

# 弱电网下多逆变器并联系统的电容电压前馈谐振抑制策略

刘梦洁, 何顺帆\*, 段启豪, 李康锐, 陈祥方, 陈衡瑜

(中南民族大学 计算机学院, 武汉 430074)

**摘要** 在弱电网环境下, 多台逆变器并联运行时, 逆变器与电网以及逆变器之间的耦合作用都显著增强, 从而产生谐振, 威胁电网的安全稳定运行. 针对该问题, 提出了一种针对弱电网下多逆变器并联系统的改进电容电压前馈谐振抑制策略. 首先解析了单台逆变器的控制原理, 基于此构建了其诺顿等效模型并分析了多逆变器并联时的谐振特性, 其次对比传统的电网电压前馈和并网电流前馈策略提出了改进的电容电压陷波器前馈谐振抑制策略, 并结合牛顿优化算法提高了并网功率变化及逆变器并联台数变化时系统的鲁棒性, 最后, 利用硬件在环(Hardware-in-the-Loop, HiL)平台搭建多机并联系统的仿真模型验证了所提谐振抑制策略的有效性.

**关键词** 并网逆变器并联; 谐振抑制; 电容电压反馈

**中图分类号** TM464 **文献标志码** A **文章编号** 1672-4321(2026)03-0401-11

**doi**: 10.20056/j.cnki.ZNMDZK.20250850

## Capacitor voltage feedforward resonance suppression strategy for multi-inverter parallel system under weak grid

LIU Mengjie, HE Shunfan\*, DUAN Qihao, LI Kangrui, CHEN Xiangfang, CHEN Hengyu

(School of Computer Science, South-Central Minzu University, Wuhan 430074, China)

**Abstract** In a weak grid environment, when multiple inverters are operated in parallel, the coupling effects between the inverters and the grid, as well as between the inverters themselves, are significantly enhanced, leading to the occurrence of resonance and threatening the safe and stable operation of the grid. To address this issue, an improved capacitor voltage feedforward resonance suppression strategy for a multi-inverter parallel system in a weak grid is proposed. Firstly, the control principle of a single inverter is analyzed, and its Norton equivalent model is constructed to analyze the resonance characteristics of the multi-inverter parallel system. Then, compared with the traditional grid voltage feedforward and grid-connected current feedforward strategies, an improved capacitor voltage notch filter feedforward resonance suppression strategy is proposed. Combined with the Newton optimization algorithm, the robustness of the system is improved during changes in grid-connected power and the number of parallel inverters. Finally, a simulation model of the multi-machine parallel system is built on a Hardware-in-the-loop (HiL) platform to verify the effectiveness of the proposed resonance suppression strategy.

**Keywords** grid-connected inverter parallel operation; resonance suppression; capacitor voltage feedback

随着全球能源结构转型进程的不断加速, 以风能、太阳能等可再生新能源为代表的分布式发电系统在电力系统中的占比不断提升. 为了提高新能源发电的传输功率和可靠性, 光伏、风电通常采用多

逆变器并联的形式将电能输送至电网. 在分布式发电系统和偏远地区都较常见的弱电网情况下, 逆变器与电网以及逆变器之间的耦合作用都显著增强, 易导致系统失稳, 威胁电网的安全稳定运行.

收稿日期 2024-12-09

\* 通信作者 何顺帆(1984-), 男, 副教授, 博士, 研究方向: 智能电网大数据分析, E-mail: heshunfan@mail.scuec.edu.cn

基金项目 国家自然科学基金资助项目(61903384)

目前,针对多台逆变器并网并联运行时的谐振机理与抑制,国内外学者开展了大量研究.文献[1-2]详细分析了多逆变器并网并联系统的谐振产生机理,即谐振由自身、串联、并联三部分组成;文献[3]应用模态分析法遍历串联和并联谐振解析了系统谐振特性及类型辨识;文献[4]通过诺顿等效原理推导出了  $n$  个参数相同的逆变器并联系统的简化输出阻抗模型,但三者均未提出具体的谐振抑制方案.文献[5-8]采用在滤波器电感或电容两端串并联电阻等无源阻尼方法抑制并网逆变器的谐波,但会造成额外的功率损耗.文献[9-13]提出了基于虚拟阻抗的有源阻尼方案来代替实际电阻,后来主动阻尼又以系统控制环状态量反馈的形式出现,如文献[14]提出的传统电网电压全前馈策略可以高效抑制电网电压背景谐波引起的注入电流的畸变,但不适应弱电网下电网阻抗存在的情况;文献[15-16]提出了基于改进型相位滞后补偿装置的电网电流反馈控制和基于高通滤波器的电容电流反馈控制,但在实际操作中需要串联多余的电流传感器,操作不方便的同时也影响了系统运行的稳定性.在以上研究的基础上,文献[17]提出了电压电容全反馈方案,反馈环包括比例项和二次微分项,容易引入微分噪声干扰问题.以上研究均未针对多机并联系统逆变器阻抗及台数等动态问题及时响应,对此,文献[18]提出了基于非线性观测器的自适应动态调节环用于多逆变器发电厂稳定的分布式协调控制,文献[19-21]提出了电流模型预测控制(MPC)和全状态观测器来提高系统的鲁棒性,但是以上方法计算复杂度较高,较依赖模型的准确性.

本文提出了一种弱电网下多逆变器并联系统

的电容电压陷波器前馈谐振抑制策略.首先解析了单台三相逆变器的控制原理图,基于此构建了诺顿等效模型分析了多机并联系统的谐振特性,其次推导出了  $n$  个参数相同的逆变器并联系统的简化输出阻抗模型,然后对比传统的电网电压前馈和并网电流前馈策略提出了改进的电容电压陷波器前馈策略并分析了系统的稳定性,并结合牛顿优化算法提高了并网功率变化及逆变器并联台数变化时的鲁棒性,最后,利用硬件在环(HiL)平台搭建多机并联系统的仿真模型验证了所提谐振抑制策略的有效性.

## 1 多逆变器并联系统谐振机理分析

### 1.1 单台三相 LCL 逆变器系统建模

典型的三相逆变器系统结构图如图 1 所示,图中  $U_{dc}$  为逆变器直流侧输入电压,  $L_1$  为逆变器侧等效电感,  $L_2$  为网侧等效电感,  $C$  为滤波电容,  $U_g$  为电网电压,  $L_g$  为电网等效阻抗,  $i_{ref}$  为给定参考电流,通过采样坐标变换后的输出电流与给定参考电流比较后,再经过准比例谐振(Quasi-Proportional Resonant, QPR)控制器生成合适的调制波.

