

双馈异步风力发电机的并网方式研究及仿真分析

郭大伟, 王维庆, 张新燕

(新疆大学电气工程学院 新疆 乌鲁木齐 830047)

摘要: 分析并推导了双馈风力发电机的数学模型,对常见的并网方式做了分析和比较。基于 PSCAD/EMTDC 仿真平台搭建了 DFIG 的软并网方式模型,仿真了电机故障及风速变化时电机及电网侧所产生的冲击电流的大小。验证了软并网方式能够很好地抑制并网运行时冲击电流对大电网的影响。

关键词: 双馈发电机; PSCAD 仿真; 软并网; 冲击电流

Abstract: The mathematical model of doubly-fed induction generator (DFIG) is analyzed and derived. The common grid integration methods are also analyzed and compared. The soft grid-connection model of DFIG is established in the PSCAD/EMTDC environment. The impulse current generated at the generator side and the grid side is simulated when there is generator fault and the change of wind velocity, which proves that the proposed mode can well suppress the impact of impulse current on the big grid when DFIG is connected to the big grid.

Key words: doubly-fed induction generator (DFIG); PSCAD simulation; soft grid-connection; impulse current

中图分类号: TM714 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013)01-0007-05

0 引言

风能作为一种安全、清洁、丰富的可持续能源,已受到了广泛的重视和开发,目前世界装机总量已经超过 25 GW。双馈风力发电机(doubly-fed induction generator, DFIG)的定子直接与电网连接,并通过交-直-交转子励磁变频器控制转子电流的频率、相位、幅值来间接调节定子侧的输出功率,实现发电机的有功和无功功率解耦控制,改善功率因数,系统动态性能良好^[1]。

在 PSCAD/EMTDC 环境下建立了 DFIG 及相应的控制系统仿真模型,并模拟仿真了 DFIG 的软并网过程,对软并网仿真结果进行了分析和研究。

1 发电机的并网方式

1.1 并网的理论条件

发电机并网时,为减小冲击电流及机械摩擦,一般要求发电机端电压的相序、幅值、频率、相位角要与电网连接端的值相等^[2]。并网时其电压相量分析如图 1 所示。

并网前断路器两端发电机侧和电网侧的电压分别为^[3]

$$u_M = U_M \sin(\omega_M t + \delta_M) \quad (1)$$

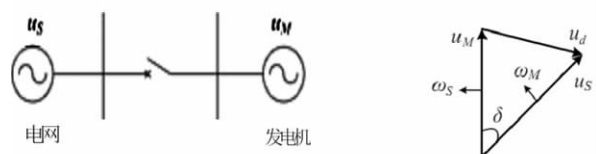


图 1 发电机并网示意图及相量分析

$$u_S = U_S \sin(\omega_S t + \delta_S) \quad (2)$$

发电机与电网之间的电压差 u_d 为

$$u_d = u_M - u_S \quad (3)$$

合闸的理想条件是

- 1) 两电压幅值相等,即 $U_M = U_S$;
- 2) 两电压角频率相等,即 $\omega_M = \omega_S$;
- 3) 合闸瞬间的相角差为零,即 $\delta = 0^\circ$ 。

1.2 常见并网方式

1.2.1 直接并网

当发电机的幅频相值跟大电网相等时,即可通过开关或断路器直接跟主配网连接。这种并网方式投资省,结构最简单,但是灵活性不足,可靠性较差。在并网瞬间就可能存在三相短路现象,供电系统将受到 6~8 倍的发电机额定电流的冲击,系统电压瞬时严重下降。因此这种并网方法只适用于发电机容量在百千瓦级以下而电网容量较大的情况。

1.2.2 降压并网

这种并网方法是在异步发电机与电网之间串接

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51010105064 2011211A016, B5100122)

电阻或电抗器或者接入自耦变压器,以达到降低并网合闸瞬间冲击电流幅值及电网电压下降的幅度。因为电阻、电抗器等元件要消耗功率,在发电机并入电网以后,进入稳定运行状态时,必须将其切除,这种并网方法适用于百千瓦级以上、容量较大的机组,显而易见这种并网方式经济性比较差。中国引进的 200 kW 异步发电机组,就是采用这种并网方式,并网时发电机每相绕组与电网之间皆串接有大功率电阻。

