

车载永磁发电机的研制

李华湘, 陈致初

(株洲南车时代电气股份有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘要:介绍了一种新型车载永磁发电机的研制过程。该电机和发动机形成一体, 其设计方法有别于常规的发电机。采用电磁场的计算方法, 根据静态气隙磁场分布状态调整该电机结构参数; 用实际运行状态进行仿真, 计算全调速范围内的输出特性, 为 HEV (混合动力汽车) 的动力供应策略选择提供其输出能力 Map 图。

关键词:永磁发电机; 发动机; 齿槽转矩; 气隙磁场; 电机驱动系统; 车载储能装置; 一体化结构; 输出能力 Map 图

中图分类号: TM313

文献标识码: A

文章编号: 1671-8410(2010)06-0030-06

Research on Onboard Permanent Magnet(PM) Generator

LI Hua-xiang, CHEN Zhi-chu

(Zhuzhou CSR Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: It introduces a new type onboard PM generator which is integrated with engine. Its design method is different from other normal ones. With computing method of electromagnetic field, it adjusts the PM generator structure's parameters according to its static gap magnetic field status, calculates all output characteristic in the range of all service speed by real duty transient simulations, and provides PM generator's output capability map to establish power supply strategy of HEV.

Key words: PM generator; engine; cogging torque; gap magnetic field; motor drive system; onboard energy storage equipment; integrated structure; output capability map

0 引言

在串联混合动力客车和全电驱动客车中, 目前一般采用柴油发电机组和车载储能装置(如动力蓄电池)混合供电。其中车载发电机组既有直接给电机驱动系统供电的工况, 又有向车载储能系统充电的工况, 因此其性能和运用策略直接影响到整车的电力供应状态和燃油消耗状态。在 HEV (混合动力汽车) 中, 车载发电机组由发动机、发电机和整流器组成。传统客车利用发动机的怠速和加油提速特性使其经常运行于低油耗区以解决整车多变工况的节能降耗问题。为了满足 HEV 的节能降耗需求, 要求发电机完全匹配发动机, 这样既能在不

同的转速下运行, 又能把发动机的机械能高效地转化为电能输出, 并利用电能存储特点, 与车载储能装置协作, 高效地为电机驱动系统供电。

目前尚无成熟的 HEV 专用车载发电机产品。考虑成本等因素, 多数整车厂商通常采用普通的工频三相无刷励磁同步发电机。这是一种系列化产品, 额定频率为 50 Hz (或 60 Hz), 按同步转速运行, 输出功率和电压恒定, 价格较低, 其输出策略一般是恒频整流供电, 在额定电压输出时效率较高。但其体积较大, 不适于车上安装; 按单一速度设计, 仅考虑恒速模式高效率运行, 输出相电压为 400 V, 限制了车载储能装置的选型; 对于变速和变输出功率的工况适应性差, 故很难在 HEV 中推广应用。市场上个别专门设计的发电机, 其特性只在很窄的速度区域与发动机的特性匹配, 而不能完全和车载储能装置匹配, 因不适用于发动机的多变工况,

收稿日期: 2010-06-10

作者简介: 李华湘 (1965-), 男, 教授级高级工程师, 长期从事牵引电机的研究和设计工作。

导致整车节能效果受到限制。而有励磁同步发电机因轴向长度更长,其运用维护成本较高,亦不适合HEV应用。针对上述问题,株洲南车时代电气股份有限公司研制了一种车载永磁发电机。其励磁不受转速的影响,采用特殊措施降低铁磁损耗,在运行速度区域内最大限度地转化发动机的机械能量,输出效率高;运用先进的能量应用策略控制输出,完全匹配车载储能装置,降低了发动机的耗油量。

1 车载发电机组的结构

现有的HEV中,发动机和发电机的连接有直接连接和通过联轴器连接2种方式。

直接连接即发动机的飞轮与发电机的转轴连接,发动机的飞轮罩和发电机的机座连接。发电机为单轴承结构(市场上应急发电机组中多为这类结构),安装在一个专设的整体支架上。在HEV上采用这种连接方式存在以下问题:发电机组安装长度太长,占空间太大,不适合11 m以下长度的客车;取消整体支架后,用4个安装座固定在底盘上,客车运行时的振动使得飞轮和发电机间经常出现连接故障,运行可靠性变差。