由图 1 可得单台三相 LCL 逆变器的并网电流控制框图如图 2 所示,其中  $G_i(s)$  为准比例谐振(QPR)控制器,表达式为:

$$G_i(s) = K_p + \frac{2K_r\omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_0^2}, \quad (1)$$

$K_{PWM}$  为调制波到逆变器侧电压的传递函数,等于直流侧电压与三角载波幅值之比,  $G_d(s)$  为 1.5 拍的数字延时控制环节,目的是消除计算延时的 1 拍和调制延时的 0.5 拍,  $G_d(s) = e^{-1.5sT}$ ,  $T$  为采样周期.

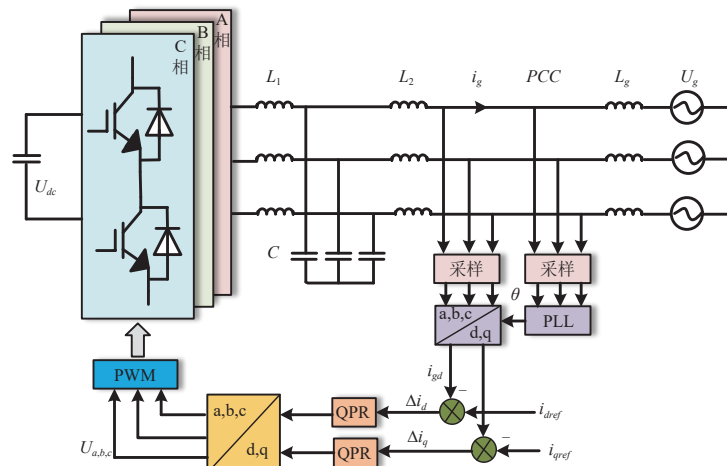


图 1 三相 LCL 逆变器系统结构图

Fig. 1 Three-Phase LCL inverter system structure diagram

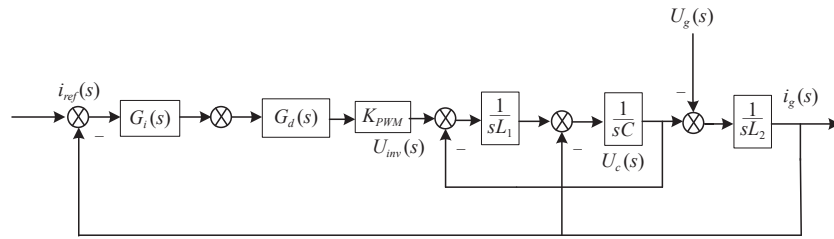


图2 三相LCL逆变器并网电流控制

Fig. 2 Three-phase LCL inverter grid-connected current control

### 1.2 多逆变器并联系统建模

在弱电网情况下, 如中低压等级的配电网, 一般呈现出电网阻抗高、短路容量低且电网电压背景谐波含量高等特点. 结合现实中新能源分布式发电系统的工作原理, 得出分布式发电系统多逆变器并联拓扑结构如图3所示.

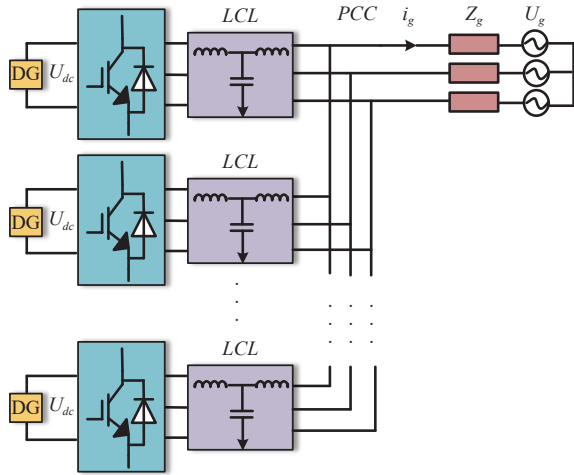


图3 分布式发电系统多逆变器并联拓扑

Fig. 3 Distributed generation system multi-inverter parallel topology

根据图2和图3, 可以得到多机并联系统的诺顿等效模型如图4所示,  $G(s)$  为等效受控电流源传递函数,  $Y_{eq}$  为逆变器等效输出导纳.

以第一台逆变器的输出并网电流为例, 根据节点电压法可得:

$$i_{g1} = R_1(s)I_{ref1}(s) - \sum_{i=2}^n P_{1,i}(s)I_{refi}(s) - S_1(s)U_g(s), \quad (2)$$

式中,  $R_1(s)$ ,  $P_{1,i}(s)$ ,  $S_1(s)$  分别为逆变器自身激励传递函数、并联逆变器耦合作用传递函数、电网电压激励传递函数, 可以看出并网电流受三个因素的影

响, 3种激励的传递函数表达式如式(3)所示.

$$\begin{cases} R_1(s) = G_1(s) - \frac{G_1(s)Y_{eq1}(s)}{\sum_{k=1}^n Y_{eqk}(s) + Y_g(s)} \\ P_{1,i}(s) = \frac{G_i(s)Y_{eq1}(s)}{\sum_{k=1}^n Y_{eqk}(s) + Y_g(s)}, i \in [2, n] \\ S_1(s) = \frac{Y_g(s)Y_{eq1}(s)}{\sum_{k=1}^n Y_{eqk}(s) + Y_g(s)} \end{cases}, \quad (3)$$

式中  $G(s)$  和  $Y_{eq}$  分别为:

$$\begin{cases} G(s) = \frac{G_i(s)K_{PWM}}{L_1L_2Cs^3 + s(L_1 + L_2) + G_i(s)K_{PWM}} \\ Y_{eq}(s) = \frac{1 + L_1Cs^2}{L_1L_2Cs^3 + s(L_1 + L_2) + G_i(s)K_{PWM}} \end{cases}, \quad (4)$$

为了便于分析电网阻抗与台数变化关系, 这里采用等效阻抗模型进行推导分析,  $G(s)i_{ref}$  用  $i_g(s)$  表示, 电网阻抗为  $Z_g(s)$ , 当各个逆变器的参数和控制策略都相同时, 可以得到简化后的诺顿等效阻抗模型如图5所示,  $n$  台并网逆变器的等效电流源为原来的  $n$  倍, 等效阻抗为原来的  $1/n$ .

