

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.01.025

一种开关磁阻发电机的均流控制策略

周 翔, 朱学忠*

(南京航空航天大学 自动化学院, 江苏 南京 210016)

摘要:针对两台或多台开关磁阻发电机并联输出时电流不平衡等问题,开展了开关磁阻发电机系统建模及并联均流控制的研究。对开关磁阻电机数学模型进行了分析,并对比了目前常用的几种并联均流控制方案,提出了将最大电流均流法运用到开关磁阻发电机均流控制系统中。通过 Ansoft 仿真分析,得到了电机的电流、角度、磁链的二维表;在 Matlab/Simulink 中应用插值查表法建立了开关磁阻发电机系统的非线性模型,通过仿真验证了该模型的准确性。在两台发电机系统模型中增加了均流外环,进行了闭环仿真实验。研究结果表明,两台发电机在一定转速差的情况下,通过运用最大电流均流法能够实现均流控制,验证了该均流策略的正确性和有效性。

关键词:开关磁阻发电机;系统建模;最大电流均流法

中图分类号:TM306;TP24

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2015)01-0133-04

A kind of current-sharing control strategies for SRG

ZHOU Xiang, ZHU Xue-zhong

(Automatic Department, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Aiming at the problems of the current inbalance between two or multiple SRG(stitched reluctance generator), the systematic model of SRG and current sharing control was researched. After the analysis of the SRG mathematical model and the comparison of some common methods, the maximal current sharing method was proposed to be applied to the SRG current sharing control system. The nonlinear model of SRG was established by the interpolation lookup table method based on the two-dimensional table of current, angle and flux from ansoft, the accuracy of the model was verified by the simulation result. A flow equalize cycle was added to the two SRG systematic model, the closed-loop simulation was tested. The experimental results show that the systematic model can achieve average-current by using maximal current sharing control while two generator had certain speed difference, proving the correctness and validity of the control strategy.

Key words: switched reluctance generator; systematic model; maximal current sharing method

0 引 言

开关磁阻电机具有结构简单、调速范围宽、调速性能优异、容错能力强等特点。由于其能够方便地实现能量的双向流动,即电机的启动/发电功能,其在汽车、航空领域具有一定的优势^[1]。当两台或多台发电机不采取均流方案直接并联发电时,往往会导致两台电机输出功率不平衡,影响电机和控制系统的性能。

目前对均流控制方法的研究较多,也有多种成功

应用的案例,但大多数应用在 DC/DC 电源、逆变器系统中。

本研究参考目前常用的均流控制方案^[2-3],采用最大电流均流法,在两台发电机系统模型的基础上增加均流环,实现发电机输出均流,通过 Matlab/Simulink 仿真对均流策略进行验证。

1 开关磁阻发电机的数学模型

本研究以三相 12/8 开关磁阻电机为例,建立电机

收稿日期:2014-09-24

作者简介:周 翔(1989-),男,江苏盐城人,主要从事开关磁阻发电机并联控制方面的研究. E-mail:570249796@qq.com

通信联系人:朱学忠,男,副教授,硕士生导师. E-mail:550125770@qq.com

的数学模型。假设电机绕组各相对称,互感忽略不计,主开关管和续流二极管均为理想元件,发电过程中转速不变。电机任意相电压平衡方程式为:

$$\pm U_s = R_k i_k + \frac{d\psi_k}{dt} \tag{1}$$

式中: U_s —电机直流供电电压, $+U_s$ 适于励磁阶段, $-U_s$ 适于发电阶段; R_k, i_k —第 k 相绕组的电阻和绕组电流; ψ_k —第 k 相绕组磁链^[4]。

