

基于电力电子变流技术的风力能源变换系统

赵 莉¹, 刘连根², 宋平岗¹

(1. 华东交通大学 电气与电子工程学院, 江西 南昌 330013; 2. 株洲变流技术国家工程研究中心, 湖南 株洲 412001)

【摘要】 利用电力电子变流技术的风力发电系统是风力能源系统中一个发展迅速的分支, 基于逆变技术和先进控制技术的系统可以使风机在不同的风速下运行在最大功率状态。文章综述了该领域电力电子变流技术的风力能源变换系统的组成、逆变器的 PWM 控制方法以及能量最大化的控制策略。以电力电子变流技术为基础的能源变换系统具有风能利用效率高, 动态响应快等特点。

关键词: 风力能源变换; 电力电子; 风力发电

中图分类号: TK89; TM46

文献标识码: A

文章编号: 1671-8410(2006)01-0034-05

A Wind Energy Conversion System Based on Power Converter Technology

Abstract: The wind power generation system based on power converter is one of the branches in wind energy system which grown rapidly. With advanced inverter and control technology, the system could be operated at different wind speed with maximum power. This paper presents the const ructure of wind power generation system, the PWM control method of inverter and control strategies at maximum energy. The novel wind energy conversion system is characterized by high efficiency, fast dynamic response and so on.

Key words: wind energy conversion; power electronics; wind power generation

0 引言

近年来, 风力发电系统(WPGS)在世界各地迅速发展, 对WPGS的研究也得到重视。目前世界风力发电装机主要集中在欧洲地区, 德国、西班牙、丹麦等国家风力装机容量居于欧洲和世界的前列。

与世界先进水平和我国电力工业发展总体水平相比, 我国的风力发电还处于相对落后的地位。但我国风能资源相当丰富, 特别是东南沿海及附近岛屿、内蒙古、东北、西北、青藏高原等地区, 每年风速在3 m/s 以上的时间近4 000 h, 部分地区年平均风速可达6~7 m/s 以上, 具有很高的开发利用价值。新疆、甘肃、内蒙古等省区是中国风力资源最丰富的地区, 而且这些地区的风速稳定, 适合发展大型风力发电厂, 这些地区的装机容量可以达到500 GW, 年发电可以达到180万GW·h,

是目前中国电力消费量的60%左右。

由此可见, 在风力资源丰富的地区, 风力发电是一个极有吸引力与发展潜力的领域。风电的经济效益与社会效益将日益突出, 使风电成为电力工业中新的生力军^[1]。

1 基于电力电子变流技术的风力能源变换系统的组成

1.1 风力发电系统

目前风力发电系统可以分成两类: 定速风机发电系统和变速风机发电系统。在定速系统中采用变桨矩定速风机带动发电机, 发出的电能直接送上电网。能源变换效率的最大值出现在定速风机工作的额定风速点上。

在变速系统中, 由于定桨矩变速风机必须使用电力电子变流装置, 将变频变压的电能变换成定频定压的电能, 并送入公用电网或局域网, 变速风力系统在较宽的风速范围之内, 都可以获得较大的变换效率。

收稿日期: 2005-11-20

作者简介: 赵莉, 副教授, 硕士毕业于西南交通大学电力电子与电力传动, 研究方向为电力电子技术。

尽管增加电力电子变流设备会提高系统的初始成本，但由于变速风力发电系统具有较高的能量捕获效率，在使用中电能的平均成本比定速风机低^[3-7]。电力电子技术的快速发展，为提高系统容量，降低发电成本打下了坚实的基础，因此，变速风力发电系统中应用电力电子技术将日益广泛。

1.2 变速风力系统

图1表示典型的变速风力发电系统。系统中的风机功率可以从几百瓦到数兆瓦，可以是多叶片的水平轴式风机，或者是垂直轴式风机。其中水平轴式风机最为普遍。

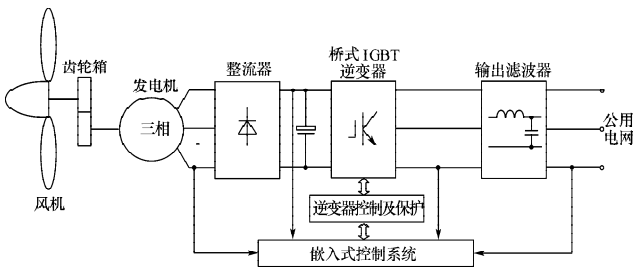


图1 变速风力发电系统的典型结构

许多商业运行的风力发电系统是通过齿轮将发电机与风机耦合。近年来，低速同步发电机与风机间无齿轮传动直接耦合是一种发展趋势。这种结构的发电系统可以免除对齿轮的维护，从而降低噪声和成本。

