

基于被动辐射制冷的光伏发电效率优化方案及其监测技术研究

朱龙潜*, 陈宇明, 张骏升, 贺 伟

广州市香港科大霍英东研究院建筑物能源研究中心, 广东 广州

收稿日期: 2023年8月15日; 录用日期: 2023年9月15日; 发布日期: 2023年9月27日

摘 要

光伏板的发电效率与运行温度密切相关。本文通过被动辐射制冷涂层改造光伏组件, 降低光伏板的运行温度, 提升其发电效率。经实验及预测算法验证得出, 被动辐射制冷涂层对光伏组件的运行温度有较大的降低, 光伏组件正面、侧面、背面及金属框架温度分别降低了约10℃、14℃、13℃及16℃。通过降低光伏组件的运行温度, 光伏板发电效率得到了提升, 提升幅度约为4.5%。由此可见, 被动辐射制冷涂层对于提升光伏板发电效率具有一定的可行性。

关键词

被动辐射制冷涂层, 光伏, 发电效率

Research on the Optimization and Monitoring Technology of Photovoltaic Power Generation Efficiency Based on Passive Radiation Cooling

Longqian Zhu*, Yuming Chen, Junsheng Zhang, Wei He

Building Energy Research Center, Guangzhou HKUST Fok Ying Tung Research Institute, Guangzhou Guangdong

Received: Aug. 15th, 2023; accepted: Sep. 15th, 2023; published: Sep. 27th, 2023

Abstract

The power generation efficiency of photovoltaic (PV) plates is closely related to the operating

*通讯作者。

文章引用: 朱龙潜, 陈宇明, 张骏升, 贺伟. 基于被动辐射制冷的光伏发电效率优化方案及其监测技术研究[J]. 传感器技术与应用, 2023, 11(5): 438-445. DOI: 10.12677/jsta.2023.115050

temperature. In this research, passive radiation cooling coating was used to modify PV modules, reduce the operating temperature of PV plates, and improve the power generation efficiency. After experimental method and simulation model prediction, it was found that the operating temperature of PV modules was reduced significantly by the passive radiation cooling coating. The front, side, back, and metal frame temperatures of PV modules were decreased by about 10°C, 14°C, 13°C, and 16°C, respectively. By reducing the operating temperature, the efficiency of PV plate power generation was improved by approximately 4.5%. It can be seen that the passive radiation cooling coating has certain feasibility for improving the power generation efficiency of photovoltaic plates.

Keywords

Passive Radiation Cooling Coating, Photovoltaic, Power Generation Efficiency

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在环境问题和能源危机的双重压力下，世界各国都开始制定能源发展战略，并以节能环保为目的开发新能源和可再生能源。达成我国提出的“双碳”目标，是我国能源及各行各业的努力方向。而发展光伏发电行业，是其中重要的途径之一。

光伏的发电效率，与光照强度、光伏板材料以及运行温度密切相关[1]。研究表明，当光伏组件运行温度超过上限后，每升高 1°C，光电转化效率将会降低 3%~5% [2] [3] [4]，整体发电效率将会降低 0.45% 以上[5] [6]。因此，将光伏组件维持在最佳工作温度范围，是提高光伏发电效率的关键之一。随着光伏技术的发展，研究人员提出了各种包含主动或被动的冷却法来降低光伏组件运行温度、提高发电效率[7] [8] [9]。例如：Valeh-e-sheyda 等提出了一种空气自然对流冷却法，然而该方法降温性能较差[10]；Bahaidarah 等提出了一种水循环冷却法，然而该方法需要耗电，并不节能[11]；Hasan 等提出利用相变材料对光伏组件进行温度控制，然而该方法能量容量有限，甚至有失效的风险[12]。总体而言，已有的光伏组件冷却方法，均有其局限性。

除运行温度控制之外，目前大多数关于光伏系统应用的研究均集中在并网系统，对离网系统的研究还很少[13] [14]。但这并非意味着离网系统的功率预测不重要，而是由于并网系统已经大规模运用，离网系统还相对小众，常见于偏远地区或边防哨所、光伏路灯。在过去的十几年间，全球各地相继启动了智慧城市计划，并已经成为历史的必然趋势。传统的光伏应用系统监测技术以人工巡检的方式获取设备运行状态信息，所以存在监测周期长、数据量少、信息量不足等缺陷，特别是对于运行温度的监测并不重视。

