

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.09.021

SRG 风力发电系统最大风能追踪控制研究^{*}

刘 恒, 潘再平^{*}

(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要:针对在实验室条件下实现 SRG 风力发电系统的最大风能追踪控制的问题,对风力机的运行特性及其模拟实现方案、开关磁阻电机的工作原理及其控制方法等方面进行了研究,并对风力发电系统中实现最大风能追踪的控制策略进行了介绍,提出了基于转速反馈的 SRG 发电系统最大风能追踪控制方案,同时对直流电机进行了转矩控制以实现风力机输出特性的模拟。在 SRG 风力发电系统平台上对风力机模拟系统进行了测试评价,并进行了变风速条件下的最大风能追踪试验。研究结果表明,直流电机能够有效模拟风力机的输出特性,控制简单,抗干扰能力强,基于转速反馈的 MPPT 控制方法能够在风速变化时快速调节 SRG 输出,准确地实现最大风能跟踪。

关键词:开关磁阻发电机;风力发电系统;风力机特性模拟;最大风能追踪

中图分类号:TM615;TP24

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2014)09-1196-05

MPPT control for wind power generation system using switched reluctance generator

LIU Heng, PAN Zai-ping

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Aiming at solving the problems of maximum power point tracking (MPPT) control of switched reluctance generator (SRG) wind generation system in laboratory, research on output characteristics of wind turbine and its imitation schemes, operation principle of SRG and its control methods were carried out, and MPPT control strategies of wind power generation system were introduced. A MPPT control strategy based on speed feedback of SRG generation system was proposed. Meanwhile, wind turbine was imitated by DC motor using torque control. Both the wind turbine imitation system and the MPPT control were tested under variable wind conditions. The results indicate that the DC motor can imitates the wind turbine effectively and the MPPT control method can achieve maximum wind power tracking accurately.

Key words: switched reluctance generator (SRG); wind power generation system; imitation of wind turbine; maximum power point tracking (MPPT).

0 引 言

开关磁阻发电机 (SRG) 具有结构简单、成本低、控制灵活、容错能力高等优良特性^[1], 在风力发电领域

显示出良好的发展前景^[2]。

文献[3]研究了 SRG 风力发电系统最大风能追踪的控制策略,通过仿真验证了在风速变动情况下通过控制发电机输出功率可以调节电磁转矩和转速,追踪

收稿日期:2014-05-08

基金项目:国家高技术研究发展计划(“863 计划”)资助项目(2011AA050204)

作者简介:刘 恒(1989-),女,湖北襄阳人,主要从事开关磁阻电机方面的研究. E-mail:liuheng0627@126.com

通信联系人:潘再平,男,教授,博士生导师. E-mail:panzaiping@zju.edu.cn

最大风能。文献[4]以非线性 SRG 仿真模型为基础,采用转速反馈控制方式实现了任意风速下的最大风能追踪。文献[5-6]采用功率扰动法,其中文献[6]提出了一种采用变步长的功率扰动法实现最大风能追踪,但是扰动量的设计比较困难,设计不当会影响系统的响应速度,甚至产生振荡。

本研究设计一套 SRG 风力发电系统的实验平台,利用直流电动机对风力机的输出特性进行模拟,并且采用转速反馈方案对 SRG 发电系统进行最大风能跟踪(Maximum Power Point Tracking,简称 MPPT)控制,在实验室环境下实现 SRG 风力发电系统的 MPPT 控制。

