

基于无刷双转子电机的新型风电调速装置的控制策略研究

王华君¹, 赵蕾¹, 付兰芳², 袁超³

(1. 河北工业大学控制科学与工程学院, 天津 300130; 2. 军事交通学院, 天津 300130;
3. 合肥京东方光电科技有限公司, 安徽 合肥 230000)

摘要: 调速型同步风力发电系统由于不包括变流器部分所以具有较强的电网友好性, 但是目前用于同步风力发电机组的调速装置存在着调速范围不大和运维成本较高等问题。为此, 在无刷双转子电机的基础上提出一种新型的无刷调速装置, 并且通过理论和实验两个方面验证了调速装置原理的可行性。通过详细分析该装置的数学模型, 结合转子磁场定向控制方法, 提出了装置的控制策略, 并在 Matlab/Simulink 软件平台下搭建了仿真模型, 仿真证明了该装置的控制策略的正确性。

关键词: 调速; 同步风力发电系统; 控制策略; Matlab/Simulink

Control strategy study of the new wind power speed regulation device based on brushless dual-rotor motor

WANG Huajun¹, ZHAO Lei¹, FU Lanfang², YUAN Chao³

(1. School of Control Science and Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China; 2. Military Transportation University, Tianjin 300130, China; 3. BOEHF, Hefei 230000, China)

Abstract: Since the speed synchronous wind power system does not contain the converters, its power reliability is relatively strong, however, the speed regulating device now used for the synchronous wind generator has some other problems, such as the limited speed range, high cost for operating and maintaining, etc. Therefore, based on the brushless double rotor motor, a new brushless speed regulating device is proposed, which is proved to be practicable through theories and experiments. After analyzing the mathematical model of speed regulation device detailedly, this paper proposes a control strategy of speed regulation device based on rotor field oriented control method, then builds simulation models in the Matlab/Simulink software platform which proves the correctness of this control strategy.

Key words: speed; synchronous wind power generation system; control strategy; Matlab/Simulink

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)06-0046-06

0 引言

目前世界上主流的风力发电技术有双馈型和全功率型, 两种机组均是通过变流器实现变速恒频的目的, 这虽然在一定程度上提高了风能的利用率, 但是带来了其他附加问题, 如输出的电流含有大量谐波、提高了系统运维价格、电网故障时不能承受大电流冲击等等制约着风电的发展^[1-5]。由此, 无变流器的调速型同步风电机组技术应运而生。

调速型同步风力发电系统可以为电网提供稳定的电压, 并且机组可以保持长期不脱网, 电网的故障穿越能力强, 逐渐成为人们研究的重点^[6]。目前, 主要有两种调速型的同步风力发电系统, 一种是基于液力耦合器^[7]进行调速, 一种是基于有刷电磁耦

合器^[8]进行调速。前者在大转差工况下运行效率偏低, 转矩控制速度有待改进, 制造相对复杂, 后者包含电刷、滑环, 增加了风电机组的维护成本, 降低了系统可靠性。

本文提出了一种应用于同步风力发电系统的新型无刷调速装置, 该装置的创新点在于将变频器与永磁无刷双转子电机结合, 通过变频器来调节电流、电压和功率, 实现电动调速。基于这种新型电机结构调速的风电机组无刷无滑环, 提高系统可靠性和降低了系统的维护成本并且具有较好的无功调节能力。

1 调速装置的基本结构及原理

1.1 调速装置的基本结构

调速型风力发电机组的基本结构如图 1 所示,

包括风机、增速齿轮箱、调速装置和同步发电机, 齿轮箱将风轮输入的较低转速升高到电机需要的高速; 调速装置与齿轮箱的高速轴相连, 将输入的变速转为恒速输出到同步发电机恒速轴^[9]。

