

WT2500 型风机变速调桨控制算法设计

翟大勇, 郭 锐, 叶 伟, 颜毅斌

(南车株洲电力机车研究所有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘 要: 分析了风机各部件的主要振动模态对风机的影响, 包括风轮、传动链以及塔筒等, 并针对南车 WT2500 型风机各主要部件设计了控制器的算法; 通过 Bladed 及 Matlab 软件对控制器的稳定性及动态特性进行仿真。现场调试验证了控制算法的效果, 并对控制器的参数进行了优化。

关键词: 变速调桨; 振动模态; 传动链阻尼器; 滤波器

中图分类号: TM315; TM301.2

文献标识码: A

文章编号: 2095-3631(2012)06-0031-05

Design on VSPR Control Algorithm of WT2500 Wind Turbine

ZHAI Da-yong, GUORui, YEWei, YAN Yi-bin

(CSR Zhuzhou Institute Co.,Ltd., Zhuzhou,Hunan 412001,China)

Abstract: It firstly analyzed the affects of the main vibration modes for each part of wind turbine, including rotor, drive train and tower, and designed the control algorithms in accordance with CSR WT2500 wind turbine. Secondly, it simulated stability and dynamic performance of the controller through Bladed and Matlab. Finally, the experiment results verified the efficiency of control algorithm in site debugging, and the control parameters were optimized.

Key words: variable speed and pitch regulation (VSPR); vibration modes; drive train damper; filter

0 引言

在风力发电领域, 风力发电机组的控制目标主要有两点: (1) 在额定风速以下, 风机的转速能够跟随风速的变化保持最佳叶尖速比, 并沿着最佳功率曲线运行以最大限度获取风能; (2) 在额定风速以上, 风机保持恒速运行及恒功率运行, 同时要求风机各部件的振动要尽可能的小, 保证风机产生较小的环境噪声及延长风机部件的使用寿命。

1 控制策略设计

南车 WT2500 型风机的主要参数如表 1 所示。通过 Bladed 软件, 可以分析风机所有的振动模态, 分析结果

如表 2 所示。为了实现上述控制目标, 设计的控制策略如图 1 所示。

表 1 风机主要参数

Tab.1 Key parameters of wind turbine

发电机类型	高速永磁同步发电机
最大稳态电气功率	2.5 MW
发电机效率	0.941
切入风速	3.5 m/s
切出风速	23 m/s
最低电机转速 (并网)	821 r/min
电机额定转速	1650 r/min
额定电机转矩	15663 N · m
齿轮箱变比	112.5
空载损耗	50 kW
叶片直径	106 m
最大变桨速率	8 (°)/s
变桨角度调节范围	-0.5° ~91°
轮毂高度	80 m

收稿日期: 2012-09-30

作者简介: 翟大勇 (1983-), 男, 硕士研究生, 设计师, 主要从事风力发电机组主控系统的技术与开发。

表2 风速为 12 m/s 时风机的各种振动模式

Tab.2 Vibration modes of the turbine at 12 m/s wind speed

自然频率 / 阻尼 / Hz %	模态类型	频率	
		$P_0=7.36 \text{ r/min}$	$P_N=14.8 \text{ r/min}$
0.31 0.62	塔筒左右一阶模态	$2.56 P_0$	$1.28 P_N$
0.32 8.42	塔筒前后一阶模态	$2.59 P_0$	$1.29 P_N$
0.74 42.4	叶片 A 一阶挥舞	$6.02 P_0$	$3.00 P_N$
0.74 42.8	叶片 B 一阶挥舞	$6.07 P_0$	$3.02 P_N$
0.77 40.7	叶片 C 一阶挥舞	$6.25 P_0$	$3.11 P_N$
1.23 1.92	叶片 A 一阶摆振	$10.0 P_0$	$4.98 P_N$
1.25 1.95	叶片 B 一阶摆振	$10.2 P_0$	$5.07 P_N$
1.64 80.0	叶片 A 模态 3	$13.04 P_0$	$6.49 P_N$
1.77 2.53	传动链	$14.25 P_0$	$7.09 P_N$
1.83 13.6	叶片 B 二阶挥舞	$14.91 P_0$	$7.42 P_N$
1.95 14.5	叶片 C 二阶挥舞	$15.88 P_0$	$7.90 P_N$
2.57 2.18	塔筒前后二阶模态	$20.98 P_0$	$10.44 P_N$
2.58 1.03	塔筒左右二阶模态	$20.98 P_0$	$10.44 P_N$
2.88 0.98	塔筒模态 5	$23.48 P_0$	$11.68 P_N$
3.73 1.46	叶片 A 模态 4	$30.38 P_0$	$15.12 P_N$
3.77 1.48	叶片 B 模态 4	$30.69 P_0$	$15.27 P_N$
4 6.21	叶片 A 模态 5	$51.86 P_0$	$25.8 P_N$
4.09 6.65	叶片 B 模态 5	$64.69 P_0$	$32.19 P_N$
4.86		$80.73 P_0$	$40.17 P_N$

