

基于半桥 LLC 谐振变换器的光伏发电系统

罗 浩

大连海洋大学 辽宁 大连 116000

【摘要】：本文针对光伏发电系统效率稳定性，提出一种基于半桥 LLC 谐振变换器的电路系统设计方案。该方案将 Boost 升压电路与半桥 LLC 谐振变换器级联，通过 Boost 电路实现光伏阵列的宽电压范围调压，结合 LLC 谐振变换器的高频高效特性，优化系统整体发电效率的稳定性。针对最大功率点跟踪（MPPT）问题，采用功率-电压导纳法实现快速精准的 MPPT 控制，提升整体发电系统工作的稳定性。实验结果表明，该方案在恒定温度及恒定辐照度、恒定辐照度及变化温度、恒定温度及变化辐照度以及变温度变辐照度下均能实现稳定的直流输出，且动态响应速度快，抗干扰能力强，为光伏发电系统的高效可靠运行提供了新的技术路径。

【关键词】：光伏发电；LLC 谐振变换器；MPPT；稳定直流输出

DOI:10.12417/3041-0630.26.02.007

随着全球能源结构向清洁化转型，信息技术和电力电子技术得到快速发展，光伏发电系统在分布式能源领域的应用规模持续扩大，开关电源的研究水平也随之不断进步，其对功率变换器的性能要求也日益严苛^[1]。其小型化、轻型化、高效率等优点，在提高功率密度、减少能量损耗等方面相较于传统电源有着明显改善^[2]。太阳能阵列输出特性呈现低电压、宽波动范围的特点，且受光照强度和温度变化影响显著，由于输出电压受太阳光照波动影响较大这一问题，导致对功率变换器的高效电能转换能力提出了更高要求，本章提出一种基于 Boost 升压与半桥 LLC 谐振变换器级联的高增益功率变换架构，通过拓扑融合作为光伏发电后端电能变换的电路结构。

1 研究现状

在“双碳”战略目标的引领和推动下，中国正加快构建新型电力系统，以太阳能为代表的可再生能源在能源消费结构中的比重持续增加，半桥 LLC 谐振变换器凭借软开关特性在光伏系统中占据重要地位，与 Boost 升压电路级联可拓宽输入电压范围并提升转换效率。文献^[3]在电路工作基础上，针对直流侧电压跌落动态演变特性展开深入解析。文献^[4]总结了光伏发电行业发展现状和退役现状、光伏组件结构和主要构成材料及价值。文献^[5]分析了混合储能方法相较于单一储能方法的优势。文献^[6]通过理论计算光伏组件的损失，并与实测值进行对照，得到了选 IAM 值优的产品能提高发电量的结论。文献^[7]通过改进深度学习方法，将长短期记忆网络与注意力机制结合，构建混合模型，优化了小型光伏电站发电功率预测中的有效性。文献^[8]基于高频链逆变器，设计了一种分布式光伏系统控制方法。然而这些研究并没有针对光伏发电的电路系统进行分析，

因此，本文针对光伏发电系统设计了一套稳定性高，抗干扰能力强的光伏发电电路系统。

2 系统方案

为了提高系统的可靠性，采用结构模块化思路进行设计，系统的整体结构如图 1 所示。搭建光伏 LLC 发电模型主要包括，光伏组件模块，boost+LLC 主电路模块，MPPT 控制模块，MOSFET 开关信号模块，变压器及后端整流稳压模块组成。MPPT 控制系统根据功率-电压参数变化驱动前级 boost 电路中绝缘栅双极型晶体管（IGBT）实现最大功率点的跟踪，利用 LLC 谐振变换器中的变压器对系统实现隔离的稳压输出。当光照发生变化时，IGBT 的 PWM 信号也会随之改变，对后端 LLC 电路实现稳定输出与提升电能质量的作用。

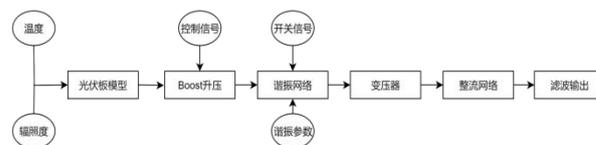


图 1 系统设计框图

3 系统电路设计

3.1 主电路设计

主电路采用模块化设计思路，由光伏输入单元、前级调压单元、谐振变换单元、隔离变压单元及输出整流滤波单元五部分构成，整体拓扑结构如图 2 所示。为抑制光伏输出波动，在光伏板正负极间并联电容 C1 作为稳压缓冲。Boost 调压电路由 IGBT、二极管 D、驱动电路及电感 L1 构成。通过控制系统对 PWM 信号进行调节，将波动较大的输出电压控制在 20V。

