

DOI: 10.7667/PSPC171694

基于遗传算法的 LCL 型逆变器双闭环参数设计

王佐勋¹, 李亚洲¹, 李国庆²

(1. 齐鲁工业大学电气工程与自动化学院, 山东 济南 250353; 2. 东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012)

摘要: 建立了单相 LCL 滤波器双闭环控制系统的数学模型。应用频域法和齐格勒-尼科尔斯法对系统进行了稳定性分析, 并初步整定了内外环参数。针对传统 PI 参数整定的不足, 采用遗传算法对外环 PI 调节器参数进行全局寻优。利用遗传算子的选择、交叉、变异操作, 逐代产生 PI 调节器参数优良个体。在适应度函数中加入上升时间和超调惩罚作为适应性评判的一部分。Matlab/Simulink 仿真实验表明, 所优化的控制器参数能有效地抑制并网电流谐波, 具有较好的稳定性和动态特性。

关键词: LCL 型逆变器; 谐波抑制; PI 调节器; 遗传算法

Parameters optimization of double closed-loop for LCL-type inverter based on genetic algorithm

WANG Zuoxun¹, LI Yazhou¹, LI Guoqing²

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Qilu University of Technology, Jinan 250353, China;
2. School of Electrical Engineering, Northeast Electrical Power University, Jilin 132012, China)

Abstract: The math modeling of the double-loop speed control system for the single-phase type LCL filter is established. The stability of the system is analyzed by using frequency-region method and Ziegler-Nichols method. The internal and external parameters are tuned preliminarily. Aiming at the shortages existing in the traditional PI parameters tuning method, the genetic algorithm is used to optimize PI regulator parameters. It makes use of the operators of choice, crossover and mutation in genetic algorithm to get fine PI adjustor parameters. The rise time and the over-shoot are added in the fitness function as part of the adaptive evaluation. The Matlab/Simulink simulation shows the optimization of controller parameters can suppress the grid current harmonic effectively, and the system has favorable stability and dynamic performance.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61601256) and National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0900903).

Key words: LCL types inverter; harmonic suppression; PI regulator; genetic algorithm

0 引言

并网逆变器是并网发电系统中核心部件之一。其稳定性直接关系到并网系统的可靠运行^[1]。然而, 并网电流谐波对电网电压的污染问题不容忽视, 针对并网电流的谐波抑制问题成为国内外学者的研究热点之一^[2]。

为抑制由电网电压造成的并网电流畸变, 需要在逆变器与电网之间加入滤波器, 常用的滤波器有 L 型、LC 型及 LCL 型滤波器。与 L 型、LC 型滤波

器相比, LCL 型滤波器是三阶系统, 具有良好的高频谐波抑制能力, 可在总电感值较小的条件下, 实现更好的滤波效果, 目前已获得广泛应用^[3-5]。

无源阻尼是在 LCL 滤波器的电容支路中串入阻尼电阻, 这种方式会增加额外的功率损耗, 降低系统效率^[6-9]。逆变器内环多采用电容电流反馈有源阻尼, 与逆变器电容侧并联电阻相比, 有源阻尼可在不增加系统额外损耗的情况下实现相同的阻尼效果^[10-12]。文献[13]应用陷波器将 LCL 滤波器引起的谐振尖峰直接抵消, 但系统只能在 $(0, f_s/2)$ 内实现有效阻尼。文献[14]采用加权导纳函数, 选取有源阻尼增益来抑制并网电流的低次谐波, 但在电容侧串联电阻依然存在功率损耗。文献[15]采用逆变器

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(61601256); 国家重点研发计划项目资助(2016YFB0900903)

的单桥臂控制方法, 结合 H_∞ 控制的结构奇异值 μ 综合方法, 但电网电压的波动会引起逆变器的环流。

传统方法设计逆变器内外环参数多为频域法, 文献[16]采用 Bode 图分析基于陷波控制策略来抑制谐波; 文献[17]将逆变器等效为两个二阶系统, 采用少自由度的极点配置方法得到内外环参数。文献[18]在传统算法的基础上, 采用基于 RBF 网络自适应算法得到 PI 参数值。在逆变器的并网过程中, 许多文献中的算法忽略了控制和计算延时对系统的影响, 然而, 延时不容忽略^[19-20], 其会影响并网逆变器的稳定性。文献[16]提出双采样模式的实时运算方法, 可完全消除 PWM 计算延时的影响。

