

基于无源性理论的双馈风力发电机双 PWM 变换器协调控制

张先勇, 舒杰

(中国科学院广州能源研究所, 广东 广州 510640)

摘要: 交流励磁双馈风力发电系统在实现最大风能跟踪过程中, 转子侧功率变化频繁, 使得双 PWM 变换器中的直流母线电压波动剧烈。基于无源性理论提出了一种双 PWM 变换器的协调控制方案, 对双 PWM 变换器的转子侧和电网侧分别进行直接功率控制, 使其具有相同的动态响应特性; 在电容电压反馈控制的基础上引入功率前馈控制, 使电容两侧功率流动动态平衡, 以减少电容电压的波动。建立了双 PWM 变换器励磁的双馈风力发电系统的仿真模型, 仿真结果表明该协调控制策略极大地改善了直流母线电压的动态特性, 实现了最大风能跟踪, 并且降低了变换器中电容容量要求, 提高了风电系统的电能质量。

关键词: 风力发电; 双馈电机; 无源性; 双 PWM 变换器; 协调控制

Passivity-based co-operation control of dual PWM converters for doubly-fed wind power generator

ZHANG Xian-yong, SHU Jie

(Guangzhou Institute of Energy conversion, the Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China)

Abstract: During the maximum wind power capture of the doubly-fed wind power generator excited by the dual PWM converter, the power of the rotor windings varies frequently and fiercely, which leads to the voltage fluctuation of the DC bus. Direct power control of the rotor-side and the grid-side converters individually are suggested. A new passivity-based co-operation control strategy is put forward for the dual PWM converter, so the subsystem can have the same dynamic characteristics. Power forward control is introduced to the voltage feedback control of the capacitor, so the power flows of the two sides of the capacitor keep balanced, which alleviates the voltage variation of the capacitor. The simulation model is established for the doubly-fed wind power generation system excited by the dual PWM converter. Simulation results show that the control strategy can not only realize the maximum wind power capture, but also improve the dynamic voltage characteristics of the DC bus. The controller designed reduces the capacity requirement of the capacitor and enhances the electric quality of the system.

This work is supported by National Natural Science Foundation of Guangdong Province (No. 8451007006000934 and No. 8151007006000005).

Key words: wind power generation; doubly-fed generator; passivity; dual PWM converter; co-operation control

中图分类号: TM315 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)21-0184-05

0 引言

交流励磁双馈风力发电机组作为变速恒频风力发电的主流机型在国内得到了广泛应用, 实际运行经验表明控制系统仍然为主要薄弱环节之一。图 1 所示的双 PWM 变换器励磁的双馈风力发电系统中, 转子侧变换器用于双馈电机的励磁控制, 实现最大风能跟踪; 网侧变换器用于从电网获取转子侧所需的转差功率, 或者将转差功率馈入到电网。稳

定的母线电压是提高系统控制性能的有效途径, 由于风能的不确定性要求不断调整电机转速以实现最大风能捕获, 因此转差功率的变化频繁而且剧烈, 对直流母线扰动很大, 增加了网侧变换器的控制难度^[1-4]。

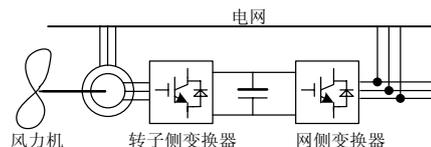


图 1 双 PWM 励磁的双馈风力发电机组

Fig.1 Doubly-fed induction wind power generator excited by dual PWM converter

基金项目: 广东省自然科学基金 (8451007006000934) (8151007006000005)

目前已有众多的学者对稳定直流母线电压开展了研究。文献[5]基于两侧静态功率平衡,改善了控制系统动态特性,取得了一定效果。文献[6-8]从动态功率平衡角度出发,分别应用非线性反馈精确线性化、主从式控制研究等进一步提高母线抗扰动能力的方案。但是控制系统结构复杂,实用性有待讨论。本文则从功率直接控制的角度出发,基于无源性控制理论,对双 PWM 变换器的转子侧变换器和网侧变换器分别进行功率控制率的设计,并通过参数选择使其具有相同的动态特性。然后基于双馈风力发电系统中的能量流动关系,在电容电压反馈控制环路中引入功率前馈控制,使得直流母线处的电容电压两侧的功率流动动态平衡,从而减轻电容电压的波动。由于采用无源性控制理论进行控制器设计,物理意义明确且具有较强的鲁棒性,另外结合了风电系统本身的能量流动特征,因此可望取得很好的系统控制效果和发电电能质量。最后对完整的风电系统进行了相关的仿真研究,以验证所提控制策略的有效性。