半桥 LLC 谐振电路采用对称式拓扑结构，由两只功率 MOSFET 构成半桥臂，谐振腔包含谐振电感 L_r 、谐振电容 C_r 及励磁电感 L_m 。副边采用全桥整流电路，由四只二极管（D1~D4）构成，整流后经电容 C3 并联滤波，满足后级设备供电需求。

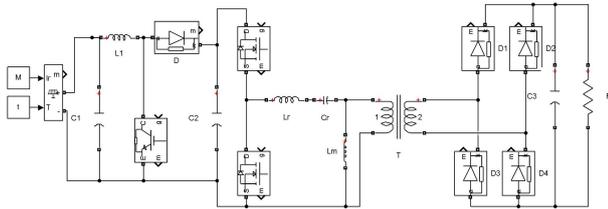


图 2 系统主电路

3.2 控制电路设计

本文控制电路主要针对 Boost 电路模块进行控制设计，两只功率 MOSFET 对称导通即可。采用电压导纳法实现最大功率点跟踪（MPPT）控制。通过电压导纳法实现高精度 MPPT 控制，结合可调节步长策略，确保了系统在复杂工况下的高效稳定运行，如图 3 所示。

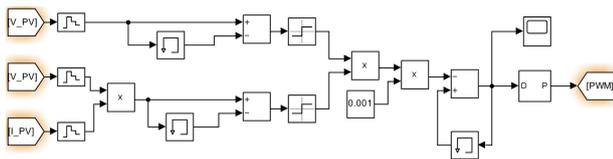


图 3 Boost 电路控制系统

4 仿真验证

为验证在电压导纳法 MPPT 控制策略下，本系统在复杂工况下的动态响应特性，从 MPPT 控制、光伏板输出、谐振变换器输入电压以及系统输出等四个维度进行分析，并通过四组对比仿真实验，深入探究 Boost+半桥 LLC 谐振变换器拓扑在温度-辐射复合扰动下的输出电压调控性能。

4.1 恒温恒辐照度下的性能验证

在 25°C 恒温与 1KW/m² 恒辐照条件下的仿真结果如下图，如图 4a 所示为光伏板的输出特性曲线，该图显示在 0.4s 左右光伏板达到最大功率输出点；如图 4b 所示为系统的输出电压曲线，由该曲线可知，系统输出电压稳定在 20V 左右。

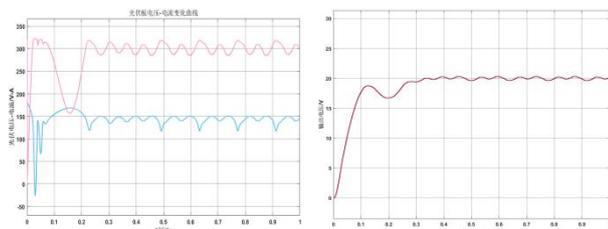


图 4a 光伏板输出特性曲线 图 4b 系统输出电压曲线

图 4 标准温度及辐照度下系统运行状态

4.2 恒温变辐照度下的性能验证

在 25°C 恒温，辐照度在 0.5s 时由 0.8KW/m² 变为 1KW/m² 的辐照情况下的仿真结果如下图，由图 5a 可知，该图显示光伏板在 0.4s 左右光伏板达到最大功率输出点，在 0.5s 发生突变，在 0.8s 达到新的平衡；如图 5b 可知，系统输出电压在 0.5s 突变后稳定在 20V 左右。

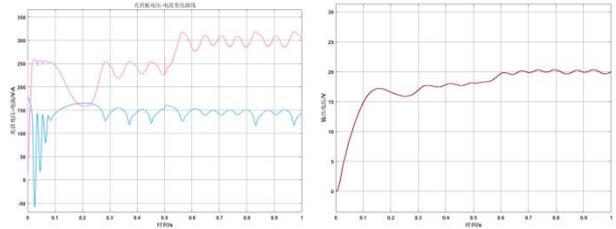


图 5a 光伏板输出特性曲线 图 5b 系统输出电压曲线

图 5 标准温度、辐照度变化下系统运行状态

4.3 恒辐照变温度下的性能验证

在 1KW/m² 恒辐照度，温度在 0.5s 时由 0°C 变为 25°C 的温度情况下的仿真结果如下图，由图 6a 可知，该图显示光伏板在 0.3s 左右光伏板达到最大功率输出点，在 0.5s 发生突变，在 0.6s 达到新的平衡；如图 6b 可知，系统输出电压在 0.5s 突变后稳定在 20V 左右。

