

基于变步长与非对称模糊的 光伏 MPPT 控制策略*

杨旭红, 尹聪聪

(上海市电站自动化重点实验室 上海电力学院自动化工程学院, 上海 200090)

摘要: 针对于光伏发电系统的输出特性, 容易受到外界变数的影响而出现非对称的强非线性特征, 输出的功率会偏离最大输出功率点的现象。分析了最大功率点跟踪的几种常用控制策略的优缺点, 对 $P-U$ 曲线进行了分析, 提出了非对称模糊与变步长电导增量法相结合的控制策略。这里的变步长电导增量法可以在远离最大功率点两侧时, 快速靠近最大功率点, 当进一步靠近最大功率点区间附近时, 采取非对称模糊控制进行寻优, 能够较好地削弱系统在最大功率点周围的振荡现象, 提升整个系统的稳定性能。通过 MATLAB/Simulink 进行建模仿真对比, 得出所提的方法有较好的动态性能。

关键词: 最大功率点跟踪; 非对称模糊; 变步长; 电导增量法

中图分类号: TM 301.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2018)04-0033-06

Photovoltaic MPPT Control Strategy Based on Variable Step Size and Asymmetric Fuzzy*

YANG Xuhong, YIN Congcong

(Shanghai Key Laboratory of Power Station Automation Technology, Automatic Engineering of
Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: In view of the output characteristics of photovoltaic power generation system, it was vulnerable to the influence of external variables and presents asymmetric strong nonlinearity, and the output power often deviates from the maximum output power point. Here we discuss the advantages and disadvantages of several commonly used maximum power point tracking control method, the $P-U$ curve was analyzed, and puts forward the method of asymmetric fuzzy and variable step incremental conductance method combining the variable step incremental conductance method here can be far away from the maximum power point on both sides, fast approaching the maximum power point. When further near the maximum power point near the interval, at this time, the asymmetric fuzzy control optimization, could effectively eliminate the oscillation phenomenon in the vicinity of the maximum power point, improve the stability of the system. The simulation results in MATLAB/Simulink showed that the proposed method had better dynamic performance.

Key words: maximum power point tracking (MPPT); asymmetric fuzzy; variable step size; incremental conductance (INC)

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(61203224); 上海自然科学基金项目(13ZR1417800); 上海市重点科技攻关计划(上海市科委地方院校能力建设项)(14110500700); 上海市科技创新行动技术高新技术领域重点项目(14511101200); 上海市电站自动化技术重点实验室开放课题(13DZ2273800)

作者简介: 杨旭红(1969—), 女, 教授, 硕士生导师, 研究方向为智能电网控制技术、新能源发电及储能技术、火电和核电机组的仿真建模及控制技术。

尹聪聪(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为微电网控制技术。

0 引言

太阳能在可持续发展的新能源中占有极其重要的部分,同时具有分布广泛、环保、清洁、可以大规模利用等优点,因此得到了大规模的应用^[1]。

近年来,众多科研工作者对于光伏发电系统的最大功率点跟踪(Maximum Power Point Tracking, MPPT)进行了研究与创新,提出并涌现了很多较好的控制方法。总体来讲,依据其实际机理和算法特点可大致分为3类:(1)基于优化数学模型的间接控制方法。其主要包括恒定电压法、开路电压系数法、短路电流系数法^[2-4]。恒定电压法,依据当温度不变,只有外界光照强度改变时,光伏电池的输出功率特性曲线是一簇单峰值曲线,光伏电池就会一直工作在最大功率点(Maximum Power Point, MPP)附近。然而它对于温度的要求较为严格,如果外界温度发生变化,就会产生较大误差。开路电压系数法与短路电流系数法相似,都是对恒定电压法的优化改进,克服温度变化的问题,但缺点是需要进行周期性地断开光伏电池与负载来检测开路电压,功率损失较大,得到的并不是MPP。(2)基于采样数据的直接控制方法。主要包括电导增量法、扰动观察法等^[5-6]。这类算法的特点是,需要连续采样光伏电池的端电压与端电流数据,通过控制算法去直接控制目标系统的工作点,如占空比*D*,精度较高,鲁棒特性较好。二者相似之处是需要不断对光伏电池输出电压进行扰动来跟踪最大功率点,不同在于电导增量法一旦达到MPP就不再施加扰动。(3)基于先进控制理论的MPPT算法。这类算法的特点是以先进控制理论作为基础,针对光伏发电系统具有的强非线性和时不变性特征,主要包括神经网络、滑模变结构、模糊逻辑算法等^[7-9]。神经网络算法进行MPPT控制精度较高,但是需要对电池板进行训练以获取控制规则,当电池板有差异时,参数就不同,操作麻烦,训练时间长。滑模变结构控制量为*S*,当*S* ≥ 0时,*U* = 0;当*S* < 0, *U* = 1。通过不断变化的开关特性,强迫系统在一定条件下在设定的状态轨道附近做较小幅度、较高频率地上下滑模运动,以达到并保持设计的滑动面上。

