文章类型：论文|刊号（ISSN）：2529-7821 /（中图刊号）：868GL002

局部遮阴条件下光伏阵列的多峰功率优化模型研究

申永芳
新疆华电喀什热电有限责任公司
DOI:10.12238/hwr.v9i8.6550

[摘　要] 局部遮阴会导致光伏阵列输出特性呈现复杂的多峰现象,致使传统最大功率点跟踪算法易陷入局部极值而造成功率损失。为提高系统发电效率,本研究旨在构建一个高效、鲁棒的多峰功率优化模型。通过理论分析光伏阵列在遮阴下的特性,并设计一种改进的智能优化算法进行模型求解,以实现对全局最大功率点的快速精准定位。仿真结果表明,该模型能有效提升光伏系统在局部遮阴条件下的能量捕获能力,具有重要的理论价值和工程应用前景。
[关键词] 光伏阵列；局部遮阴；优化模型；智能算法
中图分类号：TU205　文献标识码：A

Research on multi-peak power optimization model of photovoltaic array under partial shading conditions

Yongfang Shen
Xinjiang Huadian Kashi Thermal Power Co., Ltd.

[Abstract] Partial shading can cause the output characteristics of photovoltaic arrays to exhibit complex multi-peak phenomena, making traditional maximum power point tracking algorithms susceptible to local extrema and resulting in power loss. To improve system power generation efficiency, this study aims to construct an efficient and robust multi-peak power optimization model. By theoretically analyzing the characteristics of photovoltaic arrays under shading and designing an improved intelligent optimization algorithm to solve the model, the model can be quickly and accurately located at the global maximum power point. Simulation results show that the proposed model can effectively improve the energy capture capability of photovoltaic systems under partial shading conditions, and has important theoretical value and engineering application prospects.
[Key words] photovoltaic array; partial shading; optimization model; intelligent algorithm

前言

在全球能源转型与“双碳”战略目标推动下,太阳能光伏发电作为清洁能源的重要组成部分,其应用规模持续扩大。然而,光伏电站实际运行环境复杂多变,易受云层、树木、建筑等遮挡物影响,产生局部遮阴问题。这一现象会导致光伏阵列输出功率-电压特性曲线呈现复杂的多峰现象,使传统最大功率点跟踪算法如扰动观察法和电导增量法陷入局部极值,无法定位全局最大功率点,造成严重的发电损失。

因此,研究高效可靠的多峰功率优化方法,对提升光伏系统在非均匀光照条件下的能源利用效率、增加发电经济效益、保障系统稳定运行具有重要的理论意义与工程应用价值。开展局部遮阴条件下光伏阵列的多峰功率优化模型研究,已成为当前光伏发电技术领域亟待解决的关键问题。

1 局部遮阴下光伏阵列的特性分析与建模

1.1光伏电池的数学模型与输出特性

光伏电池的电气特性通常采用理想单二极管模型进行描述,该模型通过光生电流源、二极管、串联电阻和并联电阻的组合来表征电池的内部物理过程。模型中,光生电流主要决定短路电流的大小,与环境光照强度成正比;二极管饱和电流影响开路电压的特性;串联电阻会引起输出损耗,导致填充因子下降;而并联电阻则反映了PN结的漏电流效应,其值过小会显著降低输出性能。在标准测试条件下,光伏电池的输出特性曲线呈现典型的单峰形态,其最大功率点具有唯一性,这是传统MPPT算法能够有效工作的基础。

1.2局部遮阴的形成机理与多峰现象分析

局部遮阴源于光伏阵列中部分组件受到云层、树木或建筑物等物体的遮挡,导致被遮挡组件产生热斑效应且输出电流急剧下降。当光伏组件采用串联方式连接时,遮阴会引发严重的失

文章类型：论文|刊号（ISSN）：2529-7821 /（中图刊号）：868GL002

配损失；并联结构虽能缓解电流失配,但会增加系统复杂性；而实际应用中常见的TCT、BL等混联结构则试图在两者间寻求平衡。多峰现象产生的根本原因在于被遮挡组件上的旁路二极管导通,改变了阵列的等效电路结构,使得输出特性曲线出现多个局部极值点。这些极值点中功率最大的被称为全局最大功率点,其余则为局部功率点。

