

组合励磁永磁同步发电机主发电机的设计方法

窦 一平

(南京师范大学电气与电子工程学院, 210042, 南京)

[摘要] 提出了组合励磁稀土永磁同步发电机(以下简称 HESG)主发电机部分的一种设计方法,该方法可以定量调控发电机外特性的电压变化率,是设计 HESG 的基础,也能单独设计稀土永磁同步发电机.通过样机的实验验证,说明设计方法是成功有效的.

[关键词] 同步发电机,永磁发电机,组合励磁

[中图分类号]TM351, [文献标识码]A, [文章编号]1672- 1292- (2004)01- 0024- 05

1 概述

组合励磁稀土永磁同步发电机(HESG)的电磁设计可以分为两部分内容:一是主发电机部分的电磁设计,二是辅助电励磁部分的设计.主发电机部分的电磁设计基本上和普通永磁同步发电机相同,但是额定电压对应的电流值必须根据发电机的总体要求来定,另外为了满足 HESG 的电压调节要求,必须对主发电机的外特性进行调控设计.

本文在传统的设计方法基础上,采用了文献[1]的外特性计算模型,提出了一种基于外特性模型的 HESG 设计方法,这种方法还可以单独设计稀土永磁同步发电机,使其满足电压变化率的要求. HESG 的电磁设计总流程图如图 1 所示,下面对有关部分分别进行说明.

2 性能要求

要能够在负载变化范围内保持电压不变, HESG 必须满足电压调节的性能要求.图 2 是 HESG 外特性调节的示意图,其中曲线 0 为电励磁电流为 0 时的外特性;曲线 1 为电励磁电流为 I_{fm} 时的外特性;曲线 2 为电励磁电流为 $-I_{fm}$ 时的外特性;曲线 3 为电励磁电流为 0 时, HESG 主发电机部分的外特性.

本文采用的是双向励磁调节电压的方法,如图 2 所示,电励磁电流为 0 时的外特性过 (I_M, U_N) 点,当负载电流大于 I_M 时,电励磁绕组为正励磁电流;当负载电流小于 I_M 时,电励磁绕组为负励磁电流.

假设 HESG 要求调节电压的负载电流范围是

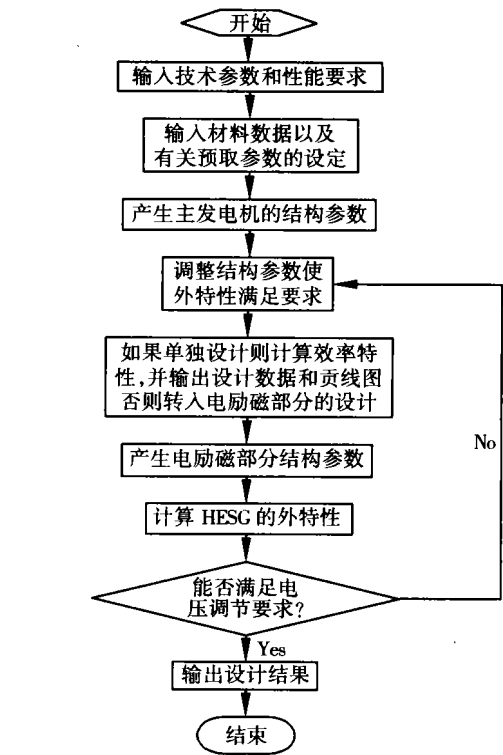


图 1 HESG 电磁设计总流程图

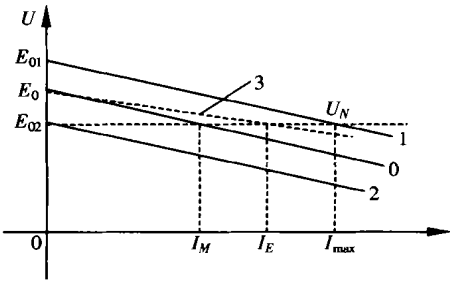


图 2 HESG 外特性调节示意图

0 ~ I_{max} , 则在空载时, HESG 加上负励磁电流的外

特性应该为图 2 中曲线 2, 或比曲线 2 低; 在负载为 I_{\max} 时, HESG 加上正励磁电流的外特性应该为图中曲线 1, 或比曲线 1 高. 这样就可以在 $0 \sim I_{\max}$ 负载电流变化时, 通过调节电励磁电流的大小和方向, 使电压保持额定电压 U_N 不变. 满足电压调节的性能要求用公式表示如下:

$$U \Big|_{I_f = -I_{fm}}^{I_f = 0} \leq U_N \quad (1)$$

$$U \Big|_{I_f = I_{fm}}^{I = I_{\max}} \geq U_N. \quad (2)$$

U 为 HESG 的端电压. 考虑到线性调节, HESG 在电励磁电流为 0 时, 外特性曲线上对应 U_N 的电流在 I_M 附近, 其中:

$$I_M = \frac{1}{2} \times I_{\max}. \quad (3)$$

这样在 $0 \sim I_{\max}$ 电流调节范围内, 满足电压调节要求的最大正负励磁电流基本相等, 设计出的辅发电机部分的体积比较合理.

