

海上风浪结合发电系统用两自由度发电机研究综述及展望

聂瑞, 司纪凯, 张国振, 程志平, 李忠文

(郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要:近年来,多能互补利用成为能源开发的一种新趋势。海上风能和波浪能具有无污染、能量形式集中等诸多优点,一种基于两自由度直线旋转发电机的新型风浪结合发电系统应运而生。对海上风能和波浪能发电系统的研究现状进行综述,对比独立开发海上风能和波浪能的发电系统、传统风浪结合发电系统及新型海上风浪结合发电系统各自的优缺点;对作为新型海上风浪结合发电系统核心能量转换装置的两自由度直线旋转发电机的研究现状进行总结,并通过有限元方法初步验证了两自由度发电机用于新型海上风浪结合发电系统中的可行性,随后探讨该类发电机的研究热点及难点。最后,对海上风浪结合发电系统用两自由度发电机未来主要的研究方向进行了展望。

关键词:海上风力发电;波浪能发电;风浪结合发电系统;两自由度发电机;风浪互补发电协调控制策略

中图分类号:TM 34

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202205002

0 引言

在全球能源日益短缺的今天,能源问题作为一个世界性问题正在制约着世界各国的快速发展。许多敏锐的发达国家很早便开始大力倡导可再生能源的开发利用,以应对愈演愈烈的能源危机及环境危机^[1]。我国是世界上最大的能源生产国和消费国,面临着能源需求量巨大、能源供给制约多、能源生产和消费严重危害生态环境等严峻挑战。2020年9月,我国明确提出“双碳”目标,勇敢承担推进能源绿色低碳转型的重任。在全球能源革命的推动下,发展以可再生能源为基础的能源技术创新能够增强我国能源自主保障能力,这对应能源供需格局新变化、国际能源发展新趋势、保障国家能源安全具有重要意义^[2]。

在众多可再生能源中,太阳能和陆上风能的开发利用已经逐渐产业化及规模化,但是这2种能源发展受地域限制严重;核能发电在占地规模及能源供应可靠性方面有着明显优势,但是大量的放射性物质潜在威胁着人类及生态的安全;相较之下,海上风能和波浪能具有无污染、储量大、分布广泛、能量密度高、能量形式集中等诸多优点,因此近年来海上风能和波浪能引起了广泛关注,成为了世界能源专

家所探寻的理想新能源^[3-6]。为了引导和推进海上风能、波浪能等海洋可再生能源的技术产业发展,美国、英国、加拿大等国家积极推行相应的海洋可再生能源激励政策^[7]。我国国务院办公厅在2014年印发的《能源发展战略行动计划(2014—2020年)》中提出我国能源发展以“节约、清洁、安全”为战略方针,并明确以“降低传统能源消费比重,大力发展可再生能源”为国家能源发展的五大战略任务之一。在该行动计划期间,我国海洋局相继印发了《海洋可再生能源发展纲要(2013—2016年)》《海洋可再生能源发展“十三五”规划》,除此之外我国还提出了海洋强国、生态文明建设等国家战略和“一带一路”倡议。我国能源技术革命日新月异,这些紧盯国际能源科技创新和产业变革前沿所制定的激励政策,为包含海上风能和波浪能在内的海洋可再生能源发展带来了前所未有的历史机遇^[6]。

现有的海上风能与波浪能发电系统可分为独立开发系统和综合开发系统2类。本文对现有的海上风能与波浪能发电系统进行综述,并针对一种基于两自由度直线旋转发电机LRG(Linear-Rotary Generator)的新型海上风浪结合发电WWCEC(Wind-Wave Combined Energy Conversion)系统进行重点探讨。对作为新型海上WWCEC系统核心能量转换装置的两自由度LRG的研究现状进行总结,并对该系统的可行性进行了初步验证,随后探讨了该类发电机的研究热点及难点。最后,对海上WWCEC系统用两自由度发电机未来主要的研究方向进行了展望。

1 海上风能和波浪能发电系统研究现状

1.1 独立开发海上风能和波浪能的发电系统

从海上风能和波浪能发电引起关注开始,独立

收稿日期:2021-09-12;修回日期:2022-03-04

在线出版日期:2022-03-10

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52207067, 51777060, 52277069);中国博士后科学基金面上项目(2020M682342);郑州市协同创新重大专项(20XTZX12023)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(52207067, 51777060, 52277069), China Postdoctoral Science Foundation(2020M682342) and the Major Special Project for Collaborative Innovation in Zhengzhou(20XTZX12023)

开发2种能量的发电系统不断涌现。

1)海上风能发电。海上风电是在陆地风电的基础上针对海上风环境进行适应性“海洋化”发展起来的^[8-9]。海上风力发电的机理仍是通过风机叶片收集海上风能,通过齿轮箱等装置提升风轮的转速,实现发电机的有效发电。除此之外,近年来为了提高风电机组的可靠性和效率,去除齿轮箱的直驱风力发电系统也成为研究的热点方案。随着海上风电技术的发展,其将成为各国沿海地区重要的能量来源。

2)海上波浪能发电。为了利用蕴藏丰富的波浪能资源,国内外相继开发了许多波浪能转换装置。美国利用一种海浪发电浮标装置为欧胡岛军事基地输送电能,当海水波动时浮漂通过海底电缆及齿轮带动发电机转动,实现有效发电;丹麦 Wave Star 公司利用多个漂浮模块研发了一种海浪发电装置,漂浮模块通过传动装置与发电机结合,在海浪起伏过程中,浮漂模块通过传动装置带动发电机运转从而产生电能;澳大利亚的 Wave Swell Energy 公司开发了采用柱状结构的海浪发电系统,利用海浪涌入、涌出造成的腔体空气流动驱动涡轮发电机进行发电;我国2013年自主研发了“万山号”鹰式海浪发电平台^[10],该平台上安装了多个波浪能吸收体,它们共享能量转换系统和锚泊系统,该平台利用具有储能环节的液压转换装置,实现了波浪能-液压能-电能的转换。此外,近年来基于直线发电机实现的振荡浮子式波浪能发电系统也因其具有更高的能量转换效率而引起了广泛关注^[11]。

经过科研工作者的不懈努力,独立的海上风能或波浪能发电系统取得了阶段性的研究进展。但是这2种发电系统均需要构建各自的海上平台、机械能转换装置,并配备相应的发电机及控制器,造成了海域面积紧缺、开发成本高等问题。除此之外,风能和波浪能的波动性、间歇性和不连续性还使得单独的风电系统/波浪能发电系统难以持续稳定地输出电能。因此,为了实现海洋可再生能源的高效利用,对多种海洋能源进行综合开发势在必行。

1.2 传统的海上 WWCEC 系统

近年来将海上风能和波浪能进行综合利用的海上 WWCEC 系统引起了广泛关注^[12-14]。在这种系统中,风能和波浪能转换装置共用系泊系统、电力基础设备及海域,其相较于独立的风电系统/波浪能发电系统具有单位海域能量产出高、成本低、不工作小时数少等优势^[13],成为了新能源发电领域的研究热点之一。传统的 WWCEC 系统可以分为平台共用式^[15-17]与机械耦合式^[18] WWCEC 系统2类。

1)平台共用式 WWCEC 系统。较为典型的平台共用式 WWCEC 系统包括挪威远洋能源公司开发的三角形单浮体双风机平台 W2Power^[15]和苏格兰绿色

海洋能源公司研制的 Wave Treader,该类 WWCEC 系统的示意图如附录 A 图 A1 所示。文献[16]提出了一种平台共用式 WWCEC 系统,其中水平轴风机收集风能带动旋转发电机进行发电,而波浪能通过半球形浮子收集,随后液压马达将液压油的压力能转换为旋转机械能,带动另一台旋转发电机发电。文献[17]介绍了一种波浪发电部分较为特殊的平台共用式 WWCEC 系统,系统中风能的收集及转换仍为常规选择,而波浪能经由直驱波浪能发电机直接转换。整体可见在这种系统中,风能与波浪能共享平台、设备及海域,但是风力发电装置与波浪能发电装置仍是2个独立的体系,需要多台发电机同时工作,且仍需多个控制器,因此系统体积依然庞大。

2)机械耦合式 WWCEC 系统。这种系统可以通过机械装置实现风能与波浪能的耦合,然后利用同一台发电机将收集的耦合动能同时转换,系统集成度高、体积小。文献[18]提出了一种机械耦合式 WWCEC 系统,其通过收缩波道收集波浪能,通过风机叶片收集风能,齿轮传动系统借助波浪轴锥棘轮和风轴锥棘轮实现机械能向电能的转换,其风轴锥棘轮与波浪锥棘轮同时与输出锥齿轮相啮合,这使得收集的风能与波浪能得以耦合,然后驱动同一发电机进行发电。这类 WWCEC 系统减少了整个系统中的发电机数量,降低了开发成本,但是需要过多的机械设备,存在多级能量转换过程,因而普遍具有效率低、可靠性低、稳定性差、维护成本高等问题。

由此可以看出,传统的2类 WWCEC 系统分别具有多电机和多传动装置的缺点,这些缺点制约着 WWCEC 系统的大规模应用。

1.3 新型海上 WWCEC 系统

为解决传统 WWCEC 系统中多电机、多传动装置制约系统效率、增加系统体积和成本的问题,学者们创造性地提出了一种基于两自由度 LRG 的新型直驱 WWCEC 系统^[17,19-20]。这种系统可以实现同时利用风能与波浪能的直驱式一体化发电,能够可观地降低系统的成本及体积,提高系统运行的稳定性。文献[17,19-20]对基于 LRG 的 WWCEC 系统展开研究,该类 WWCEC 系统的示意图如附录 A 图 A2 所示。这种系统一般包括垂直轴风机、LRG、浮子、悬浮平台或桩基。垂直轴风机安装在塔筒之上,而 LRG 安装在塔筒的底部,轴与风机相连随风旋转,同时也连接在浮子之上随着海浪上下运动,因此 LRG 的动子可以相对于定子进行旋转、直线或螺旋运动,使得 LRG 产生感应电动势,从而实现有效发电。这种 WWCEC 系统将单独的旋转发电系统与单独的直线发电系统集成在一个单元中,节省了许多能量转换装置,因此其成本及效率相较于传统理念中的 WWCEC 系统更低。通过总结上述内容,表1对比了不同海上风浪发电系统的结构特点、控制方式特点及

