

基于Simulink的光伏并网逆变器谐波抑制与控制策略仿真研究

张楚涵 商建红

临沂大学 山东 临沂 276000

摘要: 本文以三相光伏并网逆变器为研究对象, 首先分析了其主电路拓扑结构及谐波产生机理; 其次, 系统探讨了包括LCL滤波器设计、双闭环PI控制、以及先进的重复控制 (Repetitive Control, RC) 在内的多种谐波抑制方法, 并深入剖析了PI+重复复合控制策略的原理与优势; 然后利用MATLAB/Simulink构建完整光伏并网系统仿真模型, 涵盖光伏阵列等多个模块; 最后设置不同工况仿真实验, 对比单一PI控制、重复控制及PI+重复复合控制三种策略的动态响应和谐波抑制效果。结果表明, PI+重复复合控制策略能跟踪补偿周期性谐波指令, 保证系统快速响应, 降低并网电流THD, 提升电能质量优势明显。

关键词: 光伏并网逆变器; 谐波抑制; 重复控制; Simulink仿真

引言

大规模光伏并网带来电能质量问题, 光伏并网逆变器中功率半导体器件高频开关变换电能, 过程非线性, 会向电网注入大量高次谐波电流。这些谐波电流污染电网电压波形, 降低电能质量, 还引发诸多负面效应, 如增加线路和设备损耗发热、干扰通信、导致继电保护装置误动或拒动, 威胁电网安全稳定运行。为此, IEC及各国电网运营商制定严格并网标准, 对谐波发射限值提出要求。传统无源滤波器结构简单, 但有体积大、对特定次谐波抑制有限等缺点。有源滤波技术更灵活高效, 其中基于内模原理的重复控制对周期性信号增益大, 在谐波抑制领域潜力大, 不过存在动态响应慢等固有缺陷。针对此, 本文提出双闭环PI控制与重复控制结合的复合控制策略, 融合二者优势, 并在MATLAB/Simulink搭建模型验证分析, 为工程应用提供依据。

1 光伏并网逆变器系统建模与谐波分析

1.1 系统主电路拓扑

本文研究的光伏并网系统主要由以下几个部分构成: ①光伏阵列 (PV Array): 将太阳能转换为直流电能。②DC/AC三相逆变器 (Inverter): 采用全桥拓扑结构, 通过PWM技术将直流电转换为三相交流电。③LCL型滤波器 (LCL Filter): 连接在逆变器输出端与电网之间, 用于滤除逆变器产生的高频开关谐波, 平滑输出电流。④电网 (Grid): 理想电压源, 代表公共连接点 (PCC)。⑤非线性负载 (Nonlinear Load): 模拟电网中存在的谐波源, 如三相不控整流桥, 用以测试逆变器的谐波补偿能力。其中, LCL滤波器相较于传统的L型滤

波器, 具有更好的高频衰减特性, 可以用更小的电感值达到相同的滤波效果, 从而减小系统体积和成本。其传递函数在高频段呈现-60dB/dec的衰减斜率, 能有效抑制开关频率附近的谐波。

1.2 谐波产生机理

光伏并网逆变器的谐波来源主要有两个方面: ①开关谐波: 这是最主要的谐波来源。逆变器采用正弦脉宽调制 (SPWM) 或空间矢量脉宽调制 (SVPWM) 时, 其输出电压波形是由一系列宽度按正弦规律变化的矩形脉冲组成。对该脉冲序列进行傅里叶分析可知, 其频谱包含基波分量以及分布在开关频率及其边带附近的大量高次谐波分量^[1]。②死区效应: 为了防止同一桥臂上下两个开关管直通, 在其驱动信号中会人为加入一个微小的延时, 即“死区时间”。在死区时间内, 电流会通过反并联二极管续流, 导致输出电压波形发生畸变, 引入低次谐波 (主要是5、7次等)。此外, 电网背景谐波和非线性负载产生的谐波也会通过PCC影响到并网电流的质量。因此, 一个高性能的并网逆变器不仅需要抑制自身产生的谐波, 还应具备一定的主动谐波补偿能力。

2 谐波抑制控制策略设计

2.1 LCL滤波器参数设计

LCL滤波器的设计是谐波抑制的第一道防线。其关键参数包括逆变器侧电感 L_1 、网侧电感 L_2 和滤波电容 C_f 。设计时需遵循以下原则: ①总电感约束: L_1+L_2 的取值需保证电流纹波在允许范围内。②谐振频率选择: LCL滤波器存在一个固有的谐振频率 $f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1L_2C_f}}$ 。为避免与电网

