

直驱式六相永磁同步风力发电机最佳风能追踪控制

魏自聪, 章国宝

(东南大学 自动化学院, 江苏 南京 210096)

摘要: 为提高直驱式风力发电系统的机组容量和可靠性, 采用六相永磁同步发电机并联双 PWM 变频器的方案。根据风力机输出特性, 分析风电机组追踪最佳风能过程, 比较最优叶尖速法和爬山法的优劣, 提出一种将两者相结合的风力发电最佳风能追踪控制方法。分析六相永磁同步发电机数学模型, 基于所提出的最佳风能追踪方法, 给出六相电机矢量控制策略。基于 Matlab/Simulink 构建了六相电机和风电变流器模型, 对风速突变时六相电机的最佳风能追踪过程进行了仿真, 仿真结果验证了提出的控制策略可行。

关键词: 风电系统; 直驱式; 六相永磁同步发电机; 最佳风能追踪; 矢量控制

中图分类号: TM 315

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2010)12-0097-05

0 引言

目前的风力发电机组有恒速恒频和变速恒频 2 种类型^[1-3]。恒速恒频风力发电机组无法根据风速的变化有效地利用风能, 而变速恒频风力发电机组可以在很宽的风速变化范围内实现最大风能捕获, 成为目前风力发电的主流。变速恒频风电机组主要有双馈风力发电系统^[3-5]和直驱式永磁同步风力发电系统^[6-9]。其中, 直驱式风电机组的电机转子与风力机直接相连, 省去了齿轮箱, 采用全功率的变换器装置接入电网, 具有运行效率高、功率控制更加灵活且对电网波动的适应性好等特点, 逐渐成为国内外研究热点。

为提高机组容量, 发电机可选多相电机, 变流器可采用多重并联结构^[1]。并联运行能够增大机组总容量, 提高系统工作的可靠性, 是大功率风电机组中常采用的运行方式。本文介绍的风力发电机组采用双 PWM 变流器并联运行控制方式, 发电机则采用六相双 Y 移 30° 绕组电机, 2 套绕组分别连接 2 套独立的双 PWM 变流器将风能送到电网。本文针对直驱六相永磁同步风力发电系统, 提出了一种结合风力机最佳特性曲线和实际输出功率的最大风能跟踪的方法, 同时给出了基于六相电机矢量控制技术的最

佳风能追踪的控制方案和仿真。

1 全功率变流器拓扑结构

风电机组发电机采用了六相双 Y 移 30° 绕组电机, 不仅能提高机组容量, 而且动态特性优于三相电机。采用双电枢绕组使相同容量电机在不改变电压的情况下相电流减小一半, 这对于电力电子的变频装置是非常有意义的, 对于缺相运行或逆变桥臂失败等故障状态时也有更多的冗余选择, 从而提高系统的可靠性^[2]。

系统采用全控的 PWM 变换器电路结构^[1]。因此可以通过调节定子电流有效控制发电机的转矩, 更有效地进行最大功率追踪、优化发电机的运行性能。图 1 所示风电机组中六相永磁同步发电机 PMSG (Permanent Magnet Synchronous Generator) 具有 2 套定子绕组, 分别连接 2 套独立运行的双 PWM 变流器, 每套变流器都由一个 PWM 整流器和 PWM 逆变器构成, 此外直流母线上还并联有充电支路和制动单元。变流器机侧采用 LC 滤波器; 而为了提高网侧谐波的抑制能力、得到更好的输出电流, 在网侧采用 LCL 滤波器。2 套变流器同步运行, 并联于低压电网, 通过主变压器将风电机组的功率输送至高压电网。

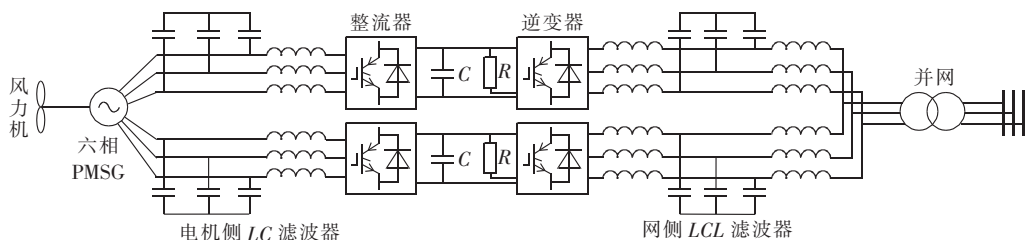


图 1 直驱风电系统并联双 PWM 变流器拓扑结构

Fig.1 Topology of directly-driven wind generator with double parallel PWM converters