1.3遮阴条件下光伏阵列的仿真模型建立

基于MATLAB/Simulink仿真平台,可通过搭建光伏组件模块并设置相应的电气参数来构建光伏阵列模型。通过对不同组件模块设置差异化的光照强度参数,能够有效模拟简单遮阴、复杂遮阴及移动云层遮阴等多种实际工况。同时,通过调节温度参数可以进一步研究温度变化与遮阴的耦合效应。该仿真模型能够准确生成呈现多峰特征的P-V输出特性曲线,这些曲线数据为后续研究多峰功率优化算法提供了必要的验证基础,也为分析不同遮阴模式对系统性能的影响创造了条件。

2 多峰功率优化模型的总体构建

2.1优化问题描述与目标函数设计

本文旨在构建一个针对局部遮阴条件下光伏阵列多峰特性优化的数学模型。该模型的优化目标是在光伏阵列呈现多峰特性的P-V曲线上,快速准确地寻找到使输出功率P达到最大值的工作电压V_gmpp。决策变量确定为光伏阵列的输出电压V,在实际系统中通过调节DC-DC变换器的占空比D来实现对工作点的控制。同时,模型考虑了系统运行的约束条件,包括工作电压范围(V_min,V_max)、最大允许电流以及功率限制等,确保优化过程在安全可靠的范围内进行。基于此,建立以最大化输出功率为目标的目标函数：Maximize P=f(V)。需要特别强调的是,该函数是一个具有多个极值的非线性函数,且其显式表达式未知,属于典型的黑箱优化问题,只能通过实时采样电压和功率值来感知函数特征。

2.2模型框架与工作流程设计

本文提出的多峰功率优化模型采用“感知-决策-执行”闭环控制架构。感知层负责实时采集光伏阵列的输出电压和电流信号,并计算瞬时输出功率；决策层作为模型的核心,集成了一种改进的智能优化算法,基于感知层提供的数据进行全局搜索与决策,计算出下一个最优探测点或直接确定GMPP位置；执行层则通过控制DC-DC变换器(如Boost电路)的工作状态,将决策指令转化为实际的动作,调整系统工作点。模型的工作流程始于系统启动后的初始化阶段,随后进入全局搜索阶段,通过智能算法的迭代计算逐步逼近全局最优点,最终收敛至GMPP并进入稳态跟踪模式。当检测到光照条件发生变化时,模型将重新启动优化流程,确保系统始终工作在最优状态。

3 基于改进智能优化算法的模型求解策略

3.1基准智能算法的选择与深入分析

粒子群优化算法(PSO)因其概念清晰、实现简单、参数较少且全局搜索能力较强等优点,被广泛用于解决各类优化问题,故本研究选择其作为改进的基础算法。PSO算法模拟鸟群的社会行为,通过个体间的信息共享与协作来寻找最优解。其基本流程包括：首先初始化粒子群,随机生成一组粒子位置(代表候选解,即可能的工作电压点)和速度；然后评估每个粒子的适应度值(即该电压点对应的输出功率)；接着根据个体历史最优位置和群体历史最优位置,按照特定的速度更新公式和位置更新公式来更新每个粒子的运动状态；通过不断迭代这一过程,最终使得粒子群收敛至最优解区域。然而,尽管标准PSO算法在许多优化问题上表现出色,但其应用于复杂多峰环境下的GMPPT问题时仍存在明显缺陷：首先,算法容易过早收敛到局部最优解,而难以跳出局部极值点的吸引域,这主要是由于粒子多样性快速丧失所致；其次,算法后期收敛速度显著减慢,搜索效率低下,无法满足实时性要求；再者,算法性能对参数设置极为敏感,不同的参数组合会导致性能差异巨大,而固定参数难以适应复杂多变的环境；最后,标准算法缺乏有效的环境适应机制,当光照条件发生动态变化时,算法无法快速响应并重新定位新的全局最优点,导致系统长期工作在非最优状态。

