

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.04.022

# 常见光伏阵列拓扑重构方法综述\*

丁 坤<sup>1,2</sup>, 王 祥<sup>1</sup>, 翟泉新<sup>1</sup>, 徐俊伟<sup>1</sup>, 张经炜<sup>1</sup>

(1. 河海大学 机电工程学院, 江苏 常州 213022;

2. 常州市光伏系统集成与生产装备技术重点实验室, 江苏 常州 213022)

**摘要:** 针对光伏发电系统中由于环境和光伏系统本身失配造成的输出功率降低问题,将系统拓扑重构技术应用到光伏发电系统中。在应对失配条件时,目前常采用的增加光伏系统输出功率的方法是使用改进的最大功率跟踪方法,然而该方法已被广泛研究和渐趋成熟,而为了使得光伏系统的输出性能更加优化,对光伏系统拓扑结构的研究已日益受到关注,不同工作环境下对光伏系统的拓扑结构进行重构的方法对于整个光伏系统输出性能的提高有着重大意义。开展了常用光伏阵列拓扑结构重构策略的研究,对其优缺点进行了对比分析,在此基础上,对各种光伏阵列拓扑重构方法进行了评估。研究结果表明,面对不同工作环境时选择合适的光伏阵列拓扑结构,从而可以有效提高光伏阵列的输出特性。

**关键词:** 光伏系统; 失配; 阵列拓扑

中图分类号: TM615; TP24 文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2014)04-0507-05

## Review of common PV array topology reconfiguration methods

DING Kun<sup>1,2</sup>, WANG Xiang<sup>1</sup>, ZHAI Quan-xin<sup>1</sup>, XU Jun-wei<sup>1</sup>, ZHANG Jing-wei<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Hohai University, Changzhou 213022, China;

2. Changzhou Key Laboratory of Photovoltaic System Integration & Production Equipment Technology, Changzhou 213022, China)

**Abstract:** Aiming at solving the problem of power reduction due to the mismatch caused by the environment and the system itself in a PV system, the system topology reconstruction technology was investigated in PV generation system. To deal with the mismatch condition, at present, the method commonly used to increase output power of PV system is using improved method of maximum power tracking, however this method has been widely studied, and in order to improve the output performance of PV system, the study on PV system topology is caused increasingly attention. Under different operation conditions, study on the topology of PV system reconstruction method to improve output power has much more significance. After analysis of plenty of commonly used PV array topology reconfiguration strategies, on the basis of comparing their advantages and disadvantages, the PV array topology reconstruction methods were evaluated. The results indicate that, choosing the appropriate PV array topology when under different operation conditions can improve output performance of the PV array.

**Key words:** photovoltaic(PV)system; mismatch; array topology

## 0 引 言

光伏发电系统在实际的应用中,由于树木、云朵或建筑物对光伏阵列的遮蔽,以及光伏系统中某些组件损坏造成的失配,此时整个光伏系统输出的功率与所

受辐照度不成正比。在某些光伏系统中,由于失配造成的输出损失年均可以达到10%<sup>[1-2]</sup>,在光伏系统中减少由失配造成的输出损失有着积极的意义。目前,普遍使用的用于减少失配的方法是多个组件并联一个旁路二极管。利用并联旁路二极管给失配组件提供低阻

收稿日期: 2013-11-25

基金项目: 江苏省自然科学基金资助项目(BK20131134)

作者简介: 丁 坤(1975-),男,福建泉州人,博士,副教授,主要从事光伏发电技术、电力电子技术方面的研究. E-mail:dkhhu@163.com

抗能量通路<sup>[3-4]</sup>,但失配光伏组件承受反压而不能发电,此外旁路二极管的导通导致了多个局部最大功率点的出现,需要复杂的最大功率点跟踪(MPPT)技术。

目前,常见光伏发电系统中常应用的是集中式拓扑结构,即将组件串联成一串,然后通过多串组件并联输出来构成整个光伏阵列。然而在实际应用的情况中,当光伏系统失配时,集中式拓扑容易造成较大的损失<sup>[5]</sup>。国内外学者对相同失配条件下的光伏系统不同拓扑结构做了大量的研究和分析实验,提出对于不同失配条件下使用不同的阵列拓扑结构,以增加整个光伏系统的最大功率的输出。本研究基于不同的实现方式对光伏阵列拓扑结构重构策略进行分类及概括讨论。

