

5kW 单相自复合励磁稀土永磁发电机的设计与分析

倪榕生 吴亚麟

(福州职业技术学院建筑工程学院 福建 福州 350108)

摘要:随着稀土永磁材料冶炼工艺技术的改进,其磁性能得到较大的提高,不但具有高剩磁和高矫顽力,而且工作温度可达 180 ~ 200℃,应用于现代电机中提供气隙磁场具有结构简单、效率高等优点,但是由于永磁体受到电机动态负载的电枢反应作用,因此在实际的运行进程当中,工作点无法随着工况的改变而自动调节气隙磁场。在实际的运行进程当中,永磁电机的稳态电压调整功率要大于电励磁发电机的稳态电压调整率。对此,本文重点介绍了单相自复合励磁稀土永磁发电机的设计形式。通过对典型规格(5kW)样机性能的实验设计和数据调研可知,表明 SEHEREPMG 的气隙磁场具有可调性,改善电压波形,降低电压波形畸变率,提高了稳态电压调整率性能。

关键词:稀土永磁; SEHEREPMG; 电枢反应; 电压调整率; 波形畸变率

0 引言

在物理场的应用进程中,磁场是电机实现电能转换的重要媒介。永磁材料的出现引起现代电机技术的变革,上世纪 80 年代之前,但是在使用的进程当中,稀土钴永磁材料价格相对比较昂贵。当时永磁电机开发与应用的重点是放在航空航天电机上,到了上世纪 90 年代出现了价格相对较低的钕铁硼(Nd-Fe-B)稀土永磁材料,这时的研究重点才刚刚转向到工业和民用的电机当中。由于早期冶炼的稀土钕铁硼(Nd-Fe-B)永磁材料的制作和加工工艺还不是很成熟。所以导致加工出的永磁材料磁性能较低。特别是工作温度只能达到在 100 ~ 120℃之间,而且热稳定性和耐腐蚀性也比较差,应用在电机上受热产生退磁和腐蚀的现象;到了本世纪初期,随着稀土永磁材料冶炼工艺技术的改进,磁性能得到了较大的提高,不但具有高剩磁和高矫顽力,工作温度可达 180 ~ 200℃,而且解决了耐腐蚀性难题,才真正推动了现代永磁电机的开发重点转到了工业和民用电机上应用,由稀土 Nd-Fe-B 永磁体提供电机的气隙磁场具有结构简单、功率密度大和效率高等特点, Nd-Fe-B 永磁体作为励磁源深受电机制造业的青睐,这时的永磁体受到着电机负载的影响,使得工作的状态点随着退载的变化导致在退磁曲线上也发生着动态变化。但是在这个过程当中,气隙磁场是无法自动调节,无法实现动态的平衡。所以在实际的进程当中最好采用电压自动调节器(简称 AVR)的模式来自动调节励磁电流,进而来补偿电枢反应,最终有效的提高稳态电压调整率精度。但是在实际的工况点运行的进程中,永磁发电机的稳态电压调整率要比电励磁发电机大得多,为了解决永磁发电机无法自动调节气隙磁场的难题,本文提出研究与设计一种单相自复合励磁稀土永磁发电机(SEHEREPMG),该课题已于 2016 年 10 月获得国家发明专利。

SEHEREPMG 是由永磁发电机和自复合励磁控制系统组成,其主要的设计内容涵盖,在发电机空载运行时能够由永磁体提供出气隙磁场,进而有效的建立空载电压。尤其是当发电机挂上负载时,此时发电机的控制器将能够实时的检测到负载的电流的变化。进而将负载电流输送到单片机或工业

控制的计算机当中,最终实现逻辑运算。同时,判断其所对应的预置设定所分挡的电流值范围将其转换成触发信号,此时由触发信号去对应控制着电子开关的开通和关断。通过调节对应的电子开关来实现电路的开通和关断。自动执行投切对应的自励电容量去调节自励励磁电流建立补偿负载电枢反应的电磁势,形成一种由永磁体和自励电磁复合的励磁系统,实现了 SEHEREPMG 气隙磁场可控调节性,解决了永磁发电机气隙磁场无法调节的难题,本课题采用计算机编程设计 SEHEREPMG 的电磁方案,试制出单相 5kW 典型规格的样机,通过样机试验实测性能数据的分析说明:SEHEREPMG 降低了稳态电压调整率和波形畸变率的值,其指标达到电机行业的相关标准要求,表明本课题的分析与研究的思路是正确的、设计方案可行的,样机试制成功具有工程实用性。