发电机改为双边轴承结构后,发电机成为独立的转动部件,发动机飞轮和发电机转轴通过弹性联轴器连接,发动机飞轮罩和发电机机座通过中间过渡筒连接。这种方式的安装长度更长,在装配和运行中,很难保证发动机的输出轴中心与发电机转轴中心重合,HEV运行时的振动使得联轴器本身的可靠性变差。

发动机和发电机的连接及发电机组安装长度是HEV的难题。以直接连接方式为基础,通过改进发电机设计,使之与发动机成为一体来解决发电机组的长度和部件间的连结问题。在这方面永磁同步发电机具有优势:转子直接和飞轮相连,利用飞轮罩和飞轮外侧的空间布置定子,通过减小绕组端部长度来缩短发电机伸出发动机外部的轴向长度,使整个发电机组的安装长度最短,发动机承载整个发电机的重量,车上发电机的安装演变为发动机的安装。

2 车载发电机的设计

作为车载发电机,由发动机驱动,首先需要匹配发动机的输出特性并满足电动驱动系统的电功率需求;其次,发电机本身的结构型式适应装车的要求——质量轻,安装长度短,与发动机的连接简单、可靠。

2.1 发电机的输出设计

图1示出发动机万有特性曲线,其中虚线为等功率

曲线,有数据标识的曲线为油耗曲线。低油耗区位于大转矩区,发动机变速运行时的区域既在低油耗区又在高油耗区;恒速运行输出较大时油耗较低。如果使发动机经常运行于低油耗区,就有可能降低整车油耗;充分利用制动能量回馈,油耗可进一步降低。

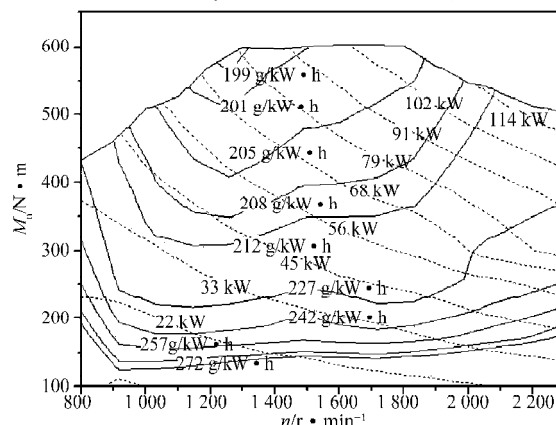


图1 发动机的万有特性曲线

Fig. 1 Universal character curve of the engine

从图1可以看出,随着转速上升,发动机输出功率的能力增强,油耗相对降低,低油耗区集中在满载输出工况。因此,配套的车载发电机必须具备变速变功率输出能力和高效率能量转换能力。除去发动机上其他辅助设备所需的功率,在每一转速下,要求发电机都能将其剩余功率全部转换成电功率输出。把图1中的最大输出功率包络线向下平移,可达到发电机的初步输出要求。

在HEV上,发电机通过整流和车载储能装置一起为电机驱动系统供电。电机驱动系统根据HEV的动力需求调整输出,因其工况是多变的,所以需要的电能也是多变的。从整车质量考虑,车载储能装置的装备容量小,输出电压常随储能状态和负载的变化而变化,“恒压供电”不是一个优化的选择。常会出现这样的情形:调高发动机的转速并反复给车载储能装置充电来满足“恒压”条件,而忽视储能状态,这将会增加发动机的燃油消耗。如果根据车载储能装置的储能状况,通过调节发动机的输出量来满足电机驱动系统的电能需求,这样能够降低发动机的燃油消耗;采用相适应的电机驱动系统控制策略,HEV将会有显著的节能效果。发电机采用三相不控桥整流输出,既能使发出的电能得到充分利用,同时发电机组的成本也较低。

随着转速的升高,发电机经三相不控桥整流后的电压也随之升高。根据整流器模块的电压范围与电机驱动系统直流环节电容的电压极限,可以确定发动机最高工作转速下发电机组的整流输出空载电压 U_{dcmax} 。

