

本文全文线上首发由
上海电器科学研究所
(集团) 有限公司
支持

王海燕, 孙涛, 熊端锋, 代颖.
车用永磁同步电机电感参数的精细化分析.
电机与控制应用, 2021, 48(10): 65.




数据监测
多维数据采集, 全面运行分析
全景可视窗口, 丰富报表类型


预测运维
海量行业数据, 精准趋势预测
生命周期管理, 性能尽在掌握


故障诊断
专业机理模型, 自动故障告警
在线智能诊断, 高效便捷派单


绿色节能
环保绿色先行, 助力低碳生产
节能降耗减排, 合理降本增效


聚汇商机
供需多方互联, 协同合作共赢
有效整合资源, 共享生态未来

SEARI
上电科

上海电器科学研究所(集团)有限公司
上海电机系统节能工程技术研究中心有限公司

云平台技术支持: 18918675776
固定电话: 021- 52669993

业务垂询: 18801608667
地址: 上海市普陀区武宁路505号9号楼



微信扫码关注
关注我们

车用永磁同步电机电感参数的精细化分析

王海燕¹, 孙涛¹, 熊端锋², 代颖¹

[1. 上海大学 机电工程与自动化学院, 上海 200072;

2. 哈兆检测技术(上海)有限公司, 上海 200435]

摘要: 电感参数直接影响电机稳态和动态的运行性能。车用驱动电机的磁路饱和和交叉耦合效应严重, 进一步增加了电感参数精确计算的难度。计算电感时若忽略饱和效应的影响, 会导致转矩控制精度不足。结合车用电机负载电流范围大、磁路饱和和变化复杂的特点, 对比分析了视在电感和增量电感随负载电流增大的变化关系及两者之间变化的差异, 进而研究了电机斜极对电感的影响。结果表明: 在磁路高度饱和时, 两种电感的计算结果差距较大, 增量自感为视在自感的 11% ~ 30%; 斜极会影响磁导率的分布, 对电机自感参数影响很大, 互感次之。

关键词: 车用驱动电机; 视在电感; 增量电感; 转子斜极

中图分类号: TM 351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2021)10-0065-06

doi: 10.12177/emca.2021.105

Refined Analysis of Inductance Parameters of Permanent Magnet Synchronous Motor for Vehicle

WANG Haiyan¹, SUN Tao¹, XIONG Duanfeng², DAI Ying¹

[1. School of Mechatronics Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China;

2. Hanzhao Inspection Technology (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai 200435, China]

Abstract: The steady-state and dynamic operating performances of the motor can be directly affected by inductance. The effects of magnetic circuit saturation and cross-coupling are more serious for the vehicle drive motor, so that the accurate calculation of the inductance parameters will be more difficult. Ignoring the saturation effect when calculating the inductance will reduce the torque control accuracy. At the same time, the load current range will become very large and the change of magnetic circuit saturation will be complicated in the vehicle drive motor. By comparing the apparent inductance and incremental inductance when the load current is increased, the relationship and change law between them are analyzed, and the influence of skewed rotor on the inductance is studied. The results show that large difference exists between the calculation results when the magnetic circuit is highly saturated, for which the incremental inductance is 11% ~ 30% of the apparent inductance. The changes in permeability with skewed rotor have a great impact on the motor's self-inductance parameters, followed by mutual inductance.