1 SRG 风力发电系统

SRG 风力发电系统主要由风力机、SRG、功率变换器和控制电路 4 个部分构成,在实验室条件下,风力机采用直流电动机进行模拟,其系统结构如图 1 所示。

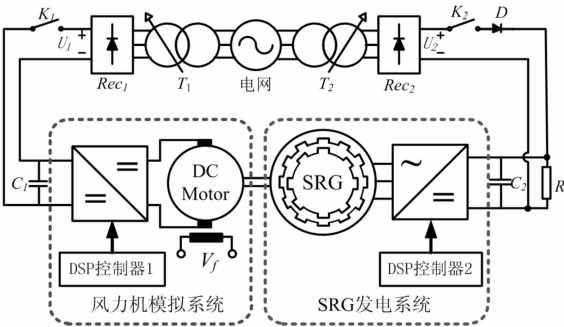


图 1 SRG 风力发电系统

1.1 SRG 工作原理

SRG 是风力发电系统中机电能量转换的核心环节,其运行分为励磁和发电两个阶段,通过控制绕组相电流可调节 SRG 的输出功率。

SRG 发电运行典型相电流波形如图 2 所示。励磁阶段,电源给电机绕组励磁,绕组电流上升,电能转换为磁场储能。发电阶段,绕组相电流通过续流二极管

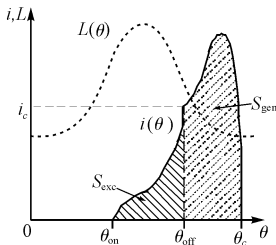


图 2 SRG 发电运行典型相电流

$\theta_{on}, \theta_{off}$ —励磁区间的导通角和关断角

向母线回馈能量,机械能以磁场储能为媒介转换为电能输出。在母线电压 u 和电机角速度 ω 恒定情况下,SRG 输出功率的大小与相电流在励磁、发电区域的幅值和宽度相关,关断时刻励磁电流越大,发电区间绕组相电流上升越多,输出功率越大。

1.2 风力机的特性

风力机作为捕捉风能并转化为机械能的关键部件,有其自身的输出特性。根据贝兹理论,风力机从风中捕获的 P_m 为^[7-8]:

$$P_m = \frac{1}{2} \rho S C_p v^3 \tag{1}$$

风力机输出机械转矩 T_m 为^[7,8]:

$$T_m = \frac{1}{2} \rho \pi v^2 R^3 C_T \tag{2}$$

式中: ρ —空气密度; v —风速; S —风轮扫风面积; C_p —风力机的风能利用系数,与桨距角 β 和叶尖速比 λ 有关; C_T —风力机的转矩系数, $C_T = C_p / \lambda$ 。其中:叶尖速比 $\lambda = \omega_r R / v$, ω_r —叶片旋转角速度, R —风轮半径。

风力机在不同风速下的输出功率曲线如图 3 所示。

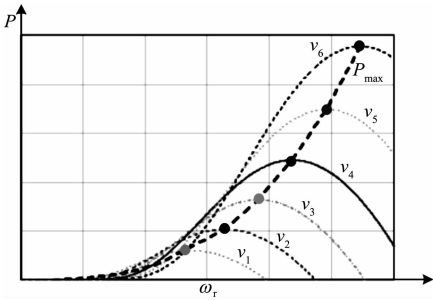


图 3 风力机输出特性曲线

在桨距角 β 一定时,存在最佳叶尖速度比 λ_{opt} ,使得 C_p 达到极大值 C_{pmax} ,此时风力机运行在最佳角速度 ω_{opt} ,输出此风速下的最大功率 P_{max} ^[7-8]:

$$P_{max} = \frac{1}{2} \rho S C_{pmax} \left(\frac{\omega_r R}{\lambda_{opt}} \right)^3 = K_{opt} \cdot \omega_r^3 \tag{3}$$

2 基于直流电机的风力机模拟

通过控制直流电机的电枢电流可直接控制其电磁转矩,控制简单,抗干扰能力强,适用于小型风力机的模拟。

2.1 直流机的特性

直流电机的稳态数学模型为^[9]:

$$\begin{cases} u_{dcm} = i_{dcm} R_a + e_a \\ e_a = C_e \varphi \omega_m \\ T_{de} = C_t \varphi i_{dcm} \end{cases} \quad (4)$$

式中： C_e —电动势常数； C_t —转矩常数； $C_e = C_t$ ； Φ —主磁通； T_{de} —电磁转矩； ω_m —转子角速度； R_a —电枢电阻； e_a —绕组反电势； u_{dcm} —电枢端电压。

若忽略各种损耗，直流电机输出机械功率 P_{do} 等于电磁功率 P_e ，机械转矩 T_{do} 等于电磁转矩 T_{de} ：

$$\begin{cases} P_{do} = C_e \varphi (u_{dcm} - C_e \varphi \omega_m) \frac{\omega_m}{R_a} \\ T_{do} = \frac{C_t \varphi (u_{dcm} - C_e \varphi \omega_m)}{R_a} \end{cases} \quad (5)$$

直流电动机运行特性曲线如图 4 所示。电枢端电压 u_{dcm} 对直流电动机输出功率的影响与风速 v 对风力机输出功率的作用相似，因而改变 u_{dcm} 可以不同风速下风力机的输出功率/转矩特性。

