

基于 MRAS 的多相永磁直驱型风力发电系统无速度 传感器控制策略研究

胡维昊, 王跃, 李明烜, 李明, 王兆安

(西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 对采用多相永磁同步发电机的大功率直驱型变速恒频风力发电系统进行了研究。系统采用六相永磁同步发电机和多重化的 AC-DC-AC 变换器, 以减少每个电机绕组中的电流和每个电力电子变换器中的电流。研究了一种基于模型参考自适应 (Model Reference Adaptive System, MRAS) 的六相永磁同步发电机无速度传感器控制策略。该策略将永磁同步发电机本身作为参考模型, 将发电机的电流模型作为可调模型, 设计了自适应律同时辨识永磁同步发电机的转速和转子位置。还研究了基于变步长爬山法的最大功率跟踪 (Maximum Power Point Tracking, MPPT) 控制策略, 该策略具有动态功率跟踪速度快和稳态时速度平稳的优点。实验结果表明, 上述控制策略在负载突变和转速突变时均能准确地检测到发电机的转速和转子位置; 在风速变化时能准确地跟踪最大功率。

关键词: 风力发电; 模型参考自适应系统; 多相永磁同步发电机; 无速度传感器控制

Research on sensorless control strategy of direct drive multi-phase PMSG wind power generation system based on MRAS

HU Wei-hao, WANG Yue, LI Ming-xuan, LI Ming, WANG Zhao-an
(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A high power direct drive variable-speed constant-frequency wind energy conversion system based on multi-phase permanent magnet synchronous generator (PMSG) is researched. In order to reduce the current of each winding and each power electronics converter, six-phase PMSG and multiple AC-DC-AC converters are used. A sensorless control strategy of six-phase PMSG based on model reference adaptive system (MRAS) is researched. In this strategy, the PMSG is regarded as reference model while the current model of PMSG is considered as adjustable model. The adaptive laws are designed so that generator speed and rotor position are estimated at the same time. Maximum power point tracking (MPPT) control strategy based on step-changing climbing method is also researched. This method has a fast dynamic response and a good steady state. Experimental results prove that the proposed method is capable of precisely estimating the generator speed and rotor position under the condition of load change and speed change. When the wind speed is changing, the proposed method can also track the maximum power point.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2012AA050206).

Key words: wind power; MRAS; multi-phase PMSG; sensorless control

中图分类号: TM315 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)23-0118-07

0 引言

常规能源以煤、石油、天然气为主, 它们不仅资源有限, 而且会造成严重的环境污染。因此, 对可再生能源的开发利用, 特别是对风能的开发利用,

已经受到世界各国的高度重视^[1-2]。变速恒频风力发电机组可以根据实际工况变速运行, 不但提高了能量的转换效率, 还能有效地降低机组的机械应力。机组通过电网侧变换器可以实现有功、无功功率的解耦控制, 提高电力系统的调节能力及稳定性。系统可以实现发电机与电网的柔性连接, 简化并网操作^[3]。采用多极永磁同步发电机的直驱型变速恒频风力发电系统具有无齿轮箱、功率密度高和容易控

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863 计划) 资助项目 (2012AA050206)

制等优点, 已经成为风力发电领域内的主流系统之一[4-11]。

由于风力发电单机容量不断增大, 目前主流的机组均为兆瓦级或多兆瓦级, 如何在低电压下实现大功率已成为一个亟待解决的问题, 多相电机在这方面具有独特的优势[12]。多相永磁同步发电机除了增加转矩脉动频率, 降低转矩脉动幅值之外, 还因为相数的增加提高了整个系统的输出功率, 对电力电子功率器件的容量要求也降低了。此外, 增加相数还有利于提高低速区的调速特性。容错性能好也是这类电机的一个特点, 当多相中的一相或几相发生故障时, 通过适当的控制, 电机仍可以降功率启动和运行[13-14]。

