

基于PSCAD的改进后的光伏电池仿真研究

王 琪, 马小三, 李海英

(安徽工业大学电气信息学院, 马鞍山 243000)

摘要: 对传统的光伏电池数学模型进行改进,并在PSCAD仿真环境下对其进行建模。考虑到光伏系统存在最大功率跟踪(maximum power point tracking, MPPT)的问题,因此有必要建立MPPT的仿真模块。系统仿真结果充分体现了改进后光伏电池的有效性,MPPT控制效果非常明显。

关键词: PSCAD仿真;改进后的光伏阵列;最大功率跟踪

中图分类号: TM743

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2012)04-0013-05

Simulation Research of the Modified Photovoltaic (PV) Cell Based on PSCAD

WANG Qi, MA Xiao-san, LI Hai-ying

School of Electric Engineering and Information, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243000, China)

Abstract: By modifying the traditional mathematical model of PV cell, an improved PV model under PSCAD environment has been established. Taking into account the problems of MPPT in PV system, it is necessary to establish MPPT simulation module. The simulation results imply that the effectiveness of modified PV cell, and the control effect of MPPT is very obvious.

Key words: PSCAD simulation; improved PV array; MPPT

0 引言

太阳能光伏发电因其清洁环保、资源丰富等诸多优点而成为当今可再生能源研究和应用的热点,它将成为人类社会能源的基石,世界能源舞台的主角。单个的光伏电池由于其带电量太小而不能被实际应用,所谓光伏模块通常是将一些光伏电池通过串联或并联从而达到一定的电压值和电流值后输出直流电,光伏阵列同理是将光伏模块经过一系列的串并联构成。光伏阵列发出的直流电通过逆变器逆变成标准频率的交流电,这样光伏系统就可以实现并网、孤网或者混网运行^[1-3]。

由于光伏电池和模块是高度非线性的,不可能通过简单的电压源或者电流源对其进行建模。然而,近些年来,很多光伏电池的模型相继被学者提出,这些模型主要分为 3 种基本类型:基于光伏阵列特性建模、根据逆变器的结构特点建模和整体光伏

系统建模。光伏阵列的非线性特点不仅体现在环境温度、光照强度,还与其他环境因素有关,例如灰尘,风速。因此构建完整的光伏电池仍然是个重大挑战。

文[4]利用 MATLAB/Simulink 软件开发了具有友好界面的光伏电池元件模型;文[5]提出了光伏发电系统在孤岛现象下的 DC-DC 全桥开关逆变器的非线性模型,并用 MATLAB/Simulink 软件对其进行了建模仿真,同时将仿真结果与 PSPICE 仿真及硬件试验所得结果进行比较分析;文[6]利用电磁暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC 建立了 1 个光伏直流发电系统;文[7]同样利用电磁暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC 构建了三相光伏并网发电系统;文[6-7]中的光伏阵列都是根据光伏电池的数学模型,利用 FORTRAN 语言编程来实现的,因此光伏阵列输出的直流电效果不是很理想,甚至最后直流电都不能趋于稳定。如果根据光伏电池的数学模型和物理模型加以改进,最后通过电路搭建的方法对其进行建模,上述问题则可迎刃而解。笔者正是基于这样的

收稿日期:2011-11-28; 修回日期:2011-12-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11105001)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(11105001).

考虑,提出了1个改进后的光伏电池模型,并在PSCAD 仿真环境下进行了建模和仿真。

1 单个二极管光伏电池模型

无需过多地考虑光伏电池内部是如何将太阳能转化为电能,标准的光伏电池是1个以单个二极管并联的电流源,其等效电路图见图1。

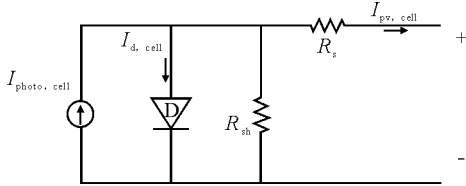


图1 单个二极管光伏电池模型

Fig. 1 Single-diode equivalent circuit of a PV cell

对电路模型运用 KCL 定律可得

$$I_{photo, cell} - I_{d, cell} - \frac{U_d}{R_{sh}} - I_{pv, cell} = 0 \quad (1)$$

$$I_{pv} = I_{photo, cell} - I_{d, cell} \quad (2)$$

$$I_{d, cell} = I_{0, cell} \left[\exp\left(\frac{qU}{akT}\right) - 1 \right] \quad (3)$$