根据发电机的初步输出要求和最高转速下的整流输出空载电压(U_{dcmax}),确定最高工作转速下的负载输

出,按永磁发电机的特点,可以得到发电机的特性曲线(图2),比较发现,永磁发电机和发动机的输出特性基本匹配。

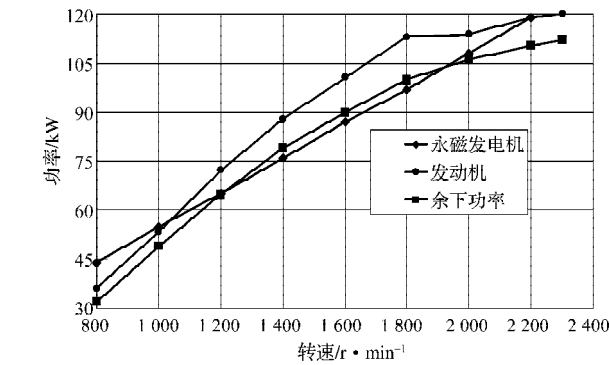


图2 发电机的输出特性曲线

Fig. 2 Output character curve of the generator

2.2 发电机的结构设计

按改进的直连方式,与发动机一体化的永磁发电机的结构如图3所示。图中,转子一端的小轴插入飞轮中心孔内、外法兰盘采用止口结构安装在飞轮盘上,用螺栓紧固;机座直接采用止口结构固定在飞轮罩上;为了使电机具有较好的防尘效果,应用端盖密封,同时安装轴承支撑转子。为了有效减轻电机的重量、减少发热,采用中空结构转轴和水冷机座,在端盖外侧布置辐射状散热筋。

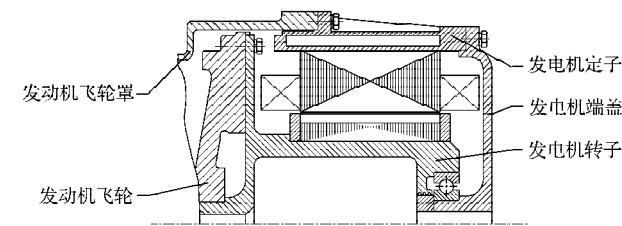


图3 一体化车载永磁发电机

Fig. 3 Integrated onboard PM generator

要限制定子绕组的端部长度,传统的双层分布绕组已不能满足要求。本设计采用每极每槽为1的单层绕组,虽然感应电势中的谐波含量较多,但端部长度较短、端部交叠部分较少。作为发电机,转子采用凸极结构比较合适,新研制的产品采用内嵌永磁体的方式。

2.3 发电机的电磁计算

随着数字计算技术的发展,采用有限元方法使电机电磁场的计算变得越来越简单、实用,不同的辅助设计软件输出的结果也基本相同。通过对发电机静态气隙磁场的计算,可以得到气隙磁场的分布波形;根据磁场波形的后处理结果,可以方便地调整定子槽型、转子磁极的尺寸和布置方式。图4示出该车载永磁发电机的静态空载气隙磁场一对极间磁密波形,对应定子冲片槽口磁密较低,波形发生畸变。如果采用磁性槽楔,可

以部分减缓波形的畸变程度。

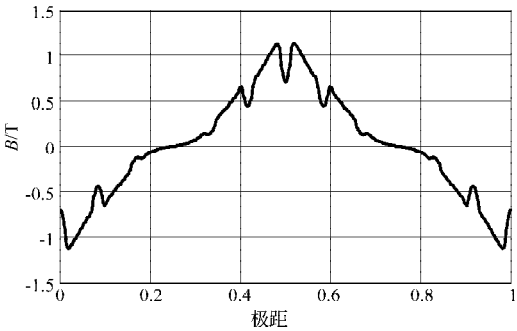


图4 永磁发电机气隙磁密波形

Fig. 4 Gap magnetic flux density wave of the PM generator

HEV电气系统设计需要的是负载变化时车载发电机的输出特性曲线。电磁设计时,永磁发电机负载特性应采用动态气隙磁场计算,再结合实际供电和应用情况可以得到比较准确的结果。但此计算量过于庞大,需要很长的计算时间,需在工程上做简化处理:负载用纯电阻替代,再利用计算出的特性曲线推导出其它复杂的负载特性。