表 1 不同海上风浪发电系统性能比较

Table 1 Comparison of performance among different offshore wind-wave energy conversion systems

海上发电系统	系统结构特点	控制方式特点	优点	独特优点	缺点
系统 1 (独立的风电系统 / 波浪能发电系统)	①各自系统相互独立; ②一套系统需要至少一台发电机	①多套装置需要多个控制器; ②控制策略为传统的发电机控制策略,如矢量控制策略、直接功率控制策略等; ③难以实现彼此间互补发电	系统独立性良好		①占据过多海域; ②单位海域产出低; ③输出电能连续性、稳定性差
系统 2 (平台共用式 WWCEC 系统)	①需要多台发电机完成能量转换; ②风能转换装置与波浪能转换装置完全解耦	①多套装置需要多个控制器; ②控制策略为传统的发电机控制策略; ③可以比较方便地增加互补发电的硬件环境		系统可靠性高	①系统成本高; ②系统体积庞大
系统 3 (机械耦合式 WWCEC 系统)	①风能转换装置与波浪能转换装置共用一台发电机进行发电; ②收集的风能和波浪能通过机械装置实现耦合	①仅需一个控制器; ②控制策略为传统的发电机控制策略; ③无法通过控制进一步调节风浪互补效果	① 2 种能量转换装置共用系泊系统、电力基础设施、海域面积等,系统体积及成本更低; ② 风能 与 波浪 能 可 互补,系统整体发电特性更加平稳	系统体积小	系统中机械转换装置多,多级能量转换过程复杂,整体效率低
系统 4 (基于 LRG 的 WWCEC 系统)	①收集的风能与波浪能直接驱动 LRG 的动子; ②系统通过 LRG 实现风能 与 波浪 能 的 同 时 转 换	①仅需一个控制器; ②控制策略需在传统的发电机控制策略上进行改进,控制相对复杂; ③可以制定风浪互补发电控制策略		①系统体积小、成本低; ②为直驱系统,系统整体效率高	为保证系统可靠性,对 LRG 的结构及性能要求较高

优缺点,表 2 对比了不同海上风浪发电系统的平台设计复杂度、电机结构设计复杂度及电机控制复杂度。

表 2 不同海上风浪发电系统设计复杂度比较

Table 2 Comparison of design complexity among different offshore wind-wave energy conversion systems

指标	比较结果
平台设计复杂度	系统 3 最大
电机结构设计复杂度	系统 4 最大
电机控制复杂度	系统 4>系统 2>系统 1>系统 3

综上,LRG 是新型 WWCEC 系统的核心能量转换装置。得益于 LRG 的运用,新型直驱 WWCEC 系统既不需要多台发电机同时工作,又避免了过多的机械传动装置,能可观地降低系统的成本及体积,提高系统效率及运行稳定性;但是另一方面,LRG 的电机结构设计及控制复杂度都比传统的旋转 / 直线发电机更高。可见,要想实现新型 WWCEC 系统的大规模应用,对 LRG 进行深入研究至关重要。

2 两自由度 LRG 研究现状

两自由度直线旋转电机 LRM (Linear-Rotary Machine) 的概念已经被提出了近 70 a 的时间,随着电机理论的不完善以及机械制造水平的不断提高,该类电机作为电动机在智能加工制造、机器人、国防科技等领域的优势逐渐显现,从而引起了国内外众多学者的广泛关注^[21]。现有研究表明,与两自由度直线旋转电动机相比,有关两自由度电机作为发电机(LRG)的研究仍处于起步阶段,主要集中在新型拓扑结构研究、电磁特性研究、优化设计方法研

究、系统建模研究以及控制策略研究 5 个方面。

2.1 两自由度 LRG 拓扑结构研究现状

在国外,克卢日·纳波卡技术大学的 Szabó L 教授对基于 LRG 的 WWCEC 系统进行了分析^[17],提出现有的大多数 LRM 都可以作为发电机进行工作,并对感应 LRM、永磁 LRM 以及变磁阻 LRM 这 3 类常见的 LRM 进行了归纳综述,其中永磁 LRM 以高效率、高功率密度的特点成为了 WWCEC 应用场合的有力竞争者,但是海上平台的强震环境、散热条件使得永磁体面临着退磁的风险,恶劣的海上环境是永磁 LRG 在 WWCEC 系统成功应用前必须面对的严峻挑战。

在国内,东南大学的付兴贺教授提出了一种应用于 WWCEC 系统的内外并联式两自由度永磁同步 LRG^[19],如附录 A 图 A3 所示。这种内外并联式两自由度永磁同步 LRG 为外转子、定子、内动子结构,永磁体分别表贴在外转子和内动子上。外转子及中间定子外侧构成旋转发电机单元用于风能-电能转换,中间定子内侧及内动子构成直线发电机单元用于波浪能-电能转换,两部分单元的绕组分别嵌放在中间定子内侧及外侧的开槽中。江苏大学的徐磊学者也提出了一种应用于 WWCEC 系统的内外并联式两自由度永磁同步 LRG^[20],如附录 A 图 A4 所示,其结构组成为外定子、动子和内定子。在风浪的外部动能输入下,内外表面贴有 N、S 磁极交替分布永磁体的动子进行螺旋运动,定子部分的绕组中感应出交变的磁链从而实现有效发电。文献[19]提出的永磁 LRG 为单定子、双动子结构,而文献[20]提出的永磁

LRG为双定子、单动子结构,可见这2种电机有相似的结构特点,即绕组缠绕在定子上,永磁体贴于运动体表面。结合文献[17]对永磁LRG用于WWCEC系统的总结,现有的永磁LRG都存在因强震退磁风险而可靠性不高的问题,因此其他适用于WWCEC系统的LRG新拓扑结构仍亟待提出。

2.2 两自由度LRG电磁特性研究现状

2.2.1 基于有限元的特性分析

电磁特性分析是LRG性能研究的重要部分。文献[19]利用有限元法分析了所提出的永磁LRG的三相反电势、端电压、气隙磁密及发电机的外特性曲线,研究表明所提出的永磁LRG的旋转单元和直线单元的效率分别为90%和87.1%,而且外转子和内动子的转速/速度变化对效率的大小几乎没有影响。文献[19]还对比了所提出的永磁LRG与单一风力发电机和单一波浪能发电机的功率密度,结果表明基于两自由度电机结构紧凑的优势,所提出的LRG的功率密度要明显高于单一自由度的发电机,该结果证明了LRG用于WWCEC系统中的优势。文献[22]针对附录A图A4所示的永磁LRG的端部效应进行分析,端部效应对该LRG的磁密、磁链、电感、电磁力/电磁转矩、齿槽转矩/定位力以及输出功率的影响通过三维有限元分析获得,其仿真结果的有效性通过实验得到了验证。除此之外,文献[22]的研究结果还表明内定子的存在不仅仅会影响电机旋转单元的性能,还会影响直线单元的性能,这种2个运动单元之间相互影响的特性也就是两自由度电机所具有的特殊的耦合关系,往往被称为耦合效应。文献[20]针对附录A图A4所示的LRG的耦合效应进行进一步研究,有限元结果表明该LRG内外运动部分的正交耦合磁场及耦合运动会影响发电机功率捕获效率降低及动态性能恶化,这意味着耦合效应对LRG性能的影响明显。因此,对耦合效应进行研究也是LRG电磁特性研究中的一个重点。

2.2.2 耦合效应分析

耦合效应是由LRG不同于单自由度发电机的一个重要结构特点造成的:LRG可以在直线和旋转2种运动下都实现发电,其本体结构上通常有共用的铁芯或空间结构,造成了2个自由度之间必然相互影响。复杂的耦合关系影响着2个自由度各自的电磁特性及运动特性,如何定量或定性分析这些耦合关系对发电机性能的影响,以及如何利用或是消除这些影响,是促进LRG进一步发展和应用过程中必须要解决的科学问题。通过总结国内外研究现状可以发现,有关LRG耦合效应研究的文献还比较少,但是LRM作为电动机运行时有关耦合效应的研究已经取得阶段性成果,它们可以作为LRG耦合效应研究时的重要借鉴,下面对LRM耦合效应研究现

状进行总结。

波兰圣十字工业大学Mendrela E学者提出一种双绕组、单电枢结构的两自由度感应LRM^[23-24],该电机的2套绕组垂直分布,该结构特点造成了2套绕组之间耦合效应严重,特性难以分析。文献[23]和文献[24]针对所提出的双电枢两自由度感应LRM的耦合效应展开研究,基于电压源供电下时域暂态分析以及滑差技术,提出了一种新算法来完成这种感应LRM耦合效应的三维有限元分析,分析结果表明由于直线运动部分端部效应的存在,旋转运动部分的性能受直线运动的影响,当直线部分的线速度越大时,这种耦合效应越明显,旋转部分的转速下降越多。

东南大学林明耀老师团队对文献[19]中提及的双定子两自由度永磁LRM的正交磁场进行研究^[25],提出了用于量化直线运动部分和旋转运动部分耦合关系的耦合系数,它们与动子铁芯合成相对磁导率成正比。耦合系数越大时,各自的转矩和电磁力损失越小,这表明2个自由度之间的耦合较弱。仿真结果表明正交磁场中的耦合效应随着励磁电流的大小而变化,当设置了合适的正交磁通时,合成相对磁导率会达到理论最大值,磁场中的耦合效应也会被削弱。

