

基于改进电导增量法的变步长MPPT算法

郭金智¹, 潘子峻², 袁绍军¹, 孙荣富³, 丁然³, 徐海翔³, 王靖然³, 王隆扬²

(1. 国网冀北电力有限公司承德供电公司, 河北 承德 067000;

2. 武汉理工大学机电工程学院, 湖北 武汉 430070;

3. 国网冀北电力有限公司, 北京 100053)

摘要:光伏发电系统的最大功率点跟踪(MPPT)技术对于保证光伏发电系统的输出效率和系统的稳定性有重要意义。首先提出一种基于改进电导增量法的MPPT控制算法,通过引入与电流相关的系数对步长变化量进行修正,以减小电流变化对光伏电池输出特性的影响。然后基于逼近理想解排序(TOPSIS)决策法,构建了6项评价指标,对3种不同的系数选取方案进行综合评估比较,从而确定最优的变步长系数。MPPT模型的仿真与TOPSIS评估计算表明,用 $1/I^2$ 作为修正系数对 dP/dU 值进行修正,代替固定步长参数,得到的MPPT控制算法有着更好的综合跟踪性能。

关键词:光伏发电;最大功率点跟踪;电导增量法;变步长;逼近理想解排序决策法

中图分类号:TM615 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed23385

Variable Step Size MPPT Algorithm Based on Improved Conductance Increment Method

GUO Jinzhi¹, PAN Zijun², YUAN Shaojun¹, SUN Rongfu³, DING Ran³,

XU Haixiang³, WANG Jingran³, WANG Longyang²

(1. State Grid Jibei Electric Power Company Chengde Power Supply Company, Chengde 067000,

Hebei, China; 2. School of Mechanical and Electronic Engineering, Wuhan University

of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China; 3. State Grid Jibei

Electric Power Company, Beijing 100053, China)

Abstract: The maximum power point tracking (MPPT) technology of the photovoltaic power generation system is the great significance to ensure the output efficiency of the photovoltaic power generation system and the stability of the system. An MPPT control algorithm was proposed based on an improved conductance increment method, which modified the step change by a coefficient related to the current to decrease the influence of the current change on the output characteristics of the photovoltaic cell. Then, based on the technique for order preference by similarity to an ideal solution (TOPSIS) method, six evaluation indicators were constructed to evaluate three different coefficient schemes, and then determined the optimal variable step size coefficient. The simulation of the MPPT model and the TOPSIS calculation show that by using $1/I^2$ as the correction coefficient to correct the dP/dU instead of the fixed step size parameter, the obtained MPPT control algorithm has integrated tracking performance.

Key words: photovoltaic power generation; maximum power point tracking (MPPT); conductance increment method; variable step size; technique for order preference by similarity to an ideal solution (TOPSIS) method

近年来,以光伏发电为代表的新能源技术发展迅速,太阳能照明设备、太阳能汽车、大型光伏发电站等应用越来越多地走进大众视野。由于光伏发电输出功率受气象条件影响较大,如何实现它的最大功率点跟踪(MPPT)已成为光伏发电领域的关键问题。

传统的MPPT方法由于步长恒定等原因不能兼顾较快的跟踪速度和较小的稳态波动的要求,有许多研究对其进行改进。文献[1]通过人群搜索算法实现了变步长扰动测量法的设计。文献[2]将恒压控制与扰动观测结合,先通过恒压控制确定最大功率点大致的位置,再使用较小的步长

作者简介:郭金智(1979—),男,硕士研究生,高级工程师,Email:royalyuan@163.com

通讯作者:潘子峻(1997—),男,硕士研究生,Email:panzijun1186772136@foxmail.com

进行扰动观测。文献[3-4]提出一种基于近似梯度法的变步长方法,即 $|dP/dU|$ (功率对电压导数的绝对值)为参数进行变步长。文献[5]对比了近年来的一些改进算法,分析了多种变步长方法,指出某些阶跃性大幅扰动仍然存在跟踪不及时的情况。