1 永磁发电机的磁势分析

在稀土永磁发电机转子的铁芯中镶嵌上永磁体形成建立气隙磁场的磁极,定子铁芯中绕嵌上电枢绕组,由外机械动力驱动转子旋转,气隙磁场切割电枢绕组产生感应电动势,发电机带上负载产生负载电流,将输入的机械能转换成电能输出,图 1 所示为稀土永磁发电机的结构示意图。

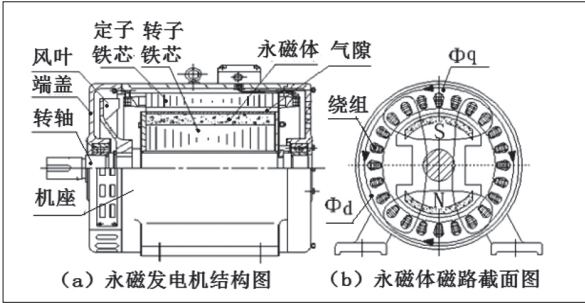


图 1 2 极永磁发电机结构示意图

图中 (b) 磁路结构由于气隙长度 δ 不均匀,气隙磁阻不相等,交、直轴磁路不对称,交轴电抗 X_{aq} 与直轴电抗 X_{ad} 不相等,交、直轴磁通分别为 Φ_q 和 Φ_d ,属于凸极式同步电机的磁路结构,所以应用 Blondel 的双反应理论分解为交、直电枢反应。在实际的运行进程当中,同步电机的电枢磁势

与转子磁势的相对位置主要取决于负载电流的性质,但是在感性的负载电流变化的背景之下,能够有效的产生电枢反应对转子磁场起着去磁作用。与此同时,容性的负载电流产生电枢反应是起着磁化作用,一般发电机都是带感性负载,本文研究单相 SEHEREPMG 的电枢电流建立的电枢磁势在时间上是脉动的、在空间上是静止的,根据单相磁势分析理论可以分解成两个幅值相等、转向相反的旋转磁势,即正序磁势和负序磁势,正序磁势相对于定子以同步转速旋转。在磁场当中,转子的磁场没有发生着相对的运动。所以正序磁势产生的电枢反应对转子磁场起到去磁或磁化作用。

图 2 所示为永磁发电机感性负载的电磁相量图,永磁体磁通 ϕ_c 产生永磁体磁势 F_c , 负载电流 I_z 建立的电枢磁势 F_z 与 F_c 合成为负载气隙磁势 F_δ , 空载时永磁体磁势感应的电动势 E_0 , 负载时合成磁势感应的电动势 E_δ , 电枢绕组电阻 R_1 , 内功率因数角 ψ , 负载功率因数角 ϕ , 发电机电枢绕组端电压 U 。

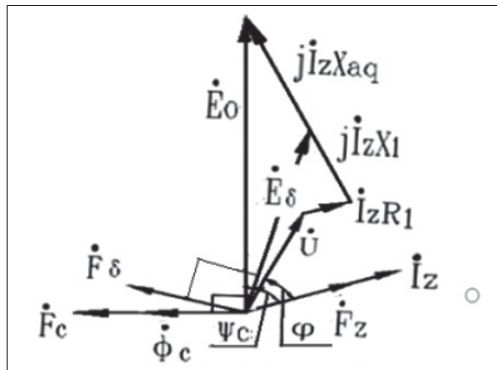


图 2 永磁发电机感性负载的电磁相量图

由于发电机带上感性负载,所以负载电流 I_z 滞后于 E_0 , 产生的直轴电枢反应起到去磁作用使得 F_δ 分量比 F_c 小,同时,永磁体受到电枢反应作用其工作点沿退磁曲线向下移动,负载时永磁体发出的磁通量要比空载时的磁通量小,因此 F_δ 随着负载增大而进一步减小, E_δ 也就比 E_0 小得很多, U 随着 E_δ 的减小而减小,这样,当负载电功率不变时由于 U 的减小使得 I_z 反而增大, $I_z R_1$ 压降也增大、稳态电压调整率的值增大,所以永磁发电机存在稳态电压调整率要比采用 AVR 调节的电励磁发电机大的缺点,难以达到对稳态电压调整率指标要求较高相关作业设备的用电要求。