本文主要的研究目的是通过被动辐射制冷技术，改造部分光伏组件外表面，降低光伏组件运行温度，提高发电效率，并对光伏组件运行状况进行监测并预测其功率。

2. 实验详解

2.1. 光伏发电实验平台及监测平台搭建

本文的被动辐射制冷涂层制备采用相变法制备。将被动辐射制冷涂料涂在光伏板背面、侧面及金属

框架上。单片光伏板面积为 2 m^2 (长 $\times$ 宽 $= 2 \text{ m} \times 1 \text{ m}$)。监测平台包含信息采集模块、物联网模块以及算法模块。信息采集模块主要包括多个温度传感器、湿度传感器、光敏电阻传感器、电压计以及电流计等, 主要用于实时测试光伏板正面、背面、侧面及金属框架的温度, 环境温度、湿度, 光照强度, 发电效率等; 物联网模块主要用于搜集天气、季节等历史数据; 算法模块主要用于计算并预测光伏发电效率, 算法步骤如图 1 所示。

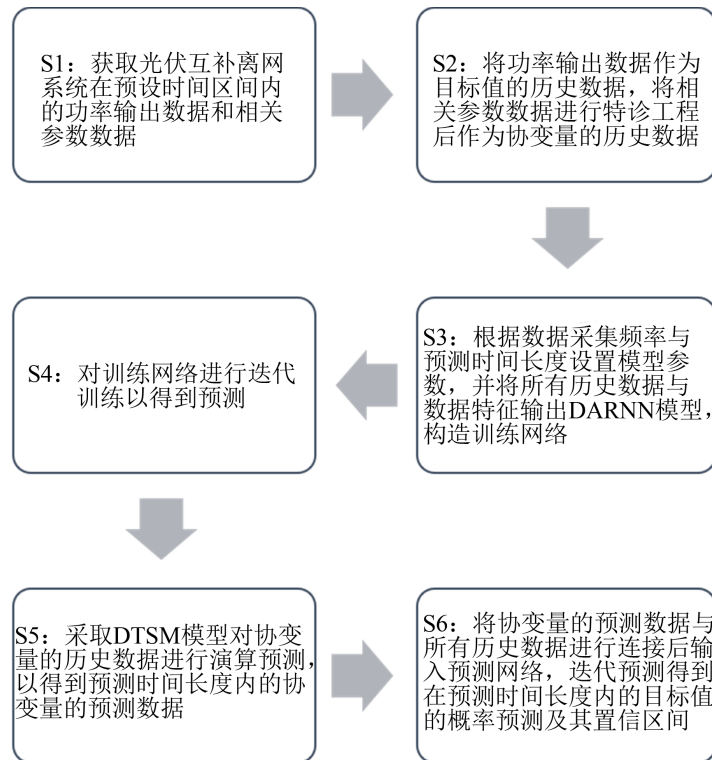


Figure 1. Steps of power generation efficiency prediction method

图 1. 发电效率预测方法步骤

2.2. 计算

在发电效率预测模型中, 图 1 中的步骤 S1 的测量输出功率 P_{e-pv} 可由公式(1)得出:

$$P_{sys} = U_P I_P \quad (1)$$

式中, U_{pv} 为测量电压, I_{pv} 为测量电流。

对方法进一步改进, 相关参数数据包括辐照度、温度、湿度、日出时间和日落时间; 对这些相关参数数据进行去量纲并标准化, 利用日出时间和日落时间构造分段函数, 即日出后值为 1, 日落后值为 0。