由于目前变步长电导增量法存在步长大小受光照强度等因素影响较大,从而降低跟踪速度等问题,本文对其中一种变步长因子 dP/dU 进一步优化,对其中的电流系数项进行了乘方等处理,并将几种优化算法的性能指标^[6]按TOPSIS决策法^[7]进行加权计算对比,结果显示本文提出的改进MPPT算法有着较好的综合跟踪性能。

1 现有方法的缺点分析

1.1 恒电压控制法

由光伏阵列的特性曲线可知,不同的光照强度、温度等条件下的最大功率点集中在某一电压值 U_m 附近。恒电压控制法通过控制光伏阵列输出电压,使其恒定为 U_m 来保证输出功率。这种控制算法简单直接,但是它忽略了在温度和光照强度的影响下产生的偏移问题,并不是真正意义上的功率跟踪。

1.2 扰动观测法

扰动观测法是一种比较常用的算法。控制器持续给光伏阵列的输出电压一个指定方向的扰动,将功率的变化进行比较,若功率变化 $\Delta P > 0$,则接着往该方向扰动,否则往相反的方向扰动。这种方法能有效地进行跟踪,在实际跟踪过程中的稳态误差较小。但此方法也有较多缺陷:实际运行中,输出功率将在最大功率点左右扰动,从而造成能量的浪费。

1.3 电导增量法

电导增量法通过计算 dP/dU 的正负来判断当前工作点的位置,相比扰动法使用的 ΔP 和 ΔU 的正负关系,其功率跟踪更为准确,用导数判别电压移动方向,提高了判断的准确性^[8]。

与扰动法类似,电导增量法仍然要考虑步长选择问题,控制精度的提高(测量导数需要较小的步长)使其对传感器等硬件的要求也更高。

2 光伏最大功率与环境参数的关系

2.1 光伏电池的数学模型

在光伏发电的过程中,光伏电池将光能转

化为电能,在外电路中产生电流,产生的直流电压和电流经过变流器转换为交流量后并入电网。

光伏电池本质上相当于平面二极管,在理想的光照环境下,其工作原理可用单二极管等效电路来描述,如图1所示。

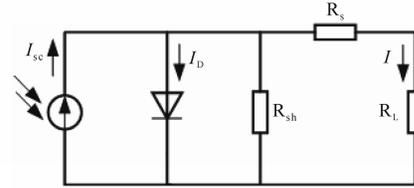


图1 光伏电池等效电路

Fig.1 Equivalent circuit of photovoltaic battery

图1中, I_{sc} 为光伏电池产生的电流, I_D 为通过PN结的总扩散电流,如下式所示:

$$I_D = I_{D0} (e^{\frac{qE}{AKT}} - 1) \quad (1)$$

其中

$$I_{D0} = SqN_cN_v \left[\frac{1}{N_A} \left(\frac{D_n}{\tau_n} \right)^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{N_D} \left(\frac{D_p}{\tau_p} \right)^{\frac{1}{2}} \right] e^{-\frac{E_g}{kT}} \quad (2)$$

式中: q 为电子的电荷量, $q=1.6 \times 10^{-19}$ C; K 为玻尔兹曼常数, $K=1.38 \times 10^{-23}$ J/K; A 为光伏电池常数因子; I_{D0} 为无光照条件下光伏电池饱和电流; S 为PN结面积; N_c, N_v 分别为导带和价带的有效态密度; N_A, N_D 分别为受主杂质和施主杂质浓度; D_n, D_p 分别为电子和空穴的扩散系数; τ_n, τ_p 分别为电子和空穴的少数寿命; E_g 为半导体材料的带隙。

根据图1,可得负载电流为

$$I = I_{sc} - I_{D0} \left[e^{\frac{q(U_{pv} + IR_s)}{AKT}} - 1 \right] - \frac{U_{pv} + IR_s}{R_{sh}} \quad (3)$$