1.2.3 自动准同期装置并网^[3]

发电机与大电网并网运行时,有一个重要的操作过程——同期并列操作,因此,可通过自动准同期并网装置进行并网。发电机的准同期判定条件包括电压差、频率差和相角差,发电机的差频并网也就是要在同期点两侧电压和频率接近时,通过预测两侧相角差为零的时刻来完成并列。发电机在孤岛模式下平稳运行,发出同期命令,当电压差、频率差不合格时,对发电机实现均频、均压控制,快速促成准同期条件的成立,加快自动并网的进程。当发电机与公用电网之间的电压差和频率差满足准同期条件时,自动提前发出合闸脉冲,使发电机和大电网在相位差满足相位差条件的瞬间并网。

1.2.4 捕捉式准同步快速并网

捕捉式准同步快速并网技术的工作原理是将常规的整步并网方式改为在频率变化中捕捉同步点的方法进行准同步快速并网。该技术可不丢失同期机,准同步并网工作准确、快速可靠,既能实现几乎无冲击准同步并网,又能很好地解决并网冲击与造价的矛盾,非常适用于发电机的并网操作^[4]。

1.2.5 晶闸管软并网

此种方法在 HVDC 中已得到广泛的应用,技术日趋完善。在发电机与大电网之间串入晶闸管控制系统,目的是通过控制晶闸管的导通角,将发电机并网瞬间产生的冲击电流限制在规定的范围内(一般为 1.5~2 倍额定电流以下),从而得到一个平滑的并网暂态过程。

前 4 种并网方式习惯上称为硬并网,因并网时伴随有冲击电流的可能性及潮流控制的困难性,这里提出基于电压源换流器(VSC)的软并网方式。

2 基于 PSCAD/EMTDC 的 DFIG 并网仿真

本例在 PSCAD / EMTDC 环境下,以基于 VSC

的并网方式搭建 DFIG 并网的模型。根据 DFIG 定转子的控制特性,整个系统采用电流闭环矢量控制。由检测到的电网三相电压,经变换得到定子磁链的相角,和转子电流一起经坐标变换和 PWM 调制产生驱动信号。DFIG 的数学模型及控制模块分别叙述如下。

2.1 双馈异步电机的数学模型

如果假设发电机为三相对称理想电机,不计零轴分量,以定子旋转磁场坐标系 $[d_c, q_c, 0]$ 为参考, d_c 轴超前轴 90° ,同时定义发电机吸收有功功率为正,则可得 DFIG 的数学模型为^[5]

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} E_d' \\ E_q' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{rd}' \\ U_{rq}' \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1/T_0 & -s \\ s & 1/T_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_d' \\ E_q' \end{bmatrix} + \frac{1}{T_0} \begin{bmatrix} 0 & x' - x \\ x - x' & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} E_d' \\ E_q' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{sd}' \\ U_{sq}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s & -x' \\ x' & r_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中 E_d' 、 E_q' 分别为 DFIG 暂态电势的 d_c 和 q_c 轴分量; U_{rd}' 、 U_{rq}' 分别为转子绕组虚拟电压的两轴分量; T_0 为转子绕组的短路时间常数; s 为转差率; x 是定子漏抗和激磁电抗之和; x' 为发电机暂态电抗; I_{sd} 、 I_{sq} 为定子电流的两轴分量; U_{sd}' 、 U_{sq}' 为定子电压的两轴分量; r_s 为定子绕组电阻。

其中,电压方程为

$$\left. \begin{aligned} u_{ds} &= p\psi_{ds} - \omega_1 \psi_{qs} - R_s i_{ds} \\ u_{qs} &= p\psi_{qs} + \omega_1 \psi_{ds} - R_s i_{qs} \\ u_{dr} &= p\psi_{dr} - \omega_s \psi_{qr} + R_r i_{dr} \\ u_{qr} &= p\psi_{qr} + \omega_s \psi_{dr} + R_r i_{qr} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