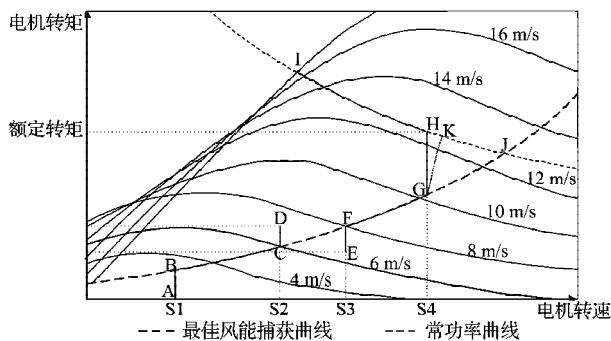


图1 WT2500 型风机控制策略

Fig.1 The control strategy of WT2500 wind turbine

可看出, 风速较低 (3.5~10 m/s) 时, 风机沿着最佳风能捕获曲线 (BG 段) 运行, 该曲线为风机力矩 - 转速平面内的一条二次曲线, 如式 (1) 所示:

$$T = \frac{\pi \lambda \rho R^5 C_p(\lambda)}{2 \lambda^3 G^3} \omega_g^2 \quad (1)$$

式中: T ——发电机转矩给定; ρ ——空气密度; R ——转子半径; λ ——叶尖速比; C_p ——风能利用系数; G ——齿轮箱变比; ω_g ——发电机转速。

在较高风速 (大于 10 m/s) 情况下, 风机运行至额定转速 S4 点之后, 脱离最佳运行曲线而沿着 GH 段做恒速运行, 转矩给定在此时不断地增加。随着风速增加至额定风速 (13 m/s) 附近, 风机的功率达到额定值 (H 点), 此时, 变桨系统开始工作, 将风机的功率和转速维持在额定值附近。风速超过 23 m/s 后, 报警系统产生停机信号, 控制风机停机。

1.1 变速控制

风机的变速运行是通过控制发电机气隙转矩来实现的。控制器根据检测到的风机转速的偏差, 通过 PI 调节, 产生一个给定转矩, 并向变流器发送转矩命令, 变流器根据转矩命令, 在发电机气隙中产生一个对应的转矩, 控制风机加速或减速, 从而将风机转速维持在期望值附近。

1.2 转矩 PI 控制

转矩控制器的结构图如图 2 所示。

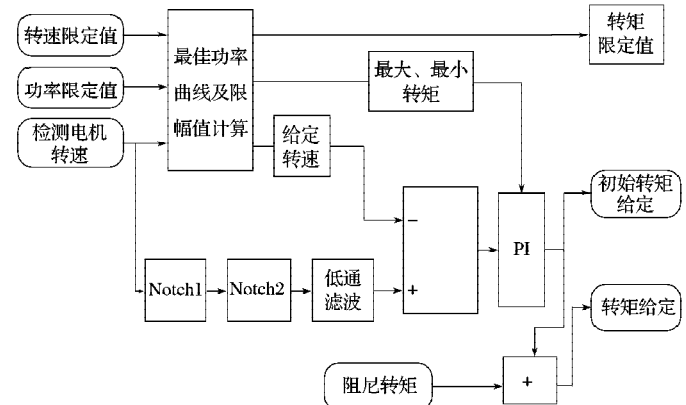


图2 转矩控制器结构图

Fig.2 Block diagram of torque control

图中, PI 调节器的增益值通过线性化控制设计得到, 其拉氏变换形式如式 (2):

$$K_q + \frac{K_q}{T_q s} \quad (2)$$

式中: K_q ——PI 控制器比例系数; T_q ——PI 控制器积分时间常数。

在 PI 调节器前面, 增加一个二阶的带阻滤波器和一个二阶的低通滤波器, 带阻滤波器用以衰减转速的 3 次和 6 次谐波信号 (以下简称 3p 和 6p 信号), 低通滤波器用以衰减高频噪声干扰信号。

