

考虑 VSC 系统谐波稳定条件下的 LCL 滤波器 参数优化设计方法

刘建锋¹, 李美玉¹, 余光正¹, 励晨阳¹, 王雅兰²

(1. 上海电力大学电气工程学院, 上海 200090; 2. 国网湖北省电力有限公司计量中心, 湖北 武汉 430075)

摘要: 可再生能源发电系统通常在逆变器出口处接入 LCL 滤波器以抑制高频谐波, 然而在 LCL 滤波器的参数设计过程中, 不合理的参数设计会加剧系统中的谐波不稳定问题。因此, 通过结合 LCL 滤波器的外特性需求, 并且综合考虑系统稳定性对滤波器的约束条件, 建立以谐波衰减率最大、电感成本最小以及系统稳定性最好为目标函数的 LCL 滤波器参数多目标优化模型。在模型的求解过程中, 针对单目标优化算法和传统的多目标优化算法存在设计目标单一、收敛性差和优化效果不佳等问题, 提出采用 MOEA/D 多目标优化算法来求解。该算法利用权重向量的进化导向性以及子问题邻域的优势共享特征, 保证了算法对最优解的寻优能力以及在目标空间上的均匀分布, 以获得理想的 pareto 最优前沿, 并进一步采用模糊隶属度函数定量分析其优化效果。最后, 利用 Matlab/Simulink 软件对光伏并网系统中的电压源型逆变器(Voltage Source Converter, VSC)进行仿真。仿真结果充分表明所设计方案的有效性和适用性。

关键词: VSC 系统; 谐波不稳定; LCL 滤波器参数设计; MOEA/D 算法; 模糊隶属度函数

Optimization design method of LCL filter parameters considering harmonic stability of VSC system

LIU Jianfeng¹, LI Meiyu¹, YU Guangzheng¹, LI Chenyang¹, WANG Yalan²

(1. School of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

2. State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd. Metrology Center, Wuhan 430075, China)

Abstract: Renewable energy power generation systems usually connect the LCL filter at the outlet of the inverter to suppress high-frequency harmonics. However, in the parameter design process of the LCL filter, unreasonable parameter design will aggravate the problem of harmonic instability in the system. Therefore, by combining the external characteristic requirements of the LCL filter and considering the constraints of the system stability on the filter, the multi-objective optimization model of LCL filter parameters with the largest harmonic attenuation rate, the lowest inductance cost and the best system stability is established. In the process of solving the model, for the single target optimization algorithm and the traditional multi-objective optimization algorithm, there are problems such as single design goal, poor convergence and poor optimization effect, the MOEA/D multi-objective optimization algorithm is proposed. The algorithm utilizes the evolutionary orientation of weight vectors and the dominant sharing characteristics of subproblem neighborhoods to guarantee the ability of the algorithm to find the optimal solution and the uniform distribution in the target space, the purpose of which is to get the ideal pareto optimal frontier, then the fuzzy membership function is used to quantitatively analyze its optimization effect. Finally, the voltage source converter (VSC) in the photovoltaic grid-connected system is simulated by Matlab/Simulink software. The simulation results fully demonstrate the effectiveness and applicability of the proposed design.

This work is supported by Youth Science Fund Project of National Natural Science Foundation of China (No. 51807114).

Key words: VSC system; harmonic instability; LCL filter parameter design; MOEA/D algorithm; fuzzy membership function

0 引言

随着电力电子技术的快速发展, 可再生能源发

电系统接入电网的规模日益增大, 以电力电子技术为基础的可再生能源发电系统逐渐取代了传统的发电系统, 成为电网中重要的部分^[1]。逆变器作为可再生能源发电系统与电网连接的重要元件, 在与并网系统动态交互的作用下, 会引发电流/电压谐波幅值持续放大的谐波不稳定现象^[2]。系统中出现谐波

不稳定现象将引起逆变器交流母线电压严重畸变, 最终导致风力、光伏等可再生能源并网系统无法正常工作^[3-4]。因此, 对谐波不稳定现象的抑制显得尤为重要。

目前, 可再生能源发电系统中多采用电压源逆变器^[5-6]。由于逆变器在并网过程中会产生大量的谐波, 因此需要在逆变器与电网之间接入滤波器来抑制谐波流入电网^[7]。相较于 L 和 LC 型滤波器, LCL 型滤波器因具有较好的谐波抑制能力而被广泛采用^[8-9]。然而, LCL 型滤波器的接入使系统存在潜在的谐振问题, 因此需采取相关的阻尼方式来抑制谐振^[10]。目前主要的阻尼方式包括有源阻尼和无源阻尼^[11]。相较于无源阻尼, 有源阻尼是通过算法来增加系统阻尼, 在不增加电阻阻尼损耗的前提下, 以控制取代实际阻尼电阻来抑制系统谐振, 进而提高了系统的谐波稳定性^[12]。近年来有大量文献通过滤波器和有源控制策略的设计来抑制系统中的谐振现象。文献[13]通过结合实际设计经验对 LCL 滤波器参数进行设计, 以实现网侧电流/电压 THD 值的最小化, 然而该方法需通过经验公式反复试凑才能得出结果, 并未涉及参数优化。文献[14]通过采用优化方法来设计 LCL 滤波器参数, 在保证滤波性能的前提下实现电感成本的最低化, 但是没有考虑滤波器参数与控制器参数间的相互制约性, 谐振未得到有效抑制。文献[15-16]通过考虑控制器对滤波器参数设计的限制并结合滤波性能的需求来设计 LCL 滤波器参数, 解决了谐波不稳定问题, 然而这些方法均是在理想的并网环境下进行的, 没有考虑系统阻抗对谐波稳定性的影响。在实际的弱电网并网运行中, 逆变器输出阻抗与电网阻抗之间的交互作用会影响系统的稳定性, 其中逆变器输出阻抗值取决于控制环路与滤波器的设计^[17]。为此, 在设计滤波器参数的过程中, 本文利用阻抗分析法得到正网络阻尼判据, 并将其作为对滤波器设计的约束条件。

在 LCL 滤波器的参数优化设计中, 文献[18]提出基于自适应遗传算法的 LCL 滤波器参数的单目标优化设计方法, 但是该算法仅以开关频率处谐波衰减率为优化目标, 存在优化对象单一、优化效果不佳等问题。文献[19]提出了基于粒子群算法的 LCL 滤波器参数的多目标优化设计方法, 虽综合考虑了多个目标, 却是通过加权为单目标优化问题来进行求解, 需要决策者有足够的先验知识, 并且存在收敛速度慢、计算复杂和易陷于局部最优等问题。

