

航空电励磁双凸极无刷直流起动发电机系统控制关键技术综述*

周兴伟¹, 谈阳¹, 周波², 王开森², 张犁¹, 吴峰¹, 李占江³

(1. 河海大学 能源与电气学院, 江苏 南京 211100;

2. 南京航空航天大学 自动化学院, 江苏 南京 211100;

3. 南京越博动力系统股份有限公司, 江苏 南京 210000)

摘要: 电励磁双凸极电机具有结构简单可靠、容错性能好、控制灵活等优势, 可构成一种具有竞争力的新型航空无刷直流起动发电机系统。简述了电励磁双凸极起动发电机系统的构成及其工作原理。针对航空电源这一特殊应用领域的要求, 对电励磁双凸极起动发电机高可靠性控制、高效率高功率密度控制、集成化控制等关键技术进行了归纳总结。讨论了电励磁双凸极起动发电机控制关键技术的未来发展趋势。

关键词: 电励磁双凸极起动发电机; 控制技术; 可靠性; 效率; 功率密度; 集成

中图分类号: TM 352 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2021)01-0001-07

doi: 10.12177/emca.2020.195

A Review of Key Techniques for Control of Aero Doubly Salient Electro-Magnetic Brushless DC Starter Generator System*

ZHOU Xingwei¹, TAN Yang¹, ZHOU Bo², WANG Kaimiao², ZHANG Li¹,
WU Feng¹, LI Zhanjiang³

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

2. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,
Nanjing 211100, China;

3. Nanjing Yuebo Power System Co., Ltd., Nanjing 210000, China)

Abstract: Due to the merits of rugged structure, strong fault tolerance and high control flexibility, doubly salient electro-magnetic motor (DSEM) can compose a novel competitive aero brushless DC starter generator (SG) system. The composition and working principle of the doubly salient electro-magnetic SG system are briefly described. In response to the requirements of the special application field of aviation power supply, key technologies such as high reliability control, high efficiency and high power density control, and integrated control of the doubly salient electro-magnetic SG are summarized. The developing trends of the above key control techniques for doubly salient electro-magnetic SG are discussed.

Key words: doubly salient electro-magnetic starter generator; control technique; reliability; efficiency; power density; integration

收稿日期: 2020-11-18; 收到修改稿日期: 2020-12-21

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51907051, 51737006); 中国博士后科学基金项目(2020M671317); 中央高校基本科研业务费项目(B200202171)

作者简介: 周兴伟(1990—), 男, 博士, 讲师, 研究方向为电机控制。

0 引言

随着飞机性能的日益提高,机载用电设备不断增加,多电飞机技术成为飞机发展的重要方向,对航空电源系统提出了更高要求^[1-3]。起动发电机(SG)技术利用1台电机实现起动、发电2个功能,革除了传统的起动机,简化了发动机附件,能够大幅提高系统的可靠性与功率密度,已成为现代航空电气系统的核心技术^[4-5]。

高可靠性、高效率、高功率密度、高集成度是航空SG的发展趋势^[1,6-8]。作为当今航空SG的主选电机之一,三级式无刷交流同步电机结构较复杂,转子上的旋转整流器,限制了电机转速,因此难以进一步提升系统功率密度^[4];永磁同步电机具有高功率密度、高效率的优势,但永磁体不适合航空高温工况,出现故障时难以灭磁,可靠性难以保证,一般认为其不适合作为航空主SG^[9-10]。

作为一种新型无刷直流电机,电励磁双凸极电机(DSEM)在开关磁阻电机(SRM)的基础上发展而来^[5,11],不仅具有SRM结构简单可靠、容错

性能好、适合于高温高速运行的优点,还可以全周期发电,且控制灵活。因此,DSEM可构成一种具有竞争力的新型航空无刷直流SG系统,成为近年来的研究热点之一,并已得到试飞验证^[12-14]。

