基于 Simulink 的 DC/DC 与 DC/AC 级联三相光伏并网系统设计

孔祥明

国网四平供电公司　吉林四平

【摘要】针对光伏阵列输出受辐照度和温度影响、直流母线需升压稳压、并网电流需满足同步与谐波约束的问题，本文设计了由光伏阵列、Boost DC/DC 变换器、直流母线、三相电压型逆变器、LC 滤波器和电网组成的级联系统。前级以最大功率跟踪和母线电压稳定为目标调节占空比，后级在同步旋转 dq 坐标系下建立电流模型，并采用电压外环、电流内环、锁相同步和 SPWM 调制实现三相并网。通过 Matlab/Simulink 搭建分层模型，可验证光照变化、直流侧扰动和电网电压波动下的动态响应，为后续参数整定和硬件实现提供依据。

【关键词】光伏并网；Boost 变换器；三相逆变器；dq 控制；Simulink

【收稿日期】2026 年 6 月 12 日　　【出刊日期】2026 年 7 月 15 日　　【DOI】10.12208/j.jer.20260034

Design of a Simulink-based three-phase grid-connected photovoltaic system cascading DC/DC and DC/AC stages

Xiangming Kong

State Grid Siping Power Supply Company, Siping, Jilin

【**Abstract**】A cascaded photovoltaic grid-connected system is designed with a PV array, Boost DC/DC converter, DC-link capacitor, three-phase voltage-source inverter, LC filter and utility grid. The front-end stage regulates the duty cycle according to MPPT and DC-link voltage requirements, while the inverter stage is modeled in the synchronous dq frame and controlled through an outer voltage loop, inner current loop, PLL synchronization and SPWM. The Simulink model is used to evaluate transient response under irradiation variation, DC-link disturbance and grid-voltage fluctuation.

【**Keywords**】Photovoltaic grid connection; Boost converter; Three-phase inverter; dq control; Simulink

引言

光伏发电具有清洁、可分布式接入和建设周期短等特点，但光伏阵列输出电压、电流随辐照度、温度和负载状态变化明显，不能直接满足公共电网对电压等级、频率、相位和电能质量的要求。因此，光伏并网系统通常需要先通过 DC/DC 级完成最大功率获取与母线升压，再通过 DC/AC 级把稳定直流能量变换为三相交流电。级联结构把能量采集和并网控制分开处理，便于分别整定前级和后级参数，也便于在仿真阶段观察各环节对系统动态性能的影响[1]。

从工程应用看，光伏并网接口不仅要把直流电变为交流电，还要在电网电压波动、光照突变、直流母线扰动和负载变化时保持稳定运行。若前级 Boost 控制过慢，母线电压会出现较大跌落，导致逆变器调制裕量不足；若后级电流控制带宽设置不合理，则可能出现电流畸变、功率振荡甚至同步失稳。本文以 Simulink 为平台，对 Boost 升压级、三相逆变级及其控制策略进行统一建模，使主电路、控制器、调制器和测量环节具有清晰的对应关系。

1 系统总体方案

本文设计的系统由光伏阵列、输入滤波电容、Boost 升压电路、直流母线电容、三相全桥逆变器、LC 滤波器、锁相环和三相电网组成。光伏阵列输出端首先接入 Boost 电路，升压后的直流电压作为逆变器母线电压。逆变器通过六个功率开关构成三相桥臂，输出经滤波后并入电网。该结构的优点是控制层次清楚，前级负责光伏侧能量获取，后级负责并网电流质量，二者通过直流母线完成能量平衡。

系统控制可分为功率级和信号级两部分。功率级包括 Boost 开关器件、电感、电容、逆变桥臂和滤波器；信号级包括光伏电压电流采样、母线电压采样、三相电网电压采样、坐标变换、PI 调节、限幅、PWM 比较和驱动脉冲生成。Simulink 模型中应把这些模块按能量流和信号流分别连接，避免把测量、控制和主电路混在一起。这样既便于调试，也便于后续把仿真控制器移植到数字控制平台。

光伏侧采用单二极管等效模型时，阵列输出由光生电流、二极管电流、串联电阻和并联电阻共同决定。温

度升高会降低开路电压，辐照度升高会增大短路电流，最大功率点也随之移动。因此，Boost 级应根据采样得到的光伏电压和电流判断工作点位置，逐步调整占空比，使阵列尽量运行在最大功率点附近。常用的扰动观察法结构简单，增量电导法在光照快速变化时判断更准确，二者都可在 Simulink 中通过离散模块实现[2]。