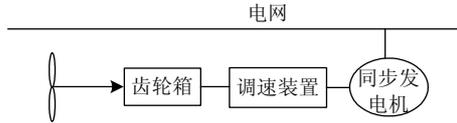


图1 调速型同步风力发电机组的基本结构

Fig. 1 Basic structure of speed synchronous wind turbines

其中调速装置是机组实现变速恒频的关键, 本文主要是提出一种新型的无刷调速装置, 基本结构如图2。

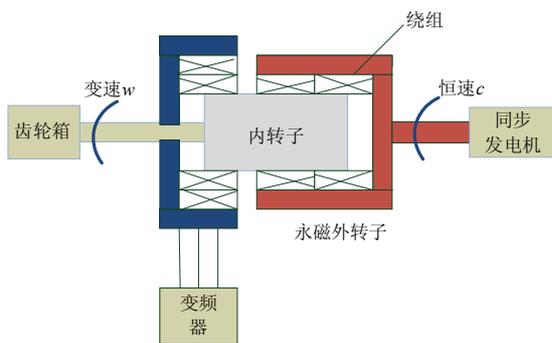


图2 新型调速装置结构示意图

Fig. 2 Schematic of the new speeder

如图2所示, 调速装置是一种叠套式的无刷结构, 由两个转子和一个定子组成, 可以看成是永磁同步电机和绕线式异步电机的级联。将两个转子分为外转子和内转子。外转子在机械上与同步发电机相连, 为其提供恒定的转速, 在电气上通过电磁耦合与内转子相连; 内转子为笼型感应电枢, 在机械上与齿轮箱相连, 电气上与定子通过电磁耦合相连; 定子是通电电枢, 与变频器相连。变频器由电网供电, 可以实时地调节通电电枢上电流的幅值、相位和频率, 从而控制电机输出的转速和转矩。

调速装置与齿轮箱连接的输入轴的转速是可变的, 为了保持与同步发电机连接的输出轴输出转速的恒定, 在两个机械端口之外增加了一个连接变频器的电气端口用来调节电流、电压和功率, 实现转矩的传递, 弥补输入轴和输出轴之间的功率差额。变频器控制无刷双转子电机可以使风力机的调速范围更宽, 响应速度快, 调节平稳, 而变频器由于其功率容量小, 控制简单。无刷双转子电机由于去掉了电刷和滑环, 增加了系统的稳定性, 提高了运行的可靠性, 降低了系统成本。

1.2 调速装置原理的理论说明

当异步电机定子接入三相电源时, 调速装置工作方式与级联无刷双馈电动机超同步运行情况极其相似, 为了分析方便, 将调速装置看做是反相序相连的永磁电机和异步电机级联结构, 永磁电机由外转子和内转子构成, 异步电机由定子和内转子构成^[10]。根据双馈电机的特性可知异步电机和永磁电机转速和极对数 n_1 、 p_d 、 n_2 、 p_y 与输出的转速 n_r 关系为

$$n_r = \frac{n_1 p_d + n_2 p_y}{p_d + p_y} \quad (1)$$

式中, p_d 、 n_2 、 p_y 是不变的, 所以通过控制 n_1 来使输出转速 n_r 为定值。

1.3 调速装置原理的实验验证

叠套式调速装置目前还没有样机, 为了验证调速原理的可行性, 将用级联式的结构代替叠套式结构进行一个开环实验, 原理不变。其连接框图如图3和图4。

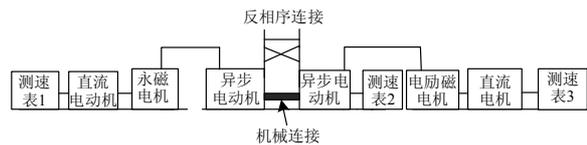


图3 调速装置实验模拟框图

Fig. 3 Experimental simulation block diagram of the speeder



图4 调速装置模拟实物图

Fig. 4 Simulating physical map of the speeder

本实验模拟装置分为三个部分: 左边定子部分、右边外转子部分和中间内转子部分。左边定子部分, 由于变频器输出的电压波形有谐波, 不是很平滑, 所以用永磁同步发电机来代替变频器获得较为稳定的电压波形。风轮用直流电动机代替; 右边外转子部分, 在模拟实验中根据电磁耦合原理将电机外转子和内转子耦合产生的力矩转换到异步电动机上; 中间内转子部分, 两个异步电动机之间机械连接保证转速一样, 电气上反相序连接, 这样就将左边和

