DOI:10.26974/j.cnki.XBGC.2026.03.003

基于PSO优化PID的光伏蓄电池充电方法

白月光[1], 李攀峰[2], 王 伟[1], 刘 青[3], 王 祯[1], 武 磊[1*]
(1.鄂尔多斯应用技术学院 信息工程学院,内蒙古 鄂尔多斯 017000;2.内蒙古电力(集团)有限责任公司 锡林郭勒供电分公司,内蒙古 锡林浩特 026000;3.鄂尔多斯生态环境职业学院 机电工程系,内蒙古 鄂尔多斯 017000)

摘 要:蓄电池作为常见的储能装置,在充电过程中存在效率低、能量损耗大等问题。基于粒子群优化(PSO)算法对PID控制器参数进行优化,并利用Simulink构建了基于光伏发电条件下的蓄电池充电仿真模型。通过仿真模拟,分别对传统充电法、PID控制法及PSO优化PID控制法进行对比分析。结果表明,PSO优化PID控制法较传统充电方法和PID控制法,充电时间明显缩短,进入恒流时间也显著减少,充电效率大幅提高。该方法有效提升了蓄电池充电效率,降低了能量损耗,具有较好的应用前景。

关键词:粒子群优化(PSO);PID控制器;蓄电池充电方法;Simulink仿真
中图分类号:TM912 **文献标志码:**A

随着“双碳”目标的稳步推进,以可再生能源为主体的分布式发电项目在发电总量中的占比日益提高[1]。由于太阳能和风能等可再生能源具有间歇性和不稳定性,以蓄电池为主的储能方式占比不断增加,尤其是光伏电站往往配备大容量蓄电池组作为储能元件[2]。然而,传统蓄电池充电方式多以恒流恒压直充或者简单容量控制为主[3],存在充电效率低、能量损耗大及安全性不足等问题。因此,亟须研究一种高效、节能的蓄电池充电方法。传统的PID(proportional-integral-derivative,PID)控制虽然可以在一定程度上改善蓄电池充电效率低等问题,但如何获得最佳PID参数是目前的研究热点。国内的研究人员正致力于将粒子群算法与先进控制策略[4]、能量管理系统[5]等相结合,以实现对蓄电池充电过程的精确控制和优化。随着物联网[6]、大数据[7]和云计算[8]等技术的不断发展,研究人员还在探索将粒子群算法与这些技术相结合,实现蓄电池充电的智能化与远程监控。王泰华等[9]为了提高低温下锂离子电池的充电性能,促进新能源汽车在低温地区的推广,建立了锂离子电池低温充电老化速率估计的BP神经网络模型,并引入粒子群优化算法对传统CC-CV充电策略进行优化。夏凌畅等[10]针对光伏发电最大功率追踪问题,提出一种基于改进粒子群优化(particle swarm optimization,PSO)算法的最大功率点追踪(MPPT)控制算法,确定了斩波电路参数范围,提高了MPPT系统稳定性。周德让等[11]为提高电池寿命预测精度,引进PSO算法,设计了一种锂离子电池剩余寿命的预测方法。

在国际上,PSO算法在蓄电池充电领域同样得到了广泛的研究,且起步较早。一些国际知名学者和机构致力于PSO算法在蓄电池充电过程中的优化研究,通过大量实验和仿真分析,验证了PSO算法在优化蓄电池充电过程中的有效性和优越性。Hoque等[12]提出了一种锂离子电池充放电控制方法,利用PSO算法对PI控制器参数进行优化,实现了电池储能系统的充电均衡控制。Dagal等[13]为太阳能光伏系统开发了一种电池充电模型。Ebrahimzade等[14]将人工神经网络(ANN)与PSO算法相结合,建立模型预测废旧锂离子电池中钴的浸出效率。通过统计阈值验证了PSO-ANN模型的性能,并与常见人工神经网络技术进行了比较。

通过对国内外相关文献的分析可知,传统蓄电

收稿日期:2024-11-26
基金项目:鄂尔多斯应用技术学院人才引进启动金;鄂尔多斯应用技术学院校级科研项目(KYYB2023016)
作者简介:白月光(1997—),男,助教,硕士,主要从事智能算法,电力设备故障监测研究(byg1126@163.com)。
* **通信作者:**武磊(1984—),男,高级工程师,硕士,主要从事新型电力系统并网研究(124753180@qq.com)。
引用格式:白月光,李攀峰,王伟,等.基于PSO优化PID的光伏蓄电池充电方法[J].西北工程技术学报(中英文),2026,25(3):212-217,226.