本文建立了单相 LCL 型逆变器系统模型, 其中内环采用电容电流比例环节, 外环采用 PI 调节器控制并网电流。考虑 PWM 调制延时和控制延时的影响, 通过劳斯稳定性判据和系统根轨迹初步确定了内外环参数。最后, 应用遗传算法对 PI 调节器参数全局寻优, 并进行了仿真实验的验证。

1 LCL 型并网逆变器数学模型

图 1 所示为单相 LCL 型逆变器拓扑结构及其控制框图。图中 u_{dc} 为输入直流电压, v_{in} 为逆变器侧输出电压, L_1 为逆变器侧电感, C 为滤波电容, L_2 为网侧电感; 其中电感 L_1 、 L_2 和电容 C 构成 LCL 滤波器; i_1 为逆变器侧输出电流, i_2 为并网电流; v_g 为电网电压。 H_1 为电容电流反馈系数, $G_i(s)$ 为并网电流调节器, 系统使用锁相环(Phase Locked Loop, PLL)获得与网侧电压同相位的并网指令电流 i_2^* 。

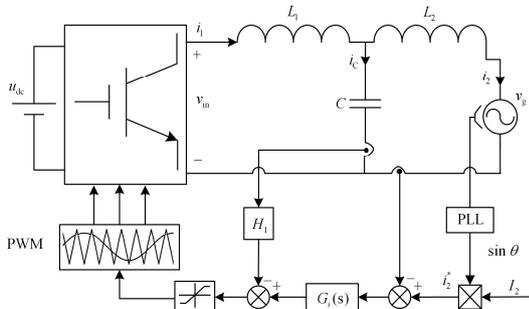


图 1 LCL 型并网逆变器及其控制框图

Fig. 1 Grid-connected inverter of an LCL-type and its control diagram

系统在数字控制下会产生延时, 它包括脉宽调制(Pulse Width Modulation, PWM)过程中采样与计算产生的一拍滞后延时和零阶保持器(Zero-Order Holder, ZOH)产生的半拍滞后延时, 总计延时为 1.5 拍^[3]。控制延时存在于电容电流反馈回路的前向通

道中, 它会影响系统环路增益的特性, 进而影响系统的稳定性和有源阻尼的效果。

由图 1 建立 LCL 型并网逆变器的系统框图, 如图 2 所示。

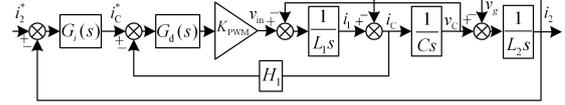


图 2 LCL 型并网逆变器系统框图

Fig. 2 System block diagram of grid-connected inverter with LCL filter

图 2 中, $K_{P_{PWM}}$ 为逆变器自身等效增益, 其大小为直流侧电压 v_{dc} 与三角载波幅值 v_{in} 的比值。 $G_d(s)$ 为 1.5 拍的滞后延时环节, 其表达式为

$$G_d(s) = e^{-1.5sT_s} \approx 1 - 1.5T_s s \quad (1)$$

式(1)中将延时环节进行泰勒展开, 并保留一次项, 将其等效为连续域中非最小相位系统的滞后环节, 信号约在 1.5 个采样周期(T_s)内保持不变。逆变器外环并网电流调节器 $G_i(s)$ 采用比例积分(Proportional-Integral, PI)调节器, 其传递函数为

$$G_i(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (2)$$

由此, 得到在连续域内系统的开环传递函数为

$$G(s) = \frac{e^{-1.5T_s s} K_{P_{PWM}} (K_p s + K_i)}{L_1 L_2 C s^4 + e^{-1.5T_s s} K_{P_{PWM}} H_1 L_2 C s^3 + (L_1 + L_2) s^2} = \frac{k(1 - 1.5T_s s)(K_p s + K_i)}{s^4 + (1 - 1.5T_s s) K_{P_{PWM}} H_1 / L_1 s^3 + w_r^2 s^2} \quad (3)$$

式中: $w_r = \sqrt{(L_1 + L_2) / L_1 L_2 C}$, 为 LCL 滤波器谐振频率; $k = K_{P_{PWM}} / L_1 L_2 C$ 。

