

# 双边永磁励磁游标电机运行原理及 电磁特性仿真研究\*

仲叙<sup>1</sup>, 陈迅<sup>1</sup>, 刘新波<sup>2</sup>, 杜恽<sup>2</sup>, 卢伟<sup>2</sup>

(1. 江苏科技大学 电子信息学院, 江苏 镇江 212000;

2. 江苏大学 电气信息工程学院, 江苏 镇江 212000)

**摘要:** 为了进一步提高电机的功率密度和转矩密度, 以满足直驱系统低速、大转矩的运行工况, 提出一种新型双边永磁励磁游标(DPMEV)电机。该电机定子和转子上均放置有永磁体, 利用定、转子齿对气隙磁导的双向调制作用, 将两组永磁体产生的永磁磁场调制成分数少、高转速的有效谐波磁场, 并根据有效谐波磁场设计电枢绕组, 从而使定、转子上两组永磁体同时与电枢绕组耦合。介绍了 DPMEV 电机的拓扑结构。基于等效磁路法, 对该电机的气隙磁通密度进行了分析, 表明该电机可利用气隙磁导的双向调制作用, 实现电机功率密度和转矩密度的有效提高。在深入分析电机工作原理的基础上, 通过有限元法对 DPMEV 电机进行了计算和分析, 验证了该电机具有适用于直驱系统的高功率密度和高转矩密度特性。

**关键词:** 双边永磁励磁; 气隙磁导; 双向调制效应; 等效磁路法; 有限元分析

**中图分类号:** TM 351 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2019)01-0081-07

## Simulation Study on the Operation Principle and Electromagnetic Performance of Dual-Permanent-Magnet Excited Vernier Machine\*

ZHONG Xu<sup>1</sup>, CHEN Xun<sup>1</sup>, LIU Xinbo<sup>2</sup>, DU Yi<sup>2</sup>, LU Wei<sup>2</sup>

(1. School of Electronics and Information, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212000, China;

2. School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212000, China)

**Abstract:** A new dual-permanent-magnet excited vernier (DPMEV) machine was proposed, in which the power density and torque density were further improved to meet the low speed and high torque operating conditions of direct drive systems. Two sets of permanent magnets (PMs) were placed on stator and rotor, respectively, and the PM magnetic field could be modulated to effective harmonic magnetic field components with low pole-pair number and high speed by the dual-modulation effect of stator and rotor teeth. Then the armature winding was designed according to the effective harmonic magnetic fields to achieve the coupling between the magnetic fields excited by two sets of PMs and armature windings. The topology of DPMEV machine was introduced. The air gap flux density was analyzed based on the equivalent magnetic circuit method, which proved the improvement potentiality of power density and torque density based on the dual-modulation effect. The performances of DPMEV machine were calculated and analyzed by the finite element method, verifying the advantages of high power density and high torque density which were suitable for the direct drive system.

**Key words:** dual-permanent-magnet excitation; air gap permeance; dual-modulation effect; equivalent magnetic circuit method; finite element analysis

\* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51677081, 51377073); 江苏省高校优势学科项目; 江苏大学高级人才启动基金项目(14JDG169); 江苏大学“青年骨干教师培养工程”项目

作者简介: 仲叙(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为永磁电机设计优化及其控制。

陈迅(1976—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为永磁电机设计优化及其控制。

刘新波(1972—), 男, 副研究员, 博士研究生, 研究方向为农业电气化与自动化。

# 0 引言

以电动机为核心的直驱系统由于其简单的系统结构和高运行效率,在风力发电、电动汽车驱动等场合中得到了广泛关注<sup>[1-3]</sup>。为了满足直驱系统的运行需求,驱动电机往往采用多槽和多极对数的设计方案,以满足直驱系统低速、大转矩的输出特性,从而导致该类电机的体积较为庞大<sup>[4-5]</sup>。

近年来,一类基于磁场调制原理的场调制永磁电机得到了快速发展<sup>[6-8]</sup>。相比于传统永磁电机,场调制永磁电机利用调磁铁块将永磁磁场调制一系列空间谐波磁场,并利用其中具有极对数少、转速高特性的有效谐波磁场与电枢绕组耦合,使得转子转速和电枢反应磁场转速之间形成转速差,实现了“自减速”。这类电机<sup>[9]</sup>的转矩密度相比于传统永磁电机可提升约 80%<sup>[10]</sup>,具有低速、大转矩的运行特性,特别适合应用于直驱系统。文献[11]提出并分析了一种适用于风力发电领域的永磁游标电机,采用外转子和裂槽式内定子结构,将永磁体表贴于外转子上并将电枢绕组放置于内定子槽中。在此基础上,文献[12]提出一种永磁游标电机,采用开槽式内定子结构以提高空间利用率,并利用聚磁式外转子结构进一步提高了电机功率密度。然而,对于表贴式和聚磁式转子永磁型电机,为克服在高速运行时离心力对永磁体的作用,需要对转子采取特别的加固措施,增加了电机结构复杂性和制造成本。为此,有学者提出将永磁体装设于定子侧的定子永磁型无刷电机。该类电机最明显的特点就是永磁体和电枢绕组均位于定子,转子上既无绕组也无永磁体。根据永磁体在定子上位置的不同,可将定子永磁型电机分为 3 类:双凸极永磁电机<sup>[13-15]</sup>、磁通反向永磁电机<sup>[16]</sup>和磁通切换永磁电机<sup>[17-19]</sup>。该类电机将永磁体安装于定子侧,产生静止的励磁磁场,在转子凸极调制作用下产生旋转的励磁磁场谐波分量,从而实现与定子上电枢绕组有效耦合,进而实现能量转换。这一设计方案为进一步提高永磁游标电机的功率密度提供了新思路。