池充电方法与基于 PID 控制的充电方法已不适用于当前大规模蓄电池组的充电控制。因此,本文基于 PSO 算法对 PID 控制器进行优化,利用 Simulink 搭建光伏条件下的蓄电池充电模型,分别对传统充电法、PID 控制器充电法以及 PSO 优化 PID 控制器充电法进行仿真研究。旨在不影响电池寿命的前提下探讨如何实现快速充电,为未来在电动汽车、智能电网等领域广泛应用蓄电池储能技术提供理论依据和技术支持,对推动可再生能源普及和能源结构转型具有重要的实践意义。

1　蓄电池充电方法

按电解液类型划分,常见蓄电池包括铅酸蓄电池、镍镉蓄电池、镍氢蓄电池及锂离子蓄电池[15]。本文以锂离子蓄电池为研究对象。

1.1　传统充电法

传统充电方法分为恒流充电、恒压充电及分段式充电[16]3 种。恒流充电法在蓄电池充电初期可获得较快的充电速度[17],但是极化现象会降低充电效率。恒压充电法能保持充电过程中蓄电池电压稳定[18],但充电初期电流较大,导致蓄电池温度过高,影响其内部化学反应性能。分段式充电方法整合了恒流、恒压充电方式的优点,但是难以实现自动化控制。

1.2　基于PID控制器的充电方法

PID 控制方法由比例环节(P)、积分环节(I)及微分环节(D)3 个环节线性组合而成[19-21],其一般表达形式为

$$y(t)=k_{\mathrm{p}}e(t)+k_{\mathrm{i}}\int_0^t e(\tau)\mathrm{d}\tau+k_{\mathrm{d}}\frac{\mathrm{d}e(t)}{\mathrm{d}t}。\quad(1)$$

式中:$y(t)$为控制器输出;t 为时间;$e(t)$为误差;k_{p}、k_{i}、k_{d}分别为比例系数、积分系数和微分系数;τ 为积分变量。

在蓄电池充电控制中,常用 PID 控制电压、电流输出,因此 k_{p}、k_{i}、k_{d} 3 个参数的取值至关重要。在复杂系统中快速获取最优参数较为困难,若参数选取不当,可能导致系统不稳定或性能下降,故仅适用于有一定限制条件的控制方法[22]。

1.3　基于PSO算法优化PID控制器的充电方法

PSO 算法通过设置一群具有速度和位置的无质量粒子来模拟鸟群的捕食行为[23-24]。在可行空间内,每个粒子可以独立寻找极值,并根据当前个体极值与粒子群共享的最优解,按式(2)~式(7)调整自身的搜索速度和位置。

$$\boldsymbol{V}_i=(V_{i1},V_{i2},V_{i3},\cdots,V_{id}),\quad(2)$$

$$\boldsymbol{X}_i=(X_{i1},X_{i2},X_{i3},\cdots,X_{id}),\quad(3)$$

$$P_{\mathrm{best},i}=(p_{\mathrm{best},i1},p_{\mathrm{best},i2},p_{\mathrm{best},i3},\cdots,p_{\mathrm{best},id}),\quad(4)$$

$$G_{\mathrm{best}}=(g_{\mathrm{best},1},g_{\mathrm{best},2},g_{\mathrm{best},3},\cdots,g_{\mathrm{best},\,d}),\quad(5)$$

$$U_{t+1}=\omega U_t+c_1r_1(P_t-x_t)+c_2r_2(G_t-x_t),\quad(6)$$

$$x_{t+1}=x_t+U_{t+1}。\quad(7)$$

式中:$\boldsymbol{V}_i$为第 i 个粒子的速度向量;V_{ij}为第 i 个粒子在第 j 维的速度分量(j=1, 2,⋯, d),其中 d 为搜索空间维度;$\boldsymbol{X}_i$为第 i 个粒子的位置向量;X_{ij}为第 i 个粒子在第 j 维的位置分量;$P_{\mathrm{best},i}$为第 i 个粒子的个体历史最优位置;$p_{\mathrm{best},ij}$为第 i 个粒子在第 j 维的个体最优分量;G_{best}为全局最优位置;$g_{\mathrm{best},j}$为全局最优在第 j 维的分量;U_{t+1}为粒子在 t+1 时刻的新速度;U_t为粒子在 t 时刻的当前速度;ω 为惯性权重;c_1、c_2分别为认知学习因子和社会学习因子;r_1、r_2为[0,1]区间的随机数;P_t为个体最优位置;G_t为全局最优位置;x_{t+1}为粒子在 t+1 时刻的新位置;x_t为粒子在 t 时刻的当前位置。其中 ωU_t代表上一次速度大小和方向的影响,ω 较大有利于全局搜索最优解,ω 较小有利于局部搜索。