为了进一步对方法进行改进, 训练网络中的 DARNN 模型对表示时间 t 处的功率输出数据的时间序列的值 y_t 的条件分布进行建模:

$$P(y_{t_0:T} | y_{1:t_0-1}, \mathbf{x}_{1:T}) \quad (2)$$

其中, $[y_{t_0}, y_{t_0+1}, \dots, y_T] := y_{t_0:T}$ 代表未来时间序列中的功率输出数据的预测值,

$[y_1, y_2, \dots, y_{t_0-2}, y_{t_0-1}] := y_{1:t_0-1}$ 代表过去时间序列的功率输出数据的历史值, 其中 t_0 表示未来与历史时间序列的时间分割点, $\mathbf{x}_{1:T}$ 则为所有时间范围内的协变量, 时间区间 $[1, t_0 - 1]$ 表示训练区间, $[t_0, T]$ 表示预测

区间。

DARNN 模型的结构可参照图 2 所示：

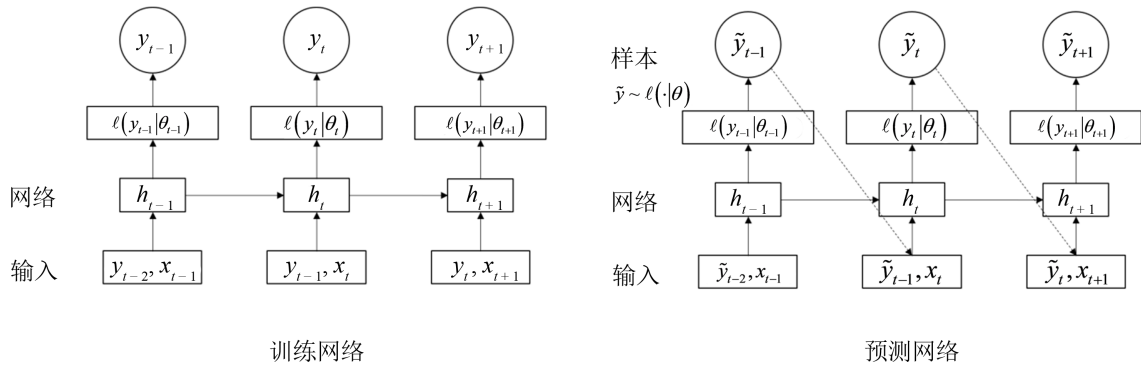


Figure 2. Structure of the DARNN model
图 2. DARNN 模型结构

对训练网络进行迭代训练以得到预测网络的步骤中，在时间步 t ，将协变量 x_t 、上一时间步的目标值 y_{t-1} 以及网络输出 h_{t-1} 输入所述训练网络，然后将所述训练网络输出 $h_t = h(h_{t-1}, y_{t-1}, x_t, \Theta)$ 用于计算似然度 $\ell(y|\theta)$ 的参数 $\theta_t = \theta(h_t, \Theta)$ ，以用于训练所述 DARNN 模型的模型参数 Θ 。

预测网络进行迭代预测时，在 $t < t_0$ 的区间内，将时间序列 y_t 的历史数据输入，然后在 $t \geq t_0$ 的区间内生成一个样本，并反馈到下一个点，直到 $t = t_0 + T$ 时预测结束形成一个样本轨迹，重复此预测过程会产生许多表示联合预测分布的迹线。

对本方法的进一步改进，模型参数 Θ 可通过最大化对数似然来学习获得：

$$\mathcal{L} = \sum_{t=t_0}^T \log \ell(y_t | \theta(h_t)) \quad (3)$$

作为预测方法的进一步改进，训练网络中的 DARNN 模型对辐照度、温度以及湿度等数据使用高斯似然方法，并使用均值 μ 和标准差 σ 参数化高斯似然： $\theta = (\mu, \sigma)$ ，其中均值 μ 由所述训练网络输出的仿射函数确定，标准差 σ 则通过应用仿射变换和 softplus 激活函数来获得，以确保 $\sigma > 0$ ，其公式如(4)~(6)：

$$\ell_G(y|\mu, \sigma) = (2\pi\sigma^2)^{-\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{(y-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4)$$

$$\mu(h_t) = \mathbf{w}_\mu^\top h_t + b_\mu \quad (5)$$

$$\sigma(h_t) = \log\left(1 + \exp(\mathbf{w}_\sigma^\top h_t + b_\sigma)\right) \quad (6)$$