模糊也是一种较理想的控制策略。本文在在

上基础上进行了改进,通过MATLAB/Simulink的建模仿真对比,用变步长方法进行快速跟踪,然后用非对称模糊控制的方法精确跟踪并优化,减小了振荡,提高了系统稳定性。

1 光伏电池输出特性

光伏电池利用半导体材料的物理光伏效应能将太阳能转变成电能,其输出特性在一定温度条件下,具有会随光照强度的变化而变化的特点^[10]。建立其数学等效电路框图,如图1所示。

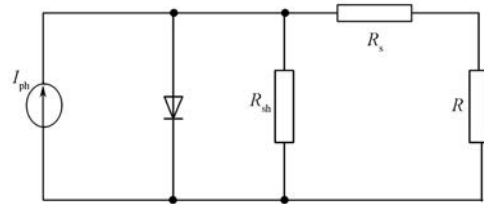


图1 太阳能等效电路图

在实际的工程应用中,其输出的电流为

$$I = I_{sc} \left\{ 1 - K_1 \left[1 - \exp\left(\frac{U + \Phi}{K_2 U_{oc}}\right) \right] \right\} + DI \quad (1)$$

其中,

$$\begin{cases} K_1 = \left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right) \exp\left(\frac{-U}{K_2 U_{oc}}\right) \\ K_2 = \left(\frac{U_m}{U_{oc}}\right) \left[\ln\left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}}\right) \right]^{-1} \\ DI = a \frac{S}{S_B} (T - T_B) + I_{sc} \left(\frac{S}{S_B} - 1\right) \\ \Phi = b(T - T_B) + DIR_s \end{cases} \quad (2)$$

式中: I_{sc} ——电池的短路电流;

I_m ——最大功率点时对应电流;

U_{oc} ——电路电压;

U ——输出电压;

U_m ——最大功率点时对应电压;

I ——光伏电板输出电流;

a, b ——电流变化时的温度系数与电压变化时的温度系数;

T, S ——光伏电池板的温度与光照强度;

T_B, S_B ——标准状况下的光伏电池板的温度与光照强度,一般标准状况下取为 25 °C、1 000 W/m²;

D ——占空比;

I ——光伏电板输出电流;
 R_s ——串联电阻。

一般状况下, 串联电阻 R_s 很小, 而并联电阻 R_{sh} 很大, 所以理论计算中 R_s 与 R_{sh} 部分忽略不考虑^[11]。一般标准状况下, 光伏电池输出的功率公式:

$$P(u) = uI_{sc} \left\{ 1 - C_1 \left[\exp\left(\frac{u}{C_2 U_{oc}}\right) - 1 \right] \right\} \quad (3)$$

按照上面理论标准状况下得出光伏电池数学模型, 接着在 MATLAB/Simulink 搭建光伏电池的仿真, 验证在不同光照强度条件下的光伏电池的输出特性。光伏电池部分的主要参数 I_m 、 U_m 、 I_{sc} 、 U_{oc} 分别是 4.2 A、32 V、4.6 A、41 V。把温度 T 设定在 25 °C, 接着设置光照强度 S 的值分别是 600、800、1 000 W/m², 得到其输出特性 $P-U$ 变化图表, 如图 2 所示。

