

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2209810

基于双谐波绕组的混合励磁发电机励磁控制系统^{*}

夏永洪¹ 郭浩然¹ 周童¹ 王名名¹ 简纘道² 张景明¹

(1.南昌大学信息工程学院 南昌 330031; 2.江西清华泰豪三波电机有限公司 南昌 330031)

摘要:为了解决不同运行工况下混合励磁同步发电机端电压恒定的问题,设计了一种基于全桥变换器拓扑的励磁控制系统。励磁系统采用以电枢绕组电压为外环、定子谐波励磁绕组电流为内环的双闭环控制策略,以谐波无刷混合励磁同步发电机端电压为反馈信号,通过调节定子谐波励磁绕组电流,以维持发电机端电压恒定。阐述了双谐波绕组的混合励磁发电机的基本结构和工作原理,设计了励磁控制系统的软硬件,并测试了励磁控制系统的性能。实验结果表明:调节定子谐波励磁绕组电流,可以很好的调节发电机的端电压;通过励磁控制系统的自动调节功能,实现了发电机在不同负载情况下的输出电压恒定。

关键词:全桥变换器;谐波励磁;双闭环控制;励磁控制

中图分类号: TM34 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

Hybrid excitation generator excitation control system based on dual harmonic winding

Xia Yonghong¹ Guo Haoran¹ Zhou Tong¹ Wang Mingming¹ Jian Zuandao² Zhang Jingming¹

(1. School of Information Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China;

2. Jiangxi Tsinghua Tellhow Sanbo Electric Machinery Co., Ltd., Nanchang 330031, China)

Abstract: In order to solve the problem of the constant voltage at the armature terminal of the hybrid excitation synchronous generator under different operating conditions, an excitation control system based on the full-bridge converter topology was designed. The excitation system adopts a double closed-loop control strategy with the armature winding voltage as the outer loop and the stator harmonic excitation winding current as the inner loop. Taking the terminal voltage of the harmonic brushless hybrid excitation synchronous generator as the feedback signal, the generator terminal voltage is kept constant by adjusting the current of the stator harmonic excitation winding. The basic structure and working principle of the hybrid excitation generator with double harmonic windings are expounded, the software and hardware of the excitation control system are designed, and the performance of the excitation control system is tested. The experimental results show that the terminal voltage of the generator can be well adjusted by adjusting the current of the stator harmonic excitation winding, and the output voltage of the generator can be kept constant under different loads through the automatic adjustment function of the excitation control system.

Keywords: full bridge converter; harmonic excitation; double closed loop control; excitation control

0 引言

近年来随着永磁材料性能的不不断提高,永磁同步电机以高效率、高功率密度,且结构简单、运行稳定备受人们关注^[1-3]。当负载或转速变化引起电枢电流变化时,永磁电机就失去了电励磁同步电机气隙磁场易调节的优势,从而在一定程度上限制了永磁电机的应用范围。

为解决永磁电机气隙磁场难以调节的问题,同时保持

其无刷化的优点,谐波励磁技术提供了一种新的解决方案^[4-6]。文献[7-8]提出了一种齿谐波辅助励磁的混合励磁同步发电机,其思路是将交流电机中固有的齿谐波磁场在转子侧感应的齿谐波电动势,整流后直接作为电机的励磁电源,用于实现永磁电机气隙磁场的调节。文献[9]提出了一种三次谐波的混合励磁同步发电机,其原理是借助定子三次谐波绕组感应的三次谐波电动势,通过定子三次谐波绕组与转子谐波绕组之间的电磁耦合关系,将励磁功率从

收稿日期:2022-05-02

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(52067015)项目资助

定子传至转子,后经整流提供给励磁绕组,达到调节气隙磁场的目的。

当负载发生变化时,为了使谐波无刷混合励磁发电机端电压自动保持恒定,需要借助励磁控制系统来实现。随着电力半导体器件和现代控制理论的发展,励磁控制系统发生了较大的变化^[10-11]。主要表现在 2 个方面:一是励磁形式,二是励磁控制方式。励磁形式从早期由直流励磁机构构成的励磁系统,发展到采用无旋转励磁机的可控硅自并励方式。励磁控制方式由早期的单一变量控制方式,发展到非线性多变量控制方式。励磁控制结构和控制策略的多样性,从而衍生出诸多不同的励磁控制系统。由于混合励磁同步发电机电机结构以及电机励磁原理的特殊性,设计其励磁控制系统也存在差异。为此,针对一台具有双谐波绕组的无刷混合励磁发电机(hybrid excitation synchronous generator, HESG),设计并研制了其励磁控制系统,并通过实验对该励磁控制系统的性能进行了测试。

