

变速恒频风电机组运行控制

舒进¹, 张保会¹, 李鹏¹, 汪成根¹, 程临燕¹, 薄志谦², A. KLIMEK², 褚云龙³

(1. 西安交通大学电气工程学院, 陕西省西安市 710049; 2. 阿海珙输配电电能自动化与信息公司, 英国斯塔福德郡 ST17 4LX; 3. 西北电网有限公司, 陕西省西安市 710049)

摘要: 在 PSCAD/EMTDC 下建立了双馈型感应变速风电机组动态模型, 基于该模型提出一种风电机组功率控制策略, 并分析了机组约束条件对控制策略的影响。该策略实现了无风速测量下的最大风能追踪, 并可以对风机捕获的功率进行控制, 使风电机组在风力限制范围内承担系统功率调节任务。对一台 2 MW 双馈型感应变速风电机组进行了仿真, 仿真结果表明控制方案在风速波动条件下能够准确、有效地对风电机组最大风能追踪, 并能对有功、无功功率按计划进行独立调节。

关键词: 变速恒频; 动态模型; 功率控制; 控制策略

中图分类号: TM614; TM76

0 引言

随着世界能源需求量的持续增大导致环境污染加重及环保压力加大, 越来越多的国家把发展电能的研究转向利用清洁的可再生能源。2006 年底, 世界风力发电总装机容量 74 223 MW, 新增装机容量 15 197 MW, 预计到 2020 年占世界总电力比例将达 12%。风力发电年增长达 35%, 在可再生能源行业中发展最快。通常使用的风力机组大致可分为 4 种类型^[1], 基于双馈型感应发电机 (DFIG) 的变速风电机组作为一种非常经济的变速恒频风力发电方案, 目前已经成为兆瓦级风力发电机组最普遍采用的形式。

为了最大限度地利用风能, 可实现最大风能追踪的变速恒频风力发电控制技术成为研究热点。由于风能的随机特性, 随着风电装机容量的不断增加, 仅对最大风能进行追踪产生的随机变化的功率无法满足电力系统功率实时平衡的运行要求^[2]。风电场应与常规发电方式一样承担系统频率、电压等调节任务。

本文在 PSCAD/EMTDC 下建立了定子磁场定向 DFIG 变速风电机组动态模型, 通过对电磁转矩的间接转速控制调节风机转速, 以实现单机最大功率追踪。针对风电接入系统运行要求, 在功率追踪的基础上实现给定功率控制策略, 并就风电机组定、转子及风机容量约束对机组调节能力产生的影响进

行了分析。该策略使无风速检测风力发电系统在可用风力范围内实现对有功、无功功率的有效控制, 从而可承担系统功率调节任务。

1 DFIG 风电机组

1.1 DFIG 风电机组总体结构

基于 DFIG 的变速风电系统总体可分为 5 部分模型: 风速模型、气动模型、机械传动模型、双馈感应发电机及各种控制系统。系统总体结构如图 1 所示。

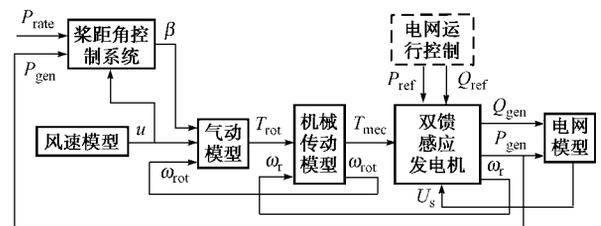


图 1 DFIG 风电机组总体结构
Fig. 1 Overall structure of DFIG-based wind generator

为了描述风速的随机性和间歇性特点, 风速 u 由基本风、渐变风、随机风叠加而成。气动模型模拟风力机桨叶将风能转变为机械能, 忽略动态迟滞效应, 将风力机捕获机械转矩 T_{rot} 表达为解析形式。机械部分包括低速轴、齿轮箱、高速轴在内的传动环节, 经齿轮箱升速后转矩变为 T_{mec} 。采用单质量块低速轴和理想齿轮箱, 传动部分可用一阶惯性环节描述。电网运行控制部分指定机组有功和无功发电功率分别为 P_{ref} 和 Q_{ref} 。桨距角控制系统根据发电功率 P_{gen} 和风速对桨距角进行调节。