式(1)-(3)中: $I_{photo, cell}$ 为光生电流; $I_{d, cell}$ 为流过二极管的电流; $I_{0, cell}$ 为二极管的饱和电流; $I_{pv, cell}$ 为光伏电池的输出电流; U_d 为光伏电池的输出电压; a 表示二极管的品质因素; q 为电子电量; k 为波尔兹曼常数; T 为光伏电池的绝对温度; R_{sh} 为分流电阻, 考虑到流向地面的电流。

对于光伏模块的完整模型应该包括各个串并联光伏电池的影响。因此, 式(2)可表示为

$$I_{pv} = I_{sc} - I_0 \left\{ \exp\left[\frac{q(U + I_{pv}R_s)}{aU_t}\right] - 1 \right\} - \frac{U + I_{pv}R_s}{R_{sh}} \quad (4)$$

$$I_{sc} = I_{photo, cell} N_p; I_0 = I_{0, cell} N_p \quad (5)$$

式(4)、(5)中: R_s 表示电池内部的电能消耗; I_{pv} 为光伏电池的输出电流; I_{sc} 为光伏电池的短路电流; N_p 为光伏模块单元并联数。

光伏电池的光生电流线性地取决于光照强度, 并且也受温度的影响, 从而

$$I_{photo, cell, n}(T_n) = [I_{photo, cell, o}(T_0) + K_1 \Delta T] \frac{G_n}{G_0} \quad (6)$$

式(6)中: $I_{photo, cell, o}(T_0)$ 是光伏电池在光照强度 1000 W/m^2 , 环境温度在 25°C 下产生的光生电流; $\Delta T = T_n - T_0$ 为实际温度, K_1 ; T_n 为额定温度, K_1 ; G_0 为电池表面的光照强度, W/m^2 ; G_n 为额定光照强度, W/m^2 。

二极管饱和电流可以表示为

$$I_0 = I_{0, n} \left(\frac{T_n}{T_0} \right)^3 \exp\left[\frac{qE_g}{T_n} \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (7)$$

式(7)中: $I_{0, n}$ 为二极管在光照强度 1000 W/m^2 , 环境温度在 25°C 下的饱和电流; E_g 为光伏电的最后输出电压。

1.1 光伏电池的改进

改进的主要思想就是在光伏电池的数学模型鲁棒性很强的情况下, 将其他环境因素对光伏电池的影响尽量考虑进去。对于式(7), 由于二极管饱和电流随温度的变化, 将其电压系数 K_U 和电流系数 K_I 考虑其中, 则有

$$I_0 = \frac{I_{sc, n} + K_I \Delta T}{\exp[(U_{oc, n} + K_U \Delta T / aU)] - 1} \quad (8)$$

此处改进的目的是由于二极管饱和电流对温度有很强的依赖性, 在温度波动范围比较大的情况下, 光伏模块开路电压的变化相对较大, 也就是说由于实验数据中光伏模块的温度变化较大, 为了使开路电压与变化的温度之间得到一个合适的匹配, 从而将电压系数 K_U 和电流系数 K_I 考虑进去, 来调整其开路电压, 使得光伏电池输出的直流电更加稳定, 也即光伏电池特性曲线更加平滑, 无太大的扰动^[8]。

根据以上光伏电池的数学模型和物理模型, 通过 PSCAD/EMTDC 对光伏阵列进行建模, 用搭建电路的方法代替 FORTRAN 语言编程, 同时将模型的改进之处考虑到建模中, 从而得到的光伏阵列见图2。

