

永磁发电机在电动汽车上的应用

李华湘, 胡勇峰

(南车株洲电力机车研究所有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘要: 分析了永磁发电机的变速变载运行模式及其与发动机输出特性的匹配。永磁发电机-发电机组采用全波整流输出, 通过调节工作转速调节电功率输出; 与动力电池并联组成车载供电系统, 以电池端电压为参量, 采用优化策略, 高效率地为驱动电机系统供电, 满足电动汽车的动力需求和降低燃油消耗需要。

关键词: 永磁发电机; 发动机—发电机组; 全波整流; 驱动电机系统; 车载供电系统

中图分类号: TM313; U469.72

文献标识码: A

文章编号: 2095-3631(2014)02-0031-04

Application of Permanent Magnet Generator for Electric Vehicle

LI Hua-xiang, HU Yong-feng

(CSR Zhuzhou Institute Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: It discussed variable speed and variable load operation modes of permanent magnet generator (PMG) and its output characteristics matching to the engine. Full-wave rectification is used in the output of PMG and engine unit to adjust the electric power output by controlling its operating speed. Generators and batteries are designed in parallel in the in-car power supply system. In order to satisfy power requirements of electric vehicle and reduce its fuel consumption, battery terminal voltage is used as reference and optimized strategy is applied to supply power for the motor drive system.

Keywords: PM generator; engine-generator units; full-wave rectification; motor drive system; in-car power supply system

0 引言

早期的串联式混合动力电动客车使用电励磁同步发电机, 电励磁同步发电机按固定转速运行和工频输出设计, 适用于同步发电机组的产品, 而不能完全适应车载发电机要求的变载工况及高效率的功率转换与输出要求。国内各电动汽车厂针对这一问题开展了专题研究。南车株洲电力机车研究所有限公司以863课题“车用驱动电机产业化集成技术研究”为契机, 开展车载永磁发电机系统及其应用研究。原型机JF225永磁发电机装车体积小, 在工作转速区域内可高效地转换发

动机的机械功率并高效地输出电功率; 因为设计时放弃定频输出, 充分利用发动机的工作特性, 使发动机经常运行在经济油耗区, 降低了整车能耗; 该产品已逐渐被市场认可。其改进型产品JF228永磁发电机已在增程式电动公交车上批量应用; 另一种改进型产品JF231样机已经交付, 正装车进行耐久性考核。相关的应用策略正被整车生产厂家认可, 这方面的研究也在继续。

1 车载永磁发电机

1.1 总体结构

车载永磁发电机采用和发动机一体的结构模式, 图1示出JF231永磁发电机的纵剖面图。发电机机座安装在飞轮罩上; 转子一侧直接固定在飞轮盘上, 另一侧通过轴承支撑在端盖中心; 端盖固定在发电机机座的另一侧, 用内、外油封轴向固定轴承; 永磁体嵌在转子铁

收稿日期: 2013-09-10

作者简介: 李华湘(1965-), 男, 教授级高级工程师, 研究方向为驱动电机及其系统。

基金项目: 国家863计划课题(2008AA11A107)

心中,定子铁心内布置三相绕组;绕组引出线在水冷机座上开孔直接引出,在绕组端部装有温度传感器,监测发电机温度。

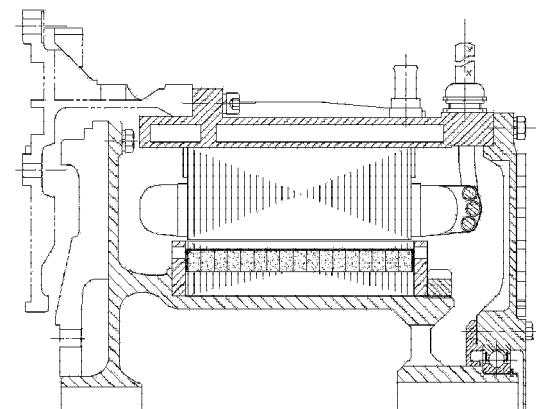


图1 JF231 永磁发电机纵剖面图

Fig. 1 Longitudinal section of JF231 PM generator

车载永磁发电机结构简单,装配后与发动机形成一体,采用全封闭机座水冷结构,防护等级达IP65,适应各种恶劣的工作环境。在性能上,要求车载永磁发电机能有效地转换发动机的机械功率和高效电功率输出,因此,设计时必须考虑发动机的工作转速区域和输出特性。

图2示出与JF225型永磁发电机配套的柴油机的万有特性曲线。可以看出,其工作转速范围为800~2 300 r/min;相同功率输出(图中虚线)工况下,经济油耗区出现在低速大转矩输出时;单速度运行不能保证变负载输出时都高效;只有特性匹配、工作转速区域相同的发电机才有可能使发动机经常运行在经济油耗区。JF225型永磁发电机的最大输出特性曲线大部分包络了发动机的最大输出特性曲线^[1];而JF228型永磁发电机的最大输出特性曲线则完全包络了发动机的最大输出特性曲线(图3),发电机可以完全转换发动机的机械功率,发电机组的输出效率完全依赖整车能量策略。