2 最佳风能追踪原理

2.1 风力机的输出特性

风力机通过桨叶把风能转化成机械能^[10]。设风力机扫风面积为 S , 空气密度为 ρ , 风速为 v , 按照贝兹原理, 风力机从风中捕获的机械功率为

$$P_w = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) \rho S v^3 \quad (1)$$

其中, $C_p(\lambda, \beta)$ 为风力机的风能利用系数, 反映风力机将风能转换为机械能的效率, 它是叶尖速比 λ 和桨叶节距角 β 的函数^[11], $\lambda = r\omega / v$, ω 为风力机的转速, r 为风轮半径。

风速确定时, 风力机吸收的风能只与 $C_p(\lambda, \beta)$ 有关。桨叶节距角 β 一定时, $C_p(\lambda, \beta)$ 是叶尖速比 λ 的函数, 如图 2 所示, 此时存在一个最佳叶尖速比 λ_{opt} , 对应最大的风能利用系数 C_{pmax} 。

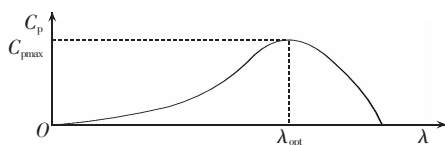


图 2 风能利用系数曲线

Fig.2 Curve of power coefficient

当风力机运行于最佳叶尖速比的状态时, 风速与风力机的转速成正比:

$$v = r\omega / \lambda_{opt} \quad (2)$$

此时, 风力机轴上输出的机械功率和机械转矩分别为

$$P_{opt} = \frac{1}{2} C_{pmax} \rho S \left(\frac{r\omega}{\lambda_{opt}} \right)^3 = \frac{1}{2} C_{pmax} \rho S \frac{r^3}{\lambda_{opt}^3} \omega^3 \quad (3)$$

$$T_{opt} = P_{opt} / \omega \quad (4)$$

式(3)(4)给出的风力机输出的机械功率、机械转矩与转速之间的关系称为最佳功率曲线和最佳转矩曲线。当风力发电系统稳定运行于某一风速下的最大功率点处, 风速与叶尖速比之间满足式(2), 即风力机处于最佳叶尖速比状态, 此时风力机的输出功率与转速之间满足式(3)所给出的最佳功率曲线关系, 风力机的输出转矩与转速之间满足式(4)所给出的最佳转矩曲线关系。不同风速下, 风力机输出的机械功率特性曲线如图 3 所示(图中, 虚线为最佳功率曲线, $v_1 < v_2 < v_3 < v_4$)。

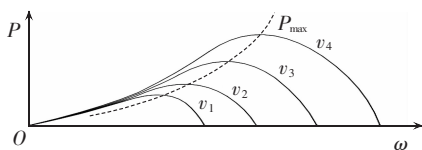


图 3 风力机的功率特性曲线

Fig.3 Power characteristic curves of wind turbine

2.2 最佳风能追踪方法

变速恒频风力发电系统在额定风速下风力机定桨距运行, 通过控制风机转速调节叶尖速比, 实现最佳功率追踪; 在额定风速以上风力机变桨距运行来

减少吸收风能, 防止风电机组超出转速极限和功率极限运行。风场在大部分时间内风速较低, 因此机组主要处于捕获最大风能的工作模式^[12-14]。

最佳风能追踪的过程如图 4 所示(图中, $v_1 < v_2$), 假设最初在风速 v_1 下风力机稳定运行在对应功率曲线的 A 点上, 此时风力机在风速 v_1 下的输出功率达到最大, 转速为 ω_1 ; 如果某时刻风速升高至 v_2 , 风力机和发电机转速不能突变, 因此运行在 B 点, 其输出功率由 P_A 突变至 P_B , 此时通过发电机控制系统调节发电机转速, 在转速增加的过程中, 风力机沿着 B-C 曲线增速, 到达 C 点时, 达到风力机在风速 v_2 下的最大输出功率 P_C , 转速为 ω_2 。同理可以分析风速从 v_2 突变为 v_1 的逆调节过程。