从图1可以看出:在每一速度下,低油耗区出现在最大扭矩输出处,经济油耗区出现在较大的转矩输出区,而不同速度下的油耗相差较大。传统车采用变档变速输出,使发动机经常运行在经济油耗区,达到降低油耗的效果。因此,作为车载发电机,主要进行能量转换。针对变化的整车工况,如果单一速度进行变功率输出其综合效率不高;如果配合发动机运行在变速变功率输出工况,使发电机组经常运行在高效率区,可以达到最佳的能量转换效果和高效率输出。这需要在发动机工作转速区域内,提供发电机输出特性Map图,供电气系统设计时校核整车动力的匹配情况和优化整车动力供给策略。

为了便于比较,首先采用图5所示仿真电路,对永磁发电机在2 000 r/min、三相对称负载的情况下进行仿真,其输出特性如图6所示。

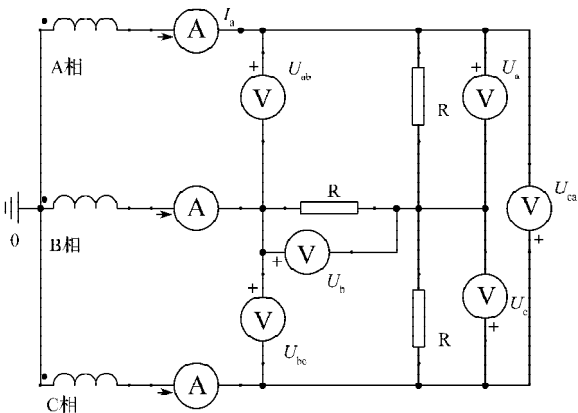


图5 永磁发电机纯电阻负载仿真电路

Fig. 5 Simulation circuit of the PM generator with resistance-load

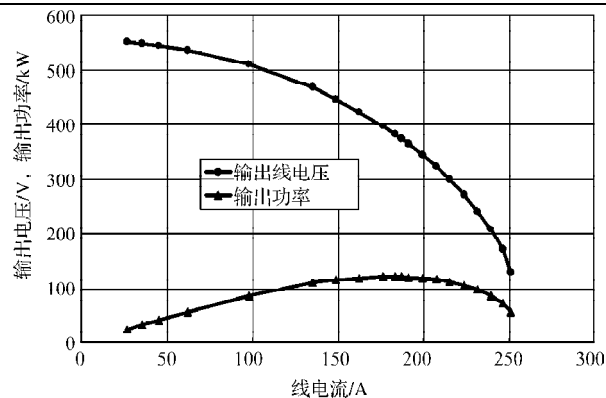


图 6 永磁发电机纯电阻负载的输出特性

Fig. 6 Output character curve of the PM generator with resistance-load

采用相同的模型 ,在转速2 000 r/min、电阻负载的情况下 ,对永磁发电机经过三相不控桥整流后的输出进行仿真(图 7),其输出特性如图8所示。

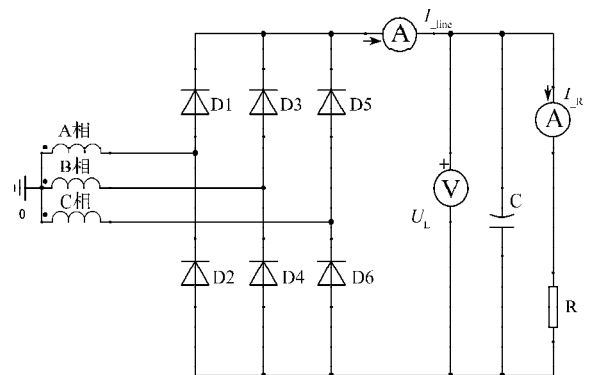


图 7 永磁发电机三相不控桥整流输出仿真电路

Fig. 7 Simulation circuit of the PM generator with three-phase uncontrolled bridge rectifier and resistance-load