Key words: vehicle drive motor; apparent inductance; incremental inductance; skewed rotor

0 引言

电感参数直接影响电机稳态和动态的运行性

能。准确计算电机工作点的 d 、 q 轴电感参数, 对电机的性能预判和高精度控制非常关键^[1]。永磁同步电机(PMSM)以其结构简单、转矩密度高和

收稿日期: 2021-06-20; 收到修改稿日期: 2021-09-17

作者简介: 王海燕(1990—), 女, 硕士, 研究方向为新能源车用电机设计及热分析。

孙涛(1995—), 男, 硕士, 研究方向为电机设计和振动噪声。

熊端锋(1979—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为新能源车用电机及其驱动技术。

集成度高等优势成为新能源汽车驱动电机的首选机型。车用电机为提高空间利用率,磁路一般设计得比较饱和,在不同工况下磁路的交叉耦合和饱和程度不同,导致电机的自感与互感不是常数^[2-3]。电感的基本定义为 $L = \frac{\varphi}{i}$ (φ 为磁链, i 为

电流),但在磁路饱和时采用这种方法计算的电感为视在电感而不是增量电感,会直接影响电机转矩控制精度^[4]。文献[5]指出视在电感和增量电感在不同工况点的差异可以用来判断电机饱和程度,文献[6-7]采用考虑磁路饱和的增量电感预测电流,提高电感参数辨识的准确度。因此,辨析视在电感和增量电感与磁路饱和程度之间的关系很重要。

车用电机通常采用定子斜槽或转子斜极的方式削弱齿谐波、抑制转矩脉动,而斜极会引起电机轴向磁场的变化,进而对电机电感产生影响^[8-9]。目前,计算 PMSM d 、 q 轴电感参数的方法主要有冻结磁导率法和有限元法,其中有限元法计算速度快、精度高且工程实用性强,同时考虑了电机磁路非线性、交叉饱和等因素^[10-13]。

本文以一台纯电动车驱动用内置式永磁同步电机(IPMSM)为研究对象,采用有限元法分析在不同负载电流下定子斜槽的增量电感和视在电感的变化情况,揭示在磁路不同饱和程度下两种电感的差异及变化规律。同时,详细对比定子斜槽和转子不同分段数斜极时这两种电感的变化情况,了解斜极对电感的影响。

1 视在电感和增量电感

1.1 电机参数

本文研究对象为一台纯电动车驱动用 IPMSM。电机主要参数如表 1 所示。

表 1 电机主要参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
极数	6	槽数	36
额定转速/($r \cdot \min^{-1}$)	3 000	额定功率/kW	35
峰值转速/($r \cdot \min^{-1}$)	8 000	峰值功率/kW	70
定子外径/mm	205	铁心长度/mm	132

转子采用内置式“V—”型结构,其轴向截面如图 1 所示。

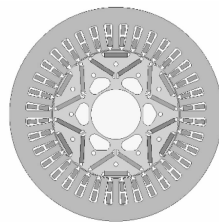


图 1 电机轴向截面

1.2 视在电感和增量电感的定义

电机电感按磁链和电流之间的关系可定义为视在电感和增量电感^[4],表达式为:

$$\begin{cases} L_{app} = \frac{\varphi}{i} \\ L_{inc} = \frac{d\varphi}{di} \end{cases} \quad (1)$$

式中: L_{app} 为视在电感; L_{inc} 为增量电感。下文中,下标“app”代表视在电感,下标“inc”代表增量电感。

图 2 为两种电感在磁链-电流坐标下的示意图。由图 2 可知:当电机运行在非饱和区(如点 1)时,两种电感值基本相等;当电机运行在饱和区(如点 2)时,增量电感随着磁路饱和程度的增加逐渐小于视在电感,差值越来越大。

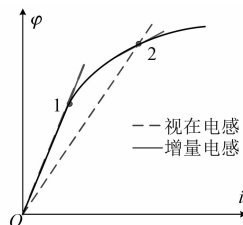


图 2 视在电感和增量电感示意图

2 电感参数的计算和分析

2.1 d 、 q 轴电感参数的计算

当考虑交叉耦合效应时, i_d 、 i_q 不同时为零,则有^[14-15]:

$$\begin{bmatrix} L_{dd} & L_{dq} \\ L_{qd} & L_{qq} \end{bmatrix} = C_{3s/2r} \begin{bmatrix} L_{AA} & L_{AB} & L_{AC} \\ L_{BA} & L_{BB} & L_{BC} \\ L_{CA} & L_{CB} & L_{CC} \end{bmatrix} C_{3s/2r}^{-1} \quad (2)$$