本文提出一种适用于直驱系统的双边永磁励磁游标(DPMEV)电机,在定子和转子上都装设永磁体,相比于传统的转子永磁型游标电机提高了永磁体用量,为增加电机功率密度提供可能。该

电机定子上永磁体位于相邻定子齿形成的槽口处,结构简单可靠;转子永磁体采用内嵌式结构,有效保证了转子的机械强度,且转子转速较低,减小了离心力对转子上永磁体的作用,提高了电机的稳定性。此外,定子齿和转子齿形成了随转子位置变化的不均匀气隙磁导,利用该不均匀气隙磁导对定子和转子永磁磁场的双向调制作用,保证了转子和定子上两组永磁体产生的永磁磁场和电枢反应磁场的有效耦合,使得电机的功率密度和转矩密度进一步提高。在介绍该电机结构特点的基础上,基于等效磁路法,利用气隙磁通密度对其运行原理进行了详细分析。此外,基于有限元法,对该电机的静态电磁特性进行了计算和分析,验证所提出的电机具有高功率密度和高转矩密度的特性。

# 1 DPMEV 电机的结构

图 1 所示为 DPMEV 电机结构示意图及电枢绕组的线圈磁势星形图。图 1(a)所示的电机主要包括外定子和内转子两部分。该电机定子由定子铁心、永磁体以及电枢绕组组成,定子铁心可由硅钢片直接叠压而成,将三相电枢绕组嵌套在定子齿上,永磁体放置于相邻的定子齿形成的槽口内。为了减小定子上永磁体的漏磁,在定子齿上

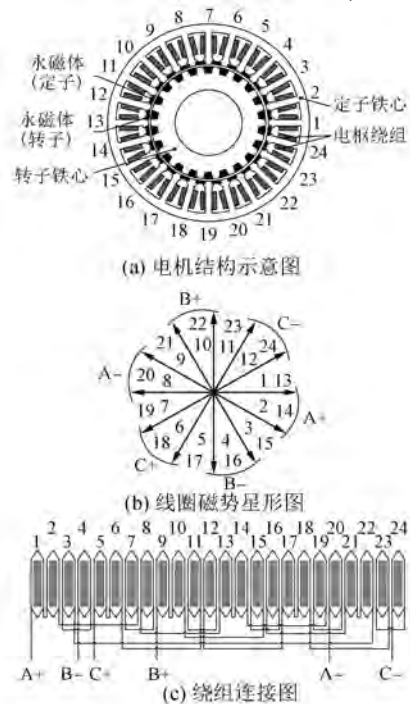


图 1 DPMEV 电机结构示意图及线圈磁势星形图

装设齿靴,可以有效提高永磁体利用率。该电机转子与传统内嵌式转子永磁电机类似,由转子铁心和永磁体组成,转子铁心可由硅钢片直接叠压而成,永磁体放置于相邻的转子齿之间,定、转子上永磁体均径向充磁且充磁方向向外。此外,DPMEV 电机电枢绕组采用集中绕组,每个定子齿上缠绕一个线圈,其线圈磁势星形图如图 1(b)所示,线圈的连接方式如图 1(c)所示。图 1(a)、图 1(b)和图 1(c)中的线圈数字标号一致。

DPMEV 电机基于磁场调制原理运行,因此,DPMEV 电机的定子齿数、转子齿数以及电枢绕组的等效极对数配比须满足以下关系:

$$p_s = p_r \pm p_a \quad (1)$$

$$p_r = p_s \mp p_a \quad (2)$$

式中:  $p_s$ ——定子齿数;

$p_r$ ——转子齿数;

