

光伏阵列的组态优化控制

岑长岸, 张 淼, 王丽琼

(广东工业大学 自动化学院, 广东 广州 510075)

摘要: 大规模太阳能光伏阵列的输出功率受入射光强和环境温度影响较大, 随着太阳光入射角度的变化, 不同位置光伏组件的输出变化不同, 容易使光伏阵列的输出偏移最大功率点. 为了控制光伏阵列的输出在最大功率点处, 本文在梯度法实现最大功率点追踪的基础上, 提出了一种组态优化方法来实现光伏阵列最大输出功率控制, 并给出了仿真结果, 仿真结果表明该组态优化方法能有效地提高光伏阵列的输出功率.

关键词: 光伏组件; 梯度法; 组态优化; 模型预测控制

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Control of the configuration optimization for photovoltaic array

CEN Chang-an, ZHANG Miao, WANG Li-qiong

(Automation College, Guang Dong University of Technology, Guangzhou Guangdong 510075, China)

Abstract: The output power of a large photovoltaic array is affected by radiant intensity and temperature. The output of photovoltaic array in different orientations changes with the incident sunlight angle, being likely to deviate from the maximum power point. For gaining maximum power point of photovoltaic array, a gradient method is presented to track the maximum power point and optimize the configuration to enhance the output power. Simulation results validate the effectiveness of this method.

Key words: photovoltaic modules; gradient method; configuration optimize; model predictive control

1 引言(Introduction)

太阳能光伏发电作为新能源和可再生能源的重要组成部分在未来将成为能源供应的重要组成部分. 其应用上是多个光伏组件按特定的支路串联后再并起来在要求的电压范围内输出的, 其中每条支路电池组件的方位差异都会引起其温度和入射光强不同, 考虑到光伏组件表面温度和光强度对光伏发电的影响, 对于控制大型光伏方阵的功率输出提出了更高的要求. 而太阳能电池方阵动态的优化组合方式是提高光伏电池输出功率的一个有效的手段.

2 太阳能光伏组件输出特性(The output curves of the photovoltaic module)

2.1 光伏阵列数学模型(Model of photovoltaic module)

实际应用中, 光伏组件把多个单体光伏电池固定在支架上并用导线将其联在一起形成光伏组件进行传输电的. 光伏组件的输出电压 V 、电流 I 的关系如式(1)所示^[2]:

$$I = I_{sc}(1 - c_1(e^{(V-d_v)/(c_2 V_{oc})} - 1)) + d_i. \quad (1)$$

其中:

$$\begin{aligned} c_1 &= (1 - I_m/I_{sc})e^{-V_m/(c_2 V_m)}, \\ c_2 &= (V_m/V_{oc} - 1)/\ln(1 - I_m/I_{sc}), \\ d_v &= -\beta d_t - R_s d_i, \\ d_i &= \alpha(R/R_{ref})d_i + (R/R_{ref} - 1)I_{sc}, \\ d_t &= T_c - T_{ref}. \end{aligned}$$

其中: $R_{ref} = 1 \text{ kW/m}^2$, $T_{ref} = 298 \text{ K}$, T_c 为实际温度, R 为实际入射光强度, α 为电流变化系数, β 为电压变化系数, I_{sc} 为短路电流, V_{oc} 为开路电压, I_m, V_m 为最大功率点电流和电压, R_s 为光伏组件的串联电阻, 它受光伏组件的串联数和并联数影响.

3 光伏阵列最大功率输出控制(Control of maximum power of photovoltaic module)

本文用的光伏组件为Siemens SP75^[5], 在 $R_{ref} = 1 \text{ km/m}^2$, $T_{ref} = 298 \text{ K}$ 时, $V_{oc} = 21.7 \text{ V}$, $I_{sc} = 4.8 \text{ A}$, $V_m = 17 \text{ V}$, $I_m = 4.4 \text{ A}$, $R_s = 1.068$ (其中 V_m, I_{max} 为光伏组件最大功率输出时电压和电流的取值). 设某建筑的屋顶在东、南、西3个方向上装了3列

电池组件, 每列有33块光伏组件, 即方阵为33×3光伏阵列.