根据叠加定理可以推导出并网总电流为:

$$i_{gd}(s) = \frac{i_0(s)Z_0(s)}{\frac{Z_0(s)}{n} + Z_g(s)} - \frac{U_g}{\frac{Z_0(s)}{n} + Z_g(s)} = n \left( i_0(s) - \frac{U_g}{Z_0(s)} \right) \frac{1}{1 + \frac{nZ_g(s)}{Z_0(s)}}, \quad (4)$$

也就是  $n$  个逆变器并联时, 对每个逆变器来说, 相当于电网阻抗放大了  $n$  倍, 所以只需以电网阻抗为  $nZ_g$

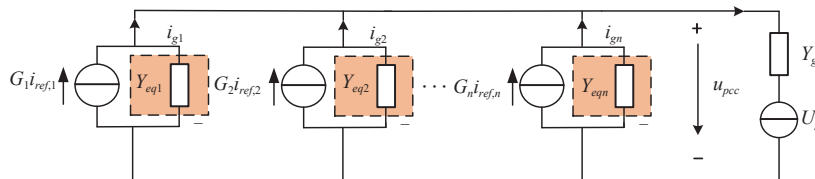


图4 多逆变器并联系统诺顿等效模型

Fig. 4 Norton equivalent model of multi-inverter parallel system

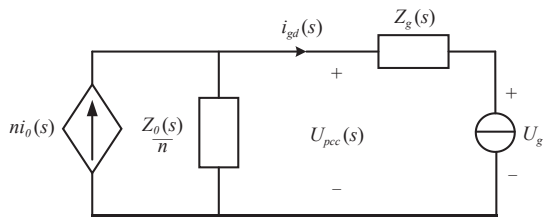


图5 多逆变器并联系统简化等效阻抗模型

Fig. 5 Simplified equivalent impedance model of multi-inverter parallel system

的单个逆变器为研究对象即可.弱电网下考虑电网阻抗时  $n$  台逆变器并联系统开环传递函数为:

$$T_{o1} = \frac{G_i(s)G_d(s)K_{PWM}}{s^3L_1L_T C + s(L_1 + L_T)}, L_T = L_2 + nL_g, \quad (5)$$

结合式(2)和式(5)可以计算出系统的两个谐振点:

$$f_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1L_2C}}, f_2 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_1 + L_2 + nL_g}{L_1C(L_2 + nL_g)}}, \quad (6)$$

其中,  $f_1$  为基于 LCL 滤波器的并网逆变器固有谐振频率点,  $f_2$  为多逆变器并联耦合作用产生的谐振频率点.

## 2 多逆变器并联系统谐振抑制

### 2.1 传统逆变器谐振抑制策略

由式(5)传递函数画出的 Bode 图如图 6 所示, 可以看出随着逆变器台数  $n$  的增加, 系统固有谐振频率不变, 耦合谐振频率逐渐向低频偏移.

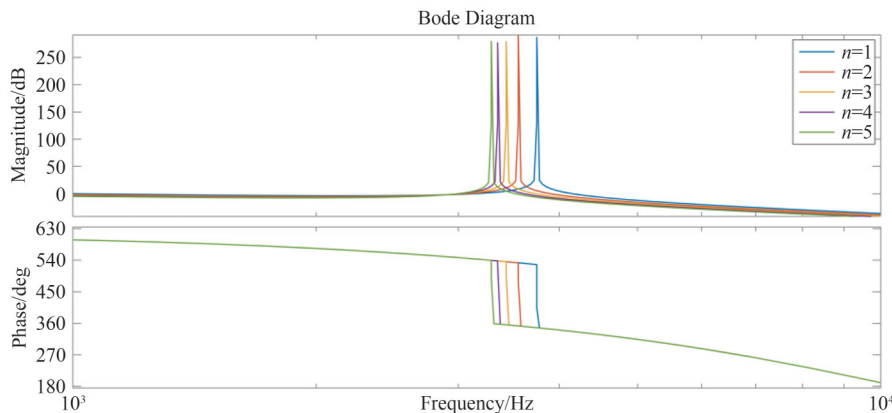


图6 耦合谐振频率随并联台数变化的 Bode 图

Fig. 6 Bode plot of coupled resonant frequency variation with the number of parallel units

传统 LCL 逆变器电流控制框图如图 7 所示,  $H_{i1}$  为电容电流的增益系数,  $H_{i2}$  为并网电流的增益系数.

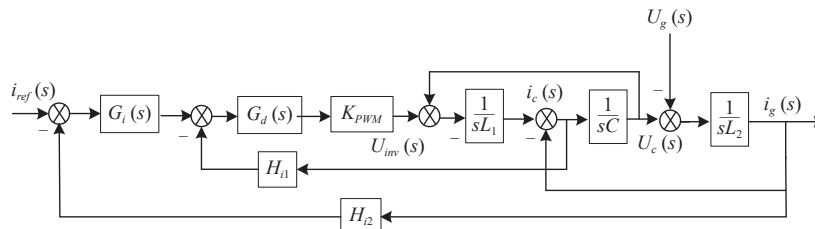


图7 传统 LCL 逆变器电流控制框图

Fig. 7 Block diagram of traditional LCL inverter current control

由图 7 推导出 LCL 逆变器电流控制等效框图如图 8 所示.

其中  $G_{x1}(s)$  和  $G_{x2}(s)$  表示为:

$$G_{x1}(s) = \frac{K_{PWM}G_d(s)}{s^2L_1C + sH_{i1}CK_{PWM}G_d(s) + 1}G_i(s)$$

$$G_{x2}(s) = \frac{s^2L_1C + sH_{i1}CK_{PWM}G_d(s) + 1}{s^3L_1L_2C + sL_2H_{i1}CK_{PWM}G_d(s) + s(L_1 + L_2)} \quad (7)$$

利用电网电压全前馈策略可以有效抑制电网电压背景谐波对并网电流的影响, 推导出电网电压前馈函数  $G_{ff}(s)$ :

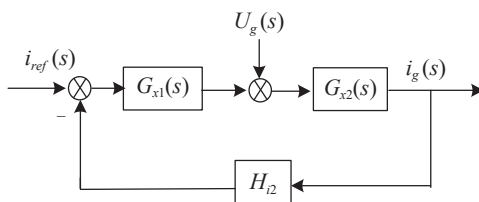


图8 LCL 逆变器电流控制等效框图

Fig. 8 Equivalent block diagram of LCL inverter current control

$$G_{ff}(s) = \frac{G_i(s)}{G_{x1}(s)} = \frac{1}{K_{PWM}G_d(s)} + sCH_{i1} + \frac{s^2L_1C}{K_{PWM}G_d(s)}, \quad (8)$$

电容电压反馈方案比传统电容电流有源阻尼和电网电流反馈的谐波抑制能力更加出色, 且不需要额外串联电流传感器, 在实际应用中, 电容电压  $U_c(s)$  为:

$$U_c(s) = U_g(s) + sL_2i_g(s), \quad (9)$$

根据图 8 和式(9)可以推导出电容电压反馈下的等效模型, 如图 9 所示.