本文首先介绍DSEM SG系统构成及其基本工作原理;接着围绕航空SG系统高可靠性、高效率、高功率密度、高集成度的要求,总结归纳了DSEM SG系统控制关键技术的当前研究热点;最后讨论了DSEM SG系统控制关键技术未来可能的发展方向。

1 电励磁双凸极无刷直流SG系统及工作原理

DSEM SG系统如图1所示。在起动阶段,开关S1闭合,起动电源(蓄电池)通过全桥变换器向DSEM供电,DSEM作为电动机带动航空发动机起动运行;在发动机到达点火转速后,S1断开,S2闭合,发动机反过来带动DSEM,DSEM作为发电机运行向负载供电,通过调节励磁电流及电枢电流即可进行发电控制。

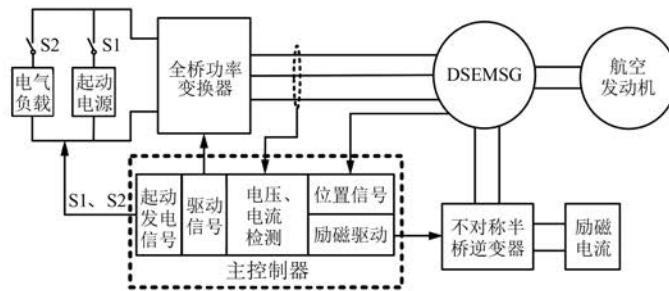


图1 DSEM SG系统

12/8极DSEM结构如图2所示。该电机定、转子均为凸极结构,转子绕组上无永磁体及绕组,适合高温、高速运行,定子槽中嵌有集中式的电枢绕组及励磁绕组,其简单的结构保证了DSEM在



图2 12/8极DSEM结构图

恶劣工况下运行时的可靠性,且各相绕组电磁隔离,容错性能好^[14-15]。

2 电励磁双凸极无刷直流SG系统控制关键技术

2.1 高可靠性控制技术

因为应用领域的特殊性,SG系统失效会严重威胁飞机的安全运行,所以可靠性是航空SG系统的最重要指标^[7,16-17]。在DSEM SG系统中,SG本体可靠性高,功率变换器中的电力电子器件、机械式转子位置传感器是系统可靠性薄弱环节,因

此本文主要介绍应对这 2 类故障的高可靠性控制技术。

2.1.1 功率变换器容错控制

针对功率器件故障,有学者对 DSEM 容错型功率变换器拓扑及其控制策略进行了研究^[18-20]。针对三相全桥变换器开路故障,文献[18]提出通过直流母线分立电容与两相正常桥臂功率管重构获得容错型变换器拓扑,如图 3 所示。文献[19]针对功率管开路故障提出一种无需增加额外硬件的容错运行控制策略。尽管上述方法实现了 DSEM SG 容错控制,但系统均处于降额运行状态。多相电机技术是减小系统容错运行降额的有效途径,文献[20]通过增加 2 个双向开关构成一种容错型四相 DSEM 驱动拓扑,获得了与正常运行几乎相同的平均转矩,但转矩波动有所增加。

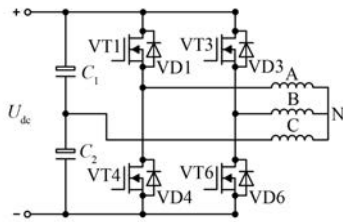


图 3 A 相故障下重构变换器拓扑

除主功率变换器外,DSEM SG 系统中还包含有励磁功率变换器,针对其发生故障引起的失磁,文献[21]提出采用四桥臂主功率变换器,并提出了一种新型六拍容错控制策略,实现了 DSEM SG 系统失磁故障下的容错发电运行。

2.1.2 无位置传感器控制

作为 SG,DSEM 起动运行阶段电动运行需要根据转子位置信息进行换相控制,机械式位置传感器在航空高温、振动、强电磁干扰的极端工况中易发生故障,使系统可靠性降低^[22]。无位置传感器控制技术可为机械位置传感器提供冗余容错能力,提高系统可靠性,一直是电机控制领域的研究热点之一^[23]。

