



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 106917720 A

(43) 申请公布日 2017. 07. 04

(21) 申请号 201510988085. 3

(22) 申请日 2015. 12. 25

(71) 申请人 上海稳得新能源科技有限公司  
地址 200433 上海市杨浦区营口路 825 号  
605 室

(72) 发明人 於岳亮 於宙 瑞秋

(51) Int. Cl.

F03D 3/06(2006. 01)

F03D 3/02(2006. 01)

F03D 9/25(2016. 01)

F03D 15/20(2016. 01)

F03D 80/70(2016. 01)

F03D 7/06(2006. 01)

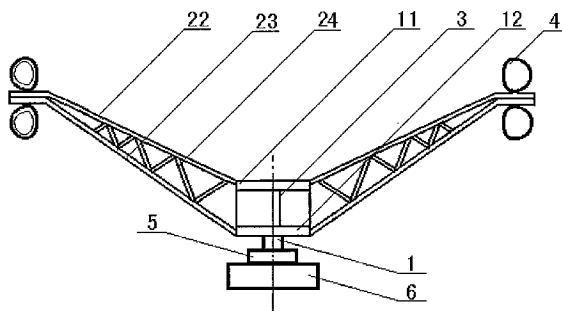
权利要求书1页 说明书11页 附图7页

(54) 发明名称

强固风叶磁悬浮大型垂直轴风电系统

(57) 摘要

本发明的大型垂直轴风电系统,所述涡轮机为 10MW 级或以上功率级超大型机组,主风叶由支撑叶片的二叶片双臂达里昂、萨沃纽斯、风球等复合而成,风球解决了空气动力学制动的难题,发电机采用永磁直驱,整个轴系采用无需额外磁体的磁悬浮弹簧结构,是目前国内外结构强度最高、发电效率最高、安全性最好、工业化覆盖面最广的风力涡轮发电机组。



1. 一种由大型垂直轴涡轮机和发电机、变流器组成的风电系统,其特征是,涡轮机组由主轴(1)、双臂翼型结构达里厄风机(2)、萨沃纽斯风机(3)和远端风球风机(4)复合而成;双臂间有支撑风叶,支撑风叶本身是升力型风叶,也是增强双臂翼刚度和强度的结构件;远端风球(4)为可转动型风轮机结构,风球工作位置时机组可产生相加的复合力矩,反转后的风球则使驱动力矩反向实现空气动力学制动。

2. 根据权利要求1所述的风电系统,其特征是,双臂达里厄风机的全部叶片都为翼型;叶片的远端,由上叶片(22)通过端部叶片(21)连接下叶片(23);而叶片近端连接为,其上叶片(22)连接于萨沃纽斯风叶的上端固定架(11),其下叶片(23)则连接于萨沃纽斯风叶的下端固定架(12),他们的连接点相互交错,即如果他们的上叶片(22)连接于萨沃纽斯风叶的上端固定架(11)的一条对角线,则他们的下叶片(23)连接于萨沃纽斯风叶的下端固定架(12)的另一方向的对角线;上下叶片在水平投影和垂直投影中呈现双三角形结构。

3. 根据权利要求1或权利要求2所述的风电系统,其特征是,安装在轴心处的萨沃纽斯风机总成(3),包括了上端固定架(11)、下端固定架(12)和二一个半圆柱形叶片;萨沃纽斯风机的二个半圆柱形叶片反向对称布置、分列在主轴(1)两边,并牢固植入两端固定架;S形叶片形状为半圆柱形、椭圆柱形或流线柱型、或不对称边的升力型之一种。

4. 根据权利要求1所述的风电系统,其特征是,萨沃纽斯风叶安装布置应与达里厄风机的对称轴相互垂直,位置相互交错布置,并且使二者在同一风向下产生的力矩方向一致,且达到最佳的丰歉互补效应。

5. 根据权利要求1所述的风电系统,其特征是,将刚性帆换成支撑风叶(24),支撑风叶处于翼型结构达里厄风机(2)双臂之间,一条或多条支撑风叶将双臂风叶切割成为一个个短小三角形。

6. 根据权利要求1所述的风电系统,其特征是,达里厄风机远端采用平面连接而省却 $\Phi$ 叶片;风球(4)固定安装在达里厄远端风叶平面上下,安装方向一致;风球形状为半球形、椭球形或不对称球形。

7. 根据权利要求1、权利要求5、或权利要求6所述的风电系统,其特征是,风球(4)为可转动型平衡轴风球,风球有工作和制动两个停留位置,分别对应正常运转发电和空气动力制动工况。

