

混合动力电动汽车中电力电子技术应用综述

Summarization of the Applications of Power Electronics in Hybrid Electric Vehicle

北京交通大学 电气工程学院 张立伟 胡广艳 游小杰 郑琼林

Zhang Liwei Hu Guangyan You Xiaojie Zheng Gionglin

摘要: 文章综述了混合动力电动汽车的发展和基本结构, 在此基础上, 结合丰田汽车公司的最新一代混合动力电动汽车Prius THS II, 介绍了电力电子技术在混合动力电动汽车上的具体应用情况。最后, 结合混合动力电动汽车的实际情况, 提出了需要重点解决的问题。

关键词: 电动汽车 混合动力 功率电子 交流驱动 逆变器

Abstract: This paper summarizes the development and basic structures of hybrid electrical vehicles (HEV). Subsequently, this paper introduces the applications of power electronics in TOYOTA new developed HEV Prius THSII, as well as some reviews about the application of power electronics installed in HEV are given.

Key words: Electric vehicle Hybrid Power electronic AC drive Inverter

[中图分类号] U463

[文献标识码] B

文章编号 1561-0330(2006)10-0091-05

1 引言

电力电子技术是研究应用电力半导体器件实现电能变换和控制的学科, 它是一门由电子、电力半导体器件和控制三者相互交叉而出现的新兴边缘学科。它研究的内容非常广泛, 主要包括电力半导体器件、磁性材料、电力电子电路、控制集成电路以及由其组成的电力变换装置。目前, 电力电子学研究的主要方向是^[1]:

(1) 电力半导体器件的设计、测试、模型分析、工艺及仿真等;

(2) 电力开关变换器的电路拓扑、建模、仿真、控制和应用;

(3) 电力逆变技术及其在电气传动、电力系统等工业领域中的应用等。

电动汽车(EV)作为清洁、高效和可持续发展的交通工具, 既对改善空气质量、保护环境具有重大意义, 又对日益严重的石油危机提供了解决方法; 同时, 电动汽车作为电力电子技术的一个新的应用领域, 涵盖了DC/DC和DC/AC的全部变换, 是实用价值非

常高的运用领域^[2]。

2 混合动力电动汽车简介

当前世界汽车产业正处于技术革命和产业大调整的发展时期, 安全、环保、节能和智能化成为汽车界共同关心的重大课题。为了使人类社会和汽车工业持续发展, 世界各国尤其是发达国家和部分发展中国家都在研究各种新技术来改善汽车和环境的协调性。

电动汽车作为21世纪汽车工业改造和发展的主要方向, 目前已从实验室开发试验阶段过渡到商品性试生产阶段, 世界上许多知名汽车厂家都推出了具有高科技水平的安全或环保型概念车, 目的是为了引导世界汽车技术的潮流。

2.1 各种类型电动汽车特点及其发展

根据所使用的动力源不同, 电动汽车大致可分为三类: 蓄电池电动汽车或纯电动汽车(Battery Electric Vehicle)、以氢气为能源的燃料电池电动汽车(Fuel Cell Electric Vehicle)和混合动力电动汽车(Hybrid

Electric Vehicle)。

纯电动汽车是单独依靠蓄电池供电的，但目前动力电池的性能和价格还没有取得重大突破，因此，纯电动汽车的发展没有达到预期的目的；

燃料电池电动汽车具有能量转化率高、不污染环境、使用寿命长等不可比拟的优势。但是由于目前燃料电池技术和研究还没有取得重大突破，燃料电池电动汽车的发展也受到了限制；

混合动力电动汽车是同时采用了电动机和发动机作为其动力装置，通过先进的控制系统使两种动力装置有机协调配合，实现最佳能量分配，达到低能耗、低污染和高度自动化的新型汽车。自1995年以来，世界各大汽车生产商已将研究的重点转向了混合动力电动汽车的研究和开发，日本、美国和德国的大型汽车公司均开发了包括轿车、面包车、货车在内的混合动力电动汽车。