其中， $\mathbf{w}$ 表示神经网络中的权重参数， b 表示偏置参数， μ 表示计算均值的神经网络参数， σ 表示计算标准差的神经网络参数。

对本方法的进一步改进，训练网络中的 DARNN 模型对日出时间和日落时间数据使用二项式似然方法，并使用均值 $\mu \in \mathbb{R}^+$ 和形参 $\alpha \in \mathbb{R}^+$ 参数化二项式似然：

$$\ell(y|\mu, \alpha) = \frac{\Gamma\left(y + \frac{1}{\alpha}\right)}{\Gamma(y+1)\Gamma\left(\frac{1}{\alpha}\right)} \left(\frac{1}{1+\alpha\mu}\right)^{\frac{1}{\alpha}} \left(\frac{\alpha\mu}{1+\alpha\mu}\right)^y \quad (7)$$

$$\mu(h_t) = \log\left(1 + \exp(\mathbf{w}_\mu^\top h_t + b_\mu)\right) \quad (8)$$

$$\alpha(h_t) = \log(1 + \exp(w_\alpha^T h_t + b_\alpha)) \quad (9)$$

其中均值 μ 和形参 α 这两个参数都是从 **softplus** 激活的全连接层输出中获取的, 以确保其值为正。

DTSM 模型被简化为两个部分, 即趋势项和周期项, 其公式组合如下:

$$y(t) = g(t) + s(t) + \epsilon_t \quad (10)$$

其中 $g(t)$ 为趋势函数, 用于对时间序列的非周期性变化进行建模; $s(t)$ 用于表示周期性变化; 误差项 ϵ_t 表示模型的任何特有变化, 通常为一正态分布的量。

在 DTSM 模型中, 通过明确定义允许增长率改变的变化点, 将趋势变化纳入模型, 假设在时间点 s_j ($j=1, \dots, S$) 上设有 S 个变化点, 定义增长率调节向量 $\delta \in \mathbb{R}^S$, δ_j 为时间点 s_j 处增长率的变化。定义一个向量:

$$a(t) \in \{0, 1\}^S \quad (11)$$

$$a_j(t) = \begin{cases} 1, & t \geq s_j \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (12)$$

其中, 时间 t 处的增长率为 $k + a(t)^T \delta$; 在调节增长率时, 偏置参数 m 也必须进行调整以连接线段的端点, 使用分段的恒定增长率来简化趋势函数, 表示为:

$$g(t) = (k + a(t)^T \delta)t + (m + a(t)^T \gamma) \quad (13)$$

其中, 变化点 j 的增长率调整量 γ_j 设为 $-s_j \delta_j$ 以满足函数的连续性。

在 DTSM 模型中, 令 Pr 为时间序列的期望周期, 则可以函数近似任意平滑的周期性影响:

$$s(t) = \sum_{n=1}^N \left(a_n \cos\left(\frac{2\pi n t}{\text{Pr}}\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi n t}{\text{Pr}}\right) \right) \quad (14)$$

对于所有范围内的时间 t , 构造一个周期性向量的矩阵以估计 $2N$ 个参数: $\beta = [a_1, b_1, \dots, a_N, b_N]^T$, 则周期项可表示为:

$$s(t) = \left[\cos\left(\frac{2\pi(1)t}{\text{Pr}}\right), \dots, \sin\left(\frac{2\pi(N)t}{\text{Pr}}\right) \right] \beta \quad (15)$$

将 $\beta \sim \text{Normal}(0, \sigma^2)$ 应用于周期项的平滑性先验, 将每个所述协变量的历史数据的周期性特征合并到矩阵 X 以及变化点指标 $a(t)$ 合并到矩阵 A 。

