

# 基于退役动力电池储能的光储微网系统

徐小勇

(上海振华重工电气有限公司, 上海 200215)

**摘要:** 锂电池作为光储微网的储能电池, 能够提高光伏发电系统的稳定性, 改善电能质量, 但成本高昂。将电动汽车的退役动力电池用于光储微网的储能单元, 不仅可以降低投资成本, 还可以缓解大批量电池进入回收阶段的压力。首先基于锂电池的工作原理, 构建了退役动力电池的等效电路模型。接着建立了储能变流器和多重双向 DC/DC 变换器级联拓扑, 储能变流器采用电压外环、电流内环的双闭环策略, 稳定直流母线的电压; 多重双向 DC/DC 变换器采用以电池组的荷电状态(SOC)为约束条件的双闭环控制策略, 平抑光伏发电系统的功率波动。最后搭建了基于退役锂电池储能的光储微网系统, 验证了控制策略的有效性。

**关键词:** 光储微网; 新能源汽车; 锂电池; 退役动力电池; 荷电状态

中图分类号: TM 615 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)02-0091-06

doi: 10.12177/emca.2019.145

## Photovoltaic/Battery Micro-Grid System Based on Energy Storage of Decommissioned Power Battery

XU Xiaoyong

(Shanghai ZPMC Electric Co., Ltd., Shanghai 200215, China)

**Abstract:** As a storage battery for micro-grid, lithium battery can improve the stability of photovoltaic power generation system and improve power quality, but the cost is high. The use of decommissioned lithium battery of electric vehicle for energy storage unit of photovoltaic/battery micro-grid can not only reduce investment costs, but also alleviate the pressure of large-scale batteries entering the recycling phase. Based on the working principle of lithium battery, the equivalent circuit model of lithium battery is constructed. Cascaded topology of energy storage converter and multiple DC/DC converters is investigated. The energy storage converter uses a double-closed-loop strategy of voltage outer loop and current inner loop to stabilize the voltage of the DC bus. The multiple bidirectional DC/DC converter adopts a double-closed-loop control strategy based on the state of charge (SOC) of the battery pack to stabilize the power fluctuation of the photovoltaic power generation system. An photovoltaic/battery micro-grid system based on decommissioned lithium battery energy storage is built to verify the effectiveness of the control strategy.

**Key words:** photovoltaic/battery micro-grid; new energy vehicle; lithium battery; decommissioned power battery; state of charge (SOC)

## 0 引言

随着电动汽车配套建设的不断完善和国家政策的扶持, 电动汽车的销量涨幅明显。中国电动汽车年销量从 2013 年的 1.81 万辆增长到 2018 年的 125.6 万辆, 电动汽车的保有量不断增加<sup>[1]</sup>。

锂电池作为电动汽车的核心部件, 成本约占整车的 40%。在经过反复充电后, 电池容量会不断衰减, 使续航里程受到影响, 在使用 5~8 年后, 容量会衰减到约 70%, 容量的降低导致续航里程的减少和更加频繁的充电, 当动力电池容量无法满足日常行驶要求时, 则需要更换新的动力电池<sup>[2]</sup>。

收稿日期: 2019-11-12; 收到修改稿日期: 2019-12-12

作者简介: 徐小勇(1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为光伏发电系统、储能微网系统。

因此,未来一段时间内,中国将有大批量的退役动力电池。新能源发电领域中的光伏发电、风力发电等,均存在波动性、间歇性和随机性,导致弃光、弃风现象严重,而储能技术是改善新能源发电弊端的有效途径。退役后的动力电池,虽然容量有所下降,但仍可应用于新能源发电系统的储能单元。从电动汽车角度讲,将退役动力电池回收,梯次利用,可促进电动汽车行业的可持续发展;从光伏微电网角度讲,因为光伏发电的间歇性、随机性和波动性会影响微电网的稳定性,所以引入储能单元能够平滑光伏微电网的功率波动,提高光伏微电网的电能质量<sup>[3]</sup>。储能单元在光伏微电网系统的投资成本占比较大,将退役动力电池用于光储微网的储能单元,不仅可以降低投资成本,还可以缓解大批量电池进入回收阶段的压力,因此采用基于退役动力电池的储能系统应用空间广阔<sup>[3]</sup>。