式中: L_{dd} 、 L_{dq} 为 d 轴电流单独激励产生的 d 轴自感和与 q 轴交叉耦合电感; L_{qq} 、 L_{qd} 为 q 轴电流单独激励产生的 q 轴自感和与 d 轴交叉耦合电感,且有 $L_{dq} = L_{qd}$; L_{AA} 为 A 相绕组的自感; L_{AB} 为 B 相绕组对 A 相绕组的互感; L_{BB} 和 L_{AC} 等定义与 L_{AA} 和 L_{AB} 类似;

$$C_{3s/2r} =$$

$$\frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta_e & \cos\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_e + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin\theta_e & -\sin\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_e + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix},$$

θ_e 为转子位置角。

在额定电流激励下不同转子位置处的视在电感 $L_{dd(\text{app})}$ 如图 3 所示。由图 3 可知: d 轴自感随转子位置变化范围为 $699.2 \sim 716.7 \mu\text{H}$, 平均值 $703.3 \mu\text{H}$, 差值较小。在每个电流运行点下电感参数的计算可以选取多个位置点求解并取平均值, 从而使计算结果更加精确, 但计算量过大、对整体精度提升不明显。为了提高计算效率, 本文仅选取一个固定转子位置角度 $\theta_e = 180^\circ$ 进行计算。通过有限元仿真可以计算出考虑电感交叉耦合效应时三相绕组的增量电感和视在电感, 根据式(2)计算出 dq 坐标系下的增量电感和视在电感。

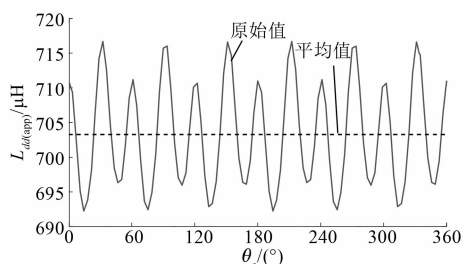


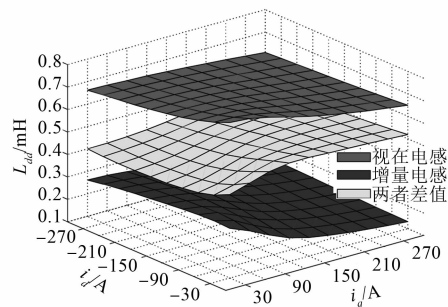
图 3 d 轴自感随定转子位置变化曲线

2.2 视在电感和增量电感对比

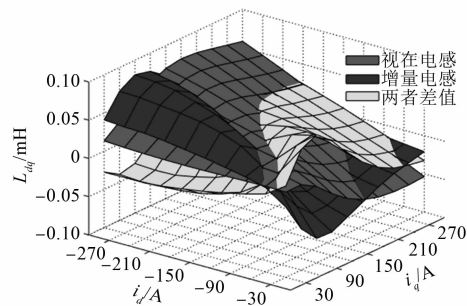
为研究峰值功率 70 kW 车用电机 d 、 q 轴电感参数从磁场不饱和到饱和严重的整个运行区间内的变化情况, 结合电机峰值负载时其对应的 d 、 q 轴电流 $i_d = -222 \text{ A}$ 、 $i_q = 207 \text{ A}$, 确定了电机负载电流的取值范围 $i_d \in (-300 \text{ A}, -30 \text{ A})$ 、 $i_q \in (30 \text{ A}, 300 \text{ A})$ 。图 4 为 dq 坐标系下视在电感、增量电感和视在电感减增量电感的差值随负载电流变化的三维图。

由图 4 可知, 在整个电流取值范围内, 视在电感和增量电感的变化趋势类似, 随着磁路饱和程度的增加, 两种电感的差值先逐渐增大再趋于稳定, 符合图 2 揭示的变化规律。