本文介绍的 SEHEREPMG 是基于上述稀土永磁发电机基础上研究的,图 3 为 SEHEREPMG 的电磁相量图,在永磁发电机基础上增加一套由自动控制器触发电子开关管实施自动投切自励磁电容的设施,电容电流 I_R 的相量超前于 U 相量 90 电角度而产生起磁化作用的直轴电枢反应 F_R , 用以抵消感性负载电流 I_z 的去磁作用,这样合成的磁势 F_δ 要比图 2 合成的磁势 F_δ 大得多,实现了 SEHEREPMG 气隙磁场可控调节,提高了稳态电压调整率。

SEHEREPMG 自动投切自励磁电容控制调节 I_R 以保证电压稳态调整率满足在相关作业设备用电要求的范围,负载是连续变化的,而自动投切自励磁的电容是有级的,所以自动

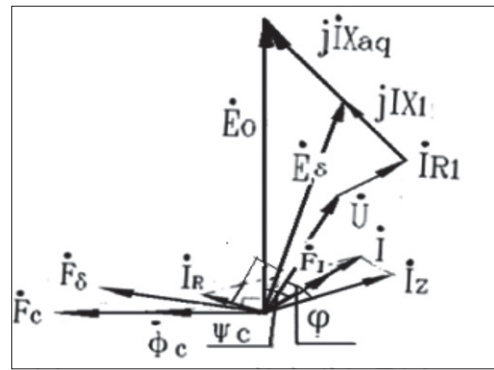


图 3 SEHEREPMG 的电磁相量图

投切的自励磁电容值要依据负载大小而定,即调节 I_R 值的大小要控制 F_δ 。弱小于 F_c , 负载 U 也弱小于空载 U_0 , 否则,如果 I_R 调节得太大就会出现势合成的磁势 F_δ 比空载时的永磁体磁势 F_c 大得太多,反而使负载 U 比空载 U_0 大得很多,使得稳态电压调整率超标准值,因此 I_R 最佳控制范围是在于 I_R 与 I_z 合成的 I 相量弱超前或弱滞后于 U 的相量,最终能够有效的确保稳态电压的调整率能够确保在控制的要求范围之内。

2 自复合励磁控制系统

根据 SEHEREPMG 电磁相量与磁势的分析,提出其自动投切自励磁电容建立磁化电流实现 SEHEREPMG 气隙磁场可调节的思路,研究其控制系统的设计方案,图 4 所示为 SEHEREPMG 自复合励磁控制系统示意图。

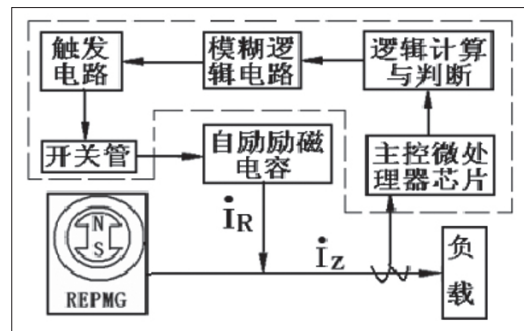


图 4 SEHEREPMG 自复合励磁控制系统

图 4 中由主控微处理器芯片、逻辑计算与逻辑判断、模糊逻辑电路以及触发电路和电子开关管组成自动控制器,主控微处理器芯片采用多功能电能计量芯片将实时检测负载电流 I_z 值送入单片机进行逻辑计算,将算出对应的 I_z 值进行实时逻辑判断,判断出与所对应几个基于负载电流 I_z 大小分挡的设定电流值后,其结果送入模糊逻辑电路,通过模糊逻辑电路产生触发电子开关管的触发信号去触发电子开关管执行自动投切对应各档的自励磁电容,产生对应的电流 I_R 建立电励磁磁势抵消电枢反应,实现 SEHEREPMG 气隙磁场的可调性,外机械动力驱动 SEHEREPMG 旋转,当 SEHEREPMG 空载时 I_z 为零,电子开关管处于全关断状态,气隙磁场由永磁体单独提供建立空载电压,即永磁发电机为固有空载状态,当 SEHEREPMG 带阻性负载时,无功电流分量为零,所以经过控制器计算和判断后能够有效的产生触发信号,并且自动的投切对应的电磁容量,使得合成 I 为弱容性状态, I_R 产生