近年来,许多学者对 DSEM 无位置传感器控制技术展开了研究^[24-30]。根据适用转速范围,DSEM 无位置传感器控制技术可分为零速、低速、中高速 3 类。图 4 为 DSEM 绕组电感随转子位置变化,注入检测脉冲辨识电机电感参数信息是零速、低转速域进行转子位置估计的有效途径。

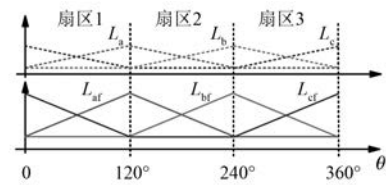


图 4 DSEM 电感随转子位置变化曲线

文献[24-25]提出在电枢绕组上注入检测脉冲,通过检测响应电流或端电压响应进行转子位置估计,但相绕组上注入检测脉冲阶段电机出力减小。为了降低上述影响,文献[26]提出一种仅需要注入一个检测脉冲的 DSEM 转子位置估计方法,增大了 DSEM 低速无位置起动转矩,改善了系统低速起动性能。进一步地,针对转子初始位置估计(零速),文献[27]提出一种基于励磁建压过程的电枢绕组感应电压测量的转子位置估计方法,无需额外注入检测脉冲。在中高转速域,基于反电动势、磁链观测是最为常用的转子位置估计策略^[28-30]。

由于 DSEM 反电动势过零点与转子位置无明确对应关系,文献[28]提出通过对端电压进行旋转坐标变换,检测其过零点实现转子位置估计。基于 DSEM 反电动势随励磁电流及转子位置变化特性,文献[29]通过设定换相阈值进行换相点检测,并进一步实现了无位置传感器运行模式下的提前角度换相以增加电机出力。文献[30]提出一种基于电机线磁链差的转子位置估计策略,能够同时适用于三相三状态、三相六状态导通策略。

2.2 高效率、高功率密度控制

作为 SG,与其他类型电机相比 DSEM 在功率密度及效率方面并无优势。对于本体结构确定的 DSEM,可通过控制策略优化提高系统效率及功率密度,其对拓展 DSEM 系统的进一步应用具有重要意义。

2.2.1 基于损耗的效率提升控制方法

降低电机损耗是提升效率的直接途径。文献[31-32]建立了 DSEM 损耗计算模型,并在不同转速、负载工况下进行了验证,为降低损耗的控制策略研究奠定了基础。文献[33]提出了一种基于损耗计算的电机效率在线优化控制方法。DSEM 系统中常将励磁电流控在其设计额定值,通过调节电枢电流实现转矩控制。由于特殊的本

体结构,额定励磁电流给 DSEM 系统带来较大损耗,在未达到额定负载工况尤为明显。不同工况的 DSEM 损耗有限元计算结果如图 5 所示。鉴于此,文献[34]提出一种电枢电流额定、基于励磁电流调节的新型 DSEM 控制策略,减小了电机损耗,提高了效率,且一定程度上降低了齿槽转矩脉动。

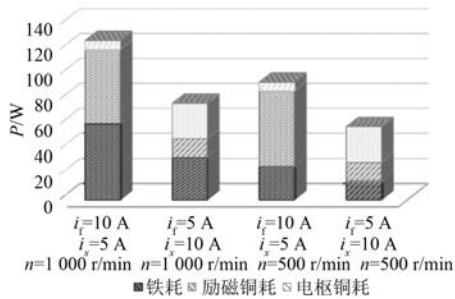


图 5 不同工况的 DSEM 损耗有限元计算结果

2.2.2 可控整流发电控制技术

作为 SG, DSEM 可采用不控整流发电向负载供电,通过改变励磁电流调节输出电压,控制简单、可靠性高^[35]。但仅采用不控整流发电存在以下问题:(1)在 SG 宽转速范围保持恒定电压输出导致励磁机构设计困难;(2)低速阶段励磁电流过大将引起较大损耗;(3)负载较大时,各相绕组电流上升时间长,绕组利用率低,影响系统效率及功率密度。