以作为混合动力电动汽车研发前沿的丰田汽车公司为例，所开发的混合动力电动汽车已达到实用化水平，自1997年所推出的世界上第一款批量生产的混合动力电动汽车Prius开始，其后又在2002年推出了混合动力面包车，该车混合动力系统采用了世纪首次批量生产的电动四轮驱动及四轮驱动力/制动力综合控制系统。2003年，丰田又推出了新一代Prius，也被称为“新时代丰田混合动力系统——THS II”（见图1），节能效果可达到100km 油耗不足3L。从2004年开始，丰田公司向欧洲市场推出了一款新的Lexus RX型豪华混合动力轿车。丰田公司计划2012年全部采用汽油电力混合发动机，以提高燃油经济性和降低排放污染。

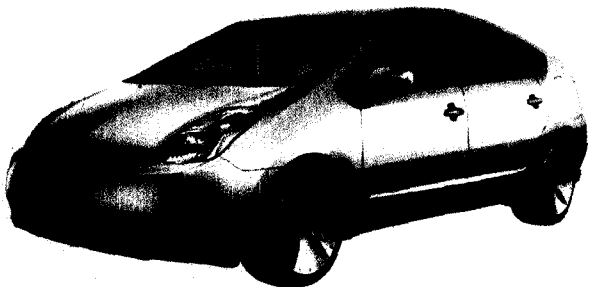


图1 丰田新一代混合动力电动汽车Prius THSII

2.2 混合动力电动汽车分类及特点

根据按照发动机与电动机的不同组合工作方式方式，混合动力电动汽车主要可以分为三类：串联式、并联式和混联式^[3]，基本结构如图2所示。

图3所示为不同混合动力类型中电动机与发动机的功率分配情况：

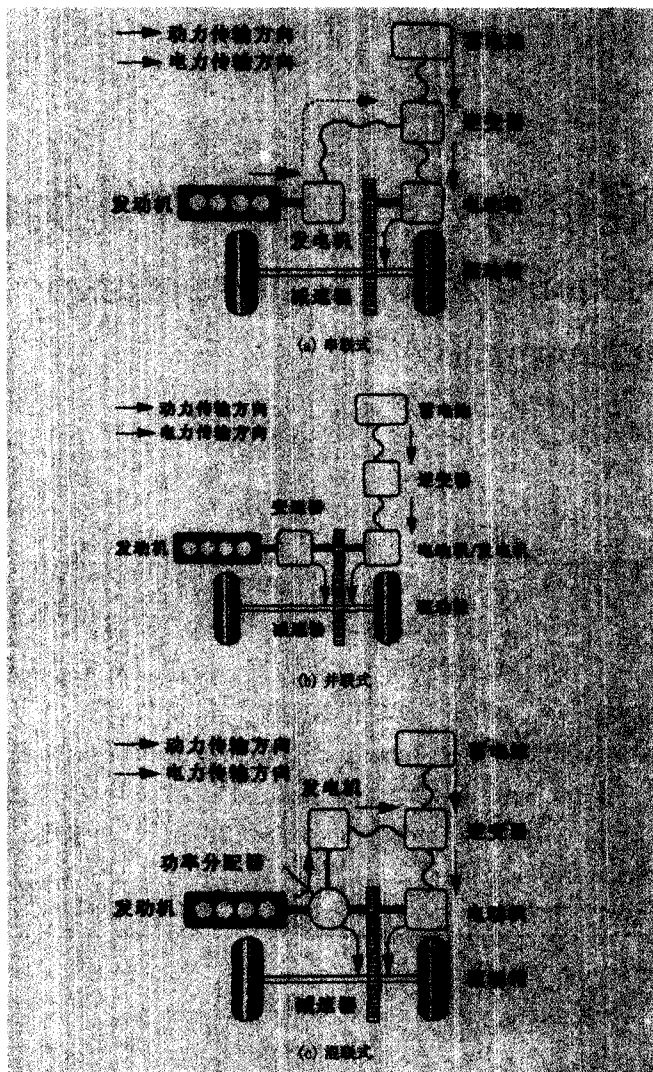


图2 混合动力电动汽车基本结构

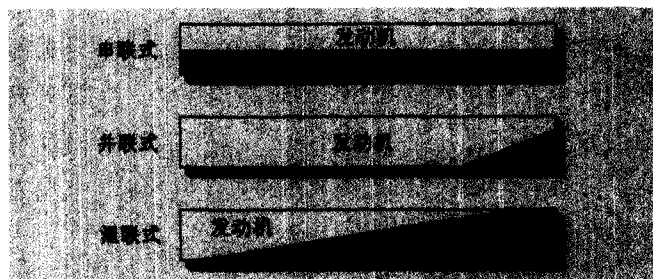


图3 不同工作模式中电动机与发动机的功率分配示意图

在串联式混合动力系统中，由发动机驱动发电机，利用发出的电能由电动机驱动车轮。即，发动机所发出的动能全部要先转换成电能，利用这一电能使车辆行驶。

并联式混合动力系统采用的是发动机与电动机驱动车轮，根据情况来运用这两个动力源，由于动力源是并行的，故称为并联式混合动力系统。

混联式也称串并联式，它可以最大限度地发挥串联式与并联式的各自优点，丰田的Prius系列的混合动力系统采用的就是这种工作方式。工作时，利用动力分

配器分配发动机的动力：一方面直接驱动车轮，另一方面自主地控制发电。由于要利用电能驱动电动机，所以与并联式相比，电动机的使用比率增大了。