为了平滑光储微网中光伏发电功率波动,基于退役动力锂电池的工作特性,本文建立了以稳定直流母线电压、合理分配微电网能量为目的的储能变流器和 DC/DC 变换器,以电池组荷电状态(SOC)和直流母线电压为约束条件,实现了功率的合理分配,并运用 MATLAB/Simulink 仿真软件建立该控制策略的仿真模型,验证了该设计的正确性。

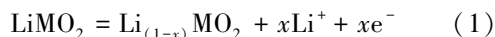
## 1 退役锂电池建模

### 1.1 锂电池工作原理

锂电池工作原理是利用锂离子在正极与负极间所形成的嵌入化合物,由锂状态和电位的不同,所造成电子的得失,完成充、放电的过程。在充、放电过程中,锂离子不断地嵌入和脱嵌,动作过程类似于摇椅的晃动,因此锂离子电池又被称为摇椅电池<sup>[4]</sup>。

锂电池的正极材料为锂金属氧化物,一般为  $\text{LiMO}_2$ ; 负极材料为 C。

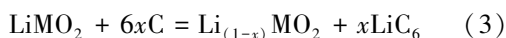
正极反应方程式为



负极反应方程式为



总反应方程式为



### 1.2 退役锂电池模型

一般电池模型可分为电化学模型和等效电路

模型。电化学模型是基于电池的化学反应原理,从电池工作时能量的吸收、释放、热力学现象等方面分析,能够较好地描述电池内部的微观反应。但电化学模型结构复杂,受电池材料、电解液种类等因素影响较大,且计算困难,因此不适用于控制系统的设计。

等效电路模型是利用电压源、电流源、二极管、电阻、电感和电容等基本电气元件来模拟电池工作时的动态特性。因为使用电气元件建模,所以其结果可用方程式表示,便于分析和控制器的搭建<sup>[5]</sup>。目前常用的等效电路模型有:Rint 模型、Thevenin 模型、RC 模型、GNL 模型和 PNGV 模型等<sup>[6]</sup>。本文从锂电池的电压特性、电容特性和内阻特性等方面分析,采用二阶 RC 等效电路模型,其中  $U_{\text{DC}}$  为锂开路电压,  $R_{\text{internal}}$  为等效内阻,  $R_1$  和  $R_2$  为锂电池的极化内阻,  $C_1$  和  $C_2$  为电池的极化电容。  $R_1$  和  $C_1$  构成的并联回路用于描述在电流突变时电压的响应过程,时间常数较小。  $R_2$  和  $C_2$  组成的并联回路用于描述当电压缓慢变化且趋于稳定的情况,时间常数较大。

图 1 所示为锂电池二阶 RC 等效电路模型。

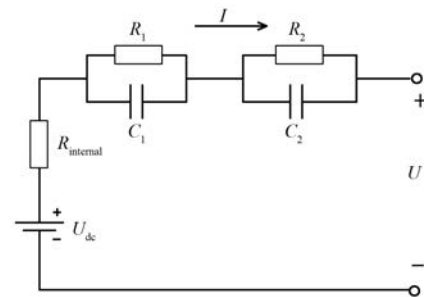


图 1 锂电池二阶 RC 等效电路模型

图 1 中,根据基尔霍夫电压定律,电容  $C_1$  和  $C_2$  的端电压分别为

$$U_{C_1} = -\frac{U_{C_1}}{R_1 C_1} + \frac{I}{C_1} \quad (4)$$

$$U_{C_2} = -\frac{U_{C_2}}{R_2 C_2} + \frac{I}{C_2} \quad (5)$$

则其输出电压的表达式为

$$U = U_{\text{DC}} - R_{\text{internal}} \times I - U_{C_1} - U_{C_2} \quad (6)$$

### 1.3 SOC 估算

常用的 SOC 估算方法有:开路电压法、安时积分法、神经网络法和卡尔曼滤波法。本文采用

安时积分法来估算退役锂电池的 SOC。安时积分法是指实时检测电池的充、放电流,通过计算电流在周期内的积分即可得到电池的充放电量,以此得到电池在任意时刻的剩余电量<sup>[7-8]</sup>。

