

A Permanent Magnet Synchronous Generator Model and Its Control Strategy

Jiaxiang Pei¹, Xuesong Chen², Bing Yu³

¹Chengdu Sanxin Electrical Service Company, Chengdu Sichuan

²State Grid Sichuan Hongya Power Company, Meishan Sichuan

³Southwest Petroleum University (SWPU), Chengdu Sichuan

Email: 2564764@qq.com

Received: May 31st, 2015; accepted: Jun. 13th, 2015; published: Jun. 19th, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Permanent magnet synchronous motor (PMSG) control is the key link in the generator set, and it directly relates to the power quality of the generator output. In this paper, through analysis of permanent magnet synchronous wind generator mathematical mechanism, generator voltage, flux and electromagnetic torque are derived respectively using formulas. According to the principle of coordinate transformation, double closed loop vector control strategy based on outer ring speed and current loop control is proposed. The method is simple and convenient, and on the output variable it has a good control effect. And finally this paper establishes the simulation model of the generator side, analyzes the simulation results and verifies the correctness and effectiveness of the control strategy.

Keywords

PMSG, Mathematical Model, Vector Control

一种永磁同步风力发电机模型及其控制策略

裴家祥¹, 陈雪松², 于兵³

¹成都市三新电力服务有限公司, 四川 成都

²国网四川洪雅供电公司, 四川 眉山

³西南石油大学, 四川 成都

Email: 2564764@qq.com

收稿日期：2015年5月31日；录用日期：2015年6月13日；发布日期：2015年6月19日

摘要

永磁同步电机(PMSG)控制是发电机组中最为关键的环节，其直接关系到发电机输出的电能质量。本文通过分析永磁同步风力发电机数学机理，分别对发电机的电压、磁链、电磁转矩以公式进行推导，根据坐标变换原理，提出采用基于外环速度、内环电流控制的双闭环矢量控制策略，该方法简便易行，对输出变量控制效果较好，最后建立发电机侧仿真模型，并分析仿真结果，验证控制策略的正确性和有效性。

关键词

PMSG, 数学模型, 矢量控制

1. 引言

PMSG 与 DFIG 几乎同时出现，但一直没得到很好的发展。近十年，随着原材料和电力电子技术的革新，PMSG 又重新得到重视，目前已大规模商业化生产和应用，而且优势越来越明显。永磁同步风力发电机组具有功能独特的背靠背变频系统，能够实现连续调速恒频的功能，与传统的恒速恒频风力发电系统比较，变速恒频发电机突破了转子和旋转磁场必须完全同步的运行方式，输出电压的频率、幅值和相位也不受转子转速影响[1]。风力发电系统通过励磁控制和变桨调节控制可运行在最佳工作区间，在一个大范围的风速范围内保持在最佳叶尖速比附近，从而保持发电机高效且稳定的输出。

PMSG 新装机容量比例逐年上涨，之所以能得到广泛的应用，是因为其具有以下明显的优势：

(1) 直驱永磁同步风力发电机组可靠性高

PMSG 无电刷和滑环，转子上既无线圈又无其它电力电子元件，转子是由永磁体和铁芯构成一个整体，结构简单，使用寿命较长。另外，转子没有铜损和铁损，过载能力较强，温升高，能够适应恶劣的运行环境。相比传统风力发电机，D-PMSG 直接与风力机耦合，省去了增速齿轮箱，齿轮箱庞大复杂，容易发生故障。据统计，风力发电系统中大多数机械故障都来自齿轮箱，可见直驱永磁发电机组的可靠性会比较高。此外，齿轮箱漏油现象时有发生，D-PMSG 可以避免这些维护，降低了维护频率。

(2) 永磁同步风力发电机效率更高

PMSG 的转子部分利用磁场较高的永磁体代替以往的电磁线圈，永磁体能产生恒定不变的磁场，这样就省去了从外部提供励磁的环节，进而降低了发电系统的切入风速，扩大了系统运行范围，提高了风能利用率和发电效率。尤其在额定风速以下时，实验表明同功率等级的 PMSG 要比 DFIG 的发电量要高，最大时可高出 20% [2]，而风电场大多数情况都工作在这一工况。另外，PMSG 的启动风速最低可达 3 m/s，对于风速较小的盆地或山区也具有一定的应用价值，因此从长远来看，其效率和经济性相当可观。

