

用于波浪发电的圆筒型直线磁齿轮永磁发电机

赵杰¹ 谭学峰²

1. 国网江苏省电力有限公司徐州供电分公司; 2. 国网江苏省电力有限公司徐州市贾汪区供电分公司

摘要: 本文采用直线磁齿轮永磁发电机作为能量转换装置, 将其用于波浪发电系统实现将波浪能转化为电能。本文分析了直线磁齿轮与直线永磁同步电机的几种耦合方式, 无须中间传动装置, 能够直接俘获波浪的直线运动, 通过磁齿轮的增速效应, 采用高速发电机设计, 从而获得更高的输出电压和功率密度。各耦合模型的结构和工作原理被分析, 利用直线磁齿轮把波浪的低速运动转化为高速, 驱动高速直线发电机, 提高电机的利用率, 大大降低电机研发成本, 为波浪发电产业化起一定的促进作用。

关键词: 直线磁齿轮; 直线永磁同步电机; 波浪发电

【DOI】10.12252/j.issn.2096-627X.2022.05.233

一、引言

海洋中蕴藏丰富的波浪能, 据估计, 只要0.2%的未开发海洋能源被利用就能够为全世界提供足够的电能。和风力以及太阳能发电相比, 波浪能具有功率密度高和易于预测的优势。在发展的早期阶段, 多采用旋转电机收集波浪能, 一般通过液压传动机构或是低水头的水轮机完成, 中间环节必然会增加系统的复杂性以及能量损耗, 降低系统的转换效率和可靠性。采用直线永磁同步发电机作为能量转换装置的直驱式波浪发电系统, 相对于其他波浪能发电装置具有以下优点: 捕获波浪能效率和转换效率较高; 制造加工相对简单, 建造成本低; 输出电能相对稳定, 特别适用于我国这类波浪能密度较低的国家。

我国波浪能密度与国外相差很大, 波速也不及国外的一半, 使得波浪发电机效率很低, 阻碍波浪发电向着产业化方向发展。

由于波浪的直驱速度很低, 因此波浪发电直线电机存在功率密度小、体积庞大的缺点, 亟待进行相关技术的深入研究。关于如何提高低速直驱发电功率密度的问题, 波浪发电领域著名的研究学者M. A. Mueller指出, 解决这些问题的主要方式是提高直线电机运动速度^[1-2], 即通过一定的方式改变直线发电机的运动速度, 从而提高电机的功率密度。

提高由波浪引起的速度, 驱动高速直线电机发电, 通常有两种增速的方式: 一种是利用机械装置调节速度, 这种在旋转电机用得很多, 但是这种方式存在机械损耗, 使得发电系统效率降低。第二种方式是采用无接触式的磁齿轮结构, 增加系统的能量密度和效率。与传统的机械齿轮相比, 直线磁齿轮是更为理想的选择。磁齿轮传动机构外形简单, 主动齿轮和从动齿轮之间没有物理接触, 是通过磁场间相互耦合作用产生的磁力来实

现推力和功率的传递。磁齿轮传动机构具有一些独特的特点, 如无须润滑、无噪声、无摩擦能耗、无油污、防水防尘、有过载保护作用等。因此, 结合磁场调制原理和磁齿轮技术, 开展低速直驱领域内高速直线发电机的研究, 即采用基于磁齿轮的双转子永磁直线发电机, 提高电机的功率密度。通过磁齿轮的升速效应, 能够在很低的波浪运动速度下, 提高直线电机转子的运行速度, 从而提高电机功率密度, 解决我国波浪能波速不高所带来的一系列问题。

二、磁齿轮发展概况及工作原理

1. 磁齿轮发展概况

磁齿轮传动装置的概念最早见于20世纪初, 1913年美国商人申请了关于磁齿轮传动装置的专利^[3], 但是磁齿轮传动装置直到近年来才引起人们的关注。这是由于过去永磁材料的磁性能较差, 导致转矩密度无法提高, 磁齿轮传动装置的应用受到限制。1983年, 第三代稀土永磁材料研制成功, 永磁材料性能有了很大提高。稀土永磁材料NdFeB磁钢磁能积高, 性能优越, 价格便宜^[4]。永磁材料的飞速发展使得磁齿轮的研究也开始活跃起来。

2. 直线磁齿轮工作原理

圆筒型直线磁齿轮由内电枢、外电枢、调磁环和两层气隙组成, 结构如图1所示。内电枢外表面和外电枢内表面均贴有稀土永磁体, 调磁环由高导磁材料和非导磁材料共同构成, 位于内、外电枢之间, 为推力传输提供足够的机械强度。所有永磁体均参与推力传递, 可以获得较高的力密度。

直线磁齿轮的基本工作原理在于调磁环能够对由内、外电枢永磁体产生的磁场进行调制, 使得内、外气隙中形成空间分布磁场的主要谐波极对数正好等于对面电枢永磁体的极对数, 从而实现推力传输。内、外电枢永磁体极对数和调磁环铁心片数满足