2 开关磁阻发电机并联均流策略

本研究将数台发电机并联输出,若在不采用均流方案时,由于输入条件的差异,往往会存在输出电流不平衡的现象,输出功率之间的不平衡会降低整个控制系统的可靠性,缩短系统的使用寿命。为解决不平衡所带来的问题,研究者往往需要在并联系统中采用并联均流控制策略。目前主要应用的均流控制方案包括电压下垂法、平均电流均流法、最大电流均流法和主从均流法等。对几种均流策略进行对比的情况如表 1 所示。可以看出,在这几种策略中最大电流均流法均流精度较高,可靠性较好,目前应用范围广泛。因此本研究采用最大电流均流法来实现两台开关磁阻发电机并联均流控制。

表 1 多种均流控制方法对比

方法名称	可靠性	精度	应用范围
主从均流法	较差	较高	较少使用
电压下垂法	较好	较差	应用广泛
最大电流均流法	较好	高	应用广泛
平均电流均流法	好	高	较广泛

最大电流均流法如图 1 所示。该方法是将均流控制母线(CSB)中输出电流最大的模块作为主模块,主模块的电流作为整个系统的电流基准,其他模块为从模块,从模块以最大电流为基准,调整自身的输出电流,最终实现电流均衡。最大电流均流法是电压型控制策略,通过调节模块输出电压的大小来调整输出电流。对于从模块而言,输出电压和基准电压与均流母线压差之和成线性关系,可以通过提高基准电压或者均流母线电压来提高输出电压,实现模块之间的均流^[5-6]。本研究采用提高从模块基准电压的方式来实现均流。

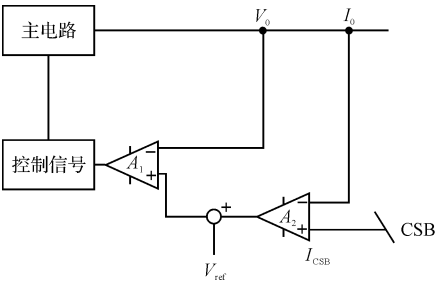


图 1 最大电流控制法

3 开关磁阻发电机并联均流建模

3.1 单台开关磁阻发电机系统建模

开关磁阻发电机系统建模主要包括 3 部分:功率变换器模块,发电机绕组模块以及闭环控制模块^[7]。其中,主电路采用不对称半桥结构。建模的核心部分是发电机绕组模块。

根据式(1),在不考虑功率管压降以及二极管压降的情况下,可得到:

$$\psi_k = \int (\pm U_s - R_k i_k) dt \tag{3}$$

由于开关磁阻系统的非线性,本研究采用非线性磁化曲线,实时地对电流插值来进行仿真计算^[7]。为避免采用微分模块,本研究在 Matlab/Simulink 建模前根据电机结构参数利用有限元分析软件 Ansoft 仿真计算出固定角度和固定电流下的磁链值,得到电机的电磁场曲线如图 2 所示。但是在该模型中还不能直接使用,需要在 Matlab 中通过反演把磁链函数 $\psi(i, \theta)$ 转变为电流特性函数 $i(\psi, \theta)$,建立起电流、磁链、角度的二维插值表。

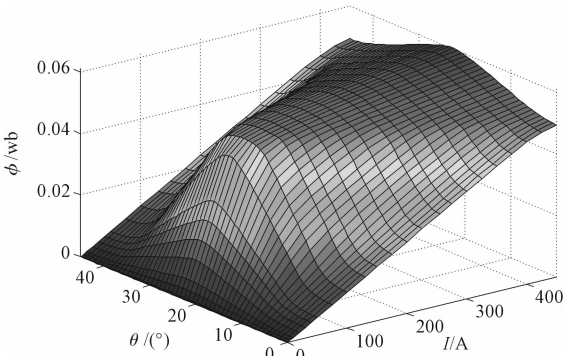


图 2 磁链-(电流,角度)三维表

发电机绕组模块如图 3 所示,受控源两端电压值相当于式(3)中的 $(\pm U_s - R_k i_k)$,经过积分计算得到磁链 ψ_k ,通过磁链 ψ_k 和角度 θ 查表可以得到绕组的电流 i_k ,电流经过受控源和电机内阻,即可得到绕组两端电压。再通过积分环节进行下一轮的计算。经过仿真验证,该模块能够较准确地模拟发电机绕组,计算速度较快。