(3) 永磁同步风力发电机连接电网更友好

永磁同步风力发电机组的整体性较高，发电机在不同负载下的电压畸变率都能保持在一个很小的范围，因此具有良好的电压波形质量。由于风能具有随机性、突变性和间歇性等不可控特点，机端电压难以稳定，如果自身励磁调节能力不足，当电网发生故障时，系统电压会降低，发电机组会自动解列，进而造成更大的破坏。目前并网的大多数风力发电机都存在这一问题，前些年在甘肃发生过几起因风力发电机组低压穿越能力不足而造成的局部大规模停电事故，影响巨大，因此具备低压穿越能力十分重要，也是目前风电场验收的标准之一[3]。而永磁风力发电系统采用自身永磁体励磁，加之风力发电机和电网

之间采用过流能力较强的全功率变换器隔离，其低压穿越性能良好。

2. 永磁同步发电机模型

PMSG 的原始动态模型十分复杂，在做理论研究时，我们通常需要通过坐标变换进行简化，将三相静止坐标变换成两相同步旋转坐标时，为了便于分析，首先做出以下假设[4]：

- (1) 定子绕组三相对称，且空间互相 120° 电角度，磁动势沿气隙正弦分布；
- (2) 忽略空间谐波和磁路饱和现象，自感和互感恒定；
- (3) 导磁系数为常数；
- (4) 不考虑温升对绕组电阻的影响。

根据坐标变换原理可得 dq 坐标系下定子电压方程为

$$\begin{cases} u_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\psi_{sd}}{dt} - \omega_r \psi_{sq} \\ u_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\psi_{sq}}{dt} + \omega_r \psi_{sd} \end{cases} \quad (1)$$

式中 u_{sd} 、 u_{sq} ——d 轴和 q 轴电压分量(V)； i_{sd} 、 i_{sq} ——d 轴和 q 轴定子电流分量(A)； ψ_{sd} 、 ψ_{sq} ——定子磁链 d 轴和 q 轴分量(Wb)。

磁链方程为

$$\begin{cases} \psi_{sd} = L_d i_{sd} + \psi_{rd} \\ \psi_{sq} = L_q i_{sq} + \psi_{rq} \end{cases} \quad (2)$$

式中 L_d 、 L_q ——d 轴和 q 轴定子同步电感分量(H)； ψ_{rd} 、 ψ_{rq} ——d 轴和 q 轴转子磁链分量(Wb)。坐标变换时，当 d 轴与转子永磁体主磁通重合，有以下关系式

$$\begin{cases} \psi_{rd} = \psi_f \\ \psi_{rq} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

联合式(1, 2, 3)可得电压方程和电磁转矩表达式如下

$$\begin{cases} u_{sd} = R_s i_{sd} + L_d \frac{di_{sd}}{dt} - \omega_r L_q i_{sq} \\ u_{sq} = R_s i_{sq} + L_q \frac{di_{sq}}{dt} + \omega_r (L_d i_{sd} + \psi_f) \end{cases} \quad (4)$$

$$T_e = \frac{3}{2} p i_{sq} [\psi_f + (L_q - L_d) i_{sd}] \quad (5)$$

式中 T_e ——发电机电磁转矩(N·m)。

如果是隐极永磁同步风力发电机且气隙均匀(或凸极电机凸极比 $L_q/L_d = 1$)，则 dq 轴上的电感值一样，即有 $L_d = L_q = L$ ，因此根据式 4 可得到电机在 dq 轴下的等值稳态电路图，如图 1 所示。同时，式 5 电磁转矩可进一步简化为

$$T_e = 1.5 p \psi_f i_{sq} \quad (6)$$

3. 永磁同步发电机运行特性

永磁同步发电机的运行特性主要体现在定子电流幅值、频率、相位的灵活调节以及电磁转矩、恒转矩角、单位功率因数、恒功率损耗等性能指标。永磁发电机运行时只要线反电动势幅值的大小低于网侧

直流电压且反电动势与定子频率的比值保持恒定，则可以产生最大的频率，称之为基频；在这样的前提下，发电机的转速称为基速。如果频率大于基频运行，发电机的转速就会超过基速，进而反电动势会超过直流母线电压，在此区域内运行的发电机定子电流和转矩的控制会变得困难。为了使得发电机转速超过基速时能限制反电动势，通常可使共磁链与转速成反比，这种运行称为弱磁工作模式。但是，此时转矩不能维持在基速时对应的转矩，否则发电机会产生较高的损耗且定子电流会超过发电机额定电流。其实，当发电机转速超过基速时，可以采用降低电压转矩使得电磁功率和基速对应的电磁功率相等，进而保护定子电流。