背景谐波或开关频率发生共振，通常将 f_r 设定在10倍基波频率与0.5倍开关频率之间。③电容无功功率限制： C_f 的取值不宜过大，以免吸收过多的基波无功功率，降低系统效率。

2.2 双闭环PI控制策略

①外环（电压环）：其目标是维持直流母线电压 V_{dc} 的稳定。通过将 V_{dc} 的实际值与给定参考值 V_{dc_ref} 进行比较，经PI调节器后生成有功电流指令 I_{d_ref} 。无功电流指令 I_{q_ref} 通常设为0，以实现单位功率因数并网。②内环（电流环）：其核心任务是精确、快速地跟踪由外环生成的电流指令。将电网电压前馈（Grid Voltage Feedforward, GVF）引入电流环，可以有效解耦d-q轴电流，并增强系统对电网电压扰动的抑制能力。电流误差信号经过PI调节器后，生成调制波信号，用于驱动逆变器。PI控制器的参数整定可采用工程上常用的“零极点对消”法。对于电流内环，其开环传递函数近似为一阶惯性环节，通过合理设置PI参数，可将其校正为一个纯比例环节，从而获得快速的动态响应。

2.3 重复控制（RC）策略

重复控制是一种基于内模原理的控制方法，其核心思想是在控制器内部植入一个能够精确描述周期性参考信号或扰动信号的内模。对于电网谐波（其频率为基波频率的整数倍），该内模就是一个纯延迟环节 z^{-N} （ N 为一个基波周期内的采样点数， $N = f_s/f_1$ ）。标准的重复控制器传递函数可表示为：

$$C(z) = Q(z) \cdot \frac{z^{-k}}{1 - Q(z)z^{-N}}$$

其中，关键参数的整定方法如下： $Q(z)$ 通常设计为一个截止频率略高于最高次目标谐波的低通滤波器（如二阶巴特沃斯滤波器），或直接取为一个小于1的常数（如0.95）。其作用是保证系统的稳定性，并滤除高频噪声。 k （超前拍数）用于补偿系统固有的计算和PWM延迟。总延迟通常为1.5个采样周期，因此 k 一般取1或2。可通过绘制伯德图或奈奎斯特图，调整 k 使得系统在谐振频率处获得最大相位裕度。增益 K_r 影响重复控制器的输出幅度，需在稳定性和收敛速度间权衡，通常在0.5至1.0之间选取^[2]。RC控制器在基波频率及其所有整数倍谐波频率处具有无穷大的增益，这意味着它能够实现对这些频率成分的无静差跟踪。

2.4 PI+重复复合控制策略

为了克服单一控制策略的局限性，本文采用PI+重复复合控制策略。其基本思想是将重复控制器作为辅助控制器，与主PI控制器并联使用。系统总的控制输出 $u(k)$ 为

两者之和：

$$u(k) = u_{PI}(k) + u_{RC}(k)$$

在这种架构下：PI控制器负责处理系统的动态过程（如启动、突加负载、电网电压跌落等）和非周期性扰动，确保系统具有快速的瞬态响应和良好的鲁棒性。重复控制器则专注于消除由电网背景谐波、死区效应等引起的周期性稳态误差，大幅降低并网电流的THD。两者优势互补，共同构成了一个兼具优良动态性能和卓越稳态精度的复合控制系统。

3 Simulink 仿真模型构建与分析

3.1 仿真模型详细搭建

基于前述理论分析，本文在MATLAB R2023a/Simulink环境中构建了完整的光伏并网逆变器仿真模型。模型主要包括以下子系统：

3.1.1 光伏阵列模型

未采用简单的受控源，而是基于光伏电池的物理方程构建。其输出电流 I_{pv} 的表达式为：

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V_{pv} + I_{pv}R_s)}{AKT} \right) - 1 \right] - \frac{V_{pv} + I_{pv}R_s}{R_{sh}}$$

其中， I_{ph} 为光生电流， I_0 为二极管反向饱和电流， R_s 和 R_{sh} 分别为串联和并联电阻， A 为二极管理想因子。该模型能更真实地反映光照强度和温度变化对光伏输出特性的影响。

3.1.2 MPPT模块

采用扰动观察法（Perturb and Observe, P&O）。其算法逻辑如下：在每个控制周期，对光伏阵列的工作电压 V_{pv} 施加一个微小的扰动 ΔV 。测量扰动前后的输出功率 $P(k)$ 和 $P(k-1)$ 。如果 $P(k) > P(k-1)$ ，说明扰动方向正确，则在下一个周期继续沿相同方向扰动；反之，则反向扰动^[3]。在Simulink中，该逻辑通过Relational Operator、Switch和Unit Delay等模块实现。

