

光伏方阵中光伏组件温度预测的研究

■ 孔凡建

摘要: 通过分析和研究光伏方阵中光伏组件的实际温度变化及光伏组件温度变化所依据的能量传输方式, 建立光伏组件即时温度模拟方程, 并将根据环境条件得出的计算数据与实际测量的数据进行比较, 两者之间符合性很好。该研究可为光伏方阵的发电量预测提供温度变量的依据。

关键词: 光伏方阵; 光伏组件温度; 模拟方程; 数据测量

0 引言

在光伏电站的设计过程中, 对光伏方阵发电量的预估离不开对方阵中组件温度的计算。就目前而言, 晶体硅光伏组件温度每上升 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 光伏电站的发电效率约下降 0.4% 。美国国家可再生能源实验室(NREL)曾组织专门的研究机构^[1]对方阵中组件温度的估计进行研究^[2], 依据能量守恒定律, 在稳态条件下, 光伏组件吸收的能量与输出的能量相等, 即:

$$a_s G_s = \varepsilon_g \sigma (T_m^4 - T_{sky}^4) + 2(1.2W_{avg} + 4.8)(T_m - T_{amb}) + \varepsilon_b \sigma (T_m^4 - T_g^4) \quad (1)$$

式中, a_s 为光伏组件上表面的光吸收系数; G_s 为光伏组件接收到的太阳总辐射; ε_g 为光伏组件上表面的发射系数; ε_b 为光伏组件背板的发射系数; σ 为玻尔兹曼常数; T_m 、 T_{sky} 、 T_{amb} 、 T_g 分别为组件、天空、环境和地面的温度; W_{avg} 为平均风速。

若 a_s 、 ε_g 、 ε_b 、 σ 等参数已知, 在特定实验中, G_s 、 T_{amb} 、 T_{sky} 和 T_g 等参数可现场测量得到, 从而可得到光伏组件的正常工作温度(NOCT)。

有文献以简单的一次方程预测光伏方阵中光伏组件的温度, 但仅考虑了总太阳辐射和环境温

度^[3], 却忽略了风速。因此也有人提出了包括风速在内的对光伏组件温度影响的一次方程^[4], 然而这有可能导致光伏组件的计算温度低于环境温度, 在有太阳辐照的情况下显然不合理。所以, 用指数的方式来表达风速对于光伏组件工作温度的影响^[5], 也许可解决此问题。

1 根据热力学理论的分析

根据热力学第一定律, 物体内能的增加等于其净吸收的能量, 即:

$$W = U - S \quad (2)$$

式中, W 为物体增加的内能; U 为物体吸收的能量; S 为物体散发的能量和对外做的功。

物体内能的增加将导致物体温度的上升, 即:

$$W = C_p M (T - T_0) \quad (3)$$

式中, C_p 为物体比热; M 为物体质量; T 为物体末温度; T_0 为物体初温度。

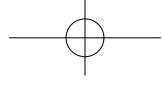
将式(2)、式(3)结合可得:

$$U - S = C_p M (T - T_0) \quad (4)$$

将式(4)应用于光伏组件中, 结合式(1), 即: $T = T_m$ 为组件温度; $T_0 = T_{amb}$ 为环境温度; $U = a_s G_s$ 为组件吸收的热量, 数据可由太阳辐射计测得;

收稿日期: 2017-07-25

通信作者: 孔凡建(1954—), 男, 教授级高级工程师, 主要从事晶体硅太阳能电池、组件及光伏系统应用的研究。15852900056@163.com



S 为组件散发的热量和对外做的功, 组件对外做的功就是其发电量 E , 而组件散发的热量包含热传导、热对流、热辐射 3 种方式^[6]。

1) 热传导为通过接触传导导出热流量 F_t , 即:

$$F_t = \lambda A_l (T_m - T_{amb}) / L \quad (5)$$

该式又称作傅里叶定律。式中, λ 为导热体的导热系数; A_l 为导热截面的面积; L 为导热体长度。定义 $C_1 = \lambda A_l / L$, 即:

$$F_t = C_1 (T_m - T_{amb}) \quad (6)$$

2) 热对流为通过空气对流传导出热流量 F_c , 即:

$$F_c = h A_c (T_m - T_{amb}) \quad (7)$$

该式又称作牛顿冷却定律。式中, h 为传热系数; A_c 为传热面积, 此处即为组件的表面积。定义 $C_2 = h A_c$, 即:

$$F_c = C_2 (T_m - T_{amb}) \quad (8)$$

3) 热辐射为通过光伏组件表面对外热辐射导出热量 F_r , 即:

$$F_r = \varepsilon \sigma A_c (T_m^4 - T_{amb}^4) \quad (9)$$

这是玻尔兹曼方程经验修正形式, 一般物体的辐射能力都小于绝对黑体。式中, ε 为光伏组件的发射率。定义 $C_3 = \varepsilon \sigma A_c$, 即:

$$F_r = C_3 (T_m^4 - T_{amb}^4) \quad (10)$$

将以上推导代入式(4), 即:

$$C_p M (T_m - T_{amb}) = a_s G_s - C_1 (T_m - T_{amb}) - C_2 (T_m - T_{amb}) - C_3 (T_m^4 - T_{amb}^4) - E \quad (11)$$