针对上述问题, 本文提出了 LCL 滤波器参数多目标优化模型, 该模型综合考虑了 LCL 滤波器的外特性需求以及系统稳定性对滤波器的约束条件, 以

实现谐波衰减率的最大化、电感成本的最低化以及系统稳定性的最佳化, 并采用 MOEA/D 算法进行求解。在求解过程中, 利用分解算法将整个多目标最优前沿的 pareto 逼近问题分解成一定数量的单目标子问题, 然后根据一定数量的相邻信息, 采用进化算法对每个单目标子问题进行优化求解^[20]。该算法在优化过程中不仅提高了 pareto 解集的质量, 同时也提高了计算效率以及收敛性。进一步基于满意度指标的分析来比较其他方案与本文方案的优化结果。最后, 通过 Simulink 软件搭建 VSC 系统模型, 进行算例验证。

1 并网逆变器的拓扑结构及控制方法

1.1 三相并网逆变器的主电路拓扑结构

如图 1 所示, 三相并网逆变器的主电路拓扑结构是由逆变器、LCL 型滤波器、电网三大模块组成的系统。图中 L_1 、 L_2 、 C 分别为 LCL 型滤波器的逆变器侧电感、网侧电感、电容; i_1 、 i_2 分别为逆变器侧电流、并网电流; V_{dc} 为逆变器直流侧电压; V_g 为网侧电压。

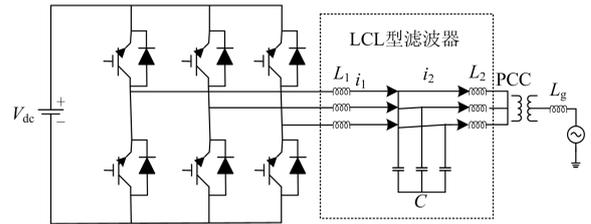


图 1 三相并网逆变器的主电路拓扑结构图

Fig. 1 Main circuit topology diagram of three-phase grid-connected inverter

1.2 VSC 并网控制方法

为抑制三相并网逆变器中谐波不稳定现象, 在图 1 的基础上引入控制策略。图 2 给出了基于双环控制的 VSC 系统及其控制框图, 图中 v_M 、 v_0 分别为逆变器交流侧电压、PCC 点电压。基于电路的微积分定理, 将逆变器交流侧三相电流 i_{1-abc} 、PCC 点三相电压 v_{0-abc} 经 $abc-\alpha\beta$ 坐标系转换成 $I_{1-\alpha\beta}$ 、 $V_{0-\alpha\beta}$, 其中, $\alpha\beta-abc$ 变换公式为

$$T_{\alpha\beta/abc}(\omega) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \cos(\omega t - 2\pi/3) & \cos(\omega t + 2\pi/3) \\ -\sin(\omega t) & -\sin(\omega t - 2\pi/3) & -\sin(\omega t + 2\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (1)$$

在双环控制策略中, G_C 、 G_V 分别为电流环、电压环的 PI 控制函数, 能够保证控制环的稳定性。然而数字控制会引发延时效应^[21], 包括 PWM 延时

T_{ZOH} 以及采样计算延时 T_d , T_{ZOH} 会降低控制系统的稳定裕度。为了简化分析, 本文暂不考虑 PWM 延时而对控制系统稳定性的影响。则 G_C 、 G_V 、 G_{all} 的传递函数分别为式(2)~式(4)。

$$G_C = K_{\text{pi}} + \frac{K_{\text{ii}}}{s} \quad (2)$$

$$G_V = K_{\text{pv}} + \frac{K_{\text{iv}}}{s} \quad (3)$$

$$G_{\text{all}} = e^{-T_d s} \approx \frac{1}{1.5T_s s + 1} \quad (4)$$

式中: T_s 为采样周期; K_{pi} 、 K_{ii} 和 K_{pv} 、 K_{iv} 分别为电流环和电压环的 PI 控制参数。

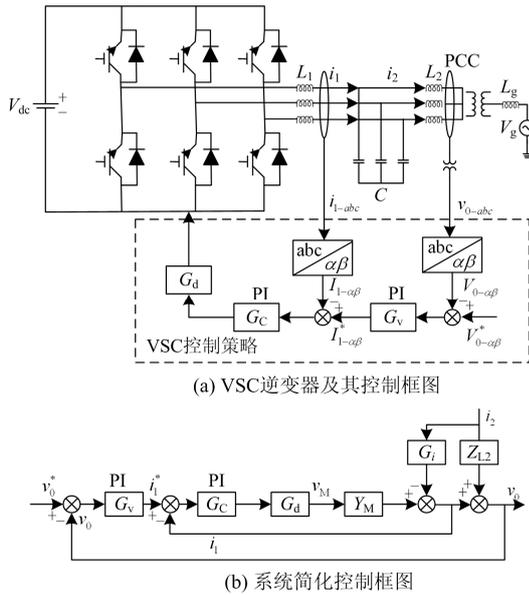


图 2 VSC 系统及其控制框图

Fig. 2 VSC system and its control block diagram

2 VSC 并网系统的等效建模及稳定判据

2.1 VSC 并网系统的等效网络阻抗模型

根据图 2, 对 VSC 并网系统进行阻抗建模分析。其中, 逆变器交流侧电压 v_M 、网侧电流 i_2 与逆变器交流侧电流 i_1 的比值关系可表示为

$$Y_M = \frac{i_1}{v_M} = \frac{1}{Z_{L1} + Z_C} \quad (5)$$

$$G_1 = \frac{i_1}{i_2} = \frac{Z_C}{Z_C + Z_{L1}} \quad (6)$$

式中, Z_C 、 Z_{L1} 、 Z_{L2} 分别为 LCL 滤波器的电容、逆变器侧电感、网侧电感的阻抗。其表达式为

$$Z_C = \frac{1}{sC}, Z_{L1} = sL_1, Z_{L2} = sL \quad (7)$$

由叠加定理, 可得 i_1 的动态特性为

$$i_1 = \frac{T_c i_1^*}{1 + T_c} + \frac{G_1 i_2}{1 + T_c} \quad (8)$$

式中, T_c 为电流控制环的开环增益, 可表示为

$$T_c = G_C G_d Y_M \quad (9)$$

根据环路电压定理, 利用戴维南模型, PCC 点电压 v_0 可表示为

$$v_0 = G_p v_0^* + Z_{\text{VSC}} i_2 \quad (10)$$

式中: G_p 为电压环控制系统的传递函数; v_0^* 为逆变器的电压环参考值; Z_{VSC} 为逆变器的输出阻抗。其中, v_0^* 可视为常数, 因此 v_0 的变化主要由 G_p 、 Z_{VSC} 决定。换句话说, 系统的谐波不稳定问题与电压环控制系统的传递函数 G_p 和逆变器输出阻抗 Z_{VSC} 有很大关联。其中 G_p 和 Z_{VSC} 的表达式为

$$G_p = 1 - \frac{1}{T_V + 1} \quad (11)$$

$$Z_{\text{VSC}} = \frac{Z_{\text{op}}}{T_V + 1} \quad (12)$$

式中: Z_{op} 为开环输入阻抗; T_V 为系统的开环增益; Z_{op} 和 T_V 可分别表示为式(13)和式(14)。

$$T_V = \frac{T_c}{T_c + 1} G_V Z_C = \frac{G_C G_d G_V Z_C}{Z_{L1} + Z_C + G_C G_d} \quad (13)$$

$$Z_{\text{op}} = \frac{Z_C (Z_{L1} + G_C G_d)}{Z_C + Z_{L1} + G_C G_d} + Z_{L2} \quad (14)$$