1 混合励磁发电机系统工作原理

具有双谐波绕组的无刷混合励磁发电机系统工作原理如图 1 所示,电机定子侧有两套绕组:电枢绕组和谐波励磁绕组,其中谐波励磁绕组用于产生谐波磁场;电机转子上除了永磁体外,还有两套绕组:励磁绕组和谐波绕组,其中谐波绕组节距与谐波励磁绕组节距相等,主要用于感应励磁所需的谐波电动势,谐波绕组通过二极管整流桥与励磁绕组相连。

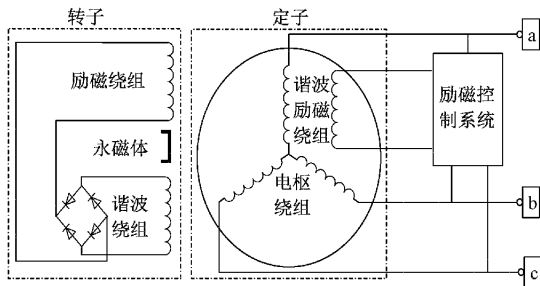


图 1 具有双谐波绕组的无刷混合励磁发电机系统原理

假定电机的极对数为 p , 定子谐波励磁绕组的极对数为 $k p$ (k 为正整数,且 $k \geq 2$), 定子谐波励磁绕组电流为^[12]

$$i_{hfd} = I_{hfdm} \cos(n\omega t) \tag{1}$$

式中: I_{hfdm} 为 n 次谐波电流幅值 ($n \geq 0$), 当 $n=0$ 时, 表示输入的谐波励磁电流为直流电流; ω 为电流角频率; t 为时间。

定子谐波励磁绕组电流建立的气隙磁场为

$$b(\alpha) = \lambda_0 F_{m\alpha} [\cos(vk\alpha - n\omega t) + \cos(vk\alpha + n\omega t)] \tag{2}$$

式中: $F_{m\alpha}$ 为 $v k$ 次谐波励磁磁动势的幅值, 且 $F_{m\alpha} = \frac{1}{v\pi} N_{hfd} I_{hfdm} \sin(\frac{1}{v} \frac{\pi}{2})$, v 为奇数; α 为定子坐标系电角度;

N_{hfd} 为定子谐波励磁绕组匝数; λ_0 为平均气隙磁导。

由式(2)可知,气隙磁场中含有两部分谐波磁场,其次数均为 $v k$ 次,相对定子的转速分别为 $n\omega/(v k)$ 和 $-n\omega/(v k)$,在定子侧感应 n 次谐波电动势;相对转子转速分别为 $\omega - n\omega/(v k)$ 和 $\omega + n\omega/(v k)$,在转子侧分别感应 $(k - n)$ 次和 $(k + n)$ 次谐波电动势。

则谐波励磁系统提供的励磁电流为

$$I_{fd} = \frac{4\sqrt{2}k_d f_1 \lambda_0 l \tau N_{hr} N_{hfd} I_{hfdm}}{\pi(R_{fd} + R_{hr} + \frac{2}{\pi} X_{hr})} \tag{3}$$

式中: k_d 为整流系数,对于单相桥式不可控整流电路, $k_d = 0.9$; f_1 为基波频率; l 为电机铁心长度; τ 为基波极距; N_{hr} 为转子谐波绕组有效匝数; R_{fd} 为励磁绕组电阻; R_{hr} 为转子谐波绕组电阻; X_{hr} 为转子谐波绕组电抗。

由式(3)可知,励磁控制系统通过检测发电机端电压的变化,以控制定子谐波励磁电流大小,就可以调节混合励磁发电机转子谐波绕组电动势、转子励磁电流、气隙磁场以及电枢端电压,实现了电机的无刷化。

