

同性极式感应子电机有限元分析及试验研究^{*}

贾璐璐¹, 付刚², 王吉², 申锐潇¹, 杨江涛³

(1. 国网河南省电力公司, 河南 郑州 450000;

2. 国网河南省电力公司电力科学研究院, 河南 郑州 450000;

3. 湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 同性极式感应子电机具有无励磁和结构简单等特点, 在飞轮储能、脉冲功率电源等领域有着广阔的应用前景。首先给出同性极式感应子电机的拓扑结构和运行原理。采用有限元法分析了矩形槽、弧形槽和正弦形槽转子对电机气隙磁密、反电动势和转矩等电磁性能的影响, 研究不同槽形的转子在高速旋转下的应力分布规律。然后, 综合考虑电磁和机械特性, 选择弧形槽转子结构的感应子电机作为对象, 对其性能进行分析。最后, 对一台感应子电机样机进行试验测试, 验证了相关分析的合理性。研究结果表明: 同性极式感应子电机采用正弦形槽转子虽能获得较为正弦的气隙磁密, 但在相同槽深条件下其基波分量比矩形槽和弧形槽约少了 25.2% 和 24.3%, 并且输出转矩较低。此外, 矩形槽和正弦形槽都出现了明显的应力集中, 分别位于转子凸极根部和槽表面, 而采用弧形槽具有更均匀的应力分布。

关键词: 同性极式感应子电机; 转子槽型; 有限元; 性能

中图分类号: TM32 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2022)04-0039-06

doi: 10.12177/emca.2021.209

Finite Element Analysis and Experimental Research on Homopolar Inductor Machine^{*}

JIA Lulu¹, FU Gang², WANG Ji², SHEN Ruixiao¹, YANG Jiangtao³

(1. State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450000, China;

2. Electric Power Research Institute of State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450000, China;

3. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Homopolar inductor machines (HIMs) have broad application prospects in the fields of flywheel energy storage system, pulsed alternator and so on with the characteristics of brushless excitation and simple structure. Firstly, the topology and operating principle of the HIM are given. Secondly, the influences of rotor with the rectangular, arc and sinusoidal slots on the electromagnetic properties such as air-gap flux density, back electromotive force (EMF) and torque are studied by finite element method. Thirdly, the stress distribution of rotors with different slot shapes under high-speed rotation is studied. Considering the electromagnetic and mechanical characteristics, an HIM with an arc slot rotor structure is selected as the object to analyze its performance. Finally, a prototype of HIM is tested to verify the rationality of the analysis. The results show that although the sinusoidal slot rotor can obtain a more sinusoidal air-gap flux density, its fundamental wave component is about 25.2% and 24.3% less than those of the rectangular and arc slots under the same slot depth, and the output torque is low. In addition, the rectangular and sinusoidal slots have obvious stress concentration, which are located at the root of the rotor salient

收稿日期: 2021-12-11; 收到修改稿日期: 2022-02-24

^{*} 基金项目: 湖南省自然科学基金项目(2021JJ40099)

作者简介: 贾璐璐(1985—), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为电机设计、电力物资管理。

杨江涛(1991—), 男, 博士, 讲师, 研究方向为特种电机理论与应用。

pole and the slot surface respectively, while the rotor with arc slot has a more uniform stress distribution.

Key words: homopolar inductor machine (HIM); rotor slot shape; finite element; performance

0 引言

高速电机具有效率高、功率密度高、适应高速直驱等特点,已成为众多关键装备的核心部件^[1]。目前,应用在高速驱动领域的电机类型主要有永磁电机、异步电机、开关磁阻电机、同步磁阻电机和同性极式感应子电机等^[2]。其中,同性极式感应子电机励磁结构位于定子侧,转子采用高强度合金钢锻造而成,具有结构简单可靠、无刷励磁、转子强度高优点,在超导电机、飞轮储能、惯性储能脉冲功率电源等领域得到了广泛关注^[3-4]。