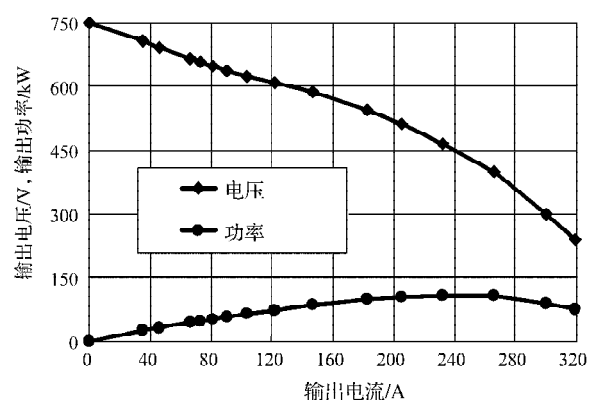


图 8 永磁发电机不控桥整流电阻负载的输出特性

Fig. 8 Output character curve of the PM generator with three-phase uncontrolled bridge rectifier and resistance-load

综上计算 ,形成永磁发电机在2 000 r/min时的负载特性曲线(图 9)。由图9可以看出 ,三相不控桥整流时 ,因模块的导通和关断导致发电机三相负载的不对称 ,功率输出能力下降约10% ;随着负荷的增加 ,永磁发电机的输出电压将减小 ,输出功率将增加 ,到达极值后又逐渐减小 ,输出电流将增大。

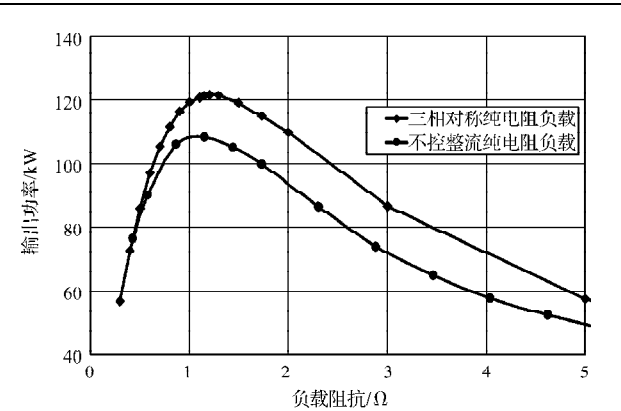


图 9 2 000 r/min 转速时永磁发电机电阻负载特性

Fig. 9 Character curve of the PM generator with resistance-load at 2 000 r/min

功率输出能力的变化可以从这两种输出方式的感应电势波形的畸变程度的差异得到证实。如图10和图11所示的电势波形 ,在具有相同的等效负载时 ,三相整流输出工况下相绕组中感应电势波形畸变较大。

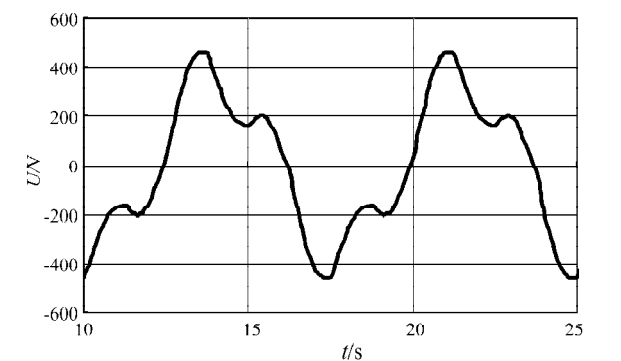


图 10 三相对称电阻负载一相绕组中的感应电势波形

Fig. 10 EMF wave of one phase winding with 3-phase symmetrical resistance-load

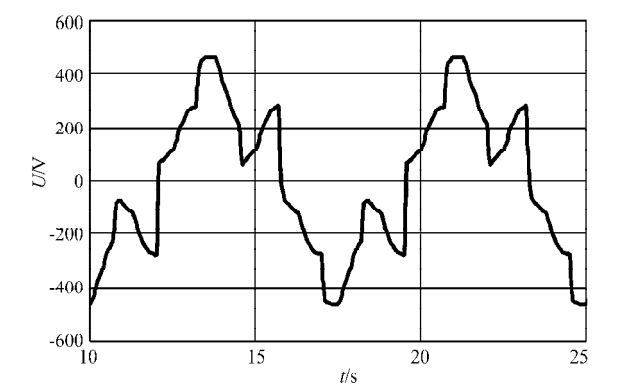


图 11 三相不控桥整流、电阻负载工况一相绕组中感应电势波形

Fig. 11 EMF wave of one phase winding with 3-phase uncontrolled bridge rectifier and resistance-load