3.1 梯度法(The gradient method)

光伏阵列的最大功率点受日照及温度影响较大, 因此最大功率跟踪控制是有效利用太阳能的一个重要步骤. 光伏阵列功率 P 和电压 U 关系式为

$$P = U(I_{sc}(1 - c_1(e^{(U-dv)/(c_2V_{oc})} - 1)) + di). \quad (2)$$

由式(2)函数的特性, 可选择用梯度法进行功率最大追踪, 其控制流程图如图1所示.

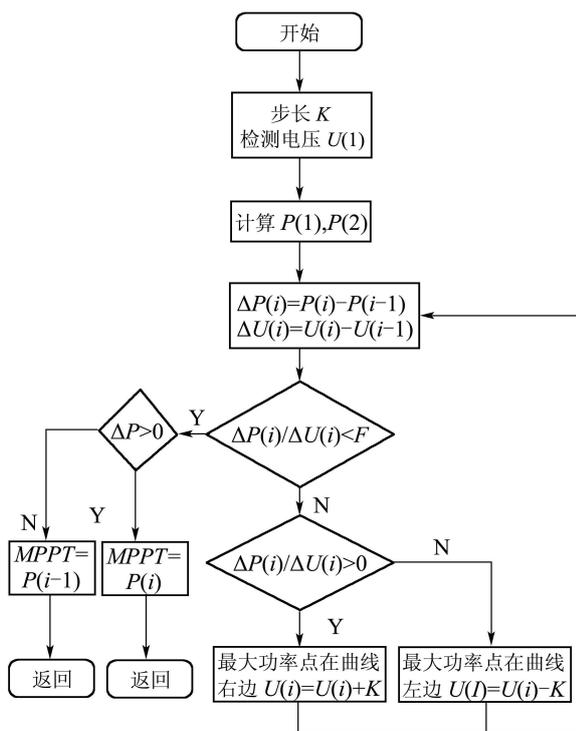


图 1 梯度法流程图

Fig. 1 Flow chart of gradient method

3.2 组态优化后光伏阵列输出(The configuration optimization output of photovoltaic module)

受环境限制, 应用上每列电池组件的温度和光强存在偏差. 如某屋东、南、西方向的电池组件, 受太阳直射角度影响, 其入射光强有很大偏差. 为使光伏阵列输出功率在其电池组件的温度和光强差异下达到最优, 本文提出一种组态优化的方法, 其以一种模型预测控制的优化组合方式实现光伏阵列最大输出功率控制. 模型预测控制是一种可预测过程未来行为的动态模型, 在线反复优化计算并滚动实施的控制作用和模型误差的反馈校正. 图2是组态优化控制流程图, 由于一些外部原因(如光伏板上的尘埃)将使模型预测的输出不可能与光伏阵列的实际输出完全相同, 会产生误差 e . 因此有必要用实测的输出构成闭环预测, 以实现对未来输出预测的反馈校正, 从

而得到闭环预测模型. 优化控制目标使未来的预测输出 U_p 尽可能接近参考轨迹所确定的期望输出 U_r .

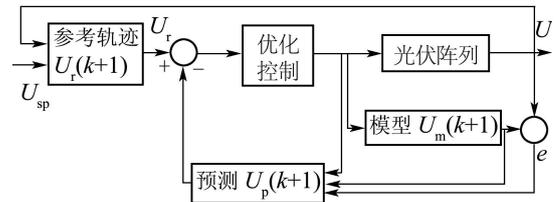


图 2 组态优化控制流程图

Fig. 2 Flow chart of configuration optimization

由公式(2)可知, 功率 P 是输出电压 U 、光强 R 、温度 T 的函数, 把 R 和 T 代入式(2)可得 $P = P(U)$ 关系式, 用梯度法可追踪到最大功率点处的 U_{pmax} . 同方向光伏组件的入射光强和表面温度大致相同, 因此 U_{pmax} 可视为相等. 每列总输出电压 U_1, U_2, U_3 分别是东、西、南各列电池组件输出总和. 由于3列光伏组件的方位不同, U_1, U_2, U_3 也会不同. 组态优化的控制法则与操作方法有如下几点:

1) 由检测的温度 T 和光强 R , 得出光伏组件在最大功率点处的电压值, 若东面 U_1 和西面 U_3 相差1.5倍, 重新组态, 反之, 保持原来的组态.