2 励磁控制系统硬件设计及实现

励磁控制系统结构框图如图 2 所示,励磁控制系统主要包括人机交换模块、DSP 控制模块、调理电路模块、PWM 隔离驱动器模块、DC/DC 变换器模块、整流模块、电信号采集模块等。该系统可以为定子谐波绕组提供直流电流,建立的谐波磁场在转子谐波绕组中感应谐波电动势,整流后为励磁绕组提供励磁功率。

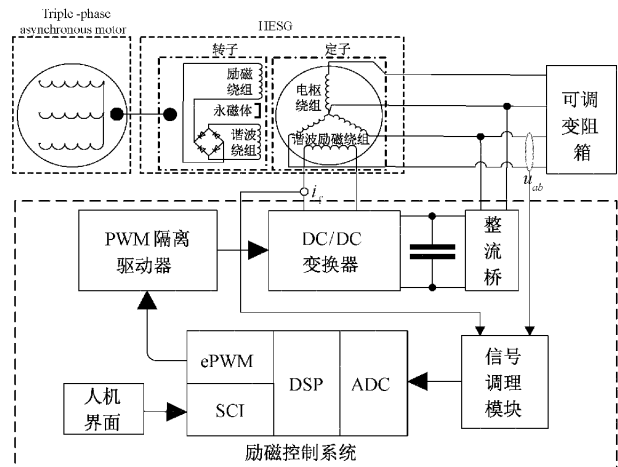


图 2 励磁控制系统结构框图

系统工作过程如下,通过一台异步电动机拖动发电机在额定转速下运行,改变发电机负载,即调节可调电阻箱的阻值。发电机负载改变时,会引起电机电枢端电压变化。励磁控制系统实时检测发电机的端电压 u_{ab} ,当发电机电枢电压变化时,调节定子谐波励磁绕组的工作电流 i_f ,从而保证发电机端电压稳定在额定值。

2.1 励磁主电路设计

励磁主电路原理图如图 3 所示,其将电枢绕组交流电变换成直流电,为定子谐波励磁绕组提供直流励磁功率。前级整流部分采用单相桥式不可控整流电路,电路工作简单、易实现;中间级串联一个电阻 R_1 ,当系统上电等待一定时间后,闭合开关 S ,可以避免过充损坏母线电容;后级采用移相全桥变换器拓扑结构^[13-14],将前级整流后的直流电逆变成高频交流电,经过高频变压器后,再通过全波整流电路将交流电变换成相应的直流电,其中高频变压器采用降压变压器。

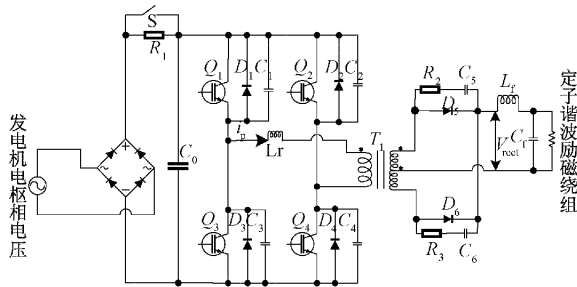


图 3 励磁主电路原理图

假设移相全桥变换器中的电感、电容、二极管、开关管和变压器均为理想器件,变换器存在 12 种开关模式^[15]。由移相全桥电路工作原理可知:变换器的输出电压会随着变换器工作移相角变化而变化。在励磁控制系统中,只要不断调节全桥电路的移相角,就可调节电机定子谐波励磁绕组的直流励磁电流,从而保持发电机端电压恒定。

2.2 信号采集电路设计

电压信号采集原理如图 4 所示,图中电压传感器型号为 LV25-P,其原边输入电流范围为 $-10 \sim 10$ mA,副边输出电流范围为 $-25 \sim 25$ mA,且成比例地反映原边电流的大小。