收稿日期: 2008-04-16; 修回日期: 2008-06-04。
国家高技术研究发展计划 (863 计划) 资助项目 (2006AA05Z247)。

1.2 DFIG模型

DFIG转子运动方程为:

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = T_{mec} - T_e \quad (1)$$

式中: T_{mec} 为机械转矩; T_e 为电磁转矩; ω_r 为转子角速度; J 为转动惯量。

DFIG 可实现电磁转矩与无功功率的解耦控制。M-T 坐标下 DFIG 模型为^[3-4]:

$$\begin{cases} \dot{U}_s = R_s \dot{I}_s + (j s + p) L_s \dot{I}_s + j s \dot{m} \\ \dot{U}_r = R_r \dot{I}_r + (j s + p) L_r \dot{I}_r + j s \dot{s} \dot{m} \\ T_e = \frac{L_m}{L_s} (\dot{m} \times I_r) \\ \dot{m} = L_m (\dot{I}_s + I_r) \end{cases} \quad (2)$$

式中: \dot{U}_s 和 \dot{U}_r 分别为定、转子电压相量; \dot{I}_s 和 \dot{I}_r 分别为定、转子电流相量; R_r 和 L_r 分别为折算到定子侧的转子电阻与漏感; R_s 和 L_s 分别为定子电阻和漏感; s 为同步速; m 为气隙磁链; \times 为叉乘符号; L_m 为励磁电感; s 为转差率; p 为微分算子。

忽略定子电阻,且认为无穷大电网电压恒定,则电磁转矩和无功功率为:

$$\begin{cases} T_e = \frac{L_m}{L_s} m_s i_{Tr} \\ Q = U_s i_{Ms} \end{cases} \quad (3)$$

式中: m_s 为定子磁链 M 轴分量; i_{Tr} 为转子电流 T 轴分量; i_{Ms} 为定子电流 M 轴分量; U_s 为机端电压幅值。

1.3 脉宽调制(PWM)交直交整流器

DFIG 通常使用 PWM 交直交整流器组驱动^[5]。转子侧变流器采用滞环 PWM 电流控制对 DFIG 实现交流励磁。网侧变流器采用具有电压外环和电流内环的双闭环控制。电流内环将由锁相环(PLL)产生的网侧电压同步信号延迟指定角度从而产生电流信号;同时,电压外环通过直流电压偏差产生网侧交流参考电流增益。

网侧变流器通过交流侧电流与电压偏移角控制网侧变流器无功。当 $\theta = 0$ 时,系统工作于单位功率因数状态。

1.4 桨距角控制系统

当风速大于额定风速时风机恒速运行,桨距角调节以维持捕获功率为额定功率。

桨距角调节系统有如下特点:机械调节时间常数较大,一般为 0.1 s;桨距角调节速度较慢,一般小于 0.2 rad/s;桨距角调节幅度有限。桨距角调节系统如图 2 所示,当风速大于额定风速时对桨距角进行调节。

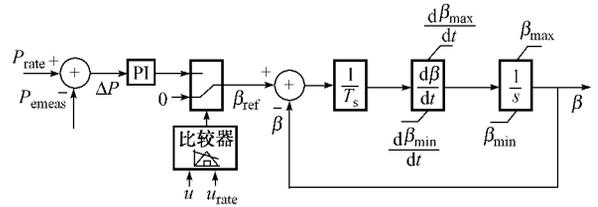


图 2 桨距角调节系统
Fig. 2 Pitch angle controller macro

2 DFIG 风电机组运行控制

2.1 DFIG 风电机组转速控制策略

当风速小于额定风速时,变速恒频风电机组在一定范围内通过控制转速捕获最大功率。转速控制策略分为直接转速控制和间接转速控制 2 类^[6-7]。在风速无法准确测量的条件下,直接转速控制策略无法实际应用于稳态运行控制。本文从转速平衡实质出发,使用间接转矩控制,通过控制 DFIG 电磁转矩不但能实现无风速测量条件下的最大风能追踪,而且可实现对捕获功率的有效控制。

2.1.1 最大风能追踪

由式(3)可知,调节 DFIG 转子励磁可直接控制其电磁转矩。按转速确定机组电磁转矩参考值,即 $T_{eref} = f(\omega_r)$,则可迫使 DFIG 运行于转速-转矩平面中不同的运行曲线 C_e 上。