郑州大学的司纪凯教授提出了对半并联式两自由度感应LRM^[26-29]如附录A图A5所示,定子由两部分弧形定子组成,一个弧形定子为旋转感应电机定子,用于产生旋转磁场,一个弧形定子为直线感应电机定子,用于产生行波磁场,动子为镀铜的实心铁芯结构。文献[26]对其所提出的对半并联式两自由度感应LRM进行运动特性分析,其实验测试结果如附录A图A6所示,当旋转单元电枢通电时,直线单元的绕组中会产生如附录A图A6(a)所示的感应电压,不同线圈中产生的感应电压随转差率变化规律如附录A图A6(b)所示。可见实验结果与有限元计算结果基本一致,这证明了旋转单元中的电枢反应会通过磁场影响直线单元的电磁及运动特性。该研究得到了与文献[20]一致的结论,即螺旋运动中运动耦合效应确实存在。文献[26]还引入了阻转矩和阻力的概念来表征耦合效应所带来的影响,其正确性通过三维有限元方法得到了验证^[26,28]。除此之外,该研究团队还完成了对半并联式两自由度感应LRM静态磁耦合效应的分析^[27]以及动态磁耦合效应的分析^[29],研究结果表明这种电机2个自由度之间磁耦合效应的存在使得一个自由度绕组通电时,另一个自由度的绕组会产生感应电压和感应电流,从而导致在电机螺旋运动下损失速度以及加剧振动,这种特性随着通电频率和旋转运动部分转速的增加更加明显,实验结果验证了分析结果和仿真结

果的正确性,这也说明耦合效应会影响两自由度电机的高精度控制。

2.3 两自由度 LRG 优化设计研究现状

2.3.1 初始尺寸设计

在 LRG 优化设计研究方面,文献[19]给出了永磁 LRG 初始尺寸的确定过程如附录 A 图 A3 所示,旋转发电机单元以及直线发电机单元的关键尺寸公式依据传统的设计理论给出,旋转单元的主要尺寸为:

$$\begin{cases} D_1 l = C_1 \frac{P_{N1}}{n_N \cos \varphi_{N1}} \\ C_1 = \frac{6.1 k_{E1}}{\alpha'_{p1} k_{NM1} k_{dp1} A_1 B_{\delta 1}} \end{cases} \quad (1)$$

式中: D_1 为定子外径; l 为定子的轴向长度; P_{N1} 为旋转单元的额定功率; $\cos \varphi_{N1}$ 为旋转单元的额定功率因数; n_N 为旋转单元的额定转速; k_{E1} 为旋转单元气隙电势计算系数; α'_{p1} 为旋转单元计算极弧系数; k_{NM1} 为旋转单元气隙磁场的波形系数; k_{dp1} 为旋转单元的绕组系数; A_1 为旋转单元的线负荷; $B_{\delta 1}$ 为旋转单元气隙磁通密度的最大值。

直线单元的主要尺寸表达式为:

$$\begin{cases} D_2 l = C_2 \frac{P_{N2}}{v_N \cos \varphi_{N2}} \\ C_2 = \frac{6.1 \pi k_{E2}}{60 \alpha'_{p2} k_{NM2} k_{dp2} A_2 B_{\delta 2}} \end{cases} \quad (2)$$

式中: D_2 为定子内径; P_{N2} 为直线单元的额定功率; $\cos \varphi_{N2}$ 为直线单元的额定功率因数; v_N 为直线单元的额定速度; k_{E2} 为直线单元气隙电势计算系数; α'_{p2} 为直线单元计算极弧系数; k_{NM2} 为直线单元气隙磁场波形系数; k_{dp2} 为直线单元的绕组系数; A_2 为直线单元的线负荷; $B_{\delta 2}$ 为直线单元气隙磁通密度的最大值。

旋转单元与直线单元尺寸之间的相互关系表达式如下:

$$\frac{D_2}{D_3} = k_1, \quad \frac{D_3}{D_1} = k_2 \quad (3)$$

式中: D_3 为一个虚拟边界的直径。

该永磁 LRG 的关键尺寸可以通过式(4)获得。

$$\begin{cases} D_1 = \sqrt{\frac{C_1 P_{N1}}{n_N l \cos \varphi_{N1}}} \\ D_2 = \frac{C_2 P_{N2}}{v_N l \cos \varphi_{N2}} \\ l = \frac{(C_2 P_{N2})^2 n_N \cos \varphi_{N1}}{(k_1 k_2 v_N \cos \varphi_{N2})^2 C_1 P_{N1}} \end{cases} \quad (4)$$

文献[19]仅对所提电机的初始尺寸进行设计,并没有给出具体优化过程。由现有研究可见,由于两自由度 LRG 拓扑结构都比较复杂,其优化设计过

程中所涉及的结构参数较多,目前还没有形成统一的优化设计准则。除了最基础的初始尺寸设计之外,关于 LRG 的优化设计研究还集中在抑制其端部效应及耦合效应对电机性能的负面影响方面。

2.3.2 抑制端部效应及耦合效应负面影响的优化设计研究

文献[22]为了抑制端部效应对所提出的永磁 LRG 性能的负面影响,对比研究了动子内侧永磁体与内定子长度一致的 LRG(被命名为 SLIPMLRG)和动子内侧永磁体与动子轴向长度抑制的 LRG(被命名为 LLIPMLRG)的性能差异。研究结果表明 SLIPMLRG 具有较小的齿槽转矩,而 LLIPMLRG 具有更稳定的磁通分布。整体而言内定子的存在加剧了 2 种拓扑结构的转矩/电磁力波动,且相较之下,LLIPMLRG 所受端部效应的负面影响更小,因此文献[22]选择 LLIPMLRG 作为优化设计方案,且对外定子的端部宽度相对于定位力之间的敏感性进行了分析,选定了使得直线单元定位力最小的外定子端部宽度,最终进行了样机制造,完成了实验验证。

除了抑制端部效应的设计优化方法外,还有一些抑制 LRM / LRG 耦合效应负面影响的设计方法被提出。英国谢菲尔德大学 Turner A 教授提出一种用于汽车自动换挡器的级联式两自由度永磁 LRM^[30],如附录 A 图 A7 所示,1 台直线永磁电机和 1 台旋转永磁电机同轴级联,2 台电机共用同一个动子及运动轴,直线定子和旋转定子被定子隔磁盘隔开,因此其定子间几乎不存在磁耦合效应,但是当共用的动子做直线、旋转或螺旋运动时,两者之间的机械运动耦合使得电机 2 个自由度的运动性能受到影响,该方法对从抑制耦合效应的角度进行两自由度电机设计优化具有一定的指导意义。

除了利用隔磁盘削弱磁耦合效应的设计方法之外,德国开姆尼茨工业大学的学者提出了一种如附录 A 图 A8 所示的永磁体矩阵式交替排列的方式用以解耦两自由度永磁 LRM 的直线运动和旋转运动^[31],直线运动绕组和旋转运动绕组为 2 套单独励磁的三相绕组。

20 世纪 80 年代美国肯塔基大学 Cathey J 学者提出了一种如附录 A 图 A9 所示的绕组斜向缠绕在定子铁芯上的两自由度感应 LRM^[32],其通过螺旋形三相绕组通电在气隙中产生螺旋形的空间磁场,使得电机能够实现旋转、直线、螺旋运动多种运动形式。这种电机的直线运动和旋转运动间存在耦合关系,若要消除这种耦合关系,则需要在另外一个定子中设置一个相反方向的螺旋形三相绕组。

司纪凯教授团队为了补偿对半并联式两自由度感应 LRM 中由耦合效应造成的阻转矩和阻力,提出

了斜槽优化的设计方法^[26],有限元计算结果表明这种优化设计方法可以改善电机的输出转矩和输出电磁力,降低运动耦合给电机带来的负面影响。

2.4 两自由度LRG系统建模研究现状

发电机系统建模是研究发电机性能及开发新型控制策略的重要一环。现有研究表明,对两自由度LRG系统进行建模通常是通过有限元软件实现的。由于两自由度LRG结构的特殊性,二维有限元模型不再能反映LRG的真实空间结构,因此文献[19]和文献[22]对LRG进行研究时均采用三维有限元方法。经过实验验证可以发现,三维有限元模型基本能够反映两自由度LRG的真实特性,其误差均在可接受范围之内,但是三维有限元模型的建立及求解需要过多的计算资源及时间,对于两自由度LRG系统的仿真不太适用,尤其是涉及新型发电系统控制策略开发时,有限元建模更难以实现。因此,对于两自由度LRG的系统建模可以借鉴两自由度LRM的研究成果,比如等效磁路法^[22]以及基于MATLAB/Simulink的数学建模方法^[33],其中前者可以节省大量的计算时间,而后者是开发新型控制策略的良好工具。

2.5 两自由度LRG控制策略研究现状

两自由度LRG的控制策略开发目前还集中在解决直线单元与旋转单元耦合关系对发电机特性的影响方面,即研究解耦控制策略。文献[20]基于矢量控制,搭建了用于WWCEC系统的两自由度永磁LRG的数学模型,在此模型的基础上提出了一种包括磁链解耦和功率解耦在内的新型解耦控制策略,研究表明正交磁场导致了螺旋运动时电机的磁通减小,为了使得发电机在螺旋运动时的输出功率仍能达到目标值,该控制策略通过加大控制环中的电流来维持平衡,仿真和实验研究表明所提出的解耦控制策略具有良好的动态性能。深圳大学的潘剑飞教授研究了一种如附录A图A10所示的两自由度开关磁阻LRM,并提出了2种用于控制该LRM的解耦控制策略^[33-34]。第一种方法为了最小化直线单元绕组通电对旋转单元转矩特性的影响^[34],对直线单元绕组的三相电流进行了分区域控制,最终实现了解耦控制,即直线单元不会对旋转单元产生影响,但是这种方法并没有改善旋转单元绕组通电时对直线单元的影响,该控制策略的控制框图如图1所示。第二种方法通过设定合适的转矩及推力分配方程^[33],实现了2个自由度独立的位置控制,但是这种方法难以用于该LRM的高精度位置跟踪。

而针对应用于WWCEC系统的两自由度LRG,其作为多能互补发电系统的核心装备,除了改善性能的控制策略外,多能互补的控制策略及后续的并网策略也亟待开发,其可以参考已有的风光互补发