$p_a$ ——电枢绕组等效极对数。

本文电机采用的极对数配比为  $p_a = 2, p_s = 24, p_r = 22$ 。

## 2 DPMEV 电机的运行原理

DPMEV 电机是一种场调制型永磁电机,定子上的电枢绕组不与永磁体直接产生的基波磁场匝链,而是与经气隙磁导调制后的有效谐波磁场耦合。因此,可在电机的定子和转子上装设极对数不同的永磁体,利用转子齿和定子齿分别对定子上永磁体和转子上永磁体产生的永磁磁场产生双向调制作用,在气隙中形成某极对数和旋转速度的有效谐波分量,并利用该谐波分量与电枢绕组有效耦合,从而实现能量转换传输。

通过式(1)、式(2)可以看出,DPMEV 电机可以分为相对独立的两部分。如图 2(a)所示,定子永磁体、转子齿和电枢绕组作为第一部分;如图 2(b)所示,转子永磁体、定子齿和电枢绕组作为第二部分。

为了进一步阐述 DPMEV 电机的工作原理,借助等效磁路方法对该电机的工作原理进行分析。为了简化分析的过程,作如下假设:

(1) 永磁体的相对磁导率为 1;

(2) 磁场仅考虑径向分量,并仅沿圆周方向发生变化;

(3) 忽略铁心的局部饱和;

(4) 忽略漏磁。

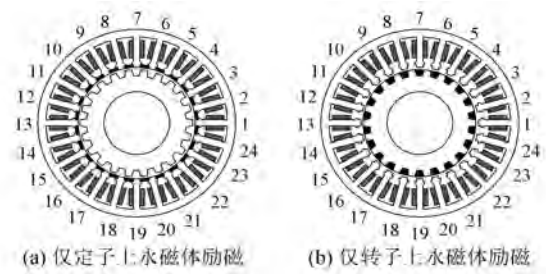


图 2 不同永磁励磁情况下 DPMEV 电机结构示意图

首先,对 DPMEV 电机的第一部分进行分析,如图 2(a)所示。当位于定子槽口上的永磁体单独励磁时,永磁体产生的径向磁动势可以表示为

$$F_{PMs}(\theta) = \sum_{j=1,3,\dots}^{+\infty} \frac{2 F_{PMs}}{j\pi} \sin\left(j p_{PMs} \frac{\theta_{PMs}}{2}\right) \cdot \cos(j p_{PMs} \theta) \quad (3)$$

式中:  $F_{PMs}$ ——定子上永磁体单极磁动势幅值;

$p_{PMs}$ ——定子上永磁体数量;

$\theta_{PMs}$ ——定子上永磁体所占的弧度。

DPMEV 电机采用凸极转子结构,导致了圆周方向气隙磁导不均匀,如图 3 所示。假设图 3(a)转子的齿槽交替产生如图 3(b)所示的理想气隙磁导波形,则气隙等效磁导的峰峰值可以表示为

$$\lambda_{pp,r} = \lambda_t - \lambda_s \quad (4)$$

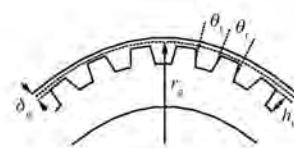
式(4)中的转子齿、槽对应的等效气隙磁导  $\lambda_t, \lambda_s$  可以表示为

$$\lambda_t = \frac{\mu_0 \theta_r r_g L_a}{\delta_g} \quad (5)$$

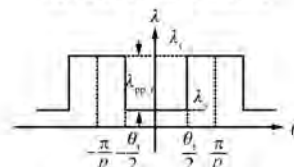
$$\lambda_s = \frac{\mu_0 \theta_l r_g L_a}{\delta_g + h_t} \quad (6)$$

式中:  $\mu_0$ ——真空磁导率;

$\theta_r$ ——转子齿宽度;



(a) 分析模型及参数定义



(b) 简化的气隙磁导波形

图 3 转子等效气隙磁导计算分析模型及其简化波形

- $r_g$ ——气隙半径;
- $L_a$ ——电机轴长;
- $\delta_g$ ——气隙长度;
- $\theta_t$ ——转子槽口宽度;
- $h_t$ ——齿高。

考虑到转子转动和其初始位置,基于图 3(b) 的简化气隙磁导波形,利用离散傅里叶变换,可得气隙磁导表达式为

$$\lambda_r(\theta, t) = \lambda_{r0} + \sum_{k=1}^{+\infty} \frac{2\lambda_{pp-r}}{k\pi} \cdot \sin\left(kp_r \frac{\theta_r}{2}\right) \cos[kp_r(\theta - \theta_0 - \omega_r t)] \quad (7)$$

- 式中:  $\lambda_{r0}$ ——气隙磁导直流分量;
- $\omega_r$ ——转子的机械转速;
- $\theta_0$ ——转子的初始位置。