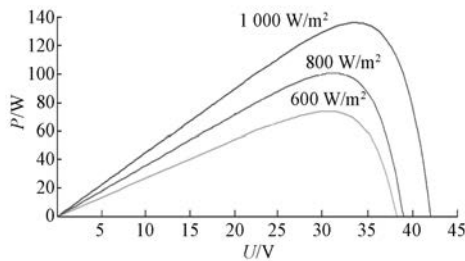


图 2 恒温下光伏电池 $P-U$ 曲线

在仿真的结果图 2 里, 易得出 MATLAB/Simulink 中搭建的光伏电池输出功率 P 。在一定范围里面, 随着光照强度的增加而加强, 符合光伏电池实际的输出特性。图 3 所示的光伏电池综合输出特性, 则满足其后续仿真所要求。

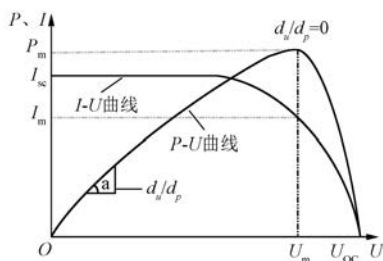


图 3 光伏电池输出特性

2 变步长部分

2.1 变步长算法的基本原理

因为传统的定步长响应速度与跟踪精度有着一

定的不足, 所以, 科研学者多采用变步长策略。一般分为两种: (1) 按照相关功率一阶导数值大小赋予不同快慢的步长; (2) 把光伏曲线 $P'(u)$ 的导数直接当作扰动步长的参数, 从而步长就会在 MPP 两侧做相关自适应性的调整, 比如, 当工作在 MPP 左侧时, 进行正方向扰动, 而在右侧时, 则进行反方向扰动, 且在距离 MPP 越近时步长越小^[12]。

将输出功率公式 $P(u)$ 求一次导数, 则得 $P'(u)$ 相关一阶导数表达式为

$$P'(u) = I_{sc} \left[1 + C_1 - C_1 \exp\left(\frac{u}{C_2 U_{oc}}\right) \right] - \frac{C_1 I_{sc} u}{C_2 U_{oc}} \exp\left(\frac{u}{C_2 U_{oc}}\right) \quad (4)$$

在标准测试下, 绘制 $P-U$ 曲线与 $|P'(u)|$ 曲线, 如图 4 所示。在 MPP 左侧时 $P'(u)$ 为正, 而工作在 MPP 右侧 $P'(u)$ 为负, 符合扰动方向的要求且两侧为关于 $|u-U_m|$ 的单调减函数, 这就符合作为步长变化直接参数的条件。其表达式为

$$D(k) = D(k-1) \pm aN(\Delta P/\Delta U) \quad (5)$$

式中: $D(k)$ ——第 k 个周期的占空比;

N ——变步长的调整系数, 常规的变步长方法里面 N 一般是 $P'(u)$;

a ——可调常数。

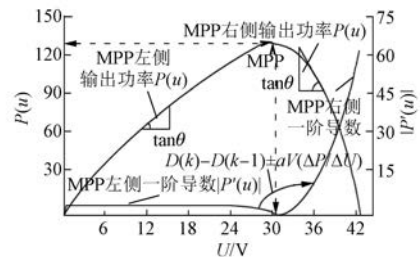


图 4 光伏电池 $P(u)$ 与 $|P'(u)|$ 特性曲线

从图 4 相关特性曲线里面, 能够得出传统方法中直接把 $|P'(u)|$ 当作参数的变步长方法有着一定的不足: 当工作在 MPP 右侧时, $|P'(u)|$ 变化率绝对值远大于左侧, 且二次导数 $P''(u)$ 并不关于 $|u-U_m|$ 呈单调递减, 那么就会出现 MPP 两侧工作点的步长差异较大化了, 所以就会对这种传统变步长方法的响应特性产生影响, 表现为输出特性部分振荡的缺陷。

2.2 优化步长参数的基本思想

这里变步长部分取 $N = \arctan[P'(u)]$, a 根

据输出特性尽量取的比较大。图 5 是变步长系数的一阶导数,根据高等数学反三角函数,求导得:

$$y = \arctan(x) = \frac{1}{1+x^2} \quad (6)$$

$$N' = \arctan[P'(u)] = \frac{1}{1+[P'(u)]^2} \quad (7)$$

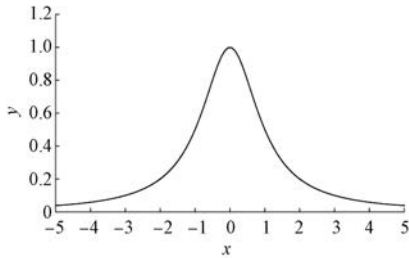


图 5 变步长参数的变化率

为了得到较好效果,本文采用了非对称模糊与变步长相结合的方法,其中,变步长部分是在远离 MPP 两侧时,为了快速接近 MPP,当靠近 MPP 附近的区间时,为了更进一步优化性能,此时,结合采用非对称模糊控制进行寻优。

