-connected inverter

响,会导致并网电流和指令信号之间存在幅值和相位的稳态误差,并造成并网电流 $i_2(s)$ 的畸变。

2 改进电网电压比例前馈策略

2.1 电网电压比例前馈控制策略分析

为便于后续分析,本文所使用的计算参数见表 1。

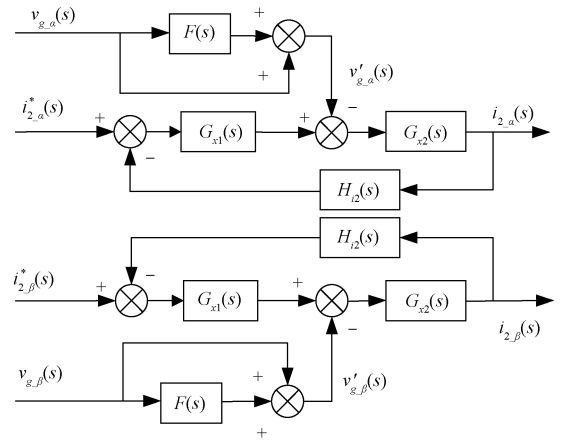


图 4 基于电网电压前馈策略的三相 LCL 型并网逆变器通用等效模型

Figure 4 A general equivalent model of three phase LCL grid-connected inverter based on feedforward strategy of grid voltage

$$f_t = \frac{1}{2\pi\sqrt{2L_1C}}. \quad (12)$$

根据式(11)、(12)可知,逆变侧电感 L_1 和滤波电容 C 的值对 f_t 和 $F(s)$ 起决定性作用,与控制器的参数无关。当其余参数不变,滤波电容值不断减小时,以 $|v_{g-\alpha}(j2\pi f)|$ 为基准,结合式(10)

和表 1 给出的数据,画出 $|v'_{g-\alpha}(j2\pi f)|$ 随电网电压谐波频率变化的标幺图如图 5 所示。从图 5 可以看出,滤波电容值越小,相对应的 f_i 越大,即电网电压比例前馈控制策略的带宽越大。在低频谐波频率范围内,增强了对电网电压中谐波频率分量的抑制作用。同时电网频率在 $2 \sim 3$ kHz 频率段附近时,电容的减小反而增大了等效电网电压的谐波含量,但是电网电压以低频谐波为主,因此可以忽略不计。当其余参数不变,逆变侧电感值不断减小时,以 $|v_{g-\alpha}(j2\pi f)|$ 为基准, $|v'_{g-\alpha}(j2\pi f)|$ 随电网电压谐波频率变化的标幺图如图 6 所示。从图 6 看出,逆变侧电感值越小,则 f_i 越大,控制带宽越大,当频率 f 在 f_i 附近时 $|v'_{g-\alpha}(j2\pi f)|$ 略有增加,但是当频率 f 小于 f_i 时,随着逆变侧电感值的减小,谐波衰减程度基本保持不变。

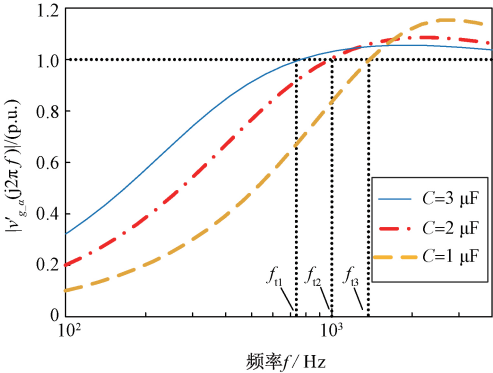


图 5 取不同容值时 $|v'_{g-\alpha}(j2\pi f)|$ 随频率变化的标幺图
Figure 5 Scalar unit diagram of $|v'_{g-\alpha}(j2\pi f)|$ varying with frequency under different capacitance values

