

NUAA2011039773

Z427
1033(2010)-(16)

自动化学院

032~035



16

2011039773

序号	作者姓名	职称	单位	论文题目	刊物名称	年卷期
1	王前双 胡育文 黄文新	硕士 正高 正高	032 032 032	风力机模拟技术综述	电机与控制应用	2010, 30 (33)
2	卜飞飞 胡育文 黄文新 施凯 王前双	博士 正高 正高 博士 硕士	032 032 032 032 032	基于DSP控制的风力机偏航控制系统研究	电气传动	2010, 40 (4)
3	梁骄雁 胡育文 鲁文其	硕士 正高 博士	032 032 032	基于梯度算法的永磁伺服系统惯量辨识性能研究	航空学报	2010年11月11号 (优先出版)
4	杜栩扬 胡育文 鲁文其 黄文新 梁骄雁	硕士 正高 博士 正高 硕士	032 032 032 032 032	基于凸极跟踪的IPMSM转子初始位置自检测的研究	微电机	2010, 43 (10)
5	杜栩扬 胡育文 鲁文其 黄文新 梁骄雁	硕士 正高 博士 正高 硕士	032 032 032 032 032	基于准滑模观测器的PMSM无位置传感器控制	电气传动	2010, 40 (5)
6	储剑波 胡育文 黄文新 杨建飞	博士 正高 正高 博士	032 032 032 032	一种变频器相电流采样重构技术	电工技术学报	2010, 25 (1)
7	余文涛 胡育文 郝振洋 黄文新 许顺	硕士 正高 博士 正高 硕士	032 032 032 032 032	一种改进型永磁电机数字电流滞环控制方法	电气传动	2010, 40 (2)
8	余文涛 胡育文 郝振洋 黄文新 许顺	硕士 正高 博士 正高 硕士	032 032 032 032 032	永磁容错电机最优转矩控制策略实验	航空学报	2010, 31 (8)
9	鲁文其 胡育文 杜栩杨 黄文新	博士 正高 硕士 正高	032 032 032 032	永磁同步电机新型滑模观测器无传感器矢量控制调速系统	中国电机工程学报	2010, 30 (33)
10	鲁文其 胡育文 黄文新 杜栩杨	博士 正高 正高 博士	032 032 032 032	永磁同步电机重载驱动的伺服压力机动力系统电容储能参数	电工技术学报	2010, 25 (10)
11	郝振洋 胡育文 黄文新 余文涛 许顺	博士 正高 正高 硕士 硕士	032 032 032 032 032	转子磁钢离心式六相十极永磁容错电机及控制策略	中国电机工程学报	2010, 30 (30)
12	胡育文 张兰红 黄文新 卜飞飞	正高 正高 正高 博士	032 032 032 032	A Fault-Tolerant Induction Generator System Based on Instantaneous Torque Control(ITC)	IEEE Transactions on Energy Conversion	VOL 25, NO.2, JUNE 2010

13	胡育文 黄文新 李勇	正高 正高 博士	032 032 032	A Novel Instantaneous Torque Control Scheme for Induction Generator Systems	IEEE Transactions on Energy Conversion	VOL 25, NO.3, SEPTEMBER 2010
14	高瑾 胡育文	博士 正高	032 032	Direct Self-Control for BLDC Motor Drives Based on Three-Dimensional Coordinate System	IEEE Transactions on Industrial Electronics	VOL 57, NO.8, AUGUST 2010
15	王宇 邓智泉 王晓琳	博士 正高 副高	032 032 032	基于空间矢量调制的异步电机直接转差线性控制	中国电机工程学报	2010, 30 (3)
16	杨钢 邓智泉 曹鑫 罗建震 范冬 王晓琳	博士 正高 博士 硕士 硕士 副高	032 032 032 032 032 032	无轴承开关磁阻电动机悬浮绕组功率变换器的分析与改进	电工技术学报	2010, 25 (2)
17	曹鑫 邓智泉	博士 正高	032 032	A full-period generating mode for bearingless switched reluctance generators	IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPER CONDUCTIVITY	2010, 20 (3)
18	曹鑫 邓智泉 姚琪 蔡骏 庄铮	博士 正高 硕士 博士 硕士	032 032 032 032 032	Analysis and application of phase current in switched reluctance generators	IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPER CONDUCTIVITY	2010, 20 (3)
19	杨艳 邓智泉 杨钢 曹鑫 张倩影	博士 正高 博士 博士 硕士	032 032 032 032 032	A control strategy for bearingless switched-reluctance motors	IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS	2010, 25 (11)
20	吴元元 邓智泉 王晓琳 凌星 曹鑫	博士 正高 副高 硕士 博士	032 032 032 032 032	Position sensorless control based on coordinate transformation for brushless DC motor drives	IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS	2010, 25 (9)
21	张倩影 邓智泉 杨艳 王晓琳	硕士 正高 博士 副高	032 032 032 032	无轴承开关磁阻电动机转子偏心补偿控制	微特电机	2010, (6)
22	陈小元 邓智泉 连广坤 范娜 许培林	博士 正高 本科 硕士 硕士	032 032 032 032 032	高容错性模块化定子开关磁阻电机	电机与控制学报	2010, 14 (6)
23	杨艳 邓智泉 曹鑫 刘泽远 王晓琳	博士 正高 博士 博士 副高	032 032 032 032 032	12/8极无轴承开关磁阻电机定子振动特性分析	南京航空航天大学学报	2010, 42 (4)
24	陈小元 邓智泉 范娜 许培林 连广坤	博士 正高 硕士 硕士 本科	032 032 032 032 032	双极性分块转子开关磁阻电机	电机与控制学报	2010, 14 (10)