式中: R_s 为串联电阻; R_{sh} 为旁漏电阻。

2.2 光伏电池的特性曲线

光伏电池的输出功率特性曲线为一条单峰曲线,峰值位置即为其最大功率点。现实环境中,光伏电池输出特性曲线在不同的光照和温度条件下如图2和图3所示。图2为光伏电池随温度变化的输出特性曲线,可以看出,随着温度的升高,最大功率 P_m 出现一定程度降低,最大功率点电压降低。图3为光伏电池随光照强度变化的输出特性曲线,可以看出,光照强度越强,最大功率 P_m 越大。

在光照强度或温度变化时,光伏电池的输出特性不一,最大功率点也随之变化。因此为提高发电效率,需要有着良好跟踪性能的MPPT算法。

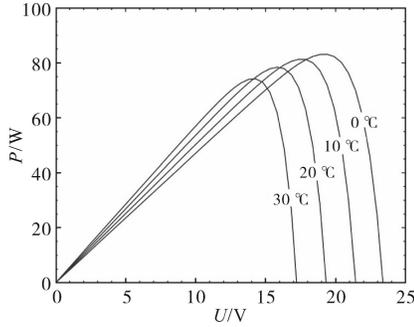


图2 温度条件变化下光伏P—U特性曲线

Fig.2 Photovoltaic P—U curves at different temperatures

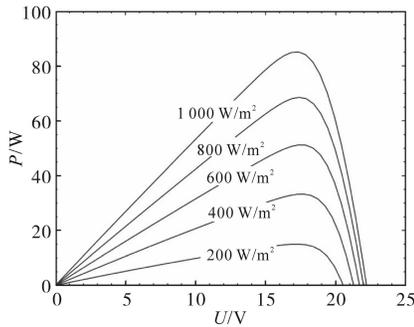


图3 光照强度变化下光伏P—U特性曲线

Fig.3 Photovoltaic P—U curves under different light intensity

3 基于改进电导增量法的变步长MPPT原理

3.1 算法的原理

光伏发电的MPPT系统的主要结构如图4所示,由光伏组件、MPPT控制器、Boost转换器^[9]和负载构成。

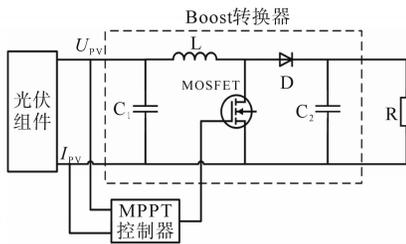


图4 MPPT系统结构图

Fig.4 MPPT system structure diagram

传统变步长法通常用光伏电池的功率与电压的比值(即 dP/dU)代替固定步长参数,并引用一个常数系数做系统修正^[10]。光伏电池的输出特性有着如下关系:

$$\begin{aligned} \frac{dP}{dU} &= \frac{d(UI)}{dU} \\ &= I + U \frac{dI}{dU} \end{aligned} \quad (4)$$

由式(4)可知,光伏电池的输出特性与电流 I 的有着明显关系。故本文在传统变步长方案基

础上,进一步引入与电流相关的系数,对 dP/dU 值进行修正,以降低电流变化对输出特性的影响。

3.2 改进的MPPT算法设置

设变步长系数为 $d(k)$,步长变化量为 δ ,则步长 $D(k)$ 可表示为

$$\begin{aligned} D(k) &= D(k-1) \pm d(k) \left| \frac{dP}{dU} \right| \\ &= D(k-1) \pm \delta \end{aligned} \quad (5)$$

变步长系数 $d(k)$ 选取有如下3种:

$$\begin{cases} d(k) = \frac{1}{I} \\ d(k) = \frac{1}{I^2} \\ d(k) = \frac{1}{\sqrt{I}} \end{cases} \quad (6)$$