为了提高安时积分法估算 SOC 的准确性,考虑退役锂电池放电前的电池容量、充放电效率和温度对 SOC 的影响,在积分法估算 SOC 中加入电池容量、充放电效率和温度的补偿,从而使估算的 SOC 更接近真实值。

电池电量和放电电流的关系式可表示为

$$Q = A \times I^{n-1} \quad (7)$$

式中:  $Q$  为退役锂电池的电量;  $A$  为电池常数,与电池所用的活性物质有关;  $I$  为放电电流;  $n$  为电池的结构常数。

在初始条件相同时,电池充、放电效率的关系式可表示为

$$\eta = \frac{Q}{Q_N} = \left(\frac{I}{I_N}\right)^{n-1} \quad (8)$$

式中:  $Q_N$  为退役锂电池的容量;  $I_N$  为额定电流。

温度补偿系数公式为

$$K_t = 1 + 0.008(T_a - T) \quad (9)$$

式中:  $T_a$  为标准温度;  $T$  为实际工作温度。

综上所述,建立 SOC 数学模型:

$$SOC = SOC_0 - \frac{\int_{t_0}^{t_1} K_t \eta i(t) dt}{Q_0} \quad (10)$$

式中:  $SOC_0$  为电池放电前锂电池的初始容量;  $\eta$  为充、放电的效率补偿系数;  $i(t)$  为以时间  $t$  为函数的充、放电电流;  $Q_0$  为锂电池放电前的容量。

## 2 退役动力电池光伏储能系统结构

图 2 所示为基于退役动力电池的光储微网系统拓扑结构。光伏发电单元通过 DC/AC 变换器与交流母线相连。采用退役动力电池的储能装置通过储能变流器、双向 DC/DC 变换器完成充、放电,保证光伏储能系统的能量平衡。静态开关用于切换光储微网系统的离网或并网。

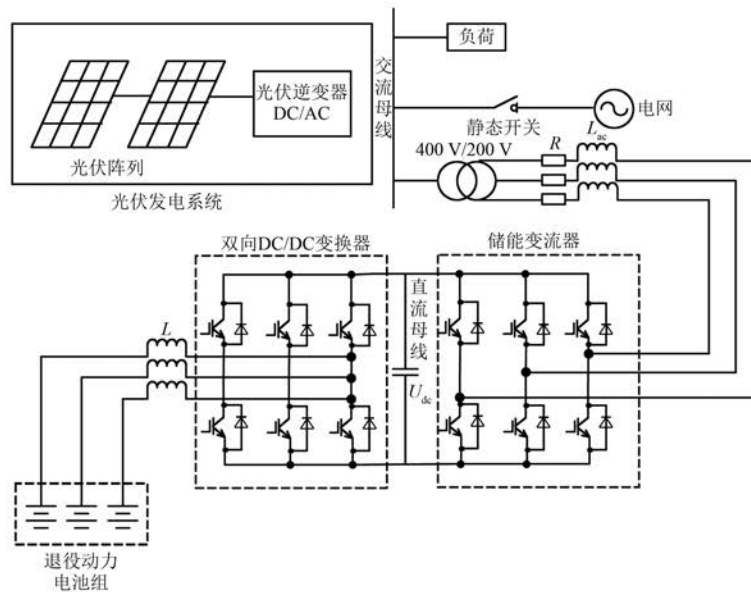


图 2 基于退役动力电池的光储微网系统拓扑结构

## 3 光储微网的控制策略

### 3.1 工作模式

基于退役动力电池储能的光储微网系统的工作模式有 4 种:离网充电、离网辅助放电、离网独立放电和并网充电,如表 1 所示。

(1) 离网充电。当系统处于离网状态下且退役动力电池组容量不足时,光伏发电单元在满足负荷的情况下,给退役动力电池组进行充电。

(2) 离网辅助放电。当系统处于离网状态下且退役动力电池组容量充足时的情况下,光伏发电单元无法满足负荷,退役动力电池组辅助放电,

表 1 基于退役动力电池储能的光储微网系统工作模式

光储微网系统	电池组容量不足	容量充足
光伏发电单元大于负荷要求	离网充电	电池组不工作
光伏发电单元小于负荷要求	电池组不工作	离网辅助放电
光伏发电单元不工作	电池组不工作	独立放电
并网	并网充电	蓄电池不工作