电机控制模块包括角度选择模块和闭环控制模块,本研究中采用固定开通关断角,电流斩波的控制方案。系统采用双闭环控制,外环为电压环,内环为电流环。发电机输出电压参考电压进行比较作差,差值经过 PI 计算得到电流参考值,参考电流与绕组电流进行比较,采用电流斩波实现输出电压稳定。这里电流斩波采用固定关断时间斩波^[8],即当绕组电流超过参考值时,开关管关断固定时间后再导通,在 Matlab/Simu-

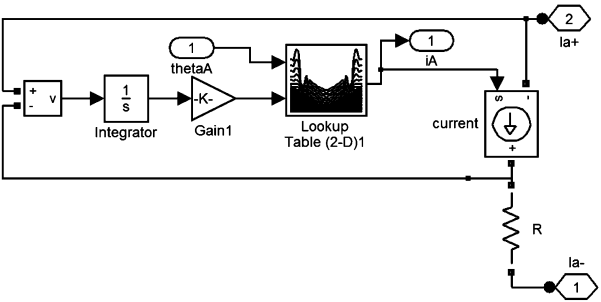


图 3 发电机绕组模型

link 中利用 s-function 实现该功能。本研究利用上述非线性模型对开关磁阻发电系统进行仿真。

3.2 两台开关磁阻发电机并流均流控制建模

由于电机并联输出电流不均衡的因素较多,实际情况也比较复杂,为使问题简化,本研究假设不均衡是由转速不同导致的,因此在仿真中设置两台电机不同的转速。根据最大电流均流法的原理,在单台发电机电压环的外部增加均流环。系统结构图如图 4 所示。

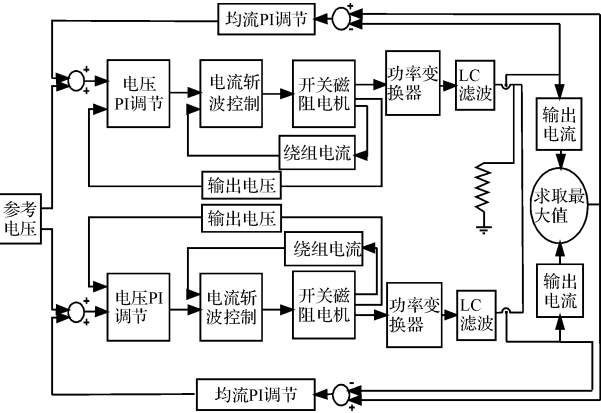


图 4 开关磁阻发电机均流模块

Matlab/Simulink 模型中均流环如图 5 所示,本研究将两台发电机的输出电流 I_1 和 I_2 进行比较得到最大值 I_{max} ,再用求得的最大值 I_{max} 分别减去两个输出电流 I_1 和 I_2 ,得到两个参考电流值 I_{ref1} 和 I_{ref2} ,这样电流大的模块(主模块)经过最大电流均流法计算输出的值为 0,而电流小的模块(从模块)输出的是最大电流与该电机输出电流的差值,再将差值经过 PI 调节,与发电机的参考电压叠加,提高了从模块的参考电压,调节输出电压使得从模块电流将跟踪最大电流^[9-10]。两台电机自动设置主从模块,在输出电流的比较过程中实现两台发电机的并联均流控制。