为了实现永磁同步发电机高精度、高动态性能的速度和位置控制, 一般是通过机械式传感器来测量转子的速度和位置。为了克服机械式传感器给系统带来的高成本、安装维护困难、抗干扰能力下降、可靠性降低等问题, 无速度传感器技术已经成为一个研究热点, 国内外学者在这方面做了大量的工作, 提出了许多方法[15-19]。基于电机精确模型的直接算法实现简单, 动态响应快, 但是这种方法严重依赖电机参数, 没有误差校正环节, 系统的抗干扰能力较差[15]。凸极跟踪法可应用于较宽的调速范围甚至在低速也可取得较好的效果, 但是这种方法依赖于电机本身的凸极效应[16]。风力发电用大功率永磁同步发电机几乎都是隐极电机, 所以在风力发电领域内, 该方法不适用。卡尔曼滤波器法[17]和神经网络法[18]实现复杂, 计算量大, 参数设计困难, 目前还不实用。模型参考自适应法保证了参数估计的渐进收敛性, 算法较为简单, 抗干扰性能好[19]。但是, 上述方法都是针对传统的三相电机进行建模和设计的。

本文首先研究了六相永磁同步发电机的数学模型和基本控制策略, 在此基础上, 研究了基于模型参考自适应法的六相永磁同步发电机无速度传感器控制策略。该策略将永磁同步发电机本身作为参考模型, 将发电机的电流模型作为可调模型, 利用 d 轴和 q 轴估计电流与实际电流的误差信号, 设计了自适应律同时辨识永磁同步发电机的转速和转子位置。该方法结构简单, 容易实现, 抗干扰性能好。为了最大限度地捕获风能, 提高风力发电的效率, 本文还研究了基于变步长爬山法的最大功率跟踪控制策略, 该策略具有动态功率跟踪速度快和稳态时速度平稳的优点。仿真和实验结果表明, 上述控制策略在负载突变和转速突变时均能准确地检测到发电机的转速和转子位置并且在风速变化时能准确地

跟踪最大功率。

1 六相永磁直驱型风力发电系统的结构和特点

永磁直驱型变速恒频风力发电系统的结构如图 1 所示。该系统由风车、六相永磁同步发电机、电机侧变换器、电网侧变换器和 LC 滤波器组成。风车负责捕获风能, 发电机负责将风能转换为电能, 电力电子变换器将发电机发出的电能转换为高质量的电能送入电网。同时, 电力电子装置还要对发电机的工作状态进行控制。电机侧变换器和电网侧变换器均采用适合大功率系统的并联二重化结构。多重化技术能够减少每个变换器的电流, 提高系统的可靠性。同时, 多重化技术还可以减少输出电流的开关纹波, 所以滤波电感和滤波电容都能大幅度的减小。电网侧变换器实现直流环节电压和交流侧单位功率因数控制; 电机侧变换器实现对永磁同步发电机的调速控制和最大功率跟踪控制。

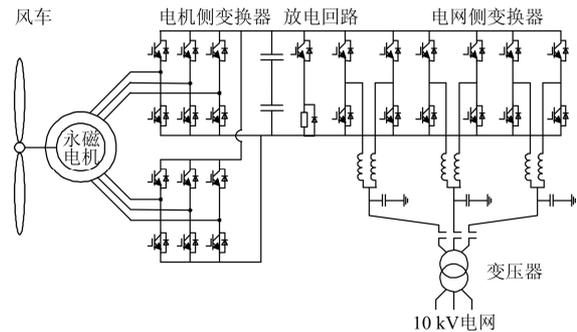


图 1 直驱型风力发电系统结构图

Fig. 1 Structure of direct drive wind power generation system

2 六相永磁同步发电机的模型和控制策略

本系统采用双 Y 移 30° 六相永磁同步发电机, 该电机有两套三相 Y 型绕组, 这两套三相绕组在空间位置上相差 30° 电角度。从电机外部看, 该电机是不对称的六相系统, 但从电机内部看, 该电机是一个绕组对称的十二相系统[20]。这种绕组结构消除了传统三相电机中的 5 次和 7 次谐波磁场对电磁转矩的危害, 所以双 Y 移 30° 六相永磁同步发电机是一种相当具有潜力的选择形式[21]。

取多相永磁同步发电机的转子磁链 ψ_r 轴线为 d 轴, 超前 d 轴 90° 电角度为 q 轴, d - q 轴以同步转速逆时针旋转。将六相永磁同步发电机的六相静止坐标系模型经过坐标变换, 可以得到基于转子磁链定向的六相永磁同步发电机在旋转坐标系下的数学模型[20-21]为