25	杨艳 邓智泉 张倩影 刘泽远 曹鑫	博士 正高 硕士 博士 博士	032 032 032 032 032	控制策略对无轴承开关磁阻电机 定子振动的影响	航空学报	2010, 31 (10)
26	杨艳 邓智泉 张倩影 王晓琳	博士 正高 硕士 副高	032 032 032 032	Stator Vibration Analysis of Bearingless Switched Reluctance Motors	2010 International Conference on Electrical and Control Engineering	2010
27	毛宇阳 邓智泉 蔡骏	硕士 正高 博士	032 032 032	The Application of Intelligent Control for Switched Reluctance Moto	2010 International Conference on Electrical and Control Engineering	2010
28	李祥生 邓智泉 陈志达 费清照 陈小元	博士 正高 硕士 硕士 博士	032 032 032 032 032	A neutral leg independently controlled Current-Regulated Delta Modulator for four-leg switching power amplifier Power Electronics	Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2010), 5th IET International Conference on 2010	2010
29	陈小元 邓智泉 彭晶晶 李祥生	博士 正高 硕士 博士	032 032 032 032 032	Comparison of two switched reluctance motors with bipolar excitation	Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2010), 5th IET International Conference on 2010	2010
30	蔡骏 邓智泉 刘泽远	博士 正高 博士	032 032 032	Nonlinear modeling of switched reluctance motor using different methods	Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2010 Twenty-Fifth Annual IEEE 2010	2010
31	陈小元 邓智泉 王晓琳 彭晶晶 李祥生	博士 正高 副高 硕士 博士	032 032 032 032 032	New designs of switched reluctance motors with segmental rotors	Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2010), 5th IET International Conference on 2010	2010
32	华明 胡海兵 邢岩 何中一	博士 副高 正高 博士	032 032 032 032	一种变频器并联运行的分布式控 制方法	中国电机工程学报	2010, 30 (24)
33	王翀 邢岩 方宇 郝飞琴 马运东	硕士 正高 副高 硕士 副高	032 032 032 032 032	理想电网条件下可再生能源发电 三电平并网逆变器	电力系统自动化	2010, 31(4)
34	吴红飞 邢岩	博士 正高	032 032	A family of forward converters with inherent demagnetizing features based on basic forward cells	IEEE Transactions on Power Electronics	2010, 24(11)
35	吴红飞 邢岩	博士 正高	032 032	一族基于正激基本单元的自磁复 位正激变换器	中国电机工程学报	2010, 30 (27)
36	吴红飞 邢岩 葛红娟	博士 正高 正高	032 032 032	A ZVS Input Series Output Parallel Forward Converter	the 5th IEEE Conference on Industrial Electronics and Application	2010

37	Zhiliang Zhang, Jizhen Fu, Yan-Fei Liu, Paresh Sen	副高 硕士 正高 正高	032 032 032 032	Discontinuous current source drivers for high frequency power MOSFETs	IEEE Trans. Power Electron.,	Vol. 25, No. 7, Jul. 2010, pp. 1863-1876.
38	Zhiliang Zhang, Wilson Eberle, Yan-Fei Liu, Paresh Sen	副高 博士 正高 正高	032 032 032 032	A 1-MHz, 12-V ZVS non-isolated full-bridge VRM with gate energy recovery	IEEE Trans. Power Electron.,	Vol. 25, No. 3, Mar. 2010, pp. 624-636
39	Zhiliang Zhang, Jizhen Fu, Yan-Fei Liu, Paresh Sen	副高 硕士 正高 正高	032 032 032 032	Comparison of continuous and discontinuous current source drivers for high frequency applications	IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)	2010, pp 2434-2440
40	Zhiliang Zhang, Jizhen Fu, Yan-Fei Liu, Paresh Sen	副高 硕士 正高 正高	032 032 032 032	Switching loss analysis considering parasitic inductances with current source drivers for Buck converters	IEEE Applied Power Electronics Conference (APEC)	2010, pp. 1482-1486.
41	王世山 刘泽远 杜亚平 王星华	副高 博士 正高 博士	032	双向间接耦合有限元法预估电力电缆载流量	南京航空航天大学学报	2010, 42(2): 133-139.
42	王世山 谢少军 金艳	副高 正高 中级	032	计及寄生参数效应的铁氧体共模扼流圈二端口网络的建立	电工技术学报	2010, 25(5): 1-8

43	崔永生 王世山 周小林 谢少军	硕士生 副高 硕士生 正高	032	利用平面线圈消除电容器寄生电感的影响	电工电能新技术	2010, 29(1): 45-48, 61.
44	周小林 王世山 崔永生	硕士生 副高 硕士生	032 032 032	平面集成滤波器LC单元的阻抗特性	电工电能新技术	2010, 29(4): 18-22.
45	Wang Shishan Liu Zeyuan Xingyan	副高 博士 正高	032 032 032	Extraction of parasitic capacitance for Toroidal Ferrite Core Inductor	the 5th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, 15-17 June 2010, Taichung, Taiwan.	2010.6
46	Wang Shishan Shi Leilei Zhou Xiaolin	副高 硕士生 硕士生	032 032 032	Impedance characteristics of LC unit for plane integrated filter	15th Asian Conference on Electrical Discharge, Xi'an, China, Nov.7-10, 2010.	2010.11
47	王亚芳 韩春阳 谢少军	硕士生 硕士生 正高	032 032 032	逆变桥无死区控制技术研究	电力电子技术	2010, 44 (2)
48	崔永生 王世山 周大林 谢少军	硕士生 副高 正高 正高	032 032 032 032 032	利用平面线圈消除电容器寄生电感的影响	电工电能新技术	2010, 29 (1)
49	王世山 谢少军 金艳	副高 正高 中级	032 032 032	计及寄生参数效应的铁氧体共模扼流圈二端口网络的建立	电工技术学报	2010, 25 (5)
50	许爱国 谢少军	博士 正高	032 032	阶梯波合成整流器及其闭环控制策略	中国电机工程学报	2010, 30 (6)
51	阚加荣 谢少军 刘爱忠	硕士生 正高 其他	032 032	逆变器单元用LCL滤波器的并联系统性能分析	电机与控制学报	2010, 14 (2)
52	赵阳 谢少军 孙炎	正高 正高 其他	032	高性能传导EMI噪声分离网络及其在电力电子电磁兼容中的应用	南京航空航天大学学报	2010, 42 (1)
53	许爱国 谢少军 姚远	博士 正高 硕士生	032 032 032	基于超级电容的城市轨道交通车辆再生制动能量吸收系统	电工技术学报	2010, 25 (3)
54	毛鹏 谢少军 许泽刚	博士 正高 博士	032 032 032	开关频率与电源频率比值较小时的单周期控制PFC变换器的建模及稳定性	电工技术学报	2010, 25 (4)
55	许爱国 谢少军 刘小宝	博士 正高 硕士生	032 032 032	串联电容器动态电压均衡技术研究	中国电机工程学报	2010, 30 (12)
56	毛鹏 谢少军 许泽刚	博士 正高 博士	032 032 032	IGBT模块的开关暂态模型及损耗分析	中国电机工程学报	2010, 30 (15)