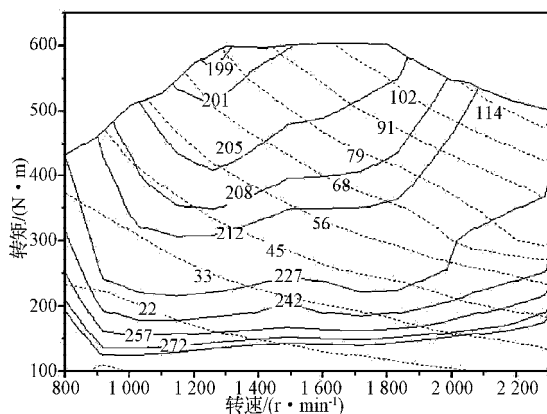


图2 发动机万有特性曲线

Fig. 2 Universal characteristics curves of the engine

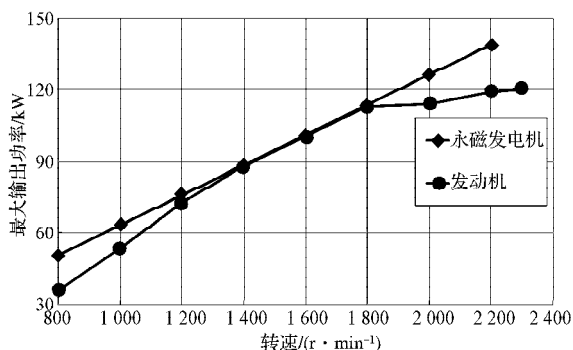


图3 发动机和发电机组输出特性

Fig. 3 Output characteristics of the engine-generator unit

1.2 输出特点

车载永磁发电机的转子由发动机直接驱动,在定子绕组中感应三相交流电势,经全波整流和滤波后输出直流电。在电动客车上,永磁发电机常与动力电池组(或超级电容组)相并联,组成车载供电系统。

气隙磁场的变化,直接影响感应电势的大小,最终影响电功率输出。基于永磁发电机的特点,空载时永磁体励磁建立的气隙磁场关于磁极中心线对称,也关于转轴对称;负载时,受定子电流的影响,气隙磁场发生严重畸变。图4示出空载和负载工况下同一电周期内相同位置的气隙磁密对比。

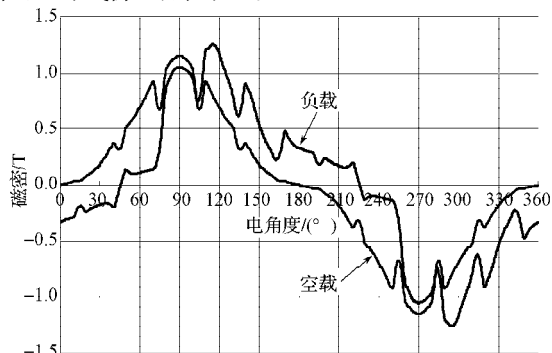


图4 空载和负载工况下的气隙磁场

Fig. 4 Characteristics of the air-gap magnetic field for PMG with load and with no-load

1.2.1 单速工况

发动机驱动发电机运行在固定的转速下,整流后输出电功率。电励磁同步发电机通过调节励磁电流减少定子电流对气隙磁场的影响,使发电机组的输出电压恒定,不受输出功率的影响,发电机的效率随输出功率变化。由发动机万有特性曲线(图2)可以看出,发动机的燃油消耗也受输出功率的影响,对于公交客车的变负荷工况,此种工作模式发动机的机械损耗较大,综合效率较低、燃油消耗较高。

永磁发电机的永磁体励磁且不可调节,气隙磁场受定子电流影响。由图4可以看出,不同工况下发电机的感应电势不相等^[2],不能保持恒压输出。图5示出

1 800 r/min转速时JF228永磁发电机的整流输出特性。可以看出,空载时输出电压(U_{dc})最大;随着输出电流(I_a)的增加, U_{dc} 逐渐降低、输出电功率(P_2)开始增加, P_2 达到最大值后下降,此时功率转换效率开始快速下降。为了保证发电机组高效率输出并防止永磁体失磁,此最大功率输出点将作为1 800 r/min转速时发电机的输出能力限制点,以限制最大输出电流。