8. 根据权利要求1所述的风电系统,其特征是,风电系统的发电机为直驱同步发电机,或开心式同步发电机。

9. 根据权利要求1或权利要求8所述的风电系统,其特征是,发电机为大直径永磁结构,轴承为双自由度磁悬浮弹簧结构。

## 强固风叶磁悬浮大型垂直轴风电系统

### 技术领域

[0001] 本发明属于涡轮动力机发电技术领域,具体地说,是提出一种实用的超强度结构的大功率复合型垂直轴风力涡轮发电机系统。

### 背景技术

[0002] 风力涡轮机(以下也可简称为风轮机或风机),是将风的动能转变为适合发电机轴能接受的机械能,然后带动发电机旋转发电的可再生能源动力装置。在整个风力发电过程中,涡轮机的产能是第一位重要的。

[0003] 在现有广泛使用的水平轴涡轮机中,产业实践证明,单机功率的增大,有利于降低单位功率装机容量的成本和风力发电的度电成本。因此,单机额定功率容量不断增大,水平轴涡轮机的单机功率已普遍从上世纪末的兆瓦(MW)级升高到目前的2~3兆瓦级,目前研发机组4~6兆瓦级,远景瞄准10~15兆瓦级的目标,这是近期来风电技术发展演进的总趋势。

[0004] 在垂直轴涡轮机领域,超大功率风力发电机的研究也方兴未艾。英国Arup公司推出的AerogeneratorX设计,将达里厄取下半段,然后在风叶顶端加上称为刚性帆的端部风叶,新构成的一种变相达里厄垂直轴涡轮机,设计额定功率10MW,额定转速3转/分。

[0005] 针对其不足之处,中国发明专利申请201410048976.6《10MW级空气动力制动的垂直轴风电系统》,对AerogeneratorX设计作了以下改进:

[0006] 1、将单臂改变为立体双臂;

[0007] 2、将刚性帆改成风杯;

[0008] 3、将风杯做成可转变角度,以获得空气动力学意义上的涡轮动力机械的制动能力。

[0009] 经以上改进后,仍存在缺点还需作进一步改进,如由于风叶很长,叶臂的挠度太大、刚性不足,叶片在强风中很容易产生振动,因而可能妨碍涡轮机的正常运行或产生巨大噪音。

### 发明内容

[0010] 本发明要解决的任务是,针对以上列举的现有超大型涡轮机风电系统的各种技术难点,提出新的整体解决方案,本方案包括了复合型高强度结构的风轮机、磁悬浮轴系,并综合风轮机的空气动力制动结构、发电机设计等多个子系统的技术方案。

[0011] 方案首先采用立体结构二叶片双臂风叶和短主轴来增强涡轮机叶片的结构强度刚度、降低结构成本,使涡轮机组有更高的抗强风能力,同时可以延伸机组的切出风速,增加机组在高风速区的截风能量;其次通过多种复合垂直轴涡轮的合成驱动力矩,增加发电量;再通过涡轮机远端风球的反转实现空气动力学制动;最后采用发电机新技术,例如采用磁悬浮结构提高轴系效率,使机组成为动力机电系统技术的完整风电装置。

[0012] 其次,将原AerogeneratorX设计中的刚性帆搬到双臂风叶的中间,增加双臂风叶的实度,作为双臂风叶间的支撑件,减少风叶在大风中可能产生的振动。

[0013] 一种由超大型垂直轴涡轮机和发电机、变流器组成的风电系统,其特征是,涡轮机组由主轴(1)、双臂翼型结构达里厄风机(2)、主轴轴心处的萨沃纽斯风机(3)和远端风球风机(4)复合而成;双臂间有支撑风叶,支撑风叶本身是升力型风叶,与双臂风叶共同产能,也是增强双臂翼刚度和强度的有效结构件;远端风球(4)为可转动型风轮机结构,风球工作位置时机组可产生相加的复合力矩,反转后的风球则使驱动力矩反向实现空气动力学制动。

[0014] 通过本发明的各项改进,涡轮机的结构强度刚度比未改进前的风机有很大提高。支撑风叶将长长的双臂翼分割成一段段局部翼,从而增加了达里厄风机(2)的刚度,不易在大风中产生振动。同时,再增加了支撑风叶,加上复合的多结构风机增加的驱动力矩,机组的功率增大,但相比较而言的机组设计制造难度不高,成本也不大。远端风球反转后驱动力矩反向,解决了垂直轴风机的制动问题,使系统安全性得到保证。新结构发电机适合直驱,适合现场施工,避免了超高超大部件运输的难题,免除了齿轮箱的高故障率和高维护保养成本。多项新技术和新结构创新叠加在一起,使本发明的系统整机性能优越,适合工业生产,并能发挥出超大型风机的巨大经济技术优势。