将式(8)的三个反馈分量代入图 9 得到的等效

变换如图 10 所示. 将电容电流反馈系数  $H_{i1}$  的输出点移至电容阻抗  $Z_c(s)$  的输出点, 具有电容器电压的一次微分项相互抵消, 电容电压反馈函数中仅具有比例项和二次微分项.

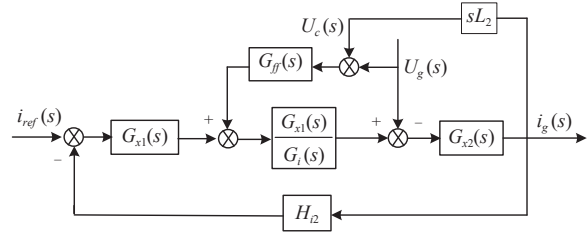


图 9 电容电压反馈下的等效模型

Fig 9 Equivalent model with capacitor voltage feedback

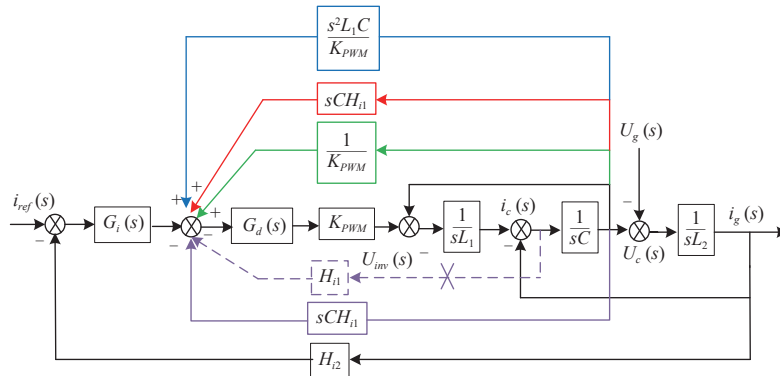


图 10 电容电压全反馈控制框图

Fig 10 Block diagram of capacitor voltage full feedback control

### 2.2 改进逆变器谐振抑制策略

图 10 仍存在的二次微分项容易引入微分噪声干扰问题, 所以在去除二次微分项的基础上,

在比例反馈回路加入了陷波器以确保系统稳定, 改进后的电容电压陷波器前馈谐振抑制控制框图如图 11 所示.

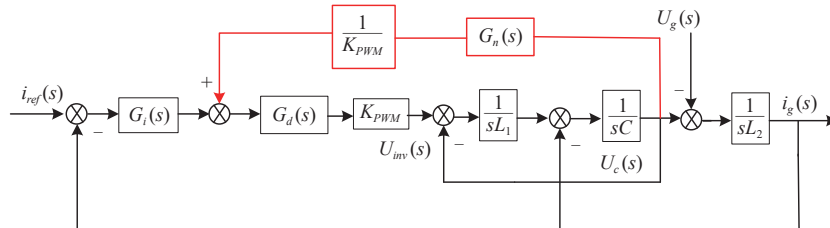


图 11 改进后的电容电压陷波器前馈控制框图

Fig. 11 Improved block diagram of capacitor voltage notch filter feedforward control

图中陷波器函数如式(10)所示:

$$G_n(s) = \frac{s^2 + \omega_n^2}{s^2 + \omega_n s + \omega_n^2}, \quad (10)$$

式中  $\omega_n$  为陷波器截止频率, 根据式(10)画出陷波器函数的 Bode 图如图 12 所示.

## 3 基于牛顿算法的优化控制策略

### 3.1 牛顿算法动态治理

加入电容电压陷波器前馈控制环后, 计算得逆

变器电流控制环开环传递函数为:

$$T_{o2} = \frac{G_i(s)G_d(s)K_{PWM}}{s^3L_1L_2C - sG_d(s)L_TG_n(s) + s(L_1 + L_T)}, \quad (11)$$

画出逆变器台数变化时式(11)的 Bode 图如图 13 所示. 与图 6 对比可以看出, 加入电容电压陷波器前馈控制环后谐振尖峰明显被消除, 但随着逆变器台数  $n$  的增加, 系统稳定裕度逐渐减小, 说明逆变器并联台数越多, 系统稳定性仍旧会越来越差.

首先以三台逆变器并联为例, 画出陷波器截止频率  $\omega_n$  变化时系统开环传递函数 Bode 图如图 14 所示,

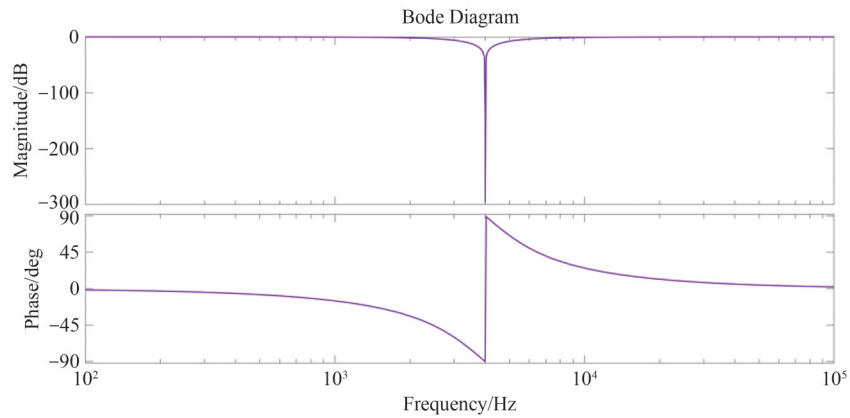


图 12 陷波器函数 Bode 图

Fig. 12 Bode plot of notch filter function

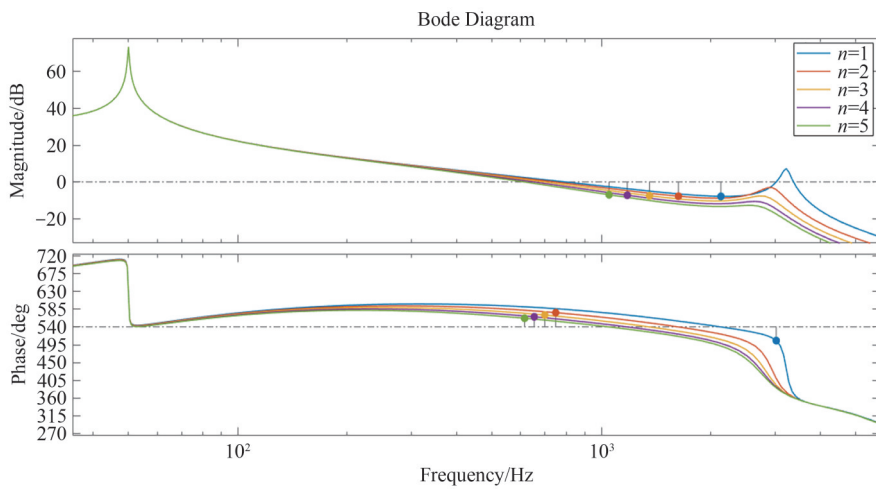


图 13 逆变器台数变化时系统开环传递函数 Bode 图

Fig. 13 Bode plot of open-loop transfer function of the system with varying number of inverters