针对仿真结果,采用TOPSIS法构建评价指标,通过与理想化目标的接近程度对3种方案进行相对优劣排序,从而评估并选取最合适的 $d(k)$ 。

本文的MPPT算法流程图如图5所示。

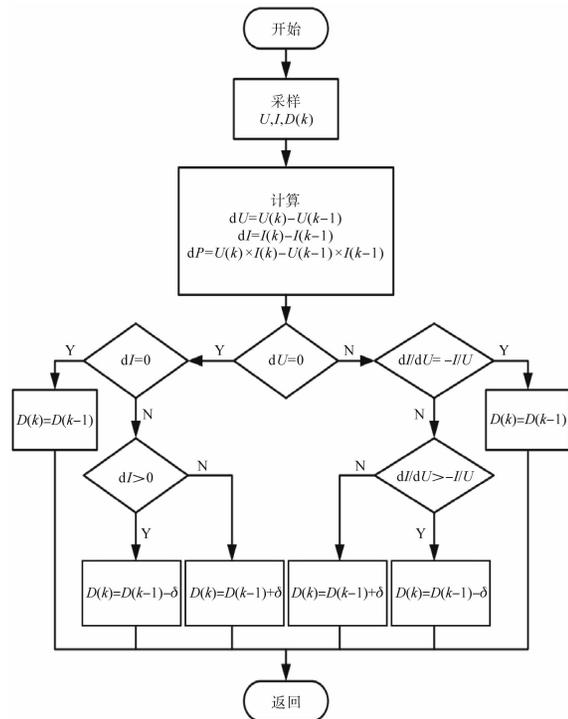


图5 改进变步长MPPT算法流程图

Fig.5 Flow chart of improved variable step size MPPT

3.3 仿真分析

施加如图6所示的光照强度和温度条件,1.5 s时光照强度降低,3 s时温度降低,4.5 s时光照强度和温度同时上升。观察光照、温度条件变化的情况下,电压、功率曲线的响应规律。

针对3种变步长系数选取方案,本文建立的

MPPT模型的运行结果如图7~图9所示。

由图7可以看出,在1.5 s时光照强度降低,电压和功率曲线随之明显降低;在3 s时温度降低,电压和功率曲线略微上升;在4.5 s时光照强度和温度升高,电压和功率曲线明显上升。

由图7~图9,可以初步看出, $d(k)=1/I$ 曲线在稳定后波动的幅度明显较大, $d(k)=1/I^2$ 与 $d(k)=1/\sqrt{I}$ 曲线总体较为接近,但 $d(k)=1/I^2$ 曲线在光照、温度条件变化的情况下达到稳定后波动更加平整,有着较好的跟踪效果。