3 主发电机部分的电磁设计

根据图 1 的 HESG 设计总流程图, 首先要进行主发电机部分的初始结构参数设计, 主发电机部分的设计是从选择转子结构开始的, 通常的转子结构有径向式和切向式, 本文样机为径向式. 下面介绍结构参数设计的主要内容.

3.1 结构参数初值的产生

一般的参考书中介绍的永磁同步发电机电磁设计都是在选定好转子结构后, 首先确定磁钢的体积和尺寸, 采用的公式如下^[4,5]:

$$V_M' = 225 \times \frac{P_N \sigma_0 K_{ad} K_F}{f K_u K_B C (BH)_{\max}} \quad (4)$$

式中: V_M 为磁钢的体积; P_N 为发电机的额定容量; σ_0 为空载漏磁系统; K_{ad} 为直轴电枢反应折合系数; K_F 为发电机短路时每极永磁体磁势与直轴电枢反应磁势之比; f 为额定频率; K_u 为电压系数; K_B 为磁场波形系数; C 为永磁体利用系数; B 是磁感应强度; H 是磁场强度; 永磁材料的最大磁能积用 $(BH)_{\max}$ 表示.

式(4) 用于定性分析是很方便的, 但是由于其中系数较多, 且 σ_0 、 K_{ad} 、 K_F 、 K_u 、 K_B 和 C 都有较大的取值范围, 不同的磁路结构也会影响这些系数的取值, 故这些系数组合起来得到的永磁材料体积数据范围变化较大. 因为要满足电压调节的要求就必须准确地设计出 HESG 的外特性, 所以采用公式

(4) 的设计方法在 HESG 的设计中并不实用.

本文提出了一种比较实用的方法来设计主发电机, 这种方法和传统方法不同, 将磁钢尺寸放在后面确定. 先根据电机设计原理确定电枢铁心和电枢绕组的初始数据, 再利用文献[1] 和[2] 对永磁同步发电机外特性研究的成果, 根据发电机结构参数与性能参数的内在规律, 以及结构参数与性能参数之间关系的数学模型, 通过直接调整有关结构参数来改变性能参数, 使外特性满足要求. 产生结构参数初始值的程序流程图如图 3 所示, 在设计过程中所采用的相应计算公式如下:

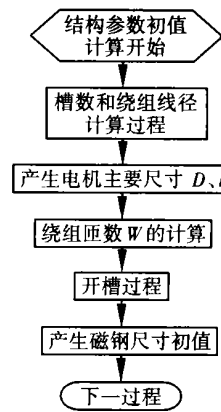


图 3 主发电机结构参数初值设计流程图

(1) 槽数和绕组线径的计算

预取了每极每相槽数 q 和并联支路数 a 后有:

$$Z = 2pmq \quad (5)$$

$$d_{a0} = \sqrt{\frac{4}{\pi} \frac{I_N}{aJ}} \quad (6)$$

其中, Z 为槽数, d_{a0} 为线径初值, J 为电流密度. 由 d_{a0} 和标准线规表可以产生并绕根数和标准线径 d_{a1} .

(2) 电机的主要尺寸 D 和 l 的确定

根据电机设计原理有:

$$D^2 l = \frac{5.5 P_{Np} \times 10^3}{\alpha k_{w1} B_{\Phi} A n} \quad (7)$$

其中, D (m) 为电枢内径, l (m) 为主发电机部分的铁心长度, P_{Np} (kW) 为计算功率, α 为极弧系数, k_{w1} 为基波绕组系数, A (A/m)、 B_{Φ} (T) 为电磁负荷, 其数据可以根据通常的取值范围来预取, 再取长径比 l/D 来确定主要尺寸 l 和 D .