最后, 分别将式(13)代入式(11)、将式(13)和式(14)代入式(12), 整理得 G_p 和 Z_{VSC} 为

$$G_p = \frac{G_C G_d G_V}{G_C G_d G_V + CL_1 s^2 + G_C G_d Cs + 1} \quad (15)$$

$$Z_{\text{VSC}} = \frac{L_1 L_2 Cs^3 + G_C G_d L_1 Cs^2 + (L_1 + L_2)s + G_C G_d}{L_1 Cs^2 + G_C G_d Cs + G_C G_d G_V + 1} \quad (16)$$

2.2 正网络阻尼稳定判据

基于 2.1 节所求的 G_p 和 Z_{VSC} , 可将图 2(a)中 VSC 逆变部分进行戴维南等效, 其等效网络阻抗如图 3 所示。

文献[22]提出当 VSC 系统处于谐波谐振条件下, 若系统无法提供足够的阻尼来抑制谐振, 将导致谐波不稳定的发生。因此本文采用阻抗分析法中的正网络阻尼判据作为系统的稳定判据。

根据图 3 可得到 SISO 型系统控制框图, 如图 4 所示。

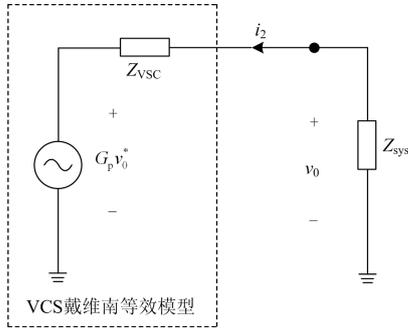


图 3 VSC 逆变器并网等效网络阻抗模型
Fig. 3 Equivalent network impedance model of inverter grid-connected

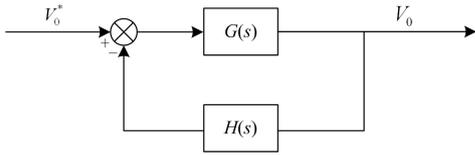


图 4 SISO 型系统控制框图
Fig. 4 SISO type system control block diagram

图中 $G(s) = G_p(s)$ 、 $H(s) = Z_{vsc}(s)/G_p(s)Z_{sys}(s)$ ，系统的开环传递函数可表示为

$$G(s)H(s) = \frac{Z_{vsc}(s)}{Z_{sys}(s)} \quad (17)$$

将式(16)代入式(17)得

$$G(s)H(s) = \frac{L_1 L_2 C s^3 + G_C G_d L_1 C s^2 + (L_1 + L_2)s + G_C G_d}{L_1 L_g C s^3 + G_C G_d L_g C s^2 + (G_C G_d G_V L_g + L_g)s} \quad (18)$$

由于图 4 是一个具有负反馈的 SISO 系统，将 $1/G(j\omega)$ 和 $H(j\omega)$ 的实部和虚部进行分离可得

$$\begin{cases} \frac{1}{G(j\omega)} = D_G(j\omega) + jK_G(j\omega) \\ H(j\omega) = D_H(j\omega) + jK_H(j\omega) \end{cases} \quad (19)$$

根据正网络阻尼判据定义：对于一个具有负反馈的 SISO 系统，在系统的角谐振频率 ω_{res} 处，若系统满足式(20)，闭环系统稳定。反之，闭环系统不稳定^[23]。

$$D(j\omega_{res}) = D_G(j\omega_{res}) + D_H(j\omega_{res}) > 0 \quad (20)$$

3 LCL 滤波器参数优化的数学模型

本文所提出的 LCL 滤波器参数的多目标优化模型，是以谐波处衰减率最大、总电感成本最小、电流追踪性能最好为目标函数的优化模型。其约束条件包括等式约束和不等式约束。具体的优化模型可表示为

$$\begin{cases} \max F(x, u) = \{f_1(x, u), -f_2(x, u), f_3(x, u)\} \\ \text{s.t.} \\ h_i(x, u) \leq 0, i = 1, 2, \dots, p \\ g_j(x, u) = 0, j = 1, 2, \dots, q \end{cases} \quad (21)$$

式中：目标函数 $f_1(x, u)$ 为谐波处衰减率； $f_2(x, u)$ 为总电感值； $f_3(x, u)$ 为基波频率处的环路增益幅值。约束条件 $h_i(x, u)$ 为不等式约束条件； $g_j(x, u)$ 为等式约束条件。

3.1 目标函数

3.1.1 开关频率处谐波衰减率

由于谐波衰减率的大小可表征滤波器的滤波性能优劣，且发生谐波不稳定现象时逆变器开关频率处具有高能谐波，因此提出将开关频率处谐波衰减率 f_1 作为优化目标， f_1 越大，滤波性能越好。其开关处谐波衰减率可表示为

$$f_1(x, u) \approx 1 - \frac{Z_{LC}^2}{|\omega_{res}^2 - \omega_{sw}^2|} \quad (22)$$

式中： ω_{res} 为谐振角频率； ω_{sw} 为开关角频率； Z_{LC} 为谐波阻抗。

3.1.2 总电感值

由于较大的滤波电感设计会增加滤波器的体积和成本。因此，本文将总电感值 f_2 作为一优化目标， f_2 越小，制造成本越低。

$$f_2(x, u) = (L_1 + L_2) \quad (23)$$

3.1.3 基波频率处的环路增益裕度

由于基波频率处的环路增益裕度表征系统在基波频率处的稳定程度。因此，为提高系统的稳定性，需将基波频率处的环路增益裕度 f_3 作为优化对象， f_3 越大，稳态误差越小，进而系统稳定性越好。

$$f_3(x, u) = 20 \lg |J_0| \quad (24)$$

式中， J_0 为基波频率处的环路增益幅值。

3.2 约束条件

3.2.1 等式约束条件

1) 谐振角频率

对于 LCL 型滤波器，谐振角频率 ω_{res} 可表示为

$$g_1(x, u) = \omega_{res} = 2\pi f_{res} = \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C}} \quad (25)$$

式中， f_{res} 为谐振频率。

2) 等效谐波阻抗

考虑在高频状态下，逆变器相当于一个谐波发生器，网侧近似短路。因此从逆变器侧到网侧的等效谐波阻抗 Z_{LC} 可表示为

$$g_2(x,u)=Z_{LC}=\sqrt{(L_2C)^{-1}} \quad (26)$$

3) 基波频率处的环路增益幅值

考虑在基波频率处, C 的容抗远大于 L_2 的感抗, 即 $1/\omega C \gg \omega L_2$, 且采样频率 f_s 取值很大, $T_s=1/f_s$ 等效为 0, 因此基波频率处的环路增益幅值 J_{ω_0} 可以近似表示为

$$g_3(x,u)=J_{\omega_0} \approx \frac{K_{\text{PWM}}(K_{\text{pi}} + \frac{K_{\text{ii}}}{j\omega_0})(K_{\text{pv}} + \frac{K_{\text{iv}}}{j\omega_0})}{j(L_1 + L_2)L_1\omega_0^2} \quad (27)$$