2 Boost DC/DC 级设计

Boost 升压电路由电感、功率开关、续流二极管和输出电容构成。开关闭合时，光伏阵列向电感充电，电感电流上升并储存磁场能量；开关断开时，电感电流经二极管流向输出端，与输入电压叠加后向母线电容和后级逆变器供能。连续导通模式下，忽略器件压降和寄生参数时，其稳态关系可表示为 Udc=Upv/（1-D），其中 Udc 为母线电压，Upv 为光伏端电压，D 为占空比。该关系说明占空比越大，升压能力越强，但器件电流应力和纹波也会随之增加。

电感和电容参数决定 Boost 级的纹波水平和动态响应。电感过小会使电流纹波增大，甚至进入断续导通模式，使传递函数和控制器设计复杂化；电感过大虽能降低纹波，却会减慢电流响应并增加体积。工程中可先按 L≥UpvD/（fsΔIL）估算电感值，再根据最大输入电流、饱和电流和温升留出裕量。输出电容可按 C≥IoD/（fsΔUdc）估算，并结合母线电压纹波、启动冲击和逆变器功率脉动进行修正。实际仿真中还应加入二极管压降、MOSFET 导通电阻和电感等效串联电阻，以便评估损耗对母线电压的影响[3]。

本文在 Simulink 中保留 MPPT 和母线电压两种控制接口，便于根据仿真目的切换。无论采用哪种方式，都应检查启动过程、电流限幅、占空比饱和和母线过压保护，确保仿真结果具有工程可解释性。为了使 Boost 级仿真更接近实际工程，还需要设置软启动和保护环节。软启动可让母线参考电压由低到高缓慢上升，避免初始时电容充电电流过大；过流保护可在电感电流超过阈值时限制占空比，防止开关器件承受过高峰值电流；过压保护可在母线电压超过设定范围时降低前级输入功率或触发停机。上述保护虽然会使控制结构略复杂，但能避免理想模型在极端条件下给出不合理的电压和电流波形。

3 三相 DC/AC 级数学模型与控制

三相 DC/AC 级采用电压型全桥逆变器。逆变器直流侧接入母线电容，交流侧经 LC 滤波后连接电网。若以滤波电感电流为控制对象，则在 abc 坐标系下三相变量随时间正弦变化，直接设计控制器较为困难。通过 Clarke 和 Park 变换，可把三相静止坐标变量转换到同步旋转 dq 坐标系中。当锁相环相角与电网基波相角一致时，稳态正弦电流在 dq 坐标中表现为近似直流量，PI 控制器即可实现无静差跟踪。

在同步旋转坐标系下，电感电流动态可写为 Ldid/dt=ud-ed-Rid+ωLiq，Ldiq/dt=uq-eq-Riq-ωLid。其中 id、iq 分别为 d 轴和 q 轴电流，ud、uq 为逆变器输出电压分量，ed、eq 为电网电压分量，R 和 L 为滤波电感等效电阻和电感，ω 为电网角频率。模型中的 ωLiq 和 ωLid 为交叉耦合项，若不处理，会降低电流环动态性能。因此，控制器通常在 PI 输出基础上加入电网电压前馈和交叉解耦补偿，使 d、q 轴近似独立调节[4]。

并网控制策略采用直流母线电压外环和电流内环。外环把母线电压实际值与参考值比较，经 PI 调节后生成 d 轴电流参考；q 轴电流参考通常设为零，以实现单位功率因数运行。当需要参与无功调节或电压支撑时，可根据电网电压偏差给出 q 轴电流参考。内环分别调节 id 和 iq，输出 dq 坐标下的电压指令，再经反 Park 变换生成三相调制波。SPWM 模块将调制波与三角载波比较，产生六路开关脉冲，控制逆变器桥臂通断。

锁相环是并网控制的关键环节。若相角估计存在偏差，d、q 轴分量会相互串扰，导致有功和无功控制不准确。仿真中可采用同步旋转坐标锁相环，以电网电压 q 轴分量为误差信号，经 PI 调节得到角频率修正量，再积分得到相角。对于电网电压跌落、谐波和不平衡工况，可在锁相环前加入低通滤波或正负序分离环节。近年研究也常把自适应、滑模或故障穿越控制引入并网逆变器，以提高弱电网条件下的鲁棒性[5]。LC 滤波器用于削弱开关频率附近的高频纹波。滤波电感越大，电流纹波越小，但压降、损耗和动态延迟越明显；滤波电容越大，输出电压纹波越小，但会增加无功电流和谐振风险。因此，滤波器参数应结合开关频率、并网电流允许纹波、谐振频率和控制带宽综合选择。

4 Simulink 仿真核查

Simulink 仿真模型应按光伏阵列、Boost 功率级、直流母线、逆变器功率级、滤波器、电网和控制器七个部分搭建。主电路采用 Simscape Electrical 或专用电力电子模块实现，控制器采用离散 PI、采样保持、限幅、坐标变换和 PWM 比较模块实现[6]。为便于分析，应在光伏端、Boost 电感、直流母线、逆变器交流侧和并网点设置测量端口，记录电压、电流、功率、占空比、调制比和 dq 轴电流。