1 转子侧变换器的功率解耦控制

为了保证双馈感应式发电机定子功率绕组输出电能频率 ω_1 不变且为工频,应该按式(1)调节转子交流励磁电源的频率 ω_2 (为了简化分析,本文中电机极对数取为1)

$$\omega_1 = \omega_r + \omega_2 \quad (1)$$

其中, ω_r 为电机的机械转速,转差率 $s = \omega_2 / \omega_1$ 。

假设定子侧正方向规定按发电机惯例,正值电流产生负值磁链;转子侧正方向规定按电动机惯例,正值电流产生正值磁链。考虑到坐标变换前后磁势关系不变、功率不变原则,在同步坐标系下双馈电机数学模型可表示为^[9-10]:

$$\begin{bmatrix} u_{ds} \\ u_{qs} \\ u_{dr} \\ u_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -pL_s - r_s & \omega_1 L_s & pL_m & -\omega_1 L_m \\ -\omega_1 L_s & -pL_s - r_s & \omega_1 L_m & pL_m \\ -pL_m & \omega_2 L_m & pL_r + r_r & -\omega_2 L_r \\ -\omega_2 L_m & -pL_m & \omega_2 L_r & pL_r + r_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:下标s和r分别代表定,转子量;下标d代表d轴分量,q代表q轴分量; u 为电压, i 为电流, L_m 为定转子互感, L_s 为定子自感, L_r 为转子自感, r_s 为定子电阻, r_r 为转子电阻,p代表变量的微分。

采用定子磁场定向的矢量控制方法,将同步坐标系的d轴与定子磁链重合,忽略定子绕组电阻压降,则定子侧电压矢量落在同步轴系q轴上,与定子磁链矢量相差 90° ,即 $u_{ds} = 0$, $u_{qs} = U_s$, U_s

为定子电压矢量的幅值,由于电网电压稳定,可视为常值。

定子功率绕组磁链为:

$$\begin{cases} \psi_{ds} = U_s / \omega_1 = -L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \\ \psi_{qs} = -L_s i_{qs} + L_m i_{qr} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

定子侧有功功率与无功功率分别为:

$$\begin{cases} P_1 = 1.5(u_{ds} i_{ds} + u_{qs} i_{qs}) = 1.5U_s i_{qs} \\ Q_1 = 1.5(u_{qs} i_{ds} - u_{ds} i_{qs}) = 1.5U_s i_{ds} \end{cases} \quad (4)$$

因此实现 i_{qs} , i_{ds} 的解耦控制即可实现定子功率绕组有功功率与无功功率的控制,取状态变量为 $x_1 = P_1$, $x_2 = Q_1$,由式(3)和式(2)的第三、四行可以得到功率状态方程如下:

$$\mu \dot{X} + BX = \varphi + 1.5U_s L_m U \quad (5)$$

$$\text{其中: } \mu = (L_s L_r - L_m^2); \quad B = \begin{bmatrix} L_s r_r & \mu \omega_2 \\ -\mu \omega_2 & L_s r_r \end{bmatrix};$$

$$\varphi = \begin{bmatrix} -1.5U_s^2 \omega_2 L_r / \omega_1 \\ -1.5U_s^2 r_r / \omega_1 \end{bmatrix}; \quad U = \begin{bmatrix} u_{qr} \\ u_{dr} \end{bmatrix}; \quad X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

若已知功率绕组有功功率及无功功率的期望值 P_1^* 和 Q_1^* ,则令 $e = [P_1^* - P_1 \quad Q_1^* - Q_1]^T$,由于风力发电系统中电磁时间常数远远小于机械时间常数,因此可认为 $\dot{X}^* = 0$,则由式(5)可得到功率误差的状态方程为

$$\mu \dot{e} + Be = BX^* - \varphi - \frac{3}{2}U_s L_m U \quad (6)$$

针对式(6),可取控制率如下

$$U = \frac{2}{3} \frac{BX^* - \varphi}{U_s L_m} + \frac{2}{3} \frac{Ke}{U_s L_m} \quad (7)$$