如图 3 所示, C_{mec4} 和 C_{mec8} 分别对应风速为 4 m/s 和 8 m/s 时的风机转速-转矩曲线。

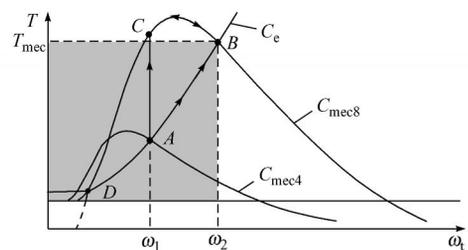


图 3 最大风能追踪
Fig. 3 Power optimization

以风速增加为例说明风能追踪机理。风速为 4 m/s 时机械转矩与电磁转矩平衡,转速稳定,风机和 DFIG 均稳定工作于 A 点,转子转速为 ω_1 。风速突然增加至 8 m/s,风机机械转矩增大,运行于 C_{mec8} 上 C 点。由于转子惯性,转速不能突变,DFIG 仍工作于 A 点。此时机械转矩大于电磁转矩,转速开始增加,风机工作点沿 C_e 向 B 点移动,而 DFIG 工作点沿 C_{mec4} 移动,直至机械转矩与电磁转矩再次平衡,系统稳定工作于 B 点,此时转速为 ω_2 。

对高速轴,风机捕获功率为 $P_{mec} = T_{mec} \omega_2$,平衡点 B 处有 $T_{mec} = T_e$,故图中矩形阴影的面积为该状

态下风机捕获功率。若该矩形为 C_{mec8} 上所有点中面积最大者,则 B 点为风速 8 m/s 的最优运行点,相应 ω_2 为最优转速。对于某一确定的风速仅有唯一最佳运行点。若使 DFIG 运行于各风速下最优运行点形成的曲线 C_e 上,则可实现最大风能追踪。

图 3 中 A 点、 B 点均为系统可以稳定运行的状态点。但对 C_e 上 D 点左边的点,若风速为 8 m/s ,风机自 $\omega_r = 0$ 启动,电磁转矩大于机械转矩,转速反而下降,系统无法稳定运行于 D 点。修改始端为图中虚线即可实现风速 8 m/s 以下稳定运行。

对同一型号风电机组,通过测试获得最优运行曲线 $T_{opt} = f(\omega_r)$,并事先将其存储在控制器中。实际运行时,无需风速测量,仅由当前转速查找最优运行曲线控制电磁转矩,即可实现最大风能追踪。

2.1.2 直接功率控制

仅从机组运行经济角度考虑,最优运行方式为在变速运行范围内捕获最大功率。这种运行方式下风电机组功率随风速不断变化,不利于电网安全稳定运行,这就要求其功率能够根据需要进行调节,使风电机组在可用风力限制范围内与常规发电方式一样承担系统有功调节任务。

直接功率控制基于以下 2 个策略:

- 1) 若指定发电功率超过当前风速下最大功率,则风机按最优运行方式运行。
- 2) 若指定发电功率低于当前风速下最大功率,则风机捕获指定功率。

该策略实际上是最大功率追踪与恒功率控制两者的组合控制策略。

直接功率控制可以表示为:

$$T_{ref} = g(\omega_r) = \begin{cases} T_{opt} = f(\omega_r) & \omega_r < \omega_{ref} \\ \frac{P_{ref}}{\omega_r} & \omega_r > \omega_{ref} \end{cases} \quad (4)$$

式中: T_{ref} 为控制器输出电磁转矩参考值; $g(\omega_r)$ 为控制函数; T_{opt} 为最优运行电磁转矩; P_{ref} 为指定发电功率; ω_r 为转子转速; $T_{opt} = f(\omega_r)$ 为最优运行曲线; ω_{ref} 为参考功率对应的最优转速。

ω_{ref} 根据电网给定发电功率由以下方程求解:

$$P_{ref} = T_{opt} \omega_{ref} = f(\omega_{ref}) \omega_{ref} = h(\omega_{ref}) \quad (5)$$

为避免求解方程,实际运行时,可将曲线 $P_{ref} = h(\omega_{ref})$ 存储在控制器中。根据给定 P_{ref} 反查曲线得到 ω_{ref} ,从而确定式(4)中的 $g(\omega_r)$,根据当前转速控制 T_{ref} ,即可实现对风机功率的控制。