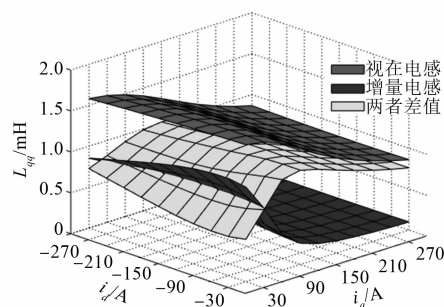
在图 4(a) 的 d 轴自感中, 视在电感和增量电感两者差值的范围为 $0.39 \sim 0.54 \text{ mH}$ 。当 $i_q \geq$



(a) d 轴自感



(b) d 、 q 轴交叉耦合电感



(c) q 轴自感

图 4 视在电感和增量电感

210 A 时, 电机磁路饱和非常严重, 两种电感的差值上升缓慢; 在 i_q 较大时, 增量电感的取值范围为 $0.13 \sim 0.19 \text{ mH}$, 为视在电感的 20% ~ 30%。在图 4(b) 的 d 、 q 轴交叉耦合电感中, 两种电感的差值范围为 $-0.04 \sim 0.07 \text{ mH}$, 差值较小。在图 4(c) 的 q 轴自感中, 两种电感的差值范围为 $0.47 \sim 1.15 \text{ mH}$, 差值较大; 当 $i_q \geq 150 \text{ A}$ 时, 电机磁路饱和严重, 两者差值由上升趋势变为缓慢下降趋势, 且增量电感的取值范围为 $0.10 \sim 0.29 \text{ mH}$, 为视在电感的 11% ~ 22%。

综上所述, 视在电感和增量电感在不同负载电流范围内存在较大差值, 且两者差值受 i_q 的影响较大, 随着 i_q 的增大而先增大再趋于稳定。

3 转子斜极对电感的影响

3.1 转子斜极对磁场的影响

当电机转子斜极时,定子和转子的相对位置会发生变化。图5为电机转子分5段斜极的电机轴向展开图,其中 θ_{sk} 为转子分段斜极角度。对于处于不同轴向位置的磁极来说,其周向位置发生了偏移。

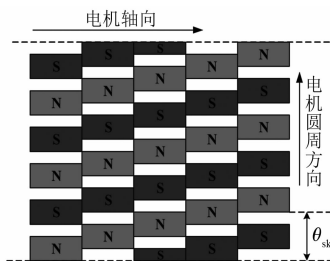


图5 转子5段斜极时电机轴向展开示意图

当定转子相对位置发生变化时,每个切片面对应的电枢电流相位角会存在差异,使电机轴向截面磁场分布不再保持一致。图6为电机转子5段斜极在不同轴向位置处的相对磁导率分布图,图中定子侧磁场变化相对较大。

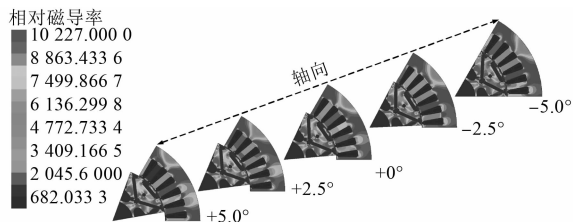


图6 转子5段斜极时相对磁导率沿轴向分布

电机转子分段斜极可以有效削弱齿谐波,且削弱的齿谐波阶数与分段数密切相关,不同分段数又会影响电机电感^[16]。为研究转子斜极对电感的影响,本文对比分析转子2段、3段、4段、5段式斜极以及定子连续斜极和未斜极这6种情况下电机的视在电感和增量电感的变化情况。

3.2 斜极对视在电感的影响

图7为上述6种情况下 d 、 q 轴视在电感随负载电流变化的三维图。相比未斜极电机,斜极电机的 d 轴自感和 d 、 q 轴交叉耦合电感均增大,而 q 轴自感减小。