气隙磁通密度可由永磁体的磁动势和气隙磁导的乘积表示,则调制后气隙磁通密度可以表示为

$$B(\theta, t) = F_{PMs}(\theta)\lambda_r(\theta, t) = \frac{2\lambda_{r0}F_{PMs}}{\pi} \sum_{j=1,3,\dots}^{+\infty} \varepsilon_1 \cos(jp_{PMs}\theta) + \frac{2\lambda_{pp-r}F_{PMs}}{\pi^2} \sum_{j=1,3,\dots}^{+\infty} \sum_{k=1}^{+\infty} \varepsilon_1 \varepsilon_2 [\cos\alpha_1 + \cos\alpha_2] \quad (8)$$

其中:  $\varepsilon_1 = \frac{1}{j} \sin\left(jp_{PMs} \frac{\theta_{PMs}}{2}\right)$ ,  $\varepsilon_2 = \frac{1}{k} \sin\left(kp_r \frac{\theta_r}{2}\right)$ ,

$$\alpha_1 = (jp_{PMs} + kp_r) \left[ \theta - \frac{kp_r(\theta_0 + \omega_r t)}{jp_{PMs} + kp_r} \right],$$

$$\alpha_2 = (jp_{PMs} - kp_r) \left[ \theta + \frac{kp_r(\theta_0 + \omega_r t)}{jp_{PMs} - kp_r} \right].$$

表 1 所示为仅由定子上永磁体产生的主要气隙谐波分量的次数、幅值和旋转速度。可以看出,组 1 的谐波分量其极对数和定子上永磁体的极对数相同且转速为零,与永磁体保持相对静止。组 2 和组 3 的谐波分量由定子上永磁体的基波分量经气隙磁导的一次分量调制产生。

表 1 第一部分产生的气隙谐波分量

组别	谐波次数	幅值	旋转速度
1	$jp_{PMs}$	$\frac{2\lambda_{r0}F_{PMs}\varepsilon_1}{\pi}$	0
2	$ jp_{PMs} - kp_r $	$\frac{2\lambda_{pp-r}F_{PMs}\varepsilon_1\varepsilon_2}{\pi^2}$	$\frac{-kp_r\omega_r}{jp_{PMs} - kp_r}$
3	$ jp_{PMs} + kp_r $	$\frac{2\lambda_{pp-r}F_{PMs}\varepsilon_1\varepsilon_2}{\pi^2}$	$\frac{kp_r\omega_r}{jp_{PMs} + kp_r}$

其次,对 DPMEV 电机的第二部分进行分析,如图 2(b) 所示,仅由转子上永磁体励磁。忽略气隙磁导的变化,考虑转子的转动,转子上永磁体产生的径向磁动势可以表示为

$$\begin{cases} F_{PMr}(\theta, t) = \sum_{m=1,3,\dots}^{+\infty} Z \cos[mp_{PMr}(\theta - \theta_0 - \omega_r t)] \\ Z = \frac{2F_{PMr}}{m\pi} \sin\left(mp_{PMr} \frac{\theta_{PMr}}{2}\right) \end{cases} \quad (9)$$

- 式中:  $F_{PMr}$ ——转子上永磁体每极气隙磁动势幅值;
- $p_{PMr}$ ——转子上永磁体数目;
- $\theta_{PMr}$ ——转子上永磁体所占弧度。

定子齿槽交替引起的气隙磁导变化和转子相似,故不再赘述。其气隙磁导可以表示为

$$\lambda_s(\theta) = \lambda_{s0} + \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{2\lambda_{pp-s}}{n\pi} \sin\left(np_s \frac{\theta_s}{2}\right) \cos(np_s\theta) \quad (10)$$

- 式中:  $\lambda_{s0}$ ——气隙磁导直流分量;
- $\lambda_{pp-s}$ ——定子等效气隙磁导峰峰值;
- $\theta_s$ ——定子齿所占弧度。

因此,转子上永磁体产生的永磁磁场经定子齿调制后,气隙磁通密度可表示为

$$B(\theta, t) = F_{PMr}(\theta, t)\lambda_s(\theta) = \frac{2\lambda_{pp-s}F_{PMr}}{\pi^2} \sum_{m=1,3,\dots}^{+\infty} \sum_{n=1}^{+\infty} \varepsilon_3 \varepsilon_4 [\cos\alpha_3 + \cos\alpha_4] + \frac{2\lambda_{s0}F_{PMr}}{\pi} \sum_{m=1,3,\dots}^{+\infty} \varepsilon_3 \cos[mp_{PMr}(\theta - \theta_0 - \omega_r t)] \quad (11)$$

其中:  $\varepsilon_3 = \frac{1}{m} \sin\left(mp_{PMr} \frac{\theta_{PMr}}{2}\right)$ ,  $\varepsilon_4 = \frac{1}{n} \sin\left(np_s \frac{\theta_s}{2}\right)$ ,

$$\alpha_3 = (np_s + mp_{PMr}) \left[ \theta - \frac{mp_{PMr}(\theta_0 + \omega_r t)}{mp_{PMr} + np_s} \right],$$

$$\alpha_4 = (np_s - mp_{PMr}) \left[ \theta + \frac{mp_{PMr}(\theta_0 + \omega_r t)}{np_s - mp_{PMr}} \right].$$