右边两部分产生的转矩的效果叠加在一起。实验设定转速定值是 1 160 r/s, 由于风轮旋转时的转速范围最大值与最小值接近两倍的关系, 为了切合实际, 调节风轮的转速时范围控制在两倍变化范围, 得到测速表 1、2、3 的结果如表 1, 各个测速表转速的关系如图 5。

表 1 测速表数据
Table 1 Data of tachometer

r/s		
测速表 1	测速表 3	测速表 2
795	1 517	1 156
850	1 463	1 156.5
947	1 374	1 160.5
1 039	1 283	1 161
1 318	1 002	1 160
1 368	967	1 167.5
1 425	894	1 159.5
1 524	792	1 157.5

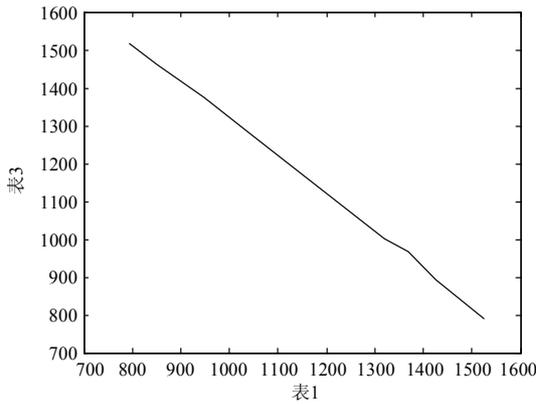


图 5 异步电机和永磁电机输出转速关系曲线

Fig. 5 Output speed curve of asynchronous motor and permanent magnet motor

实验时所用的电机的极对数都是 2, 那么由式 (1) 可得出

$$n_r = \frac{n_1 + n_2}{2}$$

实验结果很好地验证了调速装置的基本原理, 验证了装置的可行性, 并且当风轮输入的转速变化范围较大时, 仍然能够实现调速, 与实际情况相符合。

2 调速装置的数学模型

调速电机的电磁主要是通过内外转子上的绕组实现耦合的, 为了能够找到耦合以后的电量之间的关系, 运用矢量控制将所有的电量折算到同一个两相坐标系下^[11]。

分析时仍然将调速电机看做是永磁同步电机和绕线式异步电机的级联, 由永磁同步电机的数学模

型可以推出外转子部分的电压磁链方程为

$$\begin{cases} u_{yqb} = r_{yb} i_{yqb} + \frac{d}{dt} \psi_{yqd} \\ u_{ydb} = r_{yb} i_{ydb} + \frac{d}{dt} \psi_{ydd} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \psi_{yqb} = l_{yb} i_{yqb} + \psi_{fy} \\ \psi_{ydb} = l_{yb} i_{ydb} + \psi_{fy} \end{cases} \quad (3)$$

式中:

$$\begin{cases} \psi_{fy} = \psi_{fy} \sin(\Delta\theta_y) \\ \psi_{fy} = \psi_{fy} \cos(\Delta\theta_y) \end{cases} \quad (4)$$

$$\Delta\theta_y = p_y \Delta\omega_y t = p_y (\omega_y - \omega_b) t \quad (5)$$

由绕线式异步电机的数学模型可以推出内转子部分的电压磁链方程为

$$\begin{cases} u_{dqd} = r_{dd} i_{dqd} + p_d \omega_b \psi_{dqd} + \frac{d}{dt} \psi_{dqd} \\ u_{ddd} = r_{ds} i_{ddd} + p_d \omega_b \psi_{dqd} + \frac{d}{dt} \psi_{ddd} \\ u_{dqb} = r_{db} i_{dqb} + \frac{d}{dt} \psi_{dqb} \\ u_{dwb} = r_{db} i_{dwb} + \frac{d}{dt} \psi_{dwb} \end{cases} \quad (6)$$

式中:

$$\begin{cases} \psi_{dqb} = l_{dd} i_{dqd} + l_{dm} i_{dqb} \\ \psi_{ddd} = l_{dd} i_{ddd} + l_{dm} i_{dwb} \\ \psi_{dqb} = l_{dm} i_{dqd} + l_{dm} i_{dqb} \\ \psi_{dwb} = l_{dm} i_{ddd} + l_{dm} i_{dwb} \end{cases} \quad (7)$$