### 1 小型光伏阵列串并联拓扑重构

对于少量组件构成的小型光伏阵列,可以通过简单地使用开关管和二极管电路来连接光伏组件,实现小型光伏系统拓扑重构<sup>[6]</sup>。4个光伏模块PV1、PV2、PV3、PV4的重构电路拓扑如图1所示。图1展现了串联、并联、两串两并3种结构的重构控制过程。通过分析可知,对于4个模块的两并两串连接方式,相比于过往所使用的方法<sup>[7]</sup>,只用了较少的开关和二极管,就可实现了更多的电气结构,在遮阴条件下有更多的结构选择。

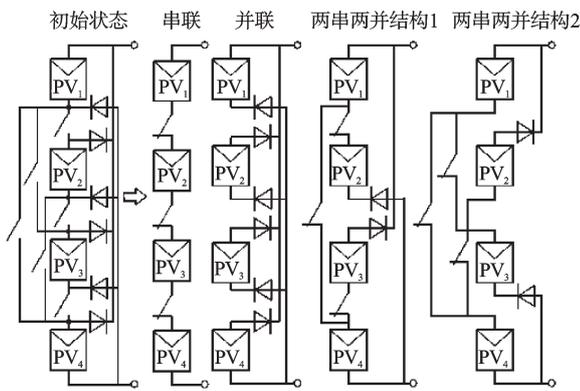


图1 串联、并联、两串两并结构重构

这种拓扑重构的方法,对不同输出电压、电流要求的场合,具有较强的适应能力,大多被应用在小型的光伏系统中,诸如太阳能电力汽车、太阳能路灯等小型的光伏系统中<sup>[8-10]</sup>。其对参数的依赖程度不高,拓扑结构重构取决于实际需求,在这类小型光伏阵列中被广泛应用。

### 2 集中式结构拓扑重构方式

目前光伏阵列应用较多的拓扑结构为SP(series-parallel)型,BL(bridge-link)型,TCT(total-cross-tied)

型<sup>[11]</sup>。

过往研究中,有关学者比较上述3种拓扑方式的优、缺点和输出功率增加和成本,提出了计算不同结构可靠性的方法<sup>[12]</sup>,得出了SP、BL、TCT拓扑结构的可靠性指数<sup>[13]</sup>。

有学者提出<sup>[14]</sup>,针对SP结构,在其发生失配时,根据各组件环境参数(辐照度和温度),确定其短路电流和开路电压,通过简单的开关控制,转换成其他的拓扑结构,轮流地使用SP、BL、TCT拓扑。通过对一系列复杂的拓扑结构进行研究一遍获得最优结构来输出功率<sup>[15]</sup>。也有其他文献<sup>[16-18]</sup>提出了针对不同工况对阵列进行改变,以应对复杂结构以及输出功率和成本的协调。

对于集中式系统,由于目前大部分大型光伏系统采用的是SP结构,当失配发生程度较小时,对整个阵列功率输出影响不大。但对在城市中的分布式光伏系统,面对城市多变环境和失配情况,这类拓扑重构的功率输出有明显增长。

### 3 辐照平衡原理光伏阵列拓扑重构

依据辐照平衡(irradiance equalization)原理<sup>[19]</sup>,研究者可通过控制智能开关的通断来平衡阵列拓扑节点处的辐照大小,从而直接减少部分阴影产生的电流限制的影响。

#### 3.1 利用功率补偿单元进行重构

通过在一个或多个光伏组件上并联功率补偿单元,根据各光伏组件之间的辐照强度不均情况进行处理,并联补偿单元如图2所示。在光伏阵列中,光伏组件进行串、并联,某个组件由于自身局部阴影造成功率较少时,通过给其并联补偿单元以达到与其他组件相同的输出状态。其输出的I-V特性曲线只有一个峰值点,具有后级控制简单的优点,但是当有多个组件发生阴影时,需要用到较多的并联补偿单元,成本昂贵。这种方法常常采用电力电子变换器作为补偿单元,通过控