磁化作用使得 F_{δ} 的直轴分量弱大于 F_c ，补偿电枢绕组的压降减小端电压的变化，当 SEHEREPMG 为负值时。此时经过控制器控制的自动励磁电容量发生着变化。由于自动投切电容量有级的，所以合成 I 处于弱容性或弱感性状态， I_r 产生磁化作用抵消去磁作用，使得负载电枢端电压弱低于空载时的电压，这样自动调节解决了永磁发电机无法调节气隙磁场的难题，因此 SEHEREPMG 具有电压稳态调整率小和效率高等特点。

3 典型规格样机的试制与分析

3.1 典型规格样机的试制

本课题设计的单相 (5kW) SEHEREPMG 典型规格样机的极数 $P=2$ ，额定转速 $n_N=3000r/min$ ，额定容量 $P_N=5kW$ ，额定频率 $f_N=50Hz$ ，额定电压 $U_N=230V$ ，额定功率因数 $\cos \phi =0.9$ ，额定电流 $I_N=24.1A$ ，转子为径向式磁极结构的永磁磁极，其特点是由两个永磁体串联起来提供磁动势，选用剩磁 B_r 为 $11.8 \sim 12.2kGs$ ，矫顽力 $H_{cb} \geq 10.8kOe$ ，内禀矫顽力 $H_{cj} \geq 25kOe$ ，最大磁能积 $(BH)_{max}$ 为 $33 \sim 36MGOe$ ，工作温度可达 $180^{\circ}C$ 的稀土钕铁硼 (Nd-Fe-B) 永磁体励磁，转子冲片上设有隔磁桥，隔磁桥的设计是减少永磁体漏磁的关键，即要考虑减少永磁体漏磁提高永磁体的利用率，又要考虑到转子结构的机械强度，定子电枢绕组为 B 级绝缘，控制器设计为三路电子开关形成 8 档组合投切对应于负载的励磁电容量，采用高性能电机专用的智能测量仪器分别实测出 SEHEREPMG 样机在有和无采用控制系统状态下的空载与感性负载的电气性能，图 5 所示为 SEHEREPMG 空载电压波形，空载时气隙磁场由永磁体单独提供的，所以有无采用控制系统的状态是一样的，是永磁发电机固有的空载性能，图 6 所示为 SEHEREPMG 样机采用控制系统状态时的满载（感性 $\cos \phi =0.9$ ）电压波形图，图 7 所示为 SEHEREPMG 样机无采用控制系统状态时的满载（感性 $\cos \phi =0.9$ ）电压波形图，表 1 所示为 SEHEREPMG 样机为有和无采用控制系统状态下实测负载（感性 $\cos \phi =0.9$ ）的电气性能数据。

3.2 典型规格样机的性能分析

本文针对以上的实验数据有效的分析了稀土永磁发电机的气隙磁场的特点，提出实现可控调节 SEHEREPMG 气隙磁场的思路与控制方法，成功试制出单相 SEHEREPMG 典型规格的样机，并通过对样机在有、无控制系统状态进行实测负载（感性 $\cos \phi =0.9$ ）的电气性能可见：

