

直驱式混合励磁风力发电系统控制策略的研究

赵梅花^{1,2}, 阮毅¹, 杨勇¹, 叶斌英¹

(1. 上海大学机电工程与自动化学院, 上海 200072; 2. 洛阳理工学院, 河南 洛阳 471023)

摘要: 介绍了一种新型的基于混合励磁同步发电机的直驱式风力发电系统, 提出了一种基于矢量控制的新型控制策略及其实现方法。建立了混合励磁同步发电机和风机的数学模型, 通过控制混合励磁同步发电机的励磁电流来稳定三相并网逆变器的直流母线电压, 通过控制混合励磁同步发电机的转速来实现最大风能跟踪。网侧变换器采用电网电压定向的矢量控制, 实现了dq轴电流解耦控制。采用Matlab/Simulink工具箱, 建立了该系统的仿真模型, 在不同条件下进行了仿真。仿真结果表明, 在风速变化时, 通过调节励磁电流, 在保持直流母线电压不变的同时, 系统可有效地实现最大风能跟踪和逆变并网, 从而验证了该控制方法不仅算法简单有效, 而且便于实现。

关键词: 风力发电; 混合励磁; 矢量控制; 最大风能跟踪; 控制策略

Control strategy study on direct-driven type hybrid excitation wind power system

ZHAO Mei-hua^{1,2}, RUAN Yi¹, YANG Yong¹, YE Bin-ying¹

(1. School of Mechatronics Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China;
2. Luoyang Institute of Science and Technology, Luoyang 471023, China)

Abstract: A novel direct-driven type wind power generation system based on hybrid excitation generator is introduced in this paper. A new control strategy based on vector control and achieving methods are proposed. First of all, the mathematical models of the hybrid excitation synchronous generator and wind turbine are established. Then the DC bus voltage of three-phase grid-connected inverter is stabilized by controlling the excitation current of hybrid excitation generators and the maximum wind speed tracking is achieved by controlling the speed of hybrid excitation generators. The grid-connected inverter is controlled using grid voltage-oriented vector to realize the decoupling control of dq axis current. Finally, the system simulation model is established using Matlab / Simulink. Simulation results show this system can achieve peak wind power point tracking by regulating the excitation current when wind speed changes and can keep DC bus voltage in constant. It is not only simple but also easy to implement by using this control strategy.

Key words: wind power generation; hybrid excitation; vector control; peak wind power point wind tracking; control strategy

中图分类号: TM614 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)12-0019-05

0 引言

风能作为一种清洁的可再生能源, 越来越受到世界各国的重视。风能有可能成为世界未来最重要的替代能源。风力发电发展到目前阶段, 其性价比正在形成与煤电、水电的竞争优势, 大力发展风力发电已成为能源可持续发展战略最现实的选择。

风力发电要求系统结构简单、成本低、运行可靠, 能最大限度地捕捉风能。目前, 用于风力发电的变速恒频发电系统有多种, 其典型的是异步双馈

风力发电系统、电励磁风力发电系统和直驱式风力发电系统。双馈异步风力发电系统的优点是系统成本低, 其缺点是需要故障率高的减速齿轮箱, 可靠性低; 电励磁同步发电机系统的优点是调节电励磁电流可直接控制母线电压, 其缺点是需要故障率高的齿轮箱, 且需配备一套容量与系统额定容量相当的变压器, 体积大, 成本高; 直驱式永磁同步风力发电机系统中, 电机采用多极发电机与叶轮直接连接进行驱动的方式, 省去了减速齿轮箱, 能实现最大功率跟踪, 风能捕捉范围大, 可靠性和效率较高, 但是由于其磁场不可控, 风能的最大功率跟踪控制方法都是通过改变母线电流来改变负载转矩, 使得发电机稳定运行于最大功率点对应的转速。这导致了PWM整流器的开关器件多, 器件损耗大,

基金项目: 台达环境与教育基金会《电力电子科教发展计划》资助(DRES2007002)

控制复杂。

近年来广受关注的混合励磁同步发电机^[1-3]集电励磁同步发电机和永磁同步发电机的优点于一体,该系统采用混合励磁发电机和风轮机直接相连,由于发电机的气隙磁场由永磁体和电励磁共同产生,通过调节电励磁绕组中直流励磁电流来调节气隙磁场的大小、实现磁场平滑可调。它具有磁场可调、转矩密度高、效率高等优点,特别适合于恒功率、宽调速驱动或恒压发电等场合,是风力发电系统中实现最大跟踪控制方法的一条有效途径。