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + p\psi_d - \omega_s \psi_q \\ u_q = R_s i_q + p\psi_q + \omega_s \psi_d \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + \sqrt{3}\psi_f \\ \psi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (2)$$

$$T_e = p_n \left(\sqrt{3}\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q \right) \quad (3)$$

$$T_e - T_L - F\omega_m = Jp\omega_m \quad (4)$$

式中： u_d, u_q 为电机电压的d轴、q轴分量； i_d, i_q 为电机电流的d轴、q轴分量； L_d, L_q 为电机d轴、q轴电感； ψ_d, ψ_q 为电机d轴、q轴磁链； ψ_f 为永磁体磁链； T_e 为电机的电磁转矩； T_L 为风车的机械转矩； F 为摩擦系数； J 为转动惯量； p_n 为永磁体极对数； p 为微分算子。

永磁直驱型风力发电系统一般采用隐极电机，电机d轴电感与q轴电感相等。所以电机的电磁转矩可以表示为

$$T_e = \sqrt{3}p_n\psi_f i_q \quad (5)$$

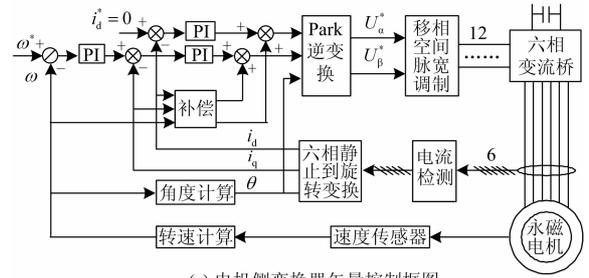
从式(5)中可以看出，电机的电磁转矩仅由q轴电流决定。

根据式(1)~式(5)设计出的六相永磁同步发电机的矢量控制系统如图2(a)所示。其外环为转速环，内环为电流环，包括了转速计算、角度计算、坐标变换、电压补偿计算、PI调节器和移相空间脉宽调制(Space Vector Pulse Width Modulation, SVPMW)等诸多模块。转速指令计算关系到最大功率跟踪的问题，将在第4节详细分析。

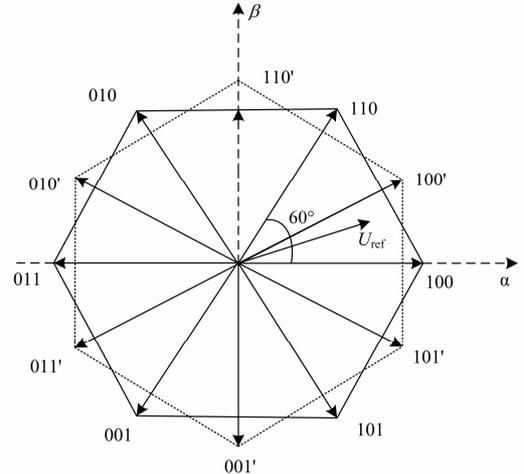
六相永磁发电机的PWM生成方法主要有传统空间脉宽调制法、矢量解耦调制法、移相空间脉宽调制法等。其中，移相空间脉宽调制法具有结构简单，电流谐波抑制效果好等优点^[12,22]。本文采用移相空间脉宽调制法来生成PWM信号驱动功率开关器件，其实现原理如图2(b)所示^[23-24]，该模块将传统三相电机SVPWM的空间矢量(100、110等)移相30°得到一组新的空间矢量(100'、110'等)，然后将参考矢量与这两组空间矢量分别进行比较，生成12路PWM脉冲，用来控制电机侧两个并联的变流器。

3 基于MRAS的速度辨识方案

为了克服图2(a)中机械式速度传感器给系统带来的高成本、安装维护困难、抗干扰能力下降、可靠性降低等问题，本节将采用基于模型参考自适应法的速度辨识方案来代替机械式速度传感器。