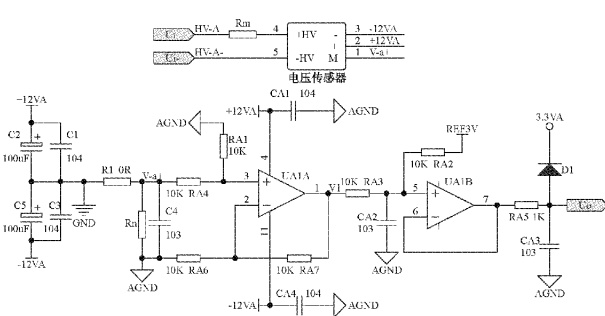


图 4 电压信号采集原理

电压信号采集原理图主要由电压传感器模块电路、差分比例运算电路、电压跟随器电路、低通滤波器电路共同构成。由于微控制器采样端口采集电压幅值范围为 $0 \sim 3$ V,需要保证采集的电压信号幅值在此范围之内。通过选取适合的 R_n 、 R_m 电阻值,配合电压传感器模块电路将强电信号转变为弱电信号,保证弱电信号满足系统要求,并实现信号

之间的电气隔离。差分比例运算电路将信号幅值变换适当的比例,调控信号幅值在控制器采样的幅值范围内,使控制器采集的信号值更准确,并有效减低误差值。电压跟随器电路在保持比例运算电路变换后的信号的幅值和相位不变的同时,仅增大电路的输入电阻,减小输出电阻,类似起到电气隔离的作用,将信号输入端和输出端隔断。低通滤波器电路滤除信号中的高频部分,保持信号的完整性,提高控制器的采样精度。

由于发电机端电压为交流信号,微控制器信号采样端口不能直接读取负信号,需要将电压信号做相应的调理才能被识别。图中电压信号采集电路中引入了幅值为 3 V 的标准信号,将被调控的交流信号的幅值抬升 1.5 V,避免交流信号幅值出现负值。假设采样信号的电压有效值为 U_i ,则输入控制器采用端口的有效值为 U_o ,两者之间的关系为

$$U_o = \frac{5U_i R_n}{2R_m} + 1.5 \quad (4)$$

3 励磁控制系统软件设计

3.1 移相全桥变换器的控制策略

双闭环控制结构框图如图 5 所示,图中以混合励磁发电机电枢绕组线电压与基准电压 V_{Ab-ref} 作差,误差值经过电压控制器 PI_v ,构成电压闭环结构。电压控制器输出值与预设励磁电流值 I_{L-ref} 比较,其输出值与定子谐波励磁绕组电流值做差,误差值经过电流控制器 PI_i ,构成电流闭环结构。系统采用电压闭环为外环,电流闭环为内环构成控制系统的双闭环控制结构,具有响应快、稳定性高等特点。

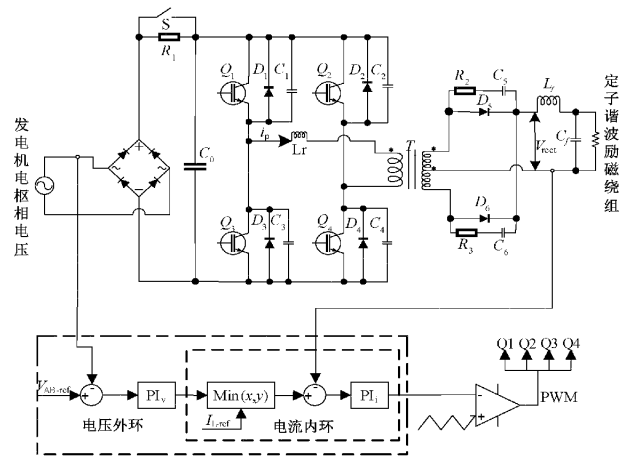


图 5 双闭环控制结构框图

通过对 DC/DC 变换器的工作状态分析,采用状态空间平均法对其建模^[16-17],得到了输出电流的传递函数为

$$G_{id}(s) = \frac{V_{in}(sC_f + 1/R)/n}{s^2 L_f C_f + s(L_f/R + R_d C_f) + 1 + R_d/R} \quad (5)$$

式中: V_{in} 为全桥母线电压; L_f 为滤波电感; C_f 为滤波电容; R 为谐波励磁绕组阻抗; R_d 为:

$$R_d = \frac{4f_s L_f}{n^2} \quad (6)$$

其中, f_s 为开关频率。

电路设计的主要参数如表 1 所示。

表 1 电路参数表

参数	数值
母线电压 V_m/V	320
谐振电感 $L_r/\mu H$	2
滤波电容 $C_f/\mu F$	30
滤波电感 L_f/mH	1
开关频率 f_s/kHz	10
变压器变比 n	3
定子谐波绕组电阻 R/Ω	4.2