针对 PID 控制器参数优化问题,本文基于 PSO 算法结合时间乘绝对误差积分(ITAE)指标(公式(8))构建粒子适应度函数。PID 控制器中的 k_{p}、k_{i}、k_{d} 3 个参数作为 PSO 中互为独立的粒子维度,为了确保获得最优参数,在 PSO 与 PID 中引入适当的惩罚系数,确保每个粒子都与特定的控制系统配置相对应。

$$J=\int_0^{\infty}t\left|e(t)\right|\mathrm{d}t。\quad(8)$$

式中:J 为 ITAE 性能指标值。

在 PSO 优化 PID 控制器过程中,实时获取当前模型的性能指标作为粒子适应度值,每迭代一次,粒子根据适应度进行更新,并通过迭代逐渐逼近最优解。PSO 优化 PID 控制器程序流程如图 1 所示。

2　蓄电池充电方法仿真

根据锂电池充电特性,本文采用预充与分段式充电相结合的仿真方案,具体可分为预充阶段、恒流充电阶段和恒压充电阶段。充电初期,蓄电池进入预充阶段,对完全放电的电池单元进行恢复性充电;预充结束后进入恒流充电阶段,蓄电池的充电电压稳定上升;当满足恒压充电条件时,蓄电池就会切换到恒压充电阶段。恒流恒压切换 Simulink 仿真如图 2 所示,光伏发电条件下的蓄电池充电模型

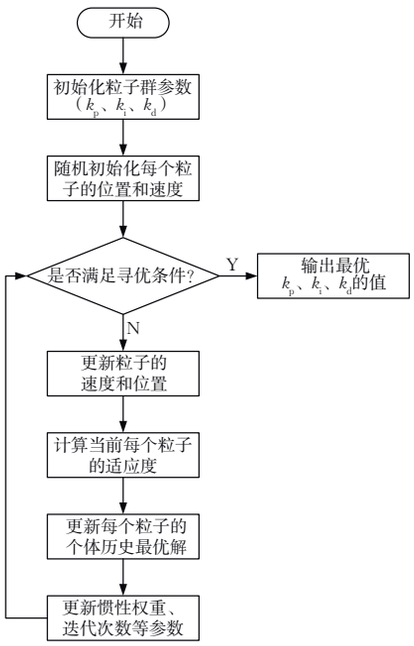


图1 PSO优化PID控制流程图

Fig. 1 Flowchart of PSO-optimized PID control

Simulink 仿真如图 3 所示。PV 模块参数设置如图 4 所示,蓄电池参数设置如图 5 所示。

3 仿真结果分析

ITAE 性能指标变化如图 6 所示,PID 参数变化曲线如图 7 所示。由图 6~图 7 可知,迭代至第 4 次时指标值基本稳定,确定了最优 PID 参数组合为 k_p=20.53、k_i=5.15、k_d=0.023,此时对应的 ITAE 性能指标值为 0.004。据此设定了 3 组试验:第 1 组不设置任何控制;第 2 组采用 PID 控制的恒流恒压的充电方法;第 3 组在第 2 组的基础上加入 PSO 优化算法对 PID 进行优化。为了方便对比,将 3 组试验的结果分为电池参数和电路参数两类,运行主电路给蓄电池充电,分析不同控制器作用下蓄电池与充电电路的工作状态。

在传统充电方法下,无控制时给蓄电池充电会产生较大波动(图 8),充电电流为 8 A,电压持续升高。充电初期效率较高,但随着充电的持续,会产生与恒流充电相同的极化现象,影响充电效率。传统充电方法电路仿真如图 9 所示。