图 4 中分别给出风速为 3 m/s 、 5 m/s 、 6 m/s 对应的机械转矩特性。直接功率控制原理如下。指定发电功率 0.2 (标么值),此时 $\omega_{ref} = \omega_{ref1}$ 。初始风速为 3 m/s ,其最大功率小于 0.2 ,则机械转矩特性曲

线与运行曲线最优运行段交于稳定运行点 A ,转速 $\omega_r < \omega_{ref1}$ 。若风速上升至 5 m/s ,最大功率大于 0.2 ,转速上升超过 ω_{ref1} ,则运行点变为恒功率运行段上 B 点,机组有功维持在 0.2 。若指定发电功率上升至 1.02 ,则运行曲线变化,此时 $\omega_{ref} = \omega_{ref2}$ 。风速 5 m/s 的最优功率小于 1.02 ,运行点变为最优运行点 C 。风速 6 m/s 的最优功率大于 1.02 ,机组运行于恒功率点 D 。

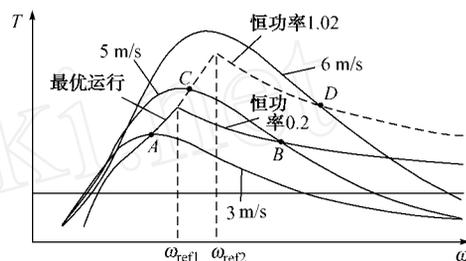


图 4 直接功率控制
Fig. 4 Direct power control

与使用桨距角进行功率控制不同,直接功率控制不受机械调节的一系列约束,可对风机捕获功率频繁连续地进行调节。

2.2 DFIG 风电机组运行区域

使用功率控制的 DFIG 风电机组在可用风力限制范围内能与常规发电方式一样承担系统有功调节任务。系统功率不再是随机变量,而仅是一个具有随机上限的可控量。实际机组的调节范围受转子变流器容量、定子额定容量、风机额定功率等多种因素限制,这些均决定了机组可控范围。

2.2.1 DFIG 风电机组稳态运行关系

图 5 综合表示了 DFIG 风电机组次同步运行机械功率与电磁功率的关系。

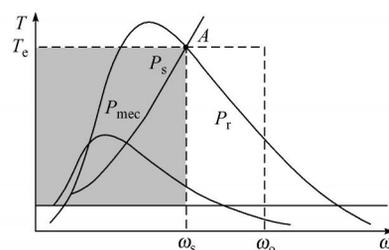


图 5 DFIG 风电机组稳态运行关系
Fig. 5 Steady-state relationship of DFIG

风机捕获机械功率可表示为 $P_{mec} = T_{mec} \omega_r$,对稳定运行点有 $T_{mec} = T_e$ 。忽略机组损耗,图中阴影面积为风机捕获机械功率,即 DFIG 定、转子总电磁功率。转子侧功率 $P_r = T_e (\omega_s - \omega_r)$ (功率正向为由电网到转子)为阴影右侧矩形面积。定子侧电磁功率可表示为 $P_e = T_e \omega_s$,为图中两矩形面积之和。

2.2.2 DFIG 风电机组有功功率运行限制

首先仅考虑风电机组对有功功率的约束,其限制因素大致可分为以下 3 类:

1) 转子变流器容量限制:转子变流器容量由变流器最大电流决定。仅考虑有功功率对转子变流器电流的影响。根据异步电机基本关系,转子侧通过功率为 $P_r = (1 - \gamma) T_e$ (功率正向为由电网到转子)。若双馈机转子变流器容量为风电机组额定功率的 30%,则 $|P_r| = |T(\gamma - 1)| < 0.3$ 。

2) 定子容量限制:定子侧功率 $P_s = T_e \omega$ 。若 DFIG 定子容量为风电机组额定功率的 120%,则 $P_s < 1.2$ 。

3) 风机额定功率限制:风机捕获机械功率应小于风机额定功率,即有 $P_{mec} = T_{mec} \omega < P_{rate} = 1$ 。其中, T_{mec} 为高速轴机械转矩; ω 为转子转速; P_{rate} 为风机额定机械功率。