式中: ω_0 为基波角频率; K_{PWM} 为逆变器等效增益, 其大小为直流电压 U_{dc} 与三角载波幅值 U_{tri} 之比, 即 $K_{\text{PWM}}=U_{\text{dc}}/U_{\text{tri}}$ 。

3.2.2 不等式约束条件

1) 滤波总电感

滤波总电感的设计需综合考虑系统的滤波效果与动态性能, 权衡高频谐波衰减性能和控制系统响应速度, 总电感 $L_1 + L_2$ 的取值范围为

$$\frac{U_{\text{dc}}}{4\sqrt{3}\Delta I_{\text{ripple-max}}f_{\text{sw}}} \leq h_1(x,u)=L_1 + L_2 \leq \frac{\sqrt{\frac{U_{\text{dc}}^2}{3} - E_{\text{mp}}^2}}{\omega I_{\text{mp}}} \quad (28)$$

式中: E_{mp} 为相电压峰值; I_{mp} 为相电流峰值; f_{sw} 为开关频率; $\Delta I_{\text{ripple-max}}$ 为最大纹波电流, 一般要求 $\Delta I_{\text{ripple-max}}$ 小于额定电流 I_N 的 15%~30%, 即 $\Delta I_{\text{ripple-max}} < (15\% \sim 30\%)I_N$ 。

2) 滤波电容

为降低系统的无功损耗, 滤波电容吸收的无功功率一般限制为不超过 5% 的系统额定功率, 即有

$$h_2(x,u)=C < 5\% \frac{P_N}{3 \times 2\pi f_N U_N^2} \quad (29)$$

式中: P_N 为系统额定功率; U_N 为系统额定电压; f_N 为系统额定频率。

3) 谐振频率

对于 LCL 滤波器, 其谐振频率一般限制在 10 倍基频和 0.5 倍开关频率之间, 即有

$$10f_N \leq h_3(x,u)=f_{\text{res}} \leq \frac{1}{2}f_{\text{sw}} \quad (30)$$

式中: f_N 为基频; f_{sw} 为逆变器的开关频率。

4) 控制系统的稳定裕度

在工程设计中, 为了得到较满意的暂态响应和系统稳定性能, 一般要求增益裕度 $G_M(\omega_g)$ 和相角裕

度 γ 取

$$h_4(x,u)=G_M(\omega_g)=-20\lg\left|\frac{Z_{\text{VSC}}(j\omega_g)}{Z_{\text{sys}}(j\omega_g)}\right| > 6 \text{ dB} \quad (31)$$

$$40^\circ \leq h_5(x,u)=\gamma(\omega_c)=180^\circ + \varphi(\omega_c) \leq 60^\circ \quad (32)$$

式中: $G_M(\omega_g)$ 为相频特性等于 $-\pi$ 时所对应的 ω_g 处的增益裕度; $\gamma(\omega_c)$ 为幅频特性在截止频率 ω_c 处所对应的相角裕度; $\varphi(\omega_c)$ 为开环相频特性在 ω_c 处的相角。

5) 正网络阻尼判据

正网络阻尼判据作为一种谐波不稳定的分析方法, 由上一节可知 VSC 并网系统模型可等效成一个标准的 SISO 系统, 因此可将基于 VSC 逆变模型的正网络阻尼判据作为一个保证闭环系统稳定的约束条件, 即有

$$g_6(x,u)=D(G_p(j\omega_{\text{res}}))+D\left(\frac{Z_{\text{VSC}}(j\omega_{\text{res}})}{G_p(j\omega_{\text{res}})Z_{\text{sys}}(j\omega_{\text{res}})}\right) > 0 \quad (33)$$

4 模型求解方法

4.1 MOEA/D 算法

针对 LCL 滤波器参数多目标模型的求解, 本文采用了 MOEA/D 算法。MOEA/D 算法主要由分解算法和进化算法组成, 即首先利用分解算法将多目标优化问题在一定的权重方向上分解成多个单目标子问题, 然后通过进化算法对每个子问题的进行计算, 经多次迭代计算后, 最后得到 pareto 最优前沿。

4.1.1 分解算法

分解算法是 MOEA/D 算法的关键, MOEA/D 算法中的分解算法有三种: 加权和法、切比雪夫法和边界交集法^[24-25]。切比雪夫方法具有对前沿面形状不敏感, 且计算简单的优点而常被采用。其表达式为

$$\begin{cases} \min g^{\text{te}}(x|\lambda, z^*) = \max_{1 \leq i \leq m} \{\lambda_i | f_i(x) - z_i^* | \} \\ \text{s.t. } x \in \Omega \end{cases} \quad (34)$$

式中: $g^{\text{te}}(x|\lambda, z^*)$ 为优化后的子目标; λ_i 为权重向量; m 为目标函数个数; $z^* = [z_1^*, \dots, z_m^*]$ 为参考点, 对于 $i=1, \dots, m$, 存在

$$\begin{cases} z_i^* = \min \{f_i(x) | x \in S\} \\ \sum_{i=1}^m \lambda_i = 1 \end{cases} \quad (35)$$

4.1.2 进化算法

文献[26]给出了两种进化算法: 模拟二进制交

叉和差分算法。为保证种群的多样性和对 pareto 解集的搜索能力, 本文采用了差分进化算法。其数学表达式可表示为

$$y = \begin{cases} x^i + \eta(x^2 - x^5) & C_R \\ x^i & 1 - C_R \end{cases} \quad (36)$$

式中: y 为进化后产生的子代; C_R 为 $[0,1]$ 之间的随机数; $x^i (i=1,2,\dots,N_p, N_p$ 为种群规模) 为种群中第 i 个个体, r_1, r_2, r_3 为进化领域内的个体编号, η 为进化控制参数。

4.2 求解流程

本文对 LCL 滤波器参数的求解流程如下。

步骤 1: 将算法参数以及逆变器并网系统的参数进行数据录入。

步骤 2: 初始化。

(a) 初始化种群 x^1, x^2, \dots, x^{N_p} 和权重向量 $\lambda^1, \lambda^2, \dots, \lambda^{N_p}$;

(b) 计算权重向量间的欧式距离, 为每个权重向量找出 T 个距离它最近的权重向量, 记邻域 $B(i) = \{i_1, i_2, \dots, i_T\}$, 其中 $\lambda^{i_1}, \lambda^{i_2}, \dots, \lambda^{i_T}$ 为距离 λ^i 最近的 T 个权重向量。

(c) 计算每个个体 x^i 所对应的目标函数值 $F(x^i)$, 初始化参考点 $z^* = [z_1^*, \dots, z_m^*]$;