(a) 电机侧变流器矢量控制框图



(b) 移相空间脉宽调制示意图

图2 电机侧变流器矢量控制策略

Fig. 2 Vector control strategy of generator-side converter

将六相永磁同步发电机在旋转坐标系下的数学模型式(1)、式(2)用矩阵形式表示为

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d + \frac{\sqrt{3}\psi_f}{L} \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L} & \omega_s \\ -\omega_s & -\frac{R_s}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d + \frac{\sqrt{3}\psi_f}{L} \\ i_q \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} u_d + \frac{\sqrt{3}\psi_f R_s}{L} \\ u_q \end{bmatrix} \quad (6)$$

由于永磁直驱型风力发电系统一般采用隐极电机，电机d轴电感与q轴电感相等，上式中用L表示电机的d轴和q轴电感。选取一组新的变量 i'_d 、 i'_q 、 u'_d 、 u'_q 为

$$i'_d = i_d + \frac{\sqrt{3}\psi_f}{L} \quad i'_q = i_q \quad (7)$$

$$u'_d = u_d + \frac{\sqrt{3}\psi_f R_s}{L} \quad u'_q = u_q$$

则式(6)可以表示为

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i'_d \\ i'_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L} & \omega_s \\ -\omega_s & -\frac{R_s}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i'_d \\ i'_q \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} u'_d \\ u'_q \end{bmatrix} \quad (8)$$

将永磁同步发电机本身作为参考模型, 将发电机的电流模型作为可调模型, 通过测量电机的电压 u_d' 和 u_q' 可以计算出电机的电流, 其计算方程为

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{i}_d' \\ \hat{i}_q' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L} & \hat{\omega}_s \\ -\hat{\omega}_s & -\frac{R_s}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_d' \\ \hat{i}_q' \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} u_d' \\ u_q' \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中, \hat{i}_d' 和 \hat{i}_q' 为电机的估计电流。

定义估计电流和实际电流的误差为

$$\begin{bmatrix} e_d \\ e_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{i}_d' - i_d' \\ \hat{i}_q' - i_q' \end{bmatrix} \quad (10)$$

利用 d 轴和 q 轴估计电流与实际电流的误差信号, 设计估计转速的自适应律为

$$\hat{\omega}_s = \int_0^t k_1 (\hat{i}_d' i_q' - i_q' \hat{i}_d') d\tau + k_2 (\hat{i}_d' i_q' - i_q' \hat{i}_d') + \hat{\omega}_s(0) \quad (11)$$

式中: $\hat{\omega}_s$ 为转速估计值; $\hat{\omega}_s(0)$ 为转速初始值; k_1 为积分系数; k_2 为比例系数。根据 Popov 超稳定理论^[25], 可以证明上述方程满足使系统稳定的两个条件。

根据式 (6) ~ 式 (11) 设计的基于 MRAS 的六相永磁同步发电机的转速辨识框图如图 3 所示。该方法仅需要检测电机的电压和电流, 结构简单, 容易实现, 抗干扰性能好。

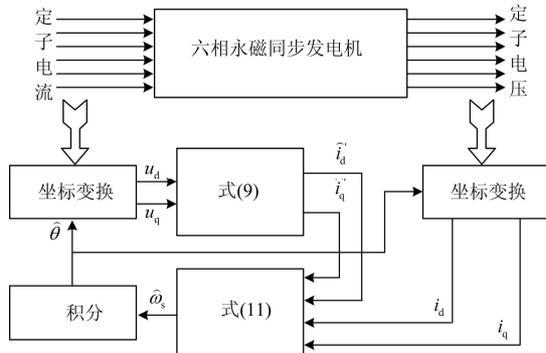


图 3 基于 MRAS 的转速辨识框图

Fig. 3 Structure diagram of speed identification based on MRAS

4 最大功率跟踪控制

由风力机的知识可知^[1], 风力机获得的功率 P 为

$$P = \frac{1}{2} \rho S v^3 C_p(\lambda) \quad (12)$$

其中: ρ 为空气密度; S 为风力机的扫风面积; v 为

风速; $C_p(\lambda)$ 为风能利用系数; λ 为叶尖速比 (Tip Speed Ratio, TSR), 其定义为

$$\lambda = \frac{\omega R}{v} \quad (13)$$

其中: ω 是风力机转速; R 为风力机叶片半径。

根据上述公式可以得出不同风速下定桨距风力机的功率特性如图 4 所示。风力机在不同的风速下, 均存在一个功率最大点。最大功率跟踪 (Maximum Power Point Tracking, MPPT) 就是要在不同的风速下, 控制发电机转速, 使系统工作在最大功率状态下, 即曲线中的最高点。由六相永磁同步发电机的数学模型式 (3)、式 (4) 可知, 通过电机侧变换器控制永磁发电机的电磁转矩就可以很好地控制发电机的转速。