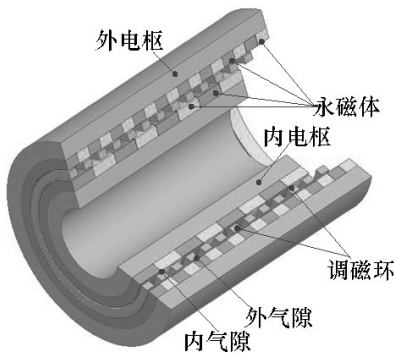


图1 圆筒型直线磁齿轮结构

$$p_1 + p_2 = n_s \quad (1)$$

式中 p_1 ——内电枢永磁体极对数；

p_2 ——外电枢永磁体极对数；

n_s ——调磁环铁心片数。

气隙磁场所包含的各次谐波磁场次数可统一表示为

$$p_{m,k} = |mp + kn_s|$$

$$m = 1, 3, 5, \dots, \infty \quad (2)$$

$$k = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots, \pm \infty$$

式中 p ——内、外电枢永磁体极对数。

气隙磁场中所包含的各次谐波磁场的直线运动速度可统一表示为

$$v_{m,k} = \frac{mp}{mp + kn_s} v_r + \frac{kn_s}{mp + kn_s} v_s \quad (3)$$

式中 v_r , v_s ——电枢和调磁环的直线运动速度。

在所有调制谐波磁场中 $p_{1,-1}$ 次调制谐波磁场幅值最大。

直线磁齿轮的三个主要部件：内电枢、外电枢、调磁环，将其中一个部件固定，其余两部件作为动子，均能实现速度和推力的变比功能。若将调磁环固定，即 $v_s=0$ ，分别将直线磁齿轮内、外电枢作为高、低速动子，两动子运动方向相反。内外电枢运行的传动比为：

$$G_r = -\frac{p_2}{n_s - p_2} = -\frac{p_2}{p_1} \quad (4)$$

若将外电枢固定，内电枢作为高速动子，调磁环作为低速动子，两动子运动方向相同，二者的传动比为：

$$G_r = \frac{n_s}{p_1} \quad (5)$$

三、用于波浪发电的圆筒型直线磁齿轮永磁同步发电机

提高功率密度和效率的一个好方法就是将直线磁齿轮与直线永磁同步电机耦合，构成增速型直线磁齿轮永磁发电机。这样既能保留直线永磁发电机直驱的优良特

性，又能将其动子的运动速度提升。通过磁场和磁路变换，磁齿轮将低速波浪运动转换成直接驱动电机的高速运动，从而提高电机的功率密度，增大系统转换效率，解决我国波浪能波速不高所带来的问题。

在电机结构设计中，采用圆筒型结构更适合波浪发电应用场合。与平板结构相比，圆筒形结构具有以下优势：无边端绕组、永磁利用率高、更少漏磁、无施加在轴承上的径向力等。因此，用于波浪发电的直线磁齿轮和直线永磁同步电机均采用圆筒形结构。与机械齿轮相比，直线磁齿轮的优越性能使其推力传输能力具有明显竞争力。磁齿轮可以通过多种方式和直线永磁电机进行耦合，用于直驱式波浪发电场合提高系统性能，二者的耦合方式分为间接耦合和直接耦合两种模式。

(一) 间接耦合

将磁齿轮与直线永磁电机进行耦合，最简单的方式即是磁齿轮高速输出转轴与直线永磁发电机的输入转轴直接进行机械耦合，但二者没有磁路和磁场上的联系。如图2所示为直线磁齿轮和直线永磁同步电机间接耦合示意图。直线磁齿轮作为增速装置，其低速动子与作为波浪发电系统中能量捕获装置的浮子直接相连，经过磁齿轮的增速效应后，其高速动子驱动直线永磁发电机，使得电机运行于高速方式下，实现高功率密度的目标。



图2 磁齿轮和直线永磁电机间接耦合

(二) 直接耦合

直线磁齿轮与直线永磁同步电机的另外一种耦合方式即是在直线电机直接耦合磁齿轮结构，实现机械与磁路的双重耦合。相较传统直线电机和间接耦合方式而言，直接耦合方式下构成的复合电机结构更为紧凑，是更加高效、高可靠性、高力密度的选择。增速型直线磁齿轮永磁复合电机既能与波浪的低速运动相匹配，通过磁齿轮实现增速驱动直线电机，高速发电机设计使得功率密度和效率都得到了极大的提升。

直接耦合方式下，直线磁齿轮和直线永磁同步电机采用复合结构型式，有串联和并联两种耦合方式。复合电机中的磁齿轮低速动子（速度为 v_L ）直接和随波浪起伏的浮子连接，则磁齿轮高速动子（直线永磁发电机动子）的速度 $v_H = G_r v_L$ ， G_r 是磁齿轮的传动比。低速波浪运动经磁齿轮低速动子俘获之后，由磁齿轮将速度提高后驱动直线发电机，以产生更高的三相输出电压和功