表 2 所示为仅由转子上永磁体产生的主要气隙谐波分量的次数、幅值和旋转速度。

忽略高次谐波的影响,仅考虑式(8)和式(11)中的直流分量和一次分量。如表 1 和表 2 所示,第 1 组谐波分量的极对数和旋转速度与其对应的永磁体的极对数相同,并且保持相对静止。当  $m = n = i = j = 1$  时,谐波是由永磁体的基波分量

表 2 第二部分产生的气隙谐波分量

组别	谐波次数	幅值	旋转速度
1	$mp_{PMr}$	$\frac{2\lambda_{s0} F_{PMr} \varepsilon_3}{\pi}$	$\omega_r$
2	$ np_s - mp_{PMr} $	$\frac{2\lambda_{pp-s} F_{PMr} \varepsilon_3 \varepsilon_4}{\pi^2}$	$\frac{-mp_{PMr} \omega_r}{np_s - mp_{PMr}}$
3	$ np_s + mp_{PMr} $	$\frac{2\lambda_{pp-s} F_{PMr} \varepsilon_3 \varepsilon_4}{\pi^2}$	$\frac{mp_{PMr} \omega_r}{np_s - mp_{PMr}}$

与气隙磁导的基波分量相互作用产生的,其极对数、幅值以及旋转速度如表 1 和表 2 中的组 2 和组 3 所示,结合极对数配比可知,表 1 和表 2 中第 2 组的谐波分量的极对数和旋转速度是相同的,表 1 和表 2 中第 3 组谐波分量的极对数和旋转速度也是相同的。此外,表 1 和表 2 中第 2 组的谐波分量的极对数小,旋转速度快,第 3 组谐波分量的极对数大,旋转速度慢。然而,由于 DPMEV 电机应用于直驱系统,电机需满足低速、大转矩的特性,故可利用第 2 组极数少、旋转速度快的有效谐波磁场,进而按照有效谐波分量的极对数设计电枢绕组,可实现电枢绕组和两组永磁体同时耦合。

为了保证电枢绕组和有效谐波磁场有效的耦合,电枢绕组中通入电流的频率可以表示为

$$f_a = \frac{p_{efs} \omega_{efs}}{2\pi} = \frac{p_{efr} \omega_{efr}}{2\pi} = \frac{p_r \omega_r}{2\pi} \quad (12)$$

式中:  $p_{efs}$ 、 $\omega_{efs}$ 、 $p_{efr}$ 、 $\omega_{efr}$ ——定子和转子永磁体产生的有效谐波磁场极对数和其对应的旋转速度。

### 3 有限元仿真分析

为了验证上述的理论分析,将通过有限元仿真软件对 DPMEV 电机的基本电磁性能进行计算和分析。PMr 代表转子上永磁体单独励磁,PMs 代表定子上永磁体单独励磁,(PMs+PMr)代表定子和转子上的永磁体同时励磁。这 3 种情况下所用的模型规格完全相同,电机相关参数如表 3 所示。

表 3 主要尺寸参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
定子外径/mm	120	气隙长度/mm	0.5
转子外径/mm	68	轴向长度/mm	50
转子内径/mm	20	定子齿数	24
PM 剩磁/T	1.2	转子齿数	22
PMr 体积/mm <sup>3</sup>	17 200	PMs 体积/mm <sup>3</sup>	15 400

### 3.1 磁场分布和气隙磁通密度

图 4 所示为 DPMEV 电机在不同励磁情况、不同运行状况下的磁场分布图。从图 4 可以看出,当电机运行于某一状况时,电机的磁场分布在定、转子上永磁体共同励磁时和单独励磁时一致,可知,两组永磁体共同励磁时磁场会相互叠加。图 4 给出了经过 A 相绕组的调制磁场达到正向最大、0、反向最大、0 这 4 种状况下的磁场分布图,可知相邻状态下的磁场分布相差 45°,电机的有效谐波磁场为 2 对极,故一个电周期内磁场旋转角度为 180°。此外,通过计算可知,电机转子在一个电周期内的旋转角度为 16.36°,可知有效谐波磁场的转速为转子转速的 11 倍,利用自身特点降低了转子转速。