磁链方程为

$$\left. \begin{aligned} \psi_{ds} &= -L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \\ \psi_{qs} &= -L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \\ \psi_{dr} &= L_r i_{dr} - L_m i_{ds} \\ \psi_{qr} &= L_r i_{qr} - L_m i_{qs} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

电磁转矩和运动方程为

$$\left. \begin{aligned} p\omega_r &= (T_m - T_e) / J \\ T_e &= \frac{3}{2} N_p L_m (i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr}) \\ \omega_s &= s\omega_1 = \omega_1 - \omega_r \\ \frac{d\theta_r}{dt} &= \omega_r \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中 s, r 为定子量和转子量; L_s, L_r, L_m 为定子自感、转子自感和定转子互感; $\omega_1, \omega_r, \omega_s$ 为电机同步角速度、转子角速度和转差角速度; T_e 为风力发电机电磁转矩; J 为发电机转动惯量; T_m 为风力发电机输入转矩; N_p 为极对数; θ_r 为定子磁链相角; p 为微分算子 [6]。

2.2 转子侧功率变换器矢量控制模型

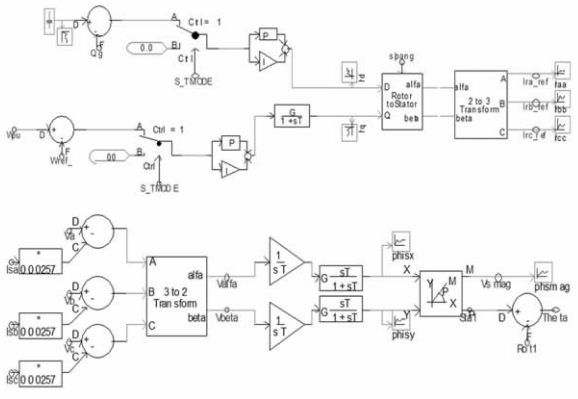


图 2 基于 PSCAD 的转子侧变换器矢量控制模型

由于定子、转子保持同步才能形成稳定的电磁转矩,所以转子电流的同步信号 θ 是由定子磁链位置角 Sta1 减去转子磁链位置角 Rot1 得到的, Rot1 是通过发电机内部输出变量获取的。利用基于电流滞环控制的 PWM 技术控制机侧换流器,使转子电流等于参考电流值,从而完成对定子侧无功功率和发电机转速的独立控制。

2.3 网侧功率变换器矢量控制模型

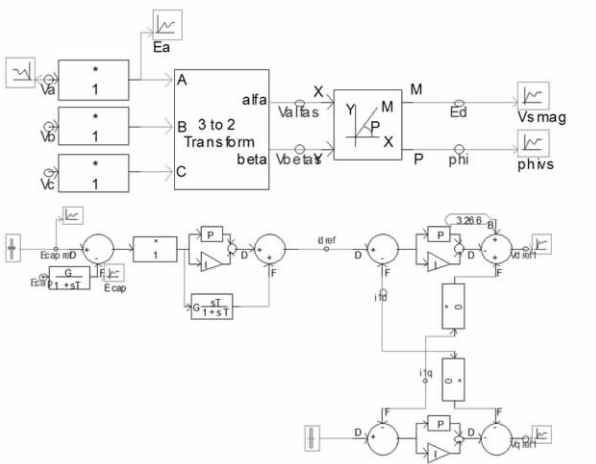


图 3 基于 PSCAD 的网侧变换器矢量控制模型

网侧变换器采用电网电压定向的矢量控制,并采用前馈解耦控制以实现直流电压与无功功率的独立控制。矢量控制的输出为网侧变换器 dq 轴电压参考值,经过坐标变换输出三相电压给定值,给定电

压值与三角波发生器的输出比较得到网侧变换器 IGBT 的控制信号 [7]。利用 SPWM 技术控制换流器,即将调制信号与三角波载波相比较获得触发信号控制网侧换流器,从而实现直流电压和无功功率的独立控制。在图 3 中,信号 i_{dref} 以 $i_d - i_q$ 解耦控制的电压误差为驱动信号。