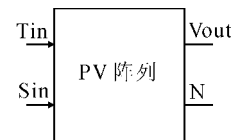


图2 光伏阵列模块

Fig. 2 Model of photovoltaic array

1.2 光伏电池的电气特性

在光伏发电系统中, 光伏电池实际输出功率往往取决于3个因素: 光照强度、电池温度和负载阻抗。光照强度主要影响光伏电池的短路电流, 对开路电压和最大功率(MPP)所对应的电压影响很小。随着光强的增加, 短路电流变大, MPP 也提高。而光伏电池的温度主要影响其开路电压, 对短路电流的影响较小。随着温度的升高, 开路电压降低, MPP 也随之降低^[9]。典型的光伏电池(电流 I —电压 U)、(功率 P —电压 U)特性见图3-5。

2 最大功率跟踪

最大功率跟踪控制(MPPT)策略实时检测光伏阵列的输出功率, 采用一定的控制算法预测当前工况下阵列可能的最大功率输出, 通过改变当前的阻抗

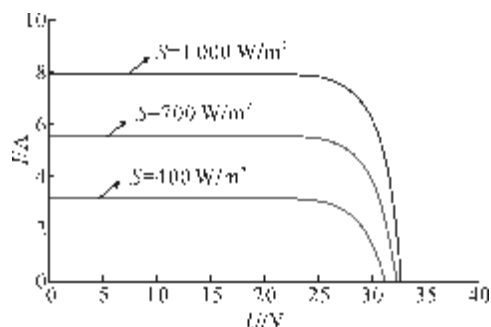


图3 不同光照强度下的 I-U 关系曲线

Fig. 3 The I-U curve of different sunlight intensity

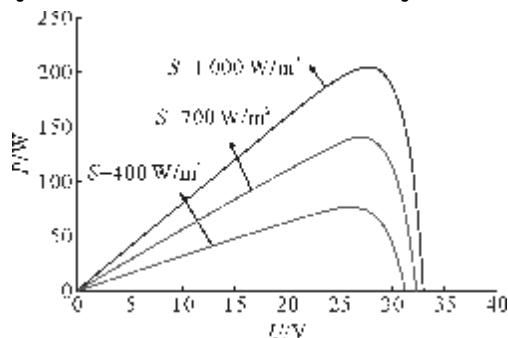


图4 不同光照强度下的 P-U 关系曲线

Fig. 4 The P-U curve of different sunlight intensity

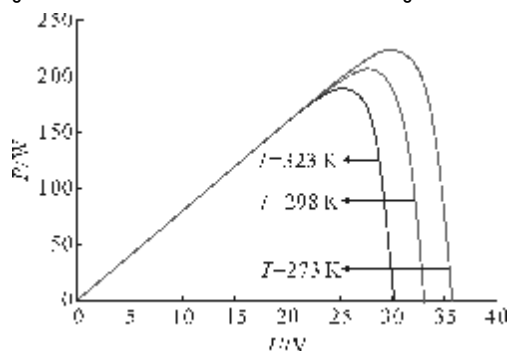


图5 光伏电池 P-U 特性随温度变化曲线

Fig. 5 The P-U curve of different temperature

情况来满足最大功率输出的要求。这样即使光伏电池的结温升高使得阵列的输出功率减少,系统仍然可以运行在当前工况的最佳状态^[10]。目前最常用的最大功率跟踪方法有:恒定电压法^[11-12]、扰动观察法^[13-14]、电导增量法^[15-17]、滞环比较法^[18]、间歇扫描法^[19]、最优梯度法^[20]、模糊控制法^[21]和神经网络预测法^[22]等。笔者根据扰动观察法(perturb & observe algorithms, P&O)对 MPPT 进行建模,其原理是每隔一定的时间增加或者减小电压,并观察其后的功率变化方向,来决定下一步的控制信号,控制电路比较简单,实现较为方便。因此笔者采用扰动观察法来实现最大功率跟踪。其控制流程图见图 6。