为求解组件温度 T_m , 整理上式可得:

$$T_m^4 + K_1 T_m + K_2 = 0 \quad (12)$$

其中:

$$K_1 = (C_p M + C_1 + C_2) / C_3 \quad (13)$$

$$K_2 = (E - a_s G_s) / C_3 - K_1 T_{amb} - T_{amb}^4 \quad (14)$$

若 K_1 和 K_2 未知, 则以上公式无法求解。

2 经验方程和数据拟合

为了考核光伏组件的性能, 2009 年夏季, 笔者在南京江北高新区的一个厂房屋顶建造了一

个 20 kW 的并网光伏电站。随后, 又在该电站后侧约 5 m 处增加了一个监测站, 测量当地的温度、风力、水平面及光伏方阵倾斜面上的太阳辐射强度、组件温度和发电量等。根据检测站收集的数据和笔者长期的分析研究, 提出了以下经验公式来模拟光伏方阵中光伏组件的实际工作温度:

$$T_m = C f(T_v; W_v) f(G_v) f(W_v) + f(T_v) \quad (15)$$

其中:

$$f(T_v; W_v) = [T_0 / (T_0 + T_v + 0.33 W_v)]^{12} \quad (16)$$

$$f(G_v) = \left(G_v \left\{ a_s - \eta \left[1 - \delta (T_v + \frac{G_v}{G_0} T_0) \right] \right\} - T_c \right)^{1.17} \quad (17)$$

$$f(W_v) = \exp[-(1.5 W_v)^{0.25}] \quad (18)$$

$$f(T_v) = (T_v + T_0)^{0.999} - T_0 \quad (19)$$

式中, C 为比例常数, 取 0.15; T_0 为 0 °C 时的绝对温度, 取 273.5; a_s 取 0.92; η 为光伏组件效率, 取 0.12; δ 为光伏组件功率温度系数, 取 0.45%; G_0 为额定辐射, 取 1000; T_c 为光伏组件标准工作温度, 取 25; T_v 为前 5 min 平均环境温度; W_v 为前 10 min 平均测量风速; G_v 为前 5 min 组件表面平均总辐射。

从 2010 年 5~12 月的系统测量数据中随机选取 6 个工作日的数据, 需包括春夏秋冬 4 个季节。为保证数据的随机性和广泛性, 数据之间的时间间隔既相互接近又不相同, 分别取 5 月 24 日、6 月 30 日、8 月 4 日、9 月 27 日、11 月 8 日和 12 月 18 日。然后根据 6 组测试数据和式(15)对光伏组件温度进行模拟计算, 得出图 1~图 6。