2.4 电压源换流器(VSC)并网装置

在 PSCAD 环境下,VSC 的模型如图 4。

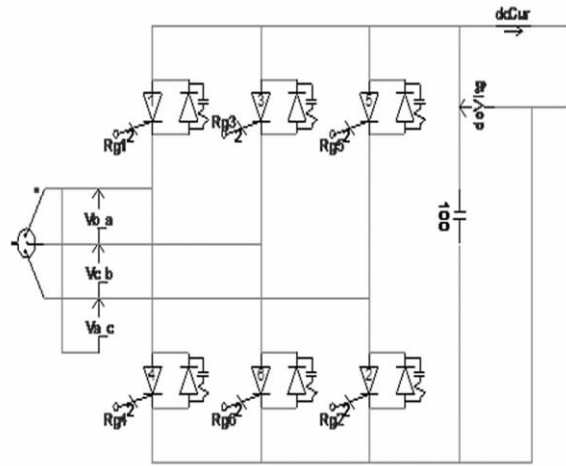


图 4 VSC 系统整流侧模型

图 4 中为 VSC 装置的整流侧模型,逆变侧为其对称装置。VSC 的门极控制脉冲采用 SPWM 控制方式 [8],即以与系统电压同相位的正弦波为调制波,以一频率为正弦波频率的整数倍的三角波为载波进行调制,原理如图 5 所示。

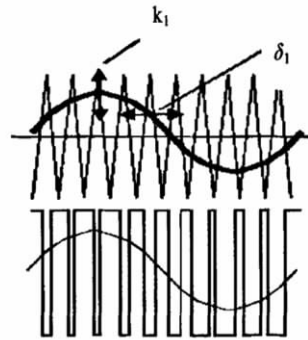


图 5 SPWM 控制原理图

1) 正弦波产生模块

PLL 为三相锁相环,它跟踪输入信号并输出与输入信号同步变化的相角。按由控制规则决定的控制相位角及变压器的接法对 PLL 的输出相位进行移位,得到正弦波的相角。图 6 中,脉宽调制正弦参考信号由信号“mr”控制,其相位由信号“shift”控制。RefRon 和 RefRoff 是用来控制 IGBT 导通和关断时间的调制信号,彼此相差 180°。

2) 三角载波产生模块

通过锁相环得到输入信号的同步相位后, 乘上希望的载波次数, 被 360 除, 取余, 并把得到的值进行变换。TrgRon 是用从 [0, 90, 270, 360] 到 [0, 1, -1, 0] 对应的方法得到的三角载波; TrgRoff 是用从 [0, 90, 270, 360] 到 [0, -1, 1, 0] 对应的方法得到的三角载波^[9]。

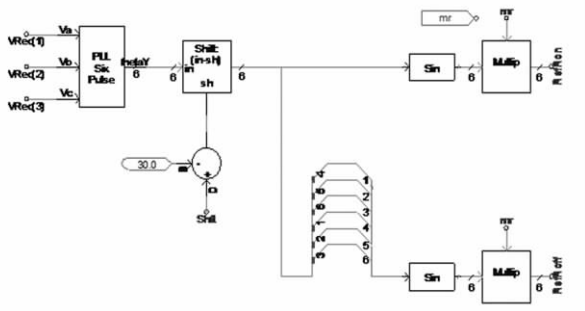


图6 正弦波产生模块

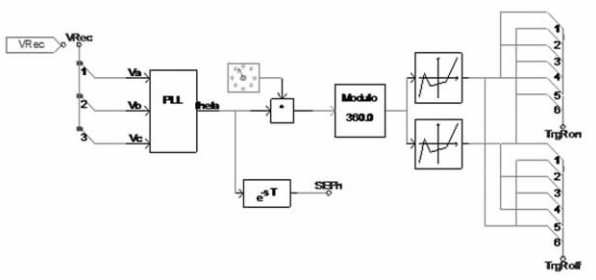


图7 三角载波产生模块

3 仿真分析

仿真中以最佳叶尖速比控制为例, 由贝兹理论可得, 风机从风能中捕获的机械功率为^[9]

$$p = 0.5 \cdot C_p \cdot \pi \cdot R^2 \cdot \rho \cdot V_w^3 \quad (9)$$

其中 ρ 为空气密度; R 为叶片半径; V_w 为风速; C_p 为风力机转换效率系数, 调节 C_p 可以调节捕获的风能, 且 C_p 为叶尖速比 λ 和桨矩角 β 的函数, 因此可以用以下方程式表达。

$$C_p = 0.22 \cdot (116/\lambda_i - 0.4\beta - 5) \cdot \exp(-12.5\lambda_i) \quad (10)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (11)$$