其中带阻滤波器 Notch1, Notch2 的传递函数表达式如式 (3):

$$N(s) = \frac{s^2/\omega^2 + 2\zeta_1 s/\omega + 1}{s^2/\omega^2 + 2\zeta_2 s/\omega + 1} \quad (3)$$

式中: ω ——带阻滤波器中心频率; ζ_1, ζ_2 ——带阻滤波器品质因数。

1.3 传动链阻尼器

在额定工作点以上, 控制器调节的发电机的转速以及转矩都在小范围内变化, 传动链上的任何振动都会有低阻尼。因此, 传动链上的振动很容易产生共振, 结果会在齿轮箱上产生一个与传动链一阶模态频率一致的幅值很大的振荡转矩。对于这种振动, 可以将得到的振动信号转换成一个额外的阻尼转矩, 进而对初始

的转矩给定值进行修正,如图3所示。这样就可以大幅度地降低齿轮箱的载荷,带通滤波器的通过频率应接近转子平面内的一阶振动模态频率。

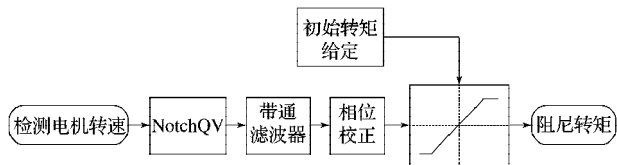


图3 传动链阻尼器控制结构图

Fig.3 Block diagram of drive train damper

1.4 桨距角调节

变桨控制器的结构如图4所示。

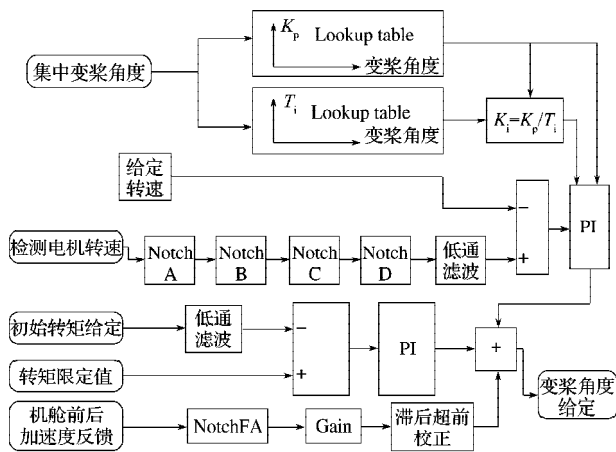


图4 变桨控制器结构图

Fig.4 Block diagram of pitch controller

当风速足够大,发电机的转矩和功率将达到额定值时,变桨系统将启动。变桨系统通过调节桨距角将发电机转速维持在设定值。桨距角的调节也是通过双PI调节器来实现。在转速变桨PI调节器之前,设置4个二阶的带阻滤波器和1个二阶的低通滤波器来对转速信号进行滤波。4个带阻滤波器的中心频率分别对应3p、6p、传动链频率以风轮转速平面内一阶振动模态频率。低通滤波器用于减小控制器对高频噪声信号的灵敏度。

在高速情况下,叶片的气动转矩对叶片桨角变化非常敏感,因此随着工作点的变化,PI控制器的增益也需对应改变。比例增益值的变化可以确保变桨系统在较大风速范围内都有良好的动态特性和足够的稳态增益裕度;而积分时间常数随桨角的增大而减小,这样可以增加变桨系统的幅值裕度从而保证在额定风速附近系统有足够的带宽。

随着风机功率的增加,会加大塔筒载荷及机舱振动,影响塔筒的使用寿命并产生噪声。通过引入机舱的前后加速度反馈信号,可以增加机舱前后振动模态的阻尼,从而减小塔筒的载荷。机舱的加速度信号经过带阻滤波器过滤3p信号,并经过一个滞后超前环节进行相位