2) 系统重组, 当 $(U_3 - U_1) \in ((n - 0.5)U_{301}, (n + 0.5)U_{301})$, 且 n 为偶数时(U_{301} 表示第3列的电池组件), 方阵输出模型为

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix} = k \begin{bmatrix} 33U_{101} + (n/2 - 1)U + U_{301} \\ 33U_{201} \\ (34 - n)U_{301} \end{bmatrix}.$$

其中: $n \in [2, 33]$, U 为两个 U_{301} 电池组件的并联; 当 n 为奇数时, 方阵输出模型为

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix} = k \begin{bmatrix} 33U_{101} + (n - 1)U/2 \\ 33U_{201} \\ (34 - n)U_{301} \end{bmatrix}.$$

3) 系统重组, 当 $(U_1 - U_3) \in ((n - 0.5)U_{101}, (n + 0.5)U_{101})$, 且 n 为偶数时, 方阵输出模型为

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix} = k \begin{bmatrix} (34 - n)U_{101} \\ 33U_{201} \\ 33U_{301} + (n/2 - 1)U + U_{101} \end{bmatrix}.$$

其中: $n \in [2, 33]$, U 为两个 U_{101} 电池组件的并联; 当 n 为奇数(U_{101} 第1列电池组件), 方阵输出模型为

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix} = k \begin{bmatrix} (34 - n)U_{101} \\ 33U_{201} \\ 33U_{301} + (n - 1)U/2 \end{bmatrix}.$$

式中的 k 为模型修正系数, 当模型输出与实际输出存在偏差时, 通过反馈校正 k , 以获得接近实际输出的闭环预测模型, 过程采用梯度法优化. 上面所

列3点的控制法则和操作方法是在特定方阵下采取的控制策略. 其考虑到整体操作成本, 控制上尽量通过移动最少的光伏组件(以减少组态开关电路所需的器件)以获得最佳的输出效果, 因此保持南面的电池组件不变, 在不同的条件对东西两面的电池组件进行组态. 整个控制系统需要检测温度和光强两个参数, 再由测到的参数通过控制算法进行处理, 以得到组态方式, 组态方式由组态开关电路实现. 从检测参数到作出响应并完成重组所需的时间基本依赖于控制芯片的计算速度和控制算法的优劣. 在硬件上, 组态开关电路的成本会相对偏高, 但从整体操作的效益考虑, 是物有所值的. 下面例子是根据上面的控制方案进行仿真的.

设东南西3个方向的光伏组件在某一时刻的光强与温度分别为: $R_1 = 0.8 \text{ km/m}^2$, $T_1 = 298 \text{ K}$; $R_2 = 0.95 \text{ km/m}^2$, $T_2 = 301 \text{ K}$; $R_3 = 1.1 \text{ km/m}^2$, $T_3 = 306 \text{ K}$. 采用 33×3 阵列输出, 则其P-V图如图3所示, T_1, T_2, T_3 分别为3列光伏组件的P-V曲线, T 为光伏阵列按照固定 33×3 阵列输出P-V特性曲线. 最大功率为 $P = 7501 \text{ W}$.

