

汽车发电机定子性能参数分析

顾秋麟

(浙江大东吴汽车电机股份有限公司, 湖州 313000)

【摘要】为使汽车发电机在车辆不同工况下均能满足供电需求,分析并验证了汽车交流发电机定子总成的参数对发电机额定功率和输出特性的影响,结果表明:在定子铁心尺寸规格不变的情况下,不改变槽满率并减小匝数,可提升额定功率,但低速条件下的输出功率下降;由星形接法改为三角形接法或增加中性点,均能在不改变低速输出功率的情况下提高额定功率;将三相电枢绕组改为六相,几乎不影响额定功率和输出特性,但能使输出电流的纹波峰峰值降低。

关键词:汽车交流发电机 输出特性 定子总成 电枢绕组

中图分类号:U463.63

文献标志码:A

DOI: 10.20104/j.cnki.1674-6546.20230021

Analysis of Performance Parameters of Automobile Generator Stator

Gu Qiulin

(Zhejiang Soochow Motor Co., Ltd., Huzhou 313000)

【Abstract】In order to ensure that the automotive generator can meet the power supply requirements under different operating conditions of the vehicle, the influence of the parameters of the automotive AC generator stator assembly on the rated power and output characteristics of the generator was analyzed and verified. The results show that, under the condition of stator core size specifications unchanged, the rated power can be increased without changing the slot filling rate and reducing the number of turns, but the output power can be reduced under low-speed conditions. Changing from star connection to triangle connection or adding a neutral point can increase the rated power without changing the low-speed output power. Changing the three-phase armature winding to six phases hardly affects the rated power and output characteristics, but can reduce the ripple peak value of the output current.

Key words: Automobile alternator, Output characteristics, Stator assembly, Armature winding

【引用格式】顾秋麟. 汽车发电机定子性能参数分析[J]. 汽车工程师, 2024(2): 27-33.

GU Q L. Analysis of Performance Parameters of Automobile Generator Stator[J]. Automotive Engineer, 2024(2): 27-33.

1 前言

汽车交流发电机将发动机输入的机械能转化为电能,是传统燃油汽车电力系统的核心。随着车辆传感器、执行器数量的逐渐增加,控制器的功耗越来越大^[1],对汽车交流发电机的制造和性能要求逐渐提高。

根据对车辆工况特征的分析,不同地域、不同

车辆的高速行驶时间占比均较小^[2],仅提高发电机的额定功率未必能满足车辆的供电需求;增大发电机的体量,使不同转速下输出功率均有所提升,又会使发电机体积过大造成更多的问题。

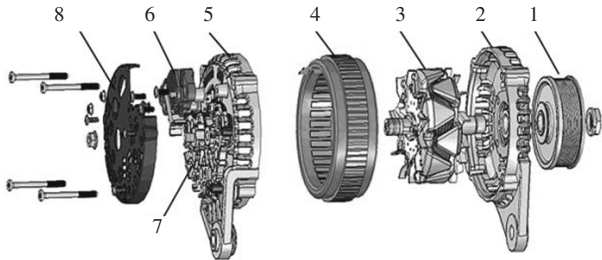
车用发电机对体积与质量的要求较为严格,提高发电机单位质量的输出功率、提高低速工况下的输出功率和发电机的额定功率,是汽车发电机行业一直在研究的课题。本文根据现有成熟产品的参

数,分析发电机定子结构,研究定子总成电枢绕组参数对发电机输出特性的影响,并设计试验样机测试发电机实际性能,与理论分析结果进行对比,验证发电机定子总成电枢绕组参数对输出功率的影响。

