

弱电网下 LCL 型并网逆变器接入的鲁棒性提升技术研究

李 静

(特变电工西安电气科技有限公司)

摘要：由于弱电网环境下电网阻抗变化大且不稳定，LCL 型并网逆变器接入时易受影响，导致运行不稳定。因此，提出弱电网下 LCL 型并网逆变器接入的鲁棒性提升技术研究。为 LCL 型并网逆变器建立基于基尔霍夫定律的数学模型，揭示其在弱电网环境下的动态行为。通过合理地优化滤波参数，平衡 LCL 滤波器的滤波性能与系统稳定性。制定电网阻抗自适应控制策略，利用小信号注入法实时检测电网阻抗变化，并设计自适应控制器以动态调整控制参数，实现 LCL 型并网逆变器在弱电网环境下的稳定运行。实验结果表明，研究技术能够有效提升 LCL 型并网逆变器在弱电网环境下的鲁棒性能，确保其在不同电网阻抗条件下均能稳定运行。

关键词：弱电网；LCL 型并网逆变器；鲁棒性提升；滤波器参数优化；电网阻抗自适应控制

0 引言

随着分布式发电技术的快速发展，可再生能源得以广泛开发和有效利用。并网逆变器是实现分布式电源与电网之间能量转化的重要环节，其运行状态直接关系到并网电源的稳定运行和电能质量^[1]。但是，当大规模的分布式电源接入电网后，实际电网结构已悄然转变为弱电网形态^[2]。在弱电网环境下，电网阻抗的非理想因素导致并网逆变器与电网之间存在显著的动态交互作用，这对并网逆变器的鲁棒性提出了严峻挑战。

LCL 并网逆变器具有较普通 L 型并网逆变器更优越的高频谐波抑制性能，引起国内外学者的高度重视^[3]。然而，LCL 型滤波器存在的谐振特性会对系统

的稳定运行构成不利影响，特别是在弱电网下，电网阻抗的大范围变化会进一步加剧这一问题，影响逆变器的鲁棒稳定性和并网电流的质量。因此，当前研究的热点和难点聚焦于如何在不添加额外传感器的前提下，有效抑制 LCL 型滤波器的谐振现象^[4]。

为了提升 LCL 型并网逆变器在弱电网下的鲁棒性，国内外学者进行大量研究。这些研究主要集中在改进并网电流控制策略、优化滤波器设计以及引入先进的控制算法等方面。通过采用多样的技术手段，成功降低了 LCL 型滤波器的谐振问题，并增强了系统的鲁棒稳定性和并网电流的质量，但是在复杂且多变的弱电网环境中，仍然难以达到最优的控制策略。综上所述，本文将针对弱电网下 LCL 型并网逆变器接

入的鲁棒性提升技术进行研究,旨在提出一种有效且实用的控制策略,为分布式发电并网系统的可靠运行提供理论和技术支持。

1 建立 LCL 型并网逆变器数学模型

由于弱电网环境下电网阻抗的不确定性会对 LCL 型并网逆变器的运行稳定性造成显著影响,为了准确模拟和分析这种影响,本文首先对 LCL 型并网逆变器进行精准建模。该模型的拓扑结构如图 1 所示。

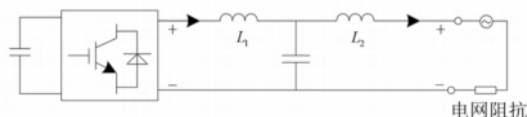


图 1 LCL 型并网逆变器拓扑结构

为了深入理解其动态行为,本文基于基尔霍夫电压和电流定律,建立相应的数学模型。首先,本文建立逆变器侧电压在 α - β 坐标系下的一阶微分方程,该方程可以通过式 (1) 进行表示:

$$\begin{cases} L_1 \frac{dI_a}{dt} = U_{pva} - U_{pca} - R_1 I_a \\ L_1 \frac{dI_\beta}{dt} = U_{pv\beta} - U_{pc\beta} - R_1 I_\beta \end{cases} \quad (1)$$