2 系统稳定性分析和参数优化

2.1 内外环参数初步配置

LCL 型滤波器具有良好的高频谐波抑制能力, 但其存在一个固有的谐振频率 w_r , 会影响并网逆变器的稳定性。采用电容电流反馈有源阻尼, 其等效为在滤波器电容侧并联一个阻抗。为了系统稳定性及有源阻尼的良好效果, 需对电容电流反馈系数 H_1 、PI 调节器参数进行合理的配置和优化。

由于系统存在内外环共 3 个参数, 不易对其整体设计和优化。考虑当逆变器不加入外环 PI 调节器时, 对内环参数 H_1 进行单独配置。本文在第 3 节给出了单相 LCL 逆变器参数, 系统的开环增益为

$$G_i(s) = \frac{k(1 - 1.5T_s s)}{s^3 + (1 - 1.5T_s s) K_{P_{PWM}} H_1 / L_1 s^2 + w_r^2 s} \quad (4)$$

由式(4)得出 $G_1(s)$ 的特征方程为

$$D_1(s) = (1 - 1.5T_S K_{P_{PWM}} H_1 / L_1) s^3 + K_{P_{PWM}} H_1 / L_1 s^2 + (w_r^2 - 1.5T_S k) s + k \quad (5)$$

根据劳斯稳定判据得出电容电流反馈系数 H_1 的取值范围, 如式(6)所示。

$$\frac{L_1}{L_1 + L_2} < H_1 < \frac{L_1}{1.5T_S K_{P_{PWM}}} \quad (6)$$

由式(6)可知, H_1 的最大值 $H_{1\max} = 0.074$, 最小值 $H_{1\min} = 0.42$, 故 H_1 无解。由于没有加入比例环节, $G_1(s)$ 的环路增益过大, 造成系统的稳定性变差, 使得 H_1 的最小值大于最大值。当系统加入比例环节 K_p 时, 得到系统的开环增益, 如式(7)所示。

$$G_2(s) = \frac{K_p k (1 - 1.5T_S s)}{s^3 + (1 - 1.5T_S s) K_{P_{PWM}} H_1 / L_1 s^2 + w_r^2 s} \quad (7)$$

由此, 得出 $G_2(s)$ 的特征方程为

$$D_2(s) = (1 - 1.5T_S K_{P_{PWM}} H_1 / L_1) s^3 + K_{P_{PWM}} H_1 / L_1 s^2 + (w_r^2 - 1.5T_S K_p k) s + K_p k \quad (8)$$

应用劳斯稳定判据得出 H_1 的取值范围, 如式(9)所示。

$$\frac{K_p L_1}{L_1 + L_2} < H_1 < \frac{L_1}{1.5T_S K_{P_{PWM}}} \quad (9)$$

比较式(9)和式(6)可知, 加入比例环节后, H_1 的最大值没有改变, 其最小值取决于比例系数 K_p 。由此, 可调节 K_p 减少系统的开环增益, 使得 H_1 的取值满足系统稳定性要求。故可取 $H_1 = 0.05$ 时, 画出 $G_1(s)$ 的根轨迹, 如图 3 所示。

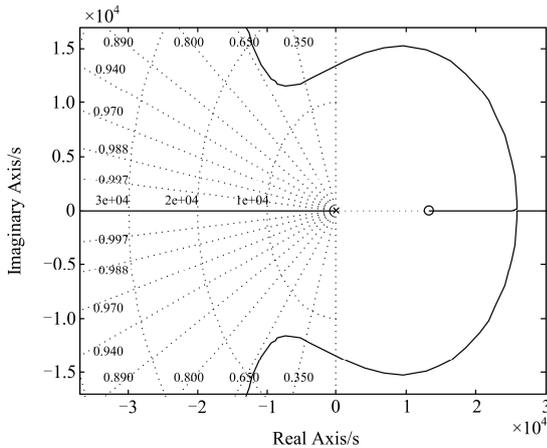


图 3 闭环系统 $G_1(s)$ 根轨迹图

Fig. 3 Root locus of $G_1(s)$ closed-loop system

系统临界振荡特性直接反映被控过程的稳定性, 根据 $G_1(s)$ 的根轨迹图, 应用齐格勒-尼克尔斯

(Ziegler-Nichols, Z-N)法初步整定 PI 控制器参数。即当系统处于临界振荡时, 得到系统的稳定裕度参数: 穿越频域 $\omega_c = 1.35 \times 10^4$, 增益裕度 $K_c = 0.1318$; 并计算 $T_c = 2\pi / \omega_c$ 。由式(10)得到 PI 控制器参数。

$$\begin{cases} K_p = 0.4K_c \\ K_i = \frac{K_p}{0.833T_c} \end{cases} \quad (10)$$

