

提高多机风力发电并网系统稳定性的研究

匡洪海¹, 吴政球¹, 何小宁², 王 兵²

(1. 湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412000)

摘 要: 风电受自然条件的影响不能持续稳定地输出电能, 当大量风电并入电网势必对电力系统稳定性产生不利影响。为确保电力系统的稳定运行, 提出基于模糊逻辑控制的超级电容器储能系统(SCESS) 结合双馈感应发电机(DFIG) 的解决方案, 采用 Matlab/Simulink 软件对多机风力发电并网系统进行了仿真分析。仿真结果表明: 所提出的 SCESS 和 DFIG 方案能够提高多机风力发电机组并网系统的暂态稳定, 当系统发生故障时能使电力系统稳定运行。

关 键 词: 超级电容器; 储能系统; 变换器; 暂态稳定; 双馈感应发电机

中图分类号: TM31; TM71 文献标识码: A

引 言

随着人们对可持续发展和降低环境污染的日益关注, 基于可再生能源的分布式发电技术正以它独有的环保性和经济性吸引人们越来越多的关注。但属于分布式发电的风能受自然条件的影响不能持续稳定地输出电能, 因此当大量风电并入电力系统势必对电力系统的稳定运行产生影响^[1~2]。

文献[3]研究了大型风场并网的暂态稳定性问题, 提出使用双馈感应发电机(DFIG) 可提高系统的暂态稳定性。文献[4]提出超级电容器储能系统(SCESS) 控制方案, 但由于采用的是定速风力发电机, 机电特性会减缓故障后电压的恢复, 接入弱电网时易导致电压、转子不稳, 对暂态电压稳定性产生不利影响。文献[5]提出 STATCOM 的控制方案, 但它只有无功功率控制的能力。STATCOM/BESS 在文献[6~7]中提出, 尽管该方案既有有功功率又有无功功率的控制能力, 但电池能量储存系统仍存在反应速度低、使用寿命短的问题。

本研究提出基于模糊逻辑控制的超级电容器储能系统(SCESS) 结合双馈感应发电机(DFIG) 方案, 解决多机风力发电并网时电力系统产生的不稳定性问题。

1 双馈感应风力发电机

DFIG 是由绕线式异步感应电机和在转子电路上带有整流器和直流侧连接的逆变器组成。发电机向电网输出的功率由两部分组成: 直接从定子输出的功率和通过逆变器从转子输出的功率。两个电压源逆变器经直流耦合回路背靠背链接在一起, 与电网连接的逆变器提供固定频率、可变电压控制; 与发电机连接的整流器提供可变电压和频率控制。发电机侧整流器为普通的电压源逆变器, 而电网侧逆变器为正弦脉宽调制(SPWM) 整流器。

DFIG 定子直接接入电网, 转子由变频器提供三相滑差频率电流进行励磁。当发电机转子旋转频率变化时, 控制励磁电流频率来保证定子输出频率恒定^[8]。

当发电机转速变化时, 若控制转子供电频率相应变化, 可使定子电流频率保持恒定不变, 与电网频率保持一致, 实现变速恒频控制^[9]。

DFIG 输出的有功功率主要由转速决定, 当转速达到额定转速时, 螺距角控制器会限制转子转速使输出功率不超过最大输出功率。与其它类型风机不同, DFIG 可作无功功率控制, 主要有两种控制模式: 一种是电压控制, 以风机端电压与其设定值的误差量来控制无功功率的输出, 从而维持与电压设定值相同; 另一种是功率因数控制, 以保持发电机功率因数与其设定值相同来控制无功功率。

2 超级电容器储能系统

SCESS 主要由超级电容器和电力电子器件组成, 其储能单元采用电力电子型可控电压源或电流源变换器, 可灵活调节接入方式, 通过变换器的合理控制可以实现有功功率和无功功率的独立调节并能补偿系统谐波, 抑制电压波动和闪变。因此超级电