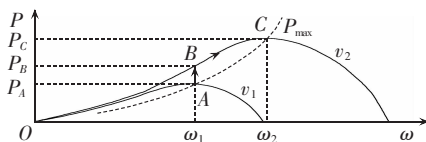


图 4 最佳风能追踪过程

Fig.4 Process of optimal wind energy tracking

最优叶尖速比法和爬山法是风力机最佳风能追踪的 2 种常用方法。

最优叶尖速比法: 测出风速信号, 查表得此风速下的最优叶尖速比 λ_{opt} , 然后根据 $\omega = v\lambda_{opt} / r$ 来调节发电机转速。该方法调节速度快, 但风速很难准确测量, 通常需要补偿措施。

爬山法: 由风力机的机械功率-转速特性曲线可以发现, 其最大功率点的两侧均为单调曲线。因而, 可以利用风力机功率在顶点两侧的单调性, 逐步追踪靠近顶点采样, 获取最大功率点的位置。不过对于大惯性系统, 爬山法所需时间较长, 风速持续变化的情况下其控制性能将受到影响。

本文把最佳叶尖速比法和爬山法相结合(见图 5): 由测得的风速根据最优叶尖速比得到发电机最佳转速 ω_{opt} , 以此作为初步设定值调节电机转速, 快速跟踪风速变化; 然后再用爬山法根据实际输出功率变化不断调整转速设定值补偿量 $\Delta\omega$, 令 $\Delta P_e(n) = P_e(n) - P_e(n-1)$, $P_e(n)$ 、 $P_e(n-1)$ 分别是 n 、 $(n-1)$ 时刻的输出功率。 $|\Delta P_e(n)|$ 的边界表示为 $\Delta P_e^*(n)$ 。则补偿量 $\Delta\omega$ 可以由下面的方法得到:

- 当 $\Delta P_e(n) < -\Delta P_e^*(n)$ 时, $\Delta\omega = -|K_t \Delta P_e(n)|$;
- 当 $\Delta P_e(n) > \Delta P_e^*(n)$ 时, $\Delta\omega = |K_t \Delta P_e(n)|$;
- 当 $-\Delta P_e^*(n) < \Delta P_e(n) < \Delta P_e^*(n)$ 时, $\Delta\omega = 0$ 。

其中, 参数 K_t 是经验值。

通过不断改变发电机转速使机组输出功率逐步逼近最优值, 对系统参数的变化不敏感; 最终以转速给定值 $\omega^* = \omega_{opt} + \Delta\omega$ 来控制电机。

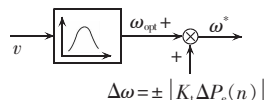


图 5 最佳风能追踪转速控制框图

Fig.5 Speed control of optimal wind energy tracking

3 六相电机最佳风能矢量控制

3.1 转子磁场定向的六相 PMSG 数学模型

分析六相 PMSG 理想模型^[15],满足以下假设:忽略电机铁心剩磁、饱和效应;不计涡流和磁滞损耗;转子上没有阻尼绕组,永磁体没有阻尼作用;电机定子绕组完全对称,产生的磁动势波和磁场在空间上都按正弦分布;不计定子表面齿、槽的影响。

六相双 Y 移 30° 绕组同步电机定子上有 a_1, b_1, c_1 和 a_2, b_2, c_2 2 组绕组, a_1, b_1, c_1 绕组超前 a_2, b_2, c_2 绕组 30°。为简化六相 PMSG 数学模型、降低其阶数,考虑以转子永磁磁势 ψ_f 的轴线为中线建立以同步速度旋转的两相正交的 dq 旋转坐标系,坐标变换过程中保持总的磁势和功率不变,电压和电流取同一变换阵。定子电流和电压从六相静止坐标系统到 dq 坐标系的变换为

$$(i_d, i_q)^T = C_{6s/2r}(i_{a1}, i_{a2}, i_{b1}, i_{b2}, i_{c1}, i_{c2})^T \quad (5)$$

$$(u_d, u_q)^T = C_{6s/2r}(u_{a1}, u_{a2}, u_{b1}, u_{b2}, u_{c1}, u_{c2})^T \quad (6)$$

$$C_{6s/2r} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \sin \theta & \cos \theta \\ \sin(\theta - 30^\circ) & \cos(\theta - 30^\circ) \\ \sin(\theta - 60^\circ) & \cos(\theta - 60^\circ) \\ \sin(\theta - 150^\circ) & \cos(\theta - 150^\circ) \\ \sin(\theta - 240^\circ) & \cos(\theta - 240^\circ) \\ \sin(\theta - 270^\circ) & \cos(\theta - 270^\circ) \end{bmatrix}^T \quad (7)$$