电容电流反馈系数 H_1 的作用是阻尼 LCL 滤波器谐振峰。由式(10)将得到的 PI 控制器参数代入 $G(s)$, 得到不同 H_1 值时的伯德图, 如图 4 所示。

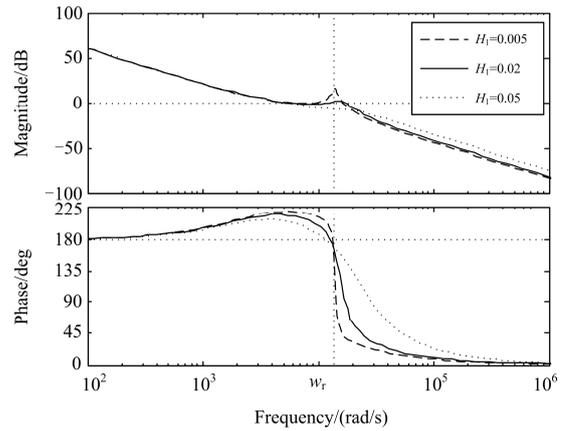


图 4 不同 H_1 值时开环系统 Bode 图

Fig. 4 Bode diagram of open-loop system with different parameters for H_1

从图 4 中可知: 系统环路增益的幅频特性曲线在 w_r 处出现谐振峰, 并且随着 H_1 的增大, LCL 滤波器的谐振峰将得到有效阻尼。从系统的相频特性曲线可知, 系统也在 w_r 处穿越 -180° , 故为了获得系统稳定性, 必须在 w_r 处在使 LCL 滤波器的谐振峰值降到 0 dB 以下。为进一步优化外环 PI 调机器参数并保证系统稳定, 取电容电流反馈系数 H_1 为 0.05。

2.2 基于遗传算法的 PI 参数优化

以上论述了 LCL 滤波器基于频域法的内外环参数整定, 可初步满足系统稳定性要求, 但为了获得良好的系统整体性能, 仍需要借助根轨迹和伯德图反复试凑。

针对以上传统方法的不足, 本文采用遗传算法 (Genetic Algorithm) 对外环 PI 调节器参数进行寻优。遗传算法的搜索策略不依赖于梯度信息, 是模拟生物在自然环境中的遗传和进化过程而形成的一种全局优化搜索算法。

首先确定 PI 调节器范围, 并由此产生一个随机

种群, 应用适应度函数对种群中的每个个体进行评价, 适应性高的个体保存到下一代, 通过对遗传算子(选择、交叉、变异)的操作产生下一代优良种群, 经多次迭代, 直到产生满足性能指标的优良个体。算法流程图如图 5 所示。

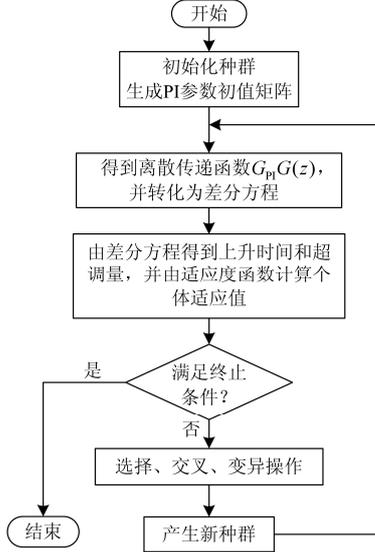


图 5 基于遗传算法的 PI 参数整定流程图

Fig. 5 PI parameter tuning flow chart based on genetic algorithm

PI 调节器参数种群初值的生成应根据系统的数学模型确定其范围。由式(3)得到系统特征方程为

$$D_3(s) = a_1s^4 + a_2s^3 + (a_4 - a_3K_p)s^2 + (K_{PWM}K_p - a_3K_1)s + K_{PWM}K_1 \quad (11)$$