收稿日期: 2010-04-29; 修订日期: 2010-05-27

作者简介: 匡洪海(1972-) 女, 湖南双峰人, 湖南大学副教授, 博士研究生。

容器可以平滑风力发电机组的输出功率、调节端电压输出。

SCCESS 是利用超级电容器组件阵列将能量以电场能的形式储存起来,当能量紧急缺乏时,再将存储的能量通过控制系统释放出来,准确快速地补偿系统所需要的有功和无功,从而实现电能的平衡、稳定控制。本研究的 SCCESS 控制方法是采用基于 SPWM 电压源变换器和模糊逻辑控制的 DC/DC 变换器。

2.1 超级电容器组建模

超级级电容器也称双电层电容器,是一种介于静电电容器与电池之间新型能源器件,它具有优良的脉冲充放电和大容量储能性能。

超级电容器组的分布式恒定等效电路如图 1 所示,其参数为 $C_{b1} = 2 \text{ F}$, $C_{b2} = 50 \text{ F}$, $C_{b3} = 48 \text{ F}$, $R_{b1} = 0.0108 \text{ } \Omega$, $R_{b2} = 0.265 \text{ } \Omega$, $R_{b3} = 0.264 \text{ } \Omega$,故超级电容器的等效电容为 100 F ,等效电阻为 $0.256 \text{ } \Omega$ 。双电层的额定能量为 792 MJ ,额定电压为 3980 V 。

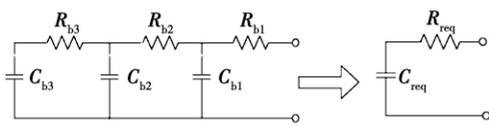


图 1 超级电容器组的电容电阻分布式等效电路

2.2 双向 DC-DC 降压/升压变换器建模

超级电容器储能装置主要工作在 3 种状态:
(1) 双向 DC-DC 降压/升压变换器给超级电容器充电,相当于 BUCK 运行。
(2) 为维持直流链的电压恒定,超级电容器向直流链母线提供能量,相当于正

向 BOOST 运行。某些情况需吸收直流链侧的电保持直流链侧电压恒定,电流反向,把直流链侧电路看成负载,相当于反向 BOOST 运行。
(3) 储能装置不工作时,没有能量流动,电容器端电压保持不变时,称为备用状态。这 3 种状态交替进行。

2.3 PWM 电压型变换器

SCCESS 的逆变器采用的 PWM 电压型逆变器如图 2 所示,逆变器桥臂上的开关选用 IGBT。电压型转换器将超级电容器储能装置的直流电压转换成一组三相交流输出电压,并通过耦合变压器供给交流系统^[4]。变换器的三相交流输出电压波形依赖于变换器桥臂开关的驱动信号,也就是 PWM 调制信号^[9]。

PWM 电压型变换器在交流电力系统和超级电容器间提供电力电子接口。通过电压型变换器可使直流链电压 V_{dc} 和电网电压维持恒定^[10]。

2.4 控制系统

2.4.1 DC-DC 降压/升压变换器的控制

DC-DC 降压/升压变换器的控制系统如图 3 所示。当风场接入点的功率小于参考功率时,能量由超级电容器和串联电感向直流链侧电源馈送,超级电容器放电,以补偿系统功率的不足。此时 IGBT1 断开,由 IGBT2 和 D1 起 BOOST 升压变换器的作用。当风场接入点的功率大于参考功率时,能量由直流链侧电源供给超级电容器,电能就储存起来,此时 IGBT2 断开,由 IGBT1 和 D2 起 BUCK 降压变换器作用。因此通过控制 g_1 和 g_2 的互补导通,使一开关管的电流过零时,另一开关管工作。从而使双向 DC-DC 降压/升压变换器交替运行^[11]。