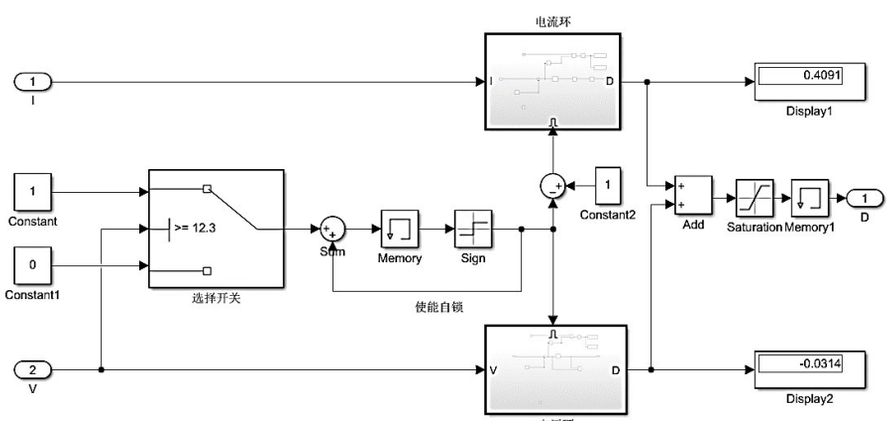


图2 恒流恒压切换Simulink仿真图

Fig. 2 Simulink simulation of constant-current and constant-voltage switching

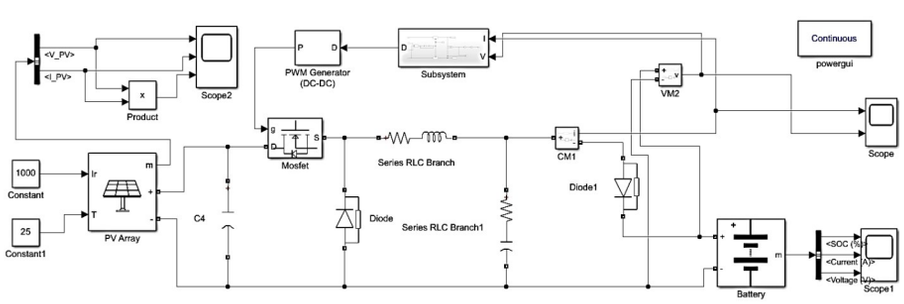


图3 光伏发电条件下的蓄电池充电模型Simulink仿真图

Fig. 3 Simulink simulation of battery charging model under photovoltaic power generation conditions

当采用 PID 控制后,其可以对电流和电压进行控制。对比图 10 与图 11 可知,充电初期的波动在 PID 的控制下完全消除掉,且实现了恒流充电与恒压充电的自动切换,避免了无法控制时产生的极化现象。但 PID 控制下预充电时间较长,且达到恒流充电状态的时间亦较长。

