

# 双馈风力发电机低压穿越工况下的电磁场分析

赵 昂<sup>1</sup> 张新燕<sup>1</sup> 张 谦<sup>1</sup> 徐其丹<sup>1</sup> 宋振雨<sup>2</sup>

(1. 新疆大学电气工程学院 新疆 乌鲁木齐 830047; 2. 国网山东庆云县供电公司, 山东 德州 253700)

**摘要:** 随着双馈风力发电机大量的应用,风电机组的低压穿越情形越来越频繁,低压穿越工况对风力发电机早期故障的影响越来越引起人们的注意,人们迫切需要知道在低压穿越过程中电机内部的电磁场的变化情况。利用 Matlab 软件建立双馈风力发电机低压穿越模型,仿真得到整个低压穿越过程中电机内部的电流值,并将得到的电流值加载到由 ANSYS 软件建立双馈风力发电机模型中,利用 ANSYS 软件对整个低电压穿越过程中双馈风力发电机内部的电磁场进行仿真。

**关键词:** 双馈风力发电机; 低电压穿越; ANSYS; 电磁场

**Abstract:** With the widely application of doubly - fed wind power generators, the low voltage ride through of wind power generator system is becoming more and more frequent, and the influence of low voltage ride through condition on incipient fault of wind power generator has attracted much attention. It is urgent to know the changes of electromagnetic field inside the motor during low voltage ride through. The low voltage ride through model of doubly - fed wind power generator is established by Matlab software, and the current value inside the motor is obtained by the simulation during low voltage ride through. The obtained current value is loaded into the model of doubly - fed wind power generator established by ANSYS software, and the simulation of electromagnetic field inside doubly - fed induction generator in the whole process of low voltage ride is carried out with ANSYS software.

**Key words:** doubly - fed induction generator (DFIG); low voltage ride through; ANSYS; electromagnetic field

中图分类号: TM315 文献标志码: A 文章编号: 1003 - 6954(2016)03 - 0007 - 05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2016.03.002

随着风电规模的日渐增长,风力发电在电力系统中所占份额越来越大,风力发电系统对电网的影响也越来越大。因此,世界各国纷纷要求风力发电机组能够在电网有较大电压波动出现时保持并网运行,并当故障清除后能够向电网提供无功支持;在电网需要时,能快速向电网提供无功功率,调节和稳定电网电压,这就要求风电机组具有低电压穿越能力。同时,随着双馈风力发电机的应用越来越多,双馈风力发电机故障情况也日益引起人们的关注。为了了解低电压穿越工况对双馈风力发电机早期故障的影响,避免重大经济损失,人们迫切需要知道在低电压穿越工况下电机内部电磁场的变化情况。

目前流行的双馈风力发电机建模方式大多数为使用 Matlab 和 PSCAD 等软件,利用派克变换的数学方式建立发电机模型,其中文献[1]是利用 Matlab 建立了能够表征变速恒频风电机组特性的整体动态数学模型。文献[2]利用 PSCAD/EMTDC 软件

基金项目:自然科学基金(201491112)

仿真模拟了双馈风力发电机。但是它们都不能够仿真出电机内部的磁场变化情况。虽然文献[3-4]利用 ANSYS 软件建立了双馈风力发电机的模型,并计算出在电机正常状态、不对称短路和匝间短路故障下的电机内部的电磁场和温度场情况。但是并没有研究在低电压穿越工况下的电机内部电磁场变化情况。下面利用 ANSYS 软件仿真计算出了在低压穿越工况下的发电机内部磁场的变化情况。

## 1 双馈风力发电机二维模型的建立

### 1.1 双馈风力发电机

双馈风力发电机(doubly - fed induction generator, DFIG)是目前应用最为广泛的风力发电机类型之一。由定子绕组与电网直接相连的绕线型异步发电机和安装在转子绕组上的双向背靠背 IGBT 电压源变流器组成。转子绕组由频率、相位、幅值都可调节的电源供给三相低频交流励磁电流。转子绕组的