上述控制率可实现状态误差渐进收敛到0,其中 $K = kI$, I 为二阶单位矩阵。

证明:将控制率式(7)带入式(6),可得误差状态方程如下

$$\mu \dot{e} + (B + K)e = 0 \quad (8)$$

取目标系统能量函数为 $V(e) = e^T e / (2\mu)$,对能量函数求导,可得

$$dV/dt = -e^T (B + K)e \quad (9)$$

其中,矩阵 $B+K$ 的一阶主子式为 $L_s r_r + k > 0$,二阶主子式为 $(L_s r_r)^2 + (\mu \omega_2)^2 > 0$,所以 $(B+K)$ 为正定矩阵,由Lyapunov稳定性理论可知误差系统是

渐进稳定的，又因为取 $k \gg \mu$ ，所以误差系统收敛动态过程主要由 K 决定。

2 网侧变换器的功率解耦控制

在两相同步旋转 dq 同步旋转坐标系下，网侧变换器的数学模型可表示为^[11]

$$\begin{aligned} Ldi_d/dt &= -Ri_d + \omega_1 Li_q + E_d - v_d \\ Ldi_q/dt &= -Ri_q - \omega_1 Li_d + E_q - v_q \end{aligned} \quad (10)$$

式中： E_d, E_q 分别为电网电动势在 dq 轴上的分量； i_d, i_q 为电网向网侧变换器输入的三相电流 i_a, i_b, i_c 在 d, q 上的分量； L 为进线电感； R 为进线等效电阻。

将 d 轴沿电网电压矢量定向，则 $E_q=0, E_d=U_s$ ，则电网向网侧变换器传输的有功功率 P 和无功功率可表示如下。

$$\begin{aligned} P &= (3/2) \cdot (E_d i_d + E_q i_q) = (3/2) \cdot U_s i_d \\ Q &= (3/2) \cdot (E_q i_d - E_d i_q) = (-3/2) \cdot U_s i_q \end{aligned} \quad (11)$$

取有功功率和无功功率为状态变量， $x_1' = P, x_2' = Q$ ，由式 (9) 可得网侧变换器功率状态方程如下

$$L\dot{X}' + B_1 X' = 1.5U_s V + \varphi_1 \quad (12)$$

其中 $B_1 = \begin{bmatrix} R & \omega L \\ -\omega L & R \end{bmatrix}, V = \begin{bmatrix} -v_d \\ v_q \end{bmatrix}, \varphi_1 = \begin{bmatrix} 1.5U_s^2 \\ 0 \end{bmatrix}$ ，

令 $e = [P^* - P \quad Q^* - Q]^T$ ，由式 (11) 可求得误差动态方程为

$$L\dot{e} + Be = BX^* - \varphi_1 - 1.5U_s V \quad (13)$$

针对上式，可取控制率为

$$V = 2(B_1 X^* - \varphi_1 + K_1 e) / (3U_s) \quad (14)$$

上述控制率可实现状态变量 P, Q 渐进收敛到给定期望值，证明过程略，可参考上节，通过 K_1, K 取值可使得两侧变换器具有相同的动态特性。

3 直流母线电容的电压控制策略

电容电压状态方程以有功功率的形式表示如下

$$C \frac{du_c^2}{2dt} = P - P_2 \quad (15)$$

式中： P 为网侧变换器向电容输入的功率； P_2 为电容向转子侧变换器输出的功率。

双馈风力发电机稳态运行时，在不计铁损和机械损耗的情况下，可得到双馈发电机励磁控制绕组的输入功率为

$$P_c = sP_1 + P_{cu2} \quad (16)$$

在忽略转子侧变换器传输功率损耗的情况下，有 $P_2 = P_c$ ，对电容电压采取功率前馈控制和电压反馈控制的复合控制策略，求得控制率如下

$$P = P_c + K_2(U_c^* - U_c) \quad (17)$$

4 双PWM变换器励磁的双馈风力发电系统仿真研究

为了实现最大风能捕获，要保持风机运行在风能利用系数最大的状态，也就是要维持在最佳叶尖速比状态。采用风力机的最大功率曲线作为负载特性曲线控制发电机的电磁功率即可实现最佳叶尖速比运行，该负载特性曲线的表达式为^[10]

$$P_c^{opt} = \frac{1}{2} C_{pmax} \rho \pi R^2 \left(\frac{\omega_r R}{\lambda_{opt}} \right)^3 \quad (18)$$