同性极式感应子电机的转子槽形可采用矩形槽、弧形槽和正弦形槽^[6]。转子齿槽对应的不同气隙磁导对直流励磁磁动势进行调制,产生直流偏置下的交流气隙磁密,从而在电枢绕组中感应出反电动势。不同的转子槽形将直接影响气隙磁场谐波含量,进而影响电机电磁性能。此外,对于高速运行的同性极式感应子电机,在设计时还需要考虑其高速旋转时的转子强度,这些关键性能参数同样会受到转子槽形的直接影响。为了满足电动/发电一体化飞轮储能系统需求,文献[5]研究了正弦形槽转子的同性极式感应子电机,实现了空载气隙磁密和反电动势的正弦化。文献[7]研究了感应子-永磁混合励磁电机结构以实现气隙磁场的灵活调节。其中,同性极式感应子电机采用了矩形槽结构。为了满足惯性储能脉冲功率电源需求,文献[8]研究了采用弧形槽转子同性极式感应子电机。当前的研究主要集中在转子槽形下的空载气隙磁密计算,忽略了转子槽型对于其他性能的影响。在有限元分析方面,文献[9]采用等效二维分析方法计算了同性极式感应子电机矩形槽转子时的气隙磁密分布;文献[10]通过空间叠加方法分析了矩形槽和弧形槽下的气隙磁密。在解析计算方面,文献[11]采用标量电位法研究了弧形槽不同角度对于气隙磁密谐波含量的影响;文献[12]采用解析分析方法计算了不同转子槽形下的气隙磁密。

针对上述问题,本文将系统研究不同转子槽形对感应子电机电磁性能和转子机械性能的影响。首先,给出了感应子电机的拓扑结构和基本

运行原理。然后,研究不同转子槽形对于电机反电动势、电感、转矩脉动、损耗等电磁性能。再次,采用有限元法研究了三种不同转子槽形下转子应力的分布规律。最后,本文对一台弧形槽转子同性极式感应子电机进行性能测试,验证了理论分析的合理性。

1 电机结构与运行原理

同性极式感应子电机结构如图1所示。电机定子部分包含两段由硅钢片轴向叠压而成的定子铁心。在两段定子铁心之间设置有一套环形集中励磁绕组。电机最外侧为电机机壳,由良性导磁材料加工而成,为励磁磁通提供轴向路径。转子采用高强度良导磁合金钢锻造而成,无任何附属部件。在转子的左右两侧开有相同数量的凸极,左右凸极轴线之间互差 π 电角度。在励磁绕组中通过直流电流,形成的励磁磁路如图1所示。励磁磁场将通过机壳-左侧定子铁心-气隙-转子-气隙-右侧定子铁心闭合。

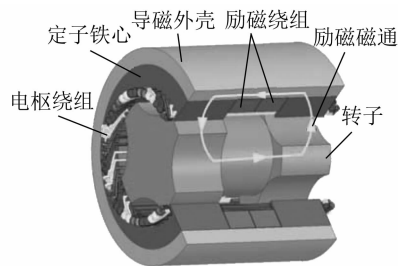


图1 同性极式感应子电机结构图

为了分析同性极式感应子电机的运行原理,本文作以下假设:(1)忽略定子齿槽对气隙磁导的影响;(2)转子槽为矩形槽。感应子电机励磁绕组一侧的气隙比磁导波形如图2所示。将励磁绕组左侧和右侧的气隙比磁导通过傅里叶分解,得到的气隙比磁导函数为

$$\Lambda_L(\theta - \theta_r) = \sum_{m=0}^{\infty} \Lambda_m \cos[mp(\theta - \theta_r)] \quad (1)$$

$$\Lambda_R(\theta - \theta_r) = \sum_{m=0}^{\infty} \Lambda_m \cos[mp(\theta - \theta_r - \pi/p)] \quad (2)$$