(3) 绕组每相串联匝数 W 的计算

根据预取的绕组电密 J 和预取的气隙磁密 B_{Φ} , 可以将绕组的有关参数初值确定下来, 每极磁通量初值 Φ_0 (Wb) 可以根据预取的气隙磁密初值 $B_{\Phi 0}$ (T) 求得:

$$\Phi_0 = l\tau\alpha B_0 \tag{8}$$

式中: $\tau(m)$ 为极距; α 为极弧系数. 每相绕组串联匝数 W 用下式计算:

$$W = C_u U_N / (4.44 f_N K_{w1} \Phi_0) \tag{9}$$

式中: C_u 为考虑漏阻抗压降的系数, 称电压系数, 一般取 1.1 ~ 1.3; f_N 为额定频率(Hz); K_{w1} 为绕组系数; 每元件匝数初值 W_0 为:

$$W_0 = m\alpha W / Z. \tag{10}$$

(4) 开槽过程

开槽过程是根据每元件匝数 W_c 、每根导体线径 d_{cu} 、电枢内径 D 等来确定槽的尺寸, 其中主要是确定槽深 h_z , 本文采用了试探迭代法来计算, 即给一个槽深的试探值, 计算槽面积 A_p , 将 A_p 与由槽满率估算得到的面积 A 比较, 满足一定相对差值即可. 槽形尺寸面积的估算公式为:

$$A = \frac{m_c W_c m_z d_{cu}^2}{K_s} \tag{11}$$

其中: m_c 为每槽层数; 双层绕组为 2; 单层为 1; m_z 为绕组并绕根数; d_{cu} 为每根导体最大线径; K_s 为预取槽满率.

(5) 磁钢尺寸的计算

磁钢的尺寸主要有磁化方向的平均长度 h_m 和磁钢的宽度 b_m . 径向结构磁钢的宽度由极弧系数确定, 设计 h_m 时可以先根据转子外径, 给一个初始值, 然后根据磁路计算得到的磁势就可以初步计算出磁钢磁化方向的平均长度, 为了满足外特性要求, 还需要调节 h_m . 这两个参数的计算公式如下:

$$b_m = D_2 \sin(\beta/2) \tag{12}$$

$$h_m = F_m \times 10^3 / (2H_m) \tag{13}$$

式中: $D_2(mm)$ 为转子外径; β 为极弧对应的圆心角; K_b 为比例系数; $F_m(A)$ 为磁路计算所需磁势.

3.2 结构参数的调整过程

结构参数调整的目的主要是满足外特性的性能要求: 即在电励磁电流为 0 时, 主发电机外特性曲线过 (I_E, U_N) 点; 单独设计永磁发电机时外特性过 (I_N, U_N) 点, 并且满足外特性固有电压变化率的要求; HESG 的外特性满足式(1) 和式(2) 的要求. 结构参数自动调整的程序流程图如图 4 所示, 其中关键的数学模型是外特性计算, 有关内容及公式请参见文献[1].

由于 h_m 是一个重要的设计参数, 因此本文在程序自动调节时将 h_m 作为内循环微调变量. 铁芯

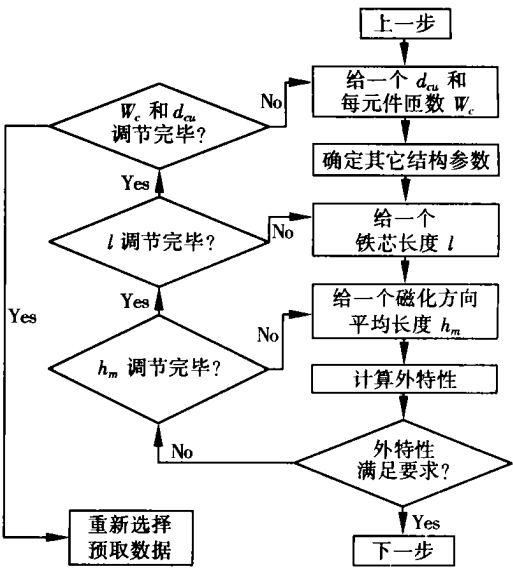


图 4 结构参数调节流程简图

长度 l 对外特性的斜率影响不大, 但对电压值有较大的影响, 可以细调电压, 故作为 h_m 的外层循环调节变量, 使外特性曲线过额定电压点. W_c 变化 1 匝, 空载电势的变化可能有好几伏, 因此将每元件匝数 W_c 作为外层循环调节变量.

通过上面的变量调节方法, 一般可以保证外特性过额定点, 如果还不能满足要求, 则需要重新考虑设计方案, 如重新选择电磁负荷和电流密度等初始预取数据.