2 汽车交流发电机及其定子总成

2.1 交流发电机基本结构

汽车交流发电机主要为鸟嘴形爪极发电机,如图1所示,其主要部件包括皮带轮、前盖总成、转子总成、定子总成、后盖、调节器总成、整流桥总成、防护罩^[3]。



1.皮带轮 2.前盖总成 3.转子总成 4.定子总成 5.后盖
6.调节器总成 7.整流桥总成 8.防护罩

图1 汽车交流发电机结构爆炸图

2.2 定子总成结构

2.2.1 定子总成基本外形

定子总成的基本参数包括外形尺寸和线圈绕组的接线方式、嵌线方式、线径匝数^[4]。定子总成的主要外形尺寸如图2所示。

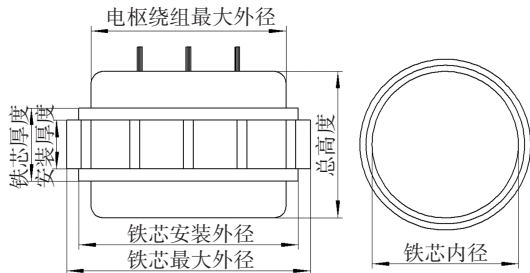


图2 定子总成主要尺寸示意

2.2.2 定子铁芯

定子铁芯是汽车交流发电机励磁回路和固定定子线圈绕组的重要部件,为向转子总成磁场提供励磁回路,通常使用磁导率较高的硅钢片叠压而成,以减小铁芯中产生的电磁涡流,有助于提高发电机的性能。定子线圈绕组的线圈嵌在其内开口的槽中。铁芯的内径、外径、高度、材料、电枢齿的截面结构都会对磁场产生影响,从而改变绕组中的感应电势。但内径、外径和高度受限于发电机的整体结构,电枢齿又需考虑与爪极的极弧系数、齿槽

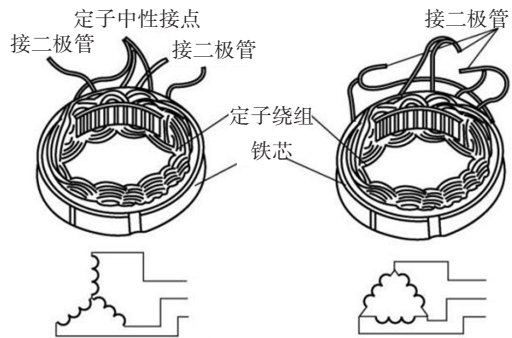
转矩,一般不进行更改。

2.2.3 电枢线圈绕组

目前常见的发电机定子线圈绕组为三相和六相,接线方式有星形和三角形接法,均输出三相交流电。在三相绕组制造过程中,每相绕组产生的感应电动势的频率相同、幅值相等、相位互差 120° 。六相绕组的相位差要求为 60° ,其他要求与三相绕组相同。发电机工作时,感应电动势从线圈绕组中产生并传递到整流桥。绕组由漆包线根据要求波绕或叠绕嵌入铁芯的电枢齿中,其匝数、相数和接线方式会对电性能产生影响,在图2中主要尺寸不变的情况下,这些参数便于更改与试验。

2.3 定子总成电枢绕组参数

定子总成的不同接线方式如图3所示,星形接法还可在中性点增加一根导线,并在整流桥中多并联一组二极管,以提高发电机高速状态下的输出功率。



(a)定子绕组星形连接 (b)定子绕组三角形连接

图3 定子总成星形和三角形接线示意

2.3.1 星形连接

空载时,定子绕组的相电势 E_{YA} 为:

$$E_{YA} = C_e n \quad (1)$$

式中: E_{YA} 为星形连接时的相电势, n 为发电机转速, $C_e = (4K_f K_0 W_f \phi P) / 60$ 为系数, K_f 为发电机结构常数, K_0 为绕组系数, W_f 为每项绕组的匝数, ϕ 为空气间隙的磁通, P 为转子的磁极数。

线电势 E_{YB} 为:

$$E_{YB} = \sqrt{3} E_{YA} \quad (2)$$

接入负载时,星形接法的等效电路如图4所示,其中 R_0 为发电机的等效内阻, R_b 为等效负载电阻。则相电流 I_{YA} 为:

$$I_{YA} = E_{YA} / \sqrt{(R_0 + R_b)^2 + X_d^2} \quad (3)$$

式中: $X_d = 2\pi f L = C_x n$ 为考虑漏感和电枢反应的电抗, f 为频率, $C_x = 2\pi L P_x / 60$ 为系数, L 为定子绕组电感, P_x 为爪极对数。