(d) 初始化迭代次数 $g_{em} = 0$ 。

步骤 3: 算法更新。

(a) 将每个个体 x^i 通过式(36)差分进化成新的个体 y , 将 y 进行约束条件处理得 y' , 然后计算新的目标函数值 $F(y')$, 若 $z_j > F_j(y')$, 则令 $z_j = F_j(y')$, $j=1,2,\dots,m$;

(b) 根据式(34), 若存在 $g^e(y' | \lambda^j, z) \leq g^e(x^i | \lambda^j, z)$, $j \in B(i)$, 则令 $x^i = y'$, $F(x^i) = F(y')$ 。

步骤 4: 终止迭代。

若满足迭代停止准则, 则停止计算, 输出 pareto 最优解集以及最优前沿, 并采用模糊集理论^[27]确定最优折中解。否则, $g_{em} = g_{em} + 1$, 返回步骤 3。

图 5 给出了具体的优化流程图。

5 算例结果及验证

5.1 算例结果

为验证前文理论分析的有效性, 本节结合表 1 所给的逆变器并网系统参数以及上述参数求解流程进行参数优化设计。

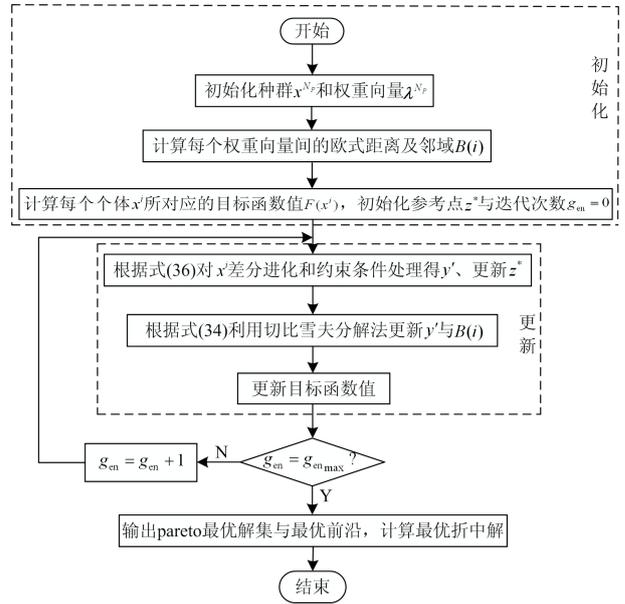


图 5 基于 MOEA/D 的多目标 LCL 滤波器参数优化流程图

Fig. 5 Flow chart of multi-objective LCL filter parameter optimization based on MOEA/D

表 1 逆变器并网系统参数

Table 1 Grid-connected system parameters of inverter

参数/单位	数值	参数/单位	数值
直流母线电压 U_{dc}/V	700	相电流峰值 I_{mp}/A	21
电网电压有效值 U_N/V	220	纹波系数 $\lambda_{ripple-max}/\%$	15
额定功率 P_N/kW	9	采样频率 f_s/kHz	20
开关频率 f_{sw}/kHz	10	电网频率 f_N/Hz	50

为体现本文所提方案的优越性, 在逆变器并网系统参数和约束函数相同的条件下, 分别采用单目标自适应遗传算法(AGA)、多目标粒子群算法(MOPSO)和 MOEA/D 算法对 LCL 滤波器参数进行优化设计。在 VSC 系统的控制参数方面, 文献[28]中提到电流环和电压环的比例增益 K_{pi} 、 K_{pv} 共同影响了谐波不稳定问题, 并且在较大阈值范围内, 电流环控制积分参数 K_{ii} 和电压环控制积分参数 K_{iv} 对谐波的稳定性几乎不产生影响, 参考文献[28]令 $K_{ii} = 9$ 、 $K_{iv} = 9$ 。为满足系统稳定性要求, 只需根据式(31)、式(32)来确定最优比例参数 K_{pi} 和 K_{pv} 的取值。基于表 1 中的系统参数和相同的约束条件, 分别将未优化、三种优化算法下的最优解或最优折衷解以及收敛于最优解的迭代次数列入表 2 中。

由表 2 中的优化结果知, MOEA/D 算法的收敛性能最好, 只需经 43 次迭代收敛至最优解。为更加直观地比较三种算法的优化性能, 将谐波衰减率、系统稳态误差与总电感成本以及稳定裕度作为 4 个

优化指标，通过模糊隶属度函数计算各指标满意程度。谐波衰减率、系统稳态误差与总电感成本需通过偏小型模糊隶属度函数求得指标满意程度。

表 2 三种算法的优化结果

Table 2 Optimization results of three algorithms

算法	L_1/mH	L_2/mH	$C/\mu\text{F}$	K_{pv}	K_{pi}	收敛性能 (迭代次数)
未优化	4	3	15	8	8	—
AGA	1.53	0.67	18	5.7	0.9	54
MOPSO	1.25	0.31	11.67	2.8	1.4	60
MOEA/D	1.16	0.27	11.74	4.1	2.6	43

$$\mu_i = \begin{cases} 1, & f_i < f_{i\min} \\ \frac{f_{i\max} - f_i}{f_{i\max} - f_{i\min}}, & f_{i\min} \leq f_i \leq f_{i\max} \\ 0, & f_i > f_{i\max} \end{cases} \quad (37)$$

稳定裕度则通过中间型模糊隶属度函数求得指标满意程度。

$$\mu_i = \begin{cases} 1, & f_i \in [a, b] \\ \frac{a - f_i}{\max[a - f_{i\min}, f_{i\max} - b]}, & f_i < a \\ \frac{f_i - b}{\max[a - f_{i\min}, f_{i\max} - b]}, & f_i > b \end{cases} \quad (38)$$

5.2 算例验证

为了验证本文设计方案的正确性和有效性，利用 Matlab/Simulink 软件搭建 VSC 并网系统仿真模型如图 6 所示的。基于表 1 中的系统参数，采用 AGA、MOPSO 以及 MOEA/D 算法分别对 LCL 滤波器参数进行求解，所得参数结果代入模型中，并对其结果进行分析比较。

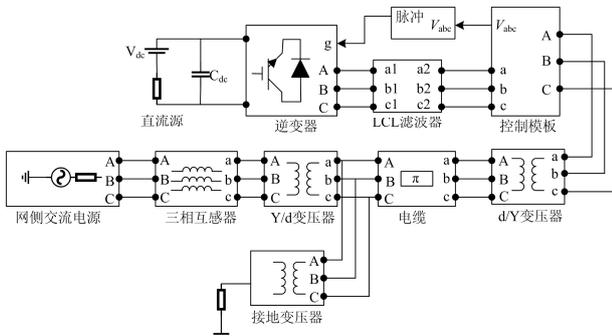


图 6 VSC 并网系统仿真模型

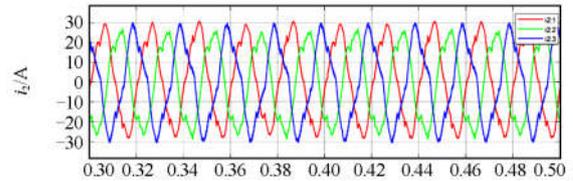
Fig. 6 VSC grid-connected system simulation model