式中, a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 的值如式(12)所示。

$$\begin{cases} a_1 = (L_1L_2C - 1.5T_S K_{PWM}H_1L_2C) \\ a_2 = K_{PWM}H_1L_2C \\ a_3 = 1.5T_S K_{PWM} \\ a_4 = L_1 + L_2 \end{cases} \quad (12)$$

根据劳斯稳定性判据, 分别得到参数 K_p 、 K_1 的限定范围为

$$\begin{cases} K_p < a_4/a_3 \\ K_p < (a_2a_4 + a_1a_3)/(a_2a_3 + a_1K_{PWM}) \\ K_p < (\beta_p + \sqrt{\beta_p^2 - 4\alpha_p\gamma_p})/(2\alpha_p) \\ K_p > (\beta_p - \sqrt{\beta_p^2 - 4\alpha_p\gamma_p})/(2\alpha_p) \\ K_1 < K_{PWM}K_p/a_3 \\ K_1 > (a_1K_{PWM}K_p + a_2a_3K_p - a_2a_4)/(a_1a_3) \\ K_1 > (-\beta_1 - \sqrt{\beta_1^2 + 4\alpha_1\gamma_1})/(2\alpha_1) \\ K_1 < (-\beta_1 + \sqrt{\beta_1^2 + 4\alpha_1\gamma_1})/(2\alpha_1) \end{cases} \quad (13)$$

式中, α_p 、 β_p 、 γ_p 、 α_1 、 β_1 、 γ_1 的值如式(14)所示。

$$\begin{cases} \alpha_p = K_{PWM}(a_2a_3 + a_1K_{PWM}) \\ \beta_p = K_{PWM}(a_2a_4 + 2a_1a_3K_1) + a_2a_3^2K_1 \\ \gamma_p = K_1(a_2a_3a_4 + a_1a_3^2K_1 + a_2^2K_{PWM}) \\ \alpha_1 = a_1a_3^2 \\ \beta_1 = K_{PWM}(a_2^2 - 2a_1a_3K_p) - a_2a_3(a_3K_p + a_4) \\ \gamma_1 = K_{PWM}K_p(a_2a_4 - a_2a_3K_p - a_1K_{PWM}K_p) \end{cases} \quad (14)$$

为缩小搜索范围, 提高寻优效率, 根据式(12)一式(14)将 PI 调节器参数的种群范围分别限定在 (0.018, 0.105)、(60, 330) 之间。

PI 调节器的适应度函数是评价群体中个体好坏的标准, 其优劣直接影响遗传算法的收敛速度及能否找到最优解, 故应保证适应度函数能准确反映系统的控制要求, 为了系统获得较好的动态特性, 适应度函数对 ITAE(误差绝对值的一阶矩)指标进行了改进, 即在 ITAE 指标中引入上升时间和超调量惩罚作为适应度评价的一部分, 其表达式如式(15)所示。

$$F = \int_0^\infty [w_1t|e(t)| + w_2u^2(t)]dt + w_3t_r + w_4\sigma \quad (15)$$

式中: $u(t)$ 为系统输出值; t_r 为上升时间; σ 为超调量; w_1 、 w_2 、 w_3 、 w_4 为权值, 用来衡量各个指标对系统动态性能的影响, 需要根据仿真结果进行调整。

选取 PI 调节器的种群大小为 20, 交叉概率为 0.8, 对其迭代 35 次。得到 PI 调节器参数的适应度函数曲线, 如图 6 所示, 横轴为迭代次数, 纵轴为每代中最优个体的适应度, 其值越小, 代表个体的适应性越优良。图 7 为优化前后系统的单位阶跃响应, 可以看出, 优化后系统的超调量得到明显改善。图 8 为优化后系统伯德图, 由图 8 可知, 系统稳定裕度得到提高, 相角裕度 $\gamma = 32.8^\circ$, 幅值裕度 $h = 10.7$ dB, 满足二阶系统稳定性要求。