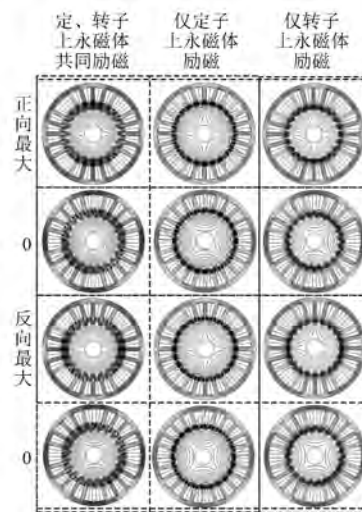


图 4 磁场分布

图 5 所示为不同永磁体励磁情况时的气隙磁通密度波形及其谐波分析结果。其中,图 5(a)可分为 3 部分,分别为电机 180°机械角度内转子永磁体单独励磁、定子永磁体单独励磁和共同励磁时的磁密波形,两组永磁体共同励磁时的气隙磁通密度峰值近似等于两组永磁体单独励磁时之和。图 5(b)为 DPMEV 电机气隙径向磁通密度谐波频谱图,其对应的谐波分量幅值如表 4 所示。由图 5 和表 4 可知,当仅由转子上永磁体励磁时,气隙中主要含有 2 次和 22 次谐波成分,其中,22 次谐波分量是由转子上永磁体直接产生的,幅值为 0.713 T,而 2 次有效谐波分量由转子上永磁体产生的永磁磁场经定子齿调制后产生,幅值为

0.173 T。当仅由定子上永磁体单独励磁时,气隙中主要的谐波次数为 2 次和 24 次,24 次谐波分量是由定子上永磁体直接产生的,幅值为 0.594 T,而 2 次有效谐波分量由定子上永磁体产生的永磁磁场经转子齿调制后产生,幅值为 0.146 T。当转子上永磁体和定子上永磁体同时励磁时,气隙中主要的谐波分量为 2、22 和 24 次,其对应的幅值分别为 0.304、0.746、0.659 T,接近两组永磁体单独励磁时相应的谐波幅值之和,与图 4 的磁场分布一致。

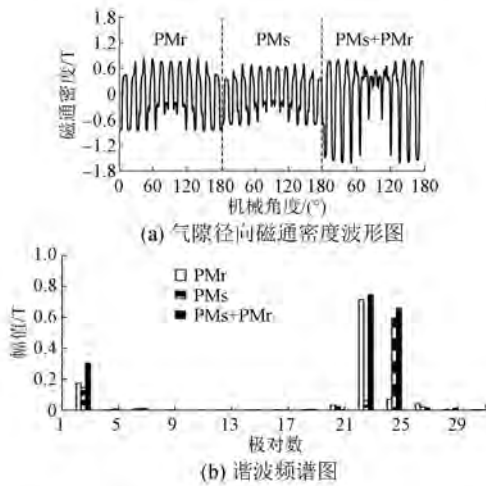


图 5 气隙径向磁通密度及其相应的谐波频谱

表 4 气隙磁通密度谐波幅值 T

次数	PMr	PMs	PMs+PMr
2 次	0.173	0.146	0.304
22 次	0.713	0.060	0.746
24 次	0.071	0.594	0.659

### 3.2 空载永磁磁链与感应电动势

如图 6 和图 7 所示,当仅定子上永磁体和仅转子上永磁体单独励磁时,其空载永磁磁链峰值分别为 0.010 5 Wb 和 0.015 4 Wb,对应的空载感应电动势分别为 12.627 V 和 18.100 V。当定子上永磁体和转子上永磁体同时励磁时,对应的磁链峰值和空载感应电动势峰值分别为 0.024 7 Wb 和 30.88 V。可知,定子上和转子上永磁体同时励磁时,其空载永磁磁链峰值和空载感应电动势峰值近似等于定子上永磁体和转子上永磁体单独励磁时峰值之和,表明 DPMEV 电机可利用气隙磁导的双向调制作用,使得电枢绕组有效地与定、转