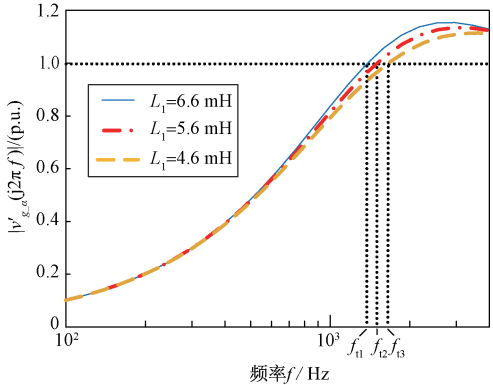


图 6 取不同感值时 $|v'_{g-\alpha}(j2\pi f)|$ 随频率变化的标幺图
Figure 6 Scalar unit diagram of $|v'_{g-\alpha}(j2\pi f)|$ varying with frequency under different inductance values

综上所述,当 f_i 的值大于所要抑制的并网电压谐波频率时,逆变侧电感 L_1 的增减对并网电压谐波的衰减程度影响可以忽略不计,但是减小滤波电容值却能够有效地增加等效电网电压的衰减

带宽和衰减程度。

2.2 改进电网电压比例前馈控制策略

逆变侧电感 L_1 一般依据纹波的衰减程度以及调制方式等因素确定其取值为 $L_{1min} \leq L_1 \leq L_{1max}$,并网侧电感 L_2 一般根据逆变器对开关谐波的衰减程度确定。LCL 型并网逆变器要求滤波电容吸收的基波无功功率不能大于系统额定有功功率的 5%,可得滤波电容最大值 C_{max} ^[9]。同时,为了降低 LCL 滤波器的谐振尖峰对电路的影响,LCL 滤波器的谐振频率应该大于基波频率的 10 倍,小于开关频率的 1/10,即 $10f_1 < f_{res} < f_{sw}/10$,其中电网频率 $f_1 = 50$ Hz,开关频率 $f_{sw} = 15$ kHz,谐振频率 f_{res} 为

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C}}} \quad (13)$$

通过谐振频率的取值范围可以确定滤波电容的最小取值 C_{min} 。在实际工程中,由于成本与体积的限制,一般逆变侧电感 L_1 取最小值 L_{1min} ^[10],此时根据上述内容可确定滤波电容值的取值为 $C_{min} \leq C \leq C_{max}$ 。

根据 2.1 节所述,逆变侧电感值的增减对等效并网电压谐波的衰减程度影响很小,减小滤波电容值却能够有效地增加衰减带宽以及衰减程度。因此,在滤波电容 C 的取值范围内,可以通过减小滤波电容值,即滤波电容值取 C_{min} 来达到衰减等效电网电压谐波的目的,进而减少并网电流谐波,并且该方法在原有的基础上减小了滤波电容值,降低了硬件成本。在利用上述方法抑制等效电网电压谐波时,还可以综合考虑逆变侧电感 L_1 和滤波电容 C 的值,进行灵活选取。例如:为了得到更强的谐波衰减特性,滤波电容 C 取值会小于 C_{min} ,谐振频率就会超出预定范围。此时,可以适当增加逆变侧电感值,这样滤波电容值就能够得到更小的取值范围,既可以有效地衰减电网谐波,又可以满足谐振频率要求,但是这势必会增加硬件的成本。因此,可以降低对谐波频率的要求,设计 LCL 滤波器的谐振频率小于开关频率的 1/2,即 $f_{res} < f_{sw}/2$,这样即使逆变侧电感 L_1 的选择范围受限,滤波电容 C 也能够有较大的选择范围^[12]。

3 实验结果

根据 2.2 节所述的改进电网电压比例前馈控制策略,搭建基于 DSP 芯片 TMS320F28335 的 LCL 型三相并网逆变器实验平台。直流侧电压为

120 V,开关频率为 15 kHz,采样频率为 30 kHz, 逆变侧电感 L_1 为 6.6 mH,并网侧电感 L_2 为 2 mH,滤波电容 C 为 2 μ F。为了体现并网电压对并网电流的影响,采用实际电网电压,经三相变压器降压后与 LCL 逆变器后级并联。经三相变压器降压后的三相电压波形如图 7 所示,其主要谐波含量如表 2 所示。可以看出本次实验所使用的电网电压主要包含 3、5、7、11 次低次谐波。