而从 dq 坐标系到六相静止坐标系统的变换为

$$(i_{a1}, i_{a2}, i_{b1}, i_{b2}, i_{c1}, i_{c2})^T = C_{2r/6s}(i_d, i_q)^T \quad (8)$$

$$(u_{a1}, u_{a2}, u_{b1}, u_{b2}, u_{c1}, u_{c2})^T = C_{2r/6s}(u_d, u_q)^T \quad (9)$$

两变换矩阵有如下关系:

$$C_{2r/6s} = C_{6s/2r}^T \quad (10)$$

六相双 Y 绕组电机矢量控制坐标参考图如图 6 所示。

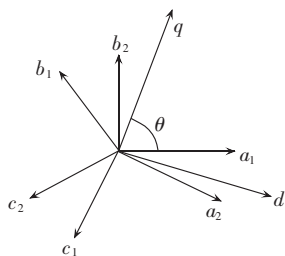


图 6 六相 PMSG 坐标变换示意图

Fig.6 Coordinates transformation of six-phase PMSG

在磁势不变和功率不变的原则下, dq 坐标系下六相 PMSG 定子侧的电压方程和磁链方程为

$$\begin{cases} u_d = R i_d + p \psi_d - \omega_s \psi_q \\ u_q = R i_q + p \psi_q + \omega_s \psi_d \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + \psi_f \\ \psi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (12)$$

电磁转矩方程为

$$T_{em} = n_p [\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (13)$$

六相风力发电机运动方程为

$$T_L - T_{em} - B \omega = J \frac{d\omega}{dt} \quad (14)$$

其中, u_d, u_q, i_d, i_q 为定子电压和电流 d, q 轴分量; R 为定子绕组相电阻; p 为微分算子 $\frac{d}{dt}$; ω_s 为电角速度;

ψ_d, ψ_q 为定子磁链 d, q 轴分量; ψ_f 为永磁体产生的磁链; L_d, L_q 为定子绕组 d, q 轴分量; i_d, i_q 为定子电流 d, q 轴分量; T_{em} 为电磁转矩; T_L 为负载转矩; B 为阻力系数; $\omega = \omega_s / n_p, n_p$ 为极对数; J 为转动惯量。

3.2 最佳风能矢量跟踪控制策略

为使六相电机转速和电流解耦,令 $i_d^* = 0$ 。通过改变 q 轴电流分量 i_q 的值可以独立控制电磁转矩。结合最佳叶尖速比法和爬山法得到转速给定值 $\omega^* = \omega_{opt} + \Delta\omega$, 与实际转速值相比较经 PI 控制得到 q 轴电流分量给定值 i_q^* 。六相 PMSG 矢量控制系统原理框图如图 7 所示,系统仿真采用双闭环控制方案,其中子模块包括风速跟踪调节模块、电流调节模块、坐标变换模块、SVPWM 模块、电压逆变模块和 PMSG 本体模块。

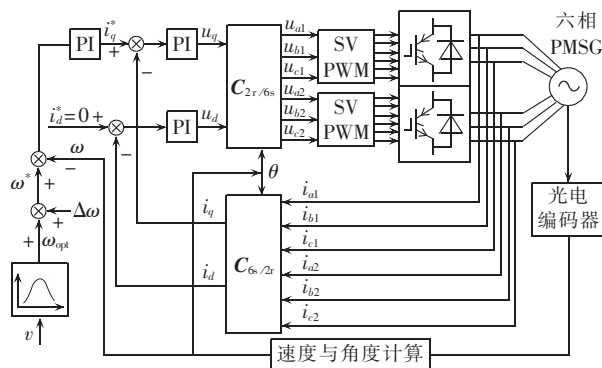


图 7 六相 PMSG 的最佳风能追踪矢量控制框图

Fig.7 Block diagram of vector control for optimal wind energy tracking of six-phase PMSG

4 仿真结果分析

利用 Matlab/Simulink 搭建了六相 PMSG 及其矢量控制模型,对风速突变时六相 PMSG 追踪最佳功率过程进行了仿真。六相 PMSG 参数:电阻 $R = 2.45 \Omega$, $L_d = L_q = 4 \text{ mH}$, $J = 3.78 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $B = 2.4 \times 10^{-4} \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s} / \text{rad}$, $n_p = 4$, $\psi_f = 0.232 \text{ Wb}$ 。风轮半径 $r = 0.84 \text{ m}$,空气密度 $\rho = 1.25 \text{ kg} / \text{m}^3$ 。如图 8 所示,设风速在 0.1 s 时刻由 4.5 m/s 突然升高到 6 m/s,最佳叶尖速比 λ_{opt} 由 4 变为 4.5, C_{pmax} 由 0.317 变为 0.468,此时风力发电机转子转速 ω 需跟随风速变化