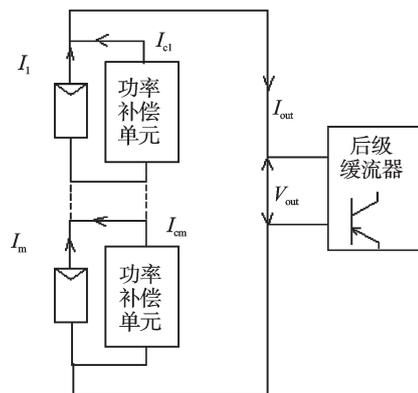


图2 并联补偿单元

制该变换器对每个组件的输出电压进行控制<sup>[20-21]</sup>。

通过采用并联的电力储存单元组件进行补偿<sup>[22]</sup>,通过使用独立的电力储存单元,当组件失配时,并联在组件旁的电容就和失配组件并联共同输出,补偿阵列输出功率。对于简单系统单一组件来说,可以通过该方法提高效率达到最佳节能状态<sup>[23]</sup>,但是对整个阵列影响时,会大大增加成本。

### 3.2 全局重构

通过移动阵列中的组件的方式,来减少失配的损失<sup>[24]</sup>,在失配条件下,对整个光伏阵列进行整体重构,可以大量地提高整个阵列的输出功率。

在整体重构中,可以用来重新配置整个光伏阵列拓扑结构的矩阵开关被广泛应用,研究者通过使用矩阵开关来进行电子化阵列(Electrical Array Reconfiguration, EAR)的重构,最大限度地通过近似条件下相近组件来最大化阵列直流功率的输出。

由光伏组件与逆变器共同组成的光伏系统中,全局重构框图如图3所示,通过控制矩阵开关的通断,可以分别完成下述拓扑结构全局重构,达到不同工作条件下所需拓扑方式<sup>[25]</sup>。

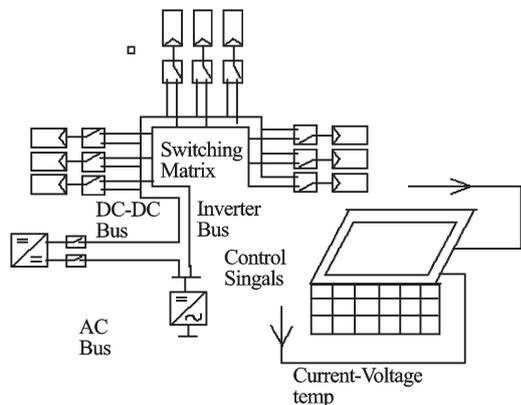


图3 全局重构框图

对于使用分布式系统的光伏系统来说,当发生失配时,该系统可以控制每个光伏组件都工作在其最大功率点,因此可以控制整个系统的输出功率最大。但是实际应用中,失配的组件可能只是一小部分,或者考虑到经济因素以及成本原因,不需要每个组件都接逆变器,因此该系统通过矩阵开关可以根据不同的失配情况,控制多个组件和一个逆变器相连共同输出,以此优化整个阵列输出功率和成本的协调。典型全局重构方式如图4所示。

图4中,开关 Ssr 用于控制各组件之间的串联结构,开关 Sby 用于允许组件从结构的移除,开关 Spu 和 Spd 分别用于连接正端总线和负端总线,以实现各组件的并联。通过矩阵开关控制上述不同功能的开关,

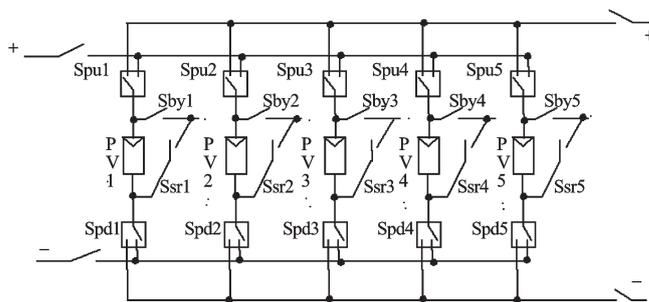


图4 典型全局重构的方式

即可实现不同组件和逆变器的接入方式。

对于正常工作的组件,控制器将有效的组件组成一串;当控制器检查以下各组件时,其工作状态与上一个相同且上述串没有达到饱和(由输出电压决定)则串联入上述串,如果饱和,重新串联入另一串;如果检测到组件处于失配状态,控制器不将该组件串联入串,并旁路这个失配组件。