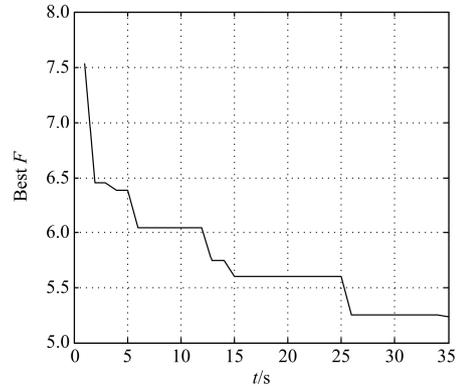


图 6 PI 调节器适应度函数迭代曲线

Fig. 6 Iteration curve for PI regulator fitness function

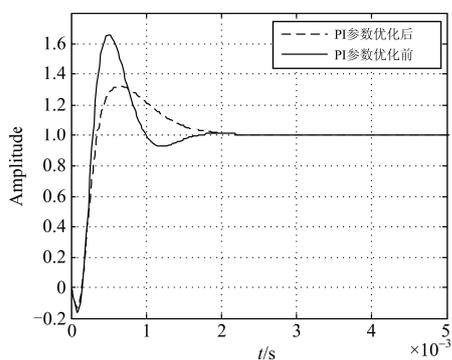


图 7 PI调节器优化前后单位阶跃曲线

Fig. 7 PI regulator curves of step response before and after optimization

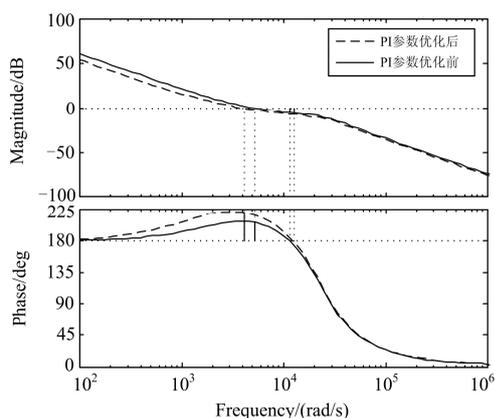


图 8 优化后系统 Bode 图

Fig. 8 System Bode diagram after optimization

3 仿真实验

为验证上文的参数优化方法, 选取一台单相 LCL 型并网逆变器样机, 其参数如表 1 所示, 进行 Matlab/Simulink 仿真实验。取电容电流反馈系数 $H_1=0.05$; 经遗传算法优化后, 外环 PI 调节器参数分别为 $K_p=0.0477$, $K_i=62.8730$ 。

表 1 LCL 滤波器单相并网逆变器的样机参数

Table 1 Parameters of single-phase grid-connected inverter for LCL filter

参数	数值
逆变器侧电感 L_1 / mH	1.0
滤波电容 C / μ F	10
网侧电感 L_2 / mH	1.2
网侧电压 v_g / V	220
三角载波 v_m / V	5
输入直流电压 v_{dc} / V	900
网侧基波频率 / Hz	50
采样频率 f_s / kHz	20

当指令电流有效值为 30 A 时, 图 9 为网侧电压 v_g 和并网电流 i_2 的波形图。为检验逆变器对网侧电压谐波的抑制能力, 将电网电压注入 5% 的 3 次谐波、3% 的 5 次谐波、2% 的 7 次谐波、1% 的 11 次谐波及 0.5% 的 13 次谐波, 得到网侧电压 v_g 和并网电流 i_2 的波形, 如图 10 所示, 并对并网电流 i_2 进行傅里叶(FFT)分析, 得到各次谐波占基波的百分比, 如图 11 所示, 其总谐波抑制比(THD)仅为 4.6%。

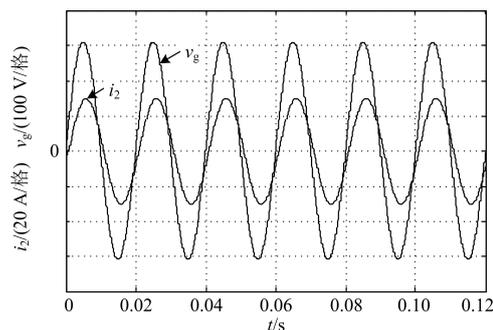


图 9 网侧电压和并网电流波形

Fig. 9 Voltage waveform in grid side and waveform of grid-connected current

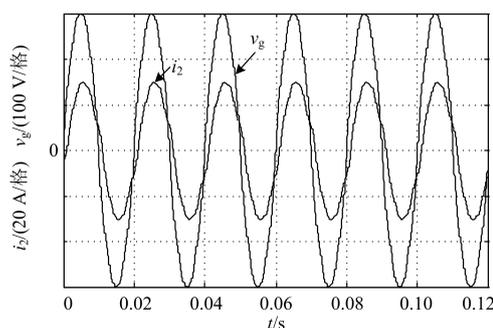


图 10 含有谐波的网侧电压及并网电流波形

Fig. 10 Voltage waveform with harmonics contained in grid side and waveform of grid-connected current