4 电磁设计计算例

本文对两台 1.5 kVA 的 HESG 样机分别进行了电磁校核计算和电磁设计(样机的结构和详细参数请参阅文献[3]), 加工了样机, 并将计算结果和实测数据进行了对比. 首先对一台原有的 HESG 样机进行了电磁校核计算, 我们把该样机称为样机 1, 其主要技术指标和结构参数如表 1, 磁钢为钕铁硼.

样机 1 的计算结果是: 在电励磁电流为 0 且额定功率因数时的电压变化率为 24.49%, 较大; 在额定负载电流时的电压值为 220.8 V, 比额定电压 230 V 小. 本文将用前面提出的数学模型对样机 1 进行改进设计, 新设计的样机称为样机 2, 设计方案是在样机 1 的基础上, 通过结构参数的调节, 达到以下两个设计目标, 在电励磁电流为 0 时:

- (1) 外特性曲线过额定点, 即 $\cos \varphi = 0.8, I = I_N$ 时的电压由样机 1 的 220.8 V 增加到 230 V 左右.
- (2) 额定功率因数时的固有电压变化率由样机 1 的 24.5% 降低到 15% 左右.

表 1 样机 1 的主要技术指标和结构参数

技术指标	参数	技术指标	参数
容量 /kVA	1.5	电压 /V	230
功率因数	0.8	转速 /r·min ⁻¹	1 500
极对数	2	定子齿数	24
相数	3	绕组相带	60
电枢外径 /mm	167	电枢内径 /mm	104
定子铁心材料	DR510-50	转子材料	10# 钢
导体并绕根数	1	每元件匝数	38
电枢导体线径 /mm	0.56	磁极磁化方向长度 /mm	6
极弧系数	0.686	气隙长度 /mm	1.9
磁极宽度 /mm	51.4	主发电机铁心长度 /mm	106
磁钢 B _r /T	1.018	磁钢 H _c /kA·m ⁻¹	820.80

辅助电励磁部分数据

电枢长 /mm	16	绕组支架外径 /mm	90
支架轴向长度 /mm	53	绕组支架内径 /mm	82.8
水平磁极长度 /mm	82	绕组支架内部长度 /mm	41.2
水平磁极内径 /mm	91	支架内圆筒外径 /mm	43.9
水平磁极外径 /mm	102.3	支架内圆筒内径 /mm	28.1
隔磁板厚度 δ _g /mm	4.0	轴材料	45# 钢

通过以上两个设计目标的实现,可以说明本文采用的数学模型和设计程序能够实现对稀土永磁同步发电机或 HESG 主发电机外特性的定量调控.

经过用前面提出的设计计算程序的计算,当结构参数按表 2 调整时,设计方案可以满足要求.表 2 是两台样机在结构和材料上不同参数的对比,样机 2 的其它参数和样机 1 完全一样.

表 3 两台样机阻抗参数以及性能参数计算值的对比

	R_1/Ω	X_{ad}/Ω	X_{aq}/Ω	U_N/V	Δu_1^*	Δu_2^*	G_m/kg	G_{Cu}/kg
样机 1	12.54	20.83	31.23	220.8	13.96%	24.49%	1.07	0.94
样机 2	6.79	13.14	15.39	232.7	7.48%	14.93%	1.56	1.31

表 4 HESG 样机 1 电磁校核计算的外特性数据与实测数据的比较

$\cos \varphi$ = 1.0	实测	I/A	0	0.67	0.81	0.94	1.14	1.60	2.10
		U/V	276.00	267.33	264.67	263.00	261.33	254.33	243.33
	计算	U/V	277.15	268.33	266.30	264.47	261.51	254.51	246.32
		γ	0.41%	0.37%	0.62%	0.56%	0.07%	0.07%	1.23%
$\cos \varphi$ = 0.8	实测	I/A	0	0.69	1.19	1.69	1.84	2.19	
		U/V	276.00	256.00	244.00	229.33	223.83	213.67	
	计算	U/V	277.15	259.57	246.70	233.54	229.53	220.48	
		γ	0.42%	1.40%	1.11%	1.84%	2.54%	3.19%	

从表 4 中可以看出,电磁校核计算的外特性数据与实测值的最大相对误差为 3.19%,说明本文所采用的电磁校核计算模型能满足工程计算精度要求.

5.2 样机 2 电磁设计的验证

本文设计并加工了样机 2, 其外特性计算和实测数据的比较如表 5, 相对误差计算如式(14).