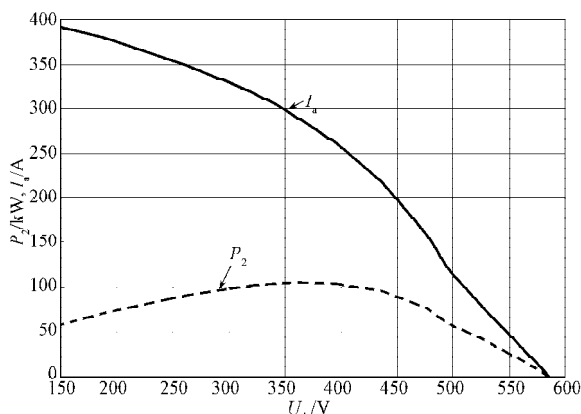


图5 1 800 r/min 转速时发电机整流输出特性

Fig. 5 Rectified output characteristics of the generator at 1 800 r/min

1.2.2 变速工况

永磁发电机由发动机直接驱动,发动机的工作转速都可能成为发电机的工作速度。与JF228永磁发电机配套的天然气发动机,其转速在800~2 300 r/min范围。图6示出发电机整流输出电压—电流输出特性曲线簇,图7示出发电机整流输出的功率—电流输出特性曲线簇。由于发电机气隙磁场受定子电流影响的缘故,故图6和图7所示特性曲线簇趋势和图5的一致。

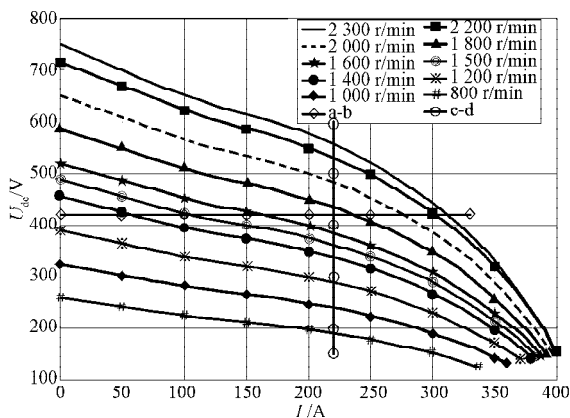


图6 发电机整流输出电压—电流特性

Fig. 6 Rectified output characteristics of voltage & current for the generator

输出电压较低时,若要得到恒定电压的输出特性,可采用改变转速的方式,如图6中的直线“a-b”($U_{dc}=425$ V)。通过提升转速,可以增加输出电流和输出功率,反之亦然。

若要得到恒定电流的输出特性,同样可采用改变转速的方式,如图6中的直线“c-d”($I_a=220$ A)。转速增加时,电压和发电机的输出电功率增加。由图7中可以得到同样的结论:恒流输出时,随着转速升高,输出功率增加。

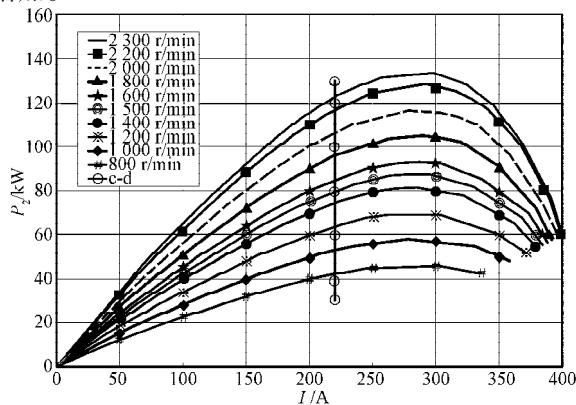


图7 发电机整流输出功率—电流特性

Fig. 7 Rectified output characteristics of power & current for the generator

综上所述,通过提升发电机转速,可以提高电功率输出能力,此时需要增加轴上的功率输入,而轴上输出功率的增加常通过加油提升发动机的转速来完成。因此永磁发电机和发动机在能量需求关系上完全匹配,永磁发电机的输出调节可通过调节发动机的转速实施,解除了发电机输出与励磁之间的耦合,不需要单独控制发电机,仅要求发电机高效转换发动机的机械功率。图8示出不考虑发电机的内部损耗的永磁发电机功率转换效率Map图,可以看到,在其应用区域,永磁发电机的功率转换效率在0.95~0.99范围之内。

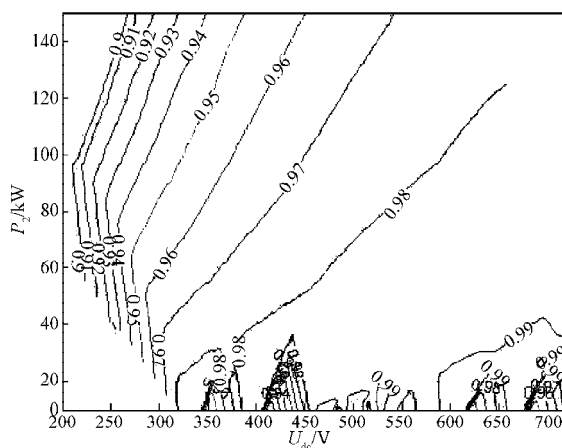


图8 发电机功率转换效率 Map 图

Fig. 8 Generator energy conversion map

2 应用

2.1 能力匹配

电动汽车的车载供电系统的负载是驱动电机系统。为了高效地利用有限的车载能源,目前电动汽车一般