率。和用于直驱海浪发电的传统低速直线永磁同步电机相比, 增速型直线磁齿轮永磁复合电机具有低成本、高效率、高功率密度的优势。由于直线永磁发电机采用外动子结构获得的功率密度是内动子结构的7-8倍。因此在串联耦合和并联耦合两种方式下, 直线磁齿轮永磁复合电机均采用外动子结构, 以获得更高的功率密度和转换效率。

1. 并联耦合结构

并联式直线磁齿轮永磁复合电机由直线磁齿轮和直线永磁发电机并联组合, 包含: 直线电机定子绕组、直线电机动子(磁齿轮高速动子)、调磁环、磁齿轮低速动子。在并联耦合方式中, 磁齿轮的高速动子和直线永磁电机动子共同安装在同一根转轴上, 机械结构以及磁路上均相互耦合。其中调磁环和定子电枢固定不动, 磁齿轮低速动子与波浪发电系统中的浮子相连, 磁齿轮高速动子(直线永磁电机动子)以高速运动磁场切割定子绕组, 产生较高幅值的感应电动势。图3为并联耦合直线磁齿轮永磁发电机的结构示意图。并联耦合方式下, 尽管体积较小, 但有两个气隙, 结构比较复杂。

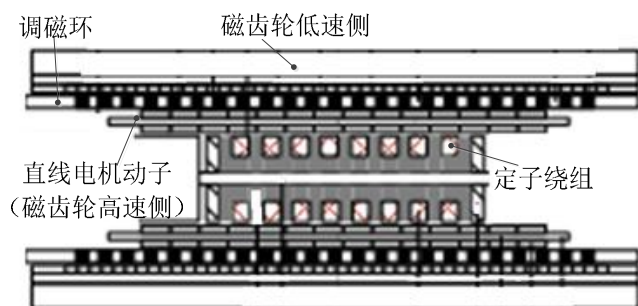


图3 并联式磁齿轮永磁发电机

2. 串联耦合结构

串联耦合结构的直线磁齿轮永磁复合电机包含两部分: 直线磁齿轮和直线永磁同步电机, 二者串联组成, 磁路可以独立设置。磁齿轮的高速动子和直线电机的动子巧妙地被安装在同一根转轴上, 直线电机定子绕组和磁齿轮定子永磁极共享同一转轴, 作为一个整体固定不动。串联耦合结构的直线磁齿轮永磁同步发电机包括以下几个部分: 直线电机定子绕组、直线电机动子(磁齿轮高速动子)、调磁环(低速动子)、磁齿轮定子永磁极。串联耦合方式下, 复合电机结构细长, 有两层气隙。

四、结论

本文所提出的直线磁齿轮永磁同步发电机结合磁齿轮与直线电机二者的优势, 其低速动子直接俘获波浪的

低速往复运动, 经直线磁齿轮的调制放大后, 由高速动子驱动永磁直线发电机, 由此产生较高的输出电压。直线磁齿轮永磁发电机的功率密度高、体积小、重量轻、定位力小、效率高, 以该电机为基础的直驱式波浪发电系统结构简单, 后期的系统维护成本低, 能够降低波浪发电系统的成本。采用磁齿轮技术实现直驱式波浪发电系统的能量传递, 可实现低速至高速传动的转变, 在不增加甚至减小系统体积的情况下, 改善直驱式波浪发电系统功率密度低下、电磁力波动大的缺点。极大地降低波浪发电成本, 推动波浪发电行业走向市场。

利用可再生清洁的波浪能源转化成电能的技术给海洋用电设备供电, 减少了以往对海洋上的相关设备进行远距离供电带来的高额投入, 有利于海洋上的相关用电设备长期实时运行, 因此直线磁齿轮永磁发电机在波浪发电中具有较好的应用前景。实现直驱式波浪发电技术的突破, 加快波浪发电技术的规模化应用的步伐, 为波浪发电的实用乃至并网提供理论基础, 对促进海洋能开发、缓解能源紧缺、改善环境具有推动作用。同时可丰富直线发电机设计和控制领域的理论和内容, 具有重要的理论意义和工程应用价值。

参考文献

- [1] M. A. Mueller, R. Wallace, Enabling science and technology for marine renewable energy[J], Energy Policy, 36 (12): 4376-4382, Jan. 2008.
- [2] H. Polinder, M. A. Mueller, M. Scuotto, et al. Linear generator systems for wave energy conversion[C]. Proceedings of the 7th European Wave and Tidal Energy Conference, Porto, Sept. 2007.
- [3] Peter Omand Rasmussen, Torben Ole Andersen, Frank T Jorgensen, et al. Development of a high-performance magnetic gear[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2005, 41 (3): 764-770.
- [4] 唐任远. 现代永磁电机: 理论与设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1996.
- [5] Atallah K, Howe D. A novel high-performance magnetic gear[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2001, 37 (4): 2844-2846.
- [6] Atallah K, Calverley S D, Howe D. Design, analysis and realization of a high-performance magnetic gear[J].