按图7所示的永磁发电机三相不控桥整流输出和电阻负载仿真电路 ,在发动机工作转速区域(800 ~ 2 200 r/min)内进行输出特性仿真 ,得到永磁发电机的输出特性Map图(图12 ~ 图15)。

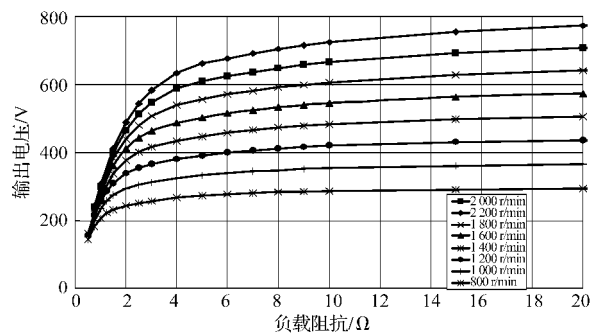


图 12 永磁发电机输出电压特性

Fig. 12 Output voltage character curve of the PM generator

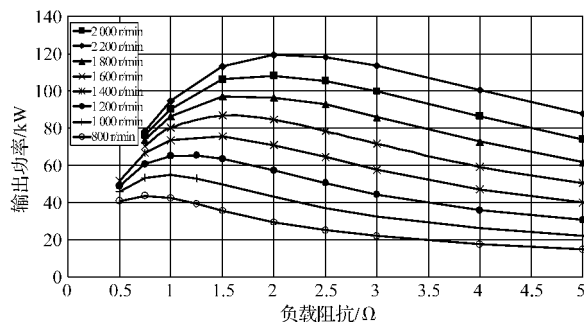


图 13 永磁发电机输出功率特性

Fig. 13 Output power character curve of the PM generator

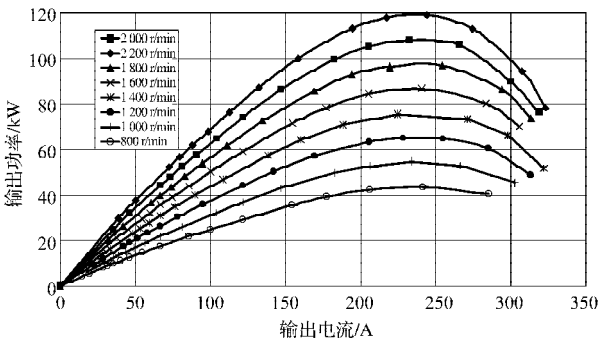


图 14 永磁发电机的输出功率和输出电流

Fig. 14 Output power-current character curve of the PM generator

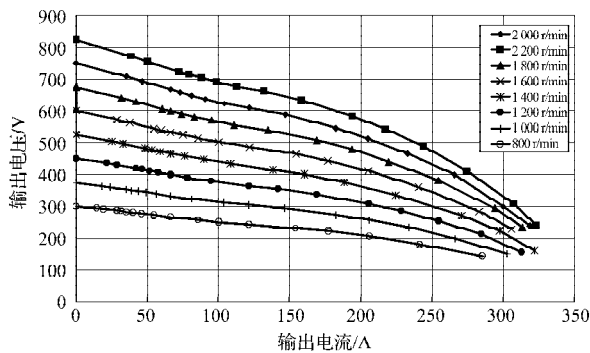


图 15 永磁发电机的输出电压和输出电流

Fig. 15 Output voltage- current character curve of the PM generator

3 发电机的齿槽转矩问题

永磁发电机存在齿槽转矩问题，且由于采用三相不控桥整流输出，发电机运行在不对称状态，相电流中高次谐波增加，放大了齿槽转矩的影响。在参考文献[1]

中提出的几种削弱齿槽转矩的措施仍有借鉴意义，而其齿槽转矩平均值计算的公式已没有实用价值，因为系统设计时需要考虑的是齿槽转矩幅值和变化规律。通过使电机绕组开路、让发电机以一定速度旋转，用有限元法计算发电机瞬态电磁场，从主磁场的磁阻变化，可以后处理得到发电机的齿槽转矩曲线(图16)。