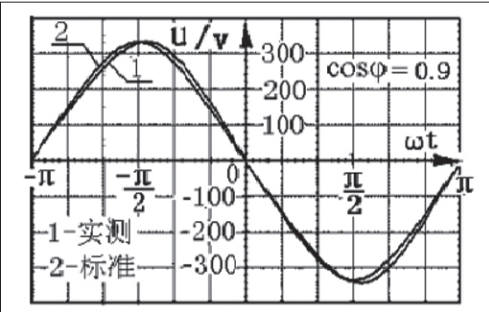


图 5 SEHEREPMG 空载的电压波形

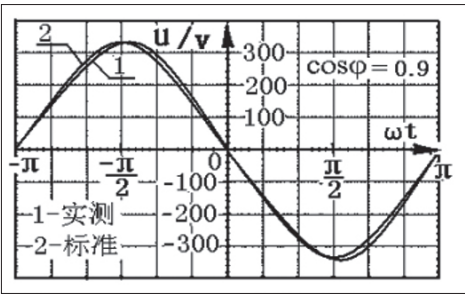


图 6 SEHEREPMG 采用控制系统满载的电压波形

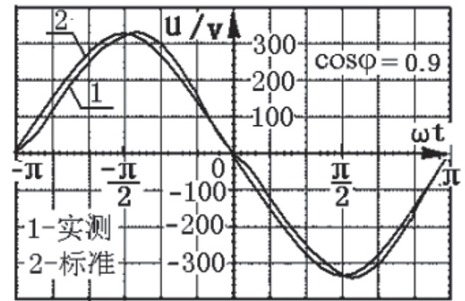


图 7 SEHEREPMG 无采用控制系统满载的电压波形

① 电压稳态调整率：空载时气隙磁场由永磁体单独提供的，稳态电压调整率为 3.74%，对于无控制系统的状态，永磁发电机从空载到超载 8% 的过程中，稳态电压调整率从 3.74% 变化到 -17.8%，这是一方面由于永磁体受到感性负载电枢反应的去磁作用，永磁体的工作点在退磁曲线往下移动，发出的磁通量减小，发电机的感应电动势降低；另一方面由于负载增加电枢电流增大，电枢绕组的压降随之增大，加剧了发电机的端电压下降，所以稳态电压调整率绝对值快速增大；对于采用控制系统的状态，SEHEREPMG 从空载到超载 8% 的过程中，而稳态电压调整率从 3.74% 变化到 -3.82%，说明永磁体虽然同样受到电枢反应的去磁作用，工作点下移磁通量减小以及负载增加引起电枢绕组的压降增大等现象，但是采用自动复合励磁控制系统，根据负载情况自动投切对

表 1 SEHEREPMG 样机有、无采用控制系统状态实测负载（感性 $\cos \phi =0.9$ ）性能数据

控制系统	功率 /kW	频率 /Hz	电压 /V	负载电流 /A	稳态电压调整率 %	电压波形畸变率 %
无	0.00	51.5	238.6	0.00	3.74	2.90
	1.22	51.2	234.2	5.79	1.82	5.60
	2.47	50.9	227.4	12.1	-1.13	9.5
	3.55	50.5	217.6	18.1	-5.39	10.9
	4.85	50.1	205.3	26.3	-10.86	13.7
	5.41	48.9	189.7	31.7	-17.8	14.5
有	0.00	51.5	238.6	0.00	3.74	2.90
	1.28	51.1	235.3	6.04	2.30	3.80
	2.50	50.9	231.8	12.0	0.04	4.10
	3.62	50.2	226.3	17.8	-1.60	4.30
	5.01	49.8	223.9	24.9	-2.65	4.32
	5.38	49.6	221.2	27.0	-3.82	5.10

（下转第 24 页）

否根据设计图纸来作业”等。

2.2 注重协同合作

自动化设备生产与制造过程是对设备研发设计理念的最终落实和呈现。因此,在加工生产中,只有通过不同部门的协同努力,才能更好地将设计理念或产品立意呈现出来。首先,应加强生产制造部门与研发部门的沟通交流,减少不必要的程序与环节,使研发人员能够实时地融入到设备生产与制造的过程中,随时掌握设备的运行情况。譬如,通过构建信息反馈系统的方式,将制造部门所遇到的问题,及时反馈到研发部门,从而在技术指引与方法引导的过程中,提高设备制造的质量与效率。其次,引导研发人员参与到设备制造的全过程,使其通过与制造人员进行沟通交流的方式,明确设备制造的细节与问题,以此确保设计方案与实际设备的一致性。

2.3 及时进行调整

质量检查是自动化设备制造的最后环节。在这个过程中需要根据相应的设计标准与行业规范,来对设备的性能与参数进行测试,以此排查设备所存在的质量问题与安全隐患。如果自动化设备存在明显的质量问题,就需要从设计环节出发,检验是否存在设计缺陷,并及时进行调整与完善。如果在设计环节不存在任何形式的缺陷,则需要从制造环节入手,从制造标准、工艺规范及原材料等角度出发,对整个

制造流程进行调整。随后是交付、调试及维护环节,在该环节需要技术人员实时记录设备出现故障的几率及问题类型,并将其反馈给设计人员,力求通过优化设计与制造环节的方式,规避此类问题的出现。