3 非对称模糊部分

3.1 非对称模糊控制的基本思想

依照上文理论分析易观察到,采取恰当的占空比 D 和步长,对 MPPT 的优化输出特性效果会产生直接影响,因为常规控制方式与常规模糊控制隶属度函数具有对称性特征,而光伏电池 MPP 两边的输出特性并不具有对称性特点,倘若采取有对称性特点的传统模糊控制, MPP 两侧输出特性效果就会有所偏颇,具体体现在 MPP 周边呈现小范围的振荡缺陷,所以依照光伏电池输出特性,这里提出并采用非对称模糊控制策略,在 MPP 两侧建立不同的隶属度函数与不同的控制策略,对 MPP 进行跟踪^[12-13]。非对称 Fuzzy 控制策略框图,如图 6 所示。

光伏发电系统正是一个强非线性系统,光伏电池的输出特性曲线很难用特别精确的数学模型来描述,光伏电池的 MPPT 也不需要特别的光伏电池精准数学模型,而是通过不断调节可控的参数值,使光伏电池的输出特性曲线接近 MPP 寻优的过程,这恰恰切合了对被控对象的模糊控制技术特点,所以,采取模糊控制策略对光伏电池

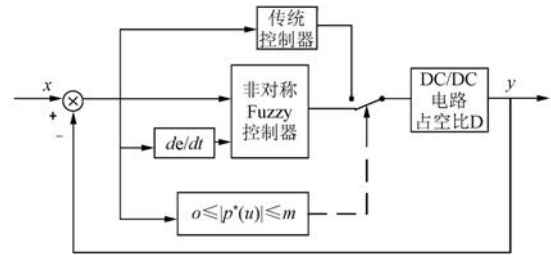


图 6 非对称 Fuzzy 控制策略框图

MPPT 进行控制就比较合适^[14]。

3.2 非对称模糊控制器的设计

非对称模糊控制器 (Asymmetric Fuzzy Logic Controller, AFLC), 本文主要对其隶属度函数非对称模糊化进行设计^[15]。传统模糊控制器通常把误差 e 与误差变化量 Δe 作为模糊的输入,本文设计的非对称模糊逻辑控制器输入量分别是:有光伏电池输出功率 P 的变化量与输出电压 u 的变化量的比值, e 表示功率误差, Δe 表示误差变化率。第 K 时刻的表达式如式(8)、式(9)所示:

$$e(k) = \frac{p(k) - p(k-1)}{u(k) - u(k-1)} \quad (8)$$

$$\Delta e(k) = e(k) - e(k-1) \quad (9)$$

式中: $p(k)$ 、 $u(k)$ ——光伏电池当前 K 时刻的输出功率与电压。

在极短时间内,可以将 $e(k)$ 看作 $P-U$ 特性曲线某一点的斜率。

控制器的输出控制量为电压调节量 du 。在控制过程中,被观测量通常是在一定精确范围内的精确数值量。为了便于控制,首先要先将输入变量从基本论域映射到与其对应的模糊语言变量论域上。这里,采用模糊语言变量 PB(正大)、PM(正中)、PS(正小)、ZE(零)、NS(负小)、NM(负中)、NB(负大)。这 7 个语言值划分模糊控制器的输入量与输出量的等级^[15]。一般在模糊的控制系统中,随着隶属函数个数的增加,系统的控制精度会相应有所提高。

本设计中,选择梯形与三角形隶属度函数为主,考虑到光伏电池 $P-U$ 输出特性的非对称性特征,为了提升模糊控制器精度,能较精确地表现光伏电池的 $P-U$ 输出特性。这里采用的隶属度函数都是具有非对称性能的。隶属度函数设计原则,是根据光伏电池 $P-U$ 特性曲线,由相同的电

压变化引起的功率变化在光伏电池 MPP 右侧比左侧较大,为了更好地提升 MPPT 精度,对 MPP 右侧需要做较小的步长扰动,因此选择的输出变量里面负论域的最大值要比正论域的最大值小。经过多次调节后的隶属度的函数,如图 7、图 8 所示。