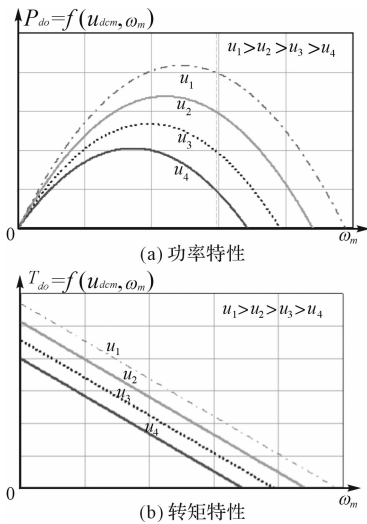


图 4 直流电机运行特性曲线

2.2 风力机模拟控制

本研究采用转矩控制方案，通过控制 i_{dcm} 可直接调节 T_{do} ，实现风力机转矩特性的模拟，具有良好的动态性能。

采用转矩控制方案进行风力机特性模拟的控制框图如图 5 所示，具体过程如下：

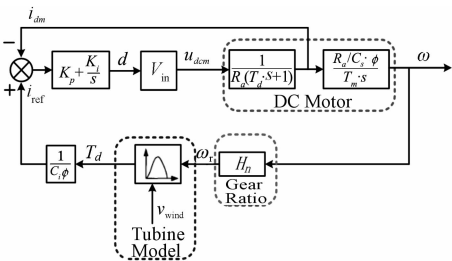


图 5 模拟风力机的直流电机控制框图

(1) 根据模拟风速 v 、风力机角速度 ω_r 和风力机的转矩特性计算出风力机的输出转矩 T_d 。其中， $\omega_r = \omega_m / H_n$ ， H_n 为齿轮变速箱的变比。

(2) 根据 $i_{ref} = T_d / C_t \varphi$ 计算出直流电机的电流参考值 i_{ref} 。

(3) 通过电流 PI 调节器控制 IGBT 导通的占空比，从而调节直流电机的电流 i_{dcm} ，控制转矩输出。

3 SRG 最大风能追踪控制

为了获得最佳风能捕获效果，SRG 发电系统需要在风速改变时调整风力机转速，保持最佳叶尖速比，使风力机工作在最佳功率曲线，捕获相应风速下的最大风能，实现最大风能追踪 (Maximum Power Point Tracking, 简称 MPPT)。

目前风力发电系统中使用的 MPPT 控制方案主要分为风速跟踪控制、转速反馈控制、功率扰动控制 3 种。本研究采用转速反馈控制方案，该方案利用风力机的转速检测代替风速检测，只需要知道其叶尖比 λ 和风机的利用系数 C_p ，即可保证风力机运行在最大功率点附近，系统简单可靠，适用于各类风力发电系统^[10-11]。

基于转速反馈方案的最大风能追踪示意图如图 6 所示，实线是不同风速下风力机输出功率特性曲线，虚线是风力机的最佳功率曲线 $P_{max} - \omega_r$ 。以 $P_{max} - \omega_r$ 为界，风力机的所有运行状态可以分为 3 个区域： P_{max} 左侧区域、 P_{max} 区域和 P_{max} 右侧区域。假设此时风速为 v_3 ，风力机运行在左侧区的 A 点，则其最大风能追踪过程如下：

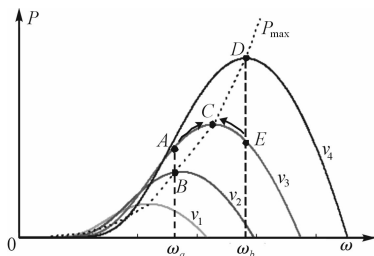


图 6 最大风能追踪示意图

(1) 根据风力机 A 点的角速度 ω_a 和风力机最大输出功率计算公式 (4)，得到最佳角速度为 ω_a 的理论最大输出功率 B 点作为 SRG 发电系统的参考功率 P_{ref} 。若忽略发电系统损耗， P_{ref} 小于 SRG 的发电功率 P_{srg} 。

(2) 通过对 SRG 发电系统进行闭环调节，发电功

率会减小至参考值 P_{ref} , 由于机械时间常数较大, 可认为在 SRG 的短暂调节过程中电机的角速度还未发生变化。

(3) 此时, SRG 的发电功率 $P_{\text{srg}} = P_{\text{ref}} = P_B$, 小于风力机 A 点的输出功率 P_A , 风力机的角速度会升高, 工作点沿着曲线 AC 向 C 点移动。SRG 的参考功率也会相应增大, P_{ref} 沿着 BC 相 C 点移动。