将设计参数代入式(5)可得:

$$G_{id}(s) = \frac{0.0032s + 25.4}{3 \times 10^8 s^2 + 3.71 \times 10^4 s + 2.058} \quad (7)$$

由式(7)可以得出系统开环输出电流传递函数的伯德图,如图 6 所示。系统的相位裕度接近 93° ,但低频增益很低,只有 22 分贝左右,且下降率几乎为 0。未加入反馈前,系统为 0 型,需要通过提高系统的型别,使系统以 -20 dB/dec 的斜率下降并穿越 0 dB 线。

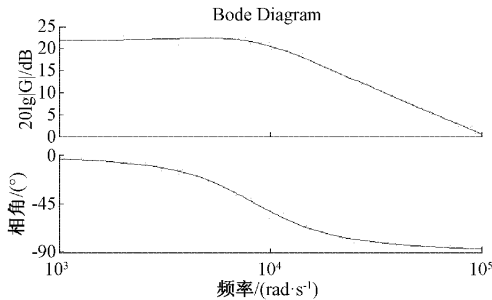


图 6 开环输出电流传递函数伯德图

闭环输出电流传递函数伯德图如图 7 所示,低频增益由 22 dB 增加到 56 dB,相位裕度为 40° ,低频增益变大,下降率变大,系统的稳态和动态性能得到很大提升。

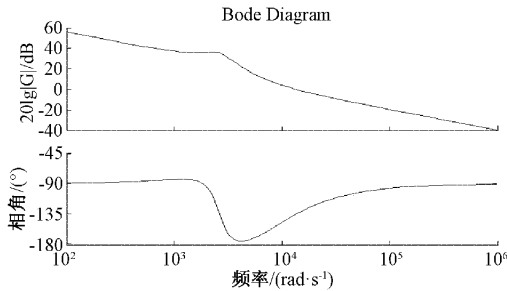


图 7 闭环输出电流传递函数伯德图

3.2 励磁控制系统软件设计

系统软件程序通过 DSP 相关端口采集所检测的变量

和拟定的控制策略进行处理计算,最终输出励磁电路所需的 PWM 波驱动信号,保证发电机输出电压稳定在设定状态。系统程序采用 CCS6.0 集成开发工具,遵循模块化、结构化、自上而下、逐步细化的设计思路,编写 C 语言程序实现系统的相关功能,其软件设计流程如图 8 所示。

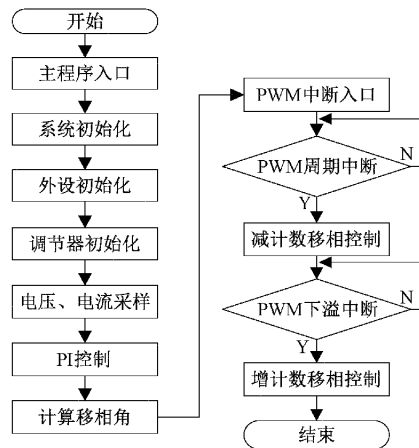


图 8 励磁控制系统软件设计流程

一个完整的控制程序主要包括主程序和中断服务程序两部分。主程序主要用来完成 DSP 外设的初始化和功能模块调节器的初始化。功能模块调节器主要包括 I/O 口, EPWM, ADC, SCI 和看门狗等部分。当系统完成准备工作后,进入 PWM 中断服务函数。中断服务程序主要用来完成移相控制算法的计算,它的好坏直接决定了系统整体性能的优劣,是系统软件程序中的核心部分。