3 结语

自动化设备是我国工业自动化、智能化发展的基础,是智能制造的前提条件。在计算机网络快速发展的过程中,自动化设备的开发设计与生产制造将呈现出信息化、数字化、智能化的发展特征,能够更好地通过计算机互联网技术,提高自动化设备设计与制造的质量,为我国的社会市场经济的快速发展提供依托和抓手。

参考文献:

- [1] 刘浩,赵越超.自动化机械设备研发设计及制造的要点分析[J].湖北农机化,2019(06):54.
- [2] 孙存虎,申雪草.机械自动化设备的安全控制管理[J].中国设备工程,2021(02):45-46.
- [3] 梁建忠.工业自动化设备的设计制造及安装调试方法[J].设备管理与维修,2019(15):129-130.
- [4] 吴磊.工业自动化设备的设计制造及安装调试方法[J].科技视界,2020(28):84-85.

作者简介:程宾(1985.3-),男,汉族,本科,中级职称,研究方向为电气自动化。

(上接第22页)

应的自励磁电容量产生 I_R 起到了磁化作用,抵消了负载电流的电枢反应,提高气隙合成磁势 F 。增大感应电动势 E ,使得发电机的端电压下降得比较少,所以提高了稳态电压调整率的性能。

②电压波形畸变率:发电机气隙磁场的波形曲线受到电枢反应的作用会产生偏移和扭曲变形,比较图6与图7实测波形曲线可见,图7实测波形曲线不但严重偏移了标准的正弦波形曲线,而且在原点附近曲线出现扭曲变形,光滑性也比较差,而图6实测波形曲线就比较靠近标准的正弦波形曲线,而且曲线的对称度和光滑性都比图7好得多,比较表1数据可见,无控制系统永磁发电机的电压波形畸变率从空载的2.9%变化到负载超载8%时为14.5%,而采用控制系统SEHEREPMG的电压波形畸变率从2.9%只变化到负载超载8%时4.5%,这就说明SEHEREPMG可以自动调节气隙磁场改善电压波形畸变率。

通过实测稀土永磁的电气性能可见,SEHEREPMG在额定负载及小于额定负载内运行,稳态电压调整率和电压波形畸变率均都达到国家小型单相同步发电机机JB/T3320.2行业标准中的 $\leq \pm 5\%$ 的标准值,比较接近于 $\pm 3\%$ 的标准值,而无控制系统的永磁发电机都超过 $\pm 10\%$ 的标准,说明SEHEREPMG实现气隙磁场的可调提高了稳态电压调整率和电压波形畸变率的品质效果。

4 结语

本文通过研究稀土永磁发电机的磁场特性提出

SEHEREPMG的设计方案,并成功试制出典型规格的样机,通过样机的实测波形和电气性能数据的比较可见,SEHEREPMG能够有效地将检测到的负载电流信号转换成为了能够控制电子开关执行器的磁电容量。建立电磁势补偿电枢反应的电励磁电流,从而随负载动态调节气隙磁场,实现了稀土永磁发电机气隙磁场的可控调节性,解决了稀土永磁发电机无法调节气隙磁场的难题,大大改善了稳态电压调整率和电压波形畸变率的品质,该课题研究思路与设计方案是正确可行的(该课题已获得国家发明专利),样机试制是成功的,具有实际工程的实用性。

参考文献:

- [1] 唐任远.现代永磁电机理论与设计[M].第一版.北京:机械工业出版社,1997.
- [2] 周颖.电机学[M].第三版.北京:中国电力出版社,1998.
- [3] 胡斌,王琰,喻俊鹏.电励磁同步发电机的变励磁控制策略[J].电源学报,2017,(03):176-180.
- [4] 徐剑萍,胡军龙.永磁发电机与电磁发电机对比分析[J].移动电源与车辆,2012,(1):43-45.
- [5] 何山,王维庆等.永磁同步发电机电枢反应去磁效应的分析[J].防爆电机,2005,40(2):8-11.
- [6] 梁波.关于复合励磁稀土永磁同步发电机相关问题的探究[J].科学与财富,2017,(30):246-247.

作者简介:倪榕生(1964-),男,汉族,本科,副教授,研究方向:单片机接口技术、变流技术、电机及其控制技术。