针对上述问题,有学者对 DSEM 可控整流发电技术展开了研究。文献[36-37]采用半控整流发电拓扑,通过提高电枢电流上升率扩大电机 ψ - i 曲线包络面积,增大了 DSEM 发电输出功率,一定程度上提升了系统功率密度,但其采用的变换器拓扑难以适用于起动运行阶段,如图 6 所示。针对全桥变换器驱动的 DSEM 发电系统,文献[38-40]采用角度位置控制、电压脉宽调制(PWM)控制降低电机损耗(绕组铜耗、铁耗)及转矩脉动,并提出了一种基于最小瞬变点跟踪的改善系统动态性能控制方法。为了减小整流输出电压脉动,文献[41]采用 H 桥功率变换器,提出了一种适用

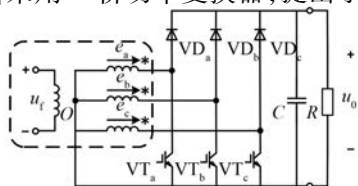


图 6 半控整流发电拓扑

于宽转速范围的角度位置半控 DSEM 发电控制策略。

2.3 转矩脉动抑制策略

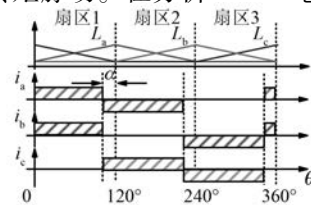
DSEM 单相输出转矩表达式为

$$T_p = T_{pr} + T_{pf} = \frac{1}{2} i_p^2 \frac{dL_p}{d\theta} + i_p i_f \frac{dL_{pf}}{d\theta} \quad (1)$$

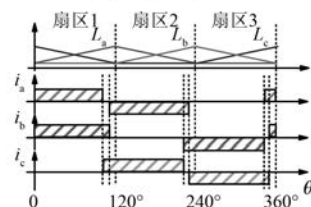
式中: T_{pf} 为励磁转矩,是主要输出; T_{pr} 为磁阻转矩。

起动阶段, DSEM 电动运行时的电流换相过程造成输出转矩跌落,是转矩脉动产生的主要来源,影响 DSEM 出力及效率。针对该问题,文献[42-47]对 DSEM 转矩脉动抑制方法进行了研究。

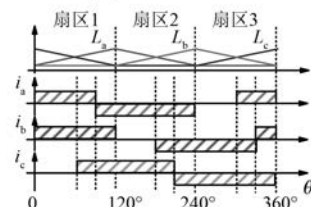
优化换相过程是目前最为有效的转矩脉动抑制策略,主要优化方法包括提前角度换相、增加通电模态等。文献[43]分析了 DSEM 三状态提前角度换相对电机运行性能的影响,得到了高速运行时适当的提前角度换相可以有效提高电机输出转矩和功率的结论,其通电策略如图 7(a) 所示。在此基础上,文献[44]提出一种上下桥臂功率管均提前开通的 DSEM 三相六拍控制策略,如图 7(b) 所示。该方法从减小母线反向电流的角度来抑制电机转矩脉动。在分析 DSEM 电感周期变化



(a) 三相三状态



(b) 三相六状态



(c) 三相九状态

图 7 DSEM 提前角度换相控制策略

特性对转矩输出能力影响规律的基础上,文献[45]提出一种 DSEM 三相九状态控制方法,如图 7(c)所示。同时,分析得到了不同转速、转矩下提前角参数选取方法。

针对最优提前换相角度与电机参数、转速、负载等多个因素相关,实际系统难以准确计算的问题,文献[46]提出一种基于母线电流反馈的提前换相角自适应控制方法,无需预知电机参数及系统运行状态。文献[47]通过引入转子位置角闭环以实现电枢电流过零点与定转子对齐点同步,实现了最优换相。