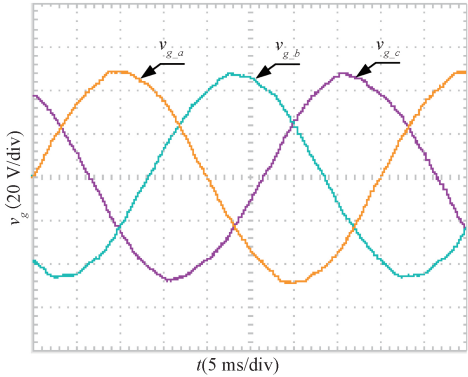


图 7 经三相变压器降压后的三相电网电压波形

Figure 7 Voltage waveform of three phase power grid after step down by three phase transformer

为了更好地分析逆变侧电感 L_1 对并网电流

表 2 三相电网电压主要谐波含量

Table 2 Main harmonic content of three phase grid voltage

谐波次数	3	5	7	11	13
所占比例/%	1.3	1.56	1.01	1.33	0.64

的影响,令其他参数不变,逆变侧电感分别取6.6、5.6、4.6 mH,采用电网电压比例前馈控制策略得到的并网电流 $i_2(s)$ 的实验波形如图 8 所示,可以看出,随着逆变侧电感值的减小,并网电流总谐波失真率 THD 分别为 3.64%、3.57%和 3.76%,并网电流无明显变化。

根据 2.2 节所述电容的取值范围限制,其他参数不变,滤波电容分别取 3、2、1 μ F,采用电网电压比例前馈控制策略得到的并网电流 $i_2(s)$ 的实验波形如图 9 所示。可以看出随着滤波电容值的减小,并网电流总谐波失真率 THD 由 4.04%减小至 3.64%和 2.58%,大大降低了并网电流的谐波含量,提高了并网电能质量。为了更好地分析滤波电容 C 的取值变化对并网电流的改善情况,图 10 给出了图 9 中并网电流 $i_2(s)$ 的谐波频谱,可以看出,在同一谐波频率下,滤波电容 C 减小,并网电流中该次谐波的含量随之减小,证明减小滤波电容能够增强电网电压比例前馈控制策略对

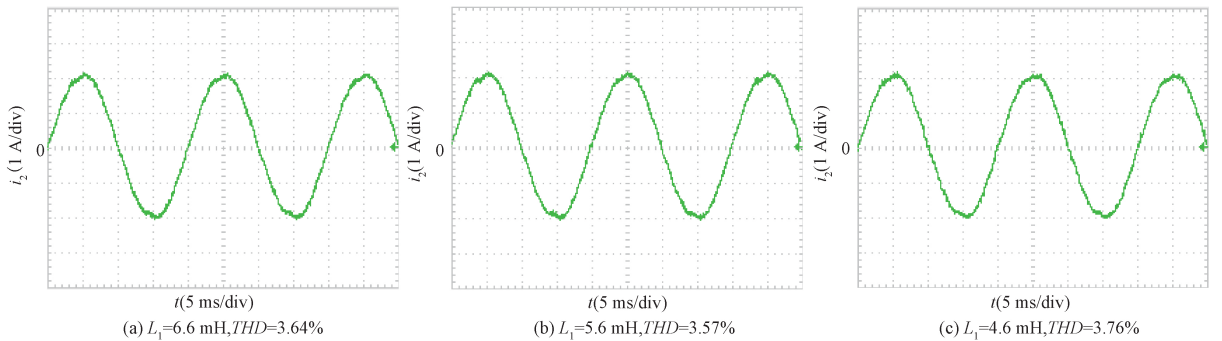


图 8 取不同感值时 a 相并网电流波形

Figure 8 Grid-connected current waveform of a phase under different inductance values