爬山法是一种简单有效的最大功率跟踪方法, 其基本原理可以描述如下: 风速的变化导致机械转矩扰动, 机械转矩扰动带来一个速度变化, 速度变化则引起发电机功率的变化, 如果风力机转速减小而功率变大, 则保持速度减小, 直到功率变动量为 0, 即达到最大功率处, 如图 4 中曲线 II; 如果转速增大时功率增大, 则保持速度增加, 直到功率变动量为 0, 如图 4 中曲线 I。爬山法用离散化公式表达为

$$\omega_{\text{ref}k} = \omega_{\text{ref}(k-1)} + \text{sign}(P_k - P_{k-1}) \text{sign}(\omega_k - \omega_{k-1}) \omega_{\text{step}} \quad (14)$$

式中: $\omega_{\text{ref}k}$ 、 $\omega_{\text{ref}(k-1)}$ 分别为第 k 次和第 $k-1$ 次采样时发电机的转速指令; ω_k 、 ω_{k-1} 分别为第 k 次和第 $k-1$ 次采样时发电机的实际转速; P_k 、 P_{k-1} 分别为第 k 次采样和第 $k-1$ 次采样时系统的功率; ω_{step} 为系统的爬山步长; sign 为符号函数, 其定义为

$$\text{sign}(P_k - P_{k-1}) = \begin{cases} -1 & P_k < P_{k-1} \\ 0 & P_k = P_{k-1} \\ 1 & P_k > P_{k-1} \end{cases} \quad (15)$$

$$\text{sign}(\omega_{mk} - \omega_{m(k-1)}) = \begin{cases} -1 & \omega_{mk} \leq \omega_{m(k-1)} \\ 1 & \omega_{mk} > \omega_{m(k-1)} \end{cases} \quad (16)$$

ω_{step} 是该方法中一个重要的参数, 其值越大, 功率跟踪越快, 但是稳态时的速度抖动也较大; 其值越小, 则功率跟踪越慢, 但稳态时速度较平稳。为了兼有功率跟踪快和稳态时速度平稳的优点, 系统采用变步长爬山法, 其离散化公式为

$$\omega_{\text{ref}k} = \omega_{\text{ref}(k-1)} + \text{sat} \left[\frac{\Delta(P_k - P_{k-1})}{\Delta t} \text{sign}(\omega_k - \omega_{k-1}) \right] \quad (17)$$

式中, sat 为限幅函数, 防止速度指令的波动过大。由于 $\Delta(P_k - P_{k-1})/\Delta t$ 既反映了功率变化的大小, 又反映了功率变化的方向, 还反映了功率变化的快

慢，以此为依据来调整转速，从而使功率控制达到快速而准确。

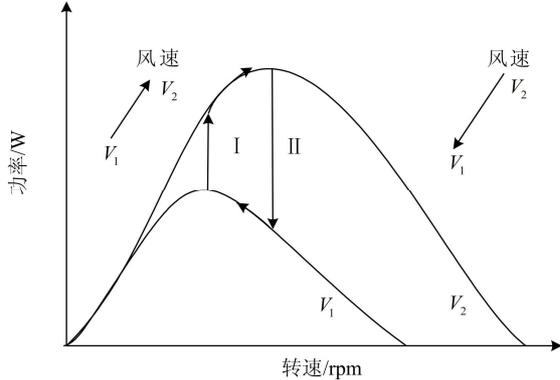


图 4 风力机的功率特性

Fig. 4 Power characteristic of wind turbine

5 实验研究

实验样机的电路拓扑如图 1 所示，采用直流电动机模拟风力机运行来拖动六相永磁同步发电机^[26-27]，两个 DSP 分别控制电机侧变换器和电网侧变换器。实验系统的参数如下。