2.4 集成化控制技术

集成化一直是现代航空的发展趋势和要求^[1,8]。实际上,SG 技术就实现了航空动力系统与电气系统的集成,使航空电源系统的体积质量得到了大幅缩减。

在航空 SG 系统中,集成化包括设备集成与控制集成。其中,设备集成将 SG 系统多个电力设备的各个环节或多个电力设备作为一个整体进行结构化设计,实现系统的集成化、小型化,提高系统的功率密度^[48]。例如,内装式 SG 需将电机本体、功率变换器、控制器等多个部件进行结构化集成设计,并将其集成于多电发动机高压轴上,简化了多电发动机机匣等结构附件,其苛刻的工作环境对电机本体及控制器的结构、耐高温、抗电磁干扰性能提出了高要求^[15]。

控制集成主要实现系统多种功能的复合,在电机系统常规功能基础上,通过传感、传输、分析、执行等步骤将系统的感知和执行合二为一,使得系统更加智能化、信息化^[6]。例如,航空 SG 系统中,需要对机械转子位置传感器运行状态进行监测,在其发生故障时切换至无位置传感器运行模式,即系统集成了位置传感器故障的冗余容错功能。实际上,控制集成常需与系统状态监测、信息处理、故障诊断等技术相融合^[49-51]。另外,实际系统还需将多个关键控制技术集成,但不同控制技术应用前后系统运行特性会发生改变,不同控制关键技术存在相互耦合影响,同时应用时需要综合考虑,已有学者对此展开研究,例如:文献[29]研究了 DSEM 无位置传感器运行模式下的提前角度换相控制;文献[52]实现了电机缺相故障容错运行时的无位置传感器运行。

3 结 语

DSEM 具有结构简单可靠、适合高温高速运行、容错性能好等优点,可构成一种具有竞争力的新型航空无刷直流 SG 系统。针对航空 SG 系统高可靠性、高效率、高功率密度、集成化的发展趋势和要求,本文对 DSEM SG 系统的高可靠性控制、高效率、高功率密度控制、集成化控制等关键技术的研究现状进行了归纳和分析,对未来的研究方向作如下展望:

(1) 目前研究的 DSEM SG 系统容错型功率变换器及其控制策略仅针对电动或发电单个运行模式,未来需要进一步研究适用于起动、发电 2 种模式的双向容错功率变换器及其控制策略。

(2) 现有研究的绝大多数 DSEM 无位置传感器控制策略针对电动运行模态,且转速适用范围窄,应用于宽转速域不同控制策略间的切换时可能会引发系统稳定性问题。未来需要研究宽转速、宽负载范围的 DSEM 无位置传感器控制方法,以及不同无位置传感器控制方法的平滑切换策略。另外,在 SG 系统中 DSEM 长时间运行于发电状态,DSEM 多种发电运行模式下的电机转子位置估计方法亟待研究突破。

(3) 由于 DSEM 本体结构的特殊性,额定励磁电流带来较大损耗(包括铜耗、铁耗),未来需要研究自适应转速、负载等工况条件的励磁电流与电枢电流协调控制的 DSEM 效率在线优化方法。

(4) 转矩脉动限制了 DSEM 进一步推广应用,换相过程优化是抑制转矩脉动的常用策略,但多个换相角度(导通模态增多)与电机参数、系统运行状态相关,难以直接准确计算获取。未来需要研究系统参数不敏感的最优提前换相角度智能化选取策略。

(5) 实际 SG 系统常需综合应用多种高性能控制技术,未来需研究不同控制策略应用前后的系统运行特性差异,以及不同控制策略间的相互耦合影响规律,获得兼顾多个性能指标的控制技术协调方法。另外,DSEM SG 控制集成化的发展还需与状态监测、信号处理、故障诊断等技术相融合,多功能复合是航空 DSEM SG 集成化的发展趋势。