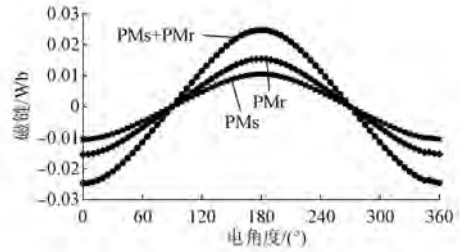


图 6 空载永磁磁链波形

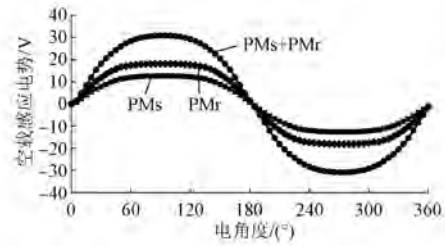


图 7 空载感应电动势波形

子上不同极对数的永磁体产生的永磁磁场耦合。

### 3.3 电磁转矩

永磁电机的电磁转矩主要由永磁体产生的永磁转矩、磁阻转矩以及定位力矩组成。若忽略定位力矩,采用  $i_d = 0$  控制,可知电磁转矩仅与永磁磁链的峰值以及通入电枢绕组中电流的  $q$  轴分量相关。由于电机受到散热条件的制约,通入电枢绕组的电流幅值受到限制,因此,可通过合理地增加永磁体的用量来提高永磁励磁磁场的强度。由图 6 可知,当定子和转子上永磁体共同励磁时,磁链的幅值几乎等于两组永磁体单独励磁时磁链幅值之和,因此,在通入一定幅值电流的情况下,两组永磁体共同励磁时电机产生的电磁转矩应等于两组永磁体单独励磁时产生的电磁转矩之和,这在图 8 得到了验证,即转子和定子永磁体单独励磁时产生的转矩平均值分别为 11.778 N·m 和 8.241 N·m,定、转子上永磁体共同励磁时平均转矩为 18.4 N·m。

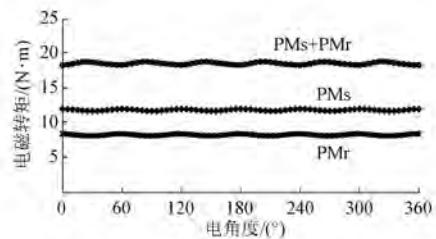


图 8 电磁转矩波形

当两组永磁体共同励磁时,电机的电磁转矩平均值为  $18.400 \text{ N}\cdot\text{m}$ ,最大值为  $18.670 \text{ N}\cdot\text{m}$ ,最小值为  $18.156 \text{ N}\cdot\text{m}$ ,转矩脉动为  $2.7\%$ ,此时电机的定位力矩的峰峰值为  $0.222 \text{ N}\cdot\text{m}$ ,仅为电机转矩的  $1.19\%$ ,表明 DPMEV 电机的输出转矩具有良好的平滑特性。

#### 4 结 语

本文提出一种新型双边永磁励磁游标电机,其定子的齿槽结构和转子的凸极齿结构造成了气隙磁导不均匀,利用不均匀的气隙磁导对定子和转子永磁体产生的永磁磁场实行双向调制,进而形成极对数少、旋转速度快的有效谐波磁场,并根据有效谐波磁场设计电枢绕组,从而实现了电枢绕组与两组永磁体的双耦合,有效提高了电机功率密度和转矩密度。

电枢反应磁场转速和转子转速之间形成了转速差,实现了电机的低速、大转矩运行工况,特别适用于直驱系统。基于等效磁路法,利用气隙磁通密度对该电机的运行进行了详细分析,并通过有限元法,对电机空载感应电动势和转矩等静态特性进行了计算与分析,验证了该电机电枢绕组与两组永磁体之间的双耦合特性,进而揭示了电机具有高功率密度和高转矩密度的实质。

#### 【参 考 文 献】

- [ 1 ] LIU Y L, NIU S X, FU W N. A novel multiphase brushless power-split transmission system for wind power generation [ J ]. IEEE Transactions on Magnetics, 2016, 52(2) : 8100907.
- [ 2 ] LUO X, LIU S X. A novel contra-rotating power split transmission system for wind power generation and its dual MPPT control strategy [ J ]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(9) : 6924.
- [ 3 ] LIU G H, YANG J Q, ZHAO W X. Design and analysis of a new fault-tolerant permanent-magnet vernier machine for electric vehicles [ J ]. IEEE Transactions on Magnetics, 2012, 48(11) : 4176.
- [ 4 ] LIU X B, ZHONG X, DU Y, et al. A new magnetic field modulation type of brushless double-fed machine [ J ]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2018, 28(3) : 5206505.
- [ 5 ] LI D W, ZOU T J, QU R H. Analysis of fractional-slot concentrated winding PM vernier machine with regular open-slot stators [ J ]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(2) : 1320.
- [ 6 ] 张东,邹国棠,江建中,等.新型外转子磁齿轮复合电机的设计与研究 [ J ].中国电机工程学报, 2008, 28(30) : 67.
- [ 7 ] 蒋一诚,刘国海,赵文祥,等.新型磁齿轮复合电机的设计与分析 [ J ].微电机, 2014, 47(3) : 24.
- [ 8 ] 杜桦,邹春花,朱孝勇,等.初级永磁型游标直线电机绕组链接及其电磁特性比较研究 [ J ].电工技术学报, 2017, 32(3) : 130.
- [ 9 ] JIAN L, CHAU K T, GONG Y, et al. Comparison of coaxial magnetic gears with different topologies [ J ]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45(10) : 4526.
- [ 10 ] FU W N, HO S L. A quantitative comparative analysis of a novel flux-modulated permanent-magnet motor for low-speed drive [ J ]. IEEE Transactions on Magnetics, 2010, 46(1) : 127.
- [ 11 ] LI J G, CHAU K T, JIANG J Z, et al. A new efficient permanent-magnet vernier machine for wind power generation [ J ]. IEEE Transactions on Magnetics, 2010, 46(6) : 1475.
- [ 12 ] 李祥林,程明,邹国棠,等.聚磁式场调制永磁风力发电机工作原理与静态特性 [ J ].电工技术学报, 2014, 29(11) : 1.
- [ 13 ] LIAO Y F, LIANG F, LIPO T A. A novel permanent magnet motor with doubly salient structure [ J ]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1995, 31(5) : 1069.
- [ 14 ] 张建忠,程明,朱孝勇,等.新型整距绕组双凸极永磁电机工作原理及特性 [ J ].电工技术学报, 2009, 24(2) : 1.
- [ 15 ] 陈云云,朱孝勇,全力,等.基于参数敏感度的双凸极永磁型双定子电机的优化设计和性能分析 [ J ].电工技术学报, 2017, 32(8) : 160.
- [ 16 ] DEODHAR R P, ANDERSSON S, BOLDEA I. The flux-reversal machine: a new brushless doubly-salient permanent-magnet machine [ J ]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1997, 33(4) : 925.
- [ 17 ] ZHU Z Q, CHEN J T. Advanced flux-switching permanent magnet brushless machines [ J ]. IEEE Transactions on Magnetics, 2010, 46(6) : 1447.