内外转子的电磁转矩分别是

$$T_{ey} = \frac{p_y}{2} (\psi_{fy} i_{ydb} - \psi_{fy} i_{yqb}) = \quad (8)$$

$$\frac{p_y \psi_{fy}}{2} [\sin(p_y \Delta\omega_y t) i_{dwb} - \cos(p_y \Delta\omega_y t) i_{dqb}]$$

$$T_{eb} = \frac{p_d}{2} (\psi_{fy} i_{ydb} - \psi_{fy} i_{yqb}) + \frac{p_d}{2} l_{dm} (i_{dqd} i_{dwb} - i_{ddd} i_{dqb}) =$$

$$\frac{p_y \psi_{fy}}{2} [\sin(p_y \Delta\omega_y t) i_{dwb} - \cos(p_y \Delta\omega_y t) i_{dqb}] +$$

$$\frac{p_d}{2} l_{dm} (i_{dqd} i_{dwb} - i_{ddd} i_{dqb}) \quad (9)$$

此无刷双转子调速电机的运动方程为

$$\begin{cases} J_y \frac{d\omega_y}{dt} = T_{iy} - T_{ey} - k_y \omega_y \\ J_b \frac{d\omega_b}{dt} = T_{eb} - T_{ib} - k_b \omega_b \end{cases} \quad (10)$$

上述公式中: 下标两侧的 y 、 b 、 d 分别代表外转子、内转子、定子绕组; 下标中间的 q 、 d 代表在内转子上建立的 q 、 d 轴坐标分量; p_y 、 p_d 代表外转子和定子绕组的极对数; r_{dd} 、 l_{dd} 、 l_{dm} 代表定子绕组的电阻、自感和与内转子内壁绕组的互感; r_{yb} 、 r_{db} 、 l_{yb} 、 l_{db} 、 ω_b 、 ω_y 、 $\Delta\omega_y$ 分别代表内转子绕组的电阻、电感、内转子与外转子的机械角速度和外转子相对于内转子的机械角速度; u_{dqd} 、 u_{ddd} 、 i_{dqd} 、 i_{ddd} 、 i_{dqy} 、 i_{ddy} 、 i_{yqb} 、 i_{ydb} 代表定子绕组、定子侧对应的内转子侧绕组、外转子侧对应的内转子绕组的电压、电流的瞬态值; J_b 、 J_y 、 T_{ib} 、 T_{iy} 、 K_b 、 K_y 代表的是内转子和外转子的转动惯量、负载转矩、摩擦阻力系数; ψ_{iy} 是外转子产生的磁链。

由式(2)~式(10)以及内转子的电量关系得出调速装置标准状态方程形式的电压磁链方程(p 代表微分算子)为

$$\begin{bmatrix} p i_{dqd} \\ p i_{ddd} \\ p i_{dqy} \\ p i_{ddy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_{dd} & 0 & l_{dm} & 0 \\ 0 & l_{dd} & 0 & l_{dm} \\ l_{dm} & 0 & l_{yb} + l_{db} & 0 \\ 0 & l_{dm} & 0 & l_{yb} + l_{db} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{dqd} \\ i_{ddd} \\ i_{dqy} \\ i_{ddy} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r_{dd} & p_d \omega_b l_{dd} & 0 & p_d \omega_b l_{dm} \\ -p_d \omega_b l_{dd} & r_{dd} & -p_d \omega_b l_{dm} & 0 \\ 0 & 0 & r_{yb} + r_{db} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_{yb} + r_{db} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{dqd} \\ i_{ddd} \\ i_{dqy} \\ i_{ddy} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & p_y \Delta \omega_y \cos(p_y \Delta \omega_y t) \\ 0 & 0 & p_y \Delta \omega_y \sin(p_y \Delta \omega_y t) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_{dqd} \\ u_{ddd} \\ \psi_{iy} \end{bmatrix}$$