【参考文献】

- [1] ROSERO J A, ORTEGA J A, ALDABAS E, et al. Moving towards a more electric aircraft [J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2007, 22 (3): 3.
- [2] 陈晓雷. 多电飞机机电作动伺服系统控制策略研究 [D]. 西安:西北工业大学, 2016.
- [3] 严仰光, 秦海鸿, 龚春英, 等. 多电飞机与电力电子 [J]. 南京航空航天大学学报, 2014, 46(1): 11.
- [4] JIAO N, LIU W, ZHANG Z, et al. Field current estimation for wound-rotor synchronous starter-generator with asynchronous brushless exciters [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017, 32 (4): 1554.
- [5] RADUN A V, FERREIRA C A, RICHTER E. Two-channel switched reluctance starter/generator results [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1998, 34(5): 1026.
- [6] 马伟明, 王东, 程思为, 等. 高性能电机系统的共性基础科学问题与技术发展前沿 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(8): 2025.
- [7] SARLIOGLU B, MORRIS C T. More electric aircraft: review, challenges, and opportunities for commercial transport aircraft [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2015, 1(1): 54.
- [8] ZHU L, JIANG D, QU R, et al. Design of power hardware-in-the-loop simulations for integrated starter-generator systems [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2019, 5(1): 80.
- [9] BALACHANDRAN A, BODEN M, SUN Z, et al. Design, construction, and testing of an aero-engine starter-generator for the more-electric aircraft [J]. The Journal of Engineering, 2019, 2019(17): 3474.
- [10] 康旭. 基于 270 V 的永磁同步电机控制器设计 [D]. 杭州:浙江大学, 2018.
- [11] SARLIOGLU B, ZHAO Y, LIPO T A. A novel doubly salient single phase permanent magnet generator [C] // Proceedings of 1994 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 1994.
- [12] LIU X, ZHU Z Q. Comparative study of novel variable flux reluctance machines with doubly fed doubly salient machines [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2013, 49(7): 3838.
- [13] KONG X, CHENG M, SHU Y. Extreme learning machine based phase angle control for stator-doubly-fed doubly salient motor for electric vehicles [C] // 2008 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 2008.
- [14] 魏佳丹. 电励磁双凸极起动/发电机系统特性研究 [D]. 南京:南京航空航天大学, 2009.
- [15] 于立, 张卓然, 张健, 等. 多电发动机内装式高速起动发电机研究与实践 [J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(14): 4615.
- [16] NOWINSKI A, FOSNESS E R, GUERRERO J, et al. Development of a low-cost, modular, reliable, shuttle-launched payload booster [C] // IEEE Aerospace Conference, 2002.
- [17] 卢二宝, 闫丽媛, 于志远, 等. 航空航天机电伺服系统可靠性设计综述 [J]. 导航定位与授时, 2016, 3 (4): 53.
- [18] WEI J, ZHOU B. Fault tolerant strategies under open phase fault for doubly salient electro-magnet motor drives [C] // 2007 International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2007.
- [19] ZHANG J, ZHANG Z, WANG Y, et al. Fault-tolerant control without extra hardware for doubly salient brushless DC motor drive under open-circuit faults [C] // IECON 2016-42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2016.
- [20] HU D, ZHOU B, GAN Z, et al. Research of fault-tolerant strategy for power converter of four-phase DSEM drive [C] // 2016 19th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2016.
- [21] 温腾翔, 周波, 周兴伟, 等. 电励磁双凸极发电机励磁故障容错控制策略 [J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(10): 3047.
- [22] 王骋, 邓智泉, 蔡骏, 等. 电机转子位置传感器的评述与发展趋势 [J]. 微特电机, 2014, 42(3): 64.
- [23] XU D, WANG B, ZHANG G, et al. A review of sensorless control methods for AC motor drives [J]. CES Transactions on Electrical Machines and Systems, 2018, 2(1): 104.
- [24] ZHOU X, ZHOU B, WANG K, et al. Two-step rotor position estimation method for doubly salient electromagnetic starter-generator over zero and low speeds range [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics (Early Access), 2020. doi: 10.1109/JESTPE.2020.2991112.
- [25] 赵耀, 王毅, 余晓明, 等. 电励磁双凸极电机初始位置检测技术研究 [J]. 上海电力学院学报, 2018, 34