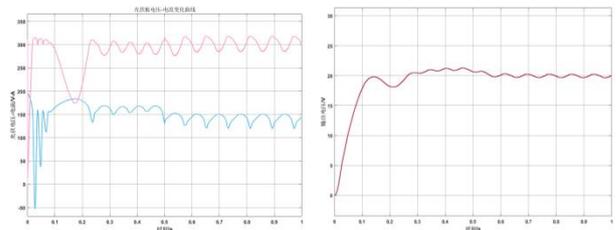


图 6a 光伏板输出特性曲线 图 6b 系统输出电压曲线

图 6 标准辐照度、温度变化下系统运行状态

4.4 双变量复合扰动下的性能验证

在 0.5s 辐照度由 0.8KW/m² 变为 1KW/m²，温度由 0°C 变为 25°C 的温度情况下的双扰动仿真结果如下图，由图 7a 可知，该图显示光伏板在 0.4s 左右光伏板达到最大功率输出点，在 0.5s 发生突变，在 0.8s 达到新的平衡；如图 7b 可知，系统输出电压在 0.5s 突变后同样稳定在 20V 左右。

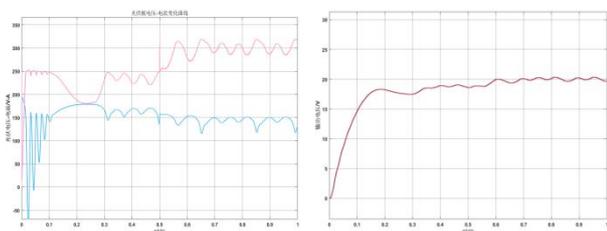


图 7a 光伏板输出特性曲线 图 7b 系统输出电压曲线

图 7 辐照度与温度都变化下系统运行状态

5 总结

本文通过构建“Boost 电路+半桥 LLC 谐振变换器”的复合电能变换系统，实现了光伏电能质量的显著提升。通过电压导纳法实现最大功率点跟踪的 IGBT 开关控制策略，动态调整工作点，确保系统在不同环境条件下保持高效运行。通过在四种不同工况下对系统进行仿真，得到在定温定辐、定温变辐、定辐变温及变温变辐等四种典型工况下，从光伏板输出及系统输出两个维度进行分析，系统都能够稳定追踪到最大功率点，验证了本系统的稳定性和控制系统的精准性，有效抑制了光伏发电的波动性对发电系统所带来的影响。

参考文献:

- [1] 赵鹏程.半桥 LLC 谐振 DC-DC 变换器的研究[D].北方工业大学,2024.
- [2] 刘期辉,高文雷,刘银川,等.一种半桥 LLC 高压电源设计与实现[J].现代电子技术,2024,47(04):103-108.
- [3] 李天宇,钟庆,冯俊杰,等.大规模光伏外送系统光伏逆变器直流侧电压跌落抑制策略[J/OL].电力系统自动化,1-10[2025-12-17].
<https://link.cnki.net/urlid/32.1180.TP.20251124.1451.002>.
- [4] 刘佳,罗涛,吴潇笑,等.废弃光伏组件回收技术发展现状与展望[J/OL].热力发电,1-10[2025-12-17].<https://link.cnki.net/urlid/61.1111.TM.20251117.0836.002>.
- [5] 胡永刚.分布式光伏发电混合储能方法应用分析[J].能源与节能,2025,(11):29-31+35.
- [6] 王响.光伏组件的菲涅尔反射现象及其对发电量的影响分析[J].机电信息,2025,(22):46-49.
- [7] 张魏娜.基于改进的深度学习方法对光伏发电功率的预测[J].科学技术创新,2025,(22):110-113.
- [8] 王侠,薛皓元,王涛.基于高频链逆变器的分布式光伏系统控制方法研究[J].电气技术与经济,2025,(11):170-172.