(4) 直至风力机输出功率与 SRG 发电功率在 C 点达到平衡, 即 $P_{\text{srg}} = P_{\text{ref}} = P_C$, 系统稳定工作在 C 点, 风力机输出风速 v_3 下的最大功率。

而当风力机运行在右侧区, 如 E 点时, 其最大风能追踪过程同左侧区类似。

根据以上 MPPT 控制方案得到的 SRG 发电系统最大风能追踪的控制系统框如图 7 所示。

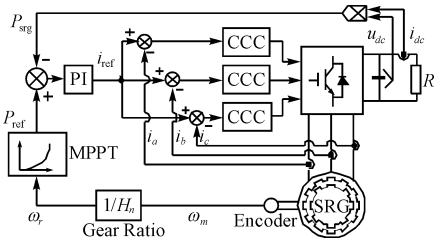


图 7 SRG 发电系统 MPPT 控制框图

基于转速反馈的 MPPT 采用功率外环加电流内环的双环控制结构。根据位置传感器信号计算得到风力机的实际角速度 ω_r , 通过功率环中的 MPPT 模块得到此角速度下最大输出功率作为 SRG 功率参考值 P_{ref} 。 P_{ref} 与 SRG 实际发电功率 P_{srg} 的误差信号经过功率 PI 调节器得到 SRG 相电流考值 i_{ref} , 其中 P_{srg} 是通过检测直流母线电压 u_{dc} 和电流 i_{dc} 相乘得到。电流内环采用带滞环的 CCC 控制, 计算电流参考值 i_{ref} 与三相电流采样值 i_a 、 i_b 、 i_c 之间的误差 i_{err} , 当 i_{err} 高出滞环宽度时, 功率管导通, 反之功率管关断。这样通过直接控制相电流的大小可以调节 SRG 输出功率和电磁转矩, 进而调节风力机和发电机的角速度, 跟踪最大风能。

4 实验

为了对上述控制系统进行验证, 本研究搭建了一套以 TI 公司的 TMS320F2812 为控制芯片的 SRG 风力发电系统实验平台, 包括基于直流电机的风力机模拟和 SRG 发电系统最大风能追踪两个模块, 主要实验设备参数。

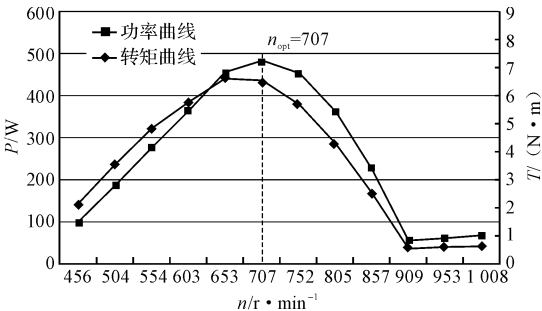
该实验平台适用于 1 kW 级别的三相开关磁阻发电电机风力发电实验测试。

表 1 系统主要设备参数

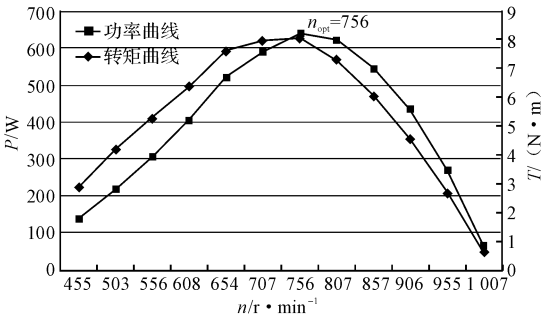
名称	参数
SRG 电机	12/8 极结构
	额定功率: 1 kW
	额定电压: 230 V
直流电机	励磁电流: 0.43 A
	额定功率: 2.5 kW
	额定转速: 1 450 r · min ⁻¹

4.1 风力机特性的模拟实验

本次实验模拟了 v_1 、 v_2 两种风速运行下的运行情况, $v_1 < v_2$ 。直流电动机采用转矩控制模拟风力机的转矩特性, 此时 SRG 采用转速闭环控制, 控制 SRG 的转速在 450 r/min 到 1 100 r/min 间变化。风速 v_1 、 v_2 下直流电动机模拟风力机输出的功率和转矩曲线如图 8 所示。



(a) 风速 v_1 时的输出特性



(b) 风速 v_2 时的输出特性

图 8 模拟风力机输出的功率和转矩曲线

可以看出模拟系统的输出特性与风力机特性基本吻合, 模拟系统的输出功率会随不同风速而改变, 在同一风速下模拟系统的输出功率和转矩也随电机角速度变化而变化, 而且存在一个最佳的运行角速度 ω_{opt} 使得风力机的输出功率最大。