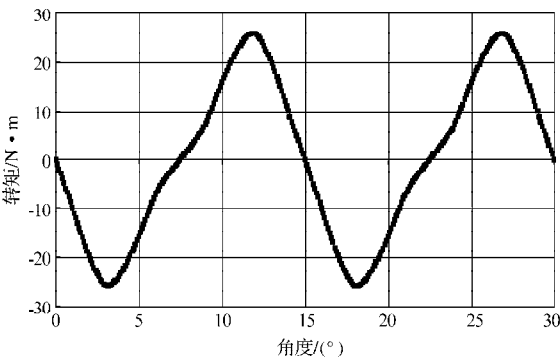


图 16 车载永磁发电机齿槽转矩

Fig. 16 Cogging torque of the onboard PM generator

所研制的车载永磁发电机中采用定子铁心斜槽和定子铁心齿顶开槽2种措施以削弱齿槽转矩。为了降低磁阻转矩和优化气隙磁场的分布状态，发电机采用了类似的转子凸极结构，内嵌永磁体，此结构不宜采用转子斜槽方式减小齿槽转矩。由于该发电机每极每相槽数为1且定子绕组端部长度很短，故不能采用分数槽来减小齿槽转矩。

由图16可以看出，永磁发电机的齿槽转矩是以一个齿距为周期的非标准正弦波曲线，其每个周期内平均值为0。从理论上来说，叠压后的定子铁心若保持一个齿距的斜槽，则齿槽转矩的作用相互抵消，但这对永磁电机的结构有着非常苛刻的要求，即要求定、转子铁心完全同心，且气隙磁场波形完全对称分布。事实上，由于存在轴承游隙和制造中定、转子铁心的不完全同心等问题，很难通过斜槽完全消除齿槽转矩效应。此外，发电机负载运行时的电枢反应也会使一对极间气隙磁场波形产生局部畸变，从而扩大齿槽转矩幅值，因此还有必要采取其它辅助措施。

定子铁心齿顶开槽能减小齿槽转矩幅值，齿槽的宽度和深度不同，效果则不同。改变槽形尺寸，通过有限元法计算发电机瞬态电磁场，得到齿槽转矩曲线(图17和图18)。图17表示齿顶槽的宽度对齿槽转矩的影响效果，图18表示齿顶槽的深度对齿槽转矩的影响效果。当齿顶槽达到一定深度后，齿槽转矩的波形开始分频，最大幅值不再减小(图19)。因此有效降低齿槽转矩的幅值，必须合理选择齿槽的宽度和深度，同时还要综合考虑输出电压、输出能力等因素。

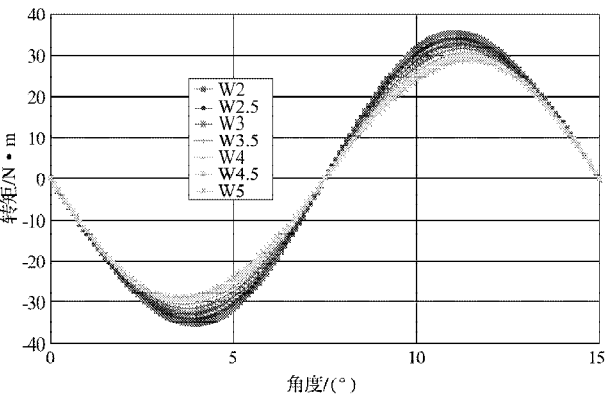


图 17 齿顶槽的宽度对齿槽转矩的影响

Fig. 17 Influence on the cogging torque of slot width on the top of the core teeth

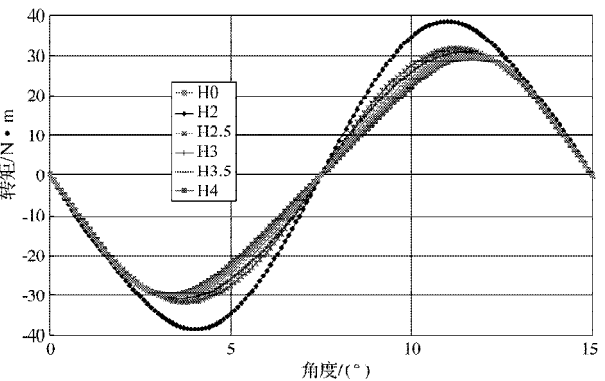


图 18 齿顶槽的深度对齿槽转矩的影响

Fig. 18 Influence on the cogging torque of slot depth on the top of the core teeth