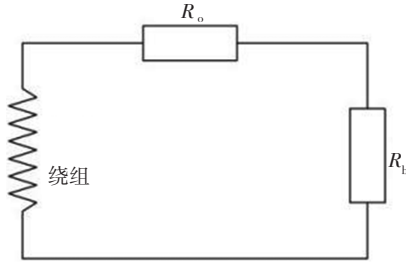


图4 等效电路

接入负载时,线电流 I_{YB} 为:

$$I_{YB} = C_e n / \sqrt{(R_o + R_b)^2 + C_x^2 n^2} \quad (4)$$

高转速条件下, $C_x^2 n^2 > (R_o + R_b)^2$, 则有:

$$I_{YB} \approx C_e n / (C_x n) = (C_e / C_x) \quad (5)$$

2.3.2 三角形接法

三角形接线时,空载条件下定子绕组的线电动势 $E_{\Delta B}$ 与相电动势 $E_{\Delta A}$ 相等:

$$\begin{cases} E_{\Delta B} = E_{\Delta A} \\ E_{\Delta A} = C_e n \end{cases} \quad (6)$$

接入负载时,定子绕组线电流 $I_{\Delta B}$ 为:

$$\begin{cases} I_{\Delta B} = \sqrt{3} I_{\Delta A} \\ I_{\Delta A} = E_{\Delta A} / \sqrt{(R_o + R_b)^2 + C_x^2 n^2} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $I_{\Delta A}$ 为定子绕组三角形连接时的相电流。

高转速条件下,有:

$$I_{\Delta B} = \sqrt{3} C_e / C_x \quad (8)$$

2.3.3 等效电路转换

以星形接法作为参考,对式(2)与式(6)进行比较,当发电机产生 14 V 电压时,有:

$$n_{\Delta 0} = \sqrt{3} n_{Y0} \quad (9)$$

式中: n_{Y0} 、 $n_{\Delta 0}$ 分别为定子绕组星形连接和三角形连接时发电机的空载转速。

由此可得,相同参数条件下,星形接法空载转速是三角形接法的 $1/\sqrt{3}$ 倍。再由式(5)与式(8)比较可得:

$$I_{YBmax} = 1/\sqrt{3} I_{\Delta Bmax} \quad (10)$$

式中: I_{YBmax} 、 $I_{\Delta Bmax}$ 分别为定子绕组星形连接和三角形连接时的最大输出电流。

由此可得,相同参数下,星形接法的最大输出电流是三角形接法最大输出电流的 $1/\sqrt{3}$ 倍^[5]。

综上,要使三角形接法的输出功率与星形接法的输出功率相等,需要将三角形接法的定子总成的匝数增加到 $\sqrt{3}$ 倍。

为提高发电机的输出功率,通过计算得出三角形接法的等效电路匝数,在此基础上,减少三角形接法定子总成的匝数,并增大线径,可在槽满率保

持不变的情况下提高高速工况下的发电量。

2.3.4 星形接法增加中性点

在星形接法基础上增加中性点,是一种提高发电机高速状态下输出功率的常用方法,可使发电机输出功率提高 10%~15%^[6]。

2.3.5 三相与六相电枢绕组

三相电枢绕组使用 3 组二极管进行整流,利用二极管的单向导通性对绕组中的交流电波进行整流,继而输出带纹波特性的直流电。理论上,二极管的正向导通电阻为 0,但实际上二极管存在管压降,可将电路中的二极管视为非线性电阻,如图 5 所示。

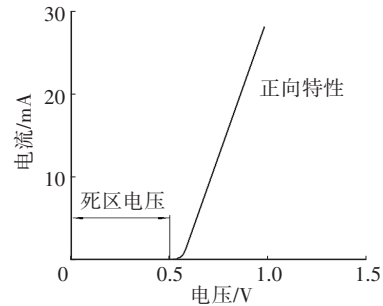


图5 二极管正向特性

二极管由 PN 结和导线封装而成,其电阻随电流的变化而变化,文献[7]使用管压降更低的二极管将发电机的输出效率提升了 6%。因此,二极管的管压降越低,电阻越小,可将二极管视为电阻,三相绕组视为电源,如图 6 所示。