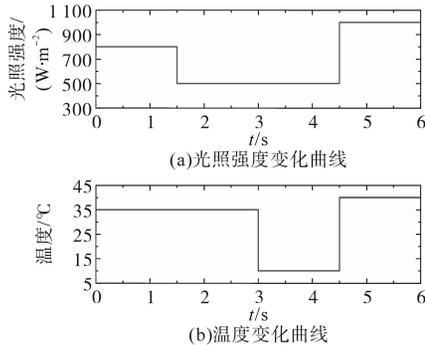


图6 光照温度变化曲线

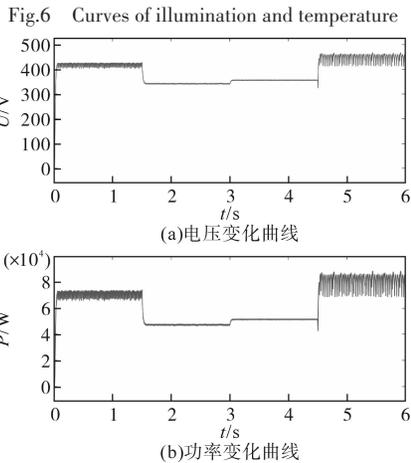


图7 $d(k)=1/I$ 下输出变化曲线

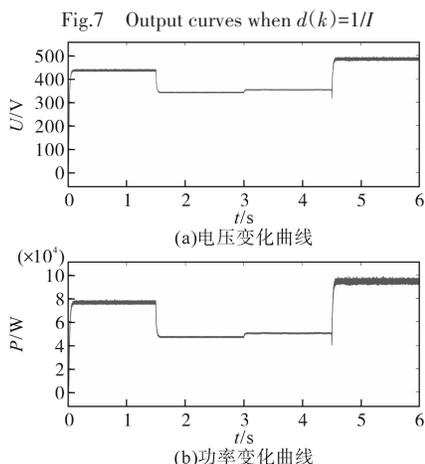


图8 $d(k)=1/I^2$ 下输出变化曲线

Fig.8 Output curves when $d(k)=1/I^2$

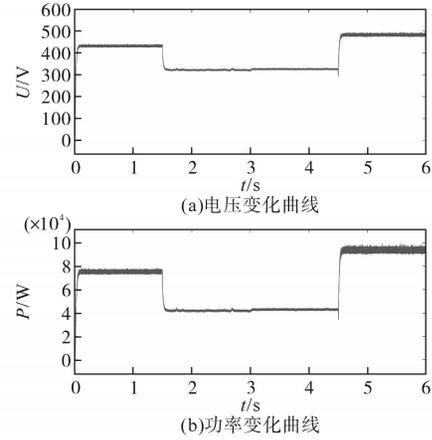


图9 $d(k)=1/\sqrt{I}$ 下变化曲线

Fig.9 Output curves when $d(k)=1/\sqrt{I}$

4 基于TOPSIS决策法的性能评估

4.1 功率变化曲线评估指标

为了科学、可靠地评估MPPT算法的综合性能,现从以下几项性能指标进行综合评估^[6],根据指标为效益型或成本型,对其中的数据进行处理。

1) 上升时间 τ_r 。

上升时间 τ_r 为曲线上升到稳态功率的95%所用的时间,该指标反应了算法跟踪的速度。

2) 光照强度变化下的响应时间 τ_1 。

光照强度变化下的响应时间 τ_1 为曲线在光照强度变化后达到稳态所用的时间,该指标反映了算法对光照条件变化的响应速度。

3) 温度变化下的响应时间 τ_2 。

温度变化下的响应时间 τ_2 为曲线在温度变化后达到稳态所用的时间,该指标反映了算法对温度条件变化的响应速度。

4) 光照温度同时变化下的响应时间 τ_3 。

光照温度同时变化下的响应时间 τ_3 为曲线在光照强度和温度同时变化后达到稳态所用的时间,该指标反映了算法对光照条件变化的响应速度。

5) 跟踪能量损耗 η 。

将算法模型在迭代步骤中进行积分,可以得到功率曲线上升过程中产生的总能量,其与这段时间中的参考功率之差为跟踪过程中的损耗能量,如图10所示。

该指标可用跟踪效率 η 表示,表达式如下:

$$\eta = \frac{\text{参考能量} - \text{损耗能量}}{\text{参考能量}} \times 100\% \quad (7)$$

跟踪效率 η 标准化后得到该项指标 η_0 。

6) 稳态性 Δ 。

稳态功率曲线波动幅值与稳态功率的比,反映了算法跟踪的稳定性能。

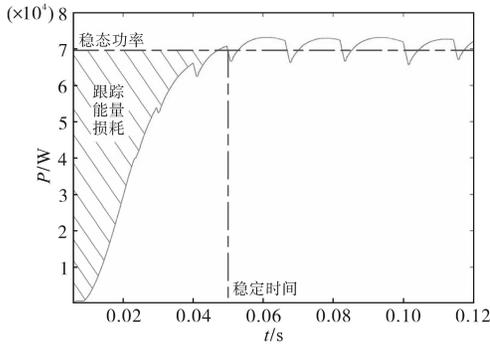


图10 跟踪能量损耗示意图
Fig.10 Tracking energy loss

稳态性为计算得到各指标数据如表1所示,各指标数值在0~1区间,越接近1,表明该项数据越好。

表1 各指标数据标准化
Tab.1 Standardized index data

	$d(k)=1/I$	$d(k)=1/I^2$	$d(k)=1/\sqrt{I}$
τ_r	1	0.110 3	0
τ_1	0.911 4	1	0
τ_2	0	0.360 4	1
τ_3	1	0	0.156 0
η_1	0	1	0.963 3
Δ	0	1	0.843 4

4.2 关键指标与指标权重的确定

4.2.1 层次分析法

将上述 $n=6$ 项指标作为准则层, $m=3$ 种变步长系数的选取作为决策层,用层次分析法求取准则层权重。

对6个评价指标构造判断矩阵:

$$A = [a_{ij}]_{n \times n} \quad (8)$$

式中: a_{ij} 为指标*i*相对于指标*j*的重要性之比。

一致性指标如下:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (9)$$

式中: λ_{\max} 为所构造的判断矩阵的最大特征值。

一致性比例如下:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (10)$$

式中: RI 为随机一致性指标。

当 $CR < 0.1$ 时,一致性检验通过,说明判断矩阵构造合理。

通过层次分析法得到的6个指标的权重为[0.168 4,0.070 5,0.096 8,0.168 4,0.493 9,0.827 7]。

4.2.2 熵值法

熵值法是根据指标的离散程度来判断该指标的综合影响的一种数学方法。

第*i*个对象在第*j*项指标下的特征比重为

$$P_{ij} = x_{ij} / \sum_{i=1}^m x_{ij} \quad (11)$$

取 $k = \frac{1}{\ln m}$,则第*j*项指标的熵值为

$$e_j = -k \sum_{i=1}^m P_{ij} \ln(P_{ij}) \quad (12)$$

计算指标的差异性系数:

$$g_j = 1 - e_j \quad (13)$$

确定权重:

$$q_j = \frac{g_j}{\sum_{i=1}^m g_j} \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (14)$$

通过熵值法得到6个指标的权重为[0.280 9,0.104 4,0.158 9,0.246 3,0.104 0,0.105 6]。

4.2.3 综合权重

采用层次分析法和熵值法的组合赋权法可以弥补单一赋权带来的不足,实现主客观的统一。

综合权重 w_j 如下:

$$w_j = \frac{\sqrt{p_j q_j}}{\sum_{j=1}^n \sqrt{p_j q_j}} \quad (15)$$

式中: p_j 为层次分析法得到的权重; q_j 为熵值法得到的权重。

通过组合赋权法得到6个指标的综合权重为[0.188 6,0.074 4,0.107 6,0.176 6,0.196 5,0.256 4]。

4.3 TOPSIS决策法

TOPSIS决策法是一种多属性决策法,可以对评估对象进行相对优劣排序^[7]。

共有 $m=3$ 个评价对象、 $n=6$ 个评价指标构成的矩阵如下:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix}$$

其标准化矩阵如下

$$Z = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & \dots & z_{1n} \\ z_{21} & z_{22} & \dots & z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{m1} & z_{m2} & \dots & z_{mn} \end{bmatrix}$$

确定正理想解 Z^+ 如下:

$$Z^+ = \{z_1^+, z_2^+, \dots, z_n^+\}$$

确定负理想解 Z^- 如下:

$$Z^- = \{z_1^-, z_2^-, \dots, z_n^-\}$$

计算第 i 个评价对象到最大值,即正理想解的距离为

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n w_j (Z^+ - z_{ij})^2} \quad (16)$$