3 HEV 常用的电力电子技术及装置

本文结合丰田新一代混合动力系统 THS II，具体研究了电力电子技术在 HEV 中的应用情况。THS II 的整车电气驱动系统（见图 4）主要由采用 AtkinSon 循环的高效发动机、永磁交流同步电动机、发电机、动力分配装置、高性能镍金属氢化物 (NI-MH) 电池、控制管理单元以及各相关逆变器和 DC-DC 变换器等部件组成。

高压电源电路、各种逆变器和 14V 蓄电池用辅助 DC-DC 变换器组成了功率控制单元（见图 5），该单元集成了 DSP 控制器、驱动和保护电路、直流稳压电容、

半导体、绝缘体、传感器、液体冷却回路以及和汽车通信的 CAN 总线接口。

下面主要介绍功率控制单元的结构组成和主要作用^{[4][5]}。

3.1 电动机/发电机用逆变器单元

在 Prius THS II 主驱动系统中，电动机和发电机所用三相电压型逆变器（功率分别为 50kW 和 30kW）被集成在一个模块上（如图 6 所示，逆变器的电气结构图如图 7 所示），直流母线最大供电电压被设定为 500V。功率器件选用带有反并联续流二极管的商用 IGBT (850V/200A)，该功率等级的 IGBT 具有足以承受最大 500V 反压的能力，以及其它诸如雪崩击穿、瞬时短路的能力。

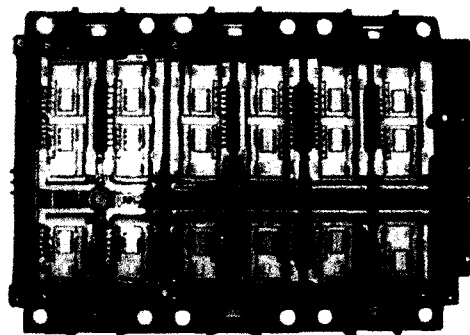


图6 电动机和发电机用逆变器集成模块

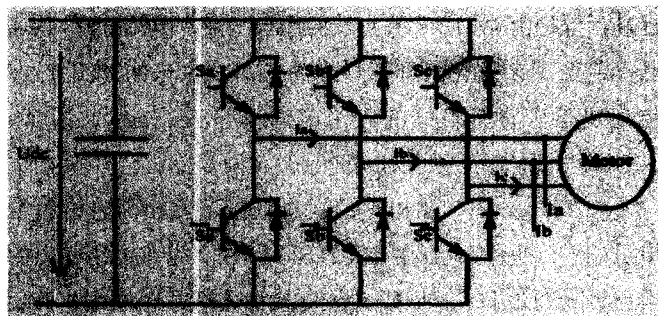


图7 功率主回路示意图

电动机用逆变器的每个桥臂都是由并联有两个 IGBT 模块和二极管模块组成，而发电机用逆变器的每个桥臂只包含有一个 IGBT 模块和二极管模块。每个 IGBT 芯片的面积为 133mm² (13.7mm × 9.7mm)，并且发射极使用了 5 μm 厚的铝膜；而每个二极管芯片的面积为 90mm² (8.2mm × 11mm)。