其中 $\lambda = W_T \cdot R / V_w$, V_w 为风机的转速; λ_i 为过程变量^[10]。其中, 大电网的电压等级为 10 kV, DFIG 的主要参数如表 1 所示。

1) 在 0.2 s 时设置电动机扰动故障, 在发电机侧、电网侧及直流侧分别测得波形, 如图 8a、b、c。

2) 风速 0.5 s 时由 12 m/s 突变为 20 m/s 时仿真波形, 如图 8d、e、f。

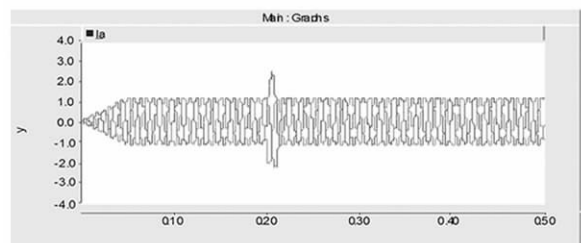
表1 DFIG 主要参数^[11]

参数	风力机额定功率	电机额定功率	额定电压	额定风速
参考数值	1 MW	0.9 MW	0.69 kV	12 m/s

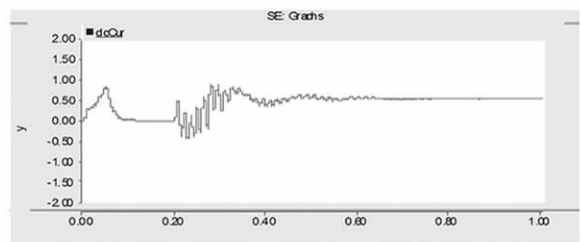
续表 1

参数	励磁电抗	定子电阻	定子漏抗	转子电阻	转子漏抗
参考数值	4.2 p. u.	0.005 4 p. u.	0.1 p. u.	0.006 07 p. u.	0.12 p. u.

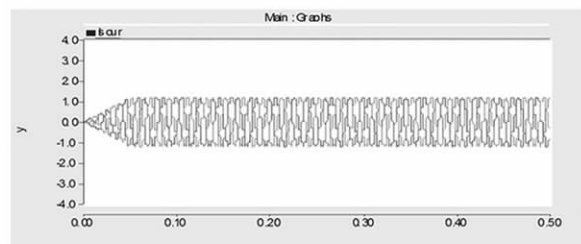
通过图 8a 的仿真结果可以看出, 在 0.2 s 时发电机端扰动故障产生冲击电流, 经 VSC 的整流逆变作用, 到大电网侧时, 由图 8c 可以看出其电流幅值基本维持不变, 冲击电流的作用很小。图 8c 中, 流经 VSC 的电流在 0.2 s 时发生震荡, 但很快趋向平稳。在 0.5 s 时, 风速由 12 m/s 突变为 20 m/s, 此时因为风力机的风能捕获控制系统, 输出电磁转矩基本维持不变。由图 8d 和图 8f 可以看出, 产生的冲击电流较直接并网时(冲击电流最高可达额定电流的 7 倍)要小得多, 到大电网侧时, 基本没有受到冲击电流的影响, 过渡较平稳。