永磁同步发电机运行首先需满足定子电流 i_s 和电压 u_s 如下条件

$$\begin{cases} i_s = \sqrt{i_{sd}^2 + i_{sq}^2} \leq i_{lim} \\ u_s = \sqrt{u_{sd}^2 + u_{sq}^2} \leq u_{lim} \end{cases} \quad (7)$$

式中 i_{lim} ——发电机定子极限电流的最小电流(A); u_{lim} ——发电机和变流器允许并网条件下极限电压的最小电压(V)。由式 4 可知，如果忽略掉暂态变化下定子电阻和电流对发电机的影响，则有

$$\begin{cases} u_{sd} = -\omega_r L_q i_{sq} \\ u_{sq} = \omega_r (L_d i_{sd} + \psi_f) \end{cases} \quad (8)$$

联合式 7 和 8 便可得到电流极限圆和电压极限椭圆如图 2 所示。

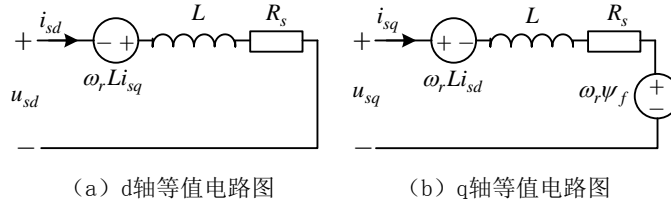


Figure 1. Equivalent circuit of mathematical model for PMSM
图 1. 永磁同步电机等值电路

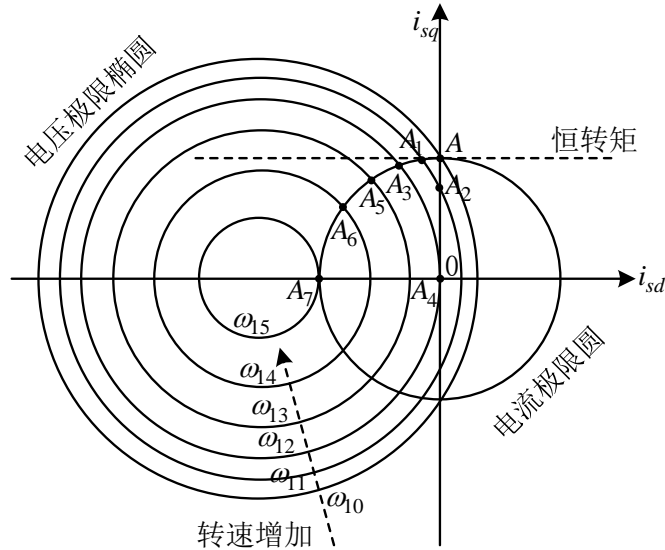


Figure 2. Schematic diagram of the operation of PMSM
图 2. 永磁同步电机运行特性示意图

4. 发电机侧控制策略及仿真分析

4.1. 基于 d 轴零电流的双闭环控制策略

式 5 可以看成由两部分组成：一部分是定子 q 轴电流转矩分量和永磁体自身磁链生成的永磁体转矩 T_{e1} ；另一部分是由凸极效应产生的定子电流励磁分量和转矩分量生成的磁阻转矩 T_{e2} (隐极电机或表贴式电机这部分为 0)。这两部分的转矩大小都与定子电流 i_{sq} 成正比，因此实际上发电机电磁转矩只由定子电流分量 i_{sq} 控制。因此，经综合考虑后，本文 PMSG 控制采用经典的双闭环控制策略，其中内环采用 d 轴零电流控制，外环采用速度控制。该方法容易实现，整个控制结构简单明了，且由于不考虑 d 轴分量，可避免转子永磁体退磁风险。矢量控制分析时，永磁发电机由永磁体励磁，发电机与整流器之间没有无功交换[5]。发电机侧控制框图如图 3 所示。