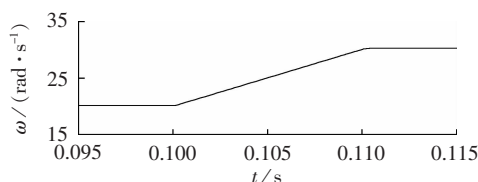


图 8 六相发电机转速曲线

Fig.8 Rotational speed curve of six-phase PMSG

由 20 rad/s 提高到 30 rad/s 以追踪最佳功率。

发电机转速的调节是通过改变定子电流大小来实现的。定子 d 、 q 轴电流和六相电流变化如图 9、10 和 11 所示。

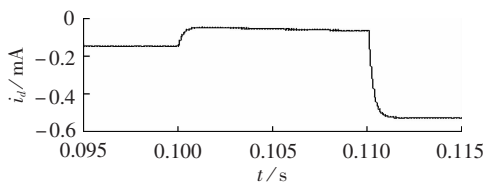


图 9 定子 d 轴电流曲线

Fig.9 d -axis current curve of stator

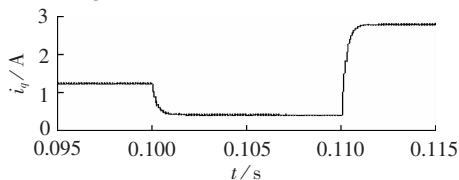


图 10 定子 q 轴电流曲线

Fig.10 q -axis current curve of stator

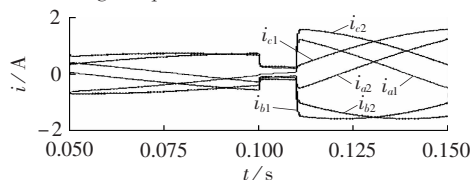


图 11 定子六相电流曲线

Fig.11 Six phase curves of stator

由式(13)可知, d 、 q 轴电感值一样时可通过减小定子 q 轴电流值来减小电磁转矩。图 12 中, 在 0.1 s 时风速突变, 风机输出机械转矩 T 突然变大, 输出功率也突然变大, 但此时风机转速并非最佳转速, 通过调节风机转速使输出功率逐渐达到最大值, 实现最佳风能的追踪。输出功率变化过程如图 13 所示。

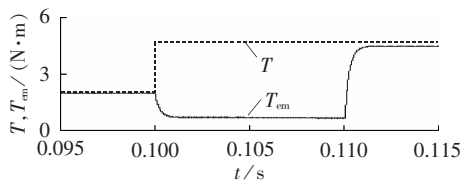


图 12 风机输出机械转矩和电磁转矩曲线

Fig.12 Mechanical torque curve and electromagnetic torque curve of wind generator

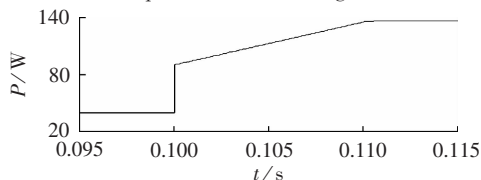


图 13 风机输出机械功率曲线

Fig.13 Mechanical power output curve of wind generator

5 结语

随着风电技术的不断发展, 直驱式风电系统中采用六相 PMSG 并联双变频器的方式已成为一种提高风电机组容量的有效方法。本文将目前常用的 2

种最佳风能追踪方法结合起来, 给出六相 PMSG 最佳风能矢量控制策略, 并利用 Matlab/Simulink 工具对其进行仿真。仿真结果验证了所提方案可行。

参考文献:

- [1] 胡书举, 李建林, 许洪华. 永磁直驱风电系统变流器拓扑分析[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(4): 77-81.
HU Shuju, LI Jianlin, XU Honghua. Analysis of converter configuration for direct-drive wind power system with PMSG[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(4): 77-81.
- [2] 陈瑶. 直驱型风力发电系统全功率并网变流技术的研究[D]. 北京: 北京交通大学电气工程学院, 2008.
CHEN Yao. Research on full-scale grid-connected power conversion technology for direct-driven wind generation system[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008.
- [3] 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 Qihui, HE Yikang, ZHAO Rende. The maximal wind-energy tracking control of a variable-speed constant-frequency wind-power generation system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(20): 62-67.
- [4] MULLER S, DEICKE M, de DONCKER R W. Doubly fed induction generator systems for wind turbines[J]. IEEE Industry Applications Magazine, 2002, 8(3): 26-33.
- [5] 郭金东, 赵栋利, 林资旭, 等. 兆瓦级变速恒频风力发电机组控制系统[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(6): 1-6.
GUO Jindong, ZHAO Dongli, LIN Zixu, et al. Research of the megawattlevel variable speed constant frequency wind power unit control system[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(6): 1-6.
- [6] 贾要勤, 曹秉刚, 杨仲庆. 风力发电的 MPPT 快速响应控制方法[J]. 太阳能学报, 2004, 25(2): 171-176.
JIA Yaoqin, CAO Binggang, YANG Zhongqing. A fast response MPPT control method for wind generation[J]. Acta Energiac Solaris Sinica, 2004, 25(2): 171-176.
- [7] TAN K, ISLAM S. Optimum control strategies in energy conversion of PMSG wind turbine system without mechanical sensors[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2004, 19(2): 392-399.
- [8] WANG Q, CHANG L. An intelligent maximum power extraction algorithm for inverter-based variable speed wind turbine systems[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2004, 19(5): 1242-1249.
- [9] BOUSCAYROL A, DELARUE P, GUILLAUD X. Power strategies for maximum control structure of a wind energy conversion system with a synchronous machine[J]. Renewable Energy, 2005, 30(15): 2273-2288.
- [10] TANG Y, XU L. A flexible active and reactive power control strategy for a variable speed constant frequency generating system[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 1995, 10(4): 472-478.
- [11] 付勋波, 郭金东, 赵栋利, 等. 直驱式风力发电系统的仿真建模与运行特性研究[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(2): 1-5.
FU Xunbo, GUO Jindong, ZHAO Dongli, et al. Characteristics and simulation model of direct-drive wind power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(2): 1-5.
- [12] 付勋波, 张雷, 胡书举, 等. 模型参考自适应无速度传感器技术在永磁直驱风力发电系统中应用[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(9): 90-93.
FU Xunbo, ZHANG Lei, HU Shuju, et al. Application of MRAS speed-sensor-less technology to direct drive wind power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(9): 90-93.
- [13] CHINCHILLA M, ARNALTES S, BURGOS J C. Control of per-

manent-magnet generators applied to variable-speed wind-energy systems connected to the grid[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21(1): 130-135.

[14] 姚骏, 廖勇, 瞿兴鸿, 等. 直驱永磁同步风力发电机的最佳风能跟踪控制[J]. 电网技术, 2008, 32(10): 11-15.

YAO Jun, LIAO Yong, QU Xinghong, et al. Optimal wind-energy tracking control of direct-driven permanent magnet synchronous generators for wind turbines[J]. Power System Technology, 2008, 32(10): 11-15.

[15] 李崇坚. 交流同步电机调速系统[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 14-54.

(实习编辑: 李 莉)

作者简介:

魏自聪(1986-), 男, 江西赣州人, 硕士研究生, 主要研究方向为风力发电技术(E-mail: weisir1986@126.com);

章国宝(1965-), 男, 江西南昌人, 教授, 香港科技大学博士, 主要研究方向为风力发电技术和电力电子技术。

Optimal wind energy tracking control of directly-driven six-phase PMSG

WEI Zicong, ZHANG Guobao

(School of Automation, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The scheme of six-phase PMSG (Permanent Magnet Synchronous Generator) combined with double parallel PWM converters is proposed to improve the capacity and reliability of directly-driven wind power system. The process of optimal wind energy tracking is analyzed based on the output characteristic of wind generator and an integrated control scheme combining the optimal tip-speed method and the hill-climbing method is proposed based on the comparison between these two. The mathematical model of six-phase PMSG is analyzed and its vector control strategy is given based on the proposed scheme. The simulation model of six-phase motor and wind power converter is developed with Matlab/Simulink and the process of optimal wind energy tracking for wind speed sudden change is simulated, which verifies the feasibility of the proposed strategy.

Key words: wind power system; directly driven; six-phase permanent magnet synchronous generator; optimal wind energy tracking; vector control