为了验证模型, 光伏板的发电效率 P_{e-pv-p} , 可由公式(16)预测出:

$$P_{e-pv-p}(T_{pv}) = 298 I_s \eta (1 + \beta(T_{pv} - 300)) \quad (16)$$

式中, T_{pv} 为光伏板温度, I_s 为光照强度, η 为硅光伏板的能量转换效率, β 为温度系数[15][16][17]。

为被动辐射制冷涂层对光伏板发电效率的影响, 被动辐射制冷涂层对光伏板发电效率的提升率 η_{prcc} 可以公式(17)得出:

$$\eta_{prcc} = \frac{(P_{s-prcc} - P_{s-o})}{P_{s-o}} \times 100\% \quad (17)$$

式中, P_{s-prcc} 为涂覆了被动辐射制冷涂层的光伏板的每平米单日发电功率, P_{s-o} 为未涂覆的光伏板的每平米单日发电功率。

2.3. 实验设计

在本次实验中, 为了测试被动辐射制冷涂料对光伏板在实际运行过程中的发电效率的影响, 总共涂覆了 4 片光伏板及其框架作为实验组, 并使用了 16 片未涂覆的光伏板作为对照组。

在本次实验中, 总共进行了 4 组实验, 每组实验持续 30 天, 分别从 6 月 1 号至 6 月 30 号、7 月 1 号至 7 月 30 号、8 月 1 号至 30 号、9 月 1 号至 30 号。每组实验中, 分别通过监测系统采集了实验组及对照组的发电总功率, 并计算出每平米光伏板的单日发电功率。通过对比 4 组实验中实验组及对照组的单日发电功率, 得出被动辐射制冷涂层对光伏板发电效率的提升率。最终, 以公式(16)中的参数, 计算光伏板发电效率提升率的理论值, 与实验数据相对比, 验证模型的有效性。

3. 实验结果及分析

3.1. 温度对比

如表 1 所示, 实验组与对照组中, 光伏组件正面、侧面、背面及金属框架温度分别降低了约 10℃、14℃、13℃及 16℃。由实验可见, 光伏板正面温度温差最小, 金属框架温度温差最大。

Table 1. Temperature comparison of the PV plate components between experimental group and control group

表 1. 实验组及对照组的光伏组件温度对比

	正面(℃)	侧面(℃)	背面(℃)	金属框架(℃)
6 月	9.48	13.48	12.08	15.11
7 月	8.83	12.73	11.33	14.35
8 月	11.54	15.51	14.01	17.21
9 月	11.35	15.24	13.77	16.98
平均	10.31	14.24	12.78	15.91

3.2. 发电效率

4 组实验中, 实验组及对照组的发电总功率及每平米光伏板单日发电功率如表 2 所示。为最大程度避免天气变化的影响, 每组实验持续 30 天。

Table 2. Total generated power and the daily generated power per square meter

表 2. 发电总功率及每平米单日发电功率

	实验组发电总功率 (kW)	实验组每平米单日 发电功率(kW/m ² /day)	对照组发电总功率 (kW)	对照组每平米单日 发电功率(kW/m ² /day)
6 月	4864.11	608.06	18,691.8	584.12
7 月	6296.88	787.11	24,259.68	758.12
8 月	7350.96	918.87	28,006.56	875.21
9 月	6810.28	851.29	25,966.94	811.44

可通过实验组及对照组的每平米光伏板单日发电功率来计算被动辐射制冷涂层对光伏板发电效率的实际影响, 也可通过预测模型, 预测出被动辐射制冷涂层对光伏板发电效率的影响, 具体提升率如表 3 所示。

Table 3. The enhancement of the power generation efficiency caused by the passive radiation cooling coating
表 3. 被动辐射制冷涂层对发电效率的提升

	实际提升率	预测提升率
6 月	4.10%	4.51%
7 月	3.82%	3.98%
8 月	4.99%	5.12%
9 月	4.91%	5.03%
平均	4.46%	4.66%

4. 结论

在本文中，在光伏组件上进行了被动辐射制冷涂层的涂覆，并搭建了一套实验及数据监测平台。本文在 6 月~9 月长时间维度下，以实验实测以及算法模拟的方式，研究了被动辐射制冷涂层对光伏组件温度的影响，以及对光伏板发电效率的影响。