图 6 给出了转速-转矩平面中双馈风电系统运行极限。图中阴影为风机工作的越限区域,应避免运行在该区域内。

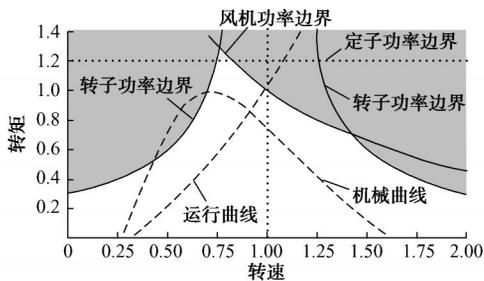


图 6 DFIG 运行区域
Fig. 6 DFIG operation limits

2.2.3 DFIG 风电机组有功与无功功率限制关系

网侧变流器使用单位功率因数运行,风电机组无功等于 DFIG 定子无功,其极限受机组定子有功(电磁转矩)的影响。

1) 转子变流器最大电流限制:若转子变流器最大电流为 I_{rmax} ,则机组无功极限与定子有功关系为:

$$P_s + j \left[Q_{lim} + \frac{U_s^2}{X_m} \right] = \frac{X_m U_s}{X_s} i_{rmax} \quad (6)$$

式中: Q_{lim} 为无功极限; X_m 为励磁电抗; X_s 为定子电抗; U_s 为机端电压; P_s 为机组定子有功。

2) 定子容量(最大电流)限制:若定子额定容量为 S_{rate} ,则定子侧无功极限与有功关系为:

$$P_s^2 + Q_{lim}^2 = S_{rate}^2 \quad (7)$$

双馈机进相运行吸收无功的静态稳定区域很大,故无功极限仅由热稳极限确定。

风电机组有功功率在额定值内变化时,机组发出、吸收无功功率极限由图 7 中阴影区域确定。随

着定子侧有功增加,风机无功调节范围缩小。

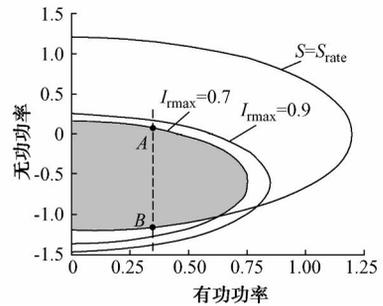


图 7 DFIG 无功功率极限
Fig. 7 DFIG reactive power limits

3 PSCAD/ EMTDC 仿真

在单机无穷大系统对额定功率为 2 MW 的 DFIG 风电机组动态模型进行了仿真。首先进行了风速变动下的最大功率追踪,然后通过直接功率控制,不调节桨距角控制风机捕获功率。

3.1 最大功率追踪与桨距角调节

初始风速为 4 m/s,转速按最优运行曲线稳定于该风速下最优转速约 0.4(标么值)。桨距角不调节,风机捕获最大功率约 90 kW。转子由电网侧吸收功率约 200 kW。

自 2 s 开始,风速上升至 11.35 m/s,转速随风速增加至超过同步速,并保持最优转速,转子开始向电网侧馈入功率,桨距角不调节,捕获功率维持最优。风速在 7.6 s 上升并超过额定风速直至 13 m/s,转速维持额定风速下最优转速。转子向电网侧馈入功率,桨距角在调节范围内进行调节,维持捕获功率约 2 MW。由于桨距角调节速度有限,功率有短时超过额定值。风速在 17 s 继续上升至 15 m/s,转速维持恒定。转子向电网侧馈入功率,桨距角调节达上限,输入功率略有增加。25 s 时,风速开始下降至 8 m/s,转速按最优转速调节。转子向电网侧馈入功率,桨距角调节以增加捕获功率,风速稳定在 8 m/s 时转速为该风速下最优转速约 0.8(标么值)。捕获功率约 700 kW。整个过程中无功恒定为 0.2 Mvar。最大功率追踪过程如图 8 所示。

3.2 直接功率控制

初始风速为 8 m/s。指定发电功率增加且小于 8 m/s 风速下风机最优功率 0.7 MW,风机捕获功率与参考值保持一致。

指定发电功率在 7 s 时增加超过 0.7 MW 至 0.8 MW,风机按最优运行捕获最大功率 0.7 MW。风速继续上升,风机最优功率大于 0.8 MW,机组运行于恒功率状态,捕获功率维持在 0.8 MW。直接功率控制过程如图 9 所示。