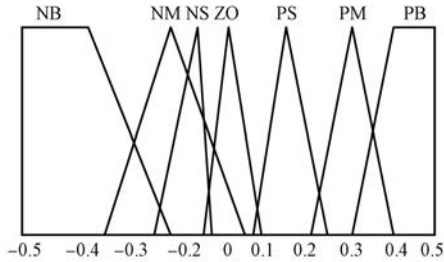


图 7 误差 e 的隶属度函数

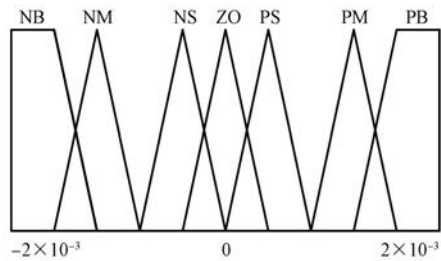


图 8 模糊控制器输出量的隶属度函数

本文应用 IF A AND B THEN C 模糊规则,得到模糊规则表,如表 1 所示。

表 1 模糊规则表

ES	E						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZE
NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZE	PS
NS	NB	NB	NM	NS	ZE	PS	PM
ZE	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
PS	NM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB
PM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB	PB
PB	ZE	PS	PM	PB	PB	PB	PB

4 仿真与分析

在 MATLAB/Simulink 建立仿真模型。仿真基于 Boost 电路模块建立的,含有光伏模块、DC/DC 电路、非对称模糊 PID 控制器构成。整体光

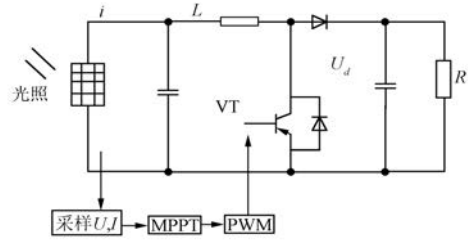


图 9 仿真结构框图

伏发电系统仿真框图,如图 9 所示。

部分参数如下:光伏电池板的最大电流 $I_{sc} = 3.5 \text{ A}$,最大功率点电流 $I_m = 3 \text{ A}$,最大输出电压 $U_{oc} = 600 \text{ V}$,最大功率点电压 $U_m = 380 \text{ V}$,电阻 $R = 100 \Omega$ 。两个电容 C 从电路图左到右分别是 $10e-6 \text{ F}$ 、 $1e-6 \text{ F}$,电感 L 值设为 $200e-3 \text{ H}$,仿真采用 ode45 算法。设光伏电池面板的温度 T 是 $25 \text{ }^\circ\text{C}$,仿真的时间是 0.8 s ,在 0.2 s 的时刻,光照强度 S 突然从 1000 W/m^2 降至 800 W/m^2 ,然后又又在第 0.4 s 时刻再升至 1000 W/m^2 ,进行仿真。

仿真结果如图 10、图 11 所示。图 10、图 11 表明基于变步长与非对称模糊控制相结合的电导增量控制算法能够比较好的追踪到 MPP,但是相比较,改进后的更加稳定与平稳,没有较大振荡,在后面仿真中的外界因数发生变化时,系统也能快速、准确地追踪到 MPP,也具有较好的稳定性。总体效果而言,比传统的定步长光伏 MPPT 控制策略较优异。

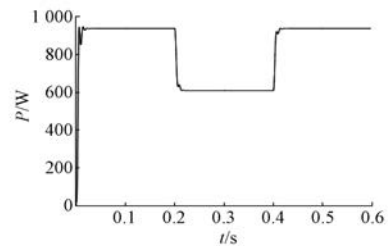


图 10 传统定步长的电导增量法

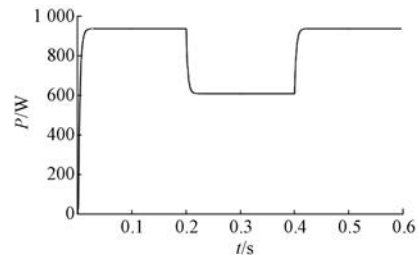


图 11 变步长与非对称模糊的电导增量法

5 结 语

在传统变步长算法的基础上,针对定步长跟踪的精度与 MPP 附近出现振荡的缺陷,设计采用了优化步长参数并结合非对称模糊的控制策略,最后通过 MATLAB/Simulink 进行仿真验证,并与传统定步长 MPPT 方法进行对比,所提的方法具有较好的动态性能。本文只进行了小功率非并网的光伏发电系统的验证,而对大功率、并网的发电系统而言是否仍具有良好性能,有待下一步的研究。