式中: Λ_m 为转子比磁导函数 m 次谐波幅值; p 为极对数; θ 为电机圆周到定子参考轴线的机械角

度; θ_r 为转子凸极轴线与A相轴线的夹角。

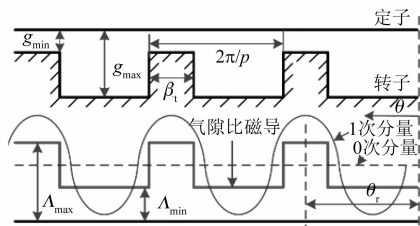


图2 同性极式感应子电机气隙比磁导

励磁绕组一侧励磁磁动势可表示为

$$F_\delta = F_f/2 = Ni/2 \quad (3)$$

式中: F_f 为励磁磁动势; N 为励磁绕组匝数; i 为励磁电流。

空载气隙磁密可表示为

$$B_\delta = F_\delta \Lambda(\theta - \theta_r) \quad (4)$$

由式(1)~式(4)可以看出,气隙磁密中含有直流分量、奇数次谐波和偶数次谐波。随着转子的旋转,电枢绕组中将会感应出反电动势。

2 电磁性能分析

2.1 空载特性

同性极式感应子电机3种不同槽形的转子结构如图3所示,其中图3(a)、图3(b)和图3(c)分别为矩形槽、弧形槽和正弦形槽转子结构。

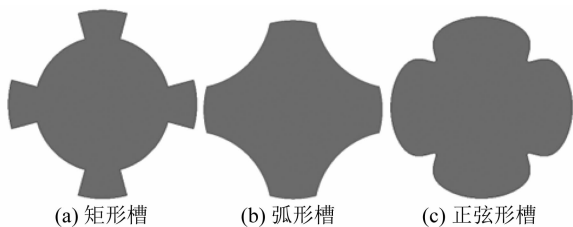


图3 不同转子结构

为了研究气隙长度和转子齿宽对气隙磁密的影响,将转子齿宽系数定义为

$$k_t = \frac{\beta_t}{2\pi/p} \quad (5)$$

式中: β_t 为转子齿宽。

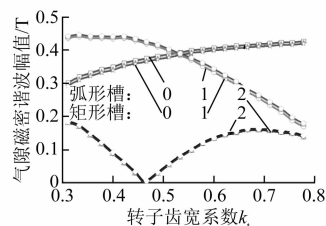
转子气隙长度比定义为

$$\alpha = \frac{g_{\max}}{g_{\min}} \quad (6)$$

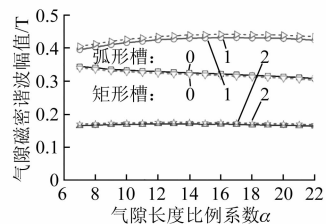
式中: $g_{\max}$ 和 $g_{\min}$ 分别为最大和最小气隙磁密。

在励磁绕组中通入2.5 A的励磁电流,将在

左右气隙中产生空载气隙磁密。图4(a)给出了同性极式感应子电机采用矩形槽和弧形槽时,在不同齿宽系数下气隙磁密的直流分量、基波和2次谐波幅值变化。可以看出,弧形槽和矩形槽在随着齿宽系数的变化时,各次谐波变化趋势基本一致。采用弧形槽时的直流分量大于矩形槽时的直流分量,然而弧形槽转子对应的基波和2次谐波幅值小于矩形槽转子对应的谐波幅值。当齿宽系数在0.3~0.8间变化时,随着转子齿宽系数的增加,直流分量逐渐增大,基波分量先增加后减少。在齿宽系数约为0.33时,气隙磁密基波分量达到最大。图4(b)给出了直流分量、基波和2次谐波随着气隙长度比例系数变化的曲线。随着气隙长度的增加,直流分量逐渐减小,基波分量会逐渐增加。当气隙长度比例系数大于17时,气隙磁密基波分量基本保持不变。



(a) 不同转子齿宽下气隙磁密谐波幅值



(b) 不同转子槽深下气隙磁密谐波幅值

图4 矩形槽和弧形槽下气隙磁密谐波幅值

图5给出了正弦性槽同性极式感应子电机转子在不同转子槽深下的气隙磁密直流分量和基波分量幅值。可以看出,在不同槽深情况下,气隙磁密直流分量值大于基波分量幅值。随着转子槽深的增加,基波分量逐渐增加,直流分量逐渐减少。在转子槽深系数大于16时,气隙磁密直流分量和基波分量基本保持恒定。

为了对比分析不同转子槽形对气隙磁密的影响,根据上述分析将矩形槽和弧形槽的齿宽系数取为0.33,此外,3种转子槽形采用了相同的最大气隙长度34 mm和最小气隙长度2 mm,即气隙系