最大风能跟踪是风力发电的基本问题。对于直驱式风力发电系统,现有不同的控制策略被提出,文献[4]分析了典型的基于永磁同步电机的矢量控制并网系统结构和最大风能跟踪方法,利用可控的整流桥、逆变桥分别控制机侧获取最大风能和网侧并网逆变,中间通过直流母线进行联系,可以实现并网逆变和最大风能跟踪的目的,但需要两套大功率变流器。文献[5]提出了不添加整流桥实现最大风能跟踪的控制方法,使系统更加稳定,但是控制方法复杂。文献[6]和文献[7]各自提出了在直流母线上添加 Boost 电路进行最大风能跟踪的方法,拥有良好的跟踪性能,但是 Boost 电路限制了系统的功率。

由于永磁电机本身励磁不可控,为了达到捕获最大风能的目的,上面提到的这些基于永磁同步电机的最大风能跟踪方法都需要在主电路上添加电力电子装置辅助实现最大风能跟踪。

本文主要介绍了一种新型的基于混合励磁同步发电机的直驱式风力发电系统。针对该系统的特点,在混合励磁发电机和风机数学模型的基础上,提出了一种基于矢量控制的新型控制策略,并在 Matlab/Simulink 软件平台上,对系统的最大风能捕捉能力进行了仿真分析。仿真结果表明,在不同风速下,该控制策略可以较好地维持输出电压恒定,实现并网逆变和最大风能跟踪。

1 直驱式混合励磁风力发电系统描述

混合励磁风力发电系统如图 1 所示,由风轮机、混合励磁发电机、不可控整流桥、网侧逆变器等组成。该系统采用多极少槽的混合励磁发电机与风轮机直接相连,避免使用故障率很高的减速齿轮箱,采用小容量励磁调节装置代替大容量的主回路直流调节装置,有效地降低了成本,提高了系统的效率和可靠性。

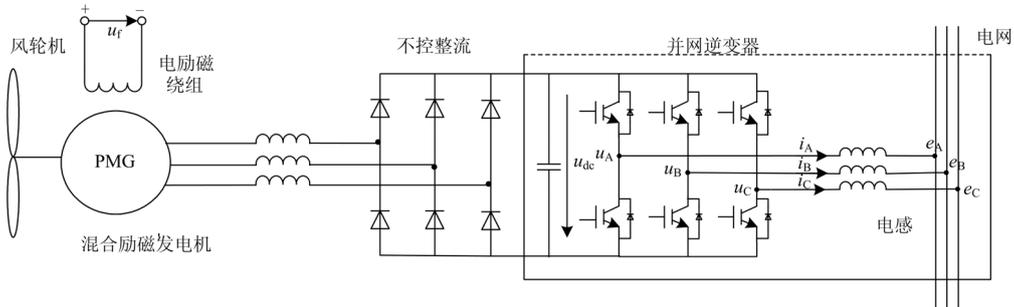


图 1 直驱式风力发电系统的原理图

Fig.1 Direct-driven wind power generation system

2 混合励磁发电机的数学模型

虽然混合励磁发电机的结构比较特殊,但从电磁关系的角度来看,混合励磁电机与普通永磁同步发电机相比,仅仅多一个可以调节电流的励磁绕组,因此仍可以采用 dq 坐标系来分析混合励磁电机。由于定子坐标系下的混合励磁电机的方程是一组与转子瞬时位置有关的非线性微分方程,只能采用与转子同步转速旋转的 dq 坐标系的变换来消除微分方程中的这种非线性关系。

取由定子绕组端点流入电机中心方向作为定子各相电流的参考正方向,绕组磁链 ψ 和电流 i 的正方向符合右手螺旋法则,永磁体产生的主极磁通

方向取为 d 轴的正方向, q 轴超前 d 轴 90°电角度。按此可得:

电枢绕组和励磁绕组的磁链方程为:

$$\begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \\ \psi_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 & M_f \\ 0 & L_q & 0 \\ 3M_f/2 & 0 & L_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \psi_{pm} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: L_d 、 L_q 分别为直轴和交轴电感; M_f 为励磁绕组与电枢绕组互感的幅值; L_f 为励磁绕组自感; ψ_{pm} 为永磁体匝链电枢绕组的磁链幅值。

电压方程为:

求，分别确定最大风能捕捉时需要的发电机给定角速度($\omega = \frac{\lambda_{opt} V_{wind}}{R}$)和感应电势 e_a ，当电机实际角速度下降时，需要助磁，即增加励磁电流的反馈分量通过图 3 以维持输出电压恒定，实现并网逆变；反之，转速上升时，需要去磁，即减小励磁电流的反馈分量通过图 3 以维持输出电压恒定，实现并网逆变。