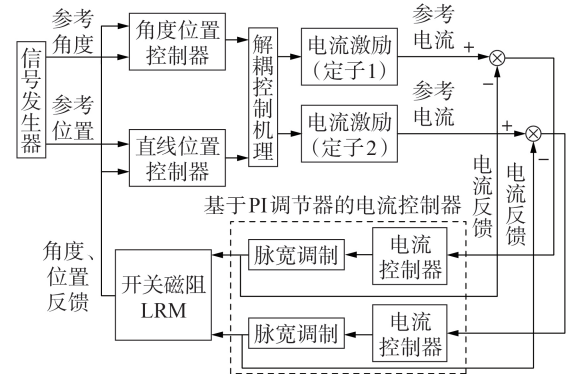


图1 开关磁阻LRM解耦控制策略框图

Fig.1 Block diagram of decoupled control strategy for switched reluctance LRM

电系统^[35-37]及风光储互补发电系统^[38]的研究成果。由风光互补发电系统自适应控制演变而来的风浪互补发电系统自适应控制结构框图如图2所示。图中: u_{rq} 、 i_{rq} 、 i_{rq}^* 分别为旋转发电单元的 q 轴电压、电流、期望电流; u_{rd} 、 i_{rd} 、 i_{rd}^* 分别为旋转发电单元的 d 轴电压、电流、期望电流; u_{lq} 、 i_{lq} 、 i_{lq}^* 分别为直线发电单元的 q 轴电压、电流、期望电流; u_{ld} 、 i_{ld} 、 i_{ld}^* 分别为直线发电单元的 d 轴电压、电流、期望电流; n 和 v 分别为LRG的转速和直线速度; n^* 和 v^* 分别为LRG的期望转速和期望直线速度。为了保证系统输出电能的稳定性,以风电作为主要的发电源、波浪能发电作为辅助发电源的供电方式,依据负载侧需求改变蓄电池的充放电状态,该结构框图可以成为制定新型WWCEC系统运行机制的重要参考。

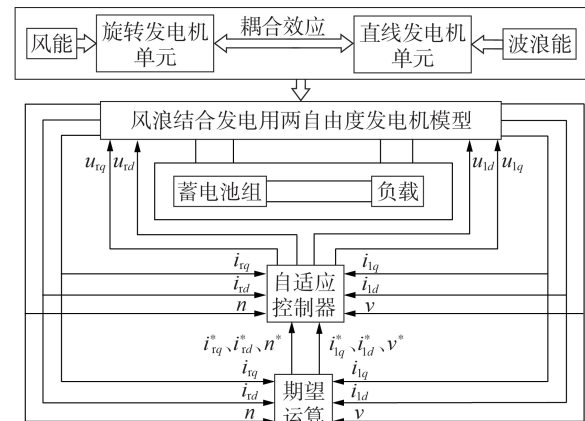


图2 风浪互补发电系统自适应控制结构框图

Fig.2 Block diagram of adaptive control structure for wind-wave complementary energy conversion system

3 两自由度发电机用于新型海上WWCEC系统的可行性初步验证

目前用于新型WWCEC系统的LRG以永磁LRG为主,这是因为永磁发电机具有功率密度高、效率高等突出优点^[39-42]。因此本节提出2种可以用于新型

WWCEC 系统的永磁 LRG,一种为永磁同步 LRG,另一种为磁通切换永磁 LRG,并通过有限元分析对它们用于 WWCEC 系统的可行性进行初步验证。

3.1 永磁同步 LRG 的可行性分析

图 3 为一种内外双定子结构的永磁同步 LRG,其永磁体贴于动子内外表面,是一种动子永磁型直线旋转发电机 MPMLRG (Mover Permanent Magnet Linear-Rotary Generator)。其外定子与动子外侧可构成类似于 12 槽 20 极结构的传统旋转永磁同步发电机,内定子与动子内侧构成类似于 12 槽 20 极结构的传统直线永磁同步发电机,旋转发电机单元与直线发电机单元共用动子轭部分。

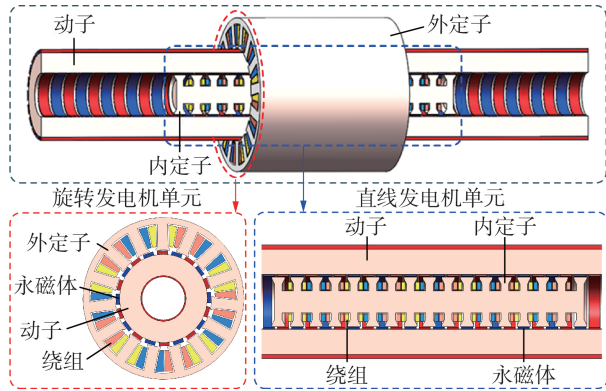


图3 MPMLRG结构示意图

Fig.3 Structural schematic diagram of MPMLRG

该 MPMLRG 在不同位置下的磁路分布示意图如附录 A 图 A11 所示。以旋转发电机单元的 A 相为例,在风能的作用下,当动子旋转到位置 1 时,A 相绕组所缠绕定子磁极的中心线与由内径向外径方向充磁的永磁体中心线对齐,与 A 相绕组匝链的磁通则由外径指向内径;当动子旋转到位置 2 时,A 相绕组所缠绕定子磁极的中心线与由外径向内径方向充磁的永磁体中心线对齐,与 A 相绕组匝链的磁通则由内径指向外径。由此可见,A 相绕组会感应出交变的电压,从而实现风能向电能的转换。直线发电机单元的运行原理与旋转发电机单元类似,不再赘述。

综上所述,所提出的 MPMLRG 结构示意图如图 3 所示,其可以在外力作用下,实现有效发电,用于新型 WWCEC 系统中的理论可行性得以验证。

3.2 磁通切换 LRG 的可行性分析

与图 3 所示的 MPMLRG 结构类似,本文还提出了如图 4 所示的一种内外双定子结构的磁通切换永磁 LRG,其永磁体及绕组均位于内外定子上,动子仅由铁磁材料制成,是一种定子永磁型直线旋转发电机 SPMLRG (Stator Permanent Magnet Linear-Rotary Generator)。外定子与动子外侧可构成类似于 12 槽 10 极结构的传统旋转磁通切换永磁发电机,内定子与动子内侧构成类似于 12 槽 10 极结构的传统直线

磁通切换永磁发电机,2 个发电机单元共用动子轭部分。本节所提出的 MPMLRG 和 SPMLRG 具有相同的反电势周期,这有助于对这 2 种发电机的反电势特性进行比较。

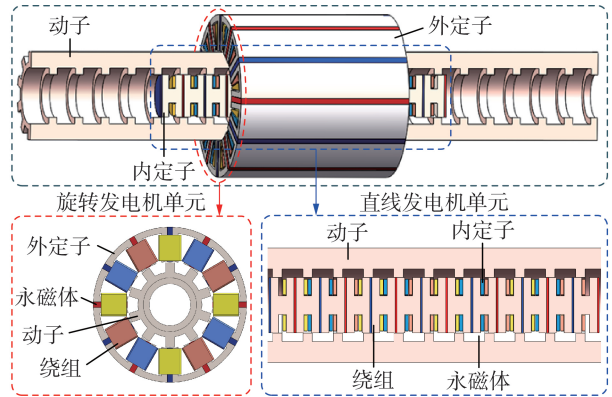


图4 SPMLRG结构示意图

Fig.4 Structural schematic diagram of SPMLRG

该 SPMLRG 在不同位置下的磁路分布示意图如附录 A 图 A12 所示。以旋转发电机单元的 A 相为例,在风能输入的作用下,当动子旋转到位置 1 时,根据磁通总沿着磁阻最小的路径闭合的“磁阻最小原理”,与 A 相绕组匝链的磁通由内径指向外径;当动子旋转到位置 2 时,与 A 相绕组匝链的磁通则改变为由外径指向内径。随着动子圆周方向位置的不断变化,A 相绕组会感应出交变的电压,从而实现风能向电能的转换。该发电机中直线发电机单元的运行原理与旋转发电机单元类似,不再赘述。同样地,SPMLRG 用于新型 WWCEC 系统中的理论可行性得以验证。

3.3 基于有限元方法的可行性初步验证

文献[43]对本文所提出的 SPMLRG 进行了多目标优化设计,其中所用的多目标优化方法为基于改进熵权法的优劣解距离法。为了保证对比的公平性与合理性,用同样的优化方法设计了 1 台如图 3 所示的 MPMLRG,2 台 LRG 具有相同的关键尺寸,其数据如表 3 所示。

表 3 所提出的 LRG 关键尺寸

Table 3 Key sizes of proposed LRG

参数	尺寸 / mm	参数	尺寸 / mm
外定子外径	230.0	直线发电机单元气隙厚度	1.5
外定子轴向长度	230.0	内定子轴向长度	MPMLRG 为 440.0 SPMLRG 为 424.0
旋转发电机单元气隙厚度	1.0		

利用有限元软件完成了 2 台 LRG 的有限元建模,并进行了空载情况下的特性分析,获得了旋转发电机单元的空载反电势 U_R 、齿槽转矩 T_{co} ,以及直线

发电机单元的空载反电势 U_L 和定位力 F_{de} 波形,当电机的动子进行旋转 300 r/min、直线 1 m/s 的螺旋运动时,2 台电机的空载特性如图 5 所示。图中: U_{RMS} 为发电机反电势的有效值;THD 表示反电势的总谐波畸变率; θ 为动子旋转角,反映了动子在旋转方向上的位置; x 为与初始位置之间的直线距离,反映了动子在直线方向上的位置。由图 5 可见,当电机动子进行直线、旋转或螺旋运动时(仿真中给予强制速度时),所提出的 2 种发电机的旋转/直线单元均能够感应出交变的电压,实现有效发电。另外计算可得,MPMLRG 的 T_{co} 峰峰值为 2.2 N·m, SPMLRG 的 T_{co} 峰峰值为 21.4 N·m; MPMLRG 的 F_{de} 峰峰值为 53.7 N, SPMLRG 的 F_{de} 峰峰值为 46.2 N。