图1中发电机到公用电网之间为电力电子变流器。其作用主要是将能源转换成交流电，变流器中的逆变器一般使用IGBT作为半导体开关器件，故又称IGBT逆变器。

变流器中，从发电机发出的变压变频的电能通过整流器变成直流电。采用可控或不可控整流器均可，不可控整流器简单，可控整流器可在风速变化的范围内获得所需的直流电压。电压源逆变器采用电容器作为直流支撑环节。针对不同的应用，若直流环节的储能容量要求较高，可以联合使用升压装置和可充电蓄电池。在直流环节之后，应用单相或三相桥式逆变器。桥式逆变器中的半导体开关器件有多种选择，例如SCR、GTO、FET等等，但是在中等容量的风力能源变换系统中，正弦波逆变器一般选择IGBT开关。对于正弦波逆变器，运用脉宽调制技术控制开关的导通和关断，使输出电流电压为正弦波形。

桥式电路与LC输出滤波器相连，滤波器减少功率半导体开关输出谐波。滤波器与电网连接，将定频定压的电能注入电网。

逆变器的控制电路通常包括微处理器及其外围电路、传感器及其转换电路、保护电路、驱动电路、触发逻辑电路等。

2 风力发电系统中逆变器的PWM控制方法

在逆变器的控制中，PWM不仅作为一种可靠可行的控制方法，而且还能减少谐波成分，改善逆变器输出电能的质量。目前最常用的方法有三种：

2.1 谐波消除控制

谐波消除法的基本原理是通过产生特定的脉冲序列来消除滤波器难于滤除的低次谐波，比如5、7、11、13次谐波等，特定脉冲序列是通过计算触发角获得的。图2所示为一典型的交流相电压PWM脉冲，计算了半个周期内5个点和5个控制角 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_5$ 。通过将此波形展开成傅立叶序列，可以得到方程式(1)和(2)。

$$V_a(t) = \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin n\omega t \dots\dots\dots(1)$$

$$b_n = \frac{4}{n\pi} [1 + 2(-\cos n\alpha_1 + \cos n\alpha_2 - \dots + \cos n\alpha_k)]$$

$$= \frac{4}{n\pi} \left[1 + \sum_{i=1}^k (-1)^i \cos n\alpha_i \right] \dots\dots\dots(2)$$

上式中 V_a 是PWM脉冲序列产生的交流相电压， b_n 是n次谐波成分，k是半周内脉冲的个数。

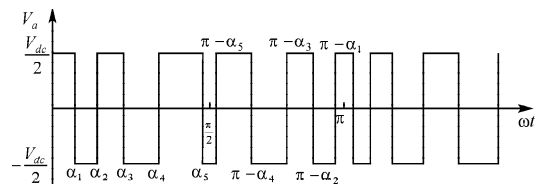


图2 消除谐波控制的典型PWM序列

基波成分指数等于M，通常为调制比，由逆变器的输出要求决定。为了消除5次谐波，可以非常简便地设定方程(2)中 b_5 等于零。按照这种设定，当5、7、11、13次谐波都为零时，基波为M，就可得出的方程组(3)。通过求解该方程组，即可求得 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_5$ 。分析中由于三相逆变器的Y型接法，三次谐波自然为零，由于PWM波形的对称性，偶次谐波均为零。

$$\frac{4}{\pi} (1 - 2\cos 1\alpha_1 + 2\cos 1\alpha_2 - 2\cos 1\alpha_3 + 2\cos 1\alpha_4 - 2\cos 1\alpha_5) - M = 0$$

$$\frac{4}{5\pi} (1 - 2\cos 5\alpha_1 + 2\cos 5\alpha_2 - 2\cos 5\alpha_3 + 2\cos 5\alpha_4 - 2\cos 5\alpha_5) = 0$$