4 开关磁阻发电机仿真验证

4.1 单台发电机模型仿真

本研究中所仿真的开关磁阻发电机的额定电压为

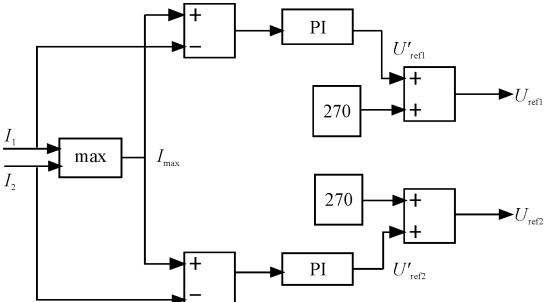


图 5 开关磁阻发电机均流模块

270 V,额定功率为 6 kW,转速范围为 10 000 r/min ~ 20 000 r/min。在单台电机的仿真中设置发电机的转速为 15 000 r/min,开通角为 15°,关断角为 30°。负载电阻为 12 Ω。初始励磁电压 50 V,该电机输出电压建立过程如图 6 所示,经过 0.035 s,电压稳定输出在 270 V,纹波 1.5%。仿真结果验证了单台发电机运行的稳定性。

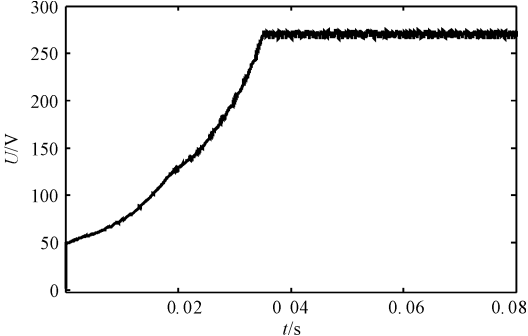


图 6 发电机的建压仿真波形

4.2 两台发电机并联均流仿真

本研究通过设置不同的转速来考察发电机输出电流之间的不均衡,低速电机转速设置为 10 000 r/min,高速电机转速为 15 000 r/min。输出电压均为 270 V,开通关断角不变,并联负载电阻为 6 Ω。发电机输出电流通过二极管经过 LC 滤波与负载连接。电机在没有采用均流环作用下仿真的波形如图 7 所示。可以看出,系统稳定后,低速电机输出电流 I_1 为 14 A,高速电机输出功率输出电流 I_2 为 31 A。均流误差率为 75.5%,低速电机严重过载,不能达到并联运行的要求。

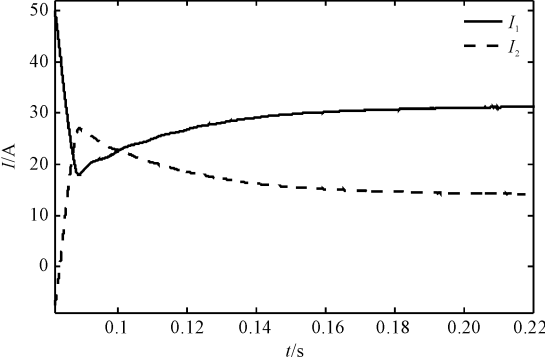


图 7 未采用均流环输出电流仿真波形

系统中采用均流控制策略发电机输出电流的波形如图 8 所示。从图 8 中可以看出,输出电流 I_1 为 22.8 A, I_2 为 22.6 A,均流误差率小于 5%,达到并联要求。

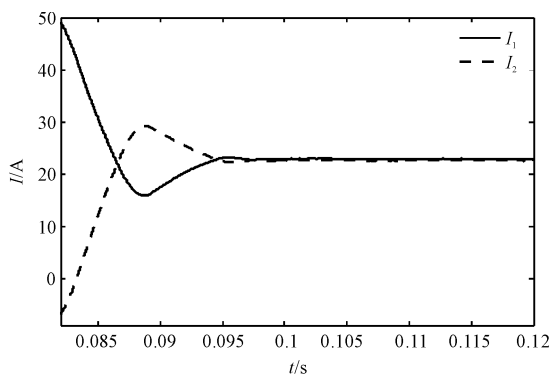


图 8 采用均流环输出电流仿真波形

为考查发电机系统的动态性能,本研究仿真了并联发电机组在 10% 及 90% 负载的情况下突加、突卸负载的波形如图 9、图 10 所示。由图 9、图 10 中可以看出电机在突加和突卸负载的情况下,负载电压波动时间较短,满足国军标要求,输出电流变化趋势基本相同,系统在负载瞬变的情况下可以实现输出均流。