如图 3 所示，发电机输出三相电流经坐标变换分别转换成 dq 坐标系下的 d、q 轴电流反馈分量 i_{sd} 和 i_{sq} ，该坐标系下的电流分量均为直流。反馈电流与给定电流通过 PI 控制器便能实现无静差控制。另外，通过式 3 可发现，发电机定子电流电压的动静态部分在 dq 坐标轴上存在彼此耦合的关系。因此，在进行矢量控制时，dq 轴上的稳态分量分别形成两个前馈补偿分量与动态分量耦合，以此消除 dq 轴之间的耦合。其中，d 轴耦合补偿量为 $-\omega_r L_q i_{sq}$ ，q 轴补偿量为 $\omega_r (L_d i_{sd} + \psi_f)$ 。

发电机侧变换器为三相全桥可控整流器，开关驱动信号采用电压利用率较高的 SVPWM 调制方式[6]。

4.2. 建模及其仿真分析

根据理论公式在 MATLAB/Simulink 中搭建由三相静止坐标系三相电流向两相同步旋转坐标系直流电流转换的仿真模型，模型如图 4 所示。

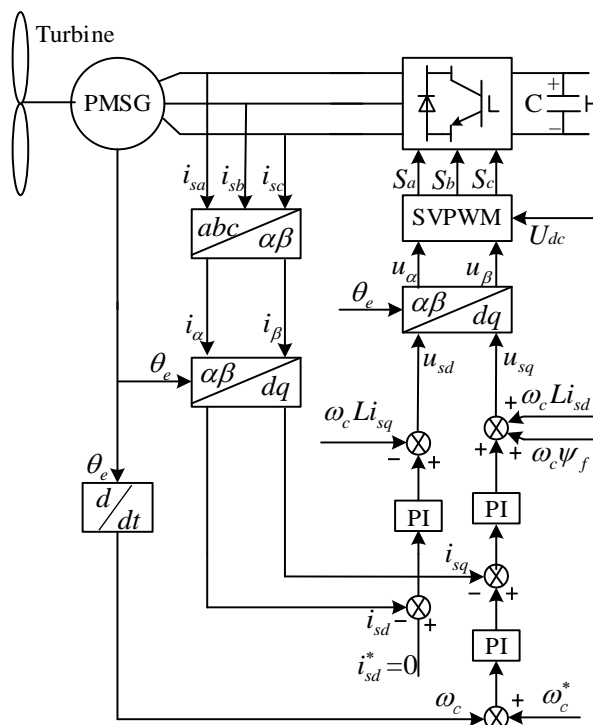


Figure 3. Control structure diagram of permanent magnet synchronous generator for direct drive type

图 3. 直驱型永磁同步风力发电机控制结构框图

根据本文理论分析和提出的控制策略，在 MATLAB/Simulink 中建立 PMSG 机侧控制仿真模型如图 5 所示。发电机具体参数为：额定电压为 830 V，定子电阻 $R_s = 0.2 \Omega$ ，dq 轴电感 $L_d = L_q = 12.6 \text{ mH}$ ，极对数 $p = 12$ ，转动惯量 $J_g = 5 \times 10^3 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ ，发电机旋转时的摩擦系数忽略不计。

本文交流侧电感 $L_s = 3 \text{ mH}$ ，直流控制电压 $U_{dc} = 400 \text{ V}$ ，电容 $C = 1880 \mu\text{F}$ ，等效负载电阻 $R_{eq} = 15 \Omega$ 。如图 6 为 PMSG 转速响应波形以及 dq 坐标系下电流分量仿真图。在仿真时间 0.4 秒处给定一个风速变化扰动，风速从 6.8 m/s 突变到 7.5 m/s，此时发电机转速从 868 rad/min 提升到 1200 rad/min；dq 坐标系下的电流分量均为直流，从仿真波形可以看出基于 d 轴零电流控制策略正确，当发电输入转矩突变时，q 轴电流 i_q 能快速响应，d 轴反馈电流 i_d 始终保持为零。

系统中其它参数不发生改变的前提下，风速给定值为 12 m/s，即发电机运行在额定状态。在发电机交流侧分别加入两组不同参数值的电感，加入电感大小 $L_{sg1} = 3 \text{ mH}$ 和 $L_{sg2} = 4 \text{ mH}$ ，图 7 为不同电感值对直