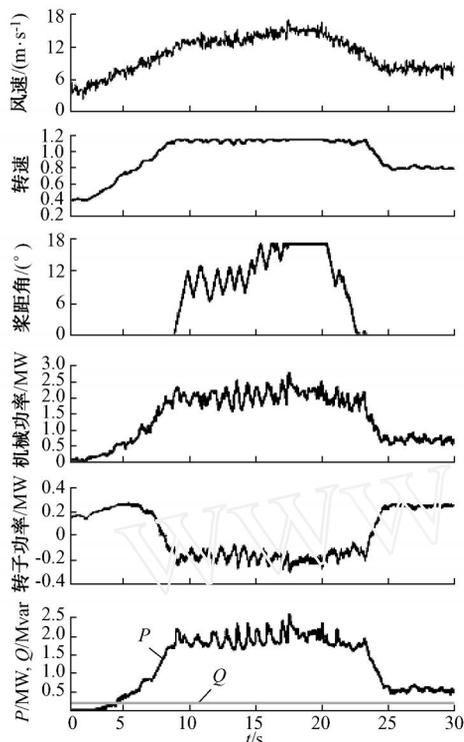


图8 最大功率追踪
Fig. 8 Power optimization

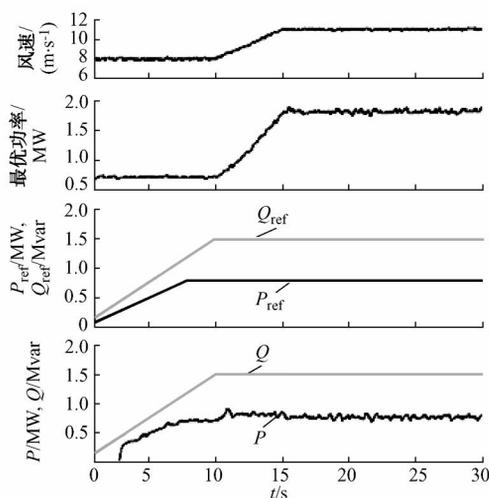


图9 直接功率控制
Fig. 9 Direct power control

由图9可以看到,最大功率跟踪控制下风机功率与风速保持一致;而直接功率控制使得风机功率在风力限制范围内与指定发电功率保持一致,实现了对风机功率的有效控制。

4 结语

磁场定向技术可实现DFIG有功与无功解耦控制。在无风速测量的条件下,仅由当前转速给定电磁转矩从而间接控制风电机组转速即可实现最大功

率追踪。由于最大功率随风速波动,对并网运行的风电机组而言并非最优控制方式。

同样,无需风速检测,仅通过转速测量,直接功率控制可使风电机组最大限度地符合指定发电功率,从而使机组能够承担有功调节任务。仿真结果表明:在风力限制范围内,直接功率控制可以有效调节风电机组功率。

风电机组有功调节受双馈机定、转子功率和风机功率等因素限制,这些限制可表示为转速-转矩平面上的运行区域。机组无功调节能力不仅受定、转子最大电流限制,而且受当前有功约束。机组有功出力确定后,可在相应范围内调节机组无功。

参考文献

- [1] CHEN Z. Characteristics of induction generators and power system stability. *Electrical Machines and Systems*, 2005, 27(2): 919-924.
- [2] 张保会. 分散式能源发电接入电力系统科学技术问题的研究. *电力自动化设备*, 2007, 27(12): 1-4.
ZHANG Baohui. On connection of distributed energy generation to power system. *Electric Power Automation Equipment*, 2007, 27(12): 1-4.
- [3] 高景德,王祥珩,李发海. *交流电机及其系统的分析*. 北京:清华大学出版社, 2005.
- [4] 伍小杰,柴建云,王祥珩. 变速恒频双馈风力发电系统交流励磁综述. *电力系统自动化*, 2004, 28(23): 92-96.
WU Xiaojie, CHAI Jianyun, WANG Xiangheng. Overview of an excitation for variable speed constant frequency double fed wind power generator systems. *Automation of Electric Power Systems*, 2004, 28(23): 92-96.
- [5] 贺益康,郑康,潘再平,等. 交流励磁变速恒频风电系统运行研究. *电力系统自动化*, 2004, 28(13): 55-59.
HE Yikang, ZHENG Kang, PAN Zaiping, et al. Investigation on an AC excited variable-speed constant-frequency wind-power generation system. *Automation of Electric Power Systems*, 2004, 28(13): 55-59.
- [6] 叶杭冶. *风力发电机组的控制技术*. 北京:机械工业出版社, 2002.
- [7] 刘其辉,贺益康,赵仁德. 变速恒频风力发电系统最大风能追踪控制. *电力系统自动化*, 2003, 27(20): 62-67.
LIU Qihui, HE Yikang, ZHAO Rende. The maximal wind-energy tracing control of a variable-speed constant-frequency wind-power generation system. *Automation of Electric Power Systems*, 2003, 27(20): 62-67.