根据扰动观察法的基本思想利用 PSCAD/EMTDC 软件对其进行建模,得到以下功能模块见图 7。

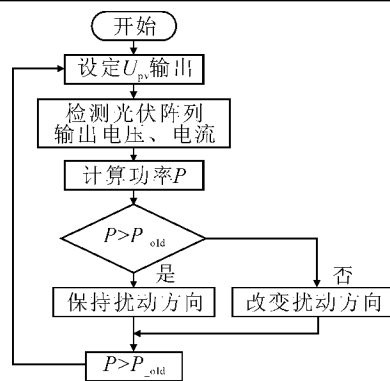


图6 扰动观察法控制流程图

Fig. 6 Flow chart of P&O control

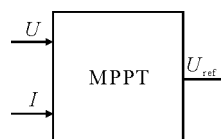


图7 MPPT 控制模块

Fig. 7 Model of MPPT controller

3 仿真结果及分析

为了验证改进后的光伏阵列模块和 MPPT 模块的正确性,建立如图 8 所示的系统对其进行仿真。

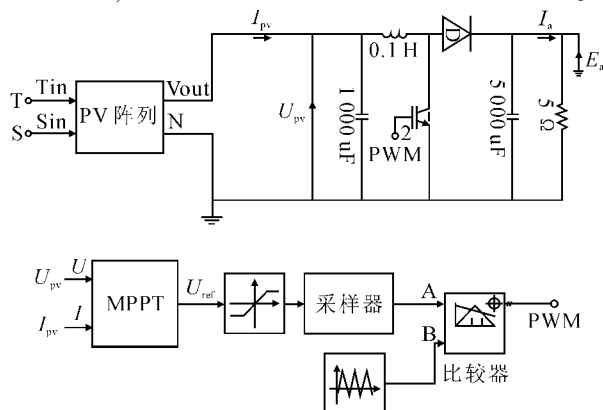


图8 系统仿真图

Fig. 8 Figure of simulation system

由图 8 不难看出,该系统由 PV 阵列输出的直流电,通过 boost(DC-DC)升压电路向负载供电。MPPT 模块输出的信号经过采样后与三角波相比较,从而生成 PWM 控制信号。

首先验证改进后的光伏电池的输出特性曲线,图 9、10 分别为光伏电池输出的 I-U 和 P-U 特性曲线,和 1.2 节中的图 3、4 是完全对应的,并且这 2 条特性曲线非常平滑,没有出现抖动现象,这充分说明了改进型光伏电池建模是成功的,改进之处也就体现在此。

光伏阵列输出功率图见图 11。光伏阵列的输出功率在最大功率点附近微弱震荡,震荡的幅度非常

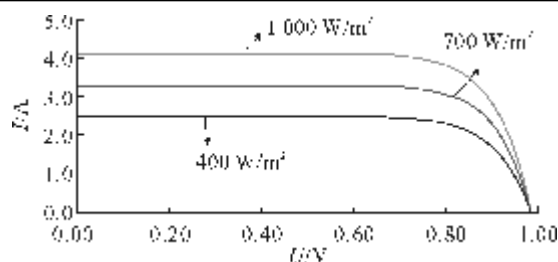


图9 不同光照强度下的 I-U 关系曲线

Fig. 9 The I-U curve of different sunlight intensity

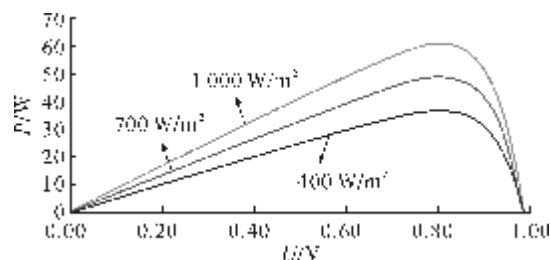


图10 不同光照强度下的 P-U 关系曲线

Fig. 10 The P-U curve of different sunlight intensity

小,最后在 0.2 s 左右趋于平稳,输出稳定的直流功率。从图 11 可以发现,PV 模块输出了理想的直流电,而 MPPT 模块同样捕捉到了光伏阵列的最大功率,并以最大功率输出。