目前，电动汽车普遍采用 PWM 控制的电压型逆变器，这种逆变器具有线路简单、效率高的特点，同时 PWM 逆变器呈现出以下几种发展趋势：

(1) 通常采用 IGBT 器件，工作频率高，并减少了低频谐波分量和起动时的电流冲击，当前国外应用的

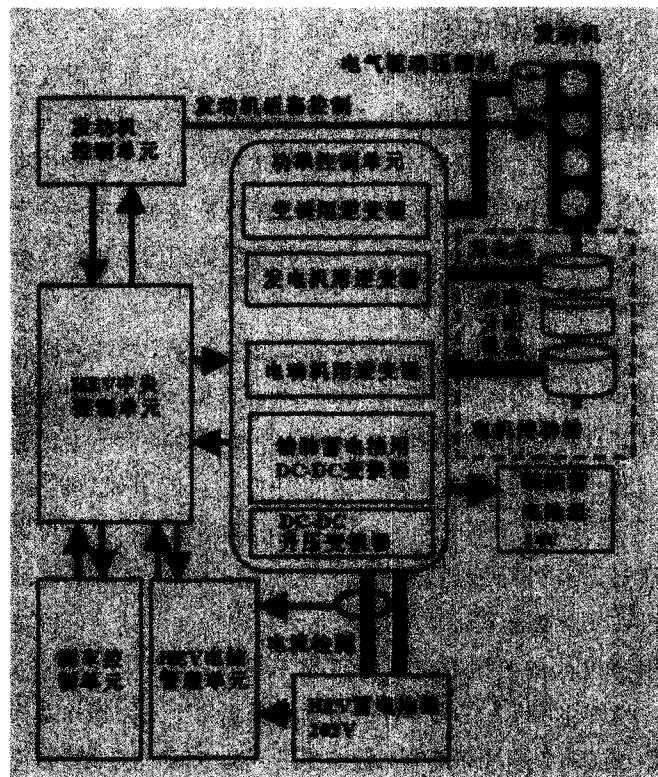


图4 Prius THSII 整车电气系统结构

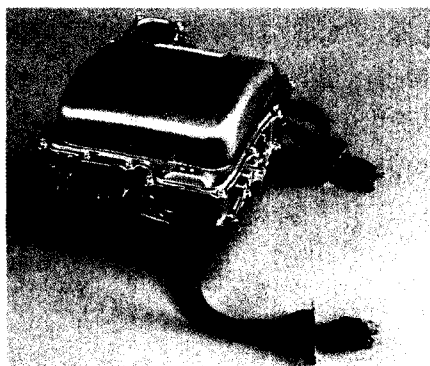


图5 Prius THSII 功率控制单元

最高开关频率已达 20 kHz,

(2) 电机额定频率相应提高了, 扩大了调速范围, 在更好地满足运行要求的同时, 减少电机的体积和重量, 提高功率比。目前国外电动汽车专用电机的最高额定频率已达 500 Hz,

(3) 采用 DSP 为核心的计算机控制系统, 能够实现可靠的矢量控制和运算, 电机可做到快速恒力矩启动及弱磁高速运行, 这种控制系统稳定, 电流冲击小, 控制效率高。

除了以上传统的 PWM 控制技术外, 最近出现了谐振直流环节变换器和高频谐振交流环节变换器。采用零电压或零电流开关技术的谐振式变换器具有开关损耗小、电磁干扰小、低噪声、高功率密度和高可靠性等优点, 引起研究人员广泛的兴趣。

目前应用于功率变换器的常用电子开关器件主要有 GTO、BJT、MOSFET、IGBT 和 MCT 等, 由于 IGBT 集 BJT 和 MOSFET 特点于一体, 所具有的高阻抗压控栅极, 可明显降低栅极驱动功率, 从而可使栅极驱动电路集成化, 并且 IGBT 具有的极短的开关时间, 可使系统具有快速响应能力, 并减小了开关损耗, 降低了噪声, 因此 IGBT 是很好的开关器件。MCT 也是一个潜在的选择器件, 虽然目前商用的 MCT 的额定值还有待于提高, 但是由于 MCT 具有低的通导压降, 因此随着 MCT 新型制造工艺的完善和新材料的使用, 未来的 MCT 在电动汽车中将有良好的应用前景。

3.2 DC—DC 升压变换器单元

在 THS 中, 蓄电池组通过逆变器直接与电机和发电机相连 (见图 8); 而在 THS II 中, 蓄电池组输出的电压首先通过 DC—DC 升压变换器进行升压操作, 然后再与逆变器相连, 因此逆变器的直流母线电压从原 THS 的 202 V 提升为现在的 500 V。