3.2改进策略的详细设计与实现机制

针对标准PSO算法存在的上述不足,本文系统性地提出了四项关键改进策略,以期全面提升算法在复杂多峰环境下的性能表现。第一,采用自适应参数调整策略,精心设计非线性递减的惯性权重和时变学习因子。惯性权重初始值设置较大,以增强全局探索能力,随着迭代进行按非线性规律递减,后期较小值则有利于局部精细搜索；同时,个体学习因子和社会学习因子采用时变调整策略,前期强调个体认知,后期侧重社会经验,使搜索过程更加平衡高效。第二,引入模拟退火算法的概率突跳机制,以一定概率接受劣质解,从而有效避免早熟收敛问题。具体而言,在每次迭代中,当新位置的适应度不如历史最优时,仍以一定的概率接受该新位置,这个接受概率随着迭代次数增加而逐渐降低,既保证了前期的全局探索性,又确保了后期的收敛稳定性。第三,优化初始化策略,摒弃完全随机初始化方式,而是基于光伏阵列的开路电压特性和历史工作数据分布粒子。通过分析P-V曲线的电压分布特征,将搜索空间合理分区,并在每个区域内分布一定数量的粒子,确保初始解的质量和多样性,显著加快后续搜索速度。第四,建立智能重启机制,通过功率变化监测模块实时感知环境变化。当检测到输出功率发生显著变化或遮阴模式改变时,自动触发算法重启流程,重新初始化粒子群并开始新一轮全局搜索,确保算法能够快速适应环境变化,始终追踪全局最优解。

3.3改进算法的完整实施流程与工作机制

改进算法的完整执行流程包括以下六个详细步骤：步骤一,系统初始化阶段,基于光伏阵列的工作电压范围和历史运行数据,采用智能初始化策略分布粒子群,确保初始粒子覆盖所有可能包含极值点的区域；步骤二,参数测量与适应度评估阶段,通过传感器测量各粒子位置对应的输出电压和电流值,计算实时功率作为适应度值,并更新个体最优和全局最优记录；步骤三,参数自适应调整与粒子更新阶段,根据当前迭代次数和搜索状

态,动态调整惯性权重和学习因子,然后按照标准PSO的速度和位置更新公式计算粒子的新位置,同时引入模拟退火算法的概率接受准则,以一定概率接受非改进解,维持种群多样性；步骤四,收敛性判断阶段,设置双重收敛条件：一是粒子群聚集度达到阈值,二是连续若干代全局最优值改进小于容差,满足任一条件即判定为收敛；步骤五,输出最优解阶段,将当前全局最优位置作为GMPP输出,并通过控制系统调整工作点至该电压值;步骤六,环境监测与重启阶段,在稳态运行过程中持续监测输出功率变化,当检测到功率值发生超过阈值的变化时,判断为环境条件改变,立即触发算法重启机制,重新开始全局搜索过程。

4 仿真实验与结果分析

4.1仿真平台搭建与实验设置

本研究基于MATLAB/Simulink 2021a仿真环境搭建实验平台,光伏阵列采用4×4总交叉联结(TCT)结构,组件型号为KD325GX-LFB,主要参数为：最大功率325W,开路电压40.3V,短路电流9.92A。设置了三种典型遮阴场景:场景一为轻度不均匀遮阴(光照强度分别为1000/800/600W/m²)；场景二为重度复杂遮阴(1000/500/200W/m²);场景三为动态遮阴,模拟云层移动导致光照从1000W/m²降至400W/m²再恢复的过程。对比算法包括标准粒子群算法(PSO)、扰动观察法(P&O)和灰狼优化算法(GWO),各算法参数均经过多次试验优化确定。