57	刘海春 徐立智 谢少军	博士 硕士 正高	032 032 032	中频动态电压恢复器研究	电力自动化设备	2010, 30 (3)
58	魏居魁 汤雨 谢少军	硕士 中级 正高	032 032 032	串联型Z源光伏并网发电系统	电力电子技术	2010, 44 (6)
59	焦鑫艳 肖华锋 谢少军	硕士 博士 正高	032 032 032	基于TMS320F28335的双向AC/DC变 换器研究	电力电子技术	2010, 44 (12)
60	肖华锋 谢少军 贡力 陈文明	博士 正高 其他 助教	032 032 032 032	非隔离型光伏并网逆变器漏电流 分析模型研究	中国电机工程学报	2010, 30 (18)
61	肖华锋 谢少军	博士 正高	032 032	用于光伏并网的交错型双管Buck- Boost变换器	中国电机工程学报	2010, 30 (21)
62	汤雨 谢少军 丁久东	博士 正高 硕士	032 032 032	一种新颖的Z源逆变器直流链峰值 电压控制策略	台达电力电子新技术研 讨会	2010
63	丁久东 谢少军 汤雨	硕士 正高 博士	032 032 032	基于单相直通SVPWM 策略的Z源逆 变器电感的优化设计	台达电力电子新技术研 讨会	2010
64	谢少军 肖华锋 罗运虎	正高 博士 副高	032 032 032	直流楼宇	电工技术前沿论坛	2010第四届
65	黄如海 谢少军	硕士 正高	032 032	基于比例谐振调节器的逆变器双 环控制策略研究	电工技术前沿论坛	2010第四届
66	肖华锋 杨晨 谢少军	博士 硕士 正高	032 032 032	NPC三电平并网逆变器共模电流抑 制技术研究	中国电机工程学报	2010, 30 (33)
67	肖华锋 谢少军	博士 正高	032 032	Leakage current analytical model and application in single-phase transformerless photovoltaic grid-connected inverter	IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility	2010, 52 (4)
68	杨晨 肖华锋 谢少军	硕士 博士 正高	032 032 032	An improved two-switch Buck- boost converter with reduced reverse-recovery losses	IEEE	2010
69	丁久东 谢少军 汤雨	硕士 正高 博士	032 032 032	Optimal Design of the inductor in Z-source inverter with Single Phase Shoot-Through SVPWM Strategy	IEEE	2010
70	肖华锋 谢少军 杨晨	博士 正高 硕士	032 032 032	Transformerless Split- inductor Neutral point clamped Three-level PV Grid- Connected inverter	IEEE	2010
71	肖华锋 黄如海 谢少军 陈文明	博士 硕士 正高 助教	032 032 032 032	An interleaving Double- Switch Buck-Boost Converter for PV Grid-Connected inverter	IEEE	2010
72	江涛 毛鹏 谢少军	硕士 博 士 正高	032 032 032	Analysis and improvement on input Current of One-Cycle Controlled PFC Converter	IEEE	2010

73	魏居魁 汤雨 谢少军	硕士 博士 正高	032 032 032	Grid-connected PV system based on the series Z-Source inverter	IEEE	2010
74	汤雨 魏居魁 谢少军	博士 硕士 正高	032 032 032	A New Direct Peak DC-Link Voltage Control Strategy of Z-Source Inverters	IEEE	2010
75	姚志垒 肖岚 严仰光	博士 正高 正高	032 032 032	Seamless Transfer of Single- Phase Grid-Interactive Inverters Between Grid-Connected and Stand- Alone Modes	IEEE Transactions on Power Electronics	2010, 25 (6)
76	姚志垒 肖岚	博士 正高	032 032	Push - Pull Forward Three- Level Converter With Reduced Rectifier Voltage Stress	IEEE Transactions on Circuits and Systems - I: Regular Papers.	2010, 57 (10)
77	姚志垒 肖岚 魏星 王慧贞	博士 正高 硕士 研究员	032 032 032 032	Dual-Buck Full-Bridge Inverter with SPWM Control and Single Current Sensor	IEEE ICIEA IEEE工业电子学及应用 国际会议	2010
78	姚志垒 肖岚 龚春英	博士 正高 正高	032 032 032	Half-Bridge-Type Inverter with Hysteresis Current Control and Unipolar Modulation	IEEE ICIEA IEEE工业电子学及应用 国际会议	2010
79	姚志垒 肖岚 魏星 龚春英	博士 正高 硕士 正高	032 032 032 032	A High-Reliability and High- Efficiency Off-Grid Inverter Suitable for Direct-Driven Wind Generator Systems	IEEE APPEEC IEEE亚太电力与能源工 程国际会议	2010
80	姚志垒 肖岚 何流 魏星	博士 正高 硕士 硕士	032 032 032 032	带整流性负载并网逆变器的控制 方法	电力系统自动化	第34卷第22期, 2010
81	曹海港 肖 岚	硕士 正高	032 032	一种新颖的航空直流电源 抗浪涌电路	电力电子技术	第44卷第5期, 2010

82	丁连锋 肖 岚	硕士 正高	032 032	基于航空交流电网的两级 PFC技术的研究	电力电子技术	第44卷第3期, 2010
83	陈曦 肖 岚 陈哲 龚春英	硕士 正高 硕士 正高	032 032 032 032	高压直流输电系统中的全桥直流 变压器研究	电力电子技术	第44卷第11期, 2010

风力机模拟技术综述^{*}

王前双, 胡育文, 黄文新

(南京航空航天大学 航空电源航空科技重点实验室, 江苏 南京 210016)

摘 要: 随着风力发电技术研究的日益深入, 风力机模拟技术也在近十年得到了快速发展。风力机模拟器可以用来取代实际的风力机, 为在实验室内进行风力发电技术的研究提供了有效途径。在研究风力机特性的基础上, 详细介绍了目前国内、外风力机模拟的具体方案, 并对各模拟方案进行了对比、分析与总结。

关键词: 风力发电; 风力机; 风力机模拟

中图分类号: TM315 文献标识码: A 文章编号: 1673-6540(2010)03-0001-06

Review on The Technology of Wind Turbine Emulation

WANG Qian-shuang, HU Yu-wen, HUANG Wen-xin

(Air Supply Aviation Science and Technology Laboratory, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: With the increasingly deep and wide research on wind power technology, the wind turbine emulation technology has been developing fast in the recent ten years. The wind turbine emulator can be used in a similar way as a real wind turbine, which provides a effective way for the research of wind power in the lab. Based on the characteristic of wind turbine, some concrete schemes of the wind turbine emulation at home and abroad was presented and a summarize of each scheme was given.