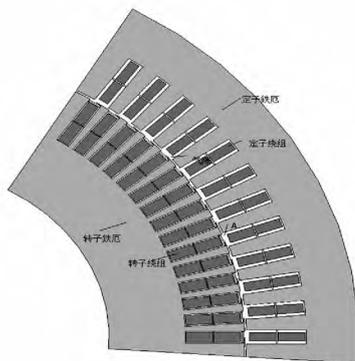
低频励磁电流在电机内部中形成一个低速旋转磁场,其旋转速度 $\omega_1$ 与转子机械转速 $\omega_2$ 相加等于定子磁场的同步转速 $\omega_3$ ,从而使发电机定子感应出工频电压。当风速变化引起转子机械转速变化 $\omega_2$ 时,可以通过调整转子绕组励磁电流的频率改变旋转磁场的转速 $\omega_1$ ,可使定子旋转磁场 $\omega_3$ 保持恒定,达到变速恒频的目的。

### 1.2 双馈风力发电机的模型建立

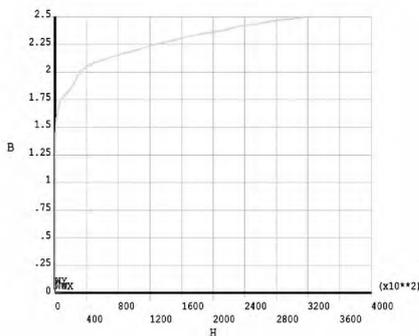
由于双馈风力发电机内部庞杂,在利用 ANSYS 软件建模的时候部分进行了简化。同时电机因为其具有轴对称特性,建立了电机的1/4模型。表1为电机参数,图1为电机模型和定转子铁心磁滞回线。

表1 电机参数

定子额定电压 /V	电机额定频率 /Hz	极对数	定子槽数	转子槽数	定子槽深 /mm	转子槽深 /mm
690	50	4	72	60	70	69.3



(a) 2.5 MW 双馈风力发电机模型



(b) 铁心 B-H 曲线图

图1 电机模型和定转子铁心磁滞回线

### 1.3 模型的计算求解

建立二维双馈风力发电机的模型,对其进行有限元分析和计算。模型采用自动智能网格对计算区域进行划分,划分后的模型如图2所示。

利用有限元软件对电机模型计算,就是利用软件强大的计算能力和仿真功能求解模型电磁场的克

斯韦方程。方程组为

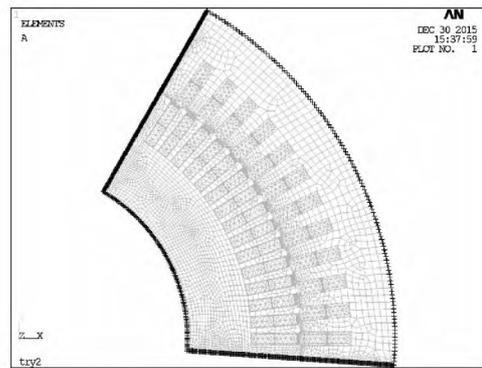


图2 划分网格后的模型

$$\begin{cases} \nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{d\vec{D}}{dt} \\ \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \vec{D} = \rho \\ \nabla \cdot \vec{B} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $E$ 为电场强度, V/m;  $B$ 为磁感应强度, T;  $D$ 为电位移矢量, C/m<sup>2</sup>;  $H$ 为磁场强度, A/m;  $\rho$ 为电荷密度, C/m<sup>2</sup>。

求解麦克斯韦方程必须确定初始条件和边界条件。初始条件为低压穿越时电机的电流值。边界条件选取 $A_z = 0$ 。化简后的方程组为

$$\begin{cases} \Omega: \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{\mu} \cdot \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{\mu} \cdot \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = -J_z \\ \Gamma_1: A_z = 0 \\ \Gamma_2: \frac{1}{\mu_1} \cdot \frac{\partial A_z}{\partial n} = \frac{1}{\mu_2} \cdot \frac{\partial A_z}{\partial n} - J_m \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\Omega$ 为求解域;  $\Gamma_1$ 为第一类边界条件;  $\Gamma_2$ 为第二类边界条件;  $A_z$ 为磁密矢量, Wb/m;  $J_z$ 为电流密度, A/m<sup>2</sup>;  $\mu$ 为磁导率, H/m。