### 附图说明

- [0015] 图1、传统达里厄垂直轴风力涡轮机简图。  
[0016] 图2、公开知识的创新型二叶片半臂达里厄风机外形视图。  
[0017] 图3、改进的双臂达里厄与萨沃纽斯复合风机平视结构简图。  
[0018] 图4、改进的双臂达里厄与萨沃纽斯复合风机俯视结构简图。  
[0019] 图5、几种萨沃纽斯风机S形叶片形状图。  
[0020] 图6、本发明的叶间支撑风叶二视图。  
[0021] 图7、被改进前的带远端风球复合型垂直轴涡轮机平视结构简图。  
[0022] 图8、几种风球风机形状图。  
[0023] 图9、本发明的加固风叶复合型垂直轴涡轮机平视结构简图。  
[0024] 图10、具有升力的不对称球形双风球风叶平视简图。  
[0025] 图11、具有升力的不对称球形双风球风叶俯视简图。  
[0026] 图12、本发明的开心式结构发电机半剖结构图。  
[0027] 图13、本发明的通用型发电机的磁悬浮化结构原理图。  
[0028] 图14、本发明的风电系统结构框图。

### 具体实施方式

[0029] 当前的大型量产商业风机,主流型是2~3MW的水平轴涡轮机型。水平轴风力涡轮机,通常采用细三针环氧树脂或含碳纤维加固的翼型叶片,叶片根端固定在轮毂上,通过轮毂连接到主轴,在风力作用下带动主轴旋转输出机械能,再通过发电机和变流器将机械能变成恒频恒压电能输入电网。三针式叶片采用悬臂梁结构的单端固定形式,因此,叶片结构应力大,易变形,结构强度低,受风力作用容易损坏,故强风中屡有风叶折断事故发生,这是水平轴风机最致命的结构弱点。因此,当功率增加到超大功率的10MW水平时,叶片必须采用结构强度更高的碳纤维材料,致使材料成本和工艺成本大幅升高,尤其在抵抗强烈暴风下的生存能力方面更明显不足。

[0030] 垂直轴风力涡轮机叶片可多点支撑,特别是 $\Phi$ 型达里厄风机,叶片二端点固定在主轴上,可获得足够支撑,叶片应力大大降低,涡轮机抗风能力显著增强,此外,垂直轴风机无须偏航对风,无水平轴风机偏航时的陀螺效应力矩阻碍,传动变速装置和发电机都可以安装在地面上,省却塔筒等等,优越性明显。

[0031] 垂直轴风力涡轮机有两大类——阻力型和升力型,阻力机型有平板型、风球型和S型等多种结构形式,阻力型的主轴两边风叶产生反向旋转力矩,所以必须使两边风叶的风阻力产生差异,利用阻力差产生定向旋转力矩,阻力型有较大的启动力矩,但尖速比低,在风轮尺寸、重量和成本一定的前提下,提供的功率输出低。

[0032] 升力型通常采用翼型剖面的叶片,主轴两边风叶可能产生同方向的旋转力矩,它的启动力矩较低,但尖速比可以很高,对于给定的风轮重量和成本,有较高的效率和功率输出,是大型垂直轴风机的首选机型。

[0033] 典型的大型垂直轴涡轮机是由法国工程师达里厄(Darrieus)于19世纪30年代发明的,是现代垂直轴风力涡轮机的初创者。在20世纪70年代,加拿大国家科学研究院对此进行了大量的研究,使垂直轴机成为当今水平轴风力发电机的主要竞争者。达里厄式风轮是一种升力型涡轮机装置,弯曲叶片的剖面是翼型,发展到现在有多种形态的达里厄式风力发电机,如 $\Phi$ 型, $\Delta$ 型,Y型和H型等。这些风轮机通常设计成二叶片、三叶片或者多叶片,从性能、造价等各种因素考虑,在大型机组中,二叶片的 $\Phi$ 型达里厄风机成本最低。

[0034] 图1为传统 $\Phi$ 型二叶片达里厄风机简图。图中,两片半圆弧外形风叶对称联接到主轴两边,由于采用双端连接的叶片,所以涡轮机强度和刚度优于水平轴风机单端连接的悬臂梁结构,结构应力小、形变少、强度刚度大。垂直轴风机不需要偏航对风装置,不需要塔筒,发电机可以布置在较低位置甚至可以放在地面,这可节省整机成本,对安装和保养也十分有利,以上都是垂直轴涡轮机的优点。但是达里厄涡轮机最大的结构缺点是其主轴太长,这么长的主轴,要保证涡轮机的总体强度刚度都存在难度,主轴不但制造成本很高,而且在转动过程中,如何防止晃动,也是需要颇费精力解决的技术问题。