Key words: wind power; wind turbine; wind turbine emulation

0 引言

能源、环境是人类生存和发展所要解决的紧迫问题。常规能源以煤、石油、天然气为主, 它们不仅资源有限, 而且这些能源的应用引起了严重的大气污染。因此, 对可再生能源的开发利用, 特别是对风能的开发利用, 已得到世界各国的关注。

实验室的前期探索对风力发电技术的发展起着重要的推动作用。但是由于条件的限制, 大多数实验室并不具备风场环境或者风力机, 这很不利于一些新颖理论和技术的验证。为了加强风力发电技术的研发能力, 必须要进行风力机模拟技术的研究。风力发电系统是将风能转化为机械能, 再将机械能转化为电能的能量转化系统。而风力机在这个系统中就扮演着将风能转化为机械能的角色, 故风力机的模拟本质上讲就是能量或者转矩的模拟。通过采取合适的控制策略, 使整

个风力机模拟系统符合实际的风力机特性, 用来驱动风力发电机, 达到模拟真实自然界中风力发电系统工作的效果。

1 风力机模拟系统的构成

实际的风力发电系统如图 1 所示。

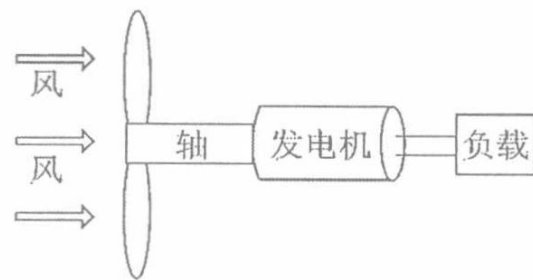


图1 实际风力发电系统图

如果需要增速还需在图 1 中加入齿轮箱。在实验室中模拟风力机, 也就是将图 1 中实际的风力机用风力机模拟系统取代, 如图 2 所示。



图2 实验室内风力发电系统图

^{*} 国家 863 项目(2008AA05Z411)

风力机模拟系统应该包括以下两个部分:

(1) 实时软件模拟器。用以实现风力机数学模型的数字化模拟,一般由工控机,可编程逻辑控制器(PLC)或基于高性能微处理器(如 DSP)的控制板实施。

(2) 机电随动系统。用以接受来自实时软件模拟器的给定信号,并提供可测量的输出变量作为系统对实时软件模拟器的响应,通常为套闭环控制的交、直流控制系统。

图 3 为实时风力发电模拟系统结构简化框图。图中输出变量 x 是机电随动系统的参考信号。如果 x 是转矩参考值,则回馈值为电动机的输出转矩信号;如果 x 为功率参考值,则回馈值为电动机的输出功率信号。 M 、 G 、 C 分别为电动机、发电机、控制器。

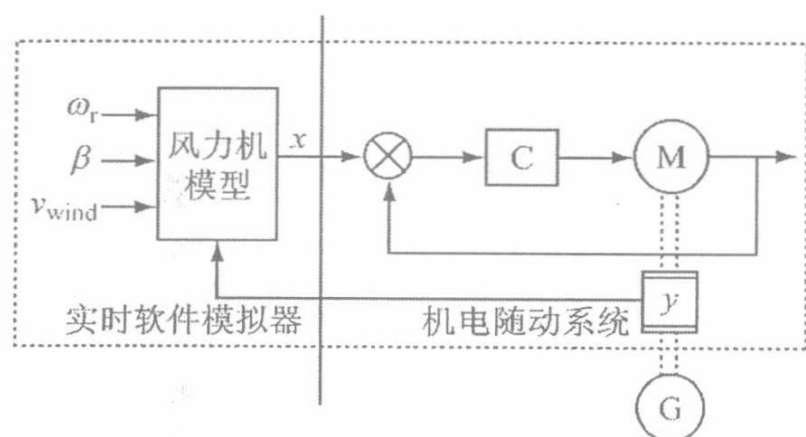


图 3 实时风力发电模拟系统控制结构

2 风力机的特性

风力机的种类和样式很多,但按风轮结构和其在气流中的位置,大致可以分为两大类:垂直轴式风力机和水平轴式风力机。前者由于具有效率低等不利因素的影响,在商业主流设计中应用较少。目前,最为常见的风力机为水平轴、三叶片、上风向的结构。风力机主要由风轮(包括叶片和轮毂)、塔架、偏航系统等部件组成。

风力机是整个风力发电系统中能量转化的首要部件,作为要模拟的对象,对于其特性的准确计算是整个系统能否有效运行的关键。只有模拟出实际的风力机特性才能用其来考察、评价与测试风力发电系统的性能。

2.1 风力机的静态特性

根据空气动力学的知识可知,风力机捕获的风能可表示为:

$$P_T = \frac{1}{2} \rho A_T v_{wind}^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{\omega_T R_T}{v_{wind}} \quad (2)$$

式中: P_T ——风力机输出功率, W;

ρ ——空气密度, kg/m^3 ;

A_T ——风轮扫掠面积, m^2 ;

v_{wind} ——风速, m/s ;

λ ——叶尖速比;

β ——桨叶节距角;

ω_T ——风轮转速, rad/s ;

R_T ——风轮半径, m ;

$C_p(\lambda, \beta)$ ——风能利用系数。

由风力机从风中捕获的功率为:

$$P_T = T_T \omega_T \quad (3)$$

可以得到风力机的输出机械转矩为:

$$T_T = \frac{1}{2} C_T \rho A_T R_T v_{wind}^2 \quad (4)$$

式中: C_T ——转矩系数, $C_T = C_p(\lambda, \beta) / \lambda$;

T_T ——风力机的机械输出转矩, $\text{N} \cdot \text{m}$ 。

Betz 理论证明风能利用系数的理论极限值为 0.593。它说明,风力机从自然风中所能获取的能量是有限的。不同的风力机有不同的风能利用系数与转矩系数,所以对于特定的风力机模拟系统来说,首先必须要确定风力机的数学模型。

对于转矩系数给定的情况,风力机的静态特性可以通过数值查表得到,查表法应用简单,但为了便于软件模拟器的执行,更希望能得到风力机特性的分析表达式。风力机的转矩特性曲线见图 4。

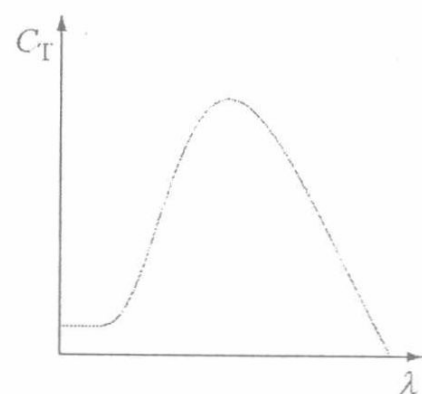


图 4 风力机的转矩系数特性曲线

文献 [5] 与 [11] 采用了 6 次多项式描述风力机的转矩系数特性:

$$C_T(\lambda) = a_0 + \sum_{i=1}^{i=6} a_i \lambda^i \quad (5)$$

式中: a_i 参数 ($i=0, 1, 2, \dots, 6$) 由 MATLAB 计算程序确定。通过拟合的 $C_T(\lambda)$ 曲线,采用式 (2)、(4),即可计算出风力机的输出机械转矩。