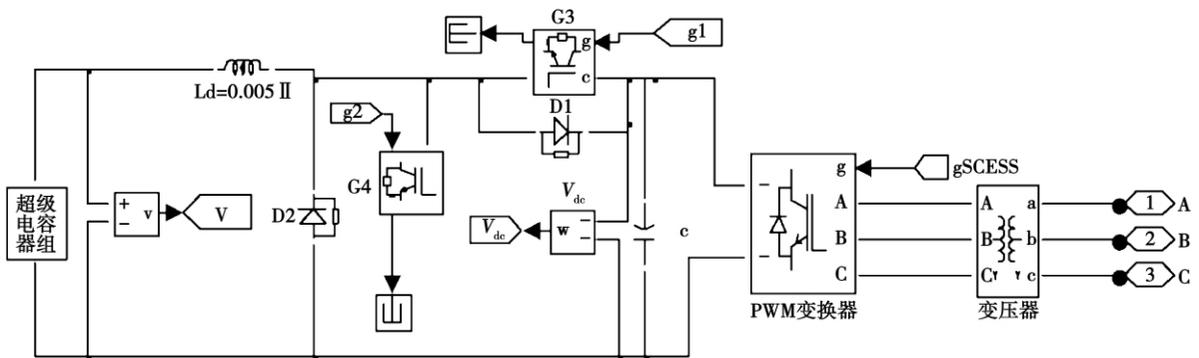


图 2 DC-DC 降压/升压变换器和 PWM 电压型变换器

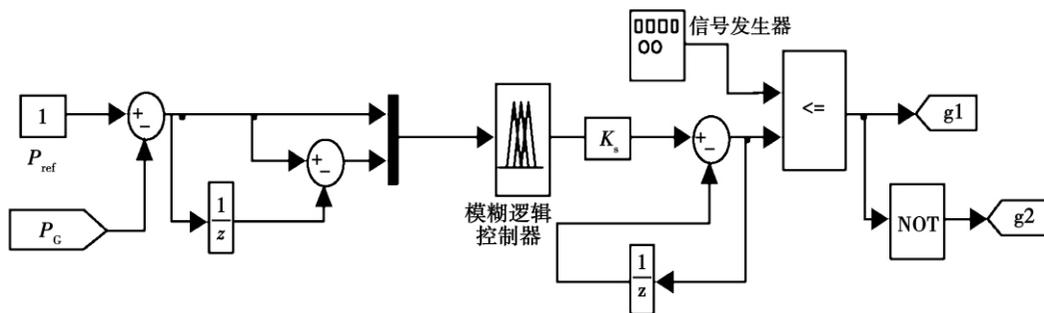


图 3 DC-DC 降压/升压变换器的模糊逻辑控制

基于功率调节的模糊逻辑控制器,其控制目标是跟踪变化的风速,并从风中吸取最大功率,它需要两个实时测量值即功率偏差 $E = P_G - P_{ref}$ 和功率偏差率 $Ec = d(P_G - P_{ref}) / dt$ 。该模糊逻辑控制器是一个双输入单输出的结构,误差 E 和误差率 Ec 能比较严格反应受控过程中输出变量的动态特性。对此二维模糊逻辑控制器的两个输入语言变量功率偏差 E 和功率偏差率 Ec ,以及一个输出语言变量功率修正值的模糊集合定义为{NB, NS, ZO, PS, PB},模糊集合中每个语言变量含义为:NB负大;NS负小;ZO零;PS正小;PB正大。风场接入点的功率和参

考功率间的误差信号是通过模糊逻辑器控制并产生 DC-DC 降压/升压变换器的工作周波,工作周波与载波信号通过关系运算模块产生驱动 DC-DC 降压/升压变换器工作的门信号^[11-12]。

2.4.2 PWM 电压源逆变器控制

PWM VSC 控制系统如图 4 所示,PI 控制器分别利用直流链电压 V_{dc} 和参考电压 V_{dc}^* 及端电压 V_k 和参考电压值 V_k^* 间的差值来确定参考 d 轴和 q 轴电流, V_{sc} 的参考信号由变换 d 轴和 q 轴电压来决定,而变换 d 轴和 q 轴电压由参考 d 轴和 q 轴电流及其检测值间的差值来确定。