5 仿真研究

5.1 仿真模型

为了验证直驱式混合励磁风力发电系统最大风能跟踪控制策略可行性和有效性，运用 Matlab/Simulink 软件进行仿真分析。开始风速为 9 m/s，0.6 s 时为 12 m/s，1 s 后为 10 m/s。

5.2 仿真结果分析

借助于仿真模型，依据风能最大跟踪的控制策略，系统仿真曲线如图 4~10 所示。

图 4 中，开始风速为 9 m/s，0.6 s 时为 12 m/s，1 s 后为 10 m/s。由图 5 可知，当风速发生变化时，发电机的转速也跟着变化，实现了最大风能跟踪；图 6 表示，当风速变化的过程中，母线侧电压基本维持在 650 V 左右，实现了直流母线电压的恒定；图 7 中，为了很清楚地表明电压和电流的相位关系，图中电压幅值由实际值缩小 100 倍，电流为实际值。在 0.6 s 时，风速变大，A 相电压幅值不变，A 相电流幅值变大，A 相输出功率增大；在 1 s 时，风速变小，A 相电压幅值不变，A 相电流幅值变小，A 相输出功率减小。从而实现了 A 相输出功率随风速的变化而变化；图 8 中，当风速变化的过程中，风能转换系数基本稳定在 0.46 左右，实现了最大风能跟踪；图 9 中，在 0~0.6 s 内，风速最小，并网逆变器输出功率最小；在 0.6~1 s 内，风速最大，并网逆变器输出功率最大；1 s 后风速变小，并网逆变器输出功率变小。实现了最大功率跟踪。

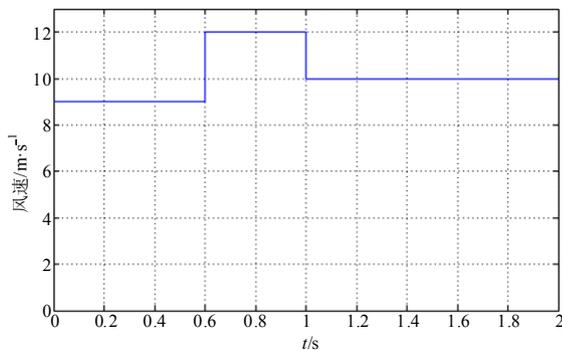


图 4 风速随时间的变化关系

Fig.4 Changing relationship between wind speed and time

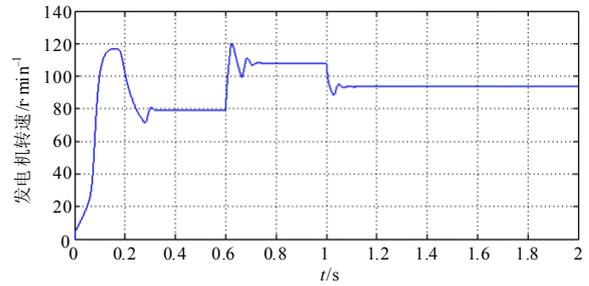


图 5 发电机转速随风速的变化关系

Fig.5 Changing relationship between generator speed and wind speed

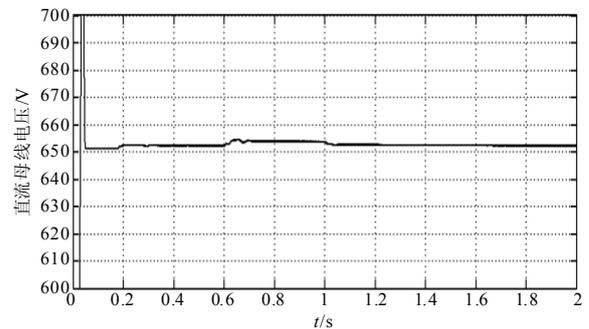


图 6 直流母线电压

Fig.6 DC bus voltage

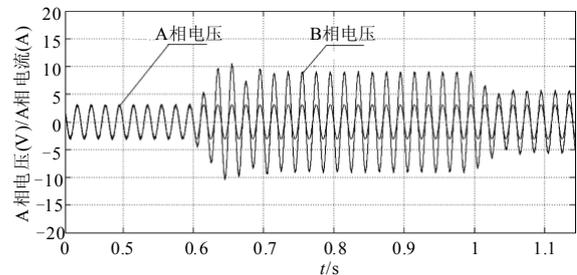


图 7 并网逆变器功率因数为 1 时的 A 相输出电压/电流逆变波形

Fig.7 Waveforms of A phase voltage and A phase current when grid- inverter power factor is 1