$$\frac{4}{7p}(1-2\cos 7a_1+2\cos 7a_2-2\cos 7a_3+\dots)(3)$$

$$2\cos 7a_4-2\cos 7a_5)=0$$

$$\frac{4}{11p}(1-2\cos 11a_1+2\cos 11a_2-2\cos 11a_3+$$

$$2\cos 11a_4-2\cos 11a_5)=0$$

$$\frac{4}{13p}(1-2\cos 13a_1+2\cos 13a_2-2\cos 13a_3+$$

$$2\cos 13a_4-2\cos 13a_5)=0$$

谐波消除法相对而言，软硬件结构简单，并且能显著改善输出电压的谐波成分。对于高次谐波的问题，一是高次谐波的幅值相对较小，二是消除的谐波次数越多，所需的方程数越多，过多的方程数会导致求解的困难。

2.2 电流滞环控制

电流滞环控制的原理是，控制逆变器的输出电流在一条正弦带内（图3），当电流超过带的上部边界时，触发信号将IGBT逆变器关闭，电流降低。而当电流低于带的下部边界时，触发信号将逆变器开关开通，电流增加。

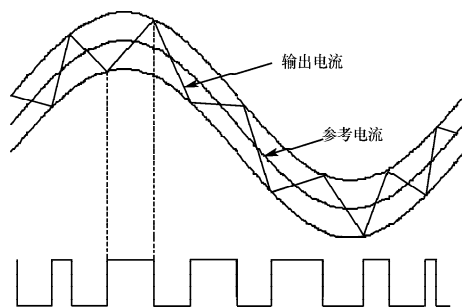


图3 电流滞环控制的原理

采用电流滞环控制，逆变器的输出功率可以依据正弦参考电流的幅值而平滑调节。参考电流称为逆变器电流理想值 $i_{dm} = I_{dm} \cdot \sin(\omega t)$ 。滞环的宽度影响输出功率的质量，最小宽度与功率半导体器件的最大开关频率有关。

电流滞环控制对电流的响应快速，这种特点对输入功率变化较快的系统，例如变速风力发电系统非常有益。根据网压调节参考电流的相位角，系统的功率因数可控。由于连续监测输出电流，对逆变器的电流保护很有帮助。不足之处是，这种方法需要快速数据处理、快速A/D转换和精确电流监测，从而需要较高的费用。

2.3 空间矢量控制

在电流滞环控制的基础上，空间矢量控制(SVM)可以使逆变器的输出品质更高，谐波畸变率

低。空间矢量控制的原理是考虑三相输出电流的瞬时误差，找出最合适的IGBT开关状态，使电流的误差变化最小。

在如图4所示的简化逆变器模型中，逆变器的输出电压可由方程式(4)表示，其中 $V(k)$ 是逆变器输出电压， i 是逆变器输出电流矢量， V_{grid} 是三相电网电压的矢量。方程式(5)表示的是三相电流的误差矢量，

i 是电流的实际值和三相电流给定值的差值。由于逆变器电压矢量 e 由方程式(6)定义，因此电流的变化 i 可由方程式(7)表示，图4中输出滤波器的阻抗 R 已忽略。

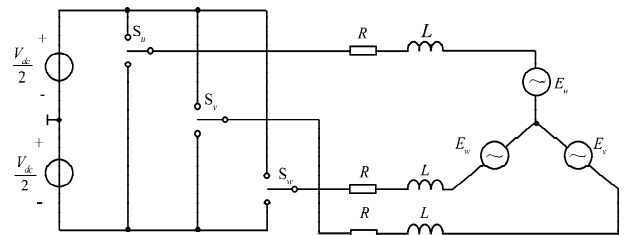


图4 空间矢量控制的逆变器模型

$$V(k) = L \frac{di}{dt} + Ri + V_{grid} \dots\dots\dots(4)$$

$$\Delta i = i^* - i \dots\dots\dots(5)$$

$$e = L \frac{d\Delta i}{dt} + V_{grid} \dots\dots\dots(6)$$

$$L \frac{d\Delta i}{dt} = e - V(k) \dots\dots\dots(7)$$

逆变器输出电压矢量 $V(k)$ 仅由IGBT的开关状态决定，如图4所示，若“1”表示开关与正电压相接，而“0”表示开关与负电压相接。这三个开关 (S_u, S_v 和 S_w) 总共有8种开关状态 (000, 001, ..., 111)。由于状态000和状态111的输出电压均为零，实际状态仅有7种。对应这7种不同的开关状态，输出电压空间矢量图如图5所示。 $V(k)$ 与IGBT开关状态的关系列于表1中。