对于转矩系数未知的情况,需要根据制造商提供的参数对风力机进行建模,再根据叶片微元受力和速度的情况计算出风力机的转矩特性曲线。

根据上文分析可建立风力机模型,见图5。

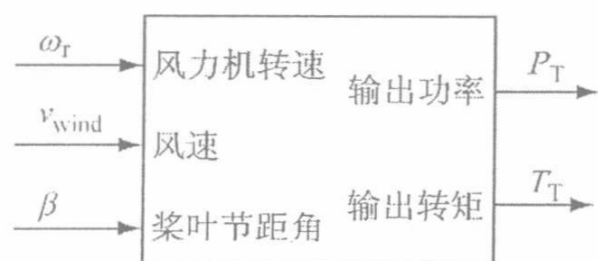


图5 风力机模型框图

2.2 风力机的动态特性

风力机的特性不是只有静态特性,还包括动态特性,主要包含风的剪切效应(Wind Shear)及塔影效应(Tower Shadow)。风的剪切效应是指叶片在旋转过程中,叶片上处于不同高度的部位所受的风力不同;而塔影效应是指由于塔架的存在使得风吹过风力机时进行了局部的重新分布。从以上定义可知,这两种情况的存在必然会对风力机的输出转矩产生影响。

风力机模拟系统需要精确地模拟实际风力机的输出转矩特性,包括由塔影效应和风的剪切效应所造成的脉动转矩,这就需要在风力机模拟系统中能够用解析表达式来实时计算所需模拟的实际转矩。文献[17]提出了一种方法:将转矩脉动标么化为平均空间风速时的稳态转矩,针对三叶片的水平轴风力机的塔影效应和风的剪切效应进行了详细的公式推导与计算。本文直接应用其结论。

$$\overline{T_{ae}(t, \theta)} = 1 + \frac{2}{mv_H} [v_{eqws} + v_{eqts} + (1 - m)v_H] \quad (6)$$

$$v_{eqts} = \frac{mv_H}{3R^2} \sum_{b=1}^3 \left[\frac{a^2}{\sin^2 \theta_b} \ln \left(\frac{R^2 \sin^2 \theta_b}{x^2} + 1 \right) - \frac{2a^2 R^2}{R^2 \sin^2 \theta_b + x^2} \right] \quad (7)$$

$$v_{eqws} = v_H \left[\frac{\alpha(\alpha - 1)}{8} \frac{R^2}{H^2} + \frac{\alpha(\alpha - 1)(\alpha - 2)}{60} \frac{R^3}{H^3} \cos(3\theta_1) \right] \quad (8)$$

其中: $m = 1 + \alpha(\alpha - 1)R^2/(8H^2)$;

v_{eqws} ——剪切效应造成的等效风速;

v_{eqts} ——塔影效应造成的等效风速;

H ——风塔的高度;

v_H ——风塔顶端的风速;

R ——风轮叶片半径;

a ——风塔半径;

x ——叶片到塔架的纵向距离;

θ_b ——叶片 b 的方位角;

α ——剪切效应指数的经验值。

式(6)~(8)包含了风塔半径,高度,塔架的尺寸等这些具体的风力机参数,还有依赖于具体风场环境的参数。这些参数可以根据实际需要灵活调整,以应对多种多样的风力机进行模拟。图6给出了上述参数的示意图。

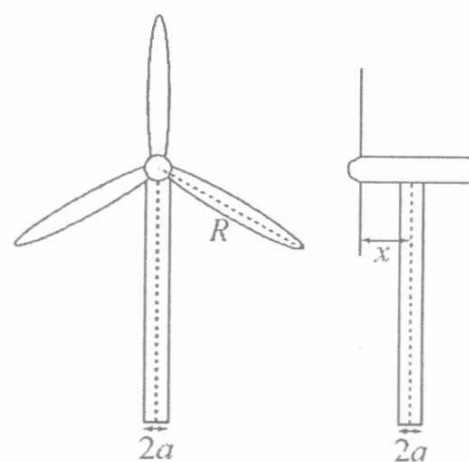


图6 风力机尺寸示意图

目前国内很多学者大多只模拟了风力机的静态特性,例如文献[6-7], [11-12]。很显然,如果只考虑静态特性简化风力机的模型,虽然易于实现,但是只模拟静态特性对考察整个系统没有实际意义。对风力机动态特性的模拟非常必要,因为只有模拟完整的风力机特性才能用其测试实际的风力发电系统,从而避免现场调试的困难。例如:由于转矩脉动影响输出电能的质量,如果并网运行,则需要对逆变器提出更高的要求;还有对电机的强度考察等。

综上所述,要模拟的系统应该既包括静态特性又包括动态特性,这样对整个系统的评价才有意义。

2.3 风力机的定桨距与变桨距

风力机有定桨距和变桨距两种形式,定桨距和变桨距的区别在于桨叶节距角是否可调。当风速过高时,通过调整桨叶节距角,改变气流对叶片攻角,从而改变风力发电机组获得的空气动力转矩,使功率输出保持稳定。同时,风力机在起动过程中也需要通过变桨距来获得足够的起动转矩。

所以完整的风力机模拟研究中需要包括模拟变桨距风力机的特性。但从查阅的文献来看,目前国内很少涉及对变桨距风力机的模拟,只有文献[13]中模拟了在额定风速以上通过变桨实现对功率的限制。因此,在以后的风力机模拟技术研究中需针对变桨距模拟系统做出一些研究。

3 风力机模拟系统的实现

近年来,广泛应用的风力机模拟系统主要有两种:基于直流电机的风力机模拟系统和基于异步电机的风力机模拟系统。

3.1 基于直流电机的风力机模拟系统

直流电机模型简单,控制性能优越,是风力机模拟的有效工具。但由于电刷和换向器的限制使得其主要应用于小功率场合。

一台他励直流电机的等效电路见图7。

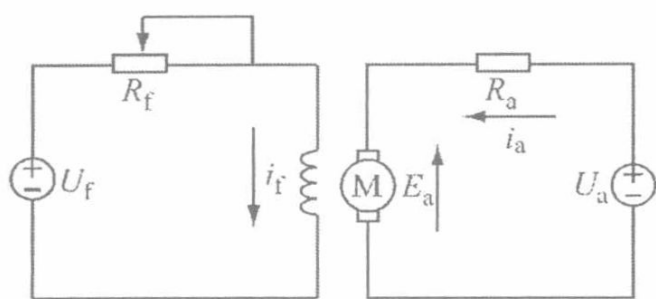


图7 他励式直流电机的等效电路

稳态下直流电机的数学模型为:

$$\begin{cases} E_a = C_e \phi n \\ U_a = E_a + R_a i_a \\ T_e = C_t \phi i_a \end{cases} \quad (9)$$

式中: E_a ——反电势;

U_a, i_a ——分别为电枢电压,电枢电流;

ϕ, T_e ——分别为励磁磁通,电磁转矩;

n ——直流电机的转速;