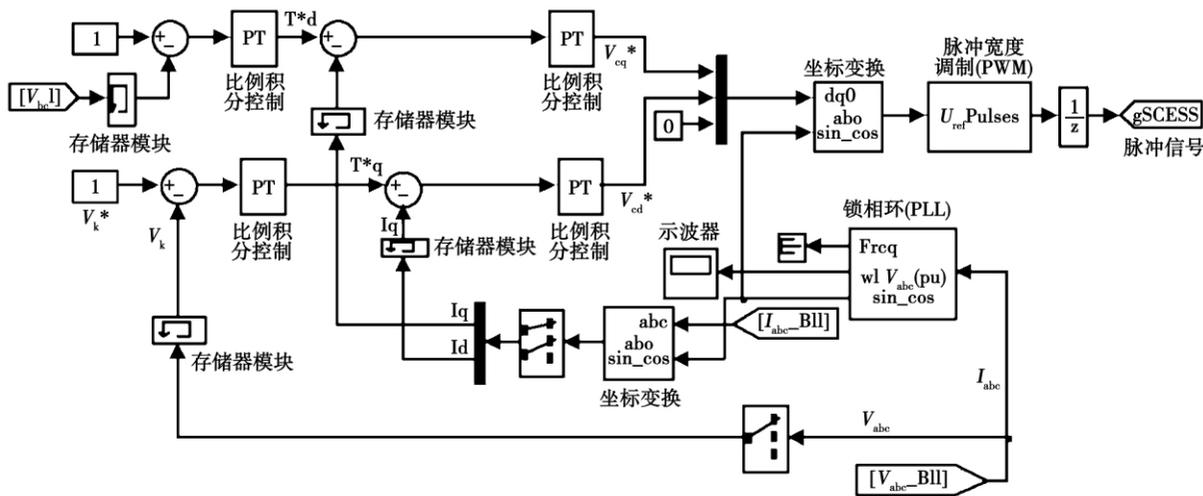


图 4 脉宽度调制电压源逆变器的控制

PI 控制器的参数可由试错法确定,通过比较参考信号可产生用于 IGBT 开关的 PWM 信号,比较参考信号被转换成具有三角载波信号的三相正弦波,高开关频率可用来改善变换器的效率,因此不会产生很大的开关损耗,在仿真分析里,三角载波信号频率是 1 000 Hz,电容器直流电压 V_{dc} 通过 6 脉冲 PWM 变换器保持恒定, V_{sc} 额定值可认为与风场额

定值相同。

3 多机风力发电并网系统仿真

多机风力发电并网系统仿真模型主要由无限大电源、汽轮同步发电机、水轮同步发电机、多台感应风力发电机、115 kV 环网构成。分别对普通多机感

应风力发电机并网系统(方案 1)和多机双馈感应风力发电机并网系统(方案 2)进行了建模仿真,方案 2 在方案 1 基础上增加了 SCESS,且用 DFIG 替代普通感应发电机,如图 5 所示。

SCESS 并接在风场与电网的公共连接点 B11、B18,两个风场分别接于 B11、B18,经输电线路输送、升压后与主系统 115 kV 环网相连。该仿真模型

主要用于电力系统的暂态仿真。两个风场各由 5 台 10 MW 的风力涡轮发电机组组成,每个风力发电机组分别由涡轮机、加速器、DFIG、0.575/66 kV 变压器以及用来补偿发电机无功功率的并联电容器构成,SCESS 的 DC/DC 变换器基于模糊逻辑控制,电压源逆变器基于 PWM 控制。系统的基准容量为 100 MV·A,频率为 60 Hz。