(下转第 93 页)

## 【参考文献】

- [ 1 ] 张凤阁,杜光辉,王天煜,等.高速电机发展与设计综述[J].电工技术学报,2016,31(7): 1.
- [ 2 ] ANDREAS K, ALDO B, ANDREA C. Soft magnetic material status and trends in electric machines[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2017,64(3): 2405.
- [ 3 ] LI D R, ZHANG L, LI G M, et al. Reducing the core loss of amorphous cores for distribution transformers [ J ]. Progress in Natural Science: Materials International,2012,22(3): 244.
- [ 4 ] YOSHIZAWA Y, OGUMA S, YAMAUCHI K. New Fe-based soft magnetic alloys composed of ultrafine grain structure[J].Journal of Applied Physics,1988,64(10): 6044.
- [ 5 ] 李山红,卢志超,李德仁,等.高速电机用非晶合金定子铁心的损耗特性研究[J],微特电机,2009,37(6): 24.
- [ 6 ] 王倩营,李春茂,卢俊文,等.非晶电机机械性能与电磁特性的数值分析[J].电机与控制应用,2015,42(3): 13.
- [ 7 ] DEMS M, KOMEZA K. Finite element and analytical calculations of no-load core losses in energy-saving induction motor[J].IEEE Transactions on Industrial Electronics,2012,59(7): 2934.
- [ 8 ] 张超,朱建国,佟文明,等.基于裂比的非晶合金永磁电机设计技术[J],电机与控制应用,2017,44(8): 48.
- [ 9 ] KOLANO R, BURIAN A K, KRYKOWSKI K, et al. Amorphous soft magnetic core for the stator of the high-speed PMLDC motor with half-open slots[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2016, 52 ( 6 ): 2003005.
- [ 10 ] DENIS K, INOUE M, FUJISAKI K, et al. Iron loss reduction in permanent magnet synchronous motor by using stator core made of nanocrystalline magnetic material[J].IEEE Transactions on Magnetics,2017,53(11): 8110006.
- [ 11 ] KIYOTA K, KAKISHIMA T, CHIBA A. Comparison of test result and design stage prediction of switched reluctance motor competitive with 60-kW rare-earth PM motor [ J ]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2014,61(10): 5712.
- [ 12 ] HIEU P T, LEE D H, AHN J W. Design of a high speed 4/2 switched reluctance motor for blender application[C]//IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific,2017.
- [ 13 ] CHIBA A, HAYASHI H, NAKAMURA K, et al. Test results of an SRM made from a layered block of heat-treated amorphous alloys[J].IEEE Transactions on Industry Application,2008,44(3): 699.
- [ 14 ] HAYASHI H, NAKAMURA K, CHIBA A, et al. Efficiency improvements of switched reluctance motors with high-quality iron steel and enhanced conductor slot fill[J].IEEE Transactions on Energy Conversion, 2009,24(4): 819.
- [ 15 ] 吴红星.开关磁阻电机系统理论与控制技术[M].北京:中国电力出版社,2010.

收稿日期: 2018-08-20

(上接第 87 页)

- [ 18 ] DU Y, XIAO F, HUA W, et al. Comparison of flux-switching PM motors with different winding configurations using magnetic gearing principle [ J ]. IEEE Transactions on Magnetics, 2016, 52 ( 5 ): 8201908.
- [ 19 ] 徐姐,林明耀,付兴贺,等.混合励磁轴向磁场磁通切换型永磁电机静态特性[J].电工技术学报,2015,30(2): 58.

收稿日期: 2018-08-20