3 调速装置的控制策略

调速装置虽然具有一个定子和两个转子, 但是它仍然适用普通电机的控制策略如直接转矩控制、模糊自适应控制等。为了使其得到较高的动态性能, 结合装置的数学模型, 本文选择转子磁场定向控制的方法。转子磁场定向控制是矢量控制的一种, 以转子磁场定向, 通过解耦分解定子电流, 使其成为转矩和磁场两个分量, 并通过这两个分量分别控制转矩和磁场^[12-13]。

建立按转子磁场定向的旋转坐标系(称为 MT 坐标系), 取旋转坐标系的 d 轴沿着转子总磁链矢量 ψ_{dbd} 的方向, 称之为 M 轴, 而 q 轴为逆时针 90° , 垂直于 M 轴, 称之为 T 轴, 然后再将其在 d 、 q 轴坐标系统下的各个电压、电流量变换到对应的同步

坐标系统下。

根据调速装置的标准状态方程, 其中用定子侧电流代替电压作为直接控制对象, 得到

$$\begin{bmatrix} u_{dqd} \\ u_{ddd} \\ u_{dqy} \\ u_{ddy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{dd} + p l_{dd} & p_d w_b l_{dd} & p l_{dm} & p_d w_b l_{dm} \\ p_d w_b l_{dm} & r_{dd} + p l_{dd} & -p_d w_b l_{dm} & p l_{dm} \\ p l_{dm} & 0 & p l_b + r_b & 0 \\ 0 & p l_{dm} & 0 & p l_b + r_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dqd} \\ i_{ddd} \\ i_{dqy} \\ i_{ddy} \end{bmatrix}$$

式中:

$$l_b = l_{yb} + l_{db}$$

$$r_b = r_{yb} + r_{db}$$

装置的 dq 两相坐标系与双同步坐标系间的夹角为

$$\theta_{de} = (-w_d - p_d w_b) t$$

$$\theta_{ye} = (w_y - p_y w_b) t$$

由此推导出装置 dq 两相坐标系与双同步坐标系之间的关系为

$$\begin{bmatrix} F_{dqy}^{de} \\ F_{ddy}^{de} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{de}) & -\sin(\theta_{de}) \\ \sin(\theta_{de}) & \cos(\theta_{de}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{dqy} \\ F_{ddy} \end{bmatrix} = \mathbf{C}_r^{de} \begin{bmatrix} F_{dqy} \\ F_{ddy} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} F_{dqd}^{ye} \\ F_{ddd}^{ye} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{ye}) & -\sin(\theta_{ye}) \\ \sin(\theta_{ye}) & \cos(\theta_{ye}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{dqd} \\ F_{ddd} \end{bmatrix} = \mathbf{C}_r^{ye} \begin{bmatrix} F_{dqd} \\ F_{ddd} \end{bmatrix}$$

式中: 上下标的 y 、 d 、 b 表示外转子、定子和内转子的相关量; 下标中的 d 、 q 表示装置的 d 、 q 轴分量; e 表示两相坐标系与双同步坐标系的夹角; \mathbf{C} 表示装置的两相坐标系到双同步坐标系的变换矩阵。

由此推断出装置在双同步坐标系下各个电量之间的关系式为

$$\begin{bmatrix} u_{dq}^{de} \\ u_{dd}^{de} \\ u_{yq}^{ye} \\ u_{yd}^{ye} \end{bmatrix} = r_{dd} \begin{bmatrix} i_{dq}^{de} \\ i_{dd}^{de} \\ i_{yq}^{ye} \\ i_{yd}^{ye} \end{bmatrix} + w_b \begin{bmatrix} \psi_{dq}^{de} \\ \psi_{dd}^{de} \\ \psi_{yq}^{ye} \\ \psi_{yd}^{ye} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_{dq}^{de} \\ \psi_{dd}^{de} \\ \psi_{yq}^{ye} \\ \psi_{yd}^{ye} \end{bmatrix}$$

$$\text{其中: } \begin{bmatrix} \psi_{dq}^{de} \\ \psi_{dd}^{de} \end{bmatrix} = L_{db} \begin{bmatrix} i_{dq}^{de} \\ i_{dd}^{de} \end{bmatrix} + l_{dm} \begin{bmatrix} i_{dqd}^{de} \\ i_{ddd}^{de} \end{bmatrix} + l_{dm} \begin{bmatrix} i_{dqy}^{de} \\ i_{ddy}^{de} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \psi_{dq}^{ye} \\ \psi_{dd}^{ye} \end{bmatrix} = L_{yb} \begin{bmatrix} i_{yq}^{ye} \\ i_{yd}^{ye} \end{bmatrix}$$