在图7(a)的 d 轴自感中,随着分段数的增

加, $L_{dd(app)}$ 逐渐减小,接近未斜极的电感值; $L_{dd(app)}$ 减小的幅度受电机运行工况的影响,在 i_d 较小、 i_q 较大时,斜极和不斜极 $L_{dd(app)}$ 之间的差值较小。

在图7(b)的 d 、 q 轴交叉耦合电感中,随着分段数的增加, $L_{dq(app)}$ 逐渐减小,接近未斜极的值;未斜极的 $L_{dq(app)}$ 与转子5段斜极和连续斜极情况下的值在整个负载电流范围内几乎相等,但与转子2段、3段斜极情况下的差值较大。

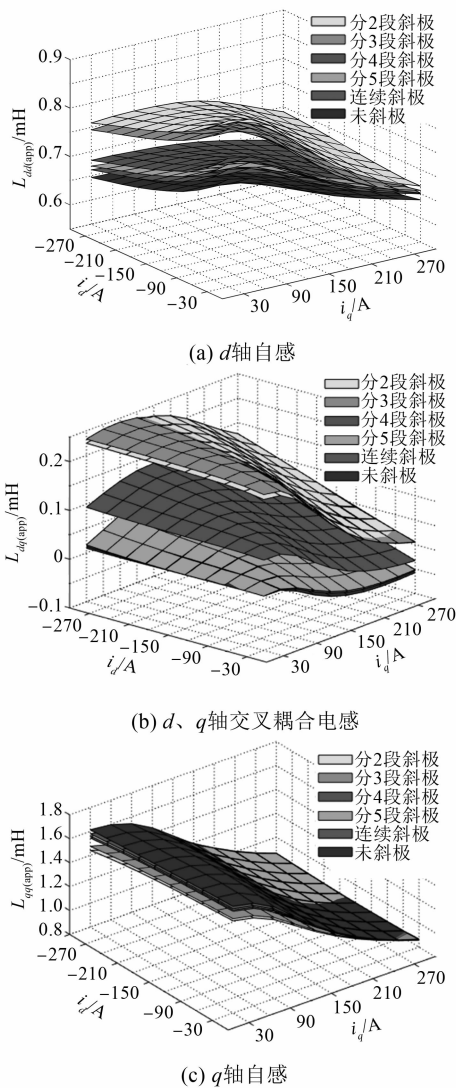


图7 转子斜极对 d 、 q 轴视在电感的影响

在图7(c)的 q 轴自感中,随着分段数的增加, $L_{qq(app)}$ 逐渐增加,接近未斜极电感值;在 i_q 较大时,转子斜极电机的 $L_{qq(app)}$ 与未斜极的 $L_{qq(app)}$ 差值非常小。