计算第 i 个评价对象到最小值,即负理想解的距离为

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n w_j (Z^- - z_{ij})^2} \quad (17)$$

则相对贴近度 S_i 为

$$S_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (18)$$

对3种方案的相对优劣程度进行排序,显然有 $0 < S_i < 1$,且 S_i 越大, D_i^+ 越小,表明结果更接近最大值。

4.4 综合评估结果分析

通过TOPSIS决策法得到3个方案的综合评价结果如表2所示。

表2 TOPSIS决策法评价结果

Tab.2 Evaluation result of TOPSIS method

$d(k)$	相对贴近度 S_i	TOPSIS 排序
$1/I$	0.465 9	3
$1/I^2$	0.548 0	1
$1/\sqrt{I}$	0.523 4	2

通过以上评价结果数据可以看出,三种变步长系数选取方式中, $d(k)=1/I^2$ 方案最优。该方案在跟踪过程中,能量效率较高,有着较好的稳态性,跟踪精度较高,综合来说有最好的最大功率点跟踪性能。

5 应用案例

本文选取河北承德某光伏电站作为最大功率仿真测试目标,研究时间段为2019年9月—2019年10月。该发电站位于(116.65° E, 41.20° N),海拔为1 472 m,研究时间内从早晨6:00到傍晚18:00,传感器实时记录光照强度、温度等气象数据,每隔30 min取其平均值记录到数据库中。选择9月9日的数据进行验证,当日天气为小雨,温度为4.8 °C~13.1 °C,记录的光照强度与温度数据如图11所示。

将图11所示数据代入本文的MPPT方案中,

得到的最大功率跟踪结果如图12所示。

从图12可以看出,本文的MPPT方案可以实时跟踪光伏单元的最大功率,跟踪曲线的变化趋势接近光照曲线,同时也一定程度受到温度变化的影响,符合前文的分析与仿真结果。

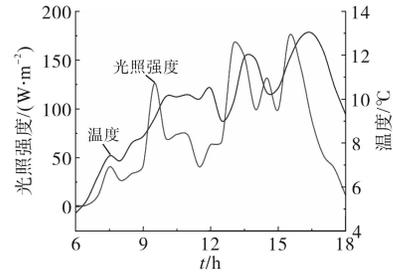


图11 光照与温度变化曲线

Fig.11 Curves of illumination and temperature

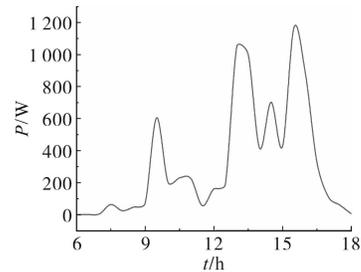


图12 最大功率跟踪结果

Fig.12 Maximum power tracking result

6 结论

针对传统的MPPT算法的震荡问题和输出特性受电流影响较大的问题,本文提出一种基于改进电导增量法的MPPT算法,引入与电流 I 相关的系数对特性曲线 dP/dU 的值进行修正,并基于TOPSIS决策法,通过6项评价指标对3种变步长系数方案进行评估,确定了性能最好的方案,对光伏发电系统MPPT算法的构建及性能评估有着参考意义。

参考文献

- [1] 艾永乐,刘群峰,韩朝阳,等.基于改进扰动观察法的光伏MPPT策略[J].武汉大学学报(工学版),2020,53(4):339-344.
Ai Yongle, Liu Qunfeng, Han Chaoyang, et al. Photovoltaic MPPT strategy based on improved perturbation and observation method[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2020, 53(4):339-344.
- [2] 楼伯良,吴俊,黄弘扬,等.基于改进型扰动观察法的MPPT控制策略研究[J].浙江电力,2019,38(9):95-99.
Lou Boliang, Wu Jun, Huang Hongyang, et al. Research on MPPT control strategy based on improved perturbation observation method[J]. Zhejiang Electric Power, 2019, 38(9):95-99.