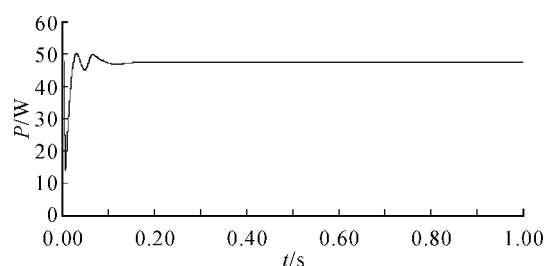


图11 光伏阵列输出功率图

Fig. 11 Output power of PV array

环境温度在 25 ℃下将光照强度从 1 000 W/m² 分别降至 750 W/m² 和 500 W/m² 时,观察光伏阵列的输出电压和电流见图 12、13。

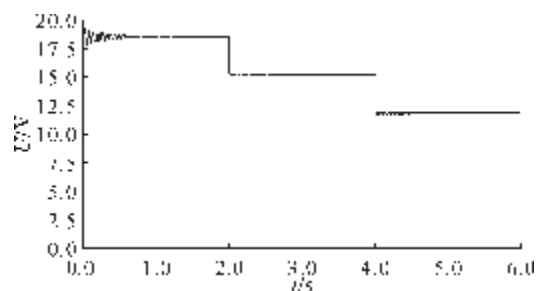


图12 光伏阵列输出电压随光照强度的变化

Fig. 12 Changes of PV array output voltage with sunlight intensity

从图 12、13 可知,改进后光伏阵列的动态响应速度非常快,在 0.1 s 左右其输出电压和电流就能

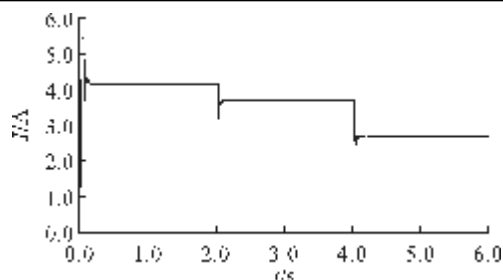


图13 光伏阵列输出电流随光照强度的变化

Fig. 13 Changes of PV array output electric current with sunlight intensity

趋于稳定,与文[6]中的光伏阵列输出电压电流波形相比,文中改进后的光伏阵列的电压和电流波形都是以稳定的直流电输出,基本上不存在小幅震荡,这点充分体现了改进后光伏阵列模块建模的正确性。而且从图 12、13 中不难看出在 2 s 时刻将光强从 1 000 W/m² 切换到 750 W/m² 和 4 s 时刻将光强从 750 W/m² 切换到 500 W/m²,不管是输出电压还是输出电流都能保持在最大功率表点附近,MPPT 的控制效果非常明显,基本不会造成功率损失。

4 结语

不再拘泥于以往光伏阵列的建模方法,通过对其进行改进,并采用搭建电路的方法将其数学模型和物理模型描述出来,从而构成光伏阵列。对 MPPT 建模时,采用扰动观察法来控制最大功率输出。仿真结果充分验证了这 2 个模块的有效性,改进后的仿真效果非常明显。

参考文献:

- [1] KISHOR N, MOHANTY S R, VILLALVA M G, et al. Simulation of PV array output power for modified PV cell model [J]. IEEE International Conference on Power and Energy, 2010, 29(1): 533-538.
- [2] 韩俊,徐政,李侠.基于 PSCAD/EMTDC 的 24 脉波整流器模型研究[J].高压电器,2010,46(12):18-21.
HAN Jun, XU Zheng, LI Xia. Research on 24-pulse rectifier model based on PSCAD/EMTDC[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(12): 18-21.
- [3] 张琪祁,徐政.考虑配网电压暂态的大型光伏电站接入点仿真研究[J].高压电器,2010,46(12):54-58.
ZHANG Qi-qi, XU Zheng. Simulation study on integration siting of large-scale PV plant considering voltage fluctuation in distribution network[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(12): 54-58.
- [4] 茆美琴,余世杰,苏建徽.带有 MPPT 功能的光伏阵列 Matlab 通用仿真模型[J].系统仿真学报,2005,17(5): 1248-1251.