3.3 斜极对增量电感的影响

图8为上述6种情况下 d 、 q 轴增量电感随负

载电流变化的三维图。相比未斜极电机,斜极电机的 d 轴自感和 q 轴自感均减小, d 、 q 轴交叉耦合电感增加。

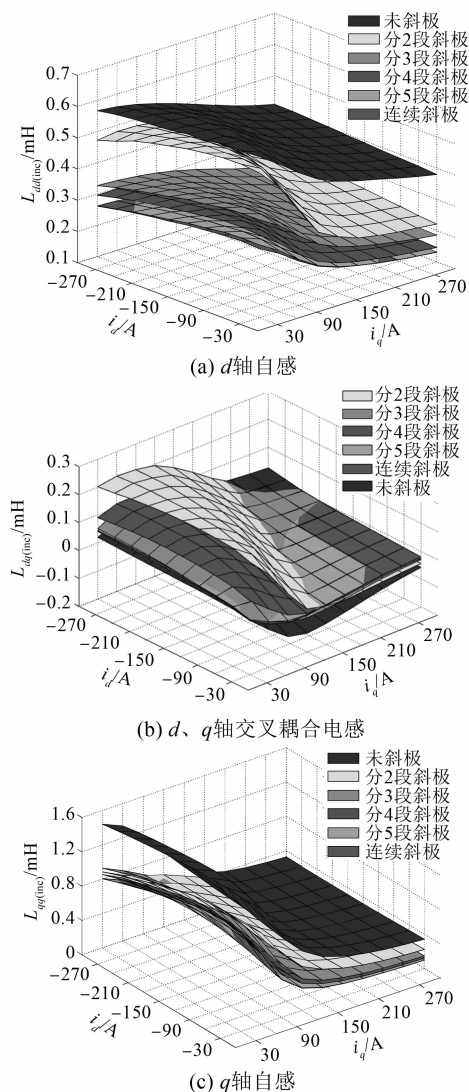


图8 转子斜极对 d 、 q 轴增量电感的影响

在图8(a)的 d 轴自感中,随着分段数的减小, $L_{dd(inc)}$ 逐渐增加,接近未斜极的 $L_{dd(inc)}$;转子分段斜极和连续斜极与未斜极电机 $L_{dd(inc)}$ 在整个电流变化范围内变化趋势类似,仅2段斜极电感在饱和区发生跳跃式变动。

在图8(b)的 d 、 q 轴交叉耦合电感中,在 i_q 较大、 i_d 较小时,斜极与未斜极的 $L_{dq(inc)}$ 差值较小。

在图8(c)的 q 轴自感中,随着分段数的减小, $L_{qq(inc)}$ 逐渐增加,接近未斜极的 $L_{qq(inc)}$;在 i_q 较大时,转子斜极与未斜极的 $L_{qq(inc)}$ 接近。

综上所述,在负载电流取值范围内,电机的视在电感和增量电感随着转子斜极段数的不同发生变动。在电机 d 轴自感中差异比较大,视在电感和增量电感取值范围分别为 $0.6 \sim 0.9$ mH 和 $0.1 \sim 0.6$ mH,随着分段数的增加,两种电感均减小,但未斜极电机电感在视在电感中为最小,而在增量电感为最大。在 d 、 q 轴交叉耦合电感中,视在电感和增量电感取值范围几乎相同,但在 i_q 较大时斜极对增量电感值影响较小。在 q 轴电感中,未斜极电机电感在两种电感计算方法下皆为最大,但随着分段数的增加,视在电感增加而增量电感减小,同时 i_q 较小时转子分段数对增量电感影响较大。

4 结 语

本文采用有限元法研究了一台峰值功率 70 kW 的车用 IPMSM 的电感参数,对比分析视在电感和增量电感随磁路饱和程度增加的变化规律,并研究了转子斜极对这两种电感的影响。结果表明:在整个负载电流范围内,车用电机 d 、 q 轴自感的视在电感均大于增量电感,两者之间的差值随着 q 轴电流增大而先增大再趋于平缓,其中, q 轴电流较大时,增量自感仅为视在自感的 11% ~ 30%;相比未斜极电机的视在电感和增量电感,斜极电机的 q 轴自感均减小, d 、 q 轴交叉耦合电感以增加为主,而 d 轴自感在视在电感中减小、在增量电感中增大。

电感参数在不同负载工况下的精确计算是车用电机高精度控制系统中的一个重要变量。考虑磁路饱和程度及斜极对电感的影响有利于提高车用电机转矩控制效果。

【参考文献】

- [1] 符荣, 窦满峰. 电动汽车驱动用内置式永磁同步电机直交轴电感参数计算与实验研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(11): 30.
- [2] 郑萍, 王勃, 吴帆, 等. 电动汽车用双三相永磁同步电机饱和电感特性分析及计算方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(7): 19.
- [3] 任雷, 崔芮华, 王宗培, 等. 永磁同步电机绕组电感的饱和效应[J]. 电工技术学报, 2000, 15(1): 21.
- [4] 张存山. 永磁无刷牵引电机电磁性能研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2006.