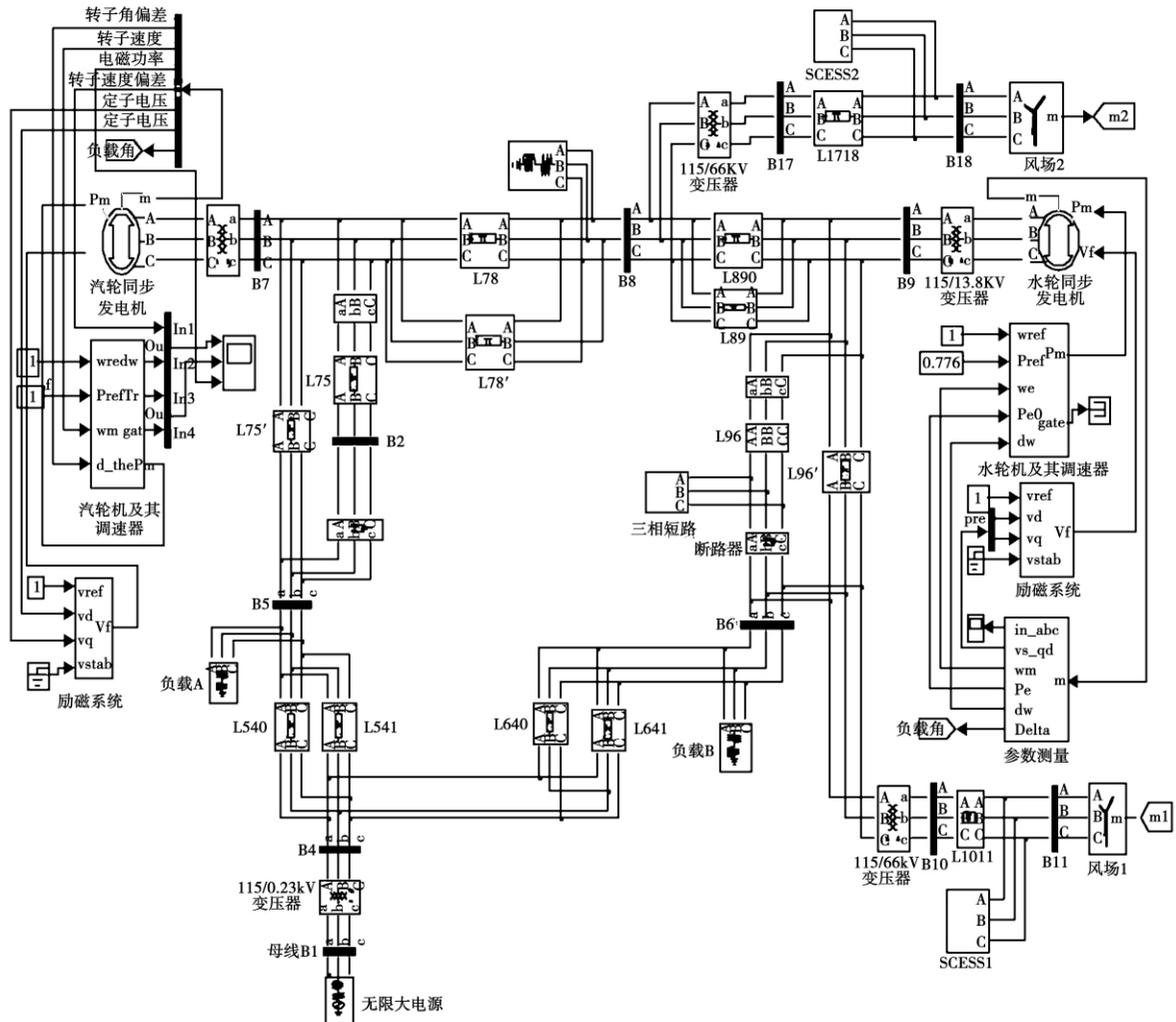


图 5 仿真系统

4 仿真分析

利用 Matlab/Simulink 软件对多机风力发电并网系统进行仿真,方案 1 和方案 2 的仿真结果如图 6 ~ 图 15 所示。假定在 $t = 5.05 \sim 5.15$ s 时,线路 L96 上发生三相接地故障,在方案 2 中通过关掉 DC-DC 降压/升压变换器的开关 g_2 ,SCESS 吸收暂态电能,从而可控制有功功率。风场的无功功率是