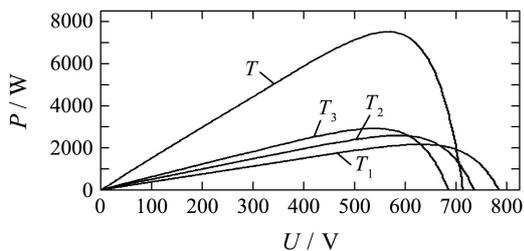


图3 光伏阵列P-V特性图

Fig. 3 The P-V curves of the photovoltaic array

图4,5为3个方向的单个电池组件的P-V, I-V特性图. 由梯度法仿真追踪出3列光伏组件在最大功率点处的电压总和为: 613.8 V , 574.2 V , 557.6 V .

由于东西方向电池组件的电压相差满足 $(U_1 - U_3) \in (2.5U_{101}, 3.5U_{101})$, 由前面介绍的控制法则(3)可得重新排列后的光伏方阵, 如图6所示.

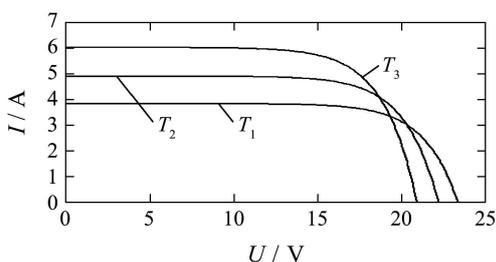


图4 3列电池组件的I-V图

Fig. 4 The I-V curves of the photovoltaic module

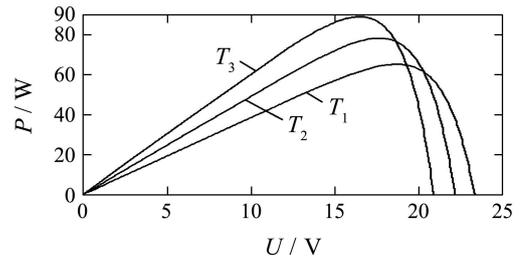


图5 3列电池组件的P-V图

Fig. 5 The P-V curves of the photovoltaic module

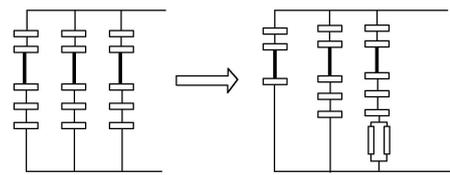


图6 光伏阵列变换图

Fig. 6 Transformation chart of photovoltaic array

仿真分析得3列电池组件电压分别为 576.6 V , 574.5 V , 579.1 V . 可微调节光伏组件的等效负载控制光伏阵列的总输出电压为 574.5 V . 计算可得组态优化后的光伏阵列总输出功率为 $P = 7928 \text{ W}$.

从上面仿真可以看出, 整个光伏阵列只有第1列的两个电池组件不在最大功率点处输出, 但输出偏离最大功率点很小. 对上面两种组态方式仿真比较可知: 光伏阵列按 33×3 阵列输出最大功率为 7501 W , 组态优化后的最大功率为 7928 W , 组态优化后的功率提高了 5.69% .

4 结论(Conclusion)

本文通过建立光伏阵列的数学模型, 对最大功率跟踪的梯度法进行分析和仿真. 同时提出了一种以组态优化的方法来提高光伏阵列输出功率, 并进行了仿真研究, 实验结果证明了本文提出的组态优化方法能有效地提高光伏阵列的输出功率.

参考文献(References):

- [1] 王长贵, 王斯成. 太阳能光伏发电使用技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [2] SHMILOVITZ D. Photovoltaic maximum power point tracking employing load parameters[J]. *Industrial Electronics*, 2005, 3(3): 1037 - 1042.
- [3] SHEN Yuliang. A photovoltaic array simulator[J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 1997, 18(2): 448 - 451.
- [4] DAHER S. Photovoltaic system for supply public illumination in electrical energy demand peak[J]. *Applied Power Electronics Conference and Exposition*, 2004, 3(3): 1501 - 1506.
- [5] CHIHCHING HUA, JONGRONG LIN, CHIHMING SHEN. Implementation of a ADSP-controlled photovoltaic system with peak power tracking[J]. *Transactions on Industrial Electronic*, 1998, 45(1): 99 - 107.