其中： λ_{opt} 为最佳叶尖速比； C_{pmax} 为最佳叶尖速比运行状态下的风能利用系数； ω_r 为风轮转速； R 为风轮半径； ρ 为空气密度。根据式 (16) 和双馈电机稳态运行关系，可给出双馈电机功率绕组输出参考功率。

$$P_1^* = P_c^{opt} / (1-s) \quad (19)$$

根据上述控制策略，采用 Matlab/Simulink 软件建立了双 PWM 变换器励磁的双馈风力发电系统的完整控制框图，如图 2 所示。

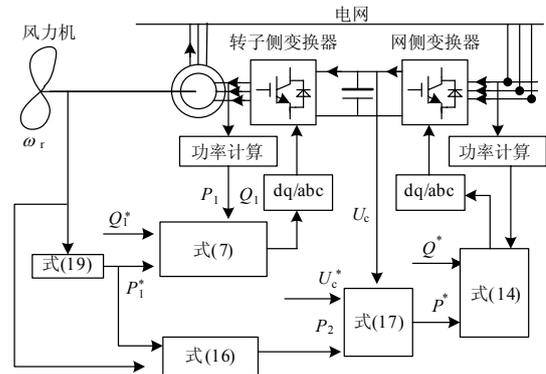


图 2 双 PWM 励磁的双馈风力发电机组控制框图

Fig.2 Control schedule of doubly-fed induction wind power generator excited by dual PWM converter

仿真参数设置如下：工频电源线电压 380 V，频率 50 Hz； $L_m=69.21$ mH、 $L_s=70.18$ mh、 $R=1$ 、 $L_r=74.31$ mH， $r_r=0.1 \Omega$ 、 $J=1$ kgm²、 $C=200 \mu F$ ， $K_2=100$ 。

A) 阶跃风速下的系统响应

图 3 为无功功率给定 500 var 不变, 风速阶跃变化时, 风电系统运行的响应情况。由图 3 (a) 可见当风速从 11 m/s 下降到 8 m/s 再上升到 11 m/s 的过程中, 转速也产生相应的变化, 从风能利用系数曲线可看到稳态时均稳定在最大风能利用系数值 0.37 处, 表明该控制策略实现了最大风能跟踪控制。图 3 (b) 示出了双馈电机定子绕组的输出功率, 定子输出有功功率随着风速的变化而变化, 无功功率则维持了参考输出为 500 VA, 实现了双馈电机定子绕组输出功率的解耦控制。当风力机转速变化时, 励磁电压频率与幅值均产生变化。图 3 (c) 示出了过渡过程中双馈电机转子绕组控制电压的变化。图 3 (d) 示出了仅采用电压反馈控制, 以及采用功率前馈控制与电压反馈相结合的复合控制时的电容电压的响应特性对比, 可明显看出, 仅采用反馈控制时, 电容电压随着风速的变化存在着波动以及稳态误差, 但是采用复合控制时, 则整个过程中电容电压基本维持不变, 具有良好的特性。