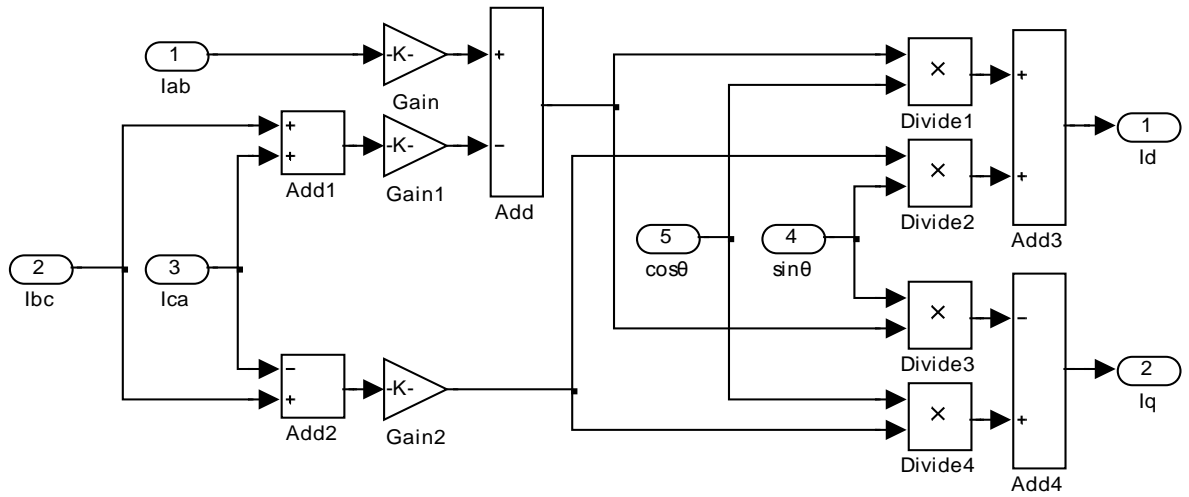


Figure 4. Simulation model of coordinate transformation
图 4. 坐标变换仿真模型

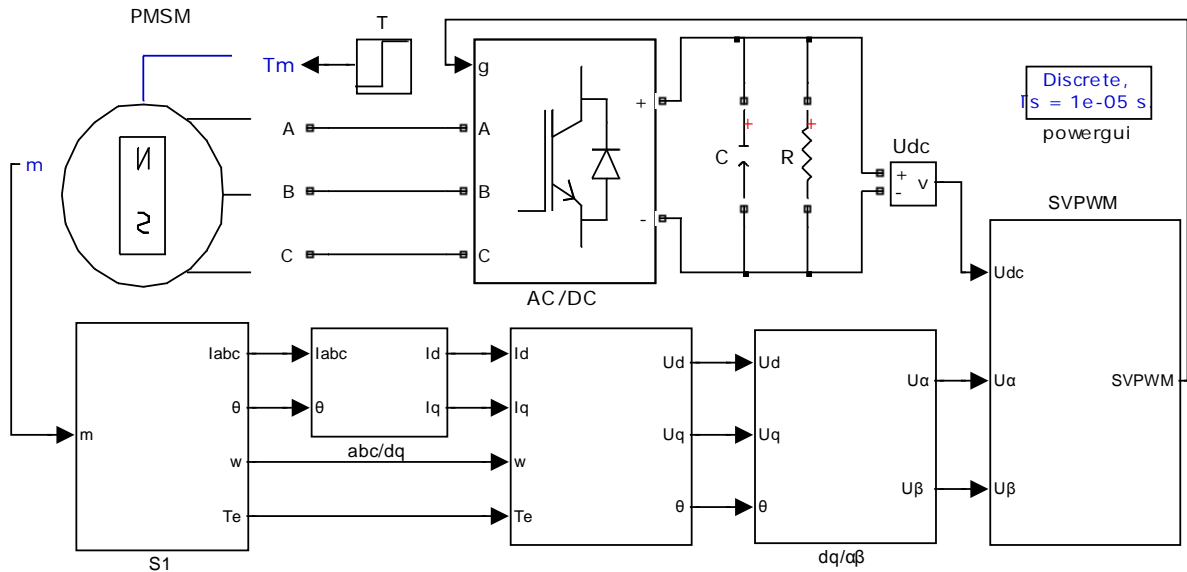


Figure 5. Simulation model of the permanent magnet synchronous wind turbine
图 5. 永磁同步风力发电机组机侧控制仿真模型