式中, I_a 和 I_β 分别为逆变器侧电流在 α 轴和 β 轴上的分量; U_{pva} 和 $U_{pv\beta}$ 分别为逆变器输出电压的 α 轴和 β 轴分量; U_{pca} 和 $U_{pc\beta}$ 分别为公共连接点处电压的 α 轴和 β 轴分量; R_1 为逆变侧电感的等效电阻^[5]。

网侧电压与逆变器侧电压和电容支路电压之间的关系如式 (2) 所示:

$$\begin{cases} U_{pa} = U_{pca} + L_2 \frac{d(I_g)_a}{dt} + R_2 (I_g)_a + Z_g (I_g)_a \\ U_{p\beta} = U_{pc\beta} + L_2 \frac{d(I_g)_\beta}{dt} + R_2 (I_g)_\beta + Z_g (I_g)_\beta \end{cases} \quad (2)$$

式中, $(I_g)_a$ 和 $(I_g)_\beta$ 为网侧电流在 α 轴和 β 轴上

的分量; L_1 和 L_2 分别为网侧电感和其等效电阻; Z_g 为电网阻抗。

同时,本文还建立滤波电容电流模型,该模型能够揭示 LCL 型并网逆变器侧电流与网侧电流之间的关系。这一关系可以通过式 (3) 表示为:

$$\begin{cases} I_{ca} = C \frac{dU_{pca}}{dt} = I_a - (I_g)_a \\ I_{c\beta} = C \frac{dU_{pc\beta}}{dt} = I_\beta - (I_g)_\beta \end{cases} \quad (3)$$

式中, I_{ca} 和 $I_{c\beta}$ 为滤波电容电流分别在 α 轴和 β 轴上的分量; C 为滤波电容的值。

为了将时域方程转化为频域方程,本文引入复变量 s , 并进行拉普拉斯变换。逆变器侧电压到网侧电流的开环传递函数在频域中可以利用式 (4) 进行表示:

$$\begin{aligned} fU_{pva}(s)(I_g)_a(s) &= fU_{pv\beta}(s)(I_g)_\beta(s) \\ &= \frac{(L_1 + L_2)Cs^2 + (R_1 + R_2 + Z_g)s + 1}{Cs^2 + L_2(R_2 + Z_g)s} \end{aligned} \quad (4)$$

式 (1) ~ 式 (4) 共同构建 LCL 型并网逆变器的数学模型,通过该模型能够深入理解 LCL 型并网逆变器在弱电网环境下的动态行为,为后续的优化和控制设计提供了坚实的理论基础。

2 优化 LCL 滤波器参数

为了改善滤波器的滤波效果和动态响应能力,本文通过合理的参数优化,旨在平衡滤波器的滤波性能和系统稳定性,确保 LCL 型并网逆变器在弱电网环境下仍能维持良好的输出特性。

首先,电感总量 L_1 的合理限制对于确保系统稳定运行至关重要,本文提出通过式 (5) 来设定电感总量的上限:

$$L_1 = L_1 + L_2 \leq L_{ep} = \frac{I_p}{E_p} \cdot k \quad (5)$$

式中, E_p 为电压峰值; I_p 为电感电流峰; L_{ep} 为

由电压峰值和电感电流峰决定的阈值； k 为安全系数，用于确保在最严苛运行条件下的稳定性。这一优化策略旨在防止电感过大导致的系统动态响应能力下降^[6]。

接下来，本文对滤波电容 C 的容量进行约束。过大的电容虽然能提升滤波效果，但也会增加无功功率，影响系统效率^[7]。因此，依据式（6）来确定滤波电容的容量：

$$C \leq \frac{5 \cdot \omega_b \cdot V_r^2}{P_r} \quad (6)$$

式中， P_r 为LCL型并网逆变器的额定功率； ω_b 为电网的基波角频率； V_r 为逆变器的额定电压。

电网阻抗的波动也是一个重要因素，其直接关系到LCL滤波器的谐振频率和环路增益，从而影响着系统稳定时参数的取值范围^[8]。在这一影响机制中，谐振频率 f_r 与电网阻抗之间的关系尤为关键，可以通过式（7）进行描述：