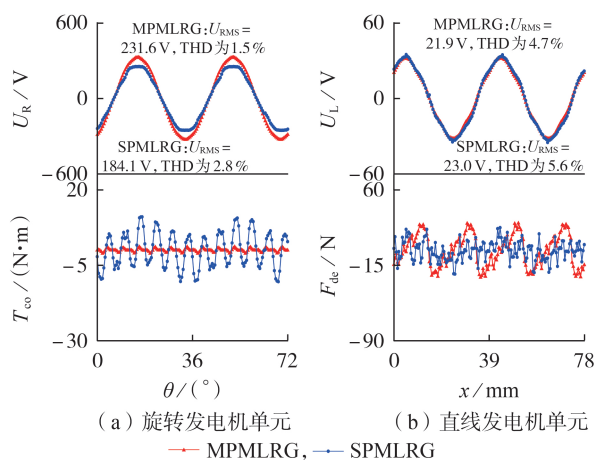


图5 所提出的2种LRG的空载特性

Fig.5 Performances of both proposed LRGs under no-load condition

图6为额定负载情况下,所提出的2种LRG输出功率 P 与效率 η 随动子运动速度变化的曲线。可以看出,随着动子旋转速度及直线运动速度的上升,2种LRG的输出功率升高,效率基本不变,但旋转发电机单元的效率要优于直线发电机单元的效率,这是由直线方向运动速度较低造成的。MPMLRG 的

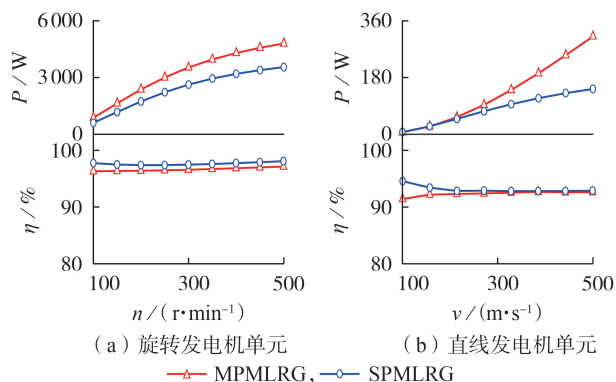


图6 额定负载情况下所提出的2种LRG输出功率与效率

Fig.6 Output power and efficiency of both proposed LRGs under rated-load condition

输出功率要高于 SPMLRG,但是其效率要略低于 SPMLRG。从以上仿真分析可以看出,所提出的2种LRG在不同的输入风速、波浪直线运动速度的情况下都可以实现有效发电,LRG用于新型WWCEC系统的可行性初步得到验证。

3.4 两自由度发电机实验平台加工方案分析

结合制造商对LRG的实验平台加工方案进行了初步的分析与制定,LRG实验平台加工方案示意图如附录A图A13所示。为了模拟新型WWCEC系统中风能和波浪能的输入,LRG的动子通过法兰与一套旋转对拖电机相连,而旋转对拖电机及LRG的动子安装在直线对拖电机的初级上。当直线对拖电机绕组有序励磁时,旋转对拖电机及LRG的动子会在导轨上做直线往复运动,若此时旋转对拖电机也处于工作状态,其会使得LRG的动子同时做旋转运动。因此,通过对旋转对拖电机和直线对拖电机的合理控制,可实现LRG进行直线、旋转或螺旋运动,从而模拟单独波浪能输入、单独风能输入以及波浪能和风能共同输入3种能量输入情况,在合理调速控制下还能模拟不同的风速和波浪速度。此外,对于所提出的内外双定子结构的MPMLRG和SPMLRG,内定子的安装方式是一大难题,在该方案中通过支撑杆单端支撑内定子,在对支撑杆进行力学分析后发现,所制定的LRG实验平台加工方案是可行的。

4 基于两自由度发电机的新型海上WWCEC系统关键问题

4.1 海上环境下发电系统的可靠性难以保证

海上环境为风电系统、波浪能发电系统等海上资源开发系统的构建提供了充裕的空间,但是海上环境潮湿,海水具有高腐蚀性,这些条件对海上环境中工作部件的材料以及保护机构提出了较高的要求。此外,海浪的震荡波动会给海洋中的机械构件带来极大的应力冲击。因此在恶劣的海上工作条件下,建立能够适应海上环境的平台,包括LRG、电力转换设备、浮漂、风机等,保证整个海上平台及发电系统长期稳定运行成为了一个难题。尤其是作为系统核心能量转换装置的LRG,其运行可靠性对系统而言至关重要。

4.2 高性能两自由度风浪结合发电机仍很缺少

LRG是新型WWCEC系统的核心能量转换装置,得益于这种新型发电机的应用,新型WWCEC系统规避了传统WWCEC系统多电机、多传动装置的缺点,因而在系统效率方面具有一定优势。但该系统风能和波浪能2种能量形式的同时转换均基于1台LRG实现,这对LRG性能提出了较高的要求,其需要兼顾直线、旋转和螺旋运动3种运动形式、直线发电单元及旋转发电单元2套发电系统,还要在海

上平台的强震环境及散热条件下表现出优越的输出功率和发电效率,保证系统的整体效率优势,因而提出更多的高性能LRG拓扑结构对新型WWCEC系统的发展和应用而言十分重要。而且,LRG是一种集成度发电机,其与LRM一样也会受到耦合效应的影响,然而对于现有的LRG耦合效应相关的研究还很缺乏,其清晰的耦合效应影响机理及发电特性研究都还没有完善。因此,对高性能LRG进行深入研究是新型WWCEC系统研究中的关键问题之一。

4.3 两自由度发电机高性能控制策略研究不充分

在LRG中,旋转发电机单元和直线发电机单元之间因耦合效应的存在而相互影响,该影响会体现在2个发电机单元的输出特性上,包括输出功率、效率等,此时就需要通过合理的控制来改善其功率输出。而针对LRG自身性能特点,传统的发电机控制策略往往不能直接使用,需要进行相应的改进和适配,例如研究适合LRG的解耦控制策略、矢量控制策略、直接功率控制策略等。但是就目前的研究而言,可以提高LRG输出特性和运行特性的高性能控制策略研究还很缺乏,这限制了LRG的性能提升和大规模应用。因此,与传统的旋转/直线发电机研究相同,高性能控制策略研究也是LRG相关研究中的重点。

4.4 WWCEC协调运行机制不完善

海上风能和波浪能具有波动性、间歇性和不规则性,单独的风力发电系统和波浪能发电系统都难以持续稳定地输出电能。将风能与波浪能综合开发的新型WWCEC系统在电能输出稳定性上具有更加明显的优势。但是与目前研究较多的风光互补发电控制相比,有关风浪互补发电控制的研究还比较少,2种能量形式的协调运行机制还不完善。因此,结合近海岸风速及波浪速度的真实数据,研究风浪互补发电控制策略是新型WWCEC系统应用前需要解决的关键问题。

5 基于两自由度发电机的新型海上WWCEC系统主要研究方向

5.1 两自由度风浪结合发电机新型拓扑结构研究

新型直驱WWCEC系统中的LRG需要工作在恶劣的海上强震环境下,如果该LRG故障或者损坏,有可能造成整个系统的瘫痪,而其作为海上设备的维修成本却相当昂贵。通过分析LRG的发展动态可以发现,永磁LRG是新型直驱WWCEC系统的有力竞争者。从第3节可以看出,所提出的2种LRG各具特性优势。MPMLRG相当于2台永磁同步发电机的结合体,近年来永磁同步发电机的相关研究较多,技术也相对成熟,但是其永磁体位于动子上,在海上风浪平台的强震、潮湿环境下,动子上的永磁体

具有不可逆退磁的风险。而SPMLRG的永磁体及绕组均装配在内外定子上,可以成为规避永磁体退磁风险的LRG结构选择之一,但是有关定子永磁型发电机的研究相对较少,相关技术发展还并不完善,且其具有定子装配工艺更加复杂、功率密度相对受限等缺点。因此,对于适合新型WWCEC系统的LRG拓扑结构还需要进行更加深入的分析,例如利用集合电磁场、温度场、机械应力场的多物理场模型进行分析,研究能够适应海上恶劣环境的其他新型LRG拓扑结构。

5.2 两自由度风浪结合发电机通用设计准则归纳

LRG的电磁参数决定着该发电机的转矩密度、推力密度、发电功率和效率,影响着发电机的结构强度、散热及运行可靠性。新型发电机的关键尺寸与其电磁功率、电负荷、磁负荷之间的关系是电机设计过程中的关键,决定着电机设计过程中其他电磁参数及结构参数的合理选择。两自由度风浪结合发电机以新型直驱WWCEC系统为应用背景,其电负荷的合理选择要结合海上环境的冷却条件,除此之外2个发电机单元的关键尺寸之间相互制约,存在着竞争有限空间的关系。因此如何在2个发电机单元相互制衡的关系下建立适用于WWCEC的LRG关键尺寸确定准则,是保证两自由度风浪结合发电机整体设计合理性的重要基础。归纳两自由度风浪结合发电机的通用设计准则有助于提高电机设计的效率,有利于提升发电机的输出性能,也是这一研究领域亟待填补的空白。

5.3 两自由度风浪结合发电机耦合效应研究

LRG与两自由度直线旋转电动机虽然构造相似,但是它们的工作目的及能量转换方向不同,因而进行耦合效应分析时的重点会有所差别。LRM的耦合效应分析着重于耦合效应对运动特性的影响方面,LRG的耦合效应分析应着重于耦合效应对发电特性的影响方面,例如衡量耦合效应对发电机静态电磁场下电磁特性的影响,包括动子铁芯磁密、绕组磁链、齿槽转矩/定位力等;研究在不同运行模式下耦合效应对发电机瞬态电磁场下的输出功率、效率、感应电压、损耗等特性的影响规律等。相较之下,LRG耦合效应分析还缺乏系列性研究成果。除此之外,耦合效应抑制策略的研究对改善LRG性能具有重要意义,但是LRG耦合效应的抑制策略成果还比较少,尤其是之前鲜有抑制LRG耦合效应的优化设计方法,一些易于实现的LRG耦合效应抑制策略亟待提出。