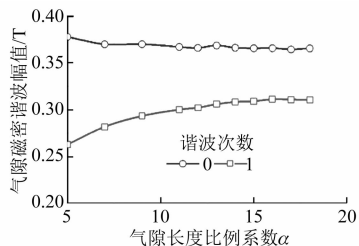


图5 正弦形槽下的气隙磁密谐波幅值

数 α 为 17。在电机中通入相同的励磁电流,得到的空载气隙磁密波形如图 6(a) 所示。可以看出,矩形槽和弧形槽得到的气隙磁密波形均接近梯形波,而正弦性槽对应的气隙磁密波形接近正弦波。通过傅里叶分解得到的气隙磁密谐波幅值如图 6(b) 所示。矩形槽和弧形槽的气隙磁密中含有直流、奇次和偶次谐波含量,而正弦形槽中,谐波含量很少。矩形槽、弧形槽和正弦形槽对应的直流分量分别为 0.307 T、0.314 T 和 0.371 T,基波幅值分别为 0.412 T、0.407 T 和 0.308 T。与矩形槽相比,弧形槽和正弦形槽气隙磁密分别减少了 1.2% 和 25.2%。

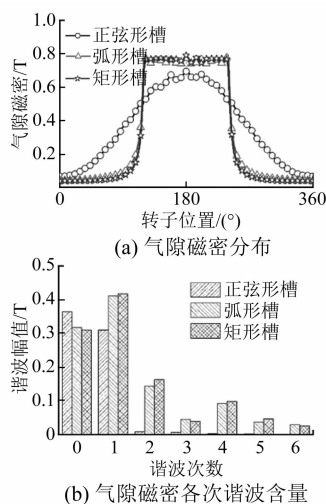


图6 不同槽形下气隙磁密

同性极式感应子电机一根导体中产生的感应电动势为励磁绕组两侧反电动势的叠加,可表示为

$$e = (B_L + B_R)lv = 2lF_f \sum_{m=2n+1}^{\infty} A_m \cos[mp(\theta - \theta_r)], n = 0, 1, 2, \dots \quad (7)$$

式中: B_L 和 B_R 分别为左侧和右侧气隙磁密; l 为左右定子铁心长度; v 为切割磁力线速度。

由式(7)可知,气隙磁密的偶次谐波不会在绕组中产生反电动势。当电机转速为 12 000 r/min 时,在励磁绕组中通过 2.5 A 的励磁电流得到的反电动势波形如图 7 所示。矩形槽和弧形槽电机的反电动势波形基本相同,幅值约为 408 V,大于正弦形槽电机反电动势幅值 312 V。

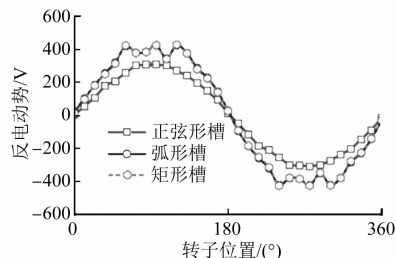


图7 不同槽形对应的反电动势

转子齿槽形状影响气隙磁导,从而影响电机绕组电感。图 8 给出了不同转子齿槽形状下的电感波形。可以看出,当转子采用正弦形槽时,相绕组电感最大;当采用矩形槽时,电感最小。

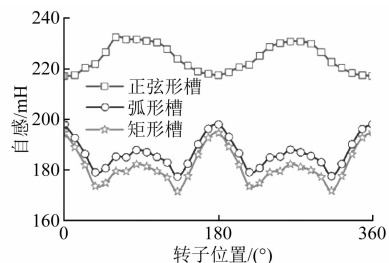


图8 相绕组电感波形

2.2 负载特性

为了研究不同转子槽形对电机输出转矩性能的影响,本文在矢量控制中采用了 $I_d = 0$ A 的控制方式。在三相对称绕组中通入有效值为 20 A 的正弦电流,在一个电周期内得到的转矩输出波形如图 9 所示。矩形槽、弧形槽和正弦性槽对应的平均转矩分别为 16.75 N·m、16.39 N·m 和 10.70 N·m。可以看出,在 3 种转子槽型中,矩形槽电机具有更大转矩输出能力。转矩脉动定义为

$$\eta = \frac{\Delta T}{T_{ave}} \quad (8)$$

式中: ΔT 为转矩脉动峰峰值; T_{ave} 为平均输出

转矩。

矩形槽、弧形槽和正弦形槽的转矩脉动分别为 140.6%、135.4% 和 47.0%。与矩形槽和弧形槽相比,采用正弦形槽能获得最小的转矩脉动。虽然矩形槽和弧形槽同性极式感应子电机具有较大转矩脉动,但瞬时输出转矩均为正值。因此,其带负载运行时,能正常运行。