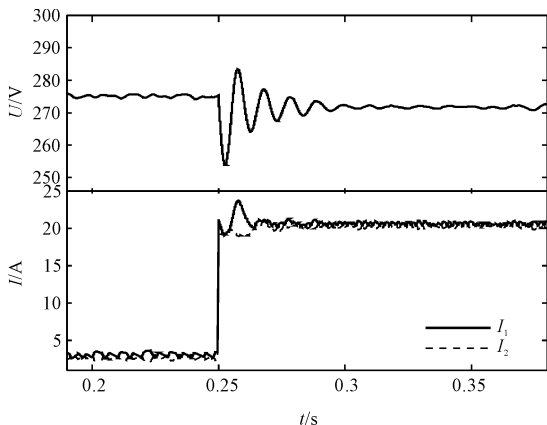


图 9 突加负载输出电流仿真波形

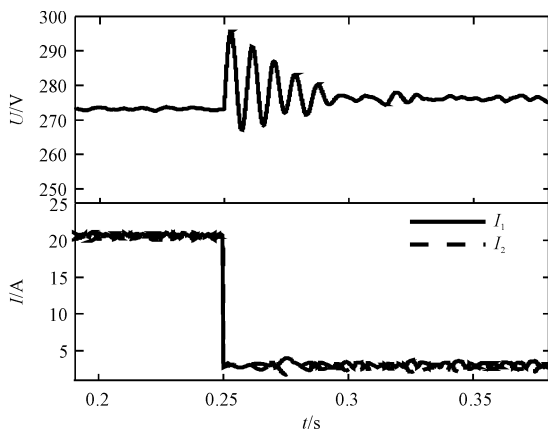


图 10 突卸负载输出电流仿真波形

型,仿真实验验证了模型的准确性和有效性。再在系统中增加均流环,仿真结果证明了最大电流均流法能够较好地实现两台电机之间的均流,为下一步发电实验做好准备。

参考文献 (References):

- [1] 宋受俊. 多/全电机用高速开关磁阻起动/发电机优化控制[J]. 电工技术学报, 2010, 25(4): 44-52.
- [2] 韦聪颖. 开关电源并联运行及其均流技术[J]. 电气自动化, 2004, 26(2): 13-15.
- [3] 高玉峰. 开关电源模块并联均流系统的研究[J]. 电源技术, 2011, 35(2): 210-212.
- [4] 刘 闯. 开关磁阻电机起动/发电系统理论与工程实践[D]. 南京: 南京航空航天大学自动化学院, 2000.
- [5] 周伟成. 最大电流均流技术的研究[J]. 电力电子技术, 2007, 42(1): 45-47.
- [6] 李 明. 自主均流控制的并联 Buck 变换器稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(15): 7-14.
- [7] 严 力. 基于 Matlab/Simulink 开关磁阻电机非线性建模方法研究与实践[J]. 河海大学学报, 2005, 34(1): 100-103.
- [8] 严加根. 航空高压直流开关磁阻起动/发电机系统的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学自动化学院, 2006.
- [9] 闰 浩. 双绕组无刷直流电机运行策略的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学电气工程与自动化学院, 2013.
- [10] 邓双渊. 自主均流法在开关变换器并联系统中的研究[J]. 通信电源技术, 2007, 24(2): 41-42.

[编辑: 张 豪]

5 结束语

本研究介绍了 12/8 三相开关磁阻发电机的建模仿真过程。为解决开关磁阻发电机并联输出可能出现的电流不平衡问题, 采用了最大电流均流法。首先, 笔者在 Matlab/Simulink 中建立了开关磁阻发电机的系统模

本文引用格式:

周 翔, 朱学忠. 一种开关磁阻发电机的均流控制策略[J]. 机电工程, 2015, 32(1): 133-136.

ZHOU Xiang, ZHU Xue-zhong. A kind of current-sharing control strategies for SRG[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2015, 32(1): 133-136.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>