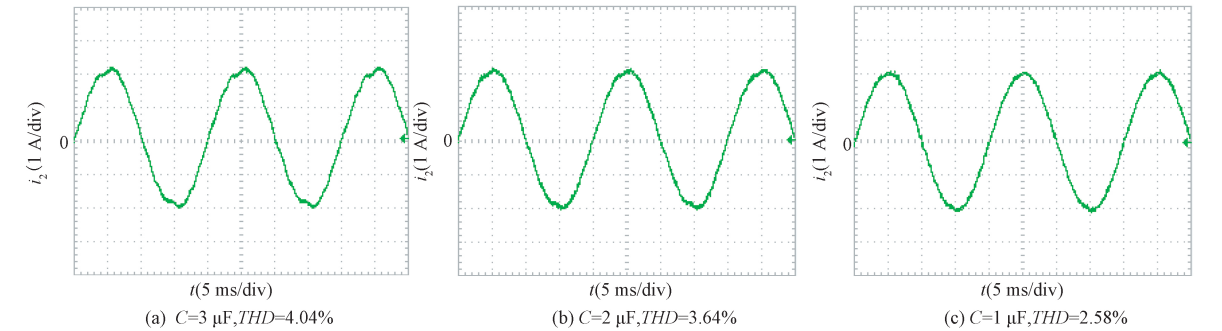


图 9 取不同容值时 a 相并网电流波形

Figure 9 Grid-connected current waveform of a phase under different capacitance values

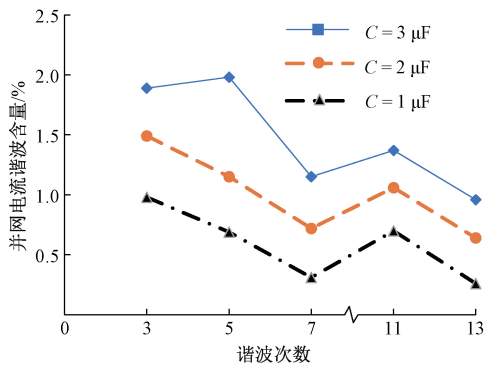


图 10 并网电流谐波含量

Figure 10 Harmonic content of grid-connected current
并网电流谐波的抑制作用。

4 结论

针对电网电压背景谐波对并网电流 $i_2(s)$ 的影响,本文提出了一种改进电网电压比例前馈控制策略,即逆变侧电感和滤波电容的优化选择方法,也就是在逆变侧电感值确定的前提下,取滤波电容有效范围内的最小值。搭建三相 LCL 型并网逆变器实验平台,实验结果表明:随着逆变侧电感值的变化,并网电流总谐波失真率 THD 的值维持在为 3.6%左右,各低次谐波含量保持一致;随着滤波电容值的减小,并网电流总谐波失真率 THD 的值由 4.04% 依次减小至 3.64% 和 2.58%,并且各低次谐波含量明显降低。因此本文提出的改进控制策略有效地增强了逆变器对电网电压背景谐波的抑制效果,降低了并网电流谐波含量,系统具有优良的经济特性,且该方案简便易行、便于操作。

参考文献:

[1] 宋国杰,李国进,杨浩,等.基于 $d-q$ 坐标系下 LCL 型光伏并网逆变器的 PI+状态反馈控制[J].太阳能学报,2020,41(11):135-142.

[2] SILWAL S,TAGHIZADEH S,KARIMI-GHARTEMANI M,et al. An enhanced control system for single-phase inverters interfaced with weak and distorted grids[J]. IEEE transactions on power electronics, 2019, 34(12):12538-12551.

[3] LI X Q,FANG J Y,TANG Y,et al.Robust design of

LCL filters for single-current-loop-controlled grid-connected power converters with unit PCC voltage feed-forward [J]. IEEE journal of emerging and selected topics in power electronics,2018,6(1):54-72.

[4] LISERRE M, TEODORESCU R, BLAABJERG F. Stability of photovoltaic and wind turbine grid-connected inverters for a large set of grid impedance values [J]. IEEE transactions on power electronics, 2006,21(1):263-272.

[5] ZHONG Q C,HORNIK T.Cascaded current-voltage control to improve the power quality for a grid-connected inverter with a local load [J]. IEEE transactions on industrial electronics,2013,60(4):1344-1355.