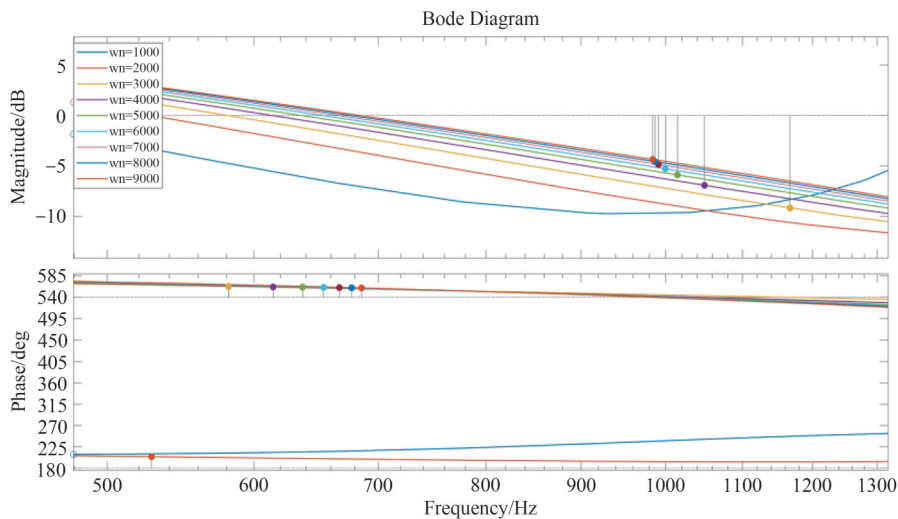


图 14 陷波器截止频率变化时系统开环传递函数 Bode 图

Fig. 14 Bode plot of the open-loop transfer function of the system with varying notch filter cutoff frequency

随着陷波器截止频率  $\omega_n$  从 1000 rad/s 到 9000 rad/s 变化,  $\omega_n=3000$  rad/s 时系统的幅值裕度和相角裕度都达到最大, 随后随着  $\omega_n$  的增大稳定裕度逐渐减小.

为了找到  $\omega_n=3000$  rad/s 附近更精准的陷波器截止频率, 拟合出一条并网电流 THD 值关于截止频率变化的曲线如图 15 所示. 由图可以看出电流 THD 值在  $\omega_n=3000\sim 4000$  rad/s 之间存在最小值, 为了精

准的找到该曲线的最小值, 尝试用优化算法寻找对应的截止频率  $\omega_n$ .

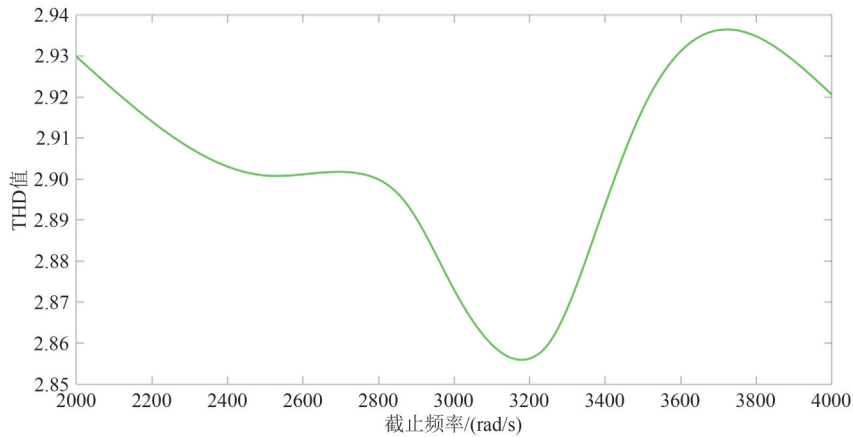


图 15 并网电流 THD 值随截止频率变化的曲线

Fig. 15 Curve of grid-connected current THD variation with cutoff frequency

经过遗传算法(GA)、麻雀算法(SSA)、模拟退火算法(SA)、牛顿算法(Newton)四个算法的寻优, 得到其收敛速度对比如图 16 所示. 可以看出牛顿算法

所用时间最短收敛速度最快, 四种算法最终找到使电流 THD 值最小为 2.856% 时的  $\omega_n$  值,  $\omega_n=3170$  rad/s.

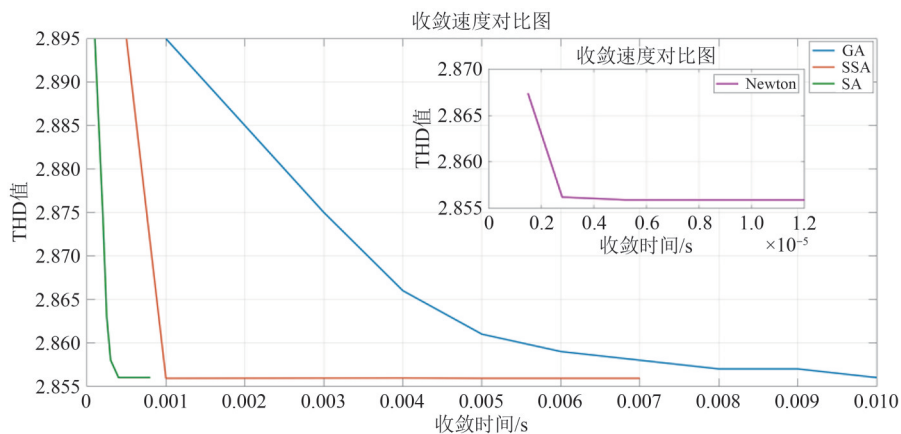


图 16 算法收敛速度对比

Fig. 16 Comparison of algorithm convergence rates

### 3.2 牛顿算法基本原理

牛顿法的基本思想是利用迭代点  $x_k$  处的一阶导数(梯度)和二阶导数(Hessen 矩阵)对目标函数进行二次函数近似, 然后把二次模型的极小点作为新的迭代点, 并不断重复这一过程, 直至求得满足精度的近似极小值, 牛顿法的优点是收敛速度比较快, 具有全局二阶收敛性, 而且能高度逼近最优值.