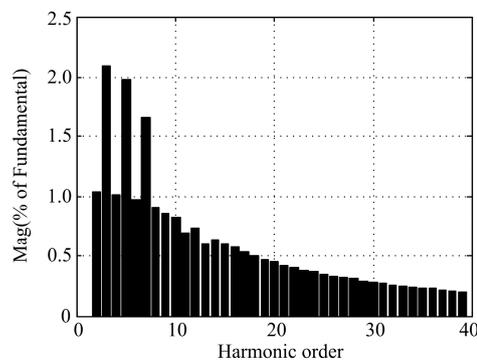


图 11 并网电流 FFT 分析

Fig. 11 FFT analysis of grid-connected current

图 12 为并网电流 i_2 在峰值为 25 A 突变到 50 A 时的动态响应曲线, 其突变过程的超调量为 20%, 动态调整时间为 1.1 ms。

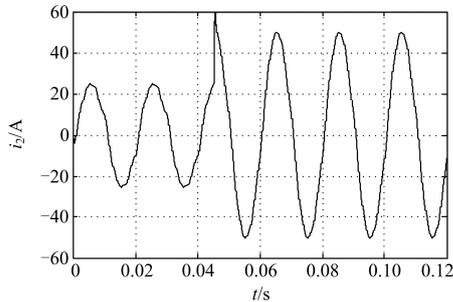


图 12 并网电流的突变波形

Fig. 12 Mutation waveform of grid-connected current

4 结论

本文应用频域法和遗传算法对 LCL 型逆变器双闭环参数进行了整定和优化, 得到如下结论:

1) 建立了单相 LCL 型逆变器双闭环控制系统的数学模型。

2) 通过根轨迹图和齐格勒-尼科尔斯法初步整定了系统内外环参数, 并根据劳斯稳定性判据分析了内外环参数对系统稳定性的影响。应用遗传算法对并网电流调节器 PI 参数进行了优化。

3) 选择一台 LCL 型单相并网逆变器进行 Matlab/Simulink 仿真实验, 仿真结果表明, 本文所优化的控制器参数具有较好的鲁棒性和并网谐波抑制能力。

参考文献

- [1] 王赞程, 陈新, 陈杰, 等. 基于谐波线性化的三相 LCL 型并网逆变器正负序阻抗建模分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(21): 5890-5898, 6033.
WANG Yuncheng, CHEN Xin, CHEN Jie, et al. Analysis of positive-sequence and negative-sequence impedance modeling of three-phase LCL-type grid-connected inverters based on harmonic linearization[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(21): 5890-5898, 6033.
- [2] 张兴, 汪杨俊, 余畅舟, 等. LCL 并网逆变器改进型重复控制策略[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(20): 101-107.
ZHANG Xing, WANG Yangjun, YU Changzhou, et al. An improved repetitive control strategy for grid-connected inverters with LCL filter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(20): 101-107.
- [3] 鲍陈磊, 阮新波, 王兴华, 等. 基于 PI 调节器和电容电流反馈有源阻尼的 LCL 型并网逆变器闭环参数设计[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 133-142, 19.
BAO Chenlei, RUAN Xinbo, WANG Xuehua, et al. Design of grid-connected inverters with LCL filter based on PI regulator and capacitor current feedback active damping[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 133-142, 19.
- [4] 潘冬华, 阮新波, 王兴华, 等. 提高 LCL 型并网逆变器鲁棒性的电容电流即时反馈有源阻尼方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(18): 1-10, 21.
PAN Donghua, RUAN Xinbo, WANG Xuehua, et al. A capacitor-current real-time feedback active damping method for improving robustness of the LCL-type grid-connected inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(18): 1-10, 21.
- [5] 李芬, 邹旭东, 邹云屏, 等. 并网 LCL 滤波的 PWM 整流器输入阻抗分析[J]. 电工技术学报, 2010, 25(1): 97-103.
LI Fen, ZOU Xudong, ZOU Yunping, et al. Input impedance analysis of LCL-filter PWM rectifier connected to grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(1): 97-103.
- [6] MARCO L, ANTONIO D 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.
- [7] FEI L, DUAN S H, CHEN G Q, et al. Design and control of three-phase PV grid connected converter with LCL filter[C] // Proc. IEEE IECON'07, 2007: 1656-1661.
- [8] TWINING E, HOLMES D G. Grid current regulation of a three-phase voltage source inverter with an LCL input filter[C] // Proc. IEEE PESC'02, 2002: 1189-1194.
- [9] 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.
- [10] 靳伟, 李永丽, 孙广宇. 基于有源阻尼的并网逆变器电流内环 H_∞ 重复控制[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(17): 4685-4694.
JIN Wei, LI Yongli, SUN Guangyu. H_∞ repetitive current controllers for grid-connected inverters based on active damping[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(17): 4685-4694.
- [11] 许津铭, 谢少军, 肖华锋. LCL 滤波器有源阻尼控制机制研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(9): 27-33, 6.
XU Jinming, XIE Shaojun, XIAO Huaifeng. Research on control mechanism of active damping for LCL filters[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(9): 27-33, 6.
- [12] 周乐明, 罗安, 陈燕东, 等. LCL 型并网逆变器的鲁棒并网电流反馈有源阻尼控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(10): 2742-2752.