C_t, C_e ——分别为转矩系数、电动势系数,且 $C_t = 30C_e/\pi$ 。

在忽略电枢反应及各种损耗的情况下,可以认为直流电机的电磁转矩即为输出的机械转矩,通过上述理论可以看出,通过控制电枢电流 i_a 的大小即可控制电机的输出转矩。

目前,直流电机主要采用如图8所示的控制系统来模拟风力机特性,例如文献[4-7]所介绍的。

上述控制方案中V-M控制系统是指晶闸管

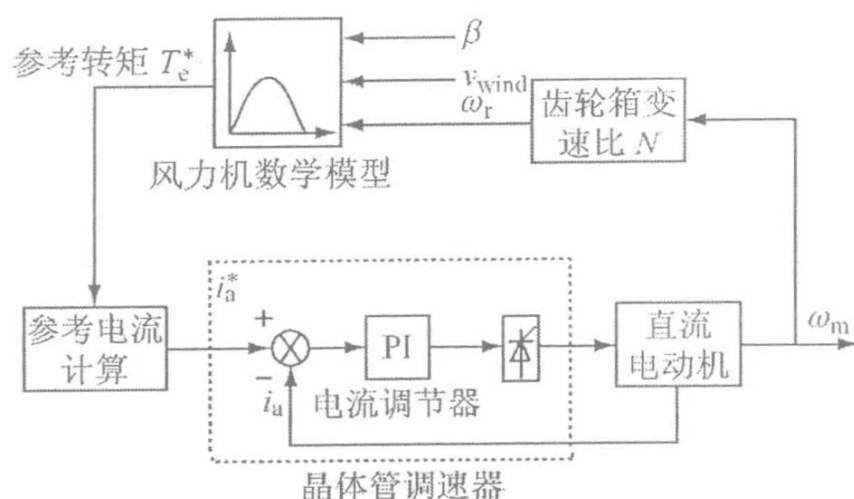


图8 基于直流电机模拟风力机的V-M控制系统

—电动机控制系统,在该方案中采用三相桥式可控晶闸管整流,将三相交流电压转化为直流电压以驱动直流电机,通过改变相控角改变直流电压,从而改变电枢电流达到控制电机输出转矩的目的,实现风力机输出转矩的跟踪。但是这种传统的V-M控制系统中,由于脉动电流的存在导致电机发热严重,并且转矩脉动严重,影响了对风力机输出转矩的跟踪。加入平波电抗器可以抑制电流脉动,但是对转矩与转速的响应速度会造成一定的影响。文献[8]采用直流脉宽调制(PWM)技术,在一定程度上改善了上述控制策略的性能,其控制框图见图9。该系统主电路线路简单,需用的功率器件少,开关频率高,电流容易连续,谐波较少,动态响应快,动态抗扰能力强,且开关损耗不大。

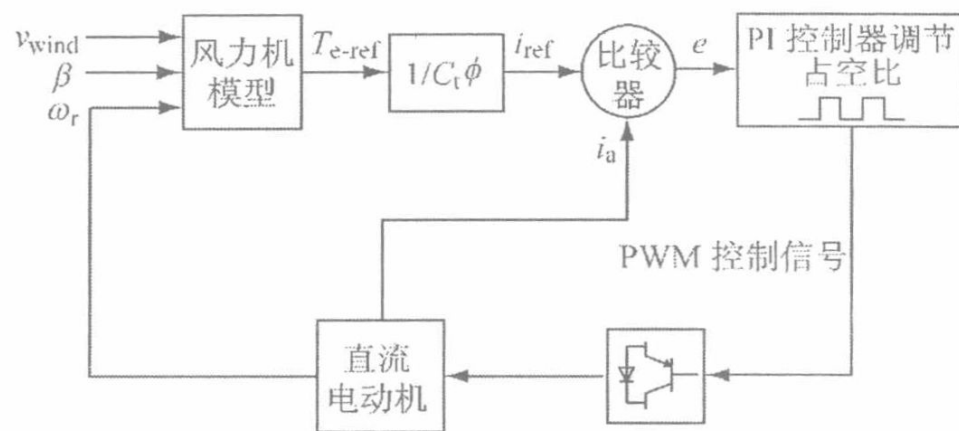


图9 直流PWM的直流电机模拟风力机系统

3.2 基于异步电机的风力机模拟系统

相比于直流电机,异步电机具有结构简单,价格便宜,运行可靠,维护方便等优势,因此被广泛应用于风力机的模拟系统。随着风力发电技术的发展和进步,单机容量越来越大,目前已有很多兆瓦级发电机投入运行。在这种情况下,直流电机的换向能力严重限制了其在风力机模拟领域的应用,因此在大功率场合异步电机有着无可比拟的优势。

异步电机的动态数学模型是一个高阶、非线性、强耦合的多变量系统,不像直流电动机可以通过控制电枢电流来灵活控制电磁转矩。随着矢量控制和直接转矩控制的发展,异步电机的控制越来越灵活,已达到可与直流电机相媲美的性能。

目前基于异步电机的风力机模拟系统主要采用矢量控制,将定子电流的励磁分量与转矩分量解耦,然后通过转矩分量的控制完成对电机转矩的控制,实现风力机的模拟。文献 [11] 提出如图 10 所示的控制系统。