5.4 WWCEC系统建模研究

WWCEC系统准确的数学模型是进行LRG研究和系统控制策略开发时的重要工具。而LRG是一种高集成度电机,其自身耦合效应影响机理复杂,这

为LRG的准确建模增加了难度,因而建立考虑了耦合效应影响的LRG的数学模型是十分重要的。在LRG研究的过程中可以选用以下2种建模方式:一是通过三维有限元软件建立LRG的模型,在有限元模型中两部分发电机单元特性相互影响,耦合效应会包含在LRG整体模型中;二是建立LRG的数学模型,在分别建立了旋转发电机单元和直线发电机单元后,加入两者之间耦合效应带来的影响,例如“耦合因子”的引入,建立起两者之间相互影响的桥梁,实现LRG精确的数学建模。完整的WWCEC系统模型还包括近海岸波浪速度与风速变化关系的数学模型、控制系统及电能后处理数学模型。利用完整的WWCEC系统模型进行电磁分析及特性模拟,开发适合WWCEC系统的高性能控制策略,可以推进新型WWCEC系统的快速发展。

5.5 风浪互补发电协调控制策略开发

在基于LRG的WWCEC系统控制方式的未来发展中,稳定性好、易于实现的风浪互补发电协调控制策略是热点研究内容之一。新型WWCEC系统将2种能量进行结合开发,基于LRG的WWCEC平台在“低风能,高波浪能”“高风能,低波浪能”以及“高风能,高波浪能”3种可以实现有效能量转化的情况下,将2种能量进行合理的转化匹配,制定合理的WWCEC协调运行机制。不同的能量输入情况下,主要工作的发电机单元不同,且各发电机单元输出特性会超出或者低于负载侧需求,因此可以结合蓄电池等储能装置,利用风浪互补发电最大功率点跟踪控制,构建发电协调控制运行规则。当LRG整体输出功率高于负载要求时,系统向储能装置充电,而当LRG整体输出功率低于负载要求时,蓄电池对负载放电。科学的WWCEC协调控制运行规则能够使得WWCEC系统在应对不同能量输入情况及不同能量变化情况时,输出功率稳定,不工作小时数少,抗扰动性良好,这也是使得WWCEC系统优于单独的风能/波浪能发电系统的关键。此外,如何在保证控制效果的同时,降低风浪互补发电协调控制的复杂度是学者们需要充分考虑的内容之一,这是实现基于LRG的WWCEC系统成功大规模应用的关键。

6 结论

WWCEC系统将为我国可再生能源发展开辟新的路径,其成功应用可以大幅缓解全球化石能源的危机。相较于传统的发电系统组成,将两自由度LRM运用于WWCEC系统是一种降低系统成本、提高系统效率和集成度的有效解决方案,但是恶劣的海上环境给这种新型WWCEC系统的运行可靠性带来了严峻的挑战。除此之外,传统的电机拓扑结构、设计理论和控制方法难以应对WWCEC系统对LRG

提出的性能要求。

本文基于WWCEC的背景,阐述了独立开发海上风能和波浪能的发电系统和WWCEC系统的研究现状,然后对作为新型WWCEC系统核心能量转换装置的LRG研究现状进行综述,通过有限元方法初步验证了LRG用于WWCEC系统的可行性,随后归纳了该系统发展过程中正在面临的关键问题,讨论了接下来主要的研究方向。未来,可以从本文所探讨的研究方向入手,进一步深化两自由度WWCEC系统的重要理论和方法,为促进这种面向海洋的、多能结合的直驱式一体化发电系统的应用及产业化奠定理论和技术基础。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

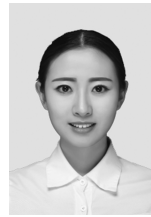
参考文献:

- [1] WANG Cheng, GAO Ning, WANG Jianhui, et al. Robust operation of a water-energy nexus: a multi-energy perspective [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(4): 2698-2712.
- [2] 陈国平, 董昱, 梁志峰. 能源转型中的中国特色新能源高质量发展分析与思考[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(17): 5493-5506.
CHEN Guoping, DONG Yu, LIANG Zhifeng. Analysis and reflection on high-quality development of new energy with Chinese characteristics in energy transition [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(17): 5493-5506.
- [3] LI Liang, ZHANG Xiantao, YUAN Zhiming, et al. Multi-stable mechanism of an oscillating-body wave energy converter [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(1): 500-508.
- [4] 姚钢, 杨浩猛, 周荔丹, 等. 大容量海上风电机组发展现状及关键技术[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(21): 33-47.
YAO Gang, YANG Haomeng, ZHOU Lidan, et al. Development status and key technologies of large-capacity offshore wind turbines [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(21): 33-47.
- [5] 符杨, 黄路遥, 刘璐洁, 等. 基于状态自适应评估的海上风电机组预防性维护策略[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(1): 1-9.
FU Yang, HUANG Luyao, LIU Lujie, et al. Preventive maintenance strategy for offshore wind turbine based on state adaptive assessment [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(1): 1-9.
- [6] 刘皓明, 赵敏, 田炜, 等. 风、浪对海上风电机组振动特性的影响及控制策略[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(1): 46-51, 58.
LIU Haoming, ZHAO Min, TIAN Wei, et al. Effect of wind and wave on vibration characteristics of offshore wind turbines and control strategy [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(1): 46-51, 58.
- [7] 黄翠, 高艳波, 吴迪, 等. 海洋可再生能源激励政策探析[J]. 海洋开发与管理, 2015, 32(2): 16-20.
HUANG Cui, GAO Yanbo, WU Di, et al. Analysis of marine renewable energy incentive policy [J]. Marine Development and Management, 2015, 32(2): 16-20.
- [8] KANDUKURI S T, SENANYAKA J S L, HUYNH V K, et al. A two-stage fault detection and classification scheme for electrical pitch drives in offshore wind farms using support vector machine [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(5): 5109-5118.

- [9] HAZRA S, KAMAT P, BHATTACHARYA S, et al. Power conversion with a magnetically-gear permanent magnet generator for low-speed wave energy converter[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(5): 5308-5318.
- [10] 盛松伟, 张亚群, 王坤林, 等. 鹰式装置“万山号”总体设计概述[J]. 船舶工程, 2015, 37(增刊1): 10-14.
SHENG Songwei, ZHANG Yaqun, WANG Kunlin, et al. The overall design of wave energy convertor Wan Shan[J]. Ship Engineering, 2015, 37(Supplement 1): 10-14.
- [11] 余海涛, 施学庆, 胡敏强, 等. 用于海浪发电的圆筒型永磁直线发电机性能分析[J]. 海洋技术, 2012, 31(4): 79-82.
YU Haitao, SHI Xueqing, HU Minqiang, et al. Analysis of performance of novel permanent magnet tubular linear generator for wave energy converters[J]. Ocean Technology, 2012, 31(4): 79-82.
- [12] BIDADFAR A, SABORIO-ROMANO O, CUTULULIS N A, et al. Control of offshore wind turbines connected to diode-rectifier-based HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2021, 12(1): 514-523.
- [13] ASTARIZ S, PEREZ-COLLAZO C, ABANADES J, et al. Co-located wave-wind farms: economic assessment as a function of layout[J]. Renewable Energy, 2015, 83: 837-849.
- [14] BAHAJ A S. Generating electricity from the oceans[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, 15(7): 3399-3416.
- [15] HANSSEN J E, MARGHERITINI L, O'SULLIVAN K, et al. Design and performance validation of a hybrid offshore renewable energy platform[C]//9th International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies. Monte Carlo, Monaco: IEEE, 2015: 1-8.
- [16] 史宏达, 韩治, 龚昊翔, 等. 一种适应冰期的风浪结合振荡浮子发电装置及发电方法: CN109209774A[P]. 2019-01-15.
- [17] SZABÓ L. On the use of rotary-linear generators in floating hybrid wind and wave energy conversion systems[C]//IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics(AQTR). Cluj-Napoca, Romania: IEEE, 2018: 1-6.
- [18] 李大鸣, 甄珠. 波浪能与风能联合发电装置: CN205779444U[P]. 2016-10-05.
- [19] FU Xinghe, WANG Jianhao, LIN Mingyao. Design and analysis of linear rotary permanent magnet generator for wind-wave combined power generation system[C]//20th International Conference on Electrical Machines and Systems(ICEMS). Sydney, NSW, Australia: IEEE, 2017: 1-6.
- [20] XU Lei, ZHANG Chao, ZHU Xiaoyong. Decoupling control of a dual-stator linear and rotary permanent magnet generator for offshore joint wind and wave energy conversion system[J]. IET Electric Power Applications, 2020, 14(4): 561-569.
- [21] 徐磊, 朱孝勇, 张超, 等. 直线旋转永磁电机及其控制技术综述与新发展[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(6): 1972-1985.
XU Lei, ZHU Xiaoyong, ZHANG Chao, et al. Overview and new development of linear and rotary permanent magnet machines and control technologies[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(6): 1972-1985.
- [22] XU Lei, LIN Mingyao, FU Xinghe. End-effects analysis and experimental study of a double stator linear-rotary permanent magnet motor with long mover[J]. IET Electric Power Applications, 2017, 11(9): 1601-1609.
- [23] MENDRELA E, GIERCZAK E. Double-winding rotary-linear induction motor[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1987, 2(1): 47-54.
- [24] FLESZAR J, MENDRELA E. Twin-armature rotary-linear induction motor[J]. IEEE Proceedings B, 1983, 130(3): 186-192.
- [25] XU Lei, LIN Mingyao, FU Xinghe, et al. Orthogonal magnetic field analysis of a double-stator linear-rotary permanent magnet motor with orthogonally arrayed permanent magnets[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2017, 53(11): 2501104.
- [26] XIE Lujia, SI Jikai, HU Yihua, et al. Characteristics analysis of the motions of the two-degree-of-freedom direct drive induction motor[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(2): 931-941.
- [27] SI Jikai, XIE Lujia, XU Xiaozhuo, et al. Static coupling effect of a two-degree-of-freedom direct drive induction motor[J]. IET Electric Power Applications, 2017, 11(4): 532-539.
- [28] XIE Lujia, SI Jikai, HU Yihua, et al. Helical motion analysis of the 2-degree-of-freedom split-stator induction motor[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2019, 55(6): 1-5.
- [29] WANG Peixin, SI Jikai, XIE Lujia, et al. Analysis of magnetic-coupling effect on the performances of 2DoF direct-drive induction motors[J]. IET Electric Power Applications, 2018, 12(7): 946-952.
- [30] TURNER A, RAMSAY K, CLARK R, et al. Direct-drive rotary-linear electromechanical actuation system for control of gear-shifts in automated transmissions[C]//IEEE Conference on Vehicle Power and Propulsion. Arlington, TX, USA: IEEE, 2007: 267-272.
- [31] CHEN L, HOFMANN W. Design of one rotary-linear permanent magnet motor with two independently energized three phase windings[C]//IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems. Bangkok, Thailand: IEEE, 2007: 1372-1376.
- [32] CATHEY J, RABIEE M. Verification of an equivalent circuit model for a helical motion induction motor[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1988, 3(3): 660-666.
- [33] PAN Jianfei, MENG Fanjie, CAO Guangzhong. Decoupled control for integrated rotary-linear switched reluctance motor[J]. IET Electric Power Applications, 2014, 8(5): 199-208.
- [34] PAN Jianfei, ZOU Yu, CHEUNG N. Performance analysis and decoupling control of an integrated rotary-linear machine with coupled magnetic paths[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2014, 50(2): 761-764.
- [35] 殷埏生. 基于模糊控制的风光互补系统协同控制研究[J]. 南京工程学院学报(自然科学版), 2020, 18(4): 32-37.
YIN Niansheng. Research on cooperative control strategy of wind/photovoltaic hybrid electric systems based on fuzzy control[J]. Journal of Nanjing Institute of Technology(Natural Science Edition), 2020, 18(4): 32-37.
- [36] 王鲁浩, 焦晓红, 李晓. 风光互补发电系统功率输出的自适应控制[J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(11): 101-107.
WANG Luhao, JIAO Xiaohong, LI Xiao. Adaptive control of power for complementary wind-PV generation system[J]. Power System and Clean Energy, 2013, 29(11): 101-107.
- [37] 孟德越, 刘伟, 崔茂齐. 风光互补发电系统协调控制策略与并网研究[J]. 河北水利电力学院学报, 2021, 31(2): 51-55, 66.
MENG Deyue, LIU Wei, CUI Maoqi. Research on coordinated control strategy and grid connection of wind-solar complementary power generation system[J]. Journal of Hebei University of Water Resources and Electric Engineering, 2021, 31(2): 51-55, 66.
- [38] KONG Xiaobing, LIU Xiangjie, MA Lele, et al. Hierarchical distributed model predictive control of standalone wind/solar/battery power system[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2019, 49(8): 1570-1581.
- [39] EKLUND P, SJÖLUND J, BERG M, et al. Experimental evaluation of a rare earth-free permanent magnet generator[J].

