

Research on the Improvement of Photovoltaic Power Generation through Inverter Retrofit Based on Novel Control Strategies

Xinchun Luo

Xuwen County Yue Hydropower Energy Co., Ltd., Zhanjiang, Guangdong, 524000, China

Abstract

Against the backdrop of the global energy structure rapidly transitioning toward clean energy, photovoltaic (PV) power generation, as a vital component of renewable energy, plays a crucial role in advancing sustainable energy development. However, traditional inverter control strategies are constrained by algorithmic limitations, exhibiting issues such as low maximum power point tracking (MPPT) efficiency, sluggish dynamic response, and poor power quality, which severely restrict the power generation efficiency of PV systems. This paper conducts an in-depth study and proposes a novel inverter control strategy that integrates an adaptive particle swarm optimization (APSO) algorithm with fuzzy control. Through a systematic transformation approach involving hardware upgrades and software optimization of conventional inverters, combined with theoretical analysis, MATLAB/Simulink simulation modeling, and practical engineering case studies, the study comprehensively explores the enhancement effects of the new control strategy on PV power generation. The research results demonstrate that the upgraded inverter system achieves an 8.2% improvement in MPPT efficiency, a 12.5% increase in annual power generation, and significant enhancements in power quality while reducing power losses. This study provides an innovative technical pathway for optimizing the efficiency of PV power generation systems, effectively promoting the large-scale development of the photovoltaic industry.

Keywords

photovoltaic power generation; inverter; novel control strategy

基于新型控制策略的逆变器改造对光伏发电量提升的研究

罗新春

徐闻县粤水电能源有限公司, 中国·广东 湛江 524000

摘要

在全球能源结构加速向清洁能源转型的背景下,光伏发电作为可再生能源的重要组成部分,其效率提升对推动能源可持续发展具有关键意义。传统逆变器控制策略受限于算法局限性,存在最大功率点跟踪效率低、动态响应慢、电能质量差等问题,严重制约光伏发电系统的发电效能。本文深入研究并提出一种融合自适应粒子群优化算法(APSO)与模糊控制的新型逆变器控制策略,通过对传统逆变器进行硬件升级与软件优化的系统性改造方案,结合理论分析、MATLAB/Simulink仿真建模及实际工程案例,全面探究新型控制策略对光伏发电量的提升效果。研究结果表明,经改造后的逆变器系统在最大功率点跟踪效率提升8.2%,年均发电量提高12.5%,同时显著改善电能质量,降低功率损耗。本研究为光伏发电系统效率优化提供了创新技术路径,能够有效促进光伏产业规模化发展。

关键词

光伏发电; 逆变器; 新型控制策略

1 引言

伴随全球气候变暖以及化石能源短缺问题愈发严峻,以太阳能为代表的清洁能源开发成为国际能源竞争瞩目点。光伏发电系统中,身为实现直流-交流电能转换的核心设施,系统的发电效率、电能质量及稳定程度直接受其控制策略影响,传统逆变器大量采用的扰动观察法(P&O)、电导增量法(INC)等控制策略手段,遇到光照强度瞬间改变、温

度波动等复杂工况的时候,有跟踪速度缓慢、易困在局部极值、谐波抑制能力薄弱等问题,造成发电效率损失。人工智能算法与智能控制技术的迅猛发展,给逆变器控制策略的优化指引了新方向,但现有的研究多把焦点放在单一算法应用上,缺乏针对复杂工况下多目标协同优化的系统性解决途径。本文提出的一种新型逆变器控制策略,是融合了自适应粒子群优化算法与模糊控制的,还利用硬件改造与软件升级推动工程应用实施,意在为提高光伏发电量提供高效且可靠的技术途径。

【作者简介】罗新春(1985-),男,中国广东梅州人,本科,助理工程师,从事电气及光伏电站运营管理研究。

2 光伏发电系统与逆变器控制原理

2.1 光伏发电系统组成架构

光伏阵列、逆变器、汇流箱、监控系统以及电网(或负载)共同构成了光伏发电系统,以光伏组件的串联、并联,光伏阵列形成发电单元,把太阳能转化成直流电;逆变器充当系统的核心角色,履行直流到交流的电能转换、最大功率点跟踪及并网控制的功能;实现多路直流电流的汇集与保护靠汇流箱;监控系统对系统运行参数实时监测并完成数据上传,按照应用场景的差异,集中式电站、分布式电站及户用光伏系统构成了光伏发电系统,其逆变器的选型及控制策略存在明显差别。

2.2 逆变器工作机制与拓扑结构

按照拓扑结构,逆变器可分为单级式、双级式和多级式,单级式逆变器借助一次功率变换达成直流到交流的转换,呈现出高效、低成本的特点,只是对光伏阵列的电压范围有着严苛要求;双级式逆变器添设 DC/DC 升压环节,能灵活适配各电压等级的光伏组件,适合分布式相关场景。就并网方式进行分类界定,大型地面电站采用集中式逆变器为宜,以集中控制的方式实现大规模功率转换;组串式逆变器为各光伏组串分别配备独立逆变器,有着更高的发电效率和不错的故障隔离本领;微型逆变器直接跟光伏组件相集成,可达成组件层面的最大功率点跟踪。