以保证整个系统的功率平衡。

(3) 离网独立放电。当光伏发电单元无法保证负荷所需的电压和频率而停止工作时,退役动力电池组向系统的交流母线提供稳定的电压和频率,并单独给负荷放电,提供所需功率。

(4) 并网充电。当系统处于并网状态且退役动力电池组容量不足时,电网给电池组充电储能,为离网运行时做准备。

### 3.2 储能变流器控制策略

在基于退役动力电池储能的光储微网系统中,储能变流器的作用是维持直流母线上的电压稳定,直流母线作为储能单元与电网侧之间的能量传输通道,维持着光储微网系统中各单元之间的功率平衡。该系统的储能变流器采用前馈解耦的控制方式,建立基于电网侧电压的定向矢量控制的  $d-q$  坐标系下的状态模型:

$$\begin{cases} u_d = u_d + \omega L i_q - L \frac{di_d}{dt} - R i_d \\ u_q = -\omega L i_d - R i_q - L \frac{di_q}{dt} \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $u_d, u_q$  分别为交流电压的  $d, q$  轴分量;  $\omega$  为交流电压的角频率;  $R, L$  为储能变流器的线路电阻和电感;  $i_d, i_q$  分别为交流电流的  $d, q$  轴分量。

图 3 所示为储能变流器的控制框图。该储能变流器采用电压外环和电流内环的双闭环控制策略。其中,电压外环采用 PI 控制器,其输出作为电流控制器的给定值,电流控制器根据设定的参考值实现电流跟踪。同时,通过调节交流电流的  $d$  轴分量  $i_d$ ,可以稳定直流母线电压、调节电网侧和储能变流器之间的有功功率;通过调节交流电流的  $q$  轴分量  $i_q$ ,可以调节电网侧和储能变流器之间的无功功率。

### 3.3 多重双向 DC/DC 变换器控制策略

本文系统中 DC/DC 变换器采用双向 DC/DC 变换器,以实现电能的双向流动。每组退役动力

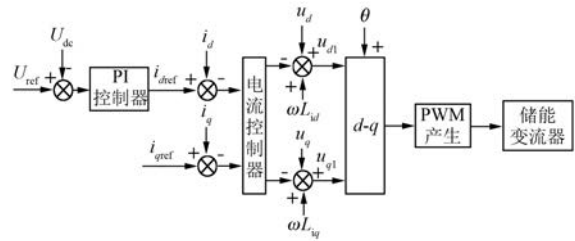


图 3 储能变流器的控制框图

电池在工作时,以 SOC 为约束条件,通过多重双向 DC/DC 变换器实现充放电和功率分配。多重双向 DC/DC 变换器的控制框图如图 4 所示。

图 4 中,  $P_v$  为光伏阵列的输出功率;  $P_{s1-ref}, P_{s2-ref}, P_{s3-ref}$  为每组退役动力电池的功率给定值;  $P_{O1}, P_{O2}, P_{O3}$  为每组退役动力电池实际的输出功率;  $i_{L1-ref}, i_{L2-ref}, i_{L3-ref}$  和  $i_{L1}, i_{L2}, i_{L3}$  为每组电池侧电感的电流的给定值和采样值。

双向 DC/DC 变换器采用双闭环的控制方式,外环根据运行模式选择恒功率或者恒电流模式,内环采用退役动力锂电池组侧的电感峰值电流模式。为了实现光储微网系统的能量双向流动和合理分配光储微网的能量,根据退役动力电池组的 SOC 以实现电池组的充放电模式切换。根据退役动力锂电池组的特性,该电池组的充放电区间为 20% ~ 80%,当电池组的 SOC  $\geq 80\%$  时,双向 DC/DC 变换器工作在 Boost 状态下,电池组工作于放电模式;当电池组的 SOC  $\leq 20\%$  时,双向 DC/DC 变换器工作在 Buck 状态下,系统改变能量流动方向,电池组工作于充电模式。