H. Noguchi, J. Tani, Y. Shimai 等人<sup>[26-28]</sup>对全局重构的方法进行了分析。此类方法也被应用于不同的领域。对阵列在发生失配的情况下,全局重构比起简单的TCT结构以及局部重构要带来更大的功率增加,但是,相应的开关和传感器大量增加,重构算法复杂较难实现,因此使用并不广泛,多处于理论阶段<sup>[29]</sup>。

### 3.3 局部重构

在辐照平衡的基础上,主要被应用的光伏阵列拓扑重构方式是局部重构。该方式通过改变光伏阵列中组件的连接方式,用没有阴影的光伏组件去补偿被遮挡的光伏组件<sup>[30]</sup>。同时也有文献<sup>[31]</sup>提出光伏阵列呈现出一个拥有自有电容调节的用于实时适应光伏发电的外部操作条件。

含自适应库的局部重构如图5所示,该方式使用固定的TCT结构以及可调节的自适应部分<sup>[32]</sup>,其控制策略同样基于辐照平衡原理,将光伏阵列中组件通过矩阵开关分成两部分,固定结构输出部分和作为自适应库的部分。当阵列上出现阴影的时候,通过矩阵开关的通断,利用自适应库的组件匹配固定结构中低输出点的部分通过矩阵开关的控制,改变组件的分布,使得TCT结构中每一行的输出趋于平衡,利用矩阵开关的通断,重构阵列,来缓和辐照失调,通过TCT结构的智能连接,达到每个节点的辐照区域平缓。这样,即使所有节点电流都工作在单个组件的最大功率点电流以下时,整个阵列的输出电压仍可保持在一个可以预估的等级上。

通过矩阵开关的控制,可以将拓扑结构与智能控制电路相结合,方便进行快速变化的阴影以及不同失

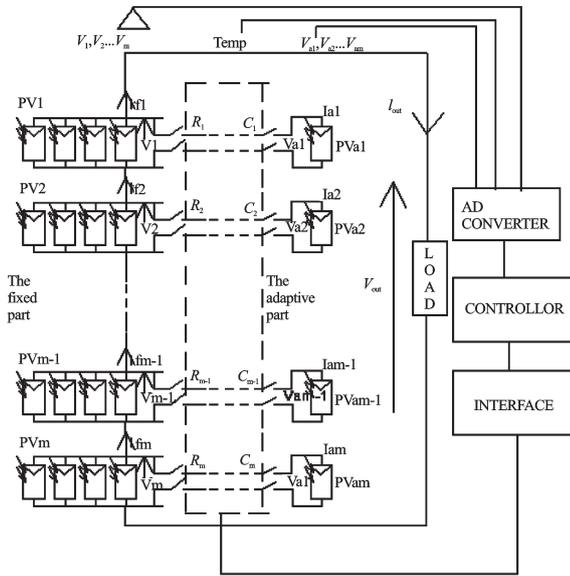


图5 含自适应库的局部重构

配情况时光伏阵列结构的重构。将阵列分为固定部分和自适应库类似的方法,部分组件专门用于补偿发生失配时阵列某些行的损失,虽然可以提高整个系统

输出功率,但是用于补偿的组件在平时输出功率就浪费了。同时对于并网的光伏系统,也有人提出了在组件层次上的重构方法。上述这些方法仍然是基于辐照度平衡的重构策略。

对于阵列中组件局部重构,当失配情况严重时,自适应库不能完全匹配固定结构的功率缺失,并且其控制算法复杂。而对于使用分布式MPPT控制的光伏阵列,需要考虑到当每个组件或者每条支路都使用组件优化器,大大增加了成本。

局部重构方法结合了辐照平衡原理对整体重构进行了优化,其适用于全部光伏系统,由于该方法能够针对不同失配情况作出调整,对于输出功率有明显提高,并且由于改变的只是部分结构,实现复杂性相对简单,成本也相应减少。不过其拓扑方式改变受到复杂判定方法的局限,但是相对于整体重构其复杂性有了显著改善。

本研究所述的各光伏阵列拓扑重构方法优劣比较如表1所示。

表1 光伏阵列拓扑重构方法比较

拓扑重构策略	适用场合	输出功率	参数依赖程度	实现复杂性	应对复杂环境
简单串并联拓扑	小型光伏系统	提高不显著	低	简单	中等
集中式结构拓扑	适用于集中式系统	取决于失配严重程度	中等	中等	高
移除失效电池片	小型光伏系统	电池片失配程度	低	中等	中等
并联补偿单元	中、小型系统	提高明显	中等	简单	高
全局重构	通用	提高明显	高	复杂	高
局部重构	通用	提高明显	高	复杂	高