5.2.1 网侧电流与 PCC 处电压波形的比较

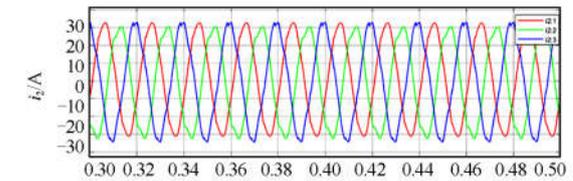
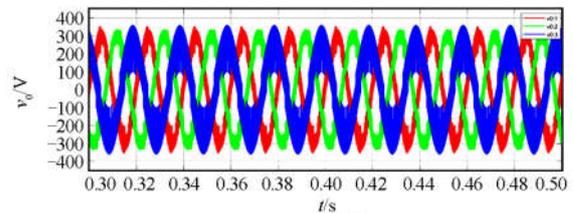
为了较为直观地反映谐波畸变程度以及系统稳定情况，分别测量未经优化和三种算法下的网侧

电流 i_2 和 PCC 处的电压 v_0 ，所得电流与电压波形如图 7 所示。

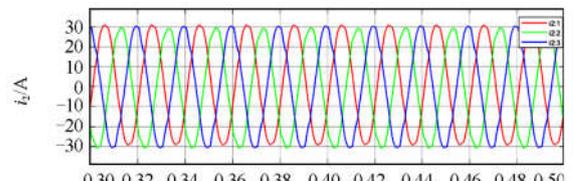
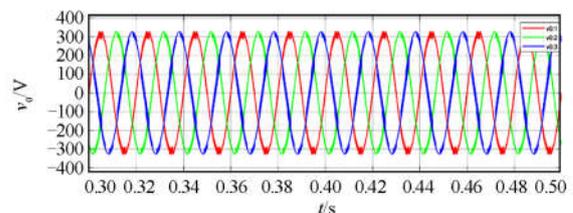
由图 7(b)、图 7(c)、图 7(d)可知，基于三种算法设计的 LCL 滤波器参数，网侧电流 i_2 与 PCC 处电压 v_0 波形情况为：AGA 算法下的 i_2 与 v_0 波形中存在较明显的纹波；MOPSO 算法下的 i_2 与 v_0 波形中存在少量纹波；MOEA/D 算法下的 i_2 与 v_0 波形中几乎不存在纹波，系统稳定。因此，基于 MOEA/D 算法所设计的 LCL 滤波器参数具有更好的滤波效果。



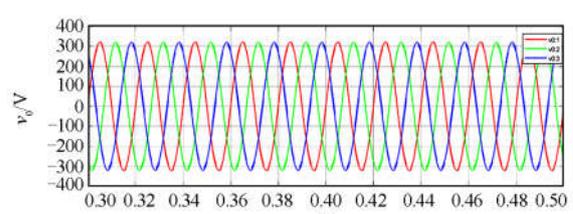
(a) 未优化



(b) AGA 算法



(c) MOPSO 算法



(d) MOEA/D 算法

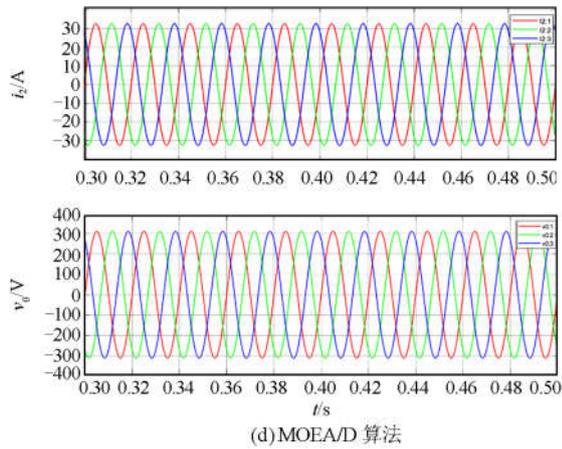


图 7 未优化和三种优化算法下的网侧电流、PCC 处电压波形

Fig. 7 Network-side current and PCC voltage waveform under unoptimized and 3 optimization algorithms

5.2.2 谐波畸变率(THD)的比较

根据 5.2.1 节所测的网侧电流与 PCC 点电压的波形, 将图 7 进行定量对比分析, 分别计算出未优化与三种算法下网侧电流频谱图、PCC 点电压频谱图所对应的 THD, 具体 THD 值见表 3。

表 3 三种算法下网侧电流与 PCC 点电压的 THD 值

Table 3 THD value of grid side current and PCC point voltage under three algorithms

算法	THD(网侧电流)	THD(PCC 点电压)
未优化	34.78%	27.40%
AGA	4.15%	3.24%
MOPSO	0.92%	0.78%
MOEA/D	0.23%	0.15%

由表 3 知 MOEA/D 算法下的网侧电流与 PCC 点电压的谐波畸变率最小, 未优化与三种算法下所测的网侧电流与 PCC 点电压的频谱图以及对应的 THD 对比分析如下。

1) 网侧电流的 THD

图 8 给出了未优化与三种算法下的网侧电流频谱图所对应的 THD。

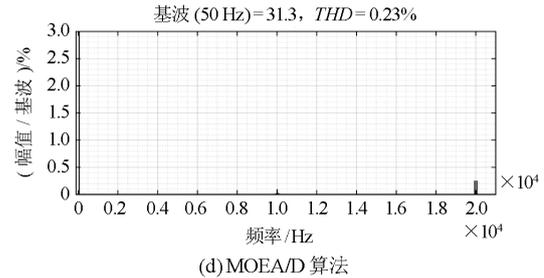
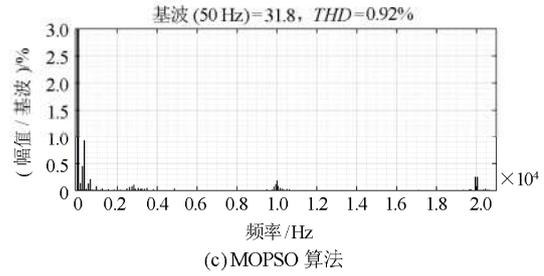
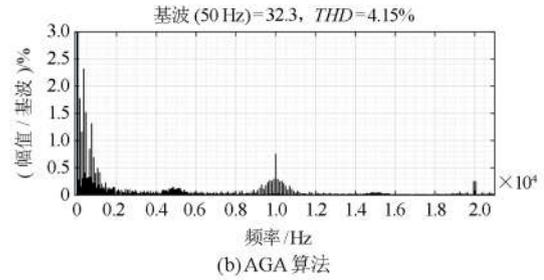
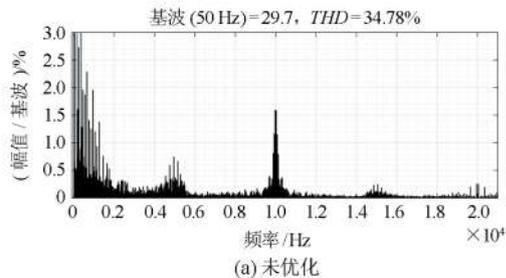