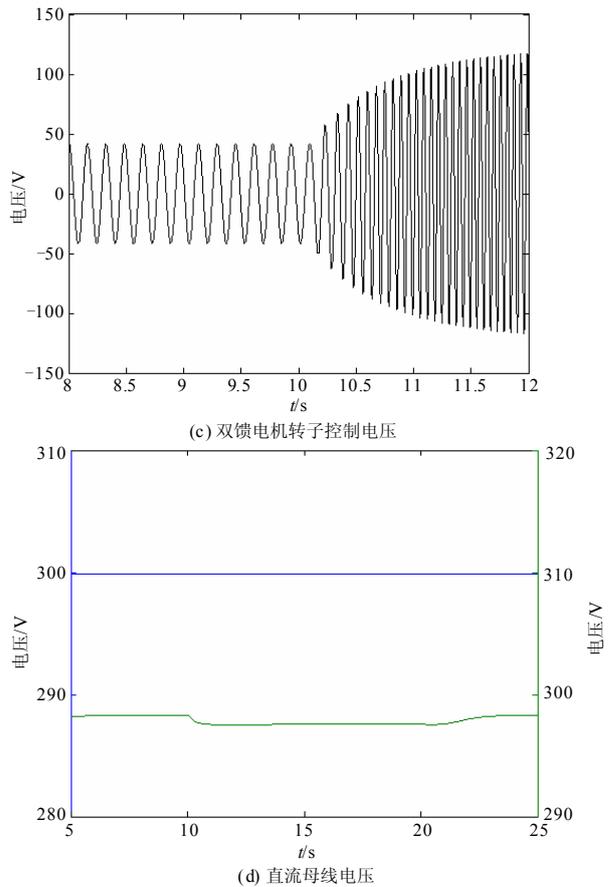
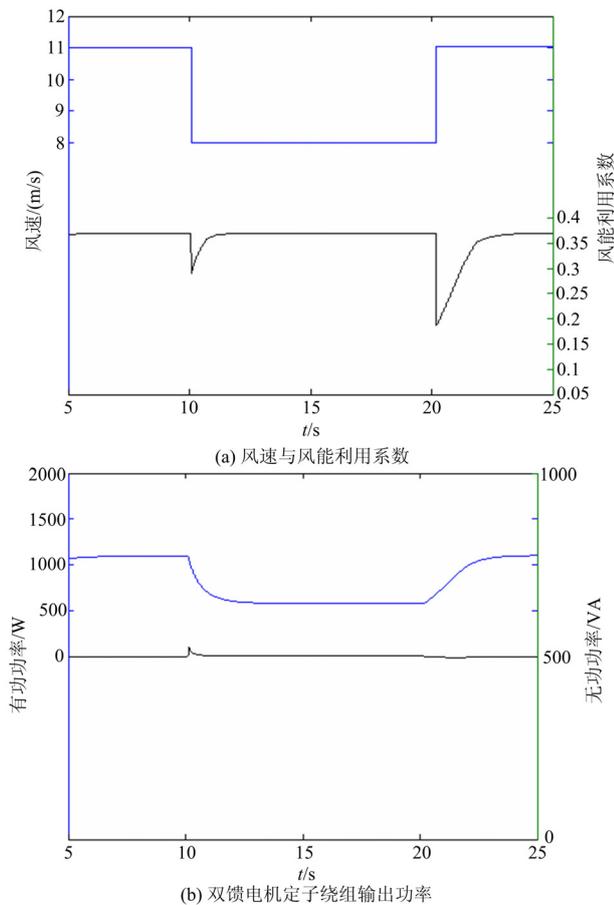


图 3 阶跃风速下的系统响应

Fig.3 Response of the system under the step wind

B) 随机风速下的系统响应

图 4 为无功功率给定 500 var 不变, 风速随机变化时风电系统运行的响应情况。由图 4 (a) 可见当风速随机变化过程中, 转速也产生相应的变化, 始终维持风能利用系数在最大值 0.37 处, 表明该控制策略能够实现风速随机变化过程中的最大风能跟踪。图 4 (b) 示出的双馈电机定子绕组的输出功率表明定子输出有功功率随着风速的变化而变化, 无功功率依然能够维持在参考输出 500 VA 处, 具有较好的功率输出解耦控制特性。图 4 (c) 示出了风速随机变化过程中的双馈电机转子绕组控制电压的变化。图 4 (d) 可看出仅采用反馈控制时, 电容电压随着风速的变化存在着波动以及稳态误差, 但是采用复合控制时, 在风速随机变化过程中仍然能够维持电容电压基本在参考值 300 V 处, 从而确保了整个控制系统的良好性能。