根据风场端电压和参考电压间的误差信号来供给。

在使用 DFIG 且有 SCESS 控制的并网系统和使用普通感应风力发电机组且无 SCESS 控制的并网系统中,当故障点处发生三相短路时,风场 1 和风场 2 处的端电压、有功功率和无功功率的响应分别如图 6 ~ 图 9 所示。图 10 和图 11 表示只有 DFIG 但没有 SCESS 控制的并网系统,图 12 ~ 图 15 分别表示方案 1 和方案 2 中同步发电机的功角特性。

在故障期间 115 kV 线路故障点相电压降为零,

风力发电机机端电压下降,DFIG 发出的无功功率增加,以保证机端电压不会下降到过低水平。故障切除后,DFIG 能很快稳定下来,持续并网运行。可见 DFIG 能够承受短时的电压降低而不退出运行,能够增大向系统输出无功功率,对系统电压的恢复提供一定的帮助。

图 6~图 7 表明,在线路 L96 发生三相短路故障时,方案 1 风场接入点的电压、功率波动幅度很大,系统极不稳定。

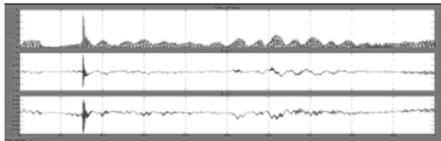


图 6 方案 1 中风场 1 处的电压、有功、无功功率的影响

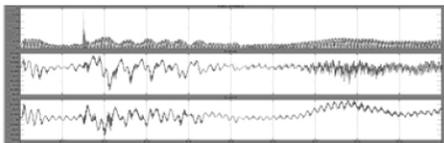


图 7 方案 1 中风场 2 处的电压和有功、无功功率的响应

图 8~图 9 表明,方案 2 风场接入点的电压、功率波动幅度很小,系统很稳定。

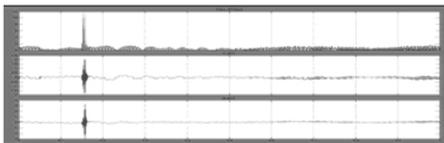


图 8 方案 2 有 ECSS 时风场 1 处的电压和有功、无功功率的响应

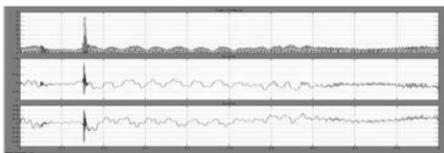


图 9 方案 2 有 ECSS 时风场 2 处的电压和有功、无功功率的响应

图 10 和图 11 表明只有 DFIG 但无 SCSS 控制时风场接入点的电压、功率也有一定幅度的波动。

图 12 和图 14 表明两个方案中均无 ECSS 时,系统中同步发电机的功角摇摆,很不稳定,而图 13

和图 15 表明两个方案中均有 ECSS 时,同步发电机的功角稳定。

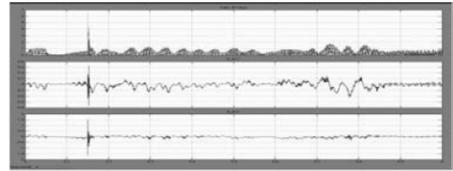


图 10 方案 2 无 ECSS 时风场 1 处的电压和有功、无功功率的影响

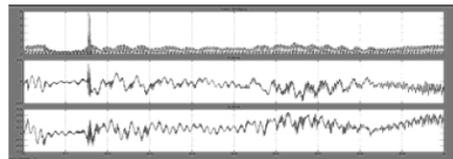


图 11 方案 2 无 ECSS 时风场 2 处的电压和有功、无功功率的影响



图 12 方案 1 中无 ECSS 时的同步发电机功角特性



图 13 方案 1 中有 ECSS 时的同步发电机功角特性



图 14 方案 2 中无 ECSS 时的同步发电机功角特性



图 15 方案 2 中有 ECSS 时的同步发电机功角特性

通过方案 1 和方案 2 的对比分析可知在三相短路故障后,使用 DFIG 能参与电力系统的无功功率调节,提高系统稳定性。从仿真图可知 SCSS 适

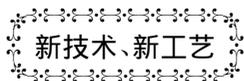
当地充放电可以平滑电网的输出功率,因此 SCESS 能维持母线电压恒定。仿真也表明,与普通感应风力发电机和无 SCESS 的系统相比,方案 2 中的 DFIG 和 SCESS 对功角振荡起抑制作用,尤其是 SCESS 的控制系统中模糊逻辑控制器的使用,使多机风力发电并网系统的稳定性有了明显的提高。