4 实验验证

为了验证研发的励磁控制系统性能的正确性,在一台具有双谐波励磁绕组的混合励磁同步发电机上进行实验,其测试平台如图 9 所示。

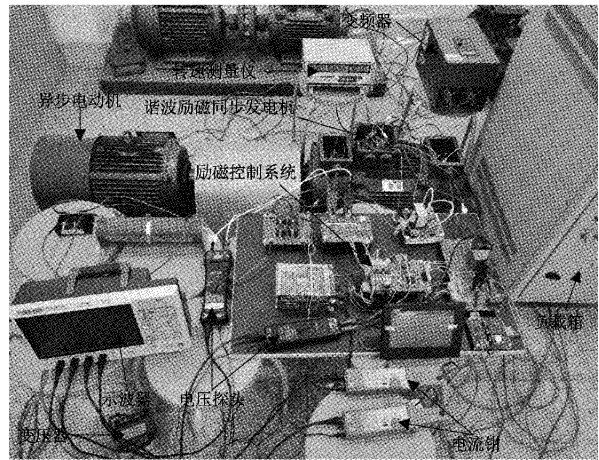


图 9 励磁控制系统测试平台

4.1 励磁系统恒流特性

为了验证励磁控制系统恒流特性,通过人机界面设定

输出电流值后,不断改变负载大小,测量了励磁系统输出的电压、电流值和全桥输出的占空比。表2为励磁系统接入不同负载,为维持输出电流恒定在设定值2 A时,全桥输出不同占空比,以及励磁系统输出的电压值和电流值。输出电压为33.91 V时励磁系统恒流实验波形图10所示。

表2 励磁系统恒流特性

占空比/%	输出电流/A	输出电压/V
12.24	2.05	12.24
16.96	2.03	17.03
19.31	2.02	19.45
22.19	2.03	22.53
32.96	1.99	33.91

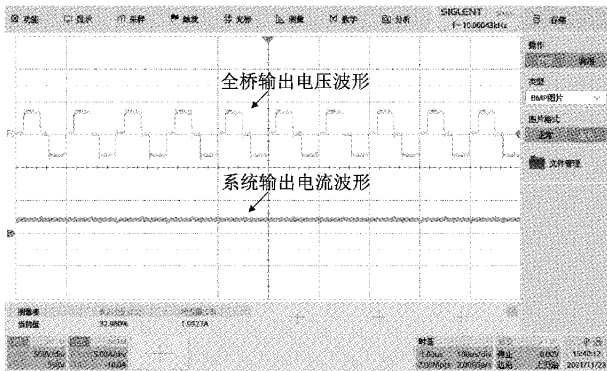


图10 输出电压为33.91 V时励磁系统输出波形

由恒流实验可知,当励磁系统负载变化时,输出电流基本稳定在2 A左右,实现了励磁系统的恒流特性,验证了励磁系统单一电流闭环的有效性和稳定性。电流环作为励磁控制系统双闭环的内环,它的稳定性为电机励磁系统性能提供了有效的保障。

4.2 直流励磁系统特性

为了验证励磁控制系统的直流励磁特性,通过人机界面设置系统为励磁模式,设定发电机端电压恒定电压值后,调节发电机的负载大小,记录了全桥输出的占空比和定子谐波励磁绕组电流值,以及发电机端电压和电枢电流。表3为发电机电枢绕组带不同功率负载时,为维持端电压稳定在420 V,定子谐波励磁绕组的直流电流随全桥输出的占空比变化情况。

表3 直流励磁系统特性

电枢 电流/A	占空比/ %	定子谐波励磁 绕组电流/A	线电压/ V
1.91	9.10	2.12	419.9
2.52	11.42	2.50	419.3
3.18	13.49	3.08	419.7
3.80	15.77	3.69	419.4
4.47	18.61	4.59	419.0

电枢电流为4.47 A时励磁控制系统实验波形图11所示,通道一为电机端电压波形;通道二为移相全桥输出电压波形,其频率为10 kHz,占空比为18.61%;通道三为定子谐波励磁绕组电流波形;通道四为电枢电流波形。

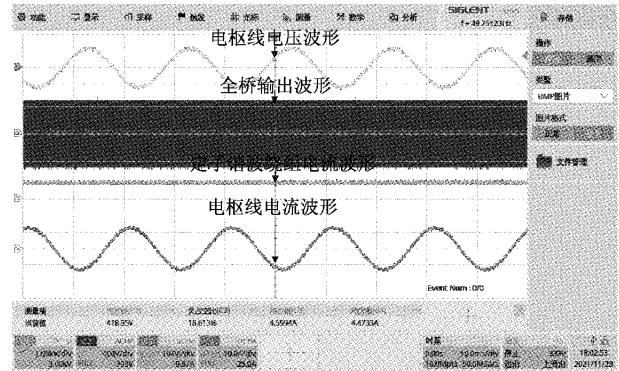


图11 电枢电流为4.47 A时直励磁控制系统实验波形

由励磁实验可知,当发电机负载变化时,励磁控制系统自动调节电机定子谐波励磁绕组电流,使电机端电压基本稳定在420 V左右,实现了励磁控制系统自动稳定电机端电压的功能。