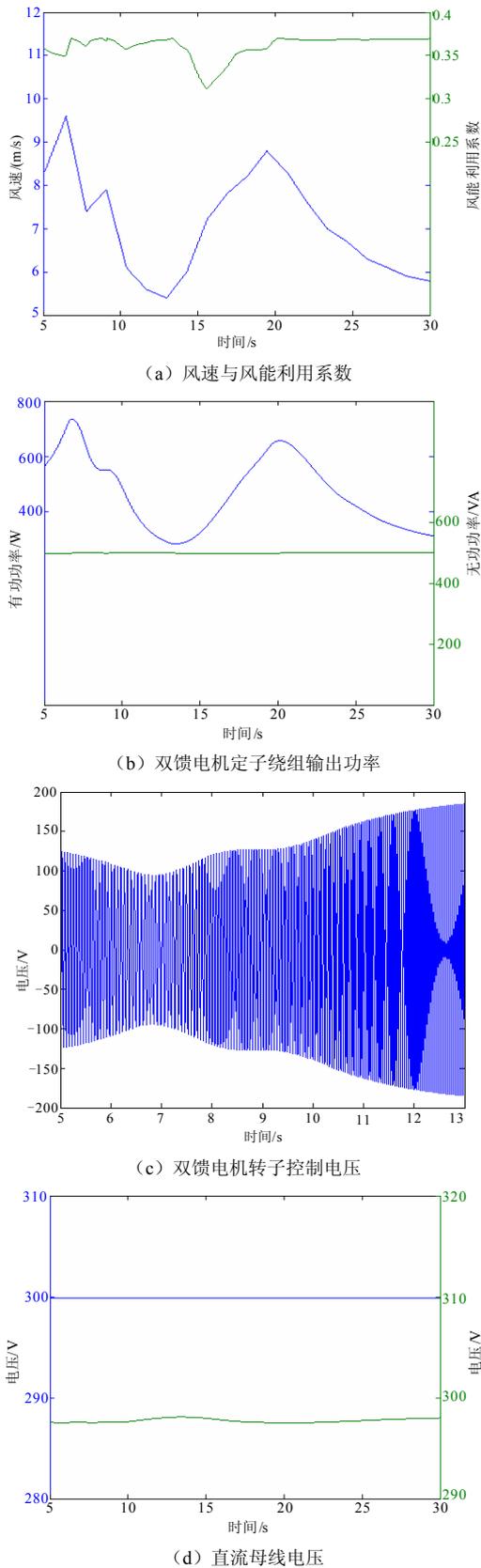


图 4 随机风速下的系统响应

Fig.4 Response of the system under the random wind

5 结论

本文对双馈风力发电系统中常用的双 PWM 变换器的协调控制策略进行了研究。对双 PWM 变换器的转子侧和电网侧分别采取直接功率控制，并基于无源性理论设计了直流母线两侧变换器的控制率，使其具有相同的动态响应特性。根据双馈风力发电系统中的能量传输关系，在电容电压反馈控制的基础上，引入了功率前馈控制，从而使得运行过程中直流母线电容两侧的功率流动平衡，减少了电容电压的波动。基于 Matlab/Simulink 建立了风电系统的完整仿真模型，仿真结果表明在阶跃风速和随机风速下，所述的控制策略不仅能够实现风能最大跟踪控制以及期望的无功输出，并且直流母线电容电压基本维持不变，从而确保了系统良好的控制效果以及风电系统良好的输电质量。基于无源性理论，结合风电系统特有的能量传输特性设计的控制率物理意义明确，结构简单，鲁棒性强，具有较高的实用价值。

参考文献

[1] TANG Yi-fan, XU Long-ya. A flexible active and reactive power control strategy for a variable speed constant frequency generating system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1995, 10 (4) : 472-478.

[2] 黄科元, 贺益康, 卞松江. 矩阵式变换器励磁的变速恒频风力发电系统的研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22 (11) : 100-105.

HUANG Ke-yuan, HE Yi-kang, BIAN Song-jiang. Investigation of a matrix converter-excited variable-speed constant-frequency wind-power generation system[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22 (15) : 100-105.

[3] 陈学顺, 许洪华. 双馈电机变速恒频风力发电运行方式研究[J]. 太阳能学报, 2004, 25 (5) : 582-586.

CHEN Xue-shun, XU Hong-hua. Investigation of variable-speed constant-frequency wind power generator operation[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2004, 25(5) : 582-586.

[4] 张先勇, 吴捷, 杨金明. 基于自抗扰解耦的变速恒频风力发电功率控制系统[J]. 电气传动, 2007, 37 (2) : 8-11.

ZHANG Xian-yong, WU Jie, YANG Jin-ming. Power control strategy based on auto-disturbance rejection decoupling for a variable speed constant frequency generation system[J]. Electric Drive, 2007, 37 (2) : 8-11.