牛顿法每一步的迭代方向都是沿着当前点函数值下降的方向, 对于一个需要求解的优化函数  $f(x)$ , 求函数极值的问题可以转化为求导函数  $f'(x)=0$ , 对函数  $f(x)$  进行泰勒展开到二阶得到:

$$f(x) = f(x_k) + f'(x_k)(x - x_k) + \frac{1}{2} f''(x_k)(x - x_k)^2, \quad (12)$$

对上式求导并令其为 0, 则为

$$f'(x_k) + f''(x_k)(x - x_k) = 0, \quad (13)$$

即可得到牛顿法的更新公式

$$x = x_k - \frac{f'(x_k)}{f''(x_k)}, \quad (14)$$

当逆变器阻抗和并联台数变化时, 调用 simulink 仿真采样并网电流并计算其 THD 值, 牛顿优化算法的工作流程为: (1) 给定终止误差阈值  $0 \leq \varepsilon \leq 1$ , 初始值  $\omega_0$ , 循环次数  $k = 0$ ; (2) 计算一阶导数  $g_k = \nabla f(x_k)$ , 若  $\|g_k\| \leq \varepsilon$ , 则停止, 输出  $x^* \approx x_k$ ; (3) 计算二阶导数  $G_k = \nabla^2 f(x_k)$ , 并求解  $x$  更新变化量  $d_k = g_k/G_k$ ; (4) 更新  $x_{k+1} = x_k - d_k$ .

### 3.3 系统稳定性分析

根据单逆变器的稳定性准则, 多逆变器系统的稳定性应满足以下条件: (1) 在理想电网的条件下,

逆变器是稳定的;(2)所有逆变器的电网阻抗与并联阻抗之比满足奈奎斯特准则.

针对第一个条件,假设理想电网下  $L_g=0$ ,由图 2 计算出系统的开环传递函数为:

$$T_{o2} = \frac{G_i(s)G_d(s)K_{PWM}}{s^3L_1L_2C - sL_2G_d(s)G_n(s) + s(L_1 + L_2)}, \quad (15)$$

则系统的闭环传递函数为:

$$T_{o3} = \frac{T_{o2}}{1 + T_{o2}}, \quad (16)$$

$$Z_o = \frac{s^3L_1L_T C + s(L_1 + L_T) - sL_T G_d(s)G_n(s) + G_d(s)G_i(s)K_{PWM}}{s^2L_T C + 1 - G_d(s)G_n(s)}, \quad (18)$$

画出式(18)的奈奎斯特曲线如图 18 所示,可以看出加入谐振抑制策略后,随着逆变器并联台数  $n$  的增加,曲线不包围  $(-1, j0)$  点,根据阻抗稳定性判据得,系统稳定,多机并联系统的耦合谐振得到有效抑制.

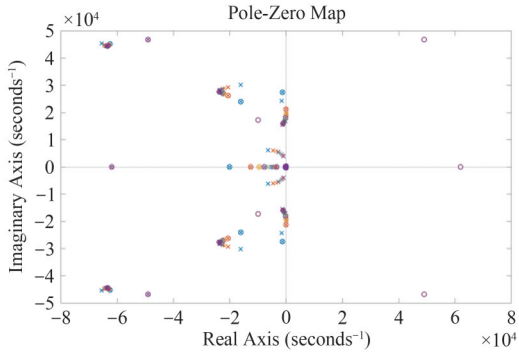


图 17 系统闭环零极点分布图

Fig. 17 Closed-loop pole-zero plot of the system

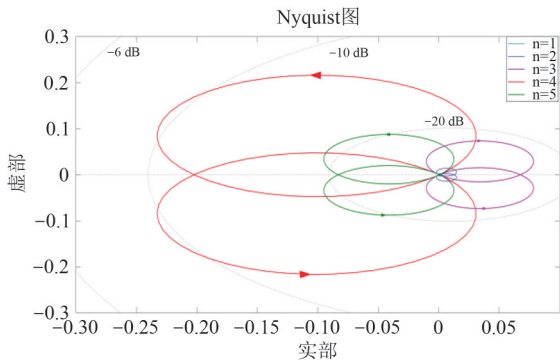


图 18 系统阻抗比奈奎斯特曲线图

Fig. 18 Nyquist plot of the system impedance ratio

## 4 实验验证

### 4.1 实验结果

硬件在环(hardware-in-the-loop, HiL)可以灵活的设置实验系统与环境,为了验证改进谐振抑制策略的有效性,利用 HIL 平台搭建了多台三相 LCL 并网逆变器并联系统模型如图 19 所示,系统具体参数

根据式(16)画出系统的零极点图如图 17 所示,可以看出系统的闭环极点全部位于  $S$  平面的左半平面,说明在理想电网的条件下,逆变器是稳定的.

针对第二个条件,电网阻抗与  $n$  个逆变器并联等效阻抗的比值为:

$$T_n = \frac{nZ_g}{Z_o}, \quad (17)$$

该式表征了逆变器之间及逆变器与电网的耦合增益,  $Z_o$  为  $n$  个逆变器并联等效输出阻抗,表达式为:

设置如表 1 所示.

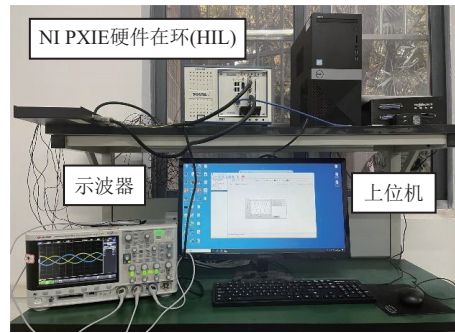


图 19 硬件在环实验平台

Fig. 19 Hardware-in-loop experiment platform

表 1 逆变器系统参数

Tab. 1 Inverter system parameters

参数	数值	单位	参数	数值	单位
直流母线电压 $U_{dc}$	720	V	QPR 控制参数 $K_p$	0.072	
电网电压 $U_g$	220	V	QPR 控制参数 $K_r$	20	rad/s
逆变器侧电感 $L_l$	5	mH	QPR 控制参数 $\omega_0$	$100\pi$	rad/s
滤波电容 $C$	3	$\mu$ F	采样频率 $f_s$	20	KHz
网侧电感 $L_2$	1	mH	基频 $f_0$	50	Hz
电网阻抗 $L_g$	2	mH	$K_{PWM}$	360	

首先验证电容电压陷波器前馈策略对单台三相并网逆变器的谐振抑制效果,采用传统谐振抑制策略和本文改进策略前后并网电流波形对比如图 20 所示.

对比可得,考虑电网阻抗且未进行任何治理时,并网电流波形质量较差,谐波失真率 THD=5.89%,采用传统谐振抑制策略时并网电流 THD=3.48%,改进控制策略后 THD=2.49%,由此可见改进前后都对谐波治理有一定效果,但改进后效果比传统策略更好.