调节。变桨控制器的传递函数形式如式(4)、式(5)所示。

变增益PI控制器:

$$K_p(\beta) + \frac{K_i(\beta)}{T_i(\beta)s} \quad (4)$$

式中: K_p ——PI控制器的比例系数; T_i ——PI控制器积分时间常数; β ——变桨角度值。

带阻滤波器(陷波器)NotchA, NotchB, NotchC, NotchD为:

$$N(s) = \frac{s^2 + 2\xi_1\omega s + \omega^2}{s^2 + 2\xi_2\omega s + \omega^2} \quad (5)$$

2 仿真分析

应用Bladed软件的线性化模块,得到不同风速下风机的线性化数学模型,其为高阶状态方程;然后根据该方程采用Matlab软件进行控制器设计,最后得到整个控制系统的数学模型,并在Matlab中进行稳态特性和动态特性的仿真分析。

2.1 传动链加阻

传动链加阻前后的开环伯德图如图5所示。传动链加阻前后齿轮箱低速轴输出转矩的阶跃响应曲线如图6所示。从仿真曲线可以看出,在传动链一阶振动频率(图5中曲线的峰值处)的附近,传动链的阻尼明显加大,其振动幅度也明显降低。

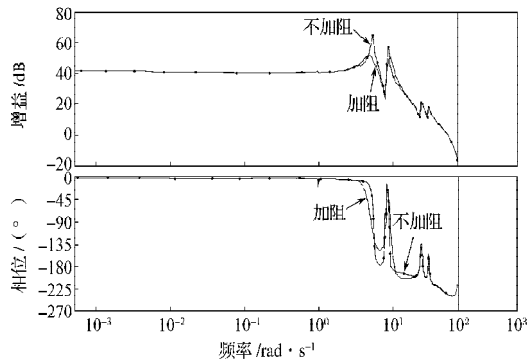


图5 传动链开环伯德图(风速 12 m/s)

Fig.5 Open loop bode diagram of drive train(wind speed at 12 m/s)

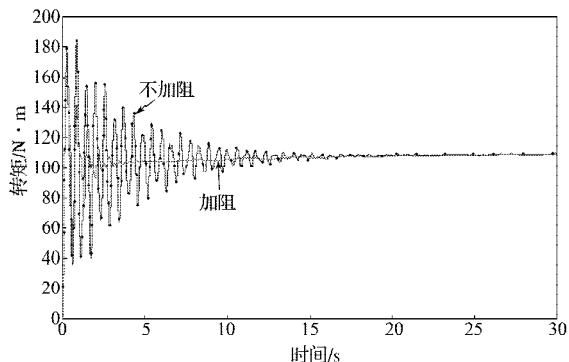


图6 传动链阶跃响应(风速 12 m/s)

Fig.6 Step response of drive train(wind speed at 12 m/s)

2.2 塔筒加阻

塔筒加速度信号引入前后,塔筒前后方向运动对应风速变化的阶跃响应曲线如图7所示。由图可知,引入加速度反馈信号以后,塔筒前后振动幅度明显降低。

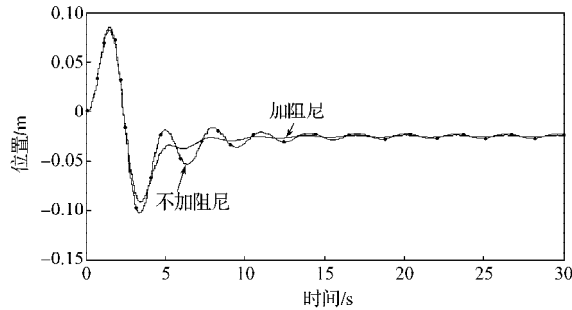


图7 塔筒振动对风速变化的阶跃响应曲线(14 m/s)

Fig.7 Step response of nacelle vibration for wind speed (wind speed at 14 m/s)

3 实验结果

所设计的控制器已应用于南车WT2500风力发电机组,通过Bladed软件中的Hardware Test模块,实时采集风机运行时的数据,并采用Matlab进行控制器优化和数据分析,分析结果表明本文所设计的算法实现了理想的控制效果。

风速为8.5 m/s左右时,进行传动链加阻实验。发电机转速稳定在1250 r/min,风机输出的有功功率为1 MW,如图8所示。加阻前后电机转速信号的功率谱密度如图9所示。加阻之后,风轮3p(0.555 6 Hz)信号对风机的影响得到削弱。

风速为12 m/s时,功率限定在2.2 MW,转速限定在1 500 r/min,风机运行情况如图10所示。对应转速信号的功率谱密度如图11所示,转子的6p、9p、12p对风机的影响都处于很低的水平。