6 结 论

SCESS 将超级电容器技术、电力电子技术和控制理论有机结合起来,解决了动态电能质量问题;模糊逻辑控制与经典的控制策略相比,其优势在于模糊逻辑控制器无需数学模型即可由微处理器执行功能,不论是在非线性还是多变量系统中,特别是当系统数学模型未知和不确定时,都能产生令人满意的效果,可以应用于非线性系统,稳定系统运行;DFIG 具有同步发电机所不具备的变速恒频运行的能力,可调节无功功率,也能稳定系统。仿真结果表明: SCESS 结合 DFIG 的解决方案能提高多机风力发电机组并网时电力系统的暂态稳定性,当系统发生故障时能使电力系统稳定运行。

参考文献:

- [1] 张洪伟,沈菊. 我国电力工业的发展前景与展望[J]. 电力环境保护 2006 22(3): 59 - 62.
- [2] 唐亮. 分布式电源的分类及对电力系统的影响[J]. 仪器仪表用户 2008 15(2): 119 - 120.
- [3] 迟永宁,王伟胜. 大型风电场对电力系统暂态稳定性的影响[J]. 电力系统自动化 2006 30(15): 10 - 14.
- [4] MUYEEN S M, TAKAHASHI RION. Transient stability augmentation of power system including wind farms by using ECS[J]. IEEE Transaction on Power System 2008 23(3): 1179 - 1187.
- [5] MUYEEN S M, MANNAN M A. Stabilization of wind turbine generator system by STATCOM[J]. IEEE Trans Power Energy 2006, 126(10): 1073 - 1082.
- [6] YANG Z, SHEN C. Integration of a STATCOM and battery energy storage[J]. IEEE Trans Power System 2001, 16(2): 254 - 260.
- [7] CHENG Y, QIAN C. A comparison of diode-clamped and cascaded multilevel converters for a STATCOM with energy storage[J]. IEEE Trans Ind Electron 2006 53(5): 1512 - 1521.
- [8] 王承熙,张源. 风力发电[M]. 北京: 中国电力出版社 2002.
- [9] SHIGENORI IMOUE, HIROFUMI AKAGI. A bi-directional DC/DC converter for an energy storage system//Applied Power Electronics Conference[C]. IEEE 2007. 761 - 767.
- [10] SHEIKH M R I, MUYEEN S M. Transient stability enhancement of wind generator using superconducting magnetic energy storage unit//Proceedings of the 2008 International Conference on Electrical Machines[C]. IEEE 2008. 1 - 6.
- [11] JAZAYERI M, FENDERESKI M. Stabilization of grid connected wind generator during power network disturbances by STATCOM//Universities power Engineering Conference [C]. Brighton: University of Brighton 2007. 1182 - 1186.
- [12] MUYEEN S M, ALI M H. Stabilization of wind farms connected with multi machine power system by using STATCOM//Power Teon 2007 IEEE Lausanne[C]. IEEE 2007. 299 - 304.



新技术、新工艺

压气机转子串列式叶型的三维数值模拟

据《ASME Journal of Turbomachinery》2010 年 7 月号报道,作为压气机叶片,在不受到高损失的情况下,串列式叶型有潜力比单叶型做更多的功。

本研究工作的目的是估算在核心压气机后部级内串列式转子的流体力学性能。因此,这些结果被限定到在入口处具有厚的端壁附面层的无激波完全紊流的流动。

根据取自以前二维研究最佳情况的串列式叶型结构,设计了高轮毂与叶尖比的三维叶片几何结构。

孤立地模拟三维串列式转子,以便仔细研究其流动机理。为了进行比较,也在相同的条件下模拟几何相似的单叶片转子。

已经发现,借助于获得更高的做功系数、多变效率和失速裕度,串列式转子的工作性能比单叶片转子好。

串列式转子流动特性的分析揭示,在前面的叶片以类似于惯用的转子的方式起作用。在后面的叶片的性能强烈取决于它从在后面的叶片接受的流动,并倾向于比在前面的叶片三维和不均匀性。