## 4 结束语

针对对于光伏阵列失配条件下拓扑重构的策略,若干文献提出了相应的解决方法,本研究对这些方法进行了详尽的总结和分析,并比较了其优、缺点。

本研究对光伏阵列拓扑重构策略进行了分析和比较,为后续研究工作提供了铺垫。

### 参考文献(References):

[1] WINTER C J, SIZMANN R L, VAN-HULL L L. Solar Power Plants[M]. Springer-Verlag, 1991.

[2] JANSSON P M, WHITTEN K, SCHMALZEL J L. Photovoltaic Module Shading: Smart Grid Impacts[C]//Sensors Applications Symposium (SAS), 2011 IEEE. SanAntonio: [s. n.], 2011: 323-328.

[3] 宋 菁,徐青山,祁建华,等. 光伏电池运行失配模式及特性分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2010, 22(6): 119-123.

[4] PATEL H, AGARWAL V. Matlab-based modeling to study

the effects of partial shading on PV array characteristics [J]. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, 2008, 23 (1): 302-310.

[5] EL-DEIN M Z S, KAZERANI M, SALAMA M M A. Optimal Photovoltaic Array Reconfiguration to Reduce Partial Shading Losses [J]. **Sustainable Energy, IEEE Transactions on**, 2013, 4(1): 145-153.

[6] 丁 明,陈 中. 遮阴影响下的光伏阵列结构研究[J]. **Electric Power Automation Equipment**, 2011, 31(10): 1-5.

[7] TRIA L A R, ESCOTO M T, ODULIO C M F. Photovoltaic Array Reconfiguration for Maximum Power Transfer [C]//TENCON 2009-2009 IEEE Region 10 Conference. Singapore: [s. n.], 2009: 1-6.

[8] SALAMEH Z M, LIANG C. Optimum Switching Points for Array Reconfiguration Controller [C]//Photovoltaic Specialists Conference, 1990. , Conference Record of the Twenty First IEEE. Kissimmee: [s. n.], 1990: 971-976.

[9] SALAMEH Z M, DAGHER F. The effect of electrical array reconfiguration on the performance of a PV-powered volumetric water pump [J]. **Energy Conversion, IEEE Trans-**