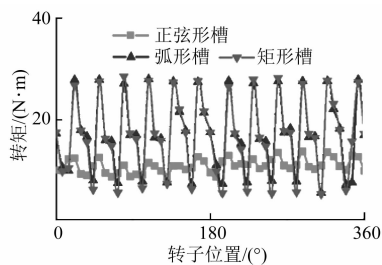


图 9 转矩波形

同性极式感应子电机在额定运行时的各部分电磁损耗如表 1 所示。因为 3 种不同转子槽形的同性极式感应子电机励磁电流和电枢电流相同,所以 3 台电机的铜耗相同。可以看出,正弦形槽同性极式感应子电机的定子铁心损耗小于矩形槽和弧形槽同性极式感应子电机。主要原因在于正弦形槽同性极式感应子电机气隙磁密中具有更少的高次谐波。此外,由于采用了实心转子结构,同性极式感应子电机的转子涡流损耗占了总损耗的较大一部分。采用在转子表面开槽的方式来抑制转子涡流损耗^[13]。

表 1 同性极式感应子电机电磁损耗分析

损耗	正弦形槽	弧形槽	矩形槽
定子铁心损耗/W	110.36	262.95	253.31
转子涡流损耗/W	123.52	225.24	236.04
励磁铜耗/W	272.83	272.83	272.83
电枢绕组铜耗/W	88.9	88.9	88.9
效率/%	91.56	91.84	91.75

3 转子强度

同性极式感应子电机在高速旋转时,转子会受到较大离心力。为了确保电机的安全运行,需要对其转子强度进行分析。由于转子为不规则形状,采用解析法很难准确计算转子应力。因此,本部分采用有限元法对转子应力进行分析。图 10

给出了当转速为 12 000 r/min 时,不同转子槽形下的转子应力分布。可以看出,矩形槽的凸极根部以及正弦形槽的槽表面出现了明显应力集中现象。与矩形槽和正弦形槽相比,采用弧形槽可以有效抑制转子应力集中。图 11 给出了 3 种不同转子开槽方式时沿 R_1 和 R_2 方向上的应力分布变化曲线。从图 11 中可以看出,采用矩形槽时,在沿转子齿轴线和转子槽轴线的方向上,随着半径的增加转子应力逐渐减小。采用弧形槽时,在沿转子槽轴线方向上,随着半径的增加,应力先增加后减小;在沿转子齿轴向方向上,应力逐渐减小。采用正弦形槽时,在沿转子齿轴线方向上,转子所受应力逐渐减小;在沿转子槽轴线方向上,转子所受应力先减小后增大。