(吉桂明 摘译)

based helium turbine (HTR-10GT) power generation project were described and the detailed structure design and key design parameters of the magnetic bearings ,given. A structure with an integral vertical arrangement was adopted for the rotor of the helium turbine. The above-mentioned rotor was supported by two radial magnetic bearings along with an axial magnetic bearing. The design load carrying capacity of the axial magnetic bearing was 9.800 kN with a clearance of 0.7 mm. The design load carrying capacity of the radial magnetic bearings reached 1.960 kN with a clearance between the stator and rotor being 0.6 mm. Furthermore , the load carrying characteristics of the magnetic bearings and the kinetic characteristics of the helium turbine rotor were studied. The results calculated by using the rotor kinetics show that before arriving at the rated speed of 250 Hz , the turbine and compressor rotor must pass through the first and second order bending critical speed. **Key words:** magnetic bearing , helium turbine , HTR-10GT , load carrying capacity

提高多机风力发电并网系统稳定性的研究 = Study on Enhancement of the Stability of a Multiple Wind Turbine Power Generation and Grid Connection System [刊 汉] KUANG Hong-hai , WU Zheng-qiu (College of Electrical and Information Engineering , Hunan University , Changsha , China , Post Code: 410082) , HE Xiao-ning , WANG Bing (College of Electrical and Information Engineering , Hunan University of Technology , Zhuzhou , China , Post Code: 412008) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2011 , 26(2) . - 238 ~ 243

Wind power can not produce electric energy constantly and stably as influenced by natural elements. When a large amount of wind power is connected to a grid , it will certainly bring about an adverse effect on the stability of the electric power system. To guarantee a stable operation of electric power systems , presented was a solution using a super capacitor energy storage system (SCESS) based on a fuzzy logic control coupled with a dual feed induction generator (DFIG) . In this connection , the software Matlab/Simulink was used to perform a simulation analysis of the multiple wind turbine power generation and grid connection system. The simulation results show that the SCESS and DFIG scheme presented by the authors can improve the transient stability of the above-mentioned system. When an accident occurs to the system , it can continue its stable operation. **Key words:** super capacitor , energy storage system , converter , transient stability , dual feed induction generator

提高反渗透海水淡化用提升泵效率的研究 = Study of Enhancement of the Efficiency of a Booster Pump Destined for Reverse Osmosis Sea Water Desalination [刊 汉] HU Jing-ning , LIU San-hua , JIANG Wei et al (Research Center for Fluid Mechanical Engineering Technology , Jiangsu University , Zhenjiang , China , Post Code: 212013) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2011 , 26(2) . - 244 ~ 247

With a view to solving the problems relating to the efficiency of booster pumps for reverse osmosis sea water desalination , designed were three hydraulic model versions on the basis of the currently available models. By employing software Fluent and multiple reference coordinates , and based on the Renault time-averaged $N - S$ equation and standard $k - \varepsilon$ turbulent flow model , a numerical simulation and performance prediction were performed of the inner flow fields in the three hydraulic models. On the basis of the prediction results , a model pump was manufactured by choosing a model scheme meeting the performance requirements and having the highest efficiency. Furthermore , an experimental study was conducted. The performance prediction and model test results show that the prediction values are in relatively good agreement with the test ones on a comprehensive basis , among which , the predicted head is relatively close to the test one under the design operating conditions but a certain error still exists under the off-design operating conditions. The real efficiency of the pump manufactured by using the hydraulic model and optimized through a theoretical calculation reaches 81.3% , meeting the requirement for the efficiency of a sea water desalination pump. **Key words:** sea water desalination , booster pump , efficiency , performance prediction , error