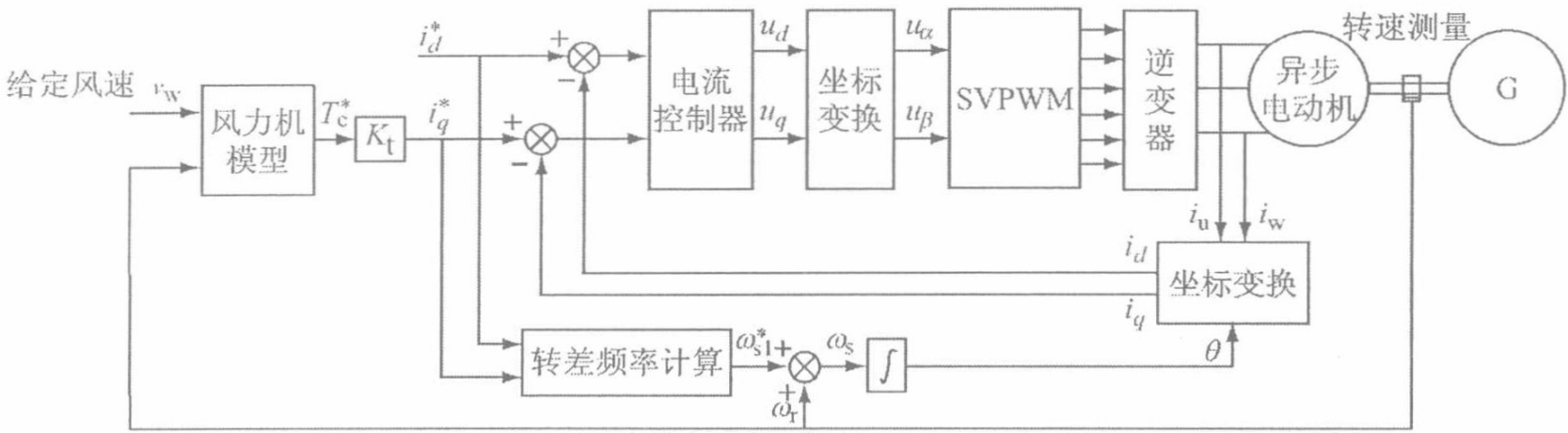


图 10 异步电机模拟风力机的电流控制框图

文献 [11] 设定异步电机的励磁电流 i_d^* 为一恒定值 (8 A), 采用转子磁链定向, 转子磁链 Ψ_r 基本恒定, 根据 $i_q^* = L_r T_e^* / (n_p L_m \Psi_r)$, 可知图 10 中 $K_t = L_r / (n_p L_m \Psi_r)$ 。式中: i_q^* 为定子电流的转矩分量; L_r 为 dq 坐标系转子等效二相绕组的自感; L_m 为 dq 坐标系定子与转子同轴等效绕组间的互感; n_p 为电机的极对数; Ψ_r 为转子磁链; T_e^*

为电机的电磁转矩。该系统在风速跃变时其转矩的动态响应时间为 1 ms, 并且转矩误差很小, 可见采用矢量控制可以实现转矩的快速跟踪, 实现风力机的模拟。但是整个系统的实现十分复杂, 并且其性能易受电机转子参数变化的影响。文献 [10] 中提出了通过恒压频比控制, 实现对风力机的模拟, 其控制系统如图 11 所示。

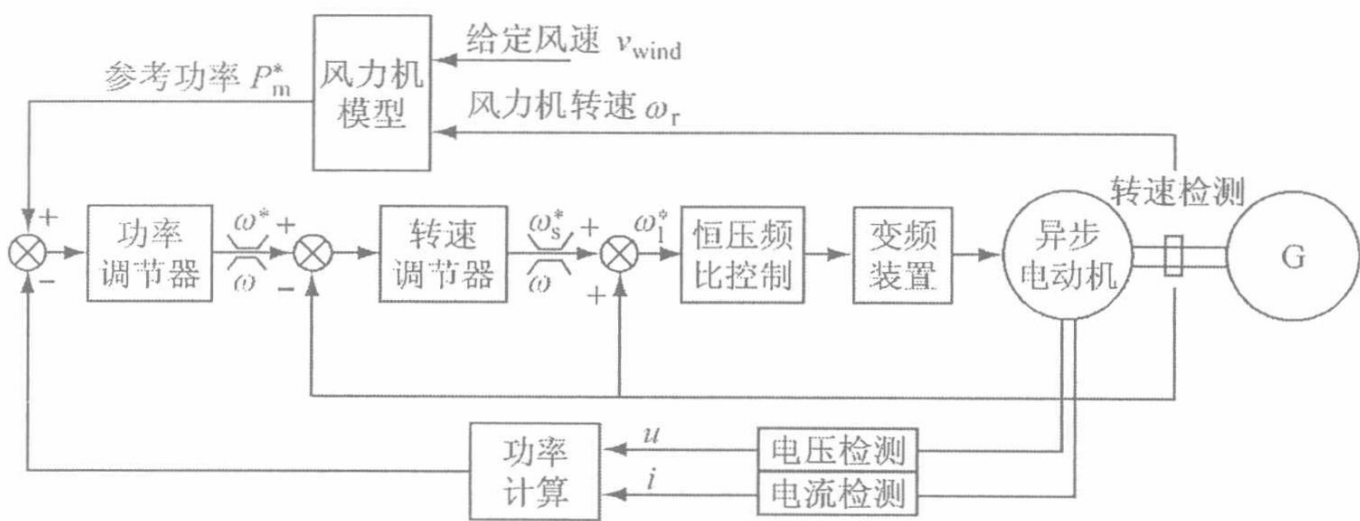


图 11 异步电机模拟风力机的 VVVF 控制框图

该系统采用了功率转速双闭环控制, 通过恒压频比控制实现电动机对风力机功率的跟踪, 与矢量控制相比, 该控制方式实现方便, 但是由于是开环控制, 其控制精度较低, 同时系统中存在电流电压检测环节, 将带来功率计算误差, 这些因素导致系统的动态性能不高。

文献 [14] 提出了一种转矩、转速双闭环的控制策略, 其控制框图如图 12 所示。

图 12 中逆变器模块包括了控制器、逆变器、采样电路及保护电路。采用电流滞环实现异步电机的控制, 根据转矩、转速传感器的直接测量结果追踪风力机的机械特性, 从而实现风力机的模拟。从试验波形来看, 该系统在风速发生变化和负载发生变化时转矩和功率能够快速响应, 但是功率脉动与转矩脉动较大。

综上所述, 采用以上三种风力机模拟控制系

统均能实现风力机的模拟,但是矢量控制的优点更加突出,虽然实现复杂,但其应用已经十分成熟。因此,矢量控制必然会在异步电机的风力机模拟技术中有广泛的应用前景。

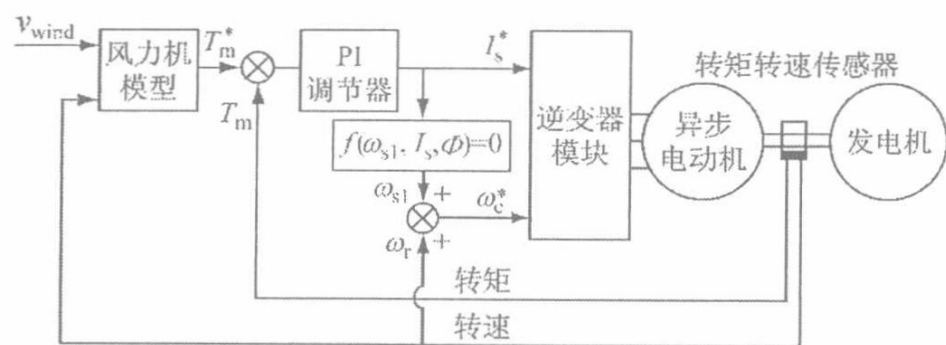


图 12 异步电机模拟风力机的控制框图

4 结 语

在风力机模拟系统中,包括风力机特性仿真实时软件模拟器与机电随动系统两大部分。软件仿真模拟器要求计算能力强,有良好的人机界面。基于直流电机的机电随动系统一般用于中小型风力机的模拟,实现简单;基于异步电机的变频调速系统可靠性高,能运用于大功率场合,控制较为复杂。但是随着变频技术的发展,变频器的性能越来越高,很多变频器已经拥有先进的矢量控制算法,并且可以通过内置的 RS-485 接口与其通信,实现转矩、转速的控制操作,因此用变频器拖动异步电机实现风力机模拟将具有很好的应用前景。风力机模拟技术的应用极大地缩短了风力发电技术的研究周期,为最大风能追踪控制以及改善控制算法创造了有利的条件,因此风力机模拟技术的研究意义深远。

【参考文献】

- [1] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1992.
- [2] 汤蕴璆, 史乃. 电机学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [3] B Rabelo, W Hofmann, M Gluck. Emulation of the Static and Dynamic Behaviour of a Wind-turbine with a DC-Machine [C]//The 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, 2004: 2107-2112.
- [4] Farret F A, Gules R, Marian J. Micro-turbine simulator based on speed and torque of a DC motor to drive actually loaded generator [C]//IEEE ICCDCS' 1995, 1995 (11): 89-93.