图 8 未优化和三种优化算法下的网侧电流频谱图

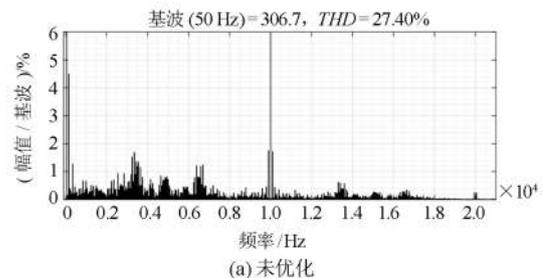
Fig. 8 Network side current spectrum diagram under unoptimized and 3 optimization algorithms

由图 8(b)、图 8(c)、图 8(d)可知, AGA 优化算法下的网侧谐波电流的 THD 值为 4.15%, 存在少量的谐波电流成分。MOPSO 优化算法下的网侧谐波电流的 THD 值为 0.92%。然而, MOEA/D 优化算法下的网侧谐波电流的 THD 值为 0.23%, 相较于 AGA 与 MOPSO 算法谐波电流成分明显减少。

2) PCC 处电压的 THD

图 9 给出了未优化与三种算法下的 PCC 处电压频谱图所对应的 THD。

由图 9(b)、图 9(c)、图 9(d)可知, AGA 优化算法下的 PCC 处谐波电压 THD 值为 3.24%; MOPSO 优



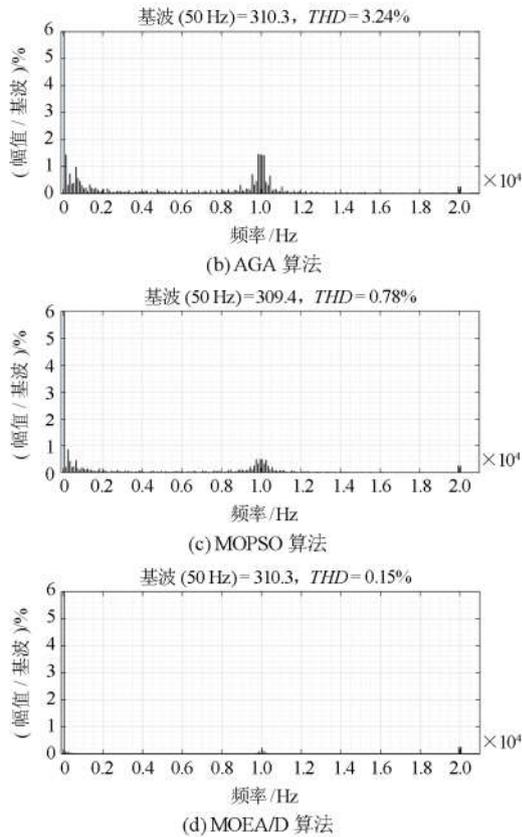


图 9 未优化和三种优化算法下的 PCC 处电压频谱图
Fig. 9 Voltage spectrum diagram at PCC under unoptimized and 3 optimization algorithms

化算法下的 PCC 处谐波电压 THD 值为 0.78%；MOEA/D 优化算法下的 PCC 处谐波电压 THD 值为 0.15%，相较于 AGA 与 MOPSO 算法谐波电压成分明显减少。因此，表明了基于 MOEA/D 算法的 LCL 滤波器参数设计更具优越性。

5.2.3 指标满意度值的比较

为进一步比较三种算法的优劣，分别计算方案一(AGA 算法)、方案二(MOPSO 算法)、方案三(MOEA/D 算法)下的指标满意度值。根据模糊隶属度函数，三种方案下的各个指标满意度对比如图 10 所示， μ_i 的取值越接近于 1，表示指标 i 的满意度越高。最终优化效果通过比较标准满意度值 μ 的大小来进行评判。其中 μ 的表达式为

$$\mu = \sum_{i=1}^n \omega_i \mu_i \quad (39)$$

式中： ω_i 为 μ_i 在 μ 中所占比重， n 为优化指标个数，三种方案中的 n 分别取 $n=2$ 、 $n=4$ 、 $n=4$ 。

根据图 10 和式(39)，三种设计方案的标准满意

度值分别为： $\mu = 0.492$ 、 $\mu = 0.694$ 、 $\mu = 0.787$ 。因此，进一步表明基于 MOEA/D 算法下的 LCL 滤波器更容易使 VSC 系统保持谐波稳定状态，且具有较为理想的滤波性能。

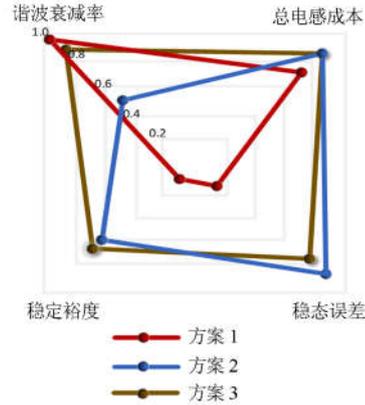


图 10 三种方案下的指标满意度对比

Fig. 10 Comparison of indicators satisfaction of three schemes

6 结论

针对逆变器与并网系统交互作用下会发生谐波不稳定现象，本文提出了考虑 VSC 系统谐波稳定条件下的 LCL 滤波器参数多目标优化模型，并采用 MOEA/D 算法进行求解。在 Matlab/Simulink 软件中搭建了 VSC 系统仿真模型，仿真结果表明相较于传统设计方案下的 LCL 滤波器，基于 MOEA/D 算法下的 LCL 滤波器使网侧与 PCC 处具有更低的谐波畸变率，进而系统更稳定。最后，基于模糊隶属度函数的定量分析将本文设计方案与传统设计方案的优化效果进行对比，结果进一步表明在滤波性能、系统成本以及稳定性方面，本文设计方案具有明显的适用性和优越性。

参考文献

- [1] 李婷, 胥威汀, 刘向龙, 等. 含高比例可再生能源的交直流混联电网规划技术研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(12): 177-187.
LI Ting, XU Weiting, LIU Xianglong, et al. Review on planning technology of AC/DC hybrid system with high proportion of renewable energy[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(12): 177-187.
- [2] WANG Y, WANG X, BLAABJERG F, et al. Harmonic instability assessment using state-space modeling and participation analysis in inverter-fed power systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(1): 806-816.
- [3] 杨明, 周林, 张东霞, 等. 考虑电网阻抗影响的大型光