根据上节公式推导出装置的磁场定向控制方程为

$$(-\omega_d - p_d \omega_b) \psi_{dbd}^{de} + l_{dm} \frac{r_{yb} + r_{db}}{l_{yb} + l_{db}} i_{dq}^{de} = 0$$

$$p \psi_{dbd}^{de} + \frac{r_{yb} + r_{db}}{l_{yb} + l_{db}} \psi_{dbd}^{de} + l_{dm} \frac{r_{yb} + r_{db}}{l_{yb} + l_{db}} i_{dd}^{de} = 0$$

- protection of DFIG system under three-phase short circuit fault of grid[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(6): 40-48.
- [5] 吕志强, 许国东. 兆瓦级双馈风电机组电网故障时的暂态分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(23): 112-116.
LÜ Zhiqiang, XU Guodong. Transient analysis of gridshort circuit fault of megawatt doubly fed wind turbine[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(23): 112-116.
- [6] 乔颖, 鲁宗相, 徐飞, 等. 风电场集成监控平台的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(6): 117-123.
QIAO Ying, LU Zongxiang, XU Fei, et al. Study on the integrated monitoring & control platform of windfarms[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(6): 117-123.
- [7] 艾超. 液压型风力发电机组转速控制和功率控制研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2012.
AI Chao. Research on speed control and power control of hydraulic type wind turbine[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2011.
- [8] 陈基和, 周强明, 柴建云, 等. 基于电磁耦合器调速的新变速恒频风力发电机组[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2011, 51(3): 361-366.
CHEN Jihe, ZHOU Qiangming, CHAI Jianyun, et al. New variable speed constant frequency wind turbine generators based on electromagnetic coupler[J]. Journal of Tsinghua University, Sci & Tech, 2011, 51(3): 361-366.
- [9] 严干贵, 王茂春, 穆钢, 等. 双馈异步风力发电机组联网运行建模及其无功静态调节能力研究[J]. 电工技术学报, 2008, 23(7): 98-104.
YAN Gangui, WANG Maochun, MU Gang, et al. Modeling of grid-connected doubly-fed induction generator for reactive power static regulation capacity study[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(7): 98-104.
- [10] 贺益康, 周鹏. 变速恒频双馈异步风力发电系统低电压穿越技术综述[J]. 电工技术学报, 2009, 24(9): 140-146.
HE Yikang, ZHOU Peng. Overview of the low voltage ride-through technology for variable speed constant frequency doubly fed wind power generation systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(9): 140-146.
- [11] HOFMANN W, OKAFOR F. Optimal power utilization with doubly-fed full-controlled induction generator[C] // African Conference in Africa, 2002. IEEE AFRICON. 6th, October 2-4, 2002, 2: 693-698.
- [12] 许恩泽. 永磁无刷双转子混合动力系统的研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2011.
XU Enze. Study on hybrid power system with the permanent magnet brushless double rotor motor[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2011.
- [13] HOLDSWORTH L, WU Xueguang, EKANAYAKE J B, et al. Comparison of fixed speed and doubly-fed induction wind turbines during power system disturbances[J]. IEEE Proceedings on Transmission, Generation, and Distribution, 2003, 150(3): 343-352.

收稿日期: 2014-06-04; 修回日期: 2014-08-11

作者简介:

王华君(1957-), 男, 教授, 主要研究方向为风能动力工程及电机控制; E-mail: zlniannian@126.com

赵蕾(1989-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为风能动力工程及电机控制。E-mail: 1058839363@qq.com

(编辑 周金梅)