从表 5 中可以看出, 外特性数据的最大相对误差为 1.09%, 说明本文所采用的 HESG 的设计计算

表 2 样机 1 和样机 2 结构参数以及磁钢性能参数的对比

	d_{cu}/mm	$W_c/\text{匝}$	h_m/mm	B_r/T	$H_c/kA\cdot m^{-1}$
样机 1	0.56	38	6.0	1.018	820.80
样机 2	0.71	33	8.7	1.070	827.60

表 3 是两台样机阻抗参数以及性能参数和固有电压变化率计算值的对比, 其中 R_1 为电枢绕组电阻; X_{ad} 为直轴电枢反应电抗; X_{aq} 为交轴电枢反应电抗; E_0 为空载电势; Δu_1^* 为 $\cos \varphi = 1.0$ 时的电压变化率; Δu_2^* 是 $\cos \varphi = 0.8$ 时的电压变化率; G_m 为磁钢重量; G_{Cu} 为用铜量.

从表 3 看出, 前面提出的两个设计目标都得到了满足, 说明本文提出的定量调控发电机固有电压变化率的理论分析和设计计算方法是实用的.

5 实验验证

为了验证本文设计计算方法和设计程序的可靠性, 我们先后加工了样机并进行了计算和实验数据的比较.

5.1 样机 1 电磁校核计算与实测的比较

这是前面提到的 1.5 kVA 的 HESG 样机 1, 其外特性数据计算和实测的比较如表 4, 相对误差计算公式为:

$$\gamma = \frac{|U_{\text{实测值}} - U_{\text{计算值}}|}{U_{\text{实测值}}} \times 100\% \tag{14}$$

模型能满足工程计算精度要求, 设计和样机加工是成功的.

6 小结

(1) HESG 的主发电机部分设计与单独设计稀土永磁同步发电机比较, 单独设计比较简单, 只要外特性过额定电压点 (I_N, U_N), 而 HESG 主发电机部分的设计必须满足电压调节的要求, 即 HESG 外特性必须同时满足(1)和(2)式的要求, 所以必须要

对外特性进行调控设计.

(2) HESG 满足电压调节要求,主发电机的外特性调控设计是关键,和传统设计方法不同,本文提出了将磁钢尺寸放在后面确定,并在外特性数学

模型基础上,对外特性进行定量调控设计,这种方法是实用有效的,电磁设计计算模型经过实验验证能满足工程精度要求.

表 5 HESG 样机 2 电磁设计计算的外特性数据与实测数据的比较

$\cos \varphi$ = 1.0	实测	I/A	0	0.54	0.74	1.13	1.65	1.86	2.16
		U/V	265.00	261.67	261.17	257.33	253.33	250.67	247.33
	计算	U/V	267.07	263.24	261.76	258.78	254.50	252.63	250.04
		γ	0.78%	0.60%	0.23%	0.56%	0.46%	0.78%	1.09%
$\cos \varphi$ = 0.8	实测	I/A	0	0.57	0.96	1.15	1.59	2.03	
		U/V	265.00	258.00	252.67	249.33	243.00	235.17	
	计算	U/V	267.07	258.16	252.09	249.06	242.05	235.03	
		γ	0.78%	0.06%	0.23%	0.11%	0.39%	0.06%	

[参考文献]

[1] 窦一平,陈海镇. 稀土永磁同步发电机外特性的向量法分析[J]. 南京航空航天大学学报, 1999, 31(3) : 312~317.

[2] 窦一平,陈海镇,严仰光. 稀土永磁同步发电机结构参数对外特性的影响[J]. 中小型电机, 2000, 27(4) : 45~47.

[3] 窦一平,陈海镇,严仰光. 组合励磁稀土永磁同步发电机的基本原理和 design 方法[J]. 中小型电机, 2001, 28 (4) : 20~ 24.

[4] 李钟明,刘卫国,刘景林等. 稀土永磁电机[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.

[5] 唐任远. 现代永磁电机[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.

Design Method of the Main Part of the Hybrid Excitation Rare Earth Permanent Magnet Synchronous Generator

Dou Yiping

(College of Electrical and Electronic Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, PRC)

Abstract: A design method is brought forward to design the main part of the Hybrid Excitation Rare Earth Permanent Magnet Synchronous Generator (simplified as HESG). The designed voltage characteristic of HESG can be regulated by adopting the method presented in this paper, which is the basis for designing a HESG to meet the voltage regulation demand. The Rare Earth Permanent Magnet Synchronous Generator can also be designed with this method. A prototype HESG has been designed and made, proving that the design method is effective and successful.

Key words: synchronous generator, permanent magnet generator, hybrid excitation

[责任编辑: 刘健]