3.1.3 主电路模块

包含三相全桥逆变器（使用Universal Bridge模块）、LCL滤波器和电网。

3.1.4 非线性负载模块

由三相二极管不控整流桥和RL负载构成，用以产生5、7、11、13次等特征谐波。

3.1.5 控制策略模块

分别实现了双闭环PI控制、重复控制和PI+重复复合控制三种方案。其中，重复控制器通过Discrete Transfer Fcn模块和Integer Delay模块搭建，便于参数调整。

3.2 仿真参数设置

系统主要仿真参数如下:

直流母线电压 V_{dc} : 700 V

电网线电压有效值 V_g : 380 V

电网频率 f_i : 50 Hz

开关频率 f_s : 10 kHz

LCL滤波器参数: $L_1 = 1.5\text{mH}$, $L_2 = 0.5\text{mH}$, $C_f = 10\mu\text{F}$

非线性负载: 三相整流桥+ 10 Ω 电阻+10 mH电感

重复控制器参数: $N = 200$, $Q(z) = 0.95$, $k = 1$, $K_r = 0.8$

3.3 仿真结果与对比分析

3.3.1 工况一: 稳态运行下的谐波抑制性能

系统在额定功率下稳定运行, 电网中接入非线性负载。分别记录采用PI控制、RC控制和PI+RC复合控制时的并网电流波形及其FFT(快速傅里叶变换)分析结果。

①PI控制: 并网电流波形存在明显畸变, FFT分析显示5、7次谐波含量较高, THD约为4.8%, 未能满足高标准的并网要求。②RC控制: 并网电流波形接近理想正弦波, 各次谐波幅值被显著抑制, THD降至约1.2%。但观察其启动过程, 发现动态响应较慢, 存在较长的超调和调节时间^[4]。③PI+RC复合控制: 并网电流波形质量最优, THD进一步降低至0.8%以下。同时, 其启动过程的动态响应速度与PI控制相当, 无明显超调, 体现了良好的动静态综合性能。

3.3.2 工况二: 动态工况下的鲁棒性

在系统稳定运行后, 于 $t = 0.2\text{s}$ 时刻突加50%的非线性负载。观察三种控制策略下并网电流的动态响应过程。

①PI控制: 电流能较快恢复稳定, 但恢复后的稳态波形畸变依然较大。②RC控制: 由于其内模需要至少一个基波周期才能更新控制量, 因此在负载突变后的第一个周期内, 电流波形畸变非常严重, 需要多个周期才能逐渐恢复。③PI+RC复合控制: 得益于PI控制器的快速作用, 电

流在负载突变后能迅速调整到新的稳态值, 且在1-2个周期内, RC控制器便开始发挥作用, 将电流波形的畸变抑制到最低水平, 展现了优异的动态鲁棒性。

4 结语

本文聚焦光伏并网逆变器谐波抑制问题, 深入探究多种控制策略后, 重点提出PI+重复复合控制方案。在Simulink平台构建详细系统仿真模型, 对比分析不同工况运行性能发现: 单一PI控制可保证系统良好动态响应, 但对周期性谐波抑制能力有限, 难以满足高标准电能质量要求; 重复控制基于内模原理, 对电网背景谐波和系统固有谐波稳态抑制效果卓越, 能将并网电流THD降至极低, 但动态响应性能欠佳。而PI+重复复合控制策略融合二者优点, 既保持系统快速动态响应能力, 又大幅提升对周期性谐波抑制精度, 显著降低并网电流总谐波畸变率。仿真结果验证了该复合控制策略的有效性与优越性, 为提升光伏并网系统电能质量和电网兼容性提供可行路径, 未来可探索其在弱电网条件下的适应性及与其他先进算法的融合应用。

参考文献

- [1]刘道生,熊世豪,宋忠文,等.基于光伏并网逆变器谐波抑制技术研究综述[J].电气工程学报,2025,20(06):223-238.
- [2]吴兴奇.光伏并网逆变器电流谐波主动抑制策略研究[D].山东大学,2024.DOI:10.27272/d.cnki.gshdu.2024.005860.
- [3]聂晓华,刘继君.光伏并网逆变器Simulink建模与教学仿真[J].实验室研究与探索,2020,39(02):76-78+122.
- [4]古少博,胡瑞河,屠楠,等.基于Simulink的光伏储能蓄电池充放电控制器建模与仿真[J].电子产品世界,2025,32(06):1-5.