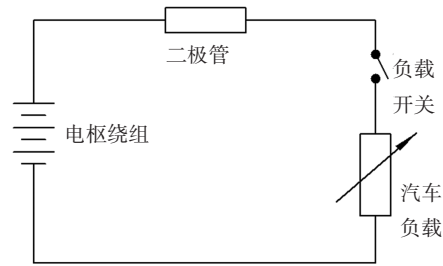


图6 二极管电阻等效电路

在实际应用中,二极管的管压降基本保持不变,通过并联电路可降低内阻,如图 7 所示。

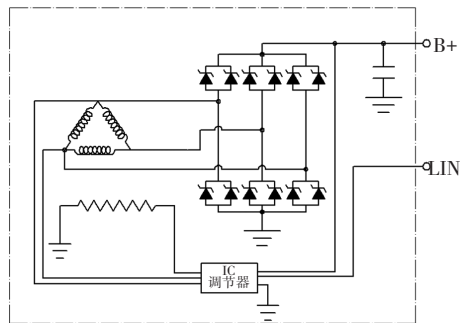


图7 二极管并联电路示意

该方法无法充分发挥二极管的性能,然而,如使用较低额定电流的管芯并联,受二极管特性和制造工艺的影响,存在被击穿的风险。图8所示为博世0120系列发电机使用的14管自激磁整流桥,其额定输出电流为110 A,为保证质量,使用14个额定电流为50 A的二极管,在中性点接1组二极管,三相绕组中每相接入并联的2组二极管。



图8 并联二极管整流桥

为能使用较低额定电流的二极管,需在三相电枢中的电流通过二极管前将其分流,故使用六相电枢代替三相电枢。如图9所示,将2个三相绕组整流后再并联,理论上不会因电流过大击穿二极管,管芯的增加也降低了内阻。

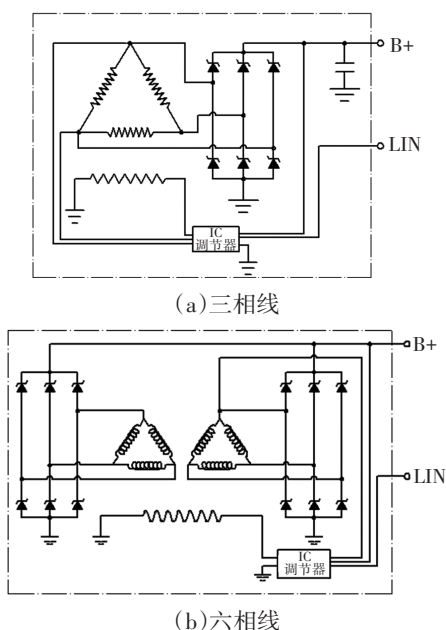


图9 三相线与六相线接线示意

3 试验方案设计与结果分析

3.1 试验条件

以GB/T 26672—2011《道路车辆 带调节器的交流发电机试验方法》^[8]中的要求为依据,试验条件如

表1所示。

表1 试验基本条件

名称	测试条件	备注
环境温度/ $^{\circ}\text{C}$	25 ± 3	
测试转速/ $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$	0~6 000	额定转速6 000
采集数据	电压、电流、转速	
测试模式	CV(恒压)	

3.2 试验设备

本文试验使用朗迪LDFD-3型发电机性能试验台,如图10所示,表2所示为测试台技术指标。



图10 朗迪LDFD-3型发电机性能试验台

表2 试验台技术指标

类型	参数	数值
测试参数	三相电压/V	0~420/500/650(0.5级)
	三相电流/A	1~300(0.5级)
	频率/Hz	5~60(0.5级)
	转速/ $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$	1~9 999(0.5级)
	功率因数	-0.5~0.5(0.5级)
	三相功率/W	1~6 000(0.5级)
电压调整参数	稳态调整率/%	± 2.5
	瞬态调整率/%	± 20
	恢复时间/s	1.5
	波动率/%	0.5
频率调整参数	稳态调整率/%	0~5(可调)
	瞬态调整率/%	± 10
	稳定时间/s	7
	波动率/%	0.5
	工作电源	AC(380 \pm 38)V、三相50 Hz
	工作方式	手动与自动
	工作时间/h	12(连续)
工作环境	温度/ $^{\circ}\text{C}$	-50~50
	相对湿度/%	≤ 85
	大气压力/kPa	86~106
	其他条件	无腐蚀性气体,无爆炸性气体