其次验证改进策略对多机并联系统的谐振抑制效果,以逆变器并联台数  $n=3$ ,  $\omega_n=3170$  rad/s 为例,治理前后电流波形对比如图 21 所示.治理前波形 THD=10.87%,治理后 THD=2.85%,治理前后 THD 分析如图 22 所示,由此说明改进策略对多机并联系统的谐波治理效果较好,系统稳定性大大提升.

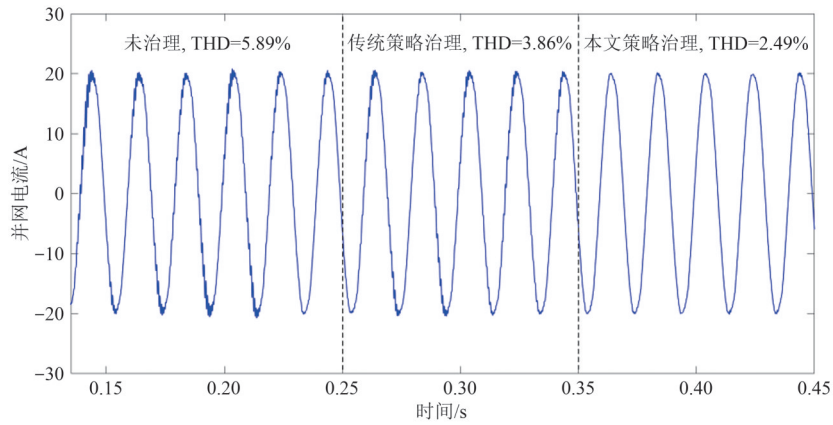


图 20 单台采用传统策略和本文改进策略并网电流波形对比

Fig. 20 Comparison of grid-connected current waveforms for a single inverter using the traditional strategy and the improved strategy proposed in this paper

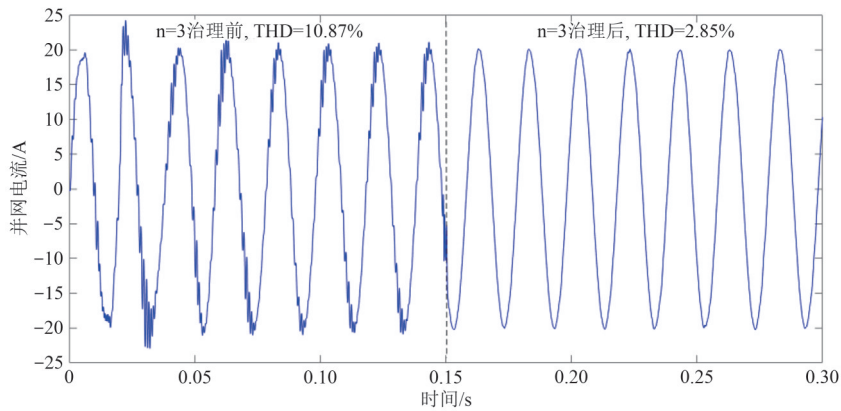


图 21 本文策略下三台并联治理前后并网电流波形对比图

Fig. 21 Comparison of grid-connected current waveforms before and after parallel control strategy for three parallel-connected inverters

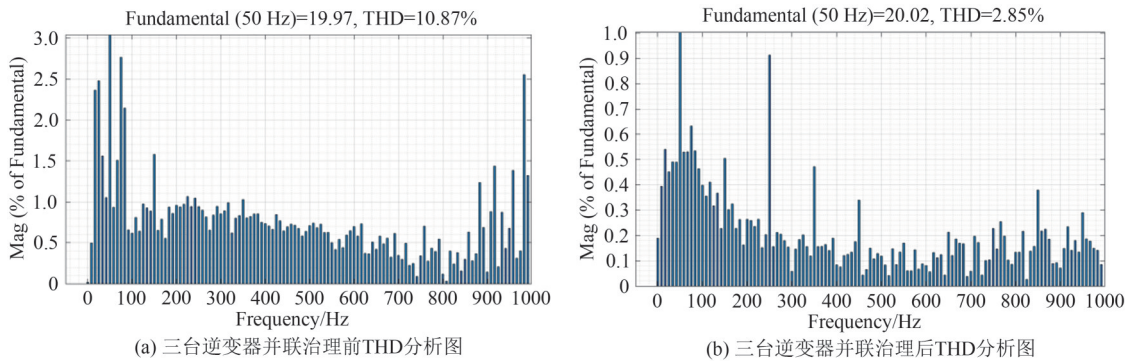


图 22 本文策略下三台逆变器并联治理前后 THD 分析图

Fig. 22 THD analysis before and after the parallel operation of three inverters under the proposed strategy

### 4.2 动态治理

最后需验证牛顿算法对并网功率和并联台数变化等动态问题的谐振抑制效果,每改变一次条件,遍历 $\omega_n$ 的值并计算电流波形 THD 值,利用牛顿算法找出最佳 $\omega_n$ .

动态改变并网功率等价于改变参考电流的值,治理效果如图 23 所示.可以看出当参考电流由 20 A 变为 40 A 时,使用牛顿优化算法调整陷波器频率 $\omega_n$ 为 5250 rad/s,系统保持稳定,当参考电流由 40 A 时变

为 30 A 时,再次调整陷波器频率 $\omega_n$ 为 2000 rad/s,系统同样保持稳定,谐波得到有效治理.

动态改变逆变器并联台数时治理效果如图 24 所示.可以看出当并联台数由 3 台变为 4 台时, $\omega_n$ 调整为 4000 rad/s, $n$ 变为 2 台时, $\omega_n$ 又调整为 3500 rad/s,谐波及时得到治理,系统保持稳定.

通过以上的仿真实验可以看出,使用改进策略后,多机并联系统在弱电网环境下的适应性提高,电流质量明显得到改善.