由实验结果可见，被动辐射制冷涂层对光伏组件的运行温度有较大的降低。通过降低光伏组件的运行温度，光伏板发电效率提升了约 4.5%。

综上所述，被动辐射制冷涂层对于提升光伏板发电效率有一定的可行性，在今后的研究中，可做进一步的探索。

基金项目

广州市科技计划项目(No. 202102080648); 广州市黄埔区国际科技合作项目(2020GH08、2021GH03)。

参考文献

- [1] Biwole, P.H., Eclache, P. and Kuznik, F. (2013) Phase-Change Materials to Improve Solar Panel's Performance. *Energy and Buildings*, **62**, 59-67. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.02.059>
- [2] Norton, B., Eames, P.C., Mallick, T.K., et al. (2011) Enhancing the Performance of Building Integrated Photovoltaics. *Solar Energy*, **85**, 1629-1664. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2009.10.004>
- [3] Li, Z., Ma, T., Zhao, J., Song, A. and Cheng, Y. (2019) Experimental Study and Performance Analysis on Solar Photovoltaic Panel Integrated with Phase Change Material. *Energy*, **178**, 471-486. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.04.166>
- [4] 董杰, 王晓霖, 李明, 董翠翠, 孙进. 层叠型光伏-热电耦合发电系统能效提升分析[J]. 当代石油石化, 2023, 31(5): 35-40.
- [5] Rahman, M.M., Hasanuzzaman, M. and Rahim, N.A. (2015) Effects of Various Parameters on PV-Module Power and Efficiency. *Energy Conversion and Management*, **103**, 348-358. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.06.067>
- [6] 黄珂, 张吉, 张卓奋, 凌继红, 吕石磊. 基于天空辐射冷却系统的光伏组件降温研究[J]. 太阳能学报, 2023, 44(2): 361-365.
- [7] Tonui, J.K. and Tripanagnostopoulos, Y. (2008) Performance Improvement of PV/T Solar Collectors with Natural Air Flow Operation. *Solar Energy*, **82**, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2007.06.004>
- [8] Kazanci, O.B., Skrupskelis, M., Sevela, P., Pavlov, G.K. and Olesen, B.W. (2014) Sustainable Heating, Cooling and Ventilation of a Plus-Energy House via Photovoltaic/Thermal Panels. *Energy and Buildings*, **83**, 122-129. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.12.064>
- [9] Gholampour, M. and Ameri, M. (2016) Energy and Exergy Analyses of Photovoltaic/Thermal Flat Transpired Collectors: Experimental and Theoretical Study. *Applied Energy*, **164**, 837-856. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.12.042>
- [10] Valeh-E-Sheyda, P., Rahimi, M., Parsamoghadam, A. and Masahi, M.M. (2014) Using a Wind-Driven Ventilator to

- Enhance a Photovoltaic Cell Power Generation. *Energy and Buildings*, **73**, 115-119. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.12.052>
- [11] Bahaidarah, H., Subhan, A., Gandhidasan, P. and Rehman, S. (2013) Performance Evaluation of a PV (Photovoltaic) Module by Back Surface Water Cooling for Hot Climatic Conditions. *Energy*, **59**, 445-453. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.07.050>
- [12] Hasan, A., McCormack, S.J., Huang, M.J. and Norton, B. (2010) Evaluation of Phase Change Materials for Thermal Regulation Enhancement of Building Integrated Photovoltaics. *Solar Energy*, **84**, 1601-1612. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.06.010>
- [13] 周林, 曾意, 郭珂, 张有玉, 李新红, 雷建. 具有电能质量调节功能的光伏并网系统研究进展[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(9): 137-145.
- [14] 姚致清, 于飞, 赵倩, 张群. 基于模块化多电平换流器的大型光伏并网系统仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 27-33.
- [15] Green, M.A., Hishikawa, Y., Warta, W., *et al.* (2017) Solar Cell Efficiency Tables (Version 50). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, **25**, 668-676. <https://doi.org/10.1002/pip.2909>
- [16] Long, L.S., Yang, Y. and Wang, L.P. (2019) Simultaneously Enhanced Solar Absorption and Radiative Cooling with Thin Silica Micro-Grating Coatings for Silicon Solar Cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **197**, 19-24. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2019.04.006>
- [17] Skoplaki, E. and Palyvos, J.A. (2009) On the Temperature Dependence of Photovoltaic Module Electrical Performance: A Review of Efficiency/Power Correlations. *Solar Energy*, **83**, 614-624. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.10.008>