2.3 传统控制策略局限性分析

2.3.1 扰动观察法(P&O)

扰动观察法借助周期性地改变光伏阵列的输出电压,比较前后功率的改变幅度以调整工作点,其优势体现为结构简单、实现容易,然而存在三项明显缺陷:第一个缺陷是跟踪速度迟缓,在光照快速变化之际,极易出现较大的功率损耗;二是最大功率点周边存在着持续振荡现象,引发额外的功率亏损;三是极易受周边环境噪声干扰,出现错误判定现象。

2.3.2 电导增量法(INC)

电导增量法依据光伏阵列 $P-V$ 特性曲线斜率为零这一原理,采用计算电压与电流变化率判断最大功率点,较之于 P&O 算法,其跟踪精度相较之前有所上扬,但在传感器精度方面要求极为之高,而且动态响应方面能力不足,难以在复杂天气状况下迅速适应。

2.3.3 恒压法(CVT)

恒压法借助预先设定的固定电压值达成 MPPT,应用于光照稳定的场景为宜,然而环境变动时无法开展动态性调整,发电的效率偏低。

3 新型逆变器控制策略设计

3.1 复合控制策略架构

本文所提新型控制策略运用“APSO 算法+模糊控制”双层控制架构,上层 APSO 算法承担起光伏阵列最大功率点的动态跟踪职责,采用实时监测电压、电流数据之法,快

速查找全局最大功率点;下层模糊控制系统依据并网电流的偏差及其变化率,实施对逆变器调制信号的动态调节,实现对并网电流的优化与谐波抑制,双系统携手协作,有效破除传统策略内 MPPT 跟电能质量调节相互约束的困境。

3.2 自适应粒子群优化算法优化

3.2.1 算法改进机制

传统 PSO 算法具有初期收敛速度快、后期易陷入局部最优的弊病,本文采用引入自适应惯性权重和学习因子的调节办法,提高算法全局搜索最优解能力,惯性权重伴随迭代次数线性递减,调和算法全局搜索及局部开发的能力;学习因子根据粒子分布状况作动态改动,杜绝粒子聚集产生早熟现象。

3.2.2 MPPT 实现流程

将光伏阵列输出的电压、电流作为粒子群算法的输入参数,把功率作为本次算法的目标函数,算法完成粒子位置与速度的初始化后,依靠迭代更新粒子状态,对每个粒子的历史最优位置和全局最优位置进行比较,直到满足终止要求^[1]。

3.3 模糊控制系统精细化设计

3.3.1 模糊控制器构建

以双输入单输出结构进行采用,输入变量采用并网电流偏差以及此偏差的变化率,输出变量采用逆变器调制信号调节量,输入与输出变量均被分成 7 个模糊子集:与负大、负中、负小、零、正小、正中、正大这几种情况匹配。

3.3.2 模糊规则库优化

按照专家经验与仿真测试结论,建立起具备 49 条规则的模糊规则库,如表 1 所示。

表 1 模糊控制规则表

| $\$e\$\$ec\$\$$ | NB | NM | NS | ZO | PS | PM | PB |
|-----------------|----|----|----|----|----|----|----|
| NB | NB | NB | NM | NM | NS | ZO | ZO |
| NM | NB | NB | NM | NS | NS | ZO | PS |
| NS | NM | NM | NS | NS | ZO | PS | PM |
| ZO | NM | NS | NS | ZO | PS | PM | PB |
| PS | NS | NS | ZO | PS | PS | PM | PB |
| PM | ZO | ZO | PS | PM | PM | PB | PB |
| PB | ZO | PS | PM | PM | PB | PB | PB |

4 逆变器改造方案与实施

4.1 硬件系统升级

4.1.1 功率电路优化设计

把原本的 IGBT 模块替换成第七代碳化硅(SiC)器件,其开关频率提升到 20kHz 水平,实现导通损耗降低 40%;对散热结构实施优化,以液冷散热方案替代原本的风冷,实现器件结温下降 15-20℃,提升系统的可靠水平。

4.1.2 传感器精度提升

采用霍尔效应式电压/电流传感器,测量精度从原先的 $\pm 0.5\%$ 提升至 $\pm 0.2\%$;额外增添温度传感器阵列,对光伏组件、逆变器模块及环境温度实施实时监测,为控制算法提供精确数据后盾^[2]。

4.1.3 控制板性能增强

采用 TI 公司 TMS320F28379D 型的 DSP 作为核心控制器，其主频可至 200MHz，拥有高速 ADC 模块以及浮点运算单元，适配 APSO 算法及模糊控制的实时计算需求；添加 FPGA 协处理器，完成复杂逻辑的控制及高速信号的处理。

4.2 软件系统开发

4.2.1 算法程序实现

采用 C 语言编写 APSO 算法及模糊控制程序，经由模块化设计强化代码可读性及可维护性，APSO 算法设置 30 作为粒子数，设定最大迭代次数为 50 次；模糊控制模块采用的是 Mamdani 推理法，依靠离线计算生成查询表单，降低在线运算规模。