3.3 试验方案

定子总成对发电机的电性能起到至关重要的作用,铁芯几何尺寸改变会牵连整个发电机结构的改变,而电枢绕组的参数变化几乎不影响结构,也便于实现已量产产品的性能优化。结合前文的分析,电枢绕组匝数、相数和接线方式会影响发电机的输出特性,为此,设计试验进行验证。为方便后期试验数据的对比分析,分别设计方案1~方案3验证定子电枢绕组的匝数、定子总成的相数以及3种不同的接线方式对发电机输出特性的影响,样机定

子总成参数如表3所示。方案3中,按星形与三角形的等效转换,三角形定子总成应使用13匝导线,为提高输出功率,调整为11匝。

受漆包线线径影响,8个定子总成导线截面积有所不同,由于圆形漆包线与定子铁芯线槽内几何尺寸上的差异,嵌入线槽后会形成许多间隙,不同线径漆包线形成的间隙大小不同,造成导线截面积不同。表3中8个试验用样品定子已达到规定线径的嵌线最高匝数,槽满率已达到最大值。

表3 样机定子总成参数

参数	方案1			方案2		方案3		
	定子总成1	定子总成2	定子总成3	定子总成4	定子总成5	定子总成6	定子总成7	定子总成8
铁芯外径/mm	118	118	118	145	145	122	122	122
铁芯内径/mm	92	92	92	111	111	95	95	95
铁芯厚度/mm	30	30	30	30	30	28.5	28.5	28.5
槽数	36	36	36	48	48	36	36	36
接线方式	三角	三角	三角	三角	双三角	星形	星形+中性点	三角
单槽导线截面积/mm ²	19.438 6	20.106 2	20.428 2	16.365 8	15.029 5	18.704 0	18.704 0	21.025 0
导线相数	3	3	3	3	6	3	3	3
导线匝数	11	10	9	7	7	8	8	11

3.4 试验结果

为分析在不改变发电机转子、定子尺寸的情况下,定子总成中电枢绕组参数对发电机输出特性及输出功率的影响,按照QC/T 729—2005《汽车用交流发电机技术条件》^[9]开展输出特性试验,测试模式为恒压(Constant Voltage, CV),选取不同转速下的电流绘制输出特性曲线,所测参数如表4所示,试验结果如表5所示。

表4 测试项目

项目	备注
输出功率	6 000 r/min, 13.5 V测试电压下
调节电压	6 000 r/min条件下
测试电压	13.5 V(调节器工作电压)
初始发电转速	发电机测试时灭灯转速
电流纹波峰峰值(2 500 r/min)/A	电流大小波动的上、下偏差
输出电流	CV

表5 试验数据

项目	定子总成1	定子总成2	定子总成3	定子总成4	定子总成5	定子总成6	定子总成7	定子总成8
输出功率/W	1 404	1 727	1 829	2 749	2 721	1 203	1 332	1 474
调节电压/V	14.57	14.54	14.40	14.29	14.63	14.53	14.51	14.41
测试电压/V	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5
初始发电转速/(r·min ⁻¹)	1 272	1 405	1 556	1 202	1 260	1 211	1 170	1 211
电流纹波峰峰值(2 500 r/min)/A	25	24	25	19.5	11.3	24	27	25
输出电流(1 500 r/min)/A	35	25	14	70	67	37	35	29
输出电流(1 800 r/min)/A	66	52	44	113	108	53	50	56
输出电流(2 400 r/min)/A	81	87	86	163	161	73	70	87
输出电流(3 500 r/min)/A	100	113	117	189	185	83	86	100
输出电流(5 000 r/min)/A	108	124	131	200	198	88	97	107
输出电流(6 000 r/min)/A	110	128	135	204	202	89	100	109