1) 六相永磁同步发电机

额定功率为 3 kW，额定电压为 380 V，极对数为 10，额定转速为 300 rpm，定子电阻为 4.177 Ω，同步电抗为 9.451 Ω，永磁体磁链为 0.928 Wb。

2) 直流电动机参数

额定功率为 4 kW，额定励磁电压为 180 V，额定电枢电压为 440 V，额定转速为 1500 rpm，电枢电阻为 1.72 Ω。

3) 变换器参数

额定功率为 10 kW，直流环节电容为 2 200 μF，电网侧滤波电感为 2 mH，开关频率为 5 kHz，智能功率模块 (Intelligent Power Module, IPM) 型号为富士电机公司的 7MBP75RA120，DSP 型号为 TI 公司的 TMS320F2812。

图 5 为负载转矩不变，转速指令变化时估计转速与实际转速的对比波形。从图中可以看出，电机转速从 170 rpm 增加到 250 rpm 再减少到 150 rpm 的动态过程中，估计转速能够有效跟踪实际转速，转速估计误差较小。图 6 为转速指令不变，模拟风力机转矩变化时估计转速与实际转速的对比波形。从图中可以看出，转矩从 24 Nm 增加到 69 Nm 再减少到 38 Nm 的动态过程中，估计转速能够有效跟踪实际转速，转速估计误差较小。从上述分析中可以看出，该速度辨识方案辨识误差小，具有良好的动、静态性能。

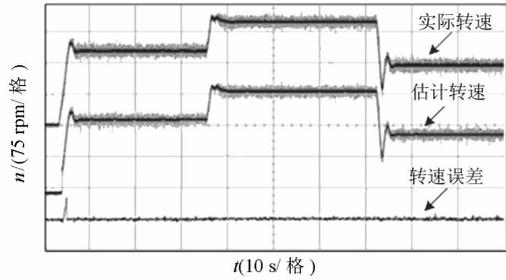


图 5 转速变化时的实验波形

Fig. 5 Experimental waveforms during rotating speed variations

图 7 表示了阶跃式风速变化下 (8~10 m/s)，永磁直驱风力发电系统跟踪最大风能的过程。从图 7 (a) 中可以看出，当风速变化时，发电机转速发生改变，风力机输出的有功功率随之改变，最后稳定为最佳转速，实现了最大功率跟踪控制，该方法功率跟踪快、稳态时转速平稳。该风力机的风能利用

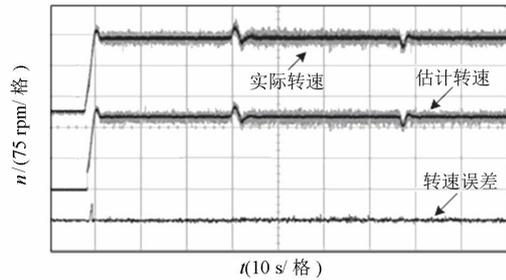
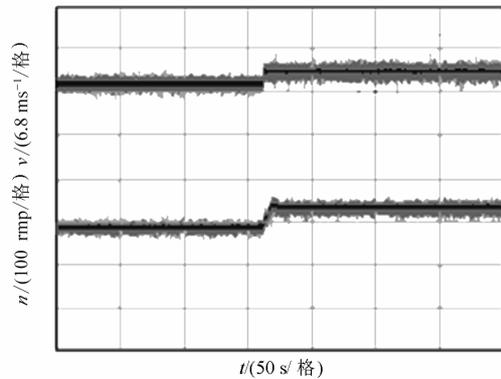
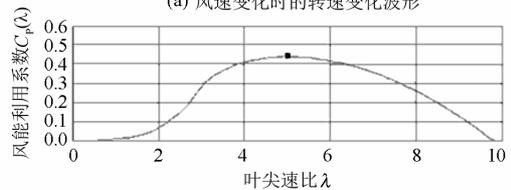