$$f_r = \frac{1}{2\pi \sqrt{\frac{L_t \cdot C}{L_t + L_g}}} \quad (7)$$

式中， L_g 为电网的等效电感。

为了确保系统的稳定性，本文还考虑系统稳定裕度对电感参数的约束，如式（8）所示：

$$Y = \arctan(R_{eq} \cdot \omega_c \cdot L_t - \omega_c \cdot C) - \arctan(R_{eq} \cdot \omega_r \cdot L_t) \geq \theta_{min} \quad (8)$$

式中， ω_c 为环路增益的截止频率； R_{eq} 为等效电阻； θ_{min} 为所需的最小相位裕度。

通过优化上述参数，可以提升LCL型并网逆变器在弱电网环境下的接入鲁棒性，确保其在各种运行条件下都能保持良好的滤波效果和动态响应能力。

3 实现电网阻抗自适应控制

尽管通过精确的数学建模和优化滤波器参数设计能够为LCL型并网逆变器在弱电网中的稳定运行奠定

基础，但电网阻抗的实时变化仍是一个不容忽视的挑战。为了有效应对这一挑战，本文深入探讨电网阻抗自适应控制策略。

该策略首先采用小信号注入法来实时检测电网阻抗的变化。通过在LCL型并网逆变器的输出端注入微小的谐波信号 $I_{inj}(t)$ ，并利用快速傅里叶变换对公共连接点的电压 $V_{pcc}(t)$ 和电流信号 $I_{pcc}(t)$ 进行细致分析，可以精确计算出电网阻抗 $Z_g(s)$ 的幅值和相位^[9]。这一过程可以利用式（9）进行表示：

$$Z_g(s) = \frac{V_{pcc}(s)}{I_{pcc}(s) - I_{inj}(s)} \quad (9)$$

式中， $V_{pcc}(s)$ 和 $I_{pcc}(s)$ 分别为 $V_{pcc}(t)$ 和 $I_{pcc}(t)$ 的拉普拉斯变换； $I_{inj}(s)$ 为 $I_{inj}(t)$ 的拉普拉斯变换。这一检测过程为后续的自适应控制提供了及时且准确的电网阻抗信息。

在获取到电网阻抗信息后，本文设计一种基于自适应滤波算法的自适应控制器，以动态调整LCL型并网逆变器的控制参数。该控制器能够实时根据电网阻抗的变化情况，灵活调整逆变器的电流参考值、电压参考值或控制增益等关键参数，确保逆变器在各种电网阻抗条件下都能维持良好的输出特性和系统稳定性^[10]。本文以电流参考值 $I_{ref}(s)$ 的调整为例，这一过程可以通过式（10）表示为：

$$I_{ref}(s) = (K_1 + \frac{K_2}{|Z_g(s)|} + jK_3 \tan(\angle Z_g(s))) \cdot I_b(s) \quad (10)$$

式中， K_1 、 K_2 、 K_3 为自适应控制器的增益系数； $I_b(s)$ 为基础电流参考值； $|Z_g(s)|$ 为电网阻抗的模， $\angle Z_g(s)$ 为电网阻抗的相位角。

在自适应控制过程中，本文还充分考虑系统的稳定性和动态响应能力。通过合理设计控制算法和参数调整策略，确保自适应控制系统在面临电网阻抗突变或扰动时，能够迅速响应并保持稳定运行。这一过程可以通过系统的传递函数 $H(s)$ 进行数学化表示：

$$H(s) = \frac{Q(s)}{U(s)} = \frac{G_c(s)I_{ref}(s)Z_L(s)}{1 + G_c(s)I_{ref}(s)Z_L(s)Z_g(s)} \tag{11}$$