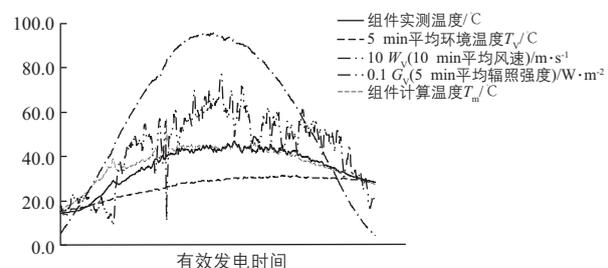


图 1 2010 年 5 月 24 日现场测量数据和组件温度模拟

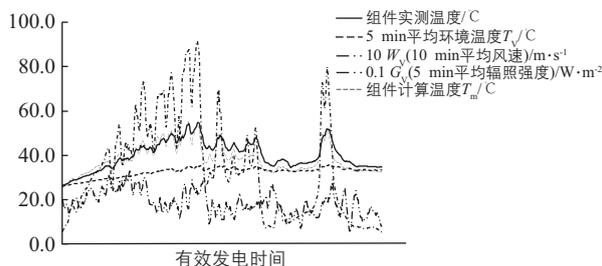


图2 2010年6月30日现场测量数据和组件温度模拟

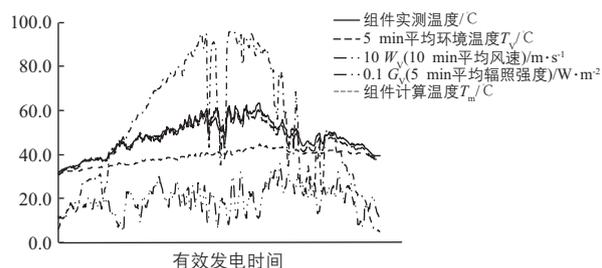


图3 2010年8月4日现场测量数据和组件温度模拟

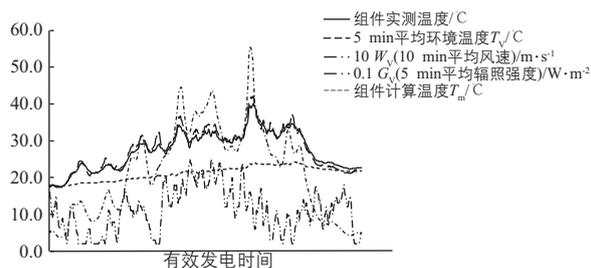


图4 2010年9月27日现场测量数据和组件温度模拟

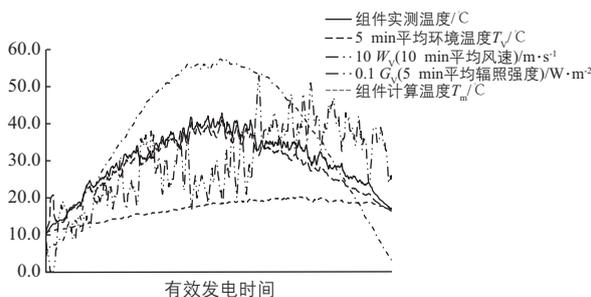


图5 2010年11月8日现场测量数据和组件温度模拟

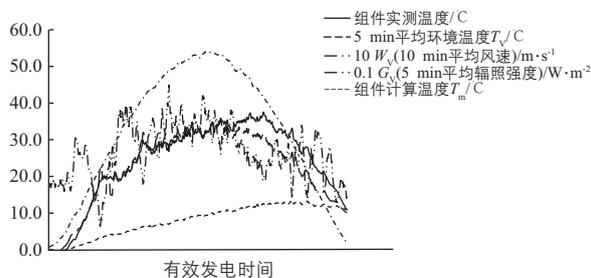


图6 2010年12月18日现场测量数据和组件温度模拟

3 讨论

式(15)中, $f(T_v; W_v)$ 代表热传导的影响, $f(G_v)$ 代表太阳辐射的影响, 是组件温度的主要影响因素; $f(W_v)$ 代表风力的影响, 采用指数方式, 体现了环境温度对组件温度的极限限制; $f(T_v)$ 代表环境温度的影响。该公式未体现组件对外热辐射散发热量的影响, 是因为该热量相比于所吸收的能量十分少。依据文献[1]对光伏组件对外散发的热量进行粗略估算, 一般不大于 0.01 W/m^2 。

拟合公式虽也存在一些较明显的偏离, 但整体上很好地符合了光伏组件的即时温度。在检查测试数据的过程中, 笔者也多次发现实际测试数据出现错误和断点, 并导致模拟数据出现一些突兀的偏离。这个系统是光伏并网电站的早期产物。

由于笔者可接触到的光伏系统的测试数据很少, 拟合公式的真实性和有效性无法得到广泛的证实, 其中一些光伏系统的建设因素无法进行全面的考虑和验证, 比如方阵的倾角、行间隔及场地条件等, 都没有纳入计算, 必然导致这个公式的有效性存在较大局限。笔者希望能够获得进一步的实验条件, 以对公式进行改进。

参考文献

- [1] Steve Rummel, Emery K, Field H, et al. PV cell and module performance measurement capabilities at NREL[EB/OL]. <https://www.researchgate.net/publication/234897389>, 1999.
- [2] Matthew Muller. Measuring and Modeling Nominal Operating Cell Temperature (NOCT) [EB/OL]. <http://www.nrel.gov/docs/fy10osti/49505.pdf>, 2010.
- [3] 程序, 谭志萍. 一种光伏电池组件的温度预测方法[J]. 物联网技术, 2013, 11: 33-36.
- [4] Muzathik A M. Photovoltaic Modules Operating Temperature Estimation Using a Simple Correlation[J]. International Journal of Energy Engineering, 2014, 4(4): 151-158.
- [5] Schwingshackl C, Petitta M, Wagner J E, et al. Wind effect on PV module temperature: Analysis of different techniques for an accurate estimation[J]. Energy Procedia, 2013, (40): 77-86.
- [6] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.

太阳能