在方案2的试验过程中,定子总成4与定子总成5在2 500 r/min时的电流纹波峰峰值差异过大,故增加了纹波电流的测试,结果如表6所示。

表6 方案2纹波电流试验数据 A

项目	定子总成4	定子总成5
电流纹波峰峰值(1 500 r/min)	9.6	5.8
电流纹波峰峰值(1 800 r/min)	11.8	7.0
电流纹波峰峰值(2 000 r/min)	15.6	7.1
电流纹波峰峰值(2 500 r/min)	19.6	11.3
电流纹波峰峰值(3 000 r/min)	20.9	14.0
电流纹波峰峰值(4 000 r/min)	21.3	17.8
电流纹波峰峰值(5 000 r/min)	20.8	16.9
电流纹波峰峰值(6 000 r/min)	20.3	17.5

3.5 试验数据分析

方案1输出特性曲线如图11所示,可以看出,导线匝数对发电机输出特性影响较大,匝数越少,6 000 r/min转速下发电量越大,与之对应的1 500 r/min转速下发电量越低。额定转速6 000 r/min条件下,9匝相较于11匝的最高输出功率提升22.7%,1 500 r/min转速条件下,11匝相较于9匝输出功率提升150%。

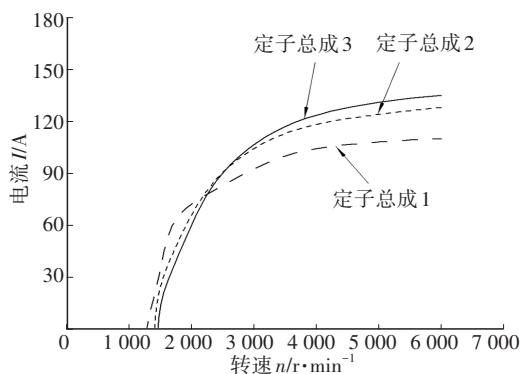


图11 匝数对输出特性曲线的影响

方案2输出特性曲线如图12所示,可以看出,不同相数条件下,发电量无明显变化,各转速节点的发电量并未超过5%的电流增幅,6 000 r/min额定转速下最高输出功率也几乎相等。

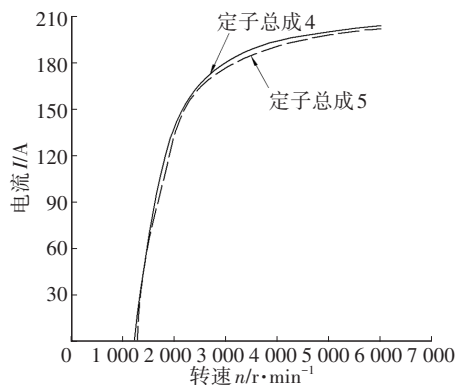


图12 相数对输出特性曲线的影响

纹波电流的对比结果如图13所示,定子总成5(六相)在各转速阶段的纹波电流幅值均小于定子总成4(三相),随着转速的提高,优势逐渐降低。

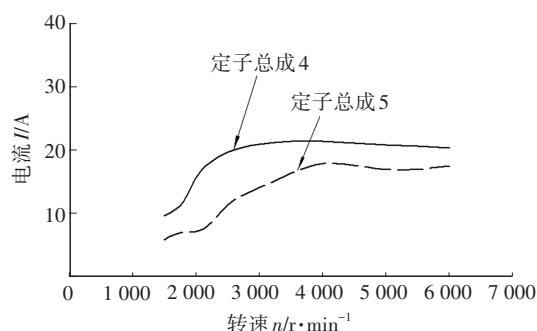


图13 相数对纹波电流的影响

方案3输出特性曲线如图14所示,三角形接法减小匝数后,在1 500 r/min转速时发电量明显降低,转速高于1 800 r/min后缓慢回升,在高速条件下明显超过星形接法和星形接法带中性点的定子总成。带中性点的星形接法相较于传统星形接法,在转速为6 000 r/min时输出性能提升12.4%,符合文献[6]中增加中性点能提高高速条件下输出功率的结论。