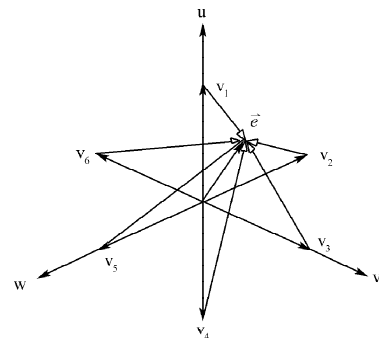


图5 空间矢量图

表1 $V(k)$ 和IGBT的状态的关系

S_u, S_v, S_w	000, 111	001	010	011	100	101	110
$V(k)$	$V(0), V(7)$	$V(5)$	$V(3)$	$V(4)$	$V(1)$	$V(6)$	$V(2)$

控制过程中，首先检测三相输出电流。当任何一相电流超出设定的环宽时，则计算电压矢量 e ，根据电压矢量的位置，选择合适的电压矢量 $V(k)$ ，使电流的变化率 di/dt 最小。这样能得到平滑的电流波形，谐波畸变率 (THD) 较低。例如在图 5 中，电压矢量 e 在图示位置时，可以选择矢量 $e-V(2)$ ，该矢量幅值最小，根据 IGBT 门极脉冲，IGBT 的开关状态为 110。

与谐波消除法和电流滞环法不同的是，空间矢量控制将三相电流电压统一考虑，而不是分相单独考虑。因此，输出 THD 最小。然而，过小的 THD 会影响电流的响应速度，因为为使电流变化率最小，开关状态已经选定，逆变器的输出电流跟踪给定电流的速度较慢，延长了逆变器的暂态响应时间。

2.4 三种 PWM 控制策略的比较

三种 PWM 控制方法，本质上，谐波消除法在电压源逆变器中的控制目标是三相输出电压，利用一次侧输出滤波器。由于在与电网相连的系统中，采用二次侧滤波器，即使很小的相位差和幅值差都会引起输出电流的较大变化。由于谐波消除法没有电流直接响应环节，将会发生过电流。因此，该控制方法很少接实际负载，尤其是与电网连接。

为了使输出电流为正弦波形，电流滞环控制建立了电流反馈环节，这一结构使电流响应快速并对逆变器进行电流快速保护。为使输出电流跟踪网压波形，该控制方法设计有功率因数校正环节。速度愈快，滞环带的宽度愈窄，开关的速度也愈高。

在对电能质量要求很高的场合，可以选用空间矢量控制方法。SVM 法根据 IGBT 逆变器三相开关状态来获取最小电流变化。因此，输出电流的谐波成分减少，但要求用于控制的微处理器要有足够快的速度 [2][8-11]。

3 能量最大化控制策略

变速风力发电系统中最大功率获取算法近年来成为一个热门的研究课题，尽管这些算法基于不同的变流器拓扑结构，但根据它们的原理可以大致分为三类，分别称为叶尖速比控制算法、功率信号反馈算法、登山搜索算法。

3.1 叶尖速比 (TSR) 控制算法

叶尖速比控制的目的是，使风机的叶尖速比保持为最优值，以便在任何风速下都能获得最大的变换效率 [12-14]。如图 6 所示，风速和风机的转速都要测量，并作为控制系统的输入信号，TSR 的最佳值可以通过计

算或实验获得。尽管 TSR 控制比较简单 (一个 PI 控制器即可满足要求)，但是测量风速的困难使得 TSR 控制算法难以达到精确。另外，TSR 的最佳值在不同的系统中也不相同，它与风机及发电机的特性相关，因此该算法的移植比较困难。