## 4 基于退役动力电池储能的光储微网仿真试验

为了分析上述光储微网系统的工作模式,验证控制策略的正确性,在 MATLAB 中搭建图 2 所示的仿真模型。为了模拟光储微网的不同工作模式,将仿真参数设定为,光照条件为  $1000 \text{ W/m}^2$ ,  $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ,光伏发电系统的输出功率为  $50 \text{ kW}$ ,当系统运行至  $4 \text{ s}$  时,受光照强度影响,输出功率降为  $40 \text{ kW}$ ;负荷所需功率为  $40 \text{ kW}$ ,当系统运行至  $2 \text{ s}$  时,负荷增大到  $60 \text{ kW}$ ;退役锂电池功率为  $20 \text{ kW}$ ,直流侧电压  $400 \text{ V}$ ,退役锂电池的 SOC 可实现从 0 至 80% 充放电。仿真结果如图 5~图 8 所示。

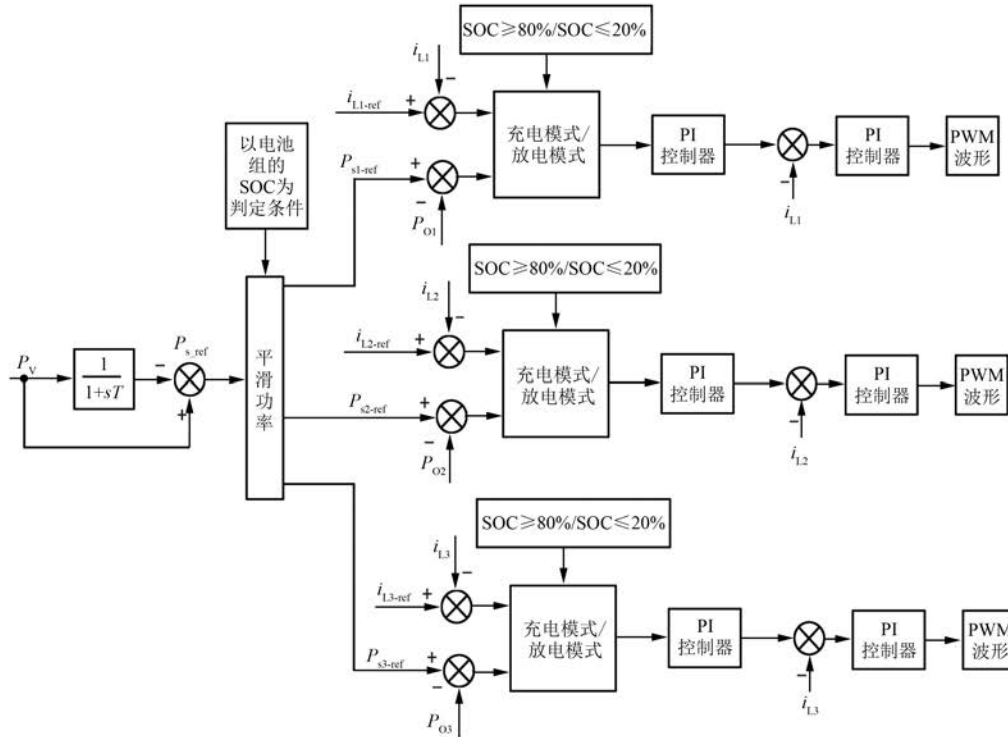


图 4 多重双向 DC/DC 变换器的控制框图

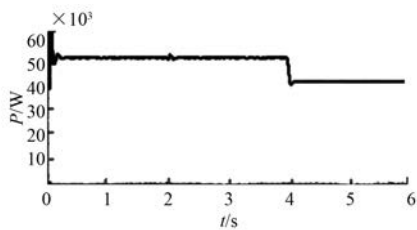


图 5 光伏发电系统输出功率

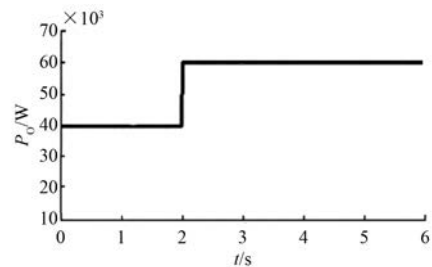


图 7 负荷功率变化

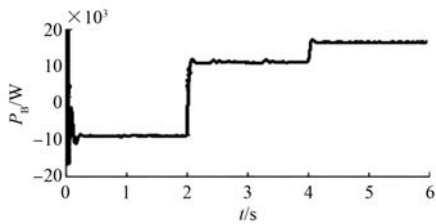


图 6 电池组输出功率

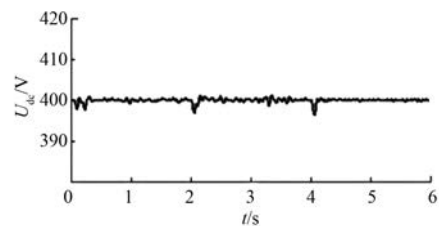


图 8 直流母线电压

由图 5~图 8 可知,系统运行在 0~2 s 时,光伏发电系统的输出功率在经过一定的波动后维持在 50 kW,此时负荷所需功率为 40 kW,光伏发电系统的输出功率大于负荷所需,蓄电池充电,充电功率为 10 kW;当系统运行至 2 s 时,负荷所需功率增加到 60 kW,光伏发电单元无法满足负荷的

功率需求,蓄电池开始放电,放电功率为 10 kW,直流母线电压轻微波动后维持稳定;当系统运行至 4 s 时,改变光照条件,光照强度下降到 800 W/m<sup>2</sup>,光伏发电系统的输出功率约为 40 kW,因此蓄电池增大输出功率以满足负荷所需功率。仿真结果显示,系统在运行时,当负荷和外界环境

发生变化,储能变流器能够稳定母线电压,同时储能单元能够通过充放电来实现整个系统的功率平衡。