## 2 双馈风力发电机低压穿越电流的获得

### 2.1 双馈风力发电机低电压穿越技术

双馈式风力发电机在电网发生电压跌落时,风力发电机机端电压同时跌落。由于风速并未突变,在发生电压跌落的瞬间风力发电机的功率没有突变,将导致定子和转子电流迅速上升,导致电容充电、直流电压快速升高、发电机转子加速、电磁转矩突变等一系列问题,极易导致电机发生故障。为保障风力发电机的安全,风力发电机一般会从电网解

列;但是随着风电的规模日益庞大,大规模风电机组从电网解列,使电网电压失去支撑,可能导致严重的连锁反应,对电网的稳定造成严重影响,因此国内外都对风电场提出了强制要求:在电网电压跌落时,风电场必须有维持与电网连接而不解列,甚至能够在此过程中提供无功以支持电网电压恢复的能力,即风力发电机需要有低电压穿越能力。

针对电网故障导致的电压骤降,根据其严重程度分为3种情况。

1) 较小的定子电压对称骤降:这种状态下可通过控制系统的适当设计使DFIG、变换器电流和电压保持在其限额内,无需保护动作。

2) 较大的定子电压对称骤降:此时DFIG转子过电流不可避免并将出现直流环节过电压。这种情况下转子快速短接保护Crowbar被激活,转子侧变换器被阻断而网侧变换器仍保持对直流母线电压的控制。随后可在交流电网恢复供电之前、后停止转子Crowbar工作,转子侧变换器解除阻断而重新投入工作。

3) 较大的极端电压骤降和直流侧出现超高压,可设定将直流Crowbar电路投/切逻辑关系来激活、解除直流Crowbar电路,以期将直流环节电压控制在安全范围内,确保网侧变换器继续安全工作。

选取第3种情况进行分析,建立仿真模型。图3为双馈风力发电机低电压穿越结构图。

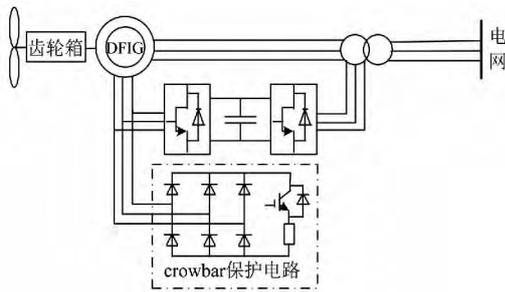


图3 低电压穿越结构图

## 2.2 电网对称故障情况下故障电流分析

在双馈风力发电机并网运行时,其定子侧与电网直接相连,当电网发生三相对称故障时,电网电压跌落导致机端电压跌落,而定子磁链不能跟随机端电压突变。为维持定子磁链不变,定子侧产生的电流直流分量切割旋转的转子绕组,会在转子侧过电流和过电压。

由于2.5 MW风力发电机定转子的电阻很小,为了简化分析,假定故障前阻值忽略不计。由于暂

态过程很短,可以假设暂态过程中风速未发生变化。

电机稳态运行时其磁链表达式为

$$\begin{cases} \vec{\psi}_s = L_g \cdot \vec{i}_s + L_m \cdot \vec{i}_r \\ \vec{\psi}_r = L_m \cdot \vec{i}_s + L_r \cdot \vec{i}_r \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\vec{i}_s$ 为定子电流; $\vec{i}_r$ 为转子电流; $\vec{\psi}_s$ 为定子磁链; $\vec{\psi}_r$ 为转子磁链; $L_s$ 为定子电感; $L_r$ 为转子电感; $L_m$ 为电机激磁电感。

由公式(3)可以得出定转子电流的表达式为

$$\begin{cases} \vec{i}_s = \frac{\vec{\psi}_s}{L_s - \frac{L_m^2}{L_r}} - \frac{L_m}{L_r} \frac{\vec{\psi}_r}{L_s - \frac{L_m^2}{L_r}} \\ \vec{i}_r = -\frac{L_m}{L_r} \frac{\vec{\psi}_s}{L_r - \frac{L_m^2}{L_s}} + \frac{\vec{\psi}_r}{L_r - \frac{L_m^2}{L_s}} \end{cases} \quad (4)$$