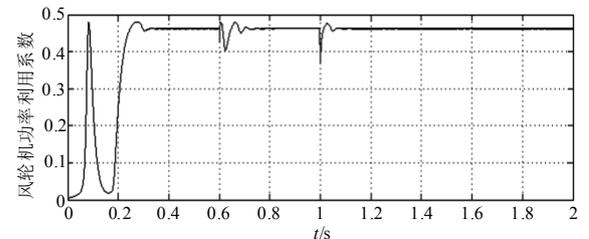


图 8 实现最大风能跟踪时风能转换系数

Fig.8 Wind energy conversion factors when tracks the peak wind energy

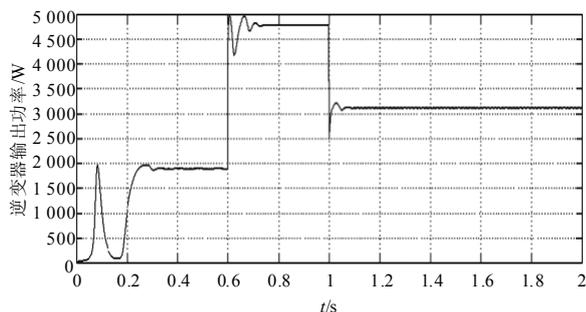


图9 并网逆变器最大输出功率跟踪

Fig.9 Grid inverter maximum output power tracking

仿真结果表明,在风速变化时,通过调节励磁电流,在维持发电机母线电压不变的同时,实现了最大风能跟踪和并网逆变,控制方法简单有效,便于实现。

6 结论

本文主要介绍了一种新型的基于混合励磁同步发电机的直驱式风力发电系统。针对该系统的特点,在混合励磁发电机和风机数学模型的基础上,提出了一种基于矢量控制的新型控制策略,并在Matlab/Simulink软件平台上,对系统的最大风能捕捉能力进行了仿真分析。仿真结果表明,在不同风速下,该控制策略可以较好地维持输出电压恒定,实现并网逆变和最大风能跟踪。

参考文献

- [1] Tapia J A, Leonardi F, Lipo T A. Consequent-pole permanent magnet machine with field weakening capability[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2003, 39 (1): 1704-1709.
- [2] ZHANG Hong-jie, TANG Ren-yuan. Theory and design of hybrid excitation permanent magnet synchronous generators[C]//International Conf on Electrical Machines and System. Shenyang: 2001.898-900.
- [3] 黄苏融, 张琪, 谢国栋, 等. 《多重电枢混合励磁直驱式风力发电系统》[P]. 中国发明专利申请, 2007-03-10.
HUANG Su-rong, ZHANG Qi, XIE Guo-dong, et al. Multiple armature hybrid excitation direct- driven wind

- power generation system[P]. China's Invention Patent Applications, 2007-03-10.
- [4] LI Shu-hui, Haskew T A. Characteristic study of Vector-controlled direct driven permanent magnet synchronous generator in wind power generation[C]// Power Engineering Society General Meeting. 2008. 1-9.
- [5] Srighakollapu N, Sensarma P S. Sensorless maximum power point tracking control in wind energy generation using permanent magnet synchronous generator[C]// Industrial Electronics 34th Annual Conference of IEEE. 2225- 2230.
- [6] Esmaili R, Xu L, Nichols D K. A new control method of permanent magnet generator for maximum power tracking in wind turbine application[C]//Power Engineering Society General Meeting. California(USA): 2005. 2090-2095.
- [7] CHEN Yi-guang, WANG Zhi-qiang, et al. A control strategy of direct driven permanent magnet synchronous generator for maximum power point tracking in wind turbine application[C]//International Conference on Electrical Machines and Systems. 2008. 3921-3926.
- [8] 李晶, 王伟胜, 宋家骅. 变速恒频风力发电机组建模与仿真[J]. 电网技术, 2003, 27 (9): 14-17.
LI Jing, WANG Wei-sheng, SONG Jia-hua. Modeling and dynamic simulation of variable speed wind turbine[J]. Power System Technology, 2003, 27 (9): 14-17.
- [9] 苑国锋, 柴建云, 李永东. 变速恒频风力发电机组励磁变频器的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (8): 90-94.
YUAN Guo-feng, CHAI Jian-yun, LI Yong-dong. Study on excitation converter of variable speed constant frequency wind generation system[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25 (8): 90-94.

收稿日期: 2009-08-20; 修回日期: 2009-10-21

作者简介:

赵梅花(1966-),女,副教授,博士研究生,研究方向为风力发电; E-mail: zhaomh2009@yahoo.cn

阮毅(1955-),男,教授,博士,博士生导师,研究方向为电力电子与机电传动;

杨勇(1981-),男,博士,研究方向为风力发电。