在风速13 m/s时,全功率运行。转速限定在1650 r/min,功率为2.5 MW时,风机运行情况如图12~图15所示。从功率谱密度图可清晰地分辨出风机的各个振动模式。

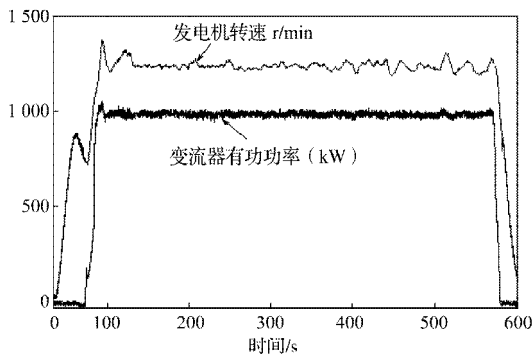


图8 发电机转速与功率(1 250 r/min,1 MW)

Fig.8 Speed and power of the generator(1 250 r/min,1 MW)

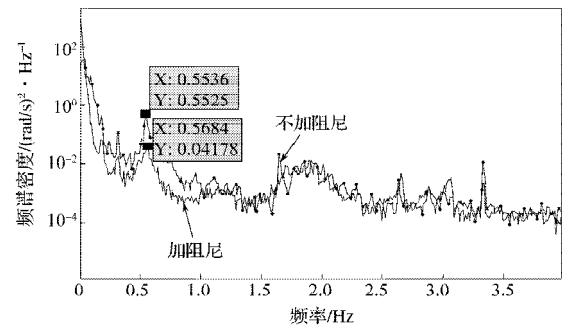


图9 传动链加阻前后电机转速的功率谱密度(1 250 r/min,1 MW)

Fig.9 Power spectral density of generator speed with and without drive train damper (1 250 r/min, 1 MW)

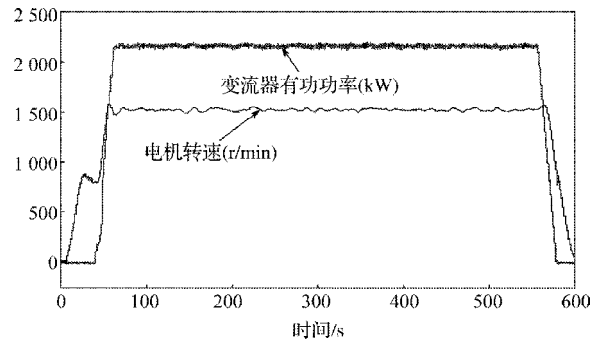


图10 风机限功率运行(1 500 r/min, 2.2 MW)

Fig.10 Tubine operates at limit speed 1 500 r/min and limit power 2.2 MW

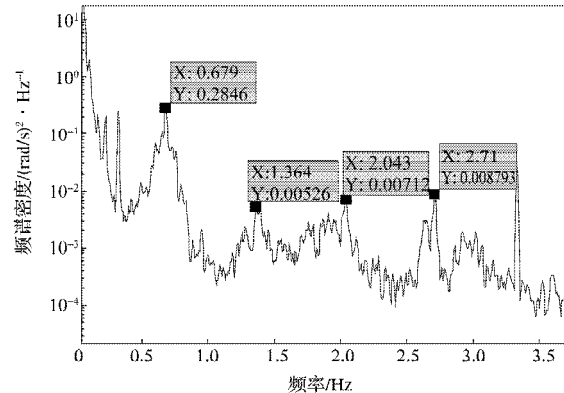


图11 发电机转速功率谱密度(1 500 r/min, 2.2 MW)

Fig.11 Power spectral density of generator speed (1 500 r/min, 2.2 MW)

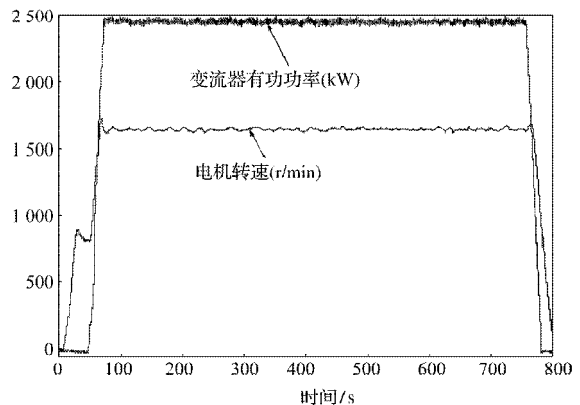


图12 风机全功率运行(1 650 r/min, 2.5 MW)