[6] QIN K,WANG W T,WANG X H,et al.An adaptive proportional feedforward scheme for LCL-type grid-connected inverter [C]//2020 IEEE Applied Power-Electronics Conference and Exposition (APEC).Piscataway:IEEE,2020:3287-3292.

[7] CHANG X, LV C,WANG Q,et al.Robust voltage resonance feedforward control strategy for LCL-type grid-connected inverters under weak grid condition [C]//2018 Asian Conference on Energy, Power and Transportation Electrification (ACEPT).Piscataway:IEEE,2018:1-6.

[8] 于文倩,同向前,燕聪,等.提高弱电网下 LCL 型并网逆变器稳定性的改进电网电压前馈策略[J].电气工程学报,2019,14(2):79-85.

[9] 蔡雨希,何英杰,陈涛,等.基于粒子群的三电平并网逆变器 LCL 滤波参数的高效精确设计方法[J].中国电机工程学报,2020,40(20):6663-6674.

[10] LIN Z H,RUAN X B,WU L G,et al.Multi resonant component-based grid-voltage-weighted feedforward scheme for grid-connected inverter to suppress the injected grid current harmonics under weak grid [J]. IEEE transactions on power electronics,2020,35(9):9784-9793.

[11] ZHANG H,RUAN X B,LIN Z H,et al.Capacitor voltage full feedback scheme for LCL-type grid-connected inverter to suppress current distortion due to grid voltage harmonics[J].IEEE transactions on power electronics,2021,36(3):2996-3006.

[12] 任明伟,张雨.弱电网下 LCL 型并网逆变器单闭环控制参数设计[J].电力电子技术,2018,52(5):68-71.

(下转第 110 页)

Blockchain-based Secure Data Sharing Mechanism Design in the
Vehicular Networks

LI Yongqiang, LIU Zhaowei

(School of Computer and Control Engineering, Yantai University, Yantai 264005, China)

Abstract: A secure data sharing mechanism based on blockchain was proposed aiming at the security and privacy issues of vehicle sharing information in the Internet of Vehicles. In this mechanism, the shared message and reputation value were stored through the blockchain based on the DAG structure, and the storage burden of the vehicle would be reduced. The malicious information in the network was excluded through the reputation mechanism. In addition, a pseudonym substitution strategy based on user privacy needs was introduced, which parameterize vehicle driving goals and driver privacy protection needed. A calculation method for the replacement interval of pseudonyms was proposed, which redefined the frequency of pseudonym replacement. Experiments showed that when the malicious nodes in the network reached 30%, the accuracy of the vehicle receiving information was higher than 91%, the mechanism could effectively improve the safety and reliability of information sharing in the Internet of Vehicles.

Keywords: blockchain; Internet of Vehicles; multi-signature; reputation assessment; privacy protection

(上接第 102 页)

Research on Current Harmonic Suppression Strategy of the
LCL Grid-connected Inverter

LIU Haiyang, DONG Lianghui, GAO Jinfeng, WANG Yaoqiang, HUANG Wenjian

(School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The increasing number of nonlinear devices increased the harmonic content of grid voltage background and led to the grid-connected current distortion of inverter. In order to suppress grid-connected current harmonics, an improved grid voltage proportional-feedforward control strategy was proposed. The influence of inverter side inductance and filter capacitance on grid voltage proportional-feedforward control strategy of LCL grid-connected inverter was analyzed, and the optimal selection method of inverter side inductance and filter capacitor was obtained. That was to say, according to the performance requirements and equipment safety requirements of the inverter, the range of inductance and filter capacitor on the inverter side of LCL grid-connected inverter was determined, and the appropriate inductance value was determined accordingly. Then the harmonic content of grid-connected current was reduced by selecting a smaller capacitance value. Finally, the effectiveness of the control strategy and optimization method was verified in the prototype of LCL grid-connected inverter. The experimental results showed that the total harmonic distortion rate of grid-connected current of LCL grid-connected inverter was reduced from 4.04% to 2.58%, and the third and fifth harmonics with higher harmonic content were reduced from 2% to less than 1%, which improved the performance of the inverter.

Keywords: LCL filter; resonant frequency; grid-connected inverter; feedforward control of grid voltage; parameter design