由于双馈风力发电机内部磁链是连续变化的,可以通过研究定转子磁链的暂态过程得到故障时定转子电流变化。

由于电机绕组的电阻、定转子磁链的直流分量会缓慢衰减,其衰减时间可以由定转子电阻及短路时的定转子等效电感决定,即

$$\begin{cases} L'_s = L_{s\sigma} + \frac{L_{r\sigma} \cdot L_m}{L_{r\sigma} + L_m} \\ L'_r = L_{r\sigma} + \frac{L_{s\sigma} \cdot L_m}{L_{s\sigma} + L_m} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $L_{s\sigma}$ 为定子漏感; $L_{r\sigma}$ 为转子漏感。可以求出定转子磁链在短路后的衰减时间常数为

$$\begin{cases} T'_s = \frac{L'_s}{R_s} \\ T'_r = \frac{L'_r}{R_r} \end{cases} \quad (6)$$

由以上公式可得

$$\begin{cases} \vec{i}_{sp} = \frac{\psi_{s0}}{L'_s} \cdot e^{-\frac{t}{T'_s}} - \frac{L_m}{L_r} \cdot \frac{\psi_{r0}}{L'_s} \cdot e^{-\frac{t}{T'_r}} \cdot e^{j\omega t} \\ \vec{i}_{rp} = -\frac{L_m}{L_s} \cdot \frac{\psi_{s0}}{L'_r} \cdot e^{-\frac{t}{T'_s}} \cdot e^{j\omega t} + \frac{L_r}{L_m} \cdot \frac{\psi_{r0}}{L'_r} \cdot e^{-\frac{t}{T'_r}} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\vec{i}_{sp}$ 为定子磁链中暂态直流分量产生的暂态电流; $\vec{i}_{rp}$ 为转子磁链中暂态直流分量产生的暂态电流; $\psi_{s0}$ 为定子磁链中暂态直流分量的初始值; $\psi_{r0}$ 为转子磁链中暂态直流分量的初始值。

为简化分析,忽略了Crowbar电路中的放电电阻。当Crowbar电路启动时,相当于增大转子电阻,

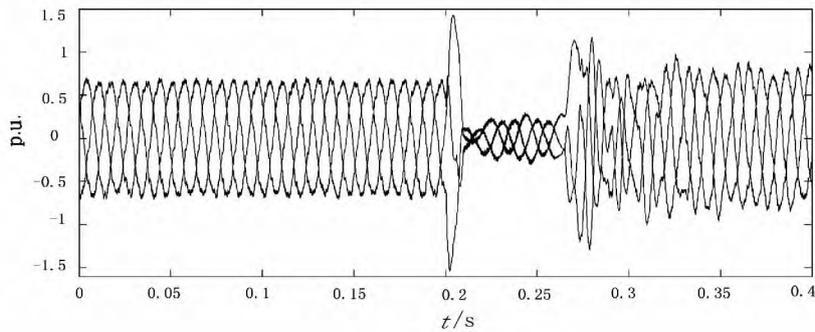


图 4 定子电流

根据公式(6)可知转子磁链的衰减常数会变小,加快了转子磁链中暂态分量的衰减。当 Crowbar 放电电阻很大时,转子侧电阻同时也会在一定程度上影响定子侧的衰减时间常数,即加快定子侧暂态磁链衰减过程。

系统设定 Crowbar 电路在转子侧变换器峰值电流超过 1.4 p.u. 时投入工作。设置电网在 0.2 s 时发生三相对称短路故障,电网电压跌落至额定电压的 20%,电机定子电流瞬间上升到 1.48 p.u.,Crowbar 电路投入工作,定子电流逐渐降低,电流峰值稳定在 0.2 p.u.。0.3 s 电网恢复正常,为有效避免与电网电压恢复时间和自动重合闸时间重叠,在当 Crowbar 电路投入时间为 0.08 s 后,Crowbar 电路被切除,转子电流产生尖峰电流随后迅速恢复至稳定状态,得到电压骤降 80% 时的定子电流如图 4 所示。

### 3 双馈风力发电机低压穿越状态下的电磁仿真

在发电机模型中定义气隙磁密分析路径和选取气隙中的 A 点,将通过 Matlab 仿真得到的低电压穿越过程中双馈电机转子和定子电流做为载荷加在 ANSYS 模型中。选取在此过程中电机在正常、故障和故障恢复 3 种状态进行研究,得到双馈风机在电网低电压穿越过程中的各种电磁场数据。