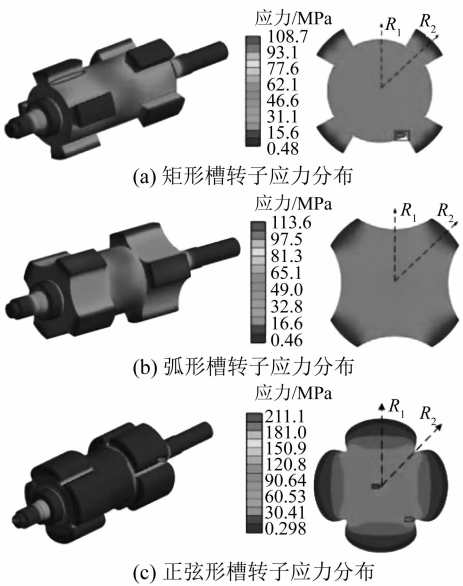


图 10 12 000 r/min 时电机转子应力分布

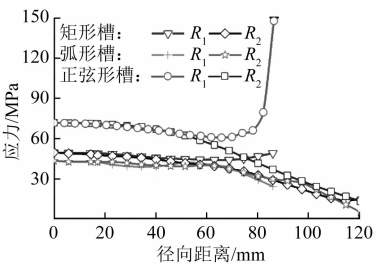


图 11 感应子电机转子沿径向 R_1 和 R_2 应力分布

4 试验研究

为了验证上述理论分析的合理性,对一台弧

形槽转子同性极式感应子电机进行了测试。该电机的具体结构参数如表 2 所示。同性极式感应子电机的定子、转子以及试验平台如图 12 所示。

表 2 同性极式感应子电机样机参数	
参数名称	参数值
定子内径/mm	245
气隙长度/mm	2
单段定子铁心长度/mm	120
转子槽深/mm	50
定子槽数	48
并联支路数	1
每相串联匝数	16
每槽导体数	2
转子凸极宽度/mm	30
极对数 p	4

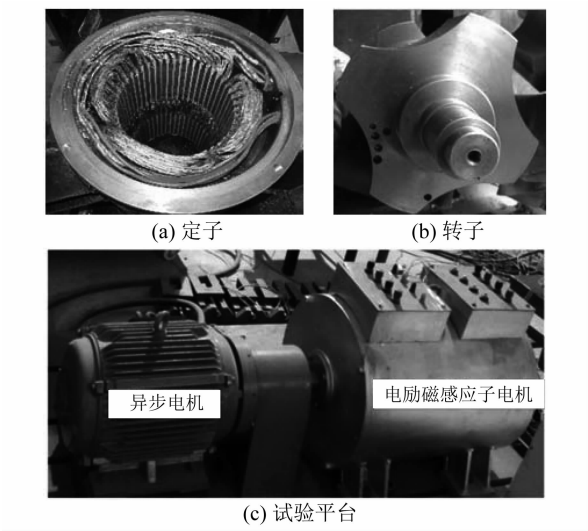


图 12 同性极式感应子电机试验测试平台

同性极式感应子电机样机由异步电机拖动，由于异步电机的最高允许转速为 8 000 r/min，本文仅给出了运行转速为 8 000 r/min 时的测试结果。图 13 给出了通过仿真和试验测试得到的空载反电动势波形。可以看出，通过试验和仿真得到的波形基本一致，均为梯形波。同时，试验得到的反电动势幅值略大于仿真得到的幅值，主要原因在于：(1) 转子采用高强度合金钢加工而成，受到励磁磁场的激励，在实心转子中会产生剩磁。这部分剩磁在仿真中很难考虑，从而导致试验值较大于仿真值；(2) 采用三维有限元仿真形式，网格的剖分精度等因素将会影响仿真结果，从而导致试验与仿真之间会产生误差。

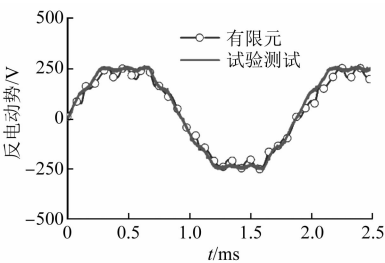


图 13 转速为 8 000 r/min 时的反电动势波形

5 结 语

本文系统研究了同性极式感应子电机不同转子结构的空载电磁性能、负载电磁性能和转子强度，并对一台样机进行测试验证分析的合理性。本文得到的主要结论如下：

- (1) 矩形槽和弧形槽转子感应子电机的气隙磁密波形基本一致，当齿宽系数为 0.33 时，气隙磁密基波分量达到最大；当转子槽深系数为 17 时，气隙磁密基波幅值基本恒定。
- (2) 转子采用正弦性槽时虽能获得较为正弦的气隙磁密，但是其基波分量相比于矩形槽和弧形槽约少了 25.2% 和 24.3%。此外，转子采用正弦形槽时能够获得更小的转矩脉动和定子铁心损耗。
- (3) 电机高速旋转时，矩形槽和正弦形槽均出现了明显的应力集中，分别位于转子凸极根部和槽表面；采用弧形槽具有更均匀的应力分布。

【参考文献】

[1] MOGHADDAM R R. High speed operation of electrical machines, a review on technology, benefits and challenges [C] // IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2014:5539.

[2] 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.

[3] 董剑宁,黄允凯,金龙,等. 高速永磁电机设计与分析技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(27): 4640.