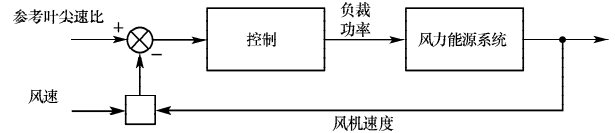


图 6 TSR 控制的原理框图

3.2 功率信号反馈 (PSF) 控制

PSF 控制需要查表找出风机转速和最大输出功率之间的关系 [15-21]。PSF 控制的原理如图 7 所示。假设 P_0 是最佳系统在当前风速下的输出功率， ω_1 是测量的风机转速值，PSF 控制可在最大功率曲线上选取 P_1 作为系统的输出功率，最大功率曲线由图中的虚线所示。风机转速将从 ω_1 加速到 ω_0 ，因为 P_1 小于风机的机械功率 P_1' ，转速变化到达 ω_0 ， P_0 可以从参考输出功率曲线上查表得出，并反映系统处于最佳状态。同样的道理，当风机的转速为 ω_2 时，通过 PSF 控制，其转速将降低，并到达 ω_0 。

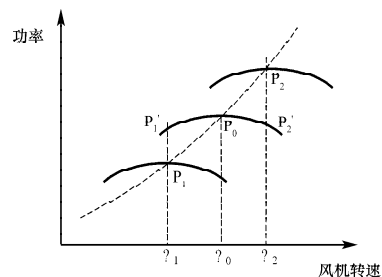


图 7 PSF 控制原理

一些 PSF 控制算法基于风速和最大功率的关系曲线，需要额外投入测量风速的设备，用风速代替风机转速。有些 PSF 控制器采用模糊逻辑控制，基于参考功率轨迹调节系统的输出功率；有些利用神经网络模型来记录并修正风机转速和参考功率之间的关系。很明显，因 PSF 控制的不足，很难找到风机转速和最大功率之间的准确关系。图 8 为 PSF 控制原理框图。

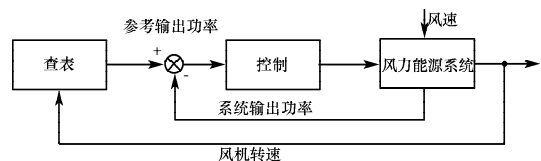


图 8 PSF 控制原理框图

3.3 登山搜索 (HCS) 控制

HCS 控制的基本原理如图 9 所示^[22-25]。假设风机转速的增加引起风机机械功率的增加, HCS 控制使风机转速沿着上升的区域接近最大功率点, 反之, 风机减速使风机沿着下降区域接近最大功率点。由于风机机械功率无法直接测量, 基于方程式 (1), 系统的输出功率在风机暂态响应足够快的情况下, 可以用登山搜索的方法来获得。HCS 在太阳能变换系统中的成功应用就得益于系统没有惯性, 惯性很小的小型风力发电机组也可以使用这种控制算法。但对于大功率的风力能源系统, 由于风机具有较大的转动惯量, 使得系统的时间常数足够长, 因此搜索算法非常慢, 特别是对大惯量的垂直轴式风机系统。

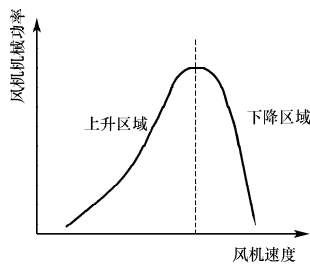


图 9 HCS 控制原理

$$P_m - P_{Load} - T_f \times \omega = \omega \times J \frac{d\omega}{dt} \dots\dots\dots (8)$$

- 式中: P_m ——风机的机械功率;
- P_{Load} ——风机的负载功率 约等于系统的输出功率;
- T_f ——反转矩;
- ω ——风机的转速;
- J ——风机的转动惯量。

图 10 为 HCS 控制原理框图。登山搜索算法的优势是便于应用及硬件简单。控制算法与风机及发电机的特性无关, 因此对变速风机而言, 不需要预先作实验和计算, 可以方便地应用该算法。构成控制器的硬件也相对简单, 因为不需要测量风速。