5 结 论

针对一台双谐波绕组的混合励磁发电机,围绕其励磁控制系统进行了研究,包括以下部分:

根据该双谐波绕组的混合励磁发电机的无刷励磁原理,设计了励磁控制系统的硬件和软件,并研制了一套谐波励磁控制系统,可为定子谐波励磁绕组提供直流电流;

测试了混合励磁发电机谐波励磁系统的性能,以及励磁控制系统的性能,结果表明:通过调节定子谐波励磁绕组电流,可以很好的调节转子励磁电流、气隙磁场和端电压;借助励磁控制系统对定子谐波励磁电流自动调节功能,实现了发电机在不同负载情况下的端电压恒定。

参考文献

- [1] 寇宝泉,赵晓坤,张浩泉,等. 永磁同步电机电磁结构及磁场调节技术的综述分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(20): 7126-7141.
- [2] ULLAH S, MCDONALD S P, MARTIN R, et al. A permanent magnet assist, segmented rotor, switched reluctance drive for fault tolerant aerospace applications[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 55(1): 298-305.
- [3] LUISE F, PIERI S, MEZZAROBBA M, et al. Regenerative testing of a concentrated-winding permanent-magnet synchronous machine for offshore wind generation—Part I: Test concept and analysis[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, 48(6): 1779-1790.

- [4] 张卓然,王东,花为. 混合励磁电机结构原理、设计与运行控制技术综述及展望[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(24): 7834-7850,8221.
- [5] 赵纪龙,林明耀,付兴贺,等. 混合励磁同步电机及其控制技术综述和新进展[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(33): 5876-5887.
- [6] HOSEINPOUR A, MARDANEH M, RAHIDEH A. Investigation of the effects of different magnetization patterns on the performance of series hybrid excitation synchronous machines[J]. Progress In Electromagnetics Research M, 2018, 64: 109-121.
- [7] 夏永洪,黄劭刚. 齿谐波绕组电流对电枢绕组空载电压波形的影响[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(6): 910-916.
- [8] 夏永洪,龚文军,黄劭刚,等. 基波电枢磁动势对转子齿谐波电动势的影响[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(9): 2304-2309.
- [9] 温子健. 基于三次谐波的混合励磁同步发电机研究[D]. 南昌:南昌大学, 2020.
- [10] 何怡刚,孙豪,袁伟博,等. 功率半导体器件栅氧化层状态监测方法综述与展望[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(11): 1-11.
- [11] 张兴旺,孙君光,熊巍,等. 国内外励磁系统技术发展综述[J]. 水电站机电技术, 2014, 37(3): 93-96.
- [12] 夏永洪,周琳,王善铭,等. 具有附加谐波绕组的混合励磁同步发电机结构和原理[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(24): 7880-7889.
- [13] 许航宇. 基于移相全桥低压大电流直流电源的研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2015.
- [14] JUNAID S. A ZVS-ZCS phase shift full bridge DC-DC converter with secondary-side control for battery charging applications[J]. International Journal of Circuit Theory and Applications, 2018: 46(7):1407-1415.
- [15] 马源. 车载移相全桥 DC/DC 充电电源的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学, 2019.
- [16] 黄永健,刘毅力,马龙涛,等. 基于分数阶 $PI\sim\lambda D\sim\mu$ 控制的移相全桥 ZVZCS 变换器的研究[J]. 国外电子测量技术, 2019, 38(11): 81-85.
- [17] 金宁治,俄立明,马腾,等. 电动汽车车载移相全桥变换器改进研究[J]. 电机与控制学报, 2021, 25(9): 70-77.

作者简介

夏永洪,博士,教授,主要研究方向为电机及其控制。

E-mail:xiayh_98@163.com

郭浩然,硕士研究生,主要研究方向为电机及其控制。

E-mail:ghran2018@163.com