#### 1) 正常状态下的双馈风力发电机内部电磁场

当电网未发生三相平衡故障,选取双馈风力发电机在 0~0.02 s 正常状态下所得到的电机内部的电磁场数据。图 5 为 A 点磁感应强度随电流变化的曲线,由图 5 可知双馈风力发电机气隙中 A 点的磁感应强度在正常状态下是随时间变化呈正弦响应。

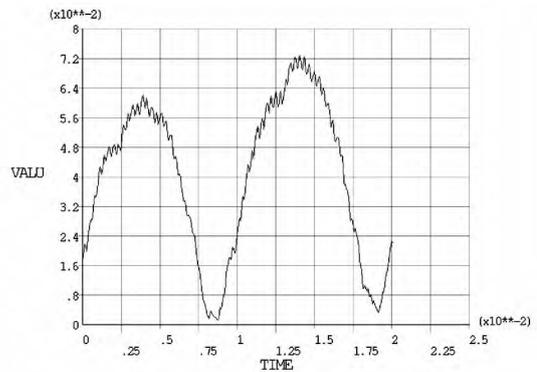


图 5 正常状态 A 点磁感应强度

#### 2) 故障发生时双馈风力发电机内部电磁场

选取当电网刚发生三相平衡故障到电机 Crowbar 电路投入运行的 0.2~0.25 s 时间段,进行 ANSYS 瞬态计算得到电机内部电磁场数据。图 6 是 A 点磁场强度随时间的变化曲线,由图 6 可以看出转子电流瞬间的变化会使双馈风力发电机内部的电磁场强度发生相应的变化,但是并未突变。

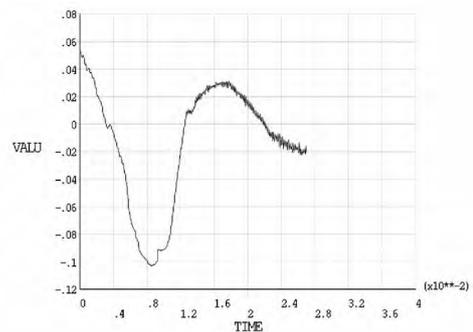


图 6 低电压穿越工况下 A 点磁场强度

#### 3) 故障恢复正常状态过程中双馈风力发电机内部电磁场

选取从电网故障恢复到电机恢复正常运行状态的 0.27~0.31 s 这个时间段,计算电机内部电磁场动态变化的数据。图 7 是 A 点磁场强度随时间的变化曲线,由图 7 可知故障结束后双馈风力发电机气隙磁感应强度随时间的变化是正弦变化,已经恢复正常。

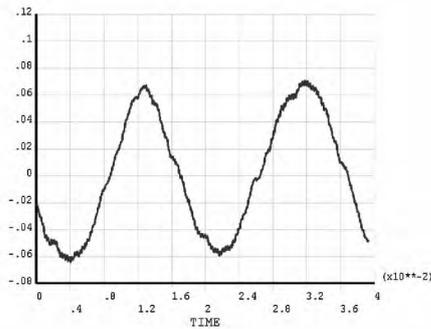


图 7 正常状态恢复过程 A 点磁场强度

表 2 双馈风力发电机在不同运行状态下的磁感应强度

状态	最小磁感应强度	最大磁感应强度	幅值
正常运行状态	-0.062	0.065	0.127
故障运行状态	-0.002	0.003	0.005
尖峰电流状态	-0.100	0.065	0.165

可以看出在电网发生对称三相短路故障时电机内部的磁场并未发生突变,而是平缓的变化。同时产生尖峰电流的时间段内电网的磁场脉振是正常状态的 1.3 倍,而故障状态时的脉振则是正常状态的 0.003 9 倍。电流的变化会最终作用在电机内部,但是并不是瞬间发生,是一个渐进的过程。电网在三相平衡故障时会使电机内部磁隙畸变,但是当电机在故障状态运行时,电机内部的磁场仍然是随着电机电流的变化呈现正弦变化状态。当电机从故障恢复后电机内部电磁场会恢复到正常状态。