- 光伏电站并网稳定性分析[J]. 电工技术学报, 2013, 28(9): 214-223.
- YANG Ming, ZHOU Lin, ZHANG Dongxia, et al. Stability analysis of large-scale photovoltaic power plants for the effect of grid impedance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(9): 214-223.
- [4] 孙钢虎, 王恩南, 贺婷, 等. 基于自适应暂态下垂控制的光伏频率快速响应方案[J]. 热力发电, 2019, 48(8): 94-100.
- SUN Ganghu, WANG Ennan, HE Ting, et al. Photovoltaic frequency fast response scheme based on adaptive transient droop control[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(8): 94-100.
- [5] YANG H, XU F, PING Y, et al. Stability analysis of digital controlled single-phase inverter with synchronous reference frame voltage control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(7): 6333-6350.
- [6] NGUYEN M K, DUONG T D, LIM Y C, et al. Switched-capacitor quasi-switched boost inverters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(6): 5105-5113.
- [7] 李小强, 伍小杰, 耿乙文, 等. 感性电网阻抗下三相光伏逆变器稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(18): 2906-2916.
- LI Xiaoqiang, WU Xiaojie, GENG Yiwen, et al. Stability analysis of three-phase PV inverter under inductive grid impedance condition[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(18): 2906-2916.
- [8] SUN X, HONG Z, MENG W, et al. Primary resonance analysis and vibration suppression for the harmonically excited nonlinear suspension system using a pair of symmetric viscoelastic buffers[J]. Nonlinear Dynamics, 2018, 94(4): 1-23.
- [9] 芮典, 李梦怡, 姚钢, 等. 基于 LCL 型感应电能双向传输系统的数学模型分析[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(1): 15-20.
- RUI Dian, LI Mengyi, YAO Gang, et al. Analysis of mathematical model based on LCL induction power bidirectional transmission system[J]. Power System and Clean Energy, 2018, 34(1): 15-20.
- [10] 杨峰峰, 杨旭红. 基于 LCL 滤波有源阻尼控制的 Z 源逆变器并网研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(5): 38-45.
- YANG Fengfeng, YANG Xuhong. Research on Z-source inverter grid-connected system based on LCL filter of active damping control[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(5): 38-45.
- [11] 汤锡. 基于 LCL 输出滤波器的并网逆变器四种 PI 控制器设计方法[J]. 电网技术, 2013, 37(11): 3268-3275.
- TANG Xi. Four design methods for proportional-integral controller of grid-connected inverter with LCL output filter[J]. Power System Technology, 2013, 37(11): 3268-3275.
- [12] 张兴, 张崇巍. PWM 整流器及其控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [13] LISERRE M, BLAABJERG F, HANSEN S. Design and control of an LCL-filter based active rectifier[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2005, 41(2): 1281-1291.
- [14] MUHLETHALER J, SCHWEIZER M, BLATTMANN R, et al. Optimal design of LCL harmonic filters for three-phase PFC rectifiers[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(7): 3114-3125.
- [15] 张光烈, 张青, 牛秋野. 基于补偿前馈电压控制的三电平逆变器研究[J]. 太阳能学报, 2018, 39(3): 783-789.
- ZHANG Guanglie, ZHANG Qing, NIU Qiuye. Three level inverter based on compensating voltage feed-forward control research[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2018, 39(3): 783-789.
- [16] 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.
- [17] CHEN X, SUN J. Characterization of inverter-grid interactions using a hardware-in-the-loop system test-bed[J]. ICPE&ECCE, 2011: 2180-2187.
- [18] 邵文权, 宋江喜, 程远, 等. 基于自适应遗传算法的风力发电系统网侧 LCL 滤波器的优化设计[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(21): 116-121.
- SHAO Wenquan, SONG Jiangxi, CHENG Yuan, et al. An optimized design for wind-power generation system grid-side LCL filter based on adaptive genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(21): 116-121.
- [19] 郭超, 杨洪耕. 考虑弱电网下逆变器稳定性的 LCL 滤波器参数优化方法[J]. 电网技术, 2018, 42(3): 949-956.
- GUO Chao, YANG Honggeng. Optimized LCL-filter design considering stability of grid-connected inverters in weak grid[J]. Power System Technology, 2018, 42(3):

- 949-956.
- [20] ZHANG Q, LI H. MOEA/D: a multiobjective evolutionary algorithm based on decomposition[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2007, 11(6): 712-731.
- [21] 沈渭程, 刘丽娟, 董开松, 等. 光伏并网 NPC 三电平逆变器调制算法研究[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(6): 69-75.
SHEN Weicheng, LIU Lijuan, DONG Kaisong, et al. Research on modulation algorithm of PV grid-connected NPC three-level inverter[J]. Power System and Clean Energy, 2018, 34(6): 69-75.
- [22] HARNEFORS L, YEPES A, VIDAL A, et al. Passivity-based controller design of grid-connected VSCs for prevention of electrical resonance instability[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(2): 702-710.
- [23] STAMATIIOU G, BONGIORNO M. Stability analysis of two-terminal VSC-HVDC systems using the net-damping criterion[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(4): 1748-1756.
- [24] 朱永胜, 王杰, 瞿博阳, 等. 采用基于分解的多目标进化算法的电力环境经济调度[J]. 电网技术, 2014, 38(6): 1577-1584.
ZHU Yongsheng, WANG Jie, QU Boyang, et al. Environmental economic dispatch adopting multi-objective evolutionary algorithm based on decomposition[J]. Power System Technology, 2014, 38(6): 1577-1584.
- [25] 田松峰, 吴昭延, 王子光, 等. 基于神经网络的凝汽器污垢热阻预测模型[J]. 热力发电, 2019, 48(2): 78-82.
TIAN Songfeng, WU Shaoyan, WANG Ziguang, et al. Prediction model of fouling thermal resistance of condenser based on neural network[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(2): 78-82.
- [26] 李研, 王洁, 王少荣, 等. 计及新能源特性的配电网评估指标及其隶属度函数的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(8): 43-49.
LI Yan, WANG Jie, WANG Shaorong, et al. Research on evaluation indices of new energy generation characteristics and membership functions[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(8): 43-49.
- [27] 邱威, 张建华, 刘念, 等. 计及插电式混合动力汽车规模化接入的多目标发电优化调度[J]. 电工技术学报, 2013, 28(12): 160-167.
QIU Wei, ZHANG Jianhua, LIU Nian, et al. Multi-objective optimal generation dispatching with large-scale plug-in hybrid electric vehicles penetration[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(12): 160-167.
- [28] 朱晓娟, 胡海涛, 陶海东, 等. 光伏并网系统的谐波不稳定产生机理及影响规律[J]. 电工技术学报, 2017, 32(10): 33-41.
ZHU Xiaojuan, HU Haitao, TAO Haidong, et al. The mechanism and influence of harmonic instability for photovoltaic grid-connected system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(10): 33-41.

收稿日期: 2019-08-07; 修回日期: 2019-09-29

作者简介:

刘建锋(1968—), 男, 博士, 副教授, 硕导, 研究方向为光电互感器、数字化变电站智能装置及电力系统、电气信息检测; E-mail: bansen@sina.com

李美玉(1996—), 女, 硕士研究生, 研究方向为可再生能源并网技术、电能质量分析; E-mail: 1169229830@qq.com

余光正(1987—), 男, 通信作者, 博士, 研究方向为新能源背景下电力系统稳定分析, 谐波谐振与谐波不稳定。E-mail: powerygz@shiep.edu.cn

(编辑 周金梅)