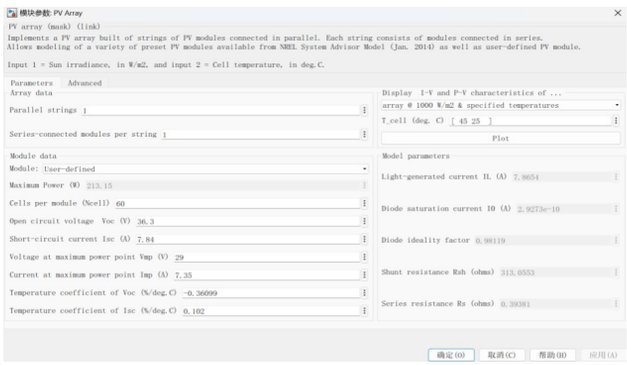


图4　PV模块参数设置

Fig. 4　Parameter settings for the PV module

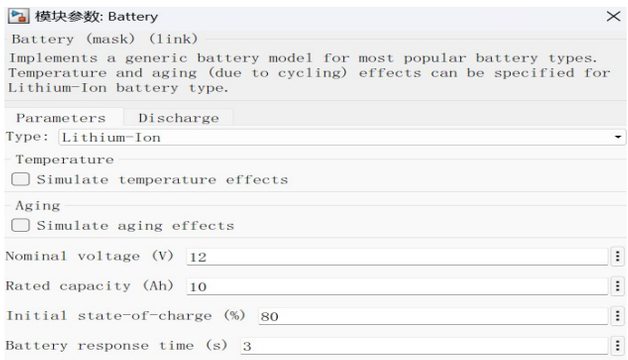


图5　蓄电池参数设置

Fig. 5　Battery parameter settings

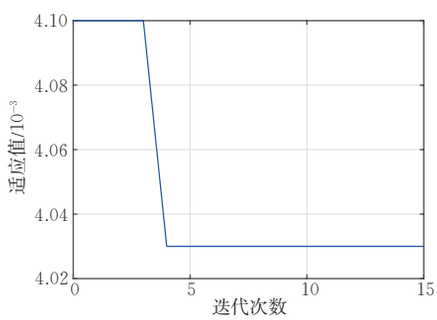


图6　ITAE性能指标变化图

Fig. 6　Variation in the ITAE performance index

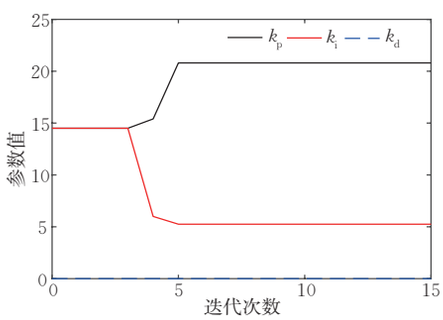


图7　PID参数变化曲线

Fig. 7　Variations in the PID parameters

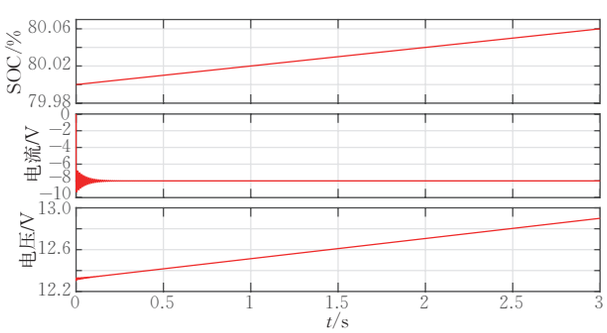


图8　传统充电方法蓄电池仿真结果图

Fig. 8　Battery simulation results obtained using the conventional charging method

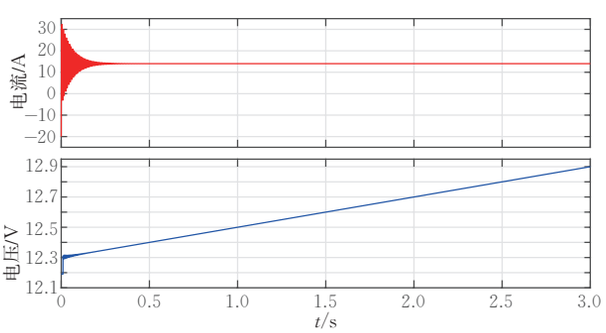


图9　传统充电方法电路仿真结果图

Fig. 9　Circuit simulation results obtained using the conventional charging method