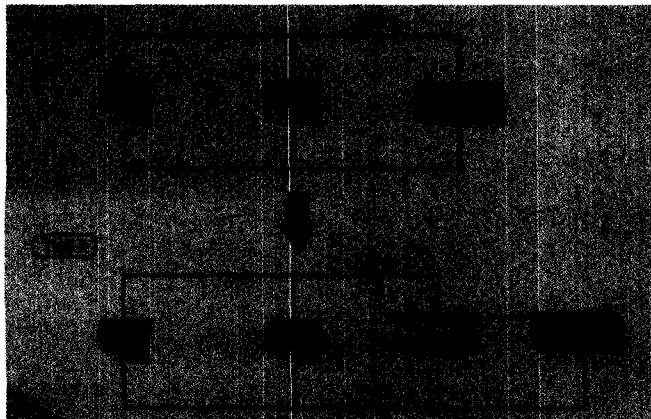


图8 Prius THS与THS II直流供电方式比较

图9为 THS II 系统中能量交换示意图, 图9中发电机的功率为 30 kW, 蓄电池组的瞬时功率为 20 kW, 两者联合起来为 50 kW 的电机提供能量; 图9中升压变换器的容量也被设计为 20 kW。

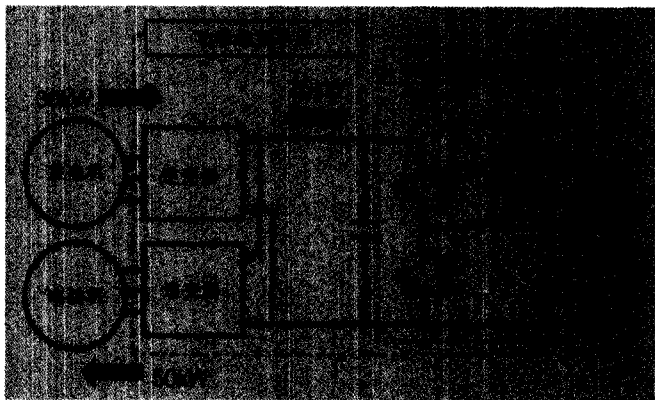


图9 Prius THS II 可变系统电路结构图

这种系统具有如下优点:

(1) 由于电机的最大输出功率能力是与直流母线电压成正比的, 因此与原 THS 系统的 202 V 供电工况相比, 在不增加驱动电流的情况下, THS II 系统中电机在 500 V 供电时, 其最大输出功率以及转矩的输出能力是原 THS 系统的 2.5 倍, 此外相同体积的电机, 还能够输出更高的功率;

(2) 由于使用了直流母线供电电压可变系统, 因此 THS II 可以根据电动机和发电机的实际需要, 自由的调节直流母线供电电压, 从而选择最优的供电电压, 达到减少逆变器开关损耗以及电动机铜损的节能目的;

(3) 对于供电电压一定的蓄电池组来说, 由于可以通过调整升压变压器的输出电压的方式, 来满足电动机和发电机的实际需要, 因此从某种程度上讲, 可以减少蓄电池的使用数量, 降低整车质量。

图9所示的 DC—DC 升压变换器每个支路都并联有 2 个 IGBT 模块和续流二极管模块, 其中每个 IGBT 芯片的面积为 225mm^2 ($15\text{mm} \times 15\text{mm}$), 每个续流二极管芯片的面积为 117mm^2 ($13\text{mm} \times 9\text{mm}$)。图9所示的电路拓扑结构可以在不中断系统的正常工作的情况, 保证蓄电池的充电和放电进行瞬间转化。由于 DC—DC 升压变换器的作用, 而使主电容器上的系统电压 (System Voltage) 不同于蓄电池组的输出电压, 从而在保证电动机和发电机高电压工作的同时, 而不受蓄电池组低电压输出能力的限制。

3.3 DC-DC 降压变换器单元

通常汽车中各种用电设备由 14 V 蓄电池组供电 (额

定电压为12V), Prius也选用了14V蓄电池组作为诸如控制计算机、车灯、制动器等车载电气设备的供电电源, 而对该蓄电池的充电工作则由直流202V通过一个DC-DC降压变换器来完成的, 变换器的电路图如图10所示。变换器的容量为1.4kW (100A/14V), 功率器件选用压控型商用MOSFET (500V/20A), 每个MOSFET芯片的面积为 49mm^2 ($7\text{mm} \times 7\text{mm}$)。