- IEEE Transactions on Energy Conversion, 2021, 36(1):3-10.
- [40] MIRNIKJOO S A, ABBASZADEH K, ABDOLLAHI S E. Multiobjective design optimization of a double-sided flux switching permanent magnet generator for counter-rotating wind turbine applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(8):6640-6649.
- [41] FARROK O, ISLAM M R, ISLAM SHEIKH M R, et al. Oceanic wave energy conversion by a novel permanent magnet linear generator capable of preventing demagnetization[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(6):6005-6014.
- [42] SEO S, SHIN K, KOO M, et al. Experimentally verifying the generation characteristics of a double-sided linear permanent magnet synchronous generator for ocean wave energy conversion [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2020, 30(4):5206804.
- [43] NIE Rui, SI Jikai, XU Shuai, et al. Optimization of a novel linear-rotary permanent magnet generator for wind-wave combined energy conversion via TOPSIS decision making[C]// 13th International Symposium on Linear Drives for Industry Applications(LDIA). Wuhan, China: IEEE, 2021: 1-6.

作者简介:



聂 瑞

聂 瑞(1994—),女,助理研究员,博士,主要研究方向为新能源发电、特种电机设计及控制(E-mail:ruinie1994@126.com);
司纪凯(1973—),男,教授,博士,通信作者,主要研究方向为特种电机设计及控制(E-mail:sijikai@zzu.edu.cn)。

(编辑 李玮)

Overview and prospect of research on two-degree-of-freedom generator for offshore wind-wave combined energy conversion system

NIE Rui, SI Jikai, ZHANG Guozhen, CHENG Zhiping, LI Zhongwen

(School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In recent years, the multi-energy complementary utilization has become a new trend of energy development. The offshore wind energy and wave energy have many merits, such as no pollution, concentrated energy form and so on. Accordingly, a novel WWCEC (Wind-Wave Combined Energy Conversion) system based on two-degree-of-freedom LRG (Linear-Rotary Generator) emerges as the times require. The research status of offshore wind and wave energy conversion systems is summarized. The advantages and disadvantages of the independent developed offshore wind and wave energy conversion systems, the traditional WWCEC system and the novel WWCEC system are compared. Then, the research status of two-degree-of-freedom LRG that is the core energy conversion device of the novel offshore WWCEC system is summarized. Furthermore, the feasibility of two-degree-of-freedom LRG applied in novel WWCEC system is preliminarily verified by finite element method, and then the research hotspots and difficulties of the generator are discussed. Finally, the main research directions of two-degree-of-freedom LRG for WWCEC system in the future are prospected.

Key words: offshore wind power generation; wave power generation; wind-wave combined energy conversion system; two-degree-of-freedom generator; coordinated control strategy of wind-wave complementary energy conversion