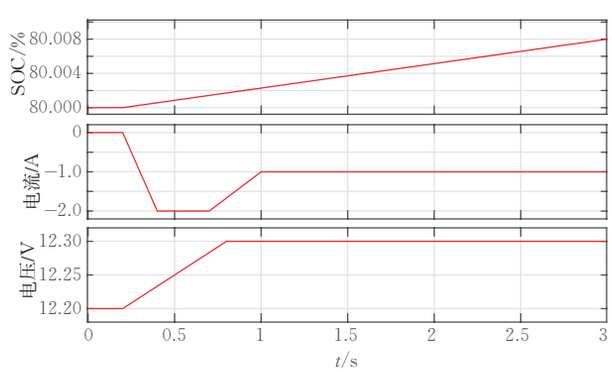


图10　PID控制时电池参数波形

Fig. 10　Battery parameter waveforms under PID control

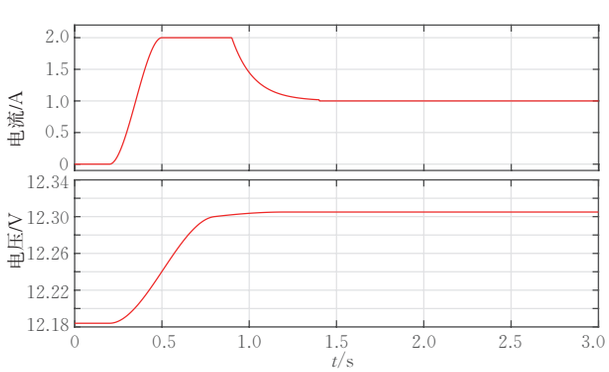


图11　PID控制时充电电路参数波形

Fig. 11　Charging circuit parameter waveforms under PID control

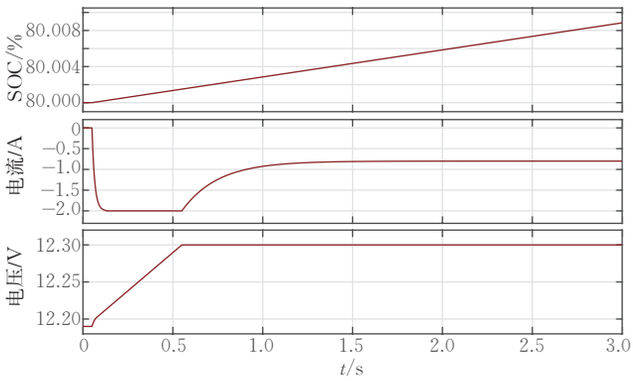


图12 PSO优化PID控制时电池参数波形

Fig. 12 Battery parameter waveforms under PSO-optimized PID control

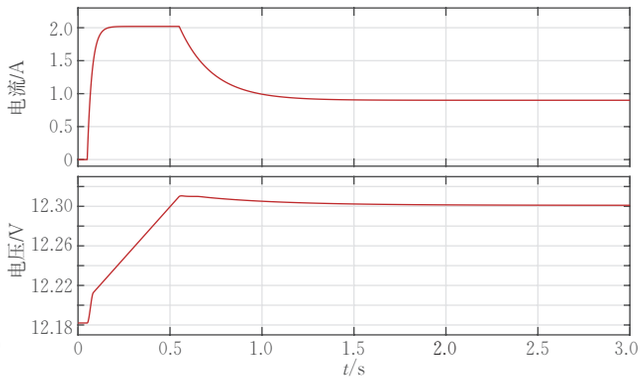


图13 PSO优化PID控制时充电电路参数波形

Fig. 13 Charging-circuit parameter waveforms under PSO-optimized PID control

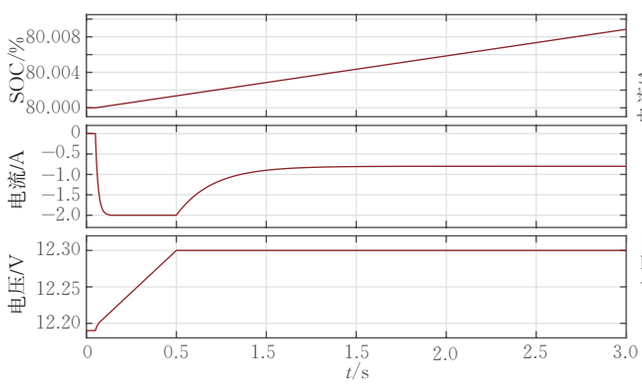


图14 PSO优化PI控制时电池参数波形

Fig. 14 Battery parameter waveforms under PSO-optimized PI control

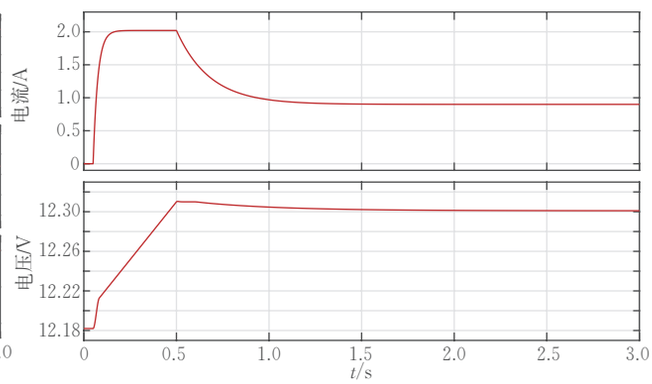


图15 PSO优化PI控制时充电电路参数波形

Fig. 15 Charging-circuit parameter waveforms under PSO-optimized PI control

采用 PSO 算法对 PID 的参数进行优化,结果如图 12 所示。对比图 10 和图 12 可知,预充电时间及进入恒流充电时间大幅缩短,充电效率亦得到提升。在重复仿真试验中观察到,k_d 值在优化过程中不断趋近于 0。对比图 11 和图 13 可知,PSO 优化 PID 时,电路电压存在超调量。这表明,在蓄电池充电控制中,微分控制(k_d)对系统性能影响不显著,甚至可能引入噪声或稳定性问题。因此,优化算法倾向于将 k_d 值减小至接近 0,以简化控制系统并提高稳定性,如图 14~图 15 所示。对比图 12 和图 14 可知,PSO 优化 PID 系统稳定时间为 1.75 s,PSO 优化 PI 系统稳定时间为 1.25 s,说明 k_d=0 时,即 PSO 优化 PI 控制器充电方法效果更佳。