Fig.12 Turbine running at full power(1 650 r/min, 2.5 MW)

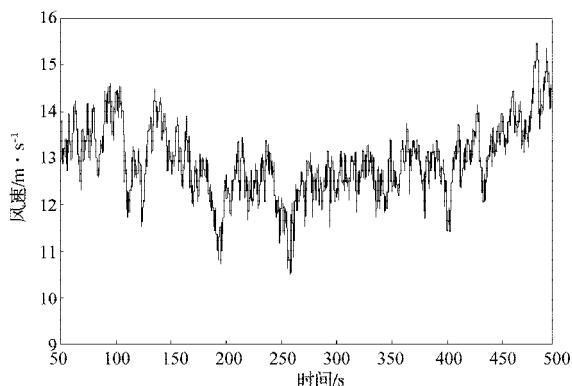


图 13 风速

Fig.13 Wind speed

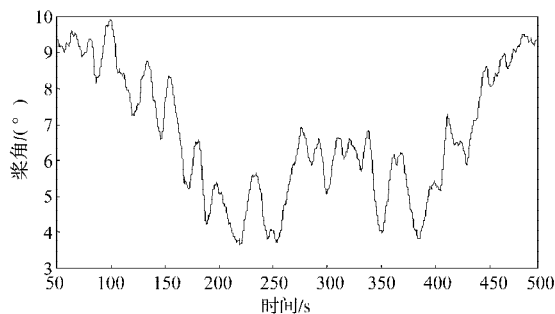


图 14 变桨角度

Fig.14 Pitch angle

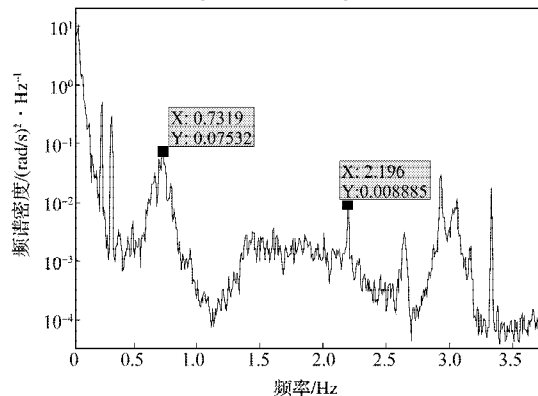


图 15 发电机转速功率谱密度

Fig.15 Power spectral density of generator speed

4 结语

从以上设计过程可以看出,运用Bladed和Matlab软件,可以将先进的控制算法应用于风力发电机组,设计及仿真都非常方便。该款风机性能良好,运行稳定,特别是在低风速区,其捕获风能的能力远高于WT1650型风机。随着后续系统优化的不断完善,其性能还将进一步提升。

参考文献

- [1] Tony Buton,武鑫. 风能技术[M]. 武鑫,译. 北京: 科学出版社, 2007.
- [2] 叶杭治. 风力发电机组的控制技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [3] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- [4] Bossanyi E A. GH Bladed Theory Manual[K]. Bristol: Garrad Hassan and Partners Limited, 2007.

声 明

为顺应网络环境下期刊出版的新要求,促进期刊网络出版进程,凡被本刊录用的论文,在《中华人民共和国著作权法》的框架内,其复制权、发行权、信息网络传播权、翻译权、汇编权等权利在全球范围内一并转让给《大功率变流技术》编辑部及其授权的第三方使用,本刊一次性支付作者著作权使用报酬(即稿费,包括印刷版、光盘版和网络版等各种版本的稿酬)。作者向本刊提交文章发表的行为即视为同意我刊上述声明。

《大功率变流技术》编辑部

株洲南车时代电气股份有限公司获第十四届中国专利金奖

2012年11月30日,国家知识产权局和世界知识产权组织在北京举行第十四届中国专利奖颁奖大会。会上,株洲南车时代电气股份有限公司的“一种直线感应电机恒转差频率矢量控制方法及系统”专利项目喜获金奖。相关论文《磁悬浮列车直线感应电机恒转差频率磁场定向控制》已发表在本刊2010年第1期上。