图 6 负载转矩变化时的实验波形

Fig. 6 Experimental waveforms during load torque variations



(a) 风速变化时的转速变化波形



(b) 风力机风能捕获曲线

图 7 阶跃风速变化时的实验波形

Fig. 7 Experimental waveform during wind speed variations

曲线^[1]如图 7 (b) 所示。系统的工作点始终稳定在最大风能捕获点, 即风力发电效率曲线的最高点, 实现了最大风能捕获。

6 结论

本文在分析多相永磁直驱型变速恒频风力发电系统结构的基础上, 推导了六相永磁同步发电机的数学模型, 研究了一种基于模型参考自适应方法的六相永磁同步发电机无速度传感器控制策略。该控制策略将永磁同步发电机本身作为参考模型, 将发电机的电流模型作为可调模型, 辨识永磁同步发电机的转速。该方法结构简单, 容易实现, 抗干扰性能好。本文还研究了基于变步长爬山法的最大功率跟踪控制策略, 该策略具有动态功率跟踪速度快和稳态时速度平稳的优点。实验结果验证了本文理论分析和控制策略的正确性。

参考文献

- [1] 叶杭冶. 风力发电机组的控制技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
YE Hang-ye. Control technology of wind power generation system[M]. Beijing: China Machine Press, 2002.
- [2] 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.
- [3] 刘其辉, 贺益康, 卞松江. 变速恒频风力发电机空载并网控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 6-11.
LIU Qi-hui, HE Yi-kang, BIAN Song-jiang. The investigation of cutting-in control of variable-speed constant-frequency wind-power generator with no-load[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(3): 6-11.
- [4] POLINDER H, VAN DER PIJL F F A, DE VILDER G J, et al. Comparison of direct-drive and geared generator concepts for wind turbines[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2006, 21(3): 725-733.
- [5] GRAUERS A. Design of direct driven permanent magnet generators for wind turbines[D]. Goteborg, Sweden: Chalmers Univ Technol, 1996.
- [6] 李和明, 董淑惠, 王毅, 等. 永磁直驱风电机组低电压穿越时的有功和无功协调控制[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 73-81.
LI He-ming, DONG Shu-hui, WANG Yi, et al. Coordinated control of active and reactive power of PMSG-based wind turbines for low voltage ride through[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 73-81.
- [7] 孟克其劳, 陈虎, 钱春震, 等. 永磁直驱风力发电系统最大功率追踪策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(22): 83-87, 93.
MENG Keqilao, CHEN Hu, QIAN Chun-zhen, et al. Study on maximum power point tracking strategy for direct-driven permanent magnet synchronous generating system[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(22): 83-87, 93.
- [8] 张明锐, 陈洁, 王之馨, 等. 一种新型的永磁同步风力发电机并网系统[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(14): 141-148.
ZHANG Ming-wei, CHEN Jie, WANG Zhi-xin, et al. A new permanent magnet synchronous wind-power generation grid-connected system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(14): 141-148.
- [9] 唐芬, 金新民, 姜久春, 等. 兆瓦级直驱型永磁风力发电机无位置传感器控制[J]. 电工技术学报, 2011, 26(4): 19-25.
TANG Fen, JIN Xin-min, JIANG Jiu-chun, et al. Sensorless control of MW-level direct-drive permanent magnet wind generator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(4): 19-25.
- [10] 张钢, 柴建云, 全恒立, 等. 直驱式风力发电变流系统拓扑方案研究[J]. 电工技术学报, 2011, 26(7): 15-20.
ZHANG Gang, CHAI Jian-yun, QUAN Heng-li, et al. Study of converter system topology for direct-driven wind generation system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(7): 15-20.
- [11] 任碧莹, 同向前, 孙向东. 具有限定功率运行的永磁直驱风力发电并网控制设计[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(2): 87-92.
REN Bi-ying, TONG Xiang-qian, SUN Xiang-dong. Grid-connected control design for directly-driven PM wind generation with limited power operation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(2): 87-92.
- [12] 欧阳红林, 周马山, 童调生. 多相永磁同步电动机不对称运行的矢量控制[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 145-150.
OUYANG Hong-lin, ZHOU Ma-shan, TONG Tiao-sheng. Vector control of multi-phase permanent magnet synchronous motor with asymmetric structure[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 145-150.
- [13] 姚文熙, 胡海兵, 徐海杰, 等. 三电平六相同步电机变频调速技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 24(18): 1-6.