- (6): 586.
- [26] ZHOU X, ZHOU B, WEI J. A novel position-sensorless startup method for DSEM [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(6): 6101.
- [27] ZHOU X, ZHOU B, YU J, et al. Research on initial rotor position estimation and anti-reverse startup methods for DSEM [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(4): 3297.
- [28] ZHAO Y, WANG H, XIAO L, et al. Sensorless control of doubly salient electromagnetic machine based on coordinate transformation [C] // IECON 2014 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2014.
- [29] ZHOU X, ZHOU B, GUO H, et al. Research on sensorless and advanced angle control strategies for doubly salient electro-magnetic motor [J]. IET Electric Power Applications, 2016, 10(5): 375.
- [30] LIU W, WANG H, WANG Y, et al. Sensorless control strategy for doubly salient electro-magnetic machine based on the line-to-line excitation flux linkage [J]. IET Electric Power Applications, 2019, 13(12): 1911.
- [31] JIA W, XIAO L, WU H, et al. An improved core-loss calculation method for doubly salient electromagnetic motor [C] // 2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2017.
- [32] ZHANG Z, YU L, SUN L, et al. Iron loss analysis of doubly salient brushless DC generators [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(4): 2156.
- [33] 束亚刚, 程明, 孔祥新. 基于损耗模型的定子双馈电双凸极电机在线效率优化实验研究 [J]. 微电机, 2009, 42(3): 1.
- [34] ZHOU X, ZHANG L, WU F. Operating performance enhancing method for doubly salient electromagnetic machine under light load condition [J]. IEEE Access, 2020, 8: 112057.
- [35] ZHAO Y, WANG H, LI D, et al. Comparative research of a wound-field doubly salient generator with different rectifiers [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(11): 4851.
- [36] 陈冉, 陈志辉, 毛志鑫, 等. 一种用于电励磁双凸极发电机的新型半控整流拓扑研究 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(36): 117.
- [37] 毛志鑫. 电励磁双凸极电机半控整流发电方式的研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
- [38] XU Y, ZHANG Z, BIAN Z, et al. Copper loss optimization based on bidirectional converter for doubly salient brushless starter/generator system [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics (Early Access), 2020. doi: 10.1109/TIE.2020.2988239.
- [39] XU Y, ZHANG Z, BIAN Z, et al. Advanced angle control for active rectifier in doubly salient electromagnetic generator system [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics (Early Access), 2020. doi: 10.1109/TIE.2020.2992953.
- [40] XU Y, ZHANG Z, BIAN Z, et al. Dynamic performance improvement of doubly salient brushless DC generator system with controlled rectifier [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(10): 8209.
- [41] WANG K, ZHOU B, ZHOU X, et al. The output voltage control strategy for DSEG with controlled rectification based on conduction angle estimation [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(5): 3350.
- [42] ZHU X, CHENG M, ZHAO W, et al. Advanced angle control schemes for stator hybrid excited doubly salient motor drive [C] // 2006 CES/IEEE 5th International Power Electronics and Motion Control Conference, 2006.
- [43] 戴卫力, 王慧贞, 严仰光. 电励磁双凸极电机的提前角度控制 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(27): 88.
- [44] 刘星, 陈志辉, 朱杰, 等. 电励磁双凸极电动机三相六拍控制策略研究 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(12): 138.
- [45] WANG Y, ZHANG Z, LIANG R, et al. Torque density improvement of doubly salient electromagnetic machine with asymmetric current control [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(12): 7434.
- [46] ZHOU X, ZHOU B, YANG L. Self-optimizing control of advanced commutation angle for doubly salient electromagnetic machine [C] // IECON 2017 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2017.
- [47] BIAN Z, ZHANG Z, YU L. Synchronous commutation control of doubly salient motor drive with adaptive angle optimization [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(6): 6070.

(下转第 19 页)