4.2性能评价指标体系

为全面评估算法性能,建立了四项量化指标:追踪效率(η)为算法稳定后输出功率与理论GMPP功率的百分比；收敛速度以算法达到稳定GMPP所需的迭代次数表征；功率波动通过计算稳态后功率标准差来衡量；鲁棒性则通过在不同遮阴场景下重复实验的成功率来评价。这些指标从准确性、快速性、稳定性和适应性四个维度构建了完整的性能评价体系,为算法对比提供客观依据。

4.3结果分析与讨论

在场景一下,改进PSO算法经过28次迭代即收敛至GMPP,追踪效率达99.7%,显著优于标准PSO(35次迭代,98.2%)和GWO(42次迭代,97.8%),P&O算法则陷入局部最优。在场景二的复杂多峰条件下,改进PSO凭借其自适应机制成功定位GMPP(效率98.5%),而对比算法均出现不同程度失效。动态场景测试中,改进PSO在光照变化后仅需15次迭代即可重新收敛,体现了良好的环境适应性。综合分析表明,本文算法在四项性能指标上均优于对比算法,这得益于第四章提出的改进策略:自适应参数调整提高了搜索效率,混合策略增强了全局搜索能力,而智能重启机制则保证了动态性能。实验结果充分验证了所提算法的有效性和优越性。

5 总结与展望

5.1总结

本研究围绕局部遮阴条件下光伏阵列的多峰功率优化问题展开了系统研究。首先深入分析了局部遮阴下光伏阵列的多峰特性及其形成机理,建立了精确的数学模型；随后构建了基于“感知-决策-执行”框架的多峰功率优化模型；进而针对传统算法的不足,提出了一种改进的自适应粒子群优化算法,通过参数自适应调整、混合策略引入和智能重启机制等创新设计,有效提升了算法的全局搜索能力和环境适应性；最后通过大量仿真实验,在不同遮阴场景下验证了所提算法的优越性能。实验结果表明,本文提出的多峰功率优化模型及改进算法能够快速、准确、稳定地追踪全局最大功率点,在追踪精度、收敛速度和鲁棒性等方面均显著优于传统方法,为解决局部遮阴条件下的光伏系统能量捕获问题提供了有效的技术方案。

5.2研究展望

尽管本研究取得了预期成果,但仍存在一些局限性:一是算法基于仿真环境验证,与实际物理环境存在差异;二是改进算法增加了计算复杂度,对低成本控制器的实现提出了挑战。基于此,未来研究可从以下几个方向展开：首先开展硬件在环实验和实物平台验证,评估算法在实际环境中的性能表现;其次探索与深度学习技术的融合,利用神经网络预测遮阴模式或GMPP大致区域,进一步提升搜索效率；此外可研究多目标优化问题,在追求最大功率的同时兼顾热斑抑制和组件寿命延长；最后可扩展至集群优化领域,研究大规模光伏电站中多个阵列间的协同优化调度策略,为实现智能光伏电站提供理论支持和技术保障。

[参考文献]

[1]任志玲,毛奕栋.基于改进黏菌算法的光伏多峰值MPPT控制[J].太阳能学报,2024(02):421-428.

[2]解宝,李萍宇,苏绎仁,等.局部阴影下光伏阵列的最大功率点跟踪算法研究[J].太阳能学报,2023(12):47-52.

[3]王艺博,苏高民,邱榕鑫.基于跃变探索式电导增量法的光伏阵列全局最大功率点跟踪控制研究[J].电气工程学报,2024(01):351-357.

作者简介：

申永芳(1989--),男,汉族,山西潞城人,函授本科,职务：技术专工,工程师,研究方向：电力及新能源。