4.2 SRG 发电系统的最大风能追踪实验

实验过程中利用基于直流电机的风力机模拟系统拖动发电机运行, SRG 发电系统采用转速反馈控制方案, 通过功率闭环调节电机转矩和角速度以追踪最大风能。

SRG 发电系统追踪最大风能的转速变化曲线如图 9 所示。原动机模拟风力机在风速 v_1 、 v_2 下的运行特性,模拟数据如图 9 所示。当风速从 v_1 变至 v_2 时,系统在 MPPT 作用下经过 1.2 s 重新追踪至最大功率点,此时转速稳定在 769 r/min。当风速从 v_2 变至 v_1 时,系统经过 1 s 重新追踪至最大功率点,此时转速稳定在 723 r/min。可见在变风速条件下,SRG 发电系统转速稳定在最佳转速 4% 范围内,最大风能追踪精度较好,符合设计目标。

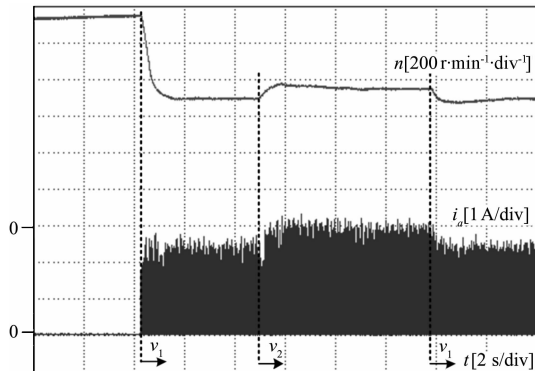


图 9 变风速 SRG 最大风能追踪波形

5 结束语

本研究设计了一套完整的 SRG 风力发电系统实验平台,原动机采用直流电动机模拟风力机在风速变化时的运行特性,为 SRG 风力发电系统的控制研究创造了条件。在此基础上,设计了 SRG 发电系统的最大风能追踪控制方案,并通过实验验证了最大风能追踪的可行性,为进一步深入研究 SRG 风力发电系统的控制技术提供了必要的基础。

参考文献 (References):

- [1] 王宏华. 开关型磁阻电动机调速控制技术[M]. 北京:机械工业出版社,1999.
- [2] TORREY D A. Switched reluctance generators and their control[J]. **Industrial Electronics, IEEE Transactions on**,2002,49(1):3-14.
- [3] 胡海燕,潘再平. 开关磁阻风电系统最大风能追踪控制[J]. 太阳能学报,2005(6):787-791.
- [4] 王晓明,马诗洋. 开关磁阻风力发电系统最大风能跟踪控制仿真研究[J]. 变频器世界,2010(12):60-63.
- [5] XIONG L, XU B, GAO H, et al. A Novel Algorithm of Switched Reluctance Generator for Maximum Power Point Tracking in Wind Turbine Application[C]// SUPBGEN. Nanjing: [s. n.],2009:1-5.
- [6] OGAWA K, YAMAMURA N, ISDA M et al. Study for small size wind power generating system using switched reluctance generator [C]// IECON 2011. Melbourne: [s. n.], 2011:967-972.
- [7] SLOOTWEY J G, 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):144-151.
- [8] MIRECKI A, ROBOAM X, RICHARDEAU F. Comparative Study of Maximum Power Strategy in Wind Turbines[C]// IESE 2004. Ajaccio: [s. n.],2004:993-998.
- [9] 贺益康,胡家兵. 风力机特性的直流电动机模拟及其变速恒频风力发电研究中的应用[J]. 太阳能学报,2006,27(10):1006-1013.
- [10] CARDENAS R, RAY W F, ASHER G M. Switched Reluctance Generators for Wind Energy Applications [C]// PESC'95. Aelamta,1995:559-564.
- [11] CARDENAS R, PENA R, PEREZ M, et al. Control of a switched reluctance generator for variable-speed wind energy applications[J]. **IEEE Transactions on Energy Conversion**,2005,20(4):781-791.

[编辑:洪炜娜]

本文引用格式:

刘 恒,潘再平. SRG 风力发电系统最大风能追踪控制研究[J]. 机电工程,2014,31(9):1196-1200.

LIU Heng, PAN Zai-ping. MPPT control for wind power generation system using switched reluctance generator[J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2014,31(9):1196-1200.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>