- MAO Mei-qin, YU Shi-jie, SU Jian-hui. Versatile Matlab simulation model for photovoltaic array with MPPT function[J]. System Simulation, 2005, 17(5): 1248-1251.
- [5] CHAUYAWATTO N, KIRTIKARA K, MONYAKUL V, et al. DC-AC switching converter modelings of a PV gridconnected system under islanding phenomena[J]. Renewable Energy, 2009(34): 2536-2544.
- [6] 孙自勇, 宇 航, 颜干贵, 等. 基于 PSCAD 的光伏阵列和 MPPT 控制器的仿真模型[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(19): 61-64.
- SUN Zi-yong, YU Hang, YAN Gan-gui, et al. PSCAD simulation models for photovoltaic array and MPPT controller[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(19): 61-64.
- [7] 姚致清, 张 茜, 刘喜梅. 基于 PSCAD/EMTDC 的三相光伏并网发电系统仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(17): 76-81.
- YAO Zhi-qing, ZHANG Qian, LIU Xi-mei. Research on simulation of a three-phase grid-connected photovoltaic generation system based on PSCAD/EMTDC[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(17): 76-81.
- [8] VILLALVA M G, GAZOLI J R, FILHO E R. Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(5): 1198-1208.
- [9] 朱铭炼, 李臣松, 陈 新, 等. 一种应用于光伏系统 MPPT 的变步长扰动观察法[J]. 电力电子技术, 2010, 44(1): 20-22.
- ZHU Ming-lian, LI Chen-song, CHEN Xin, et al. A variable step size P&O MPPT method for PV systems[J]. Power Electronics, 2010, 44(1): 20-22.
- [10] 赵争鸣. 太阳能光伏发电及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- ZHAO Zheng-ming. Photovoltaic generation and application [M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [11] WASYNCZUK O. Dynamic behavior of a class of photovoltaic power systems[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1983, 102(9): 3031-3037.
- [12] KOUTROULIS E, KALAITZAKIS K, VOULGARIS N C. Development of a microcontroller-based, photovoltaic maximum power point tracking control system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2001, 16(1): 46-54.
- [13] HUSSEIN K H, MUTA I. Maximum photovoltaic power tracking: an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions[J]. IEEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution, 1995, 142(1): 59-64.
- [14] NOGUCHI T, TOGASHI S, NAKAMOTO R. Short-current pulse-based adaptive maximum power point tracking for a photovoltaic power generation system[J]. Electrical Engineering, 2002, 139(1): 65-72.
- [15] ENSLIN J H R, WOLF M S, SNYMAN D B, et al. Integrated photovoltaic maximum power point tracking converter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1997, 44(6): 769-773.
- [16] KUO Y C, LIANG T J, CHEN J F. Novel maximum power point tracking controller for photovoltaic energy conversion system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2001, 48(3): 594-601.
- [17] 叶满园. 电导增量法实现 MPPT 单级光伏并网逆变器的仿真研究[J]. 防爆电机, 2006, 41(2): 32-35.
- YE Man-yuan. Emulation of MPPT single-stage photovoltaic parallel mains inverter by conductance increment method [J]. Explosion-proof Electric Machine, 2006, 41(2): 32-35.
- [18] HSIAO Ying-tung, CHEN China-hong. Maximum power tracking for photovoltaic power system[J]. Industry Application Conference, 2002, 2(10): 1035-1040.
- [19] 欧阳名三. 独立光伏系统中蓄电池管理的研究[D]. 安徽: 合肥工业大学, 2004.
- OUYANG Ming-san. Study on the batteries management in stand-alone photovoltaic system[D]. Anhui: Hefei University of Technology, 2004.
- [20] SAMIMI J, SOLEIMANI E A, ZABIHI M S. Optimal sizing of photovoltaic system in varied climates[J]. Solar Energy, 1997, 60(2): 97-107.
- [21] VEERACHARY M, SENJYU T, UEZATO K. Neural-network-based maximum power point tracking of coupled-inductor interleaved boost converter supplied PV system using fuzzy controller, industrial electronics[J]. IEEE Transactions, 2003, 50(4): 749-758.
- [22] PREMRUDEEPREECHACHARN S, PATANAPIRONM N. Solar-array modeling and maximum power point tracking using neural networks[J]. Power Tech. Conference Proceedings, 2003, 2(5): 23-26.
- 王 琪(1987—), 男, 硕士研究生, 主要从事微电网技术研究。
- 马小三(1980—), 男, 副教授, 主要研究方向量子纠缠在量子信息处理中的作用。

~~~~~

**欢迎投稿! 欢迎订阅! 欢迎评刊! 欢迎刊登广告!**