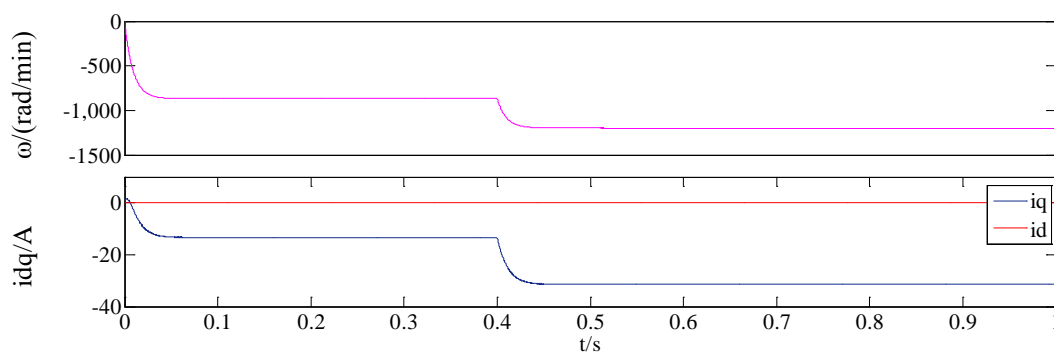


Figure 6. Simulation of generator speed and current

图 6. 发电机转速和电流分量仿真波形

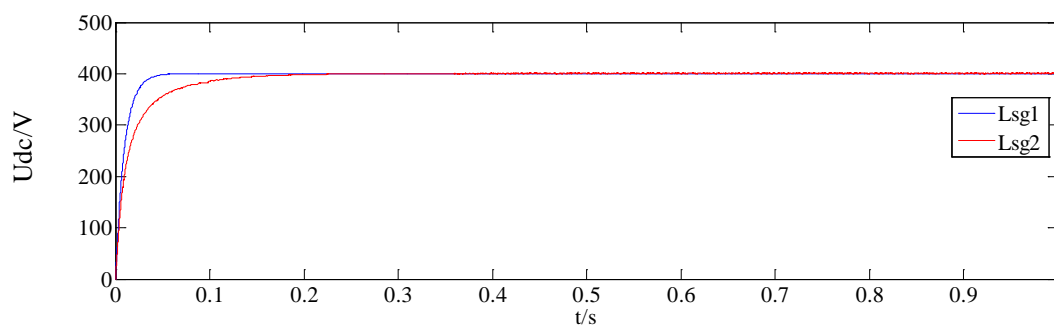


Figure 7. Influence of AC side inductance on DC voltage

图 7. 交流侧电感变化对直流电压影响

流侧电压的影响。从仿真图可以看出，交流侧电感的取值直接影响直流母线电压，电感取值较小时电压的跟随速度较好，响应较快，稳定的越快；相反，当增大电感值时，电压信号响应速度较慢，需要稳定的时间越长。但同时，电感较大相对电感小时电压纹波较小，因此选取一个合适的电感对直流电压的效果影响较大。

5. 结论

由于永磁同步风力发电机内部结构复杂，因此本文基于假设前提下，将发电机数学模型经过坐标变换的形式进行简化，得出 dq 同步旋转坐标系下的数学关系。经分析，PMSG 电磁转矩大小只与 q 轴电流分量有关，与 d 轴电流分量无关。因此，为减小 d 轴电流分量对电磁转矩带来的影响，本文采用了基于 d 轴零电流的双闭环矢量控制策略，最后通过搭建模型，进行了仿真分析验证。结果表明：发电机转速跟踪效果良好，整流后直流电压具有较强稳定性，说明本文控制策略效果明显，能达到预期的目的。

参考文献 (References)

- [1] 屠富军, 何飞楚, 成博, 等 (2013) 双馈感应电机风力发电系统的控制策略研究. *电力电子技术*, **5**, 43-45.
- [2] 符荣, 窦满峰 (2012) 离网型小功率直驱永磁同步风力发电机设计与有限元仿真. *微特电机*, **7**, 23-25, 32.
- [3] 冉然 (2011) 并网风电场无功补偿策略研究. 华北电力大学, 北京.
- [4] Li, S.H., Haskew, T.A., Swatloski, R.P., et al. (2012) Optimal and direct-current vector control of direct-driven PMSG wind turbines. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **27**, 2325-2337.
- [5] 尹明, 李庚银, 张建成, 等 (2007) 直驱式永磁同步风力发电机组建模及其控制策略. *电网技术*, **15**, 61-65.
- [6] 张崇巍, 张兴 (2005) PWM 整流器及其控制. 机械工业出版社, 北京.