4 结论

针对传统充电方法效率低、能量损耗大等问题,本文分析了 PID 控制蓄电池充电参数,提出了一种基于 PSO-PID 的光伏蓄电池充电方法,并利用 MATLAB/Simulink 进行仿真,得出以下结论。

(1)基于 PSO-PID 的光伏蓄电池充电控制方法可以精确控制充电电压和电流。对比 PID 控制和 PSO-PID 控制的仿真波形发现,PSO-PID 控制充电曲线具有较小的超调量。

(2)微分控制(k_d)在蓄电池充电控制中的影响不显著,减少微分控制作用可提高系统的稳定性和可靠性。当 k_d=0 时,PSO 优化 PI 控制器充电方法效果更佳。

(3)通过 PSO 算法对 PID 参数进行全局寻优,快速获得最优的 PID 参数组合,有效提高了蓄电池充电控制的精度和稳定性,为蓄电池高效、节能充电提供一定的理论基础。

参考文献:

[1] 王璐. 清洁电力发展对经济增长与碳排放耦合协调的影响及其政策研究[D]. 成都: 西南财经大学, 2023.

[2] 张琳, 谢洪途, 赵路路, 等. 混合能源直流微电网能源优化管控策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(3): 141-151.

[3] 赵晨龙. 基于改进量子粒子群算法电动汽车充放电优化调度[J]. 电气开关, 2023, 61(4): 59-62.

[4] 邱燕. 光伏发电系统蓄电池充电分析及其控制设计[J]. 微电机, 2023, 56(9): 41-43.
[5] 潘冯超, 刘勤明, 叶春明, 等. 基于改进PSO算法的分布式能源供应链配置研究[J]. 上海理工大学学报, 2021, 43(4): 393-399.
[6] 冷令, 吴伟斌, 张伟杰, 等. 基于改进PSO算法的多温室物联网群控终端变量协调控制研究[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(1): 179-185.
[7] 李清. 基于改进PSO-PFCM聚类算法的电力大数据异常检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(18): 161-166.
[8] 汪婷, 邵鹏, 李光泉, 等. 改进的粒子群优化算法在云计算任务调度中的应用[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(29): 12594-12603.
[9] 王泰华, 张书杰, 陈金干. 基于BP-PSO算法的锂电池低温充电策略优化[J]. 储能科学与技术, 2020, 9(6): 1940-1947.
[10] 夏凌畅, 郑巍. 基于改进PSO算法的光伏发电最大功率追踪研究[J]. 机电信息, 2023(24): 23-25, 29.
[11] 周德让. 基于PSO算法的锂离子电池剩余寿命预测方法[J]. 信息记录材料, 2022, 23(6): 66-69.
[12] Hoque M M, Hannan M A, Mohamed A. Charging and discharging model of lithium-ion battery for charge equalization control using particle swarm optimization algorithm [J]. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 2016, 8(6): 065701.
[13] Dagal I, Akin B, Akboy E. MPPT mechanism based on novel hybrid particle swarm optimization and salp swarm optimization algorithm for battery charging through Simulink [J]. Scientific Reports, 2022, 12: 2664.
[14] Ebrahimzade H, Khayati G R, Schaffie M. PSO-ANN-based prediction of cobalt leaching rate from waste lithium-ion batteries [J]. Journal of Material Cycles and Waste Management, 2020, 22 (1): 228-239.
[15] 王德玉, 秘锡鸿, 傅超伟, 等. 基于变结构补偿网络的WPT恒流/恒压充电系统[J]. 电工电能新技术, 2022, 41(4): 9-15.
[16] 雷旭, 陈潇阳, 于明加, 等. 基于SOC自适应分阶的动力锂电池两步优化快速充电策略[J]. 中国公路学报, 2022, 35(8): 65-78.
[17] 张宏济. 基于多状态联合估计模型的锂电池多段恒流充电策略研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2019.
[18] 乔亮波, 张晓虎, 孙现众, 等. 电池-超级电容器混合储能系统研究进展[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(1): 98-106.
[19] 肖静, 吴宁, 冯玉斌, 等. 电动汽车无线电能传输系统中Buck电路非理想模型及其效率优化[J]. 电器与能效管理技术, 2020(4): 77-82.
[20] 靳凯, 肖平, 吕傲宁. 基于改进PSO-PID的无刷直流电机矢量控制[J]. 台州学院学报, 2024, 46(6): 56-62, 86.
[21] 兰江, 周少平. 基于模糊PID的新能源发电站设备自动控制系统[J]. 自动化与仪表, 2024, 39(11): 39-42, 46.
[22] 朱恒, 李荣冰, 何梓君, 等. 基于PSO-BP的嵌入式大气数据系统算法研究[J]. 电子测量技术, 2024, 47(22): 67-75.
[23] 高宁, 张安琪, 梅鹤波, 等. 基于PSO-SVR算法的土壤含水率预测模型构建[J]. 中国农机化学报, 2025, 46(5): 227-234.
[24] 吕嘉琦. 基于PI控制器的Buck型DC-DC变换器Simulink建模与仿真[J]. 科学技术创新, 2023(16): 15-20.
[25] 韦荣阳, 毛阆, 高晗, 等. 基于TWP-SVR的锂离子电池健康状态估计[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(8): 2585-2599.
[26] 刘纪周, 李述辉, 张景璋. 基于BUCK电路的宽电压输入焊接电源[J]. 电焊机, 2019, 49(1): 54-58.