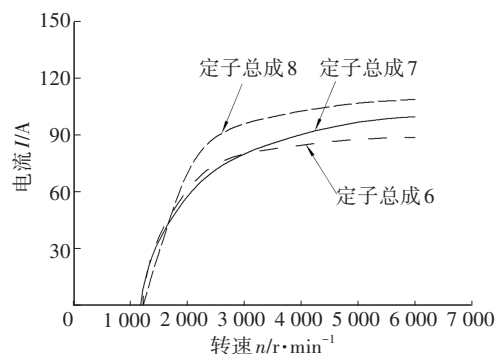


图14 接线方式对输出特性曲线的影响

4 结束语

本文通过改变发电机定子线圈匝数、相数和接线方式分析了定子总成中电枢绕组参数对发电机输出特性及输出功率的影响,得到以下结论:

a. 随着定子线圈绕组匝数的增加,输出特性曲线趋于平稳,初始发电转速降低,低速状态下输出功率极大提高,进入电流饱和状态的转速也随之降低,同时会使高速条件下的输出功率有所下降。

b. 相线数量的增加对发电机输出特性曲线影响有限,但相较于三相,六相的纹波电流在低速条件下明显降低,随着转速的升高,优势减小。

c. 三角形接法在低速条件下电流随转速的提高增长较快,输出功率提升效果较为明显,随着转

速的升高,电流增大幅度逐渐减小,但在初始发电阶段,输出功率有所下降,而星形接法增加中性点,初始发电阶段至低速阶段的输出功率基本不变,随着转速的提高,输出功率逐步提升。

在实际应用中,发电机供电不足或供大于求都会带来不同程度的问题,结合车况和用电需求配置合适的发电机,可有效提升整车性能。在未来产品设计中,使用较小匝数的电枢绕组提高额定输出功率,在低速时若能通过调节器提高磁场励磁线圈的电压并在转速升高时降低,可同时满足低速条件下发电量要求。

参 考 文 献

- [1] 于继成,王强,赵目龙.面向智能驾驶控制器的电源系统变化分析综述[J].汽车文摘,2021(1):7-10.
YU J C, WANG Q, ZHAO M L. Power System Change Analysis for Intelligent Driving Controllers[J]. Automotive Digest, 2021(1): 7-10.
- [2] 胡熙,刘昱,李孟良.中国重型商用车行驶工况开发[J].汽车技术,2021(2):51-57.
HU X, LIU Y, LI M L. Development of the China Heavy-Duty Commercial Vehicle Test Cycle[J]. Automobile Technology, 2021(2): 51-57.
- [3] 吴鏊炜.汽车交流发电机效率分析及改进[D].杭州:浙江工业大学,2019.
WU L W. Efficiency Analysis and Improvement of Automotive Alternators[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2019.
- [4] 邱新勤.汽车发电机定子设计探讨[J].中国机械,2014(11):32.
QIU X Q. Discussion on the Design of Automobile Generator Stator[J]. China Machinery, 2014(11): 32.
- [5] 胡泽岩.星形—三角形转换在汽车交流发电机中的应用初探[J].汽车电器,1991(5):11-13.
HU Z Y. Preliminary Study on the Application of Star Delta Conversion in Automotive Alternators[J]. Automotive Appliances, 1991(5): 11-13.
- [6] 刘春晖,王云.汽车交流发电机中性点的应用与拓展[J].汽车维修,2010(5):20-21.
LIU C H, WANG Y. The Application and Expansion of Neutral Point in Automotive Alternators[J]. Automotive Maintenance, 2010(5): 20-21.
- [7] 易远程,郑妍,黄兴.汽车发电机效率优化方向研究[J].汽车电器,2020(6):50-52+55.
YI Y C, ZHENG Y, HUANG X. Research on Efficiency Optimization of Automotive Generators[J]. Automotive Appliances, 2020(6): 50-52+55.
- [8] 中华人民共和国国家发展与改革委员会.道路车辆带调节器的交流发电机试验方法:GB/T 26672—2011[S].北京:中国标准出版社,2011.
National Development and Reform Commission. Road Vehicle - Alternators with Regulators - Test Methods: GB/T 26672—2011[S]. Beijing: Standards Press of China, 2011.
- [9] 全国汽车标准化技术委员会.汽车用交流发电机技术条件:QC/T 729—2005[S].北京:中国计划出版社,2005.
National Technical Committee of Auto Standardization. Automotive Alternator Technical Specification: QC/T 729—2005[S]. Beijing: China Planning Press, 2005.

(责任编辑 弦 歌)

修改稿收到日期为2023年2月20日。