舒进(1983—),男,通信作者,博士研究生,主要研究方向:分布式电源。E-mail: staticwind.sj@gmail.com

张保会(1953—),男,教授,博士生导师,主要研究方向:电力系统继电保护、安全稳定控制和电力线通信。

李鹏(1982—),男,博士研究生,主要研究方向:分布式电源接入。

(下转第97页 continued on page 97)

SHEN Zhu, WANG Shimin, LUO Chengmu. Development of an electronic current transformer. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(18): 41-44.

邢立功(1967→),男,高级工程师,主要研究方向:电网继电保护整定计算。

黄毅(1965→),男,高级工程师,主要研究方向:电网

继电保护。

叶罕罕(1985→),男,学士,主要研究方向:机械工程及其自动化。

宗洪良(1970→),男,通信作者,硕士,高级工程师,主要研究方向:电力系统自动化及数字化变电站的应用。

E-mail: hlzong@wiscom.com.cn

Interface Between Electronic Instrument Transformer and Protection Equipment in Digital Substation

XING Ligong¹, HUANG Yi¹, YE Hanhan², ZONG Hongliang³, XU Ke⁴, GU Jian³, JIN Yong³
(1. Tianjin Electric Power Corporation, Tianjin 300010, China; 2. Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China; 3. Jiangsu Wiscom Technology Co. Ltd., Nanjing 211100, China;
4. Tianjin Electric Power Corporation Technology Center, Tianjin 300010, China)

Abstract: This paper introduces the coil arrangement of electronic instrument transformer and the reliability of protection equipment in traditional substation. Some questions about the pickup unit in condition of the internal fault of electronic instrument transformer and the interface between electronic instrument transformer and protection equipment are presented. Several interface schemes are proposed and compared.

Key words: digital substation; electronic instrument transformer; protection equipment; pickup unit; merging unit

(上接第 93 页 continued from page 93)

A Control Strategy on the Variable-speed Constant-frequency Wind Turbine

S HU Jin¹, ZHANG Baohui¹, LI Peng¹, WANG Chenggen¹, CHENG Linyan¹, BO Zhiqian²,
A. KLIMEK², CHU Yunlong³

(1. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. AREVA T&D Automation, Stafford ST17 4LX, UK;
3. North West Electric Power Corporation, Xi'an 710049, China)

Abstract: A variable-speed constant-frequency (VSCF) wind generator dynamic model is developed with PSCAD/EMTDC. Based on this model, a novel power control strategy is introduced considering various constraints imposed by wind turbine. The strategy makes it possible to capture maximum wind energy and control power outputs for wind turbines even without wind speed measurements. Therefore the wind turbines can participate system load dispatch under certain wind conditions. Simulation results on 2 MW wind turbine demonstrate maximum energy capture, independent active and reactive power control can be achieved by use of the strategy.

This work is supported by the National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (No. 2006AA05Z247).

Key words: variable-speed constant-frequency (VSCF); dynamic model; power control; control strategy

国家电网公司已将原国网南京自动化研究院和原国网武汉高压研究院重组整合为国网电力科学研究院。《电力系统自动化》、《高电压技术》、《水电自动化与大坝监测》均由国网电力科学研究院杂志社负责编辑出版,涵盖了电力系统及其自动化、高压输电、水利水电自动化、大坝安全监测等相关领域的全部专业范畴,形成了全面服务于电力行业、水利水电行业的系列化出版刊物。

欢迎投稿 欢迎刊登广告