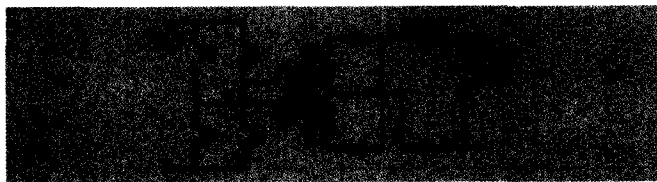


图10 14V蓄电池充电用DC-DC变换器

3.4 其它交流设备用逆变器单元

Prius THSII空调系统使用了电机驱动的空气压缩机, 取代了传统的用发动机机械驱动的空气压缩机。为了驱动该空气压缩机用电机, 设计了一种小功率逆变器(DC202V, 1.6kW)。功率器件选用带有反并联续流二极管的商用IGBT (600V/30A), 其中每个IGBT芯片的面积为 22.1mm^2 ($4.7\text{mm} \times 4.7\text{mm}$), 每个续流二极管芯片的面积为 9mm^2 ($3\text{mm} \times 3\text{mm}$)。

4 HEV对电力电子技术的要求

受实际运用条件的限制, 要求混合动力电动汽车用电力电子技术及装置应具有成本低、体积小、比功率大、易于安装的特点^[6]。除此之外, 下面的技术细节需进行重点考虑:

(1) 电力电子装置密封问题

各种车用电力电子装置必须要进行有效的密封, 以耐受温度和振动的影响, 并能防止各种汽车液体的侵入。

(2) 电磁兼容/电磁干扰(EMC/EMI)问题

混合动力电动汽车是一个相对狭小的空间, 里面包含有各种控制芯片和弱电回路, 因此在进行车载电力电子装置设计时, 为了消除将来的事故隐患, 必须要很好的研究并解决EMC/EMI问题。

(3) 直流母线电压利用问题

混合动力电动汽车储能系统的电压是可变的, 电压的大小取决于汽车实际负载的大小、运行工况(电动还是发电)以及电机是否弱磁运行等等, 典型的母线电压波动范围是标称值的 $-30\% \sim +25\%$ 。因此如何在汽车工况频繁变化的情况下, 充分利用直流母线电压, 成为控制策略设计者所需要解决的问题。

(4) 电力电子装置控制问题

“高开关频率”和“高采样率”目前被普遍应用于混合动力电动汽车的电力电子装置和交流传动系统中, 客观上“双高”需要高精度的编码器和解算器, 因此这就意味着在电机中出现宽的温度梯度和饱和状态时, 如何降低参数敏感度, 以满足控制的要求。

5 结束语

本文结合丰田汽车公司的最新一代混合动力电动汽车Prius THSII, 综述了电力电子技术在混合动力电动汽车中的应用情况, 提出了需要重点考虑并解决的技术问题。

随着电力电子技术、微电子技术和控制技术的发展, 数字化交流驱动系统在商业化电动汽车中得到广泛应用; 而开发研制采用交流电机驱动系统的混合动力电动汽车, 已经汽车工业可持续发展的的重要途径之一。随着人类对生存环境要求的提高, 合理利用能源意识的增强, 作为一种污染小和高效率的现代化交通工具, 混合动力电动汽车将得到全面的发展和运用。

参考文献

- [1] 俞勇祥. 电力电子技术的应用概况. 新技术新工艺. 2002,10
- [2] 马宪民. 电动汽车的电气驱动系统. 西安公路交通大学学报, 2001(7)
- [3] 蔡梦贫. 混合动力系统概述. 汽车电器, 2005(1)
- [4] A.Kawahashi. A New Generation Hybrid Electric Vehicle and Its Supporting Power Semiconductor Devices. Proceedings of 2004 International Symposium on Power Semiconductor Devices & ICS, Kitakyushu, pp.23-29
- [5] 丰田汽车公司研发资料, 丰田汽车公司官方网站
- [6] J.M.Miller. Power Electronics in Hybrid Electric Vehicle Applications. Proceedings of 18th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2003, Vol.1, pp.23-29

作者简介

张立伟 男 博士后 研究方向为电力电子与电气传动。