- [5] LI Wei Wei, Xu Diang Guo, Zhang Wei, et al. Research on wind turbine emulation based on DC motor [C]//IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, 2007 (5): 2589-2593.
- [6] 刘其辉, 贺益康, 赵仁德. 基于直流电动机的风力机模拟特性 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26 (7): 134-138.
- [7] 卞松江, 潘再平, 贺益康. 风力机特性的直流电机模拟 [J]. 太阳能学报, 2003, 24 (3): 360-364.
- [8] 车兆辉, 周建华. 基于直流电动机的风力机仿真 [J]. 江苏电机工程, 2008, 27 (3): 47-50.
- [9] 卞松江. 变速恒频风力发电关键技术研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2003.
- [10] 谢震. 变速恒频双馈风力发电模拟平台的研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2005.
- [11] 贾要勤. 风力发电实验室模拟风力机 [J]. 太阳能学报, 2004, 25 (6): 735-739.
- [12] 吴捷, 许燕灏. 基于异步电动机的风力机风轮动态模拟方法 [J]. 华南理工大学学报 (自然科学版), 2006, 33 (6): 46-49.
- [13] M Chinchilla, S Arnaltes J L. Rodriguez-amenedo, laboratory set-up for wind turbine emulation [C]//IEEE ICIT' 2004, 2004 (1): 553-557.
- [14] Hossein Madadi Kojabadi, Liuchen Chang. Development of a novel wind turbine simulator for wind energy conversion systems using an inverter-controlled induction motor [J]. IEEE Transaction on Energy Conversion, 2004, 19 (3): 547-552.
- [15] 乔明, 林飞, 孙湖, 等. 基于异步电机的风力机模拟实验平台的研究 [J]. 电气传动, 2009, 39 (1): 40-43.
- [16] Dale S L Dolan, Peter W Lehn. Simulation model of wind turbine 3p torque oscillations due to wind shear and tower shadow [C]//IEEE Transaction on Energy Conversion on September, 2006, 21 (3): 717-724.
- [17] Dale S L Dolan, Student Member. Real-time wind turbine emulator suitable for power quality and dynamic control studies [C]//Int Conf Power Systems Transients Montreal, 2005: 464-468.
- [18] 刘万琨, 张志英, 李银凤, 等. 风能与风力发电技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [19] 叶杭冶. 风力发电机组的控制技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.

收稿日期:2009-07-28

基于 DSP 控制的风力机偏航控制系统研究

卜飞飞, 胡育文, 黄文新, 施凯, 王前双

(南京航空航天大学 自动化学院, 江苏 南京 210016)

摘要: 为了获得最大的风能, 提高风力发电机的发电效率, 对风力机偏航控制系统进行了研究。该系统采用主动迎风的方式, 通过风向传感器测得机舱的相对风向, 由 DSP 计算出偏航角度, 采用细分控制技术控制偏航步进电机正转或反转, 从而实现偏航控制系统自动跟踪风向。实验表明, 采用 DSP 控制, 实时性较好, 细分技术控制的步进电机, 运行精度较高, 系统能快速、准确使机舱对风。

关键词: Freescale MC56F8037; 风向传感器; 偏航角; 细分技术; 风向跟踪; 风力机

中图分类号: TM 614

文献标识码: A

Yaw Control System of Wind Turbine Based on DSP Control

BU Fei-fei, HU Yu-wen, HUANG Wen-xin, SHI Kai, WANG Qian-shuang

(College of Automation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,
Nanjing 210016, Jiangsu, China)

Abstract: In order to capture the maximum wind energy and improve the efficiency of wind turbine, the yaw control system was researched. This system takes the initiative to windward. The relative wind direction is measured by the wind sensor. According to the relative wind direction, yaw angle is calculated by the DSP and generate the drive pulse. Then the stepping motor is controlled to turn or turn over by the subdivision control technology to make the turbine windward. Through this way, the yaw control system can track the wind direction automatically. Experimental results show that using DSP control, the real-time performance of yaw system is good and operation precision of stepping motor is high by the subdivision control technology. Therefore, the yaw system tracks the wind direction quickly and exactly.

Key words: Freescale MC56F8037; wind sensor; yaw angle; subdivision control technology; wind direction track; wind turbine

1 引言

风能作为一种可再生的清洁能源, 其开发和利用得到了长足的进步和发展, 成为发展最快的绿色能源^[1]。为了提高风能利用率, 偏航控制系统成为水平轴风电机组控制系统的重要组成部分, 主要功能有 2 个: 一是使风力机跟踪变化的风向; 二是当风力发电机组由于偏航作用, 机舱引出电缆发生缠绕时, 自动解除缠绕^[2]。对于水平轴叶轮形式的风力机, 调整叶轮平面进行迎风有 2 种方式: 一种是被动迎风, 它是在风力的作用下叶轮自行调至迎风位置; 另一种是主动迎风, 它是由调向电机将叶轮调至迎风位置。在大中型风力发

电机中, 因调向力矩大, 叶轮平面频繁摆动对调向机构的寿命影响严重, 故不采用被动迎风而采用主动迎风^[3]。为了提高偏航控制系统的快速性和准确性, 本文基于 DSP 控制器, 通过风向标检测出机舱的相对风向, 采用细分技术来控制偏航步进电机, 从而达到自动跟踪风向的目的, 提高风力发电系统的效率和延长调向机构的寿命。

2 偏航控制系统的原理

最为常见风力机为水平轴、三叶片、上风向的结构。风力机主要由风轮(包括叶片和轮毂)、塔架、偏航等部件组成^[4]。风轮将流动的风能转化为转动的动能, 作为风电机组的主要动力部件, 对

基金项目: 国家高新技术研究发展计划(863 计划)(2008AA05Z411)

作者简介: 卜飞飞(1984-), 男, 博士研究生, Email: bufeifei1984@163.com