[4] JEONG J S, AN D K, HONG J P, et al. Design of a 10 MW-class HTS homopolar generator for wind turbines [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2017, 27(4): 5202804.

(下转第 65 页)

水道前后端的空腔结构,避免出现逆流现象而导致系统散热效率降低。

【参考文献】

- [1] 曹飞,郑国丽,周黎明,等.三相异步风力发电机通风散热分析[J].电机与控制应用,2014,41(12): 39.
- [2] 周茜茜,黄勇.一种润滑油冷却永磁同步电机温度场研究[J].微特电机,2020,48(11): 5.
- [3] 张维伟,丰帆,郑国丽,等.定子轴向通风孔对永磁同步牵引电机绕组温升的影响[J].电机与控制应用,2020,47(11): 51.

- [4] 陈丽香,付佳玉,张超,等.电动汽车用永磁电机温升及冷却的研究[J].微电机,2020,53(6): 13.
- [5] DAVE S, DOUGLAS H, MIRCEA P. Motor-CAD software for thermal analysis of electrical motors-links to electromagnetic and drive simulation models[C]// CWIEME, 2010.
- [6] 郑力铭. ANSYS Fluent 15.0 流体计算从入门到精通[M].北京:电子工业出版社,2015.
- [7] 吴清松.计算热物理引论[M].合肥:中国科学技术大学出版社,2009.
- [8] 陈义良,朱旻明.物理流体力学[M].合肥:中国科学技术大学出版社,2008.

(上接第 38 页)

【参考文献】

- [1] 袁庆伟,赵荣祥.考虑死区的三相 PWM 逆变器共模电压抑制技术[J].浙江大学学报:工学版,2017,51(11): 2276.
- [2] 周娟,魏琛,杨宇,等.逆变器简化 PWM 算法及抑制共模电压策略[J].电工技术学报,2014,29(8): 158.
- [3] HAN D, MORRIS C T, SARLIOGLU B. Common-mode voltage cancellation in PWM motor drives with balanced inverter topology[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(4): 2683.
- [4] HOU C, SHIH C, CHENG P, et al. Common-mode voltage reduction pulsewidth modulation techniques for

three-phase grid connected converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(4): 1971.

- [5] 郭磊磊,金楠,申永鹏.一种基于优化电压矢量选择的电压源逆变器模型预测共模电压抑制方法[J].电工技术学报,2018,33(6): 1347.
- [6] 郭磊磊,金楠,李琰琰,等.电压源逆变器虚拟矢量模型预测共模电压抑制方法[J].电工技术学报,2020,35(4): 839.
- [7] GUO L, JIN N, GAN C, et al. An improved model predictive control strategy to reduce common-mode voltage for two-level voltage source inverters considering dead-time effects[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(5): 3561.

(上接第 44 页)

- [5] TSAO P, SENESKY M, SANDERS S R. An integrated flywheel energy storage system with homopolar inductor motor/generator and high-frequency drive [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2003, 39(6): 1710.
- [6] 张娟.飞轮储能系统用感应子电机的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.
- [7] 付兴贺.永磁-感应子式混合励磁发电机电磁场计算及运行特性分析[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.
- [8] YE C, YU K, XU W, et al. Optimal design and experimental research of a capacitor-charging pulsed alternator [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2015, 30(3): 948.
- [9] WANG Q, LIU C, ZOU J, et al. Numerical analysis and design optimization of a homopolar inductor machine used for flywheel energy storage [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2013, 41(5): 1290.

- [10] YANG J, YE C, LIANG X, et al. Investigation of a 2-D analytical model of the homopolar inductor alternator [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2018, 28(3): 5205205.
- [11] LOU Z, CHENG Y, HE Y, et al. Analytical calculation of synchronous reactances of homopolar inductor alternator [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2015, 43(5): 1462.
- [12] YANG J, YE C, HUANG S, et al. Analysis of the electromagnetic performance of homopolar inductor machine through nonlinear magnetic equivalent circuit and air-gap permeance function [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 56(1): 267.
- [13] YANG J, YE C, LIU G, et al. Research on the no-load rotor eddy loss of a high-speed pulsed alternator [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2017, 45(7): 1213.