a 发电机侧电流仿真波形



b 整流直流侧电流仿真波形



c 大电网侧电流仿真波形

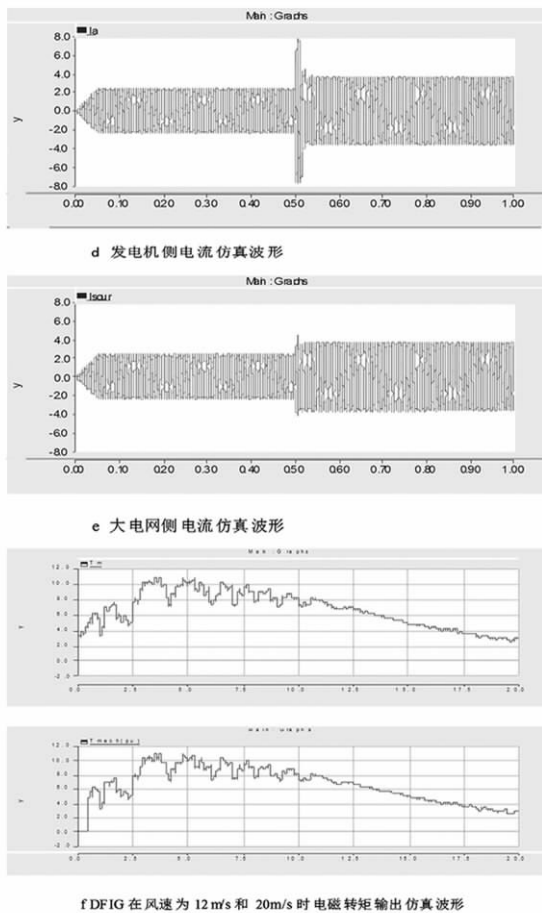


图8 PSCAD 仿真波形

4 结 论

在 PSCAD 环境下,通过与发电机侧产生的冲击电流进行比较可知,经 VSC 并网装置可以有效地抑制并网瞬间对大电网的电流冲击,把冲击电流限制在比较小的范围内,保护了发电机自身设备的安全和电网的正常运行。目前在轻型直流输电领域,VSC 已经得到了实践应用,运行稳定,技术成熟。为了更好地平滑并网,还应注意:为减少软并网持续的时间与冲击电流的峰值,机组的并网转速应随风速调节;晶闸管导通速度不易过快,否则可能会引起并网电流幅值的跃变上升。

参考文献

- [1] 雷亚洲, Gordon Lightbody. 国外风力发电导则及动态模型简介[J]. 电网技术, 2005, 25(12): 27-32.
- [2] 辜承林, 等. 电机学[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2005.
- [3] Tamura J, Ueno M. Transient Stability Simulation of Power System Including Wind Generator by PSCAD / EMTDC [J]. IEEE Porto Power 2001(14): 10-13.
- [4] 丁明, 李宾宾, 韩平平. 双馈风电机组运行方式对系统电压稳定性的影响[J]. 电网技术, 2010, 34(10): 26-31.
- [5] 冯双磊, 赵海翔, 任普春, 等. 基于 PSCAD / EMTDC 的双馈式变速恒频风电机组动态模型仿真[J]. 电网技术, 2007, 31(17): 30-35.
- [6] AnayaLara O, Acha E. Modeling and Analysis of Custom Power Systems by PSCAD/EMTDC [J]. IEEE Trans. Power Delivery, 2002, 17(1): 266-272.
- [7] 冯双磊. 基于 PSCAD/EMTDC 的变速风电机组控制系统仿真研究[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2005.
- [8] 陆城. 变速恒频风力发电用双 PWM 变换器的协调控制[D]. 北京: 中国科学院, 2004.
- [9] 高阿龙. 基于 PSCAD 的变速恒频双馈风力发电系统建模与控制研究[D]. 南京: 河海大学, 2007.
- [10] 院海, 晁勤, 吐尔逊. 基于 PSCAD 的并网型风机建模及仿真[J]. 可再生能源, 2008, 26(2): 15-19.
- [11] 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.

作者简介:

郭大伟(1987), 男, 硕士研究生, 研究方向为风力发电及电力系统稳定控制;

王维庆(1959), 男, 教授, 博士研究生导师, 主要致力于风能利用技术的研究和应用, 主持完成了自治区级和国家级重点课题 5 项;

张新燕(1964), 女, 教授, 硕士研究生导师, 从事风力发电机组故障诊断方面的研究。

(收稿日期: 2012-10-09)

欢迎订阅 欢迎投稿