【参考文献】

- [1] 丁明,王伟胜,王秀丽,等.大规模光伏发电对电力系统影响综述[J].中国电机工程学报,2014,34(1): 1-14.
- [2] 朱拓斐,陈国定.光伏发电中 MPPT 控制方法综述[J].电源技术,2011,35(10): 1322-1324,1328.
- [3] 高金辉,李国成.一种开路电压和短路电流相结合的 MPPT 算法研究[J].电力系统保护与控制,2015(24): 96-100.
- [4] 邵翠,丁宝,宋镇江,等.光伏系统最大功率点跟踪控制算法的研究[J].建筑电气,2010,29(6): 34-38.
- [5] 邱革非,张春刚,仲泽坤,等.基于扰动观察法和电导增量法的光伏发电系统 MPPT 算法研究综述[J].中国电力,2017,50(3): 154-160.
- [6] 张超,何湘宁.短路电流结合扰动观察法在光伏发电最大功率点跟踪控制中的应用[J].中国电机工程学报,2006,26(20): 98-102.
- [7] 阳同光,桂卫华.基于神经网络滑模控制光伏系统最大功率点跟踪[J].太阳能学报,2016,37(9): 2386-2392.
- [8] 何俊强.基于滑模变结构的光伏并网发电系统 MPPT 算法研究[D].济南:山东大学,2012.
- [9] 薛亚林,周建萍,朱建萍,等.光伏发电中基于模糊自适应修正变步长最大功率点跟踪的控制策略[J].电机与控制应用,2016,43(12): 11-17,30.
- [10] 周东宝.光伏发电系统改进型变步长 MPPT 控制研究[D].广州:华南理工大学,2016.
- [11] 王亚楠,杨旭红,王军成,等.一种新型变步长光伏最大功率点跟踪控制策略[J].电气传动,2015(1): 54-57.
- [12] 王亚楠,杨旭红,李浩然,等.改进模糊控制策略在光伏发电 MPPT 中的应用[J].电源技术,2016,40(12): 2388-2391.
- [13] 张超,何湘宁.非对称模糊 PID 控制在光伏发电 MPPT 中的应用[J].电工技术学报,2005,20(10): 72-75.
- [14] 毛金枝,杨俊华,王秋晶,等.光伏发电最大功率跟踪的非对称模糊控制[J].电测与仪表,2015,52(18): 57-62.
- [15] WANG X L, MENG R S. An asymmetric fuzzy method for MPPT control of PV system[J]. Advanced Materials Research,2012(341/342): 323-327.

收稿日期: 2017-08-23

【期刊简介】

《电机与控制应用》(原《中小型电机》)创刊于 1959 年,是经国家新闻出版总署批准注册,由上海电器科学研究所(集团)有限公司主办的具有专业权威的电工技术类科技期刊。

期刊定位于电机、控制和应用三大板块,以中小型电机为基础,拓展新型的高效节能和微特电机技术,以新能源技术和智能控制技术引领和提升传统的电机制造技术为方向,以电机系统节能为目标开拓电机相关应用,全面报道国内外的最新技术、产品研发、检测、标准及相关的行业信息。

本刊每月 10 日出版,国内外公开发行,邮发代号 4-199。在半个多世纪的岁月中,该杂志为我

国中小型电机行业的技术进步与发展做出了巨大的贡献,在中国电机及其应用领域享有很高的影响。

依托集团公司雄厚的技术实力和广泛的行业资源,《电机与控制应用》正朝着专业化品牌媒体的方向不断开拓创新,在全国科技期刊界拥有广泛的知名度,是“中国学术期刊综合评价数据库来源期刊”、“中国科学引文数据库来源期刊”、“中国学术期刊(光盘版)全文收录期刊”,得到了业内人士的普遍认可,备受广大读者的推崇和信赖,多次被评为中文核心期刊、中国科技核心期刊、全国优秀科技期刊。