(下转第226页)

Applicability of CMA-WSP Model Products to Wind Energy Forecasting in Ningxia

GOU Xiaohui[1,2,3], *YAN Xiaoyu*[3*], *WU Wanli*[3], *JIANG Ting*[3]
(1.CMA Key Laboratory for Meteorological Disaster Monitoring, Early Warning, and Risk Management of Characteristic Agriculture in Arid Regions, Yinchuan 750000, China; 2. Ningxia Key Laboratory of Meteorological Disaster Prevention and Mitigation, Yinchuan 750000, China; 3.Ningxia Meteorological Service Center, Yinchuan 750000, China)

Abstract: To evaluate the applicability of the CMA-WSP wind speed forecast product in Ningxia, CMA-WSP wind speed forecasts for 2022 and concurrent hourly observations from 25 surface meteorological stations in Ningxia were used. Statistical methods were applied to analyze the spatial and temporal differences between the forecasts and observations and to evaluate forecast performance. The results showed that, in terms of spatial distribution, CMA-WSP overestimated both the mean wind speed and its standard deviation at all stations except Liupanshan Station. The root mean square error was the lowest at Pingluo station and the highest at Shizuishan Station. At the monthly scale, the largest biases in mean wind speed occurred in March and April, whereas the smallest errors and best forecast performance occurred in November and December. In terms of diurnal variation, the largest biases in mean wind speed occurred at approximately 20:00-21:00 and 1:00, whereas the smallest bias occurred at around 11:00. The correlations between the forecast and observed wind speeds were strongest for WNW and NW winds. Overall, the forecast and observed frequency distributions of wind direction and wind speed were relatively consistent. However, the observed frequencies of calm winds and wind speeds below 2m/s were notably higher than the corresponding forecast frequencies.

Keywords: wind speed; numerical model; forecast verification; Ningxia

(责任编辑 王德平)

(上接第217页)

A Battery Charging Method for Photovoltaic Systems Based on PSO-Optimized PID Control

BAI Yueguang[1], *LI Panfeng*[2], *WANG Wei*[1], *LIU Qing*[3], *WANG Zhen*[1], *WU Lei*[1*]
(1.School of Information Engineering, Ordos Institute of Technology, Ordos 017000, China;
2. Xilin Gol Power Supply Branch, Inner Mongolia Electric Power (Group) Co., Ltd., Xilinhot 026000, China;
3. Department of Mechanical and Electrical Engineering,
Ordos Vocational College of Eco-Environment, Ordos 017000, China)

Abstract: As a commonly used energy storage device, batteries suffer from low charging efficiency and substantial energy losses. In this study, the parameters of a proportional-integral-derivative (PID) controller were optimized using particle swarm optimization (PSO), and a Simulink model was developed to simulate battery charging under photovoltaic power generation conditions. Simulations were conducted to compare the conventional charging method, PID control method, and PSO-optimized PID control method. The results showed that, compared with the conventional charging and PID control methods, the PSO-optimized PID control method significantly shortened the charging time and the time required to reach the constant-current charging stage, thereby substantially improving charging efficiency. This method effectively improves battery charging efficiency, reduces energy losses, and has promising application prospects.

Keywords: particle swarm optimization (PSO); proportional-integral-derivative (PID) controller; battery charging method; Simulink simulation

(责任编辑 王德平)