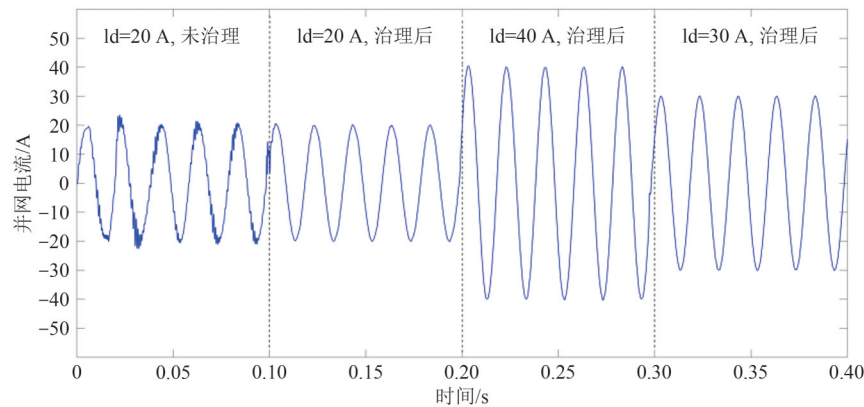


图 23 本文策略下改变并网功率时治理效果对比

Fig. 23 Comparative analysis of the regulation effect when changing the grid-connected power under the proposed strategy

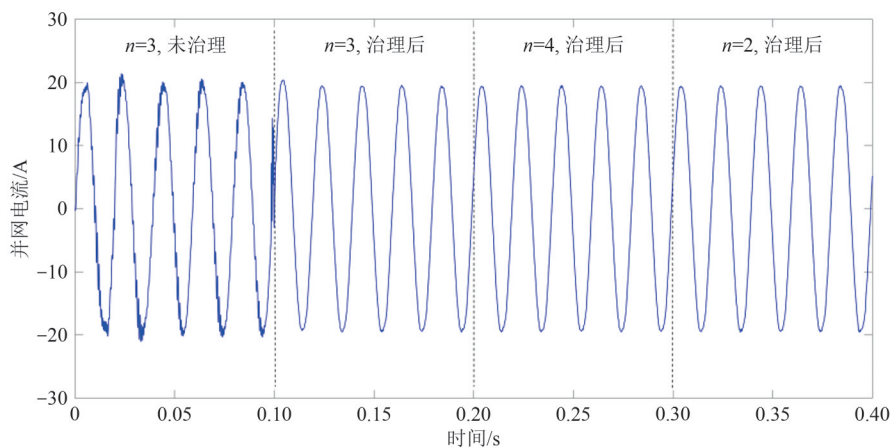


图 24 本文策略下改变并联台数时治理效果对比

Fig. 24 Comparative analysis of the regulation effect when changing the number of parallel-connected units under the proposed strategy

## 6 结论

针对弱电网下多逆变器并联系统的耦合谐振现象以及传统谐振抑制策略的局限性,本文构建了多机并联系统的诺顿等效模型,解析了谐振产生机理,提出了一种基于陷波器的电容电压前馈谐振抑制策略并分析了系统的稳定性,该策略的优势在于:

(1)有效消除了系统的谐振尖峰,提高了并网电流质量,增强了系统的稳定性;

(2)采用电容电压前馈避免了串联电流传感器带来的干扰,去除微分项用陷波器代替避免了噪声干扰带来的振荡;

(3)结合牛顿优化算法提高了并网功率变化及逆变器并联台数变化时系统的鲁棒性。

### 参 考 文 献

- [1] ALI R, O' DONNELL T. Analysis and mitigation of harmonic resonances in multi-parallel grid-connected inverters: A review[J]. Energies, 2022, 15(15): 5438.
- [2] 郑嘉龙, 杨鸽, 陈开宇, 等. LCL型多逆变器并网系统谐振研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(21): 177-186.
- [3] 李强, 孙鹏菊, 董光德, 等. 基于模态分析的多逆变器系统串并联谐振特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(13): 5269-5281.
- [4] AGORRETA J L, BORREGA M, LÓPEZ J, et al. Modeling and control of  $N$ -paralleled grid-connected inverters with LCL filter coupled due to grid impedance in PV plants[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(3): 770-785.
- [5] 郑昕昕, 肖岚, 王长宝, 等. 三相变流器LCL滤波器参数优化新方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(12): 55-63, 186.
- [6] 高善诚, 廖冬初, 陈俊, 等. 有源阻尼与无源控制的弱电网下LCL并网逆变器[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(6): 57-64.
- [7] 王海松, 王晗, 张建文, 等. LCL型并网逆变器的分裂电容无源阻尼控制[J]. 电网技术, 2014, 38(4): 895-902.
- [8] ABBAS H H, SHAFIEE Q, BEVRANI H. Optimal passive LCL filter design for grid-connected converters in weak

- grids[J]. *Electric Power Systems Research*, 2024, 235: 110896.
- [9] HE J, LI Y W, BOSNJAK D, et al. Investigation and active damping of multiple resonances in a parallel-inverter-based microgrid[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2013, 28(1): 234-246.
- [10] 王渝红, 叶葳, 宋瑞华, 等. 基于阻抗分析法的三相LCL型并网逆变器附加有源阻尼设计[J]. *高电压技术*, 2021, 47(8): 2645-2656.
- [11] 谢志为, 陈燕东, 伍文华, 等. 弱电网下多逆变器并网系统的全局高频振荡抑制方法[J]. *电工技术学报*, 2020, 35(4): 885-895.
- [12] 张声淇, 陈冬冬, 洪卫东, 等. LCL型并网逆变器有源阻尼叠加的控制策略[J]. *南方电网技术*, 2024, 10(9): 1-13.
- [13] WANG X, RONG X, HUANG P, et al. Stability analysis and resonance suppression of multi-inverter parallel operation[J]. *Electric Power Systems Research*, 2024, 226: 109907.
- [14] WANG X, RUAN X, LIU S, et al. Full feedforward of grid voltage for grid-connected inverter with LCL filter to suppress current distortion due to grid voltage harmonics[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2010, 25(12): 3119-3127.
- [15] 曹子恒, 肖先勇, 马俊鹏, 等. 提高LCL型并网逆变器鲁棒性的改进型电容电流反馈有源阻尼策略[J]. *高电压技术*, 2020, 46(11): 3781-3790.
- [16] WANG J, PAN G, OUYANG J, et al. Phase lag compensation for improving the stability of LCL-type converters under weak grid condition [J]. *Journal of Power Electronics*, 2022, 22(5): 727-738.
- [17] 段晓宁, 李萍, 赵峰, 等. 弱电网下基于电容电压全前馈的LCL型并网逆变器稳定性控制[J]. *高电压技术*, 2022, 48(6): 2140-2151.
- [18] LI M, GENG H, ZHANG X. Distributed coordinated control for stabilization of multi-inverter power plant[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2023, 70(12): 12421-12430.
- [19] ZHENG F, WU G, LIN X, et al. Research on control strategy for improving stability of multi-inverter parallel system under weak grid condition [J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2023, 153: 109121.
- [20] HOU T, JIANG Y, CAI Z. Inverter multi-machine grid integration resonance suppression strategy by active damping[J]. *Energies*, 2024, 17(15): 3791.
- [21] ZHENG F, LIN X, ZHANG Y, et al. Design of a novel hybrid control strategy for multi-inverter parallel system for resonance suppression[J]. *Energy Science & Engineering*, 2020, 8(8): 2878-2893.

(责编&校对 雷建云)