- actions on**, 1990, 5(4): 653–658.
- [10] AUTTAWAITKUL Y, PUNGSIRI B, CHAMMONGTHAI K, et al. A Method of Appropriate Electrical Array Reconfiguration Management for Photovoltaic Powered Car [C]//Circuits and Systems, 1998. IEEE APCCAS 1998. The 1998 IEEE Asia-Pacific Conference on. Chiangmai: [s.n.], 1998: 201–204.
- [11] PICAULT D, RAISON B, BACHA S, et al. Changing Photovoltaic Array Interconnections to Reduce Mismatch Losses: a Case Study [C]//Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2010 9th International Conference on. Rome: [s.n.], 2010: 37–40.
- [12] 刘素梅. 光伏方阵失配现象研究[D]. 汕头: 汕头大学工学院, 2008.
- [13] GAUTAM N K, KAUSHIKA N D. Reliability evaluation of solar photovoltaic arrays [J]. **Solar Energy**. 2002, 72(2): 129–14.
- [14] PICAULT D, RAISON B, BACHA S, et al. Forecasting photovoltaic array power production subject to mismatch losses [J]. **Solar Energy**, 2010, 84(7): 1301–1309.
- [15] CANDELA R, DI D V, RIVA S E, et al. Reconfiguration Techniques of Partial Shaded PV Systems for The Maximization of Electrical Energy Production [C]//Clean Electrical Power, 2007. ICCEP'07. International Conference on. Capri: [s.n.], 2007: 716–719.
- [16] KAUSHIKA N D, GAUTAM N K. Energy yield simulations of interconnected solar PV arrays [J]. **Energy Conversion, IEEE Transactions on**, 2003, 18(1): 127–134.
- [17] PICAULT D, RAISON B, BACHA S, et al. Changing Photovoltaic Array Interconnections to Reduce Mismatch Losses: a Case Study [C]//Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2010 9th International Conference on. Rome: [s.n.], 2010: 37–40.
- [18] DI D V, LA C D, MICELI R, et al. A Mathematical Model to Determine the Electrical Energy Production in Photovoltaic Fields under Mismatch Effect [C]//Clean Electrical Power, 2009 International Conference on. Capri: [s.n.], 2009: 46–51.
- [19] STOREY J, WILSON P, BAGNALL D. Improved Optimization strategy for Irradiance Equalization in Dynamic Photovoltaic Arrays [J]. **Power Electronics, IEEE Transactions on**, 2013, 26(6): 2946–2956.
- [20] SHIMIZU T, HIRAKATA M, KAMEZAWA T, et al. Generation control circuit for photovoltaic modules [J]. **IEEE Trans. On Power Electronic**, 2001, 16(3): 293–300.
- [21] SHIMIZU T, HASHIMOTO O, KIMURA G. A Novel High Performance Utility Interactive Photovoltaic Inverter System [J]. **IEEE Trans. On Power Electronic**, 2003, 18(2): 704–711.
- [22] WANG Y, LIN X, KIM Y, et al. Enhancing Efficiency and Robustness of a Photovoltaic Power System under Partial Shading [C]//Quality Electronic Design (ISQED), 2012 13th International Symposium on. IEEE, 2012: 592–600.
- [23] KIM Y, CHANG N, WANG Y, et al. Maximum Power Transfer Tracking for a Photovoltaic-supercapacitor Energy System [C]//Proceedings of the 16th ACM/IEEE International Symposium on Low Power Electronics and Design. Austin: [s.n.], 2010: 307–312.
- [24] VELASCO G, NEGRONI J J, GUINJOAN F, et al. Irradiance Equalization Method for Output Power Optimization in Plant Oriented Grid-connected PV Generators [C]//Power Electronics and Applications, 2005 European Conference on. Dresden: [s.n.], 2005: 10.
- [25] CHAABAN M A, ALAHMAD M, NEAL J, et al. Adaptive Photovoltaic System [C]//IECON 2010–36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. Glendale: [s.n.], 2010: 3192–3197.
- [26] SHIMAI Y, TANI J, NOGUCHI H, et al. FPGA Implementation of Mixed Integer Quadratic Programming Solver for Mobile Robot Control [C]//Field-Programmable Technology, 2009. FPT 2009. International Conference on. Sydney: [s.n.], 2009: 447–450.
- [27] NOGUCHI H, TANI J, SHIMAI Y, et al. A 34.7-mW quad-core MIQP Solver Processor for Robot Control [C]//Custom Integrated Circuits Conference (CICC), 2010. Sanjose: [s.n.], 2010: 1–4.
- [28] NISHINO M, NOGUCHI H, SHIMAI Y, et al. A 75-variable MIQP Solver Processor for Real-time Autonomous Robot Control [C]//System Integration (SII), 2011 IEEE/SICE International Symposium on. Kyoto: [s.n.], 2011: 469–472.
- [29] ALAHMAD M, CHAABAN M A, SHI J, et al. An adaptive utility interactive photovoltaic system based on a flexible switch matrix to optimize performance in real-time [J]. **Solar Energy**, 2012, 86(3): 951–963.
- [30] 庞志超. 局部阴影条件下基于模糊控制的光伏阵列重构系统的研究[D]. 天津大学机械工程学院 2010.
- [31] NGUYEN D, LEHMAN B. A Reconfigurable Solar Photovoltaic Array under Shadow Conditions [C]//Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2008. APEC 2008. Twenty-Third Annual IEEE. Austin: [s.n.], 2008: 980–986.
- [32] VELASCO Q G, GUINJOAN G F, PIQUÉ L R, et al. Electrical PV array reconfiguration strategy for energy extraction improvement in grid-connected PV systems [J]. **Industrial Electronics, IEEE Transactions on**, 2009, 56(11): 4319–4331.

[编辑:李辉]

本文引用格式:

丁坤,王祥,翟泉新,等. 常见光伏阵列拓扑重构方法综述[J]. 机电工程, 2014, 31(4): 507–511.

DING Kun, WANG Xiang, ZHAI Quan-xin, et al. Review of common PV array topology reconfiguration methods [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2014, 31(4): 507–511.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>