- ZHOU Leming, LUO An, CHEN Yandong, et al. A robust grid-current-feedback-active-damping method for LCL-type grid-connected inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(10): 2742-2752.
- [13] 卞文倩, 李飞, 赵晋斌. 基于 LCL 型逆变器的数字陷波器有源阻尼方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(21): 14-19.
- BIAN Wenqian, LI Fei, ZHAO Jinbin. Research on digital notch filter active damping based on LCL-type inverter[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(21): 14-19.
- [14] 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.
- [15] 方红伟, 陶月, 肖朝霞, 等. 并网逆变器并联系统的鲁棒控制与环流分析[J]. 电工技术学报, 2017, 32(18): 248-258.
- FANG Hongwei, TAO Yue, XIAO Zhaoxia, et al. Robust control and circulating current analysis for grid-connected parallel inverters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(18): 248-258.
- [16] 田鹏, 宣文华, 牛益国. 基于陷波控制的 LCL 型光伏并网逆变器谐波谐振抑制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(14): 82-88.
- TIAN Peng, XUAN Wenhua, NIU Yiguo. Suppression of harmonic resonance for photovoltaic grid-connected inverter with LCL filter based on notch filter control[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(14): 82-88.
- [17] 殷进军, 刘邦银, 段善旭. LCL 滤波并网逆变器双环控制参数设计与优化[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(9): 123-128.
- YIN Jinjun, LIU Bangyin, DUAN Shanxu. Parameters design and optimization of dual-loop controller for grid-connected inverters with LCL filters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(9): 123-128.
- [18] 满灿, 王宝华. LCL 型三相并网逆变器自适应控制策略及其参数设计[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(14): 134-142.
- MAN Can, WANG Baohua. Adaptive control strategy and its parameters design of grid-connected inverters with LCL filter[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(14): 134-142.
- [19] 杨树德, 同向前, 尹军, 等. 增强并网逆变器对电网阻抗鲁棒稳定性的改进前馈控制方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(10): 222-230, 240.
- YANG Shude, TONG Xiangqian, YIN Jun, et al. An improved grid voltage feedforward strategy for grid-connected inverter to achieve high robust stability against grid-impedance variation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(10): 222-230, 240.
- [20] 杨东升, 阮新波, 吴恒. 提高 LCL 型并网逆变器电流控制性能的双采样模式实时运算方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(6): 1445-1454.
- YANG Dongsheng, RUAN Xinbo, WU Heng. A real-time computation method with dual sampling modes to improve the current control performance of the LCL-type grid-connected inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(6): 1445-1454.

收稿日期: 2017-11-16; 修回日期: 2017-12-03

作者简介:

王佐勋(1972—), 男, 教授, 博士, 研究方向为控制理论与控制工程; E-mail: wangzuoxun@126.com

李亚洲(1991—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为检测技术与自动化。E-mail: liyazhou566@126.com

(编辑 周金梅)