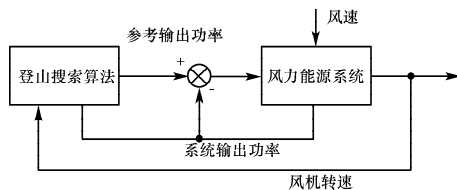


图 10 HCS 控制原理框图

4 结论与展望

电力电子技术的发展将促进风力能源的应用, 大

型并网型风力电场的开发将使风电的价格进一步降低。随着国家能源政策的调整, 风电产业会不断扩大。

采用电力电子最优控制技术的风力能源系统, 有比其他系统获取更多能量的优势, 研究结果表明, 同样功率的系统, 年发电量居高。随着电力半导体开关容量频率的提高和价格的下降, 电力电子变流系统的性能也将不断提高, 成本下降以及控制技术不断成熟, 它在风力能源系统中的应用也将更为广泛。

参考文献:

- [1] 王承煦, 张源. 风力发电 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
- [2] 叶杭冶. 风力发电机组的控制技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [3] Bimal K Bose. 现代电力电子学与交流传动 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [4] Gary L Johnson. Wind Energy Systems, Prentice-Hall, Inc, Englewood Cliffs [D]. N.J. 07632.
- [5] Daniel Hunt V. Windpower: a handbook on wind energy conversion [M]. New York: Van Nostrand Reinhold Co, 1980.
- [6] Muhammad H. Rashid, Power Electronics, Circuits, Devices, and Applications, Prentice Hall, Englewood Cliffs [C]. New Jersey 07632, 1993.
- [7] Kjeld Thorborg, Power Electronics - in Theory and Practice, Prentice Hall [D]. UK, 1993.
- [8] Bimal K Bose. Power Electronics and Variable Frequency Drives: Technology and Applications, IEEE Press Inc [M] New York, NY 10017-2394, 1997.
- [9] Liuchen Chang, Chris Diduch, Pinggang Song. Development of Standards for Interconnecting Distributed Generators with Electric Power Systems [J]. Proceeding of 36th IEEE Power Electronics Specialists Conference (pesc'05), June 2005.
- [10] Quincy Wang, Liuchen Chang. An Independent Maximum Power Extraction Strategy for Wind Energy Conversion Systems [J]. Proceeding of IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE'99), May 1999.
- [11] Qingrong Zeng, Liuchen Chang. Improved Current Controller Based on SVPWM for Three-Phase Grid-Connected Voltage Source Inverters [J]. Proceeding of 36th IEEE Power Electronics Specialists Conference (pesc'05), June 2005.
- [12] K Buehring, L L Freris. Control Policies for Wind Energy Conversion System [J]. IEE PROC, 1981, 128(5).
- [13] M Sadre. Electro-mechanical Converters Associated to Wind Turbines and Their Control [J]. Solar Energy, 1997, 61(2): 119-125.
- [14] J Thiringer, J Linders. Control by Variable Rotor Speed of a Fixed-Pitch Wind Turbine Operating in a Wide Speed Range [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1993, 8(3): 520-526.
- [15] R Chedid, F Mrad, M Basma. Intelligent Control for Wind Energy Conversion Systems [J]. Wind Engineering, 1998, 22(1): 1-16.
- [16] A A Shaltout, Maximum Power Tracking for a wind Driven Induction Generator Connected to a Utility Network [J]. Applied Energy, 1995, 52: 243-253.

(下转第42页)

了许多小型样品试运时没有想到的不良情况(例如在管道中会留有反应生成的水,阻碍了燃料和空气的供给等),这些问题已有了解决对策,现在可以长期稳定运行了。

6 转向架在试验台上的驱动试验

把装有试制的燃料电池的铁道车辆的转向架置于试验台上进行驱动试验。实际上,车辆转向架采用氢能源进行驱动试验在世界上还是首次。图5是其构成概图。燃料电池发出的直流电经逆变器变成交流电来驱动异步电动机。本次使用的铁道车辆转向架与实际通勤电车的大体相同。由于异步电动机按逆变器将直流1500V转换的要求来研制的。而燃料电池输出的直流电压只有300V,为此,不得不降低异步电动机的性能,调整起来费时费力。调整结果如下:

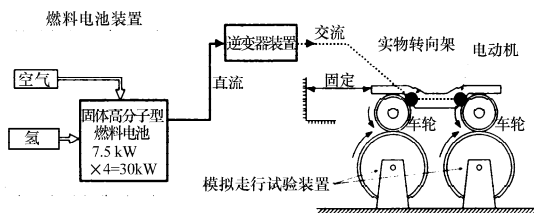


图5 试验台试验装置概图

- (1) 确认可驱动到50 km/h(图6);
- (2) 确认燃料电池的额定输出;
- (3) 确认负荷变动的跟随性。

上述调试,除了输出较小外,可以确认新试制的

燃料电池满足了铁道车辆电源的要求。

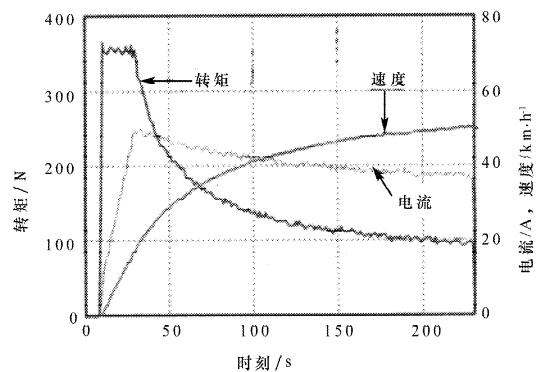


图6 转向架试验结果

7 结语

本次研究开发是燃料电池用于铁道车辆的基础研究。从2001年开始的三年时间中,进行了燃料电池的选定,燃料电池系统的试制,转向架驱动试验。在此基础上,从2004年开始第二阶段工作,研究在车辆上能实际搭载100 kW级燃料电池的系统,拟在所内的电车上搭载此系统进行运行试验。为此,燃料电池系统以及供给燃料和空气的装置的小型轻量化是绝对必要的。现在成本和寿命是燃料电池的最大问题,但燃料电池的技术开发速度是惊人的,将来一定能满足低成本和高寿命的要求。

译自《RRR》2004, 9

译者:钱文良

校者:张振生

(上接第38页)

[17] M Ermis, H B Ertan, E Akpınar, F Ulgut. Autonomous Wind Energy Conversion Systems with a Simple Controller for Maximum-Power Transfer[J]. IEE Proceedings Electric Power Applications 1992, 139(5): 421-28.

[18] R Spee, S Bhowmik, J Enslin. Novel Control Strategies for Variable-Speed Doubly Fed Wind Power Generation Systems[J]. Renewable Energy, 1995, 6(8): 907-915.

[19] P Stergenakis, E Tatakis, E Tsimploustephanakis, N Polyzos, A Safacas. Investigation of the optimal operation of a wind generation using a microprocessor controlled drive system[J]. Electro-motion, 1997, 4(1/2): 44-49.

[20] R Hillowala, A M Sharaf. A Rule-Based Fuzzy Logic Controller for a PWM Inverter in a Stand Alone Wind Energy Conversion Scheme[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1996, 32(1): 57-65.

[21] R Chedid, F Mrad, M Basma. Intelligent Control of a class of Wind Energy Conversion System[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1999, 14(4): 1597-1604.

[22] M G Simoes, B K Bose, R J Spiegel. Fuzzy Logic-Based Intel-

ligent Control of a Variable Speed Cage Machine Wind Generation System[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1997, 12(1): 87-94.

[23] M G Simoes, B K Bose, R.J. Spiegel. Design and Performance Evaluation of a Fuzzy-Logic-Based Variable-Speed Wind Generation System[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1997, 33(4): 56-64.

[24] T Tanaka, T Toumiya. Output Control by Hill-climbing Method For a Small Wind Power Generating System[J]. Renewable Energy, 1997, 12(4): 387-400.

[25] J H Enslin, J V Wyk. A Study of a Wind Power Converter with Micro-Computer Based Maximum Power Control Utilizing an Over-Synchronous Electronic Scherbius Cascade[J]. Renewable Energy, 1992, 2(6): 551-562.

[26] 郭烈锦, 赵亮. 基于可再生能源的分布式多目标供能系统[J]. 西安交通大学学报, 2002, 36(5): 441-445.

[27] 彭晓, 黄绍平. 电力前沿技术综述[J]. 大众用电, 2002(8): 22-23.

[28] 王健, 康龙云, 曹秉刚. 新能源分布式发电系统的能量互补控制研究[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(6): 1438-1440.