仿真工况至少包括三类。第一类为辐照度阶跃，例如从 1000 W/m2 降至 700 W/m2 再恢复，观察光伏功率、MPPT 跟踪方向、Boost 占空比和母线电压变化；第二类为直流侧扰动，例如改变母线参考值或并网功率指令，观察电压外环超调、调节时间和电感电流峰值；第三类为并网侧扰动。若并·网电流 THD、功率因数和母线稳态误差均满足设计目标，说明控制结构具有基本可行性。

参数整定可遵循由内到外、由快到慢的原则。首先确定光伏阵列额定功率、母线电压、开关频率、电感和电容；其次在固定母线电压条件下整定逆变器电流内环，使其快速跟踪且不过度振荡；然后整定母线电压外环，使其带宽低于电流环，避免外环指令变化过快[7]；最后调整 Boost 级 MPPT 步长和电流限幅，使光照变化时既能保持较高能量获取效率，又不引起母线大幅波动。对于离散控制，还应保证采样周期、PWM 周期和控制器更新周期一致或成整数倍关系，降低数字延时对稳定裕度的影响[8]。

仿真结果可从稳态和动态两方面评价。稳态评价关注母线电压误差、并网电流有效值、THD、功率因数和有功功率输出；动态评价关注光照突变时最大功率点恢复时间、母线电压超调量、并网电流峰值和锁相环重新同步时间。若出现母线振荡，可适当降低电压外环比例系数或增大母线电容；若并网电流存在明显畸变，可检查滤波器参数、解耦补偿和 PWM 载波频率；若 dq 轴电流存在静差，则需检查坐标变换相角、采样极性和 PI 限幅是否设置正确。为了便于外审复核，仿真输出图应至少包括光伏阵列 P-V 或 P-t 曲线、Boost 电感电流、直流母线电压、三相并网电流、dq 轴电流和有功无功功率。文字分析不宜只描述“波形正常”，而应给出变化原因和控制作用，例如光照降低时输入功率下降，母线电压短时跌落，电压外环降低 d 轴电流参考，随后 Boost 级在新的最大功率点附近稳定。通过这种因果说明，可以证明模型确实反映了级联系统的能量平衡和闭环控制过程。

5 结论

本文围绕 DC/DC 与 DC/AC 级联三相光伏并网系统完成了方案设计和 Simulink 建模说明。Boost 级实现光伏侧升压、最大功率跟踪和母线能量支撑，三相逆变级通过 dq 坐标建模、锁相同步、双闭环控制和 SPWM 调制实现并网电流调节。后续工作可在现有模型上继续加入器件损耗、死区时间、采样延时、温升模型和电网阻抗变化，进一步评估控制器在弱电网和故障穿越场景下的稳定性。若进入硬件设计阶段，还需结合功率器件选型、驱动保护、电磁兼容、散热和并网保护要求，对 Boost 电感、母线电容、滤波器和控制周期进行复核，以提高系统的工程适用性。

参考文献

[1] IEEE Standards Association. IEEE Application Guide for IEEE Std 1547-2018, IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces[S]. IEEE, 2024.

[2] Akin E, Sahin M E. Investigation of Incremental Conductance MPPT Algorithm in MATLAB/Simulink Using Photovoltaic Powered DC-DC Boost Converter[C]//2023 22nd International Symposium on Power Electronics (Ee). IEEE, 2023:1-6.

[3] Singh D K, Manna S, Akella A K. Control of Three-Phase Grid-Connected Inverter Using dq Axis Theory[M]//Recent Advances in Power Electronics and Drives. Singapore: Springer, 2022:157-167.

[4] Chen Y, Meng J, Yan Y, et al. Quasi-Z based adaptive sliding mode control for three-phase photovoltaic grid-connected system[J]. IET Power Electronics, 2023, 16(15):2577-2591.

[5] Rey-Boue A B, Guerrero-Rodriguez N F, Stockl J, Strasser T I. Enhanced Control of Three-Phase Grid-Connected Renewables with Fault Ride-Through Capability under Voltage Sags[J]. Electronics, 2022,11(9):1404.

[6] Arise N, Saiteja M, Siddu V, et al. Optimized control strategy for a three-phase grid connected inverter using PI controller and DQ frame[J]. International Journal of Applied Power Engineering, 2024,13(4):790-797.

[7] Rashid M H. Power Electronics Handbook: Devices, Circuits, and Applications[M]. 4th ed. Oxford: Butterworth -Heinemann, 2018.

[8] Ali Z, et al. A study of a generalized photovoltaic system with MPPT using perturb and observer algorithms under varying conditions[J]. Energies, 2023, 16(9): 3638.

版权声明：©2026 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

OPEN ACCESS