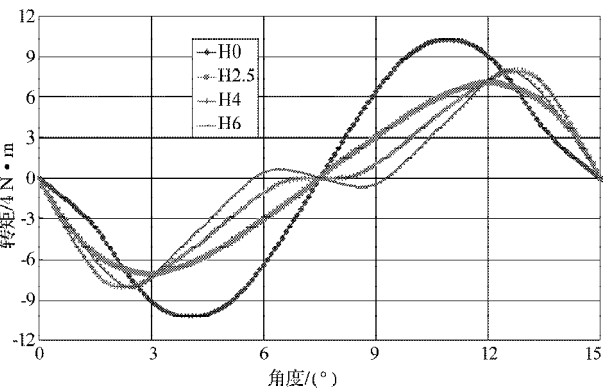


图 19 齿顶槽深度对齿槽转矩的影响

Fig. 19 Influence on the cogging torque of the more depth slot on the top of the core teeth

4 车载永磁发电机组与电机驱动系统的匹配

车载永磁发电机的输出量(电压、电流和功率)与发动机的转速和负载状态相关。如果电机驱动系统与永磁发电机匹配良好,适应供电电压的变化,根据车载供电状态,最大限度地输出机械功率,满足HEV的动力需求,则可以达到降低发动机燃油消耗的效果。

该电机驱动系统的轴功率输出如图20所示。驱动系统充分利用车载储能,以其储能状态控制发电机的

输出电压。当HEV需求功率较大时,通过发动机加油升速,使发电机的输出电压提升、电功率输出能力增强,满足电机驱动系统增加输入(供电)的请求;电机驱动系统运行在较高电压区域、动力输出能力增加,满足HEV的动力需求。当HEV需求功率较小时,甚至无需求时,通过使发动机低速或怠速运行,减小发动机的燃油消耗和发电机的输出,由车载储能装置为主供电,电机驱动系统运行在较低电压区域,减小动力输出;在车载储能不能输出时,容量较大的发电机可以单独供电。与单速车载发电机组相比,该发动机的油耗明显减少。

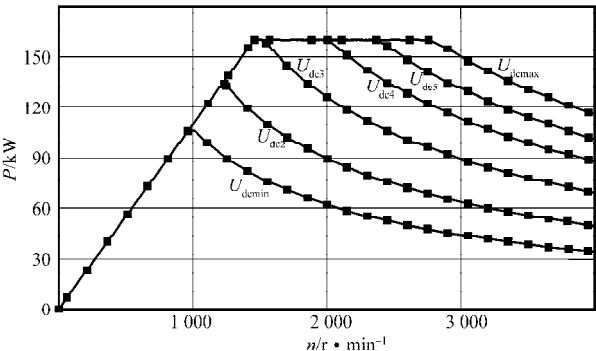


图 20 电机驱动系统的轴功率输出峰值 Map 图

Fig. 20 Shaft output power peak-Map of the motor drive system

5 结语

装载永磁发电机的HEV其动力性能不会因能量单元和驱动单元的改变而变化。相反,利用车载永磁发电机的高效能量转换功能和优化的整车能量存储及应用策略,与车载储能装置协同供电,在满足整车的动力需求的同时,尽可能降低发动机的燃油消耗,使HEV更加节能。新研制的车载永磁发电机,基于变速变载的概念,提供了发电机的转速—功率(或电压)输出能力Map图,为HEV电气系统设计者制定整车能量供应和使用策略提供了依据。同样的设计理念可以应用到永磁直驱风力发电机中,在风机的工作速度范围内,永磁发电机高效地转换机械能并输出电能,按照电能输出方式提供发电机输出能力Map图,以此为风力发电机组设计的依据和系统运行的保证。该车载永磁发电机样机已通过地面试验、装车考核试验,并将改进能量存储及应用策略,随HEV一起推广应用。

参考文献：

[1] 蔡长铭,汤宁平. 低速永磁同步电机的齿槽转矩分析[J]. 防爆电机, 2008, 43(1): 5-8.
[2] 唐任远. 现代永磁电机理论与设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
[3] 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.