(下转第 195 页 continued on page 195)

- HU Shu-ju, LI Jian-lin, XU Hong-hua. Analysis on the low-voltage-ride-through capability of direct-drive permanent magnetic generator wind turbines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31 (17): 73-77.
- [9] Verkrijging, Fokkema J T. Wind power modeling and impact on power system dynamics[D]. 2003.
- [10] Verkrijging, Fokkema J T. Wind power modeling and impact on power system dynamics[D]. 2003.
- [11] 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[J]. 电力系统自动化, 2003, 27 (20): 62-67.
LIU Qi-hui, HE Yi-kang, ZHAO Ren-de. The maximal wind energy tracing control of a variable-speed constant-frequency wind-power generation system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27 (20): 62-67.
- [12] 严干贵, 魏治成, 穆钢, 等. 直驱永磁同步风电机组的动态建模与运行控制[J]. 电力系统及其自动化学报, 2009, 21 (6): 34-39.
YAN Gan-gui, WEI Zhi-cheng, MU Gang, et al. Dynamic modeling and control of directly-driven permanent magnet synchronous generator wind turbine [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2009, 21(6): 34-39.
- [13] 徐科, 胡敏强, 郑建勇, 等. 风力发电机无速度传感器网侧功率直接控制[J]. 电力系统自动化, 2006, 30 (23): 43-47.
XU Ke, HU Min-qiang, ZHENG Jian-yong, et al. Direct-control grid-connected power with none direct speed measurement of direct-drive wind generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30 (23): 43-47.
- [14] Slootweg J G, de haan S W H, Polinder H, et al. General model for representing variable speed wind turbines in power system dynamics simulations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18 (1) .
- [15] Chinchilla M, Arnaltes S, Burgos J C. Control of permanent-magnet generators applied to variable-speed wind-energy systems connected to the grid[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2006, 21 (1) : 130-135.
- [16] 迟永宁, 王伟胜, 刘燕华, 等. 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.
CHI Yong-ning, WANG Wei-sheng, LIU Yan-hua, et al. Impact of large scale wind far integration on power system transient stability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30 (15): 10-14.
- [17] Hier S. Grid integration of wind energy conversion systems[M]. John Wiley and Sons, 1998.

收稿日期: 2010-04-06

作者简介:

蔺 红 (1969-), 女, 副教授, 博士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制及风力发电技术; E-mail: Tseagle@163.com

晁 勤 (1959-), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统综合自动化及风力发电技术研究与教学工作。

(上接第 188 页 continued from page 188)

- [5] Wu R, Dewan S B, Slwmon G R. Analysis of a PWM AC to DC voltage source converter under the predicted current control with a fixed switching frequency[J]. IEEE Trans Ind Applicat, 1991, 27: 756-764.
- [6] Nambo H, Jinhwan J, Kwanghee N. A fast dynamic DC-link power-balancing scheme for a PWM converter-inverter system[J]. IEEE Trans Ind Electron, 2001, 48 (4) : 794-803.
- [7] Jung J, Lim S K, Nam K. A feedback linearizing control scheme for a PWM converter-inverter having a very small DC-link capacitor[J]. IEEE Trans Ind Applicat, 1999, 35 (5) : 1124-1131.
- [8] 许凌峰, 吕跃刚, 徐太平. 变速恒频风机双 PWM 变换器协调控制策略研究[J]. 华北电力技术, 2008 (1) : 1-5.
XU Ling-feng, Lü Yue-gang, XU Da-ping. Coordinated control of dual PWM converters for variable-speed constant-frequency wind generation[J]. North China Electric Power, 2008 (1) : 1-5.
- [9] Estanqueiro ANA I. A dynamic wind generation model for power system studies[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22 (3) : 920-928.
- [10] Zhang Xianyong, Shu Jie, Wu Changhong. A novel maximum wind power capture strategy for the doubly-fed induction generator[C]. //Asia-Pac Power Energy Eng Conf. 2009.
- [11] Vladimir Blasko, Vikram Kaura. A new mathematical model and control of a three-phase AC-DC voltage source converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1997, 12 (1) : 116-123.

收稿日期: 2010-04-16

作者简介:

张先勇 (1977-), 男, 副研究员, 主要研究领域为风能控制技术, 微电网控制技术研究。E-mail: zhangxy@ms.giec.ac.cn