## 5 结 语

针对光伏发电系统的波动性、随机性和不确定性,本文搭建了基于退役动力锂电池储能的光储微网系统,在降低储能单元成本的同时,提高了光伏发电系统的稳定性。其中,储能变流器采用矢量控制策略,控制直流母线电压稳定;双向 DC/DC 变换器采用双闭环控制策略,以电池组的 SOC 为判定条件,实现整个系统的功率分配。搭建了基于退役动力锂电池储能的光储微网系统,并结合光储微网系统的工作模式,进行仿真试验。仿真结果表明:所建立的控制系统能够根据电池组的 SOC 实现能量的双向流动,稳定直流母线电压及合理分配光储微网系统所产生的功率。

### 【参考文献】

[ 1 ] 刘怡,穆苗苗,张友琅,等.退役动力电池在光伏储

能中应用[J].电源技术,2019,43(1): 126.

[ 2 ] 姜婷婷,郭翔,徐鼎,等.电动汽车老化电池梯次利用储能系统研究[J].山东电力技术,2017,44(12): 56.

[ 3 ] 刘念,唐霄,段帅,等.考虑动力电池梯次利用的光伏换电站容量优化配置方法[J].中国电机工程学报,2013,33(4): 34.

[ 4 ] ZHENG M, QI B, DU X. Dynamic model for characteristics of Li-ion battery on electric vehicle [C] // 2009 4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, 2009.

[ 5 ] 戴海峰,魏学哲,孙泽昌.基于等效电路的内阻自适应锂离子电池模型[J].同济大学学报(自然科学版),2010,38(1): 98.

[ 6 ] 李国洪,吴静臻,刘鲁源.基于 RC 等效电路的动力电池 SOC 估计算法[J].天津大学学报,2007,40(12): 1453.

[ 7 ] 卢杰祥.锂离子电池特性建模与 SOC 估算研究[D].广州:华南理工大学,2012.

[ 8 ] 李哲,卢兰光,欧阳明高.提高安时积分法估算电池 SOC 精度的方法比较[J].清华大学学报(自然科学版),2010,50(8): 1293.

## [ 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,国内外公开发行人,邮发

代号 4-199。在半个多世纪的岁月中,本刊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声誉。

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。