- YAO Wen-xi, HU Hai-bing, XU Hai-jie, et al. Research on techniques of three-level six-phase synchronous motor driver[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 24(18): 1-6.
- [14] 欧阳红林. 多相永磁同步电机调速系统控制方法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2005.
- OUYANG Hong-lin. The research on control method of variable speed system of multi-phase permanent magnetic synchronous motor[D]. Changsha: Hunan University, 2005.
- [15] 田明秀, 王丽梅, 郑建芬. 永磁同步电机无传感器转速和位置控制方案[J]. 沈阳工业大学学报, 2005, 27(5): 518-521.
- TIAN Ming-xiu, WANG Li-mei, ZHENG Jian-fen. Sensorless position and speed control scheme for permanent magnet synchronous motor drives[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2005, 27(5): 518-521.
- [16] 秦峰, 贺益康, 刘毅, 等. 两种高频信号注入法的无传感器的运行研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(5): 116-121.
- QIN Feng, HE Yi-kang, LIU Yi, et al. Comparative investigation of sensorless control with two high frequency signal injection schemes[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(5): 116-121.
- [17] BOLOGNANI S, TUBIANA L, ZIGLIOTTO M. Extended Kalman filter tuning in sensorless PMSM drivers[J]. IEEE Trans on Industry Application, 2003, 39(6): 1741-1747.
- [18] 李鸿儒, 顾树生. 基于神经网络的 PMSM 速度和位置自适应观测器的设计[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(12): 32-35.
- LI Hong-ru, GU Shu-sheng. Neural-network-based adaptive observer of position and speed of PMSM[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(12): 32-35.
- [19] 李永东, 张猛, 肖曦, 等. 永磁同步电机模型参考自适应无速度传感器控制方法[J]. 电气传动, 2004, 34(增刊): 302-306.
- LI Yong-dong, ZHANG Meng, XIAO Xi, et al. Sensorless control of PM synchronous motors based on MRAS method[J]. Electric Drive, 2004, 34(S1): 302-306.
- [20] LYRA R O C, LIPO T A. Torque density improvement in a six-phase induction motor with third harmonic current injection[C] // 36th Industry Applications Conference, Chicago, USA, 2001.
- [21] BOJOI R, LAZZARI M, PROFUMO F. Digital field oriented control for dual three-phase induction motor drives[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2003, 39(3): 752-759.
- [22] ZHAO Yi-fan, LIPO T A. Space vector PWM control of dual three phase machine using vector decomposition[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 1995, 31(5): 1100-1108.
- [23] HADIOUCHE D, RAZIK H, REZZOUG A. Study and simulation of space vector PWM control of double-star induction motors[C] // IEEE International Power Electronics Congress, Acapulco, Mexico, 2000.
- [24] BAKHSHAI A R, JOOS G, JIN H. Space vector PWM control of a split-phase induction machine using the vector classification technique[C] // IEEE Power Electronics Specialist Conference, Charleston, USA, 1998.
- [25] 吴振顺. 自适应控制原理与应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2005.
- [26] 卞松江, 潘在平, 贺益康. 风力机特性的直流机模拟[J]. 太阳能学报, 2003, 24(3): 360-364.
- BIAN Song-jiang, PAN Zai-ping, HE Yi-kang. The imitation of the fan characteristic by the DC motor[J]. Acta Energeiae Solaris Sinica, 2003, 24(3): 360-364.
- [27] 刘其辉, 贺益康, 赵仁德. 交流励磁变速恒频风力发电系统的运行与控制[J]. 电工技术学报, 2008, 23(1): 129-136.
- LIU Qi-hui, HE Yi-kang, ZHAO Ren-de. Operation and control of AC-excited variable-speed constant-frequency wind power generation system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(1): 129-136.

收稿日期: 2014-03-18

作者简介:

胡维昊(1982-), 男, 博士研究生, 研究方向为永磁直驱型变速恒频风力发电; E-mail: huweihao@mail.xjtu.edu.cn

王跃(1972-), 男, 博士, 副教授, 博士生导师, 研究方向为有源电力滤波器, 变速恒频风力发电等;

李明焜(1990-), 男, 硕士研究生, 研究方向为风力发电并网与变流器控制技术。