式中， $G_c(s)$ 为控制器的传递函数； $Z_L(s)$ 为负载阻抗的传递函数； $Q(s)$ 和 $U(s)$ 分别为系统输出和系统输入的拉普拉斯变换。

通过确保 $H(s)$ 的特征方程根都在复平面的左半平面，可以进一步保证系统的稳定性和动态响应能力。综上所述，本文提出的电网阻抗自适应控制策略，通过实时检测电网阻抗变化、动态调整控制参数以及优化前馈函数等方法，能够实现对 LCL 型并网逆变器在弱电网环境下的稳定运行和良好输出特性的有效控制。由此，完成了本文弱电网下 LCL 型并网逆变器接入的鲁棒性提升技术的研究。

4 实验

4.1 实验平台

在实验准备阶段，本文致力于搭建一个全面的实验平台，以深入测试 LCL 型并网逆变器在弱电网环境下的鲁棒性。该实验平台的核心组件是一台高精度的示波器，它能够实时监测并网电流、电压波形以及逆变器输出信号的质量，确保数据的准确性和可靠性。为了更贴近实际的弱电网环境，本文特别引入可配置的电源模块。该模块具备模拟不同电网阻抗和谐波条件的能力，从而能够全面评估逆变器在复杂电网环境下的性能表现。实验平台的整体布局如图 2 所示。

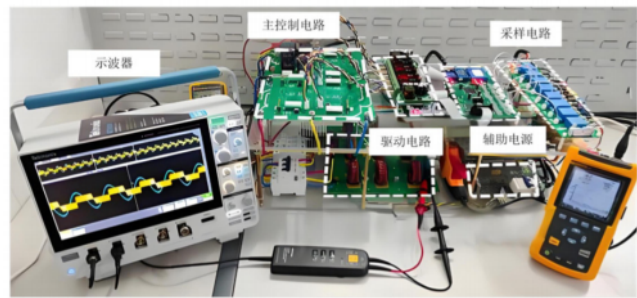


图 2 LCL 型并网逆变器实验平台

除了示波器和电源模块外，实验平台上还布置其他关键组件。主控制电路负责实现逆变器的整体控制策略，确保逆变器能够按照预定的方式运行。驱动电路负责将控制信号转换为实际驱动逆变器的信号，实现电能的转换和输出。辅助电源为整个系统提供必要的电力支持，确保实验的顺利进行。

4.2 实验参数

为了进一步说明实验平台的详细配置，本文列出实验设备的具体清单，如表 1 所示。

表 1 实验设备清单

设备名称	数量	主要参数
LCL 型并网逆变器	1 台	额定功率: 10kW
		输入电压范围: 180~260V AC
		输出电压: 230V AC
		频率: 50Hz
		LCL 滤波器参数: 电感 $Z=8\text{mH}$, $Z=14\text{mH}$ 和 $Z=22\text{mH}$, 电容 $C=10\mu\text{F}$
可编程交流电源	1 台	输出电压范围: 0~300V AC 输出电流范围: 0~50A 频率范围: 45~65Hz
高精度示波器	1 台	带宽: 100MHz 采样率: 2.5GS/s 通道数: 4
功率分析仪	1 台	测量范围: 功率 0~50kW 电压测量精度: $\pm 0.1\%$ 电流测量精度: $\pm 0.1\%$
数据采集系统	1 套	采样频率: 1kHz 数据存储容量: 1TB
电阻负载箱	1 台	功率范围: 0~10kW 可调步长: 100W
控制电脑	1 台	处理器: Intel i7 内存: 16GB 硬盘: 512GB SSD

通过上述实验平台的搭建和设备准备，本文为后续的实验测试工作奠定了坚实的基础。

4.3 实验结果及分析

在成功搭建并配置好实验平台及各项参数后，本文对 LCL 型并网逆变器在弱电网环境下的鲁棒性提升技术进行实验测试。实验特别聚焦于逆变器在不同电网阻抗条件下的表现，以及应用所提鲁棒性提升技术后系统性能的变化。为了全面评估逆变器在弱电网