## 4 结 论

通过 ANSYS 有限元分析软件建立了 2.5 MW 双馈风力发电机二维有限元实体模型,并对其在低压穿越整个工况下的电磁场进行了计算和仿真。通过计算和仿真可以得到以下结论:

1) 正常状态下的电机内部的气隙磁感应强度是按照正弦状态分布的,同时气隙内任意一点的磁感应强度也随着时间的变化呈现出正弦状态。

2) 在电网发生对称三相短路的故障状态下电机内部气隙上的磁感应强度最终会因为电网电压的降低而降低。在故障发生的瞬间电机内部的磁场强度并未发生突变,并且随着时间的推移而降低,最终达到稳定状态。

3) 在故障结束后,电机恢复到正常状态的情况下,电机内部的磁感应强度基本恢复到正常状态。

### 参考文献

[1] 胡家兵,贺益康. 双馈风力发电系统的低压穿越运行

与控制[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(2): 49-52.

[2] 李晶,宋家骅,王伟胜. 大型变速恒频风力发电机组建模与仿真[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(6): 100-105.

[3] 段晓田,张新燕,张俊,等. 基于有限元法的双馈风力发电机电磁场计算与分析[J]. 电网技术, 2012, 36(2): 231-236.

[4] 王金行,赵生传,王泽众,等. PSCAD/EMTDC 环境下双馈风力发电机组的建模与仿真[J]. 可再生能源, 2012, 30(3): 22-26.

[5] 宋国强,张新燕,王维庆,等. 1.5 MW 双馈风力发电机电磁场和温度场分析[J]. 电源技术, 2015, 39(5): 1053-1056.

[6] 朱晓东,石磊,陈宁,等. 考虑 Crowbar 阻值和退出时间的双馈风电机组低电压穿越[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(18): 84-89.

[7] 王伟,孙明冬,朱晓东. 双馈式风力发电机低电压穿越技术分析[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(23): 84-89.

[8] 梁亮,李建林,许洪华. 双馈感应式风力发电系统低电压穿越研究[J]. 电力电子技术, 2008, 42(3): 19-21.

[9] 顾卓远,汤涌,刘文焯,等. 双馈风力发电机组的电磁暂态-机电暂态混合仿真研究[J]. 电网技术, 2015, 39(3): 615-620.

[10] 訾鹏,周孝信,安宁,等. 提高双馈式风力发电机电磁暂态模型 crowbar 保护仿真精度的方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(6): 1322-1328.

[11] 王红,梁俊霞,胡佳琳. 基于  $\alpha\beta$  坐标系模型的双馈风力发电机参数辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(20): 81-85.

[12] 徐殿国,王伟,陈宁. 基于撬棒保护的双馈电机风电场低电压穿越动态特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(22): 29-36.

[13] Ouyang J, Xiong X. Dynamic Behavior of the Excitation Circuit of a Doubly-fed Induction Generator under a Symmetrical Voltage Drop [J]. Renewable Energy, 2014, 71(11): 629-638.

[14] Alberdi M, Amundarain M, Garrido A, et al. Neural Control for Voltage Dips Ride-through of Oscillating Water Column-based Wave Energy Converter Equipped with Doubly-fed Induction Generator [J]. Renewable Energy, 2012, 48(6): 16-26.

[15] Patin N, Monmasson E, Louis J P. Modeling and Control of a Cascaded Doubly-fed Induction Generator Based on Dynamical Equivalent Circuits [J]. Mathematics & Computers in Simulation, 2010, 81(2): 225-238.

[16] Junyent-Ferré A, Gomis-Bellmunt O, Sumper A, et al. Modeling and Control of the Doubly Fed Induction Generator Wind Turbine [J]. Simulation Modelling Practice & Theory, 2010, 18(9): 1365-1381.

[17] Resmi, R, C. Arun Agoram, P. Adithya, et al. Design and Analysis of Brushless Doubly Fed Induction Generator. [J] Procedia Technology, 2015 (21): 604-610.

### 作者简介:

张新燕(1964),博士、教授、硕士生导师,从事洁净能源的科研工作。

(收稿日期:2016-01-18)