- [5] POURAMIN A, DUTTA R, RAHMAN M F, et al. Inductances of a fractional-slot concentrated-winding interior PM synchronous machine considering effects of saturation and cross magnetization[C]//2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2015.
- [6] 李峰, 夏超英. 考虑磁路饱和的内置式永磁同步电机电感参数旋转辨识算法[J]. 电工技术学报, 2016, 31(21): 203.
- [7] 靳峰雷, 张利深. 基于增量电感拟合的开关磁阻电机电流预测控制[J]. 微特电机, 2020, 48(2): 42.
- [8] LAZARI P, SEN B, WANG J, et al. Accurate d - q axis modeling of synchronous machines with skew accounting for saturation[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2014, 50(11): 8105704.
- [9] CHEN Y S, ZHU Z Q, HOWE D. Calculation of d - and q -axis inductances of PM brushless AC machines accounting for skew[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2005, 41(10): 3940.
- [10] 张宇宁. 考虑交叉耦合的永磁同步电机电感参数研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2016.
- [11] 肖玉坤, 戴正文, 邹琳, 等. 永磁电机交、直流电感特性有限元分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2018, 41(9): 1196.
- [12] SHU Y, TAKASHI K, YOSHIHIRO Y, et al. A method to determine direct and quadrature-axis inductances of permanent magnet synchronous motors[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2008, 128(7): 910.
- [13] 孙涛, 代颖, 刘皖秋, 等. 考虑交叉耦合时电动汽车用内置式永磁同步电机交直流电感计算[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(3): 87.
- [14] YAMAZAKI K, KUMAGAI M. Torque analysis of interior permanent-magnet synchronous motors by considering cross-magnetization: variation in torque components with permanent-magnet configurations[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(7): 3192.
- [15] LEE S T, BURRESS T A, TOLBERT L M. Power-factor and torque calculation with consideration of cross saturation of the interior permanent magnet synchronous motor with brushless field excitation[C]//2009 IEEE International Electric Machines and Drives Conference, 2009: 317.
- [16] 徐珂, 应红亮, 黄苏融, 等. 转子分段斜极对永磁同步电机电磁噪声的削弱影响[J]. 浙江大学学报(工学版), 2019, 53(11): 2248.

(上接第 50 页)

- [3] 陈益广, 王颖, 沈勇环, 等. 内置混合式可控磁通永磁同步电机有限元分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 29(6): 61.
- [4] WANG W, LIN H Y, YANG H, et al. Second-order sliding mode-based direct torque control of variable-flux memory machine[J]. IEEE Access, 2020, (8): 34981.
- [5] 赵魁, 裴宇龙, 柴凤. 锥形外转子永磁同步轮毂电机的转矩密度分析[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(S1): 265.
- [6] 刘福贵, 杨凯, 赵志刚, 等. 分数槽集中绕组表贴式永磁同步电机转子损耗[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(2): 52.
- [7] ZHAO X K, KOU B Q, ZHANG L, et al. Design and analysis of permanent magnets in a negative-Salient permanent magnet synchronous motor[J]. IEEE Access, 2020(8): 182249.
- [8] 寇宝泉, 赵晓坤. 反凸极永磁同步容错电机的短路特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(22): 6716.
- [9] ZHU X Y, YANG S, DU Y, et al. Electromagnetic performance analysis and verification of a new flux-intensifying permanent magnet brushless motor with two-layer segmented permanent magnets[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2019, 52(7): 8204004.
- [10] 郑菲菲, 邓先明, 李学峰, 等. 一种新颖反凸极结构永磁同步电动机的设计与分析[J]. 微特电机, 2016, 44(2): 12.
- [11] IBRAHIM M, MASISI L, PILLAY P. Design of variable flux permanent-magnet machine for reduced inverter rating[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(5): 3666.