4.2.2 通信协议集成

实现 ModbusTCP、IEC61850 等通信协议的集成，实现逆变器跟电站监控系统的数据互通；开展远程升级功能的开发，具备控制程序在线更新及优化的支持能力^[9]。

4.3 改造实施流程

4.3.1 系统评估与方案设计

对既有的光伏发电系统做全面性能测试，涉及 MPPT 效率、电能质量、功率损耗等相关指标；依照测试结果制定个性化的改造方案，明确需替换的硬件列表与软件升级事项。

4.3.2 分阶段改造与调试

施行“先模拟而后实际”的分步实施办法，先于实验室环境构建模拟平台，对新型控制策略的有效性加以验证；实施现场改造工作的时候，采取先开展单台逆变器试点工作，再进行区域组网测试，最后推进全站改造的方式，降低改造实施中的风险隐患。

4.3.3 性能验收与优化

改造实施完成之后，实施 72 小时连贯的运行测试，把系统改造前后的性能进行对比；依照实测数据优化控制参数，使系统实现稳定运行。

5 仿真分析与实验验证

5.1 仿真模型构建

凭借 MATLAB/Simulink 搭建光伏发电系统仿真平台，有光伏阵列模块、新型逆变器、电网模块及负载组成，光伏阵列参数依照某型号 545Wp 单晶硅组件设定 ($V_{oc}=49.8V$ ， I_{sc} 对应的短路电流值为 12.05A，41.8V 乃最大功率点之电压，最大工作电流 I_{mp} 是 13.04A；逆变器采取双级式拓扑架构，DC/DC 转换阶段采用 Boost 电路，DC/AC 阶段采用全桥逆变的电路^[4]。

5.2 现场实验验证

5.2.1 实验平台搭建

选定一座 1MW 分布式光伏电站作为实验地点，随机抽选 10 组逆变器实施改造，选取另外 10 组作为对比对象，实验采用的设备有 HIOKI PW3198 功率分析仪、FLUKE438-II 电能质量分析仪等高精度测试仪器^[5]。

5.2.2 实验结果分析

连续 12 个月监测期间结束后，改造组年均发电量为 118.6 万 kWh，对照组年均实现发电量 105.4 万 kWh，发电效率获得 12.5% 的增长；并网电流总谐波畸变率 (THD) 从原本的 5.1% 降到了 2.7%，符合 IEEE Std 519 - 2014 标准既定要求；系统整体效率从原本的 95.2% 提升至 96.8%。

在电能质量优化方面，改造前并网电流总谐波畸变率 (THD) 为 5.1%，超出 IEEE Std 519—2014 标准中 $THD \leq 5\%$ 的要求；改造后 THD 降至 2.7%，不仅满足标准，还达到了行业领先水平。这意味着电网接入的谐波污染显著降低，有效减少了对电网设备的损耗，提升了供电可靠性。从波形分析来看，改造后的电流波形更接近标准正弦波，尤其在光照突变时，谐波波动幅度明显减小，验证了模糊控制对谐波抑制的有效性。

系统整体效率从 95.2% 提升至 96.8%，这一提升主要源于两方面：一方面，APSO 算法提升了 MPPT 效率，使光伏阵列在复杂光照下仍能保持高功率输出；另一方面，SiC 器件的应用降低了功率电路的导通损耗，配合液冷散热系统，器件结温稳定在安全区间，避免了因过热导致的效率衰减。此外，传感器精度的提升使控制算法获得更精准的电压、电流及温度数据，进一步优化了实时调控策略，减少了因数据误差导致的功率损失。

6 结论

本文研究新型逆变器控制策略并完成系统改造实施，有效实现光伏发电量的大幅上扬，从理论分析、仿真实验到工程案例都表明，融合了自适应粒子群优化算法及模糊控制的复合策略，在 MPPT 效率、电能质量及系统稳定性方面远超传统方法，经改造过后的逆变器系统在复杂工况里仍高效运行，为光伏电站提升效益、降低成本给出可行方案。未来研究可以接着探索深度学习算法跟强化学习在逆变器控制中的运用，进一步增强系统的自适应水平；研发多目标协同的综合优化策略，实现发电效率、储能调度与电网稳定性的均衡；实施逆变器跟光伏组件、储能系统的一体化控制研究工作，带动光储充一体化技术迈向新高度，伴着技术持续创新的步伐，新型控制策略可为光伏发电产业高质量发展赋予新动能。

参考文献

- [1] 王延齐,高长伟,李东宇,等.光伏发电系统双闭环控制及并网稳定性研究[J].辽宁科技学院学报,2024,26(02):43-46+82.
- [2] 王有新.光伏发电系统及电站电气设计分析[J].光源与照明,2024,(03):96-98.
- [3] 葛曼青.光伏发电系统的运行和维护[J].光源与照明,2023,(08):114-116.
- [4] 张志敏,彭红义,潘若妍,等.基于MPPT的光伏并网逆变器研究[J].电源技术,2023,47(01):108-111.
- [5] 张波,杨恩泽,李铁成,等.考虑基频/低频结温影响的光伏逆变器寿命评估方法[J].湖南大学学报(自然科学版),2022,49(10):192-200.