环境下的性能，实验中模拟多种电网阻抗条件，包括 $Z=8\text{mH}$ 、 $Z=14\text{mH}$ 和 $Z=22\text{mH}$ 等场景。图 3 展示采用研究技术后系统的实验波形图。

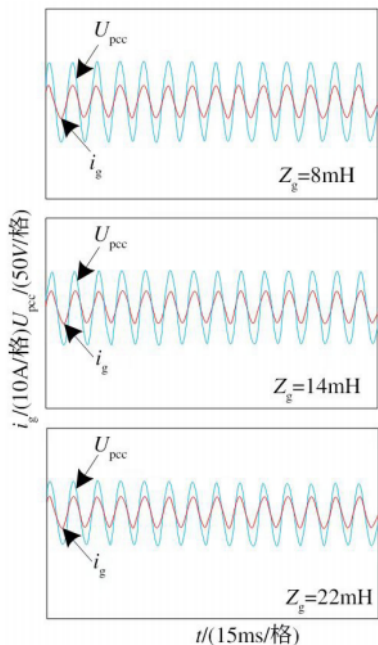


图 3 采用本文技术后系统的实验波形图

从图 3 中观察电压随时间的变化，本文发现随着电容值的增加，LCL 型并网逆变器电路的振荡周期逐渐延长，但电压峰值并未显著变化，显示出逆变器在弱电网环境下对电容值变化具有良好的适应性，即鲁棒性较高。进一步分析发现，即便电容值发生较大变化，逆变器仍能保持稳定的输出电压和电流，确保电网的稳定运行。这得益于 LCL 滤波器结构的优化以及鲁棒性提升技术的有效应用，通过精确的参数设计和先进的控制策略，逆变器成功适应了弱电网环境的复杂性，保障了电能稳定传输。综上所述，本实验全面验证了 LCL 型并网逆变器在弱电网环境下的鲁棒性提升技术，该技术不仅显著提高了逆变器的稳定性和适应性，还极大地增强了其在复杂电网条件下的鲁棒性能。

5 结束语

本文研究综合分析 LCL 滤波器的谐振特性与弱电网环境下电网阻抗的非理想因素，提出一种创新的控制策略。该策略显著提升了逆变器在弱电网下的鲁棒稳定性和并网电流质量，同时，在不增加额外传感器的前提下，通过优化控制算法，该策略实现了对电网阻抗变化的自适应调节，增强了系统的动态响应能力和稳定性。展望未来，将持续深化这一领域的研究，完善和优化现有控制策略，并积极关注并融入最新的技术进展和研究成果，不断探索新的控制策略和优化方法，以期为提高分布式发电并网系统的稳定性和电能质量做出更大贡献。

参考文献

- [1] 金衍珍，林丽，戴哲仁，等. 一种提高数字控制 LCL 型并网逆变器对电网阻抗鲁棒性的补偿策略 [J]. 智慧电力，2024，52（4）：108-115.
- [2] 付铭，辛建波，宋晓威，等. LCL 并网逆变器鲁棒不确定干扰估计电流控制策略 [J]. 江西电力，2024，48（1）：21-26.
- [3] 孙标广，杨泽昆，饶吉来. 提高 LCL 型并网逆变器鲁棒性的延时补偿策略 [J]. 电力电子技术，2024，58（2）：119-122，136.
- [4] 梁军杨，孔繁锦，王振民，等. 基于延时补偿的 LCL 型并网逆变器鲁棒控制策略 [J]. 太阳能学报，2023，44（12）：444-452.
- [5] 杨明，杨杰，赵铁英，等. 弱电网下抑制谐波谐振的 LCL 型并网逆变器鲁棒性 CCFAD 方法 [J]. 电机与控制学报，2023，27（11）：125-137.

（下转第 55 页）