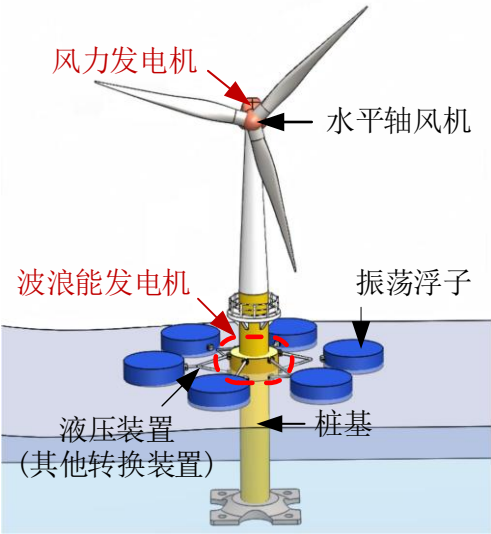


图 A1 平台共用式 WWCEC 系统
Fig.A1 Platform sharing WWCEC system

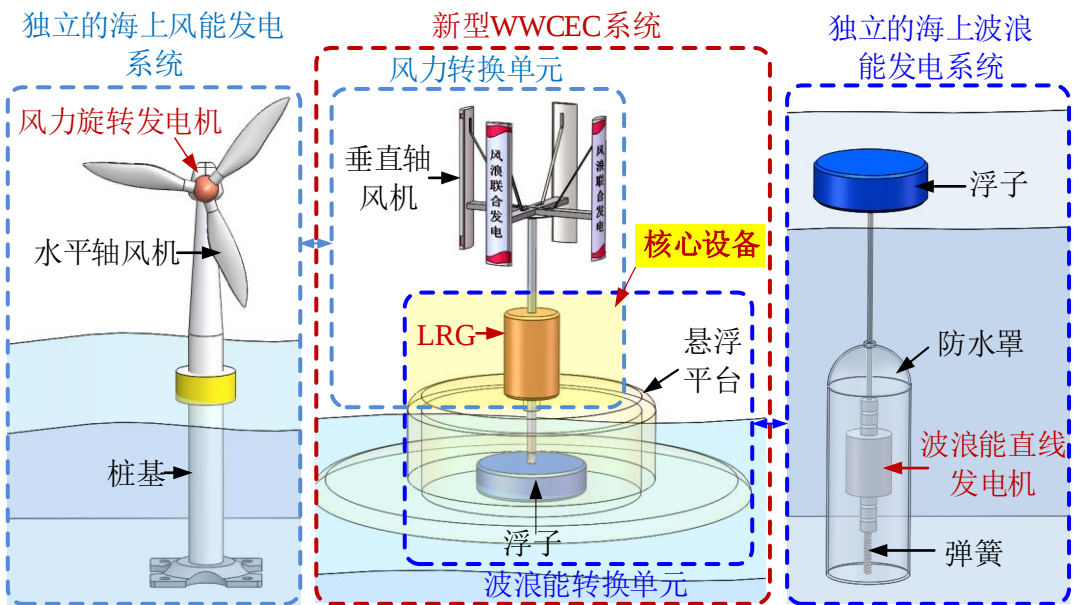


图 A2 基于 LRG 的新型 WWCEC 系统
Fig.A2 Novel WWCEC system based on LRG

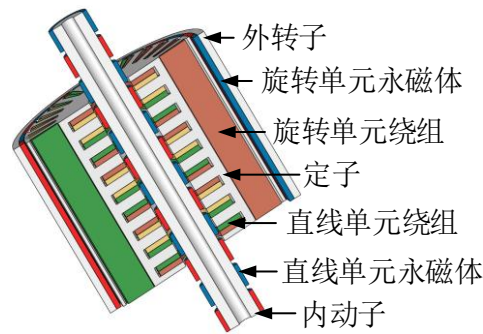


图 A3 双定子永磁同步 LRG
Fig.A3 Double-mover permanent magnet synchronous LRG

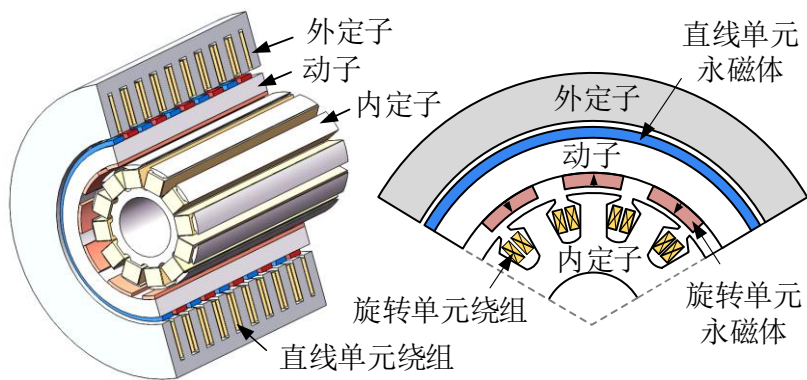


图 A4 双定子永磁同步 LRG

Fig.A4 Double-stator permanent magnet synchronous LRG

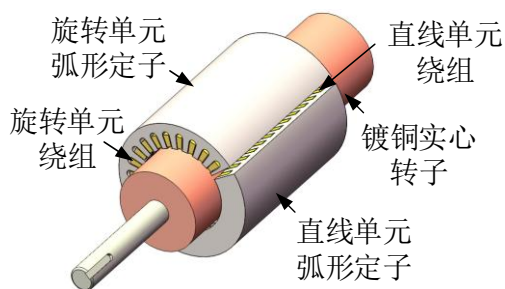
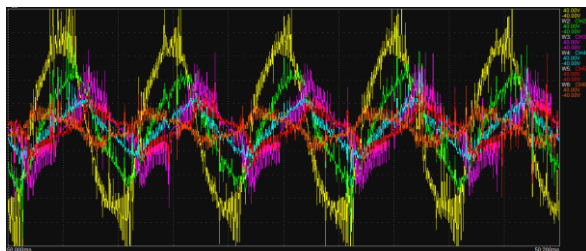
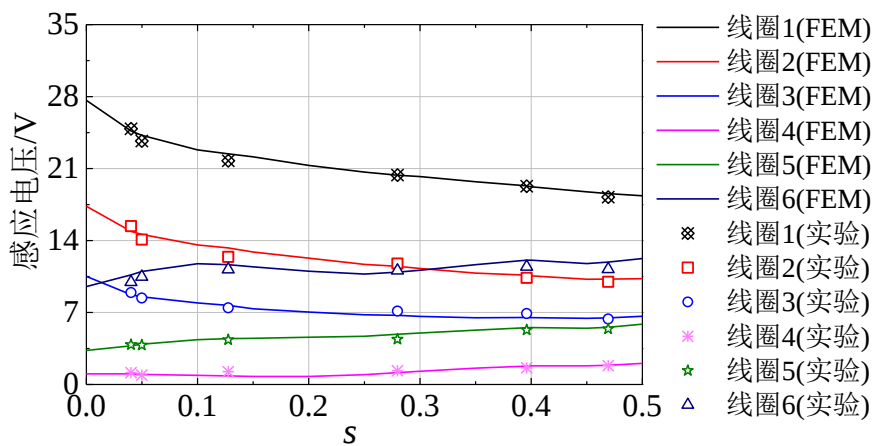


图 A5 对半并联式感应 LRM

Fig.A5 Half-parallel inductance LRM



(a) 感应电压波形



(b) 实验和有限元结果对比

图 A6 耦合效应实验验证

Fig.A6 Experimental verification of coupling effect

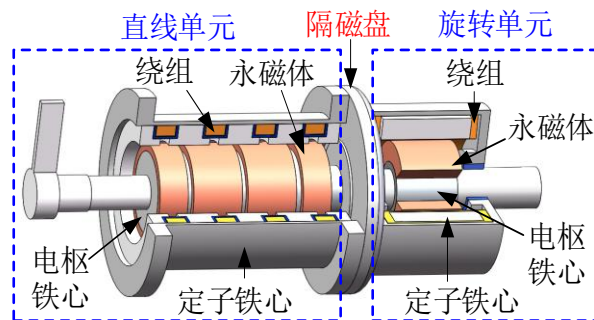


图 A7 用于汽车自动换挡器的永磁 LRM

Fig.A7 Permanent magnet LRM for automotive automatic gearshift

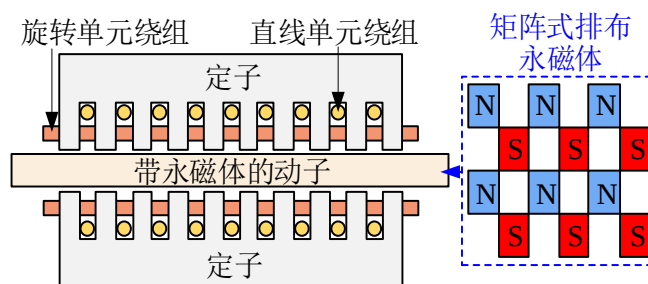


图 A8 永磁 LRM 及其矩阵式排布永磁体

Fig.A8 Permanent magnet LRM and its matrix permanent magnet

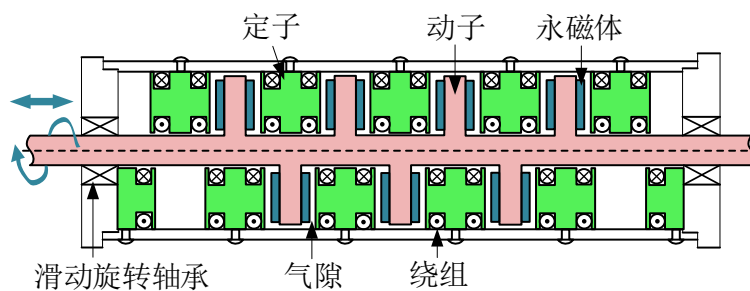


图 A9 单电枢感应 LRM

Fig.A9 Single-armature inductance LRM

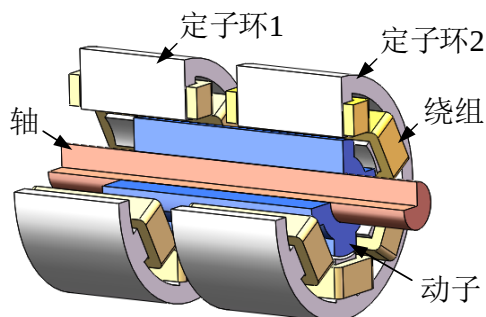


图 A10 开关磁阻 LRM

Fig.A10 Switched reluctance LRM

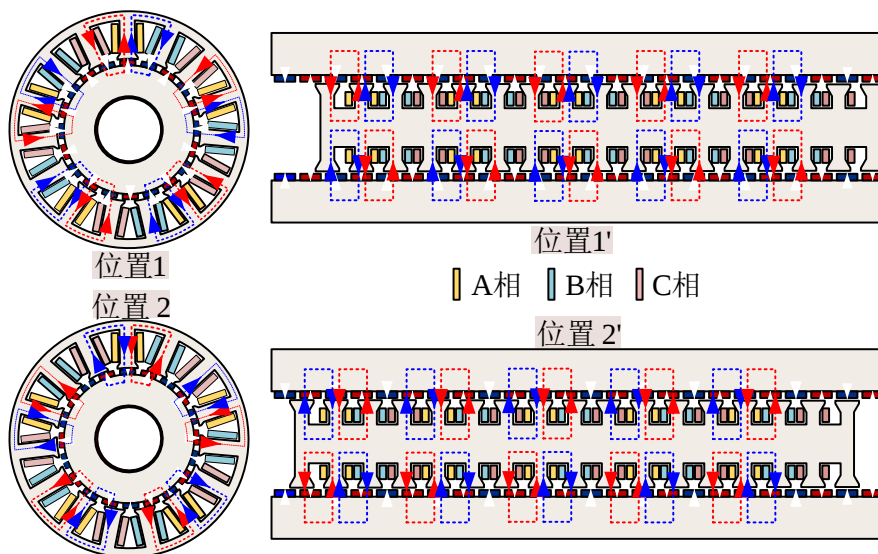


图 A11 MPMLRG 不同位置下磁路分布图

Fig.A11 Magnetic circuit distributions of MPMLRG at different positions

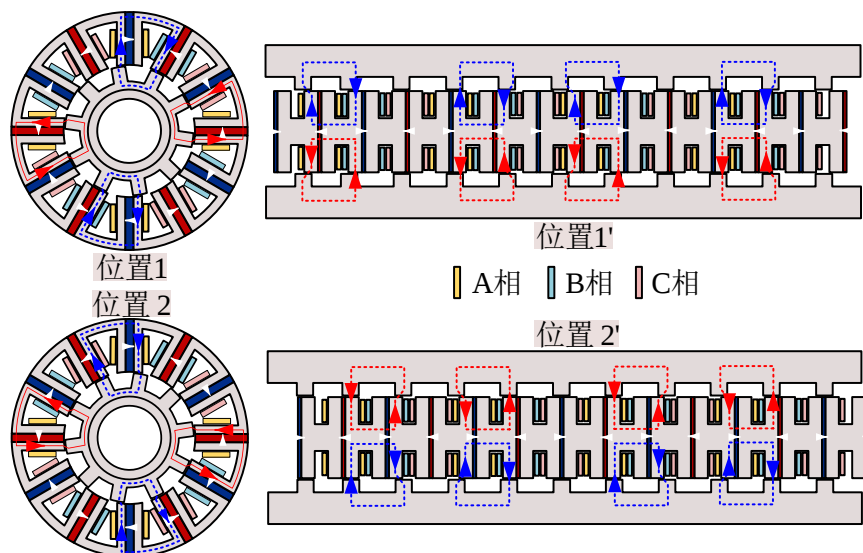


图 A12 SPMLRG 不同位置下磁路分布图

Fig.A12 Magnetic circuit distributions of SPMLRG at different positions

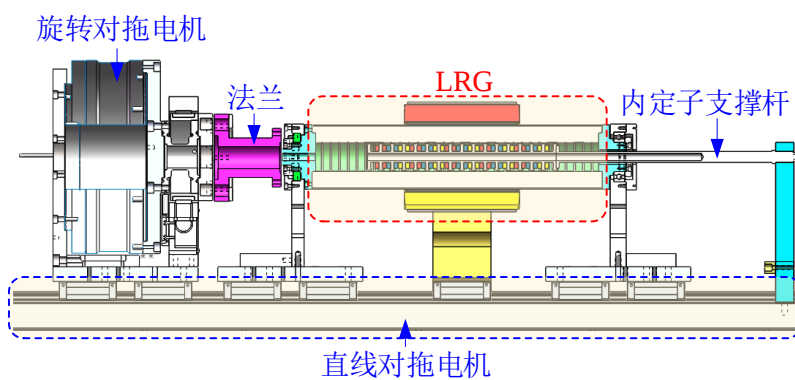


图 A13 两自由度发电机实验平台加工方案

Fig.A13 Processing scheme of LRG experimental platform