[0035] 水平轴风机发展到MW级和数MW级,为此,各国也在探索同样功率级别的大型和超大型垂直轴风机。经过不断的探索努力,英国Arup推出的AerogeneratorX设计,将达里厄取下半段成为主风叶,然后在风叶顶端加上称为刚性帆的端部风叶,所构成的一种变相达里厄垂直轴涡轮机,设计额定功率10MW,额定转速3转/分。

[0036] 从结构物理学角度看,该英国设计,是对法国达里厄原型进行了重大创新,相当于将达里厄 $\Phi$ 型机省略上半段而截取下半段所形成的一种简化形式,从而去除了冗长的主轴,经过这样一种简化,昂贵难做的主轴就被彻底取消了,根据该公司发布的参考图,分析该机组的外形视图见图2。

[0037] 图2为公开知识的创新型二叶片半臂达里厄风机外形视图。

[0038] 从图2中,可大致分析其基本结构为,在方型(也可以是圆形)基础平台上布置有发电机和机舱,发电机轴上有一个扁平Y形轮毂,Y形轮毂上端的V字形二叉插入或安装入两片主风叶,主风叶两远端分别安装有刚性帆,受风力作用,主风叶和刚性帆产生旋转力矩。轮毂下端连接主轴,主风叶为翼形,二叶片以轴为中心对称分布。受风力作用,两风叶在同方向的风中产生相加的力矩,两力矩形成共同的驱动力推动涡轮机和发电机旋转。

[0039] 按以上分析,AerogeneratorX设计在取得省略主轴优越性的创新点上确实可圈可

点,有显著进步。但是也应该看到,在克服一个缺点的同时,另一个缺陷又冒了出来,那就是风叶的悬臂梁结构又重新出现在新设计中,这就又重复了水平轴风叶的悬臂梁结构,复现了强度刚度低这一大缺陷。

[0040] 本发明是在法英两国技术成果的基础上所作的系统改进,首先采用双臂达里厄风叶结构,以克服其悬臂梁结构的缺陷,创造出一种更坚固高效实用的超大型垂直轴风力涡轮机。双臂达里厄风叶,就是将原有的单臂风叶改变为双臂风叶。双臂的近端连接于短主轴上下前后不同位置,形成牢固的双三角形结构。

[0041] 双三角形双臂结构达里厄风机的下叶片和上叶片在远端相连接,连接的方式可以采用特制的连接件的永久性固定连接方式,也可以采用在二叶之间接触平面上的紧固件可拆卸连接方式。上下叶片以双臂风叶的结构形式连接后,两张叶片可以相互依靠支撑以增加强度刚度,克服单端连接悬臂梁结构的缺陷,两叶片的近端则连接在主轴(1)的下端和上端,成三角形相互支撑的态势。整个风机有两片双臂风叶,每个双臂风叶有上下两张叶片,包括叶片及其作为远端连接件的端部 $\Phi$ 叶片都为翼型,都可通过升力获取风中的动能,端部 $\Phi$ 叶片有如单独的连接件,其尺度相当于一个百kW级的 $\Phi$ 型二叶片达里厄风机,但由于其远离轴心,力臂长,力矩更大,所以功率可增加到百kW级的水平。从图中可以看出,所设计的风叶由单片改为双片后,恢复了基本达里厄风叶的强度刚度,既是对水平轴风机悬臂梁结构的改进,同时,二张风叶都参与截风产能,达里厄风机的风叶长度可能减缩,长主轴也大为缩短。可见,本改进既克服了水平轴风机或AerogeneratorX设计叶片悬臂梁结构强度刚度不够的缺点,又克服了达里厄 $\Phi$ 型风机长主轴晃动和制造成本高的缺点。

[0042] 据公开资料分析AerogeneratorX设计,其叶片长度约在226米左右,这么长的叶片,可采用大型飞机机翼的制造方法,在工厂里分段制造后,运抵现场拼接成为一体,也可在现场按建筑施工的方式,在平地上制造整体骨架建造,然后覆盖蒙皮成型后,吊装就位。

[0043] 双臂达里厄风机的上下叶片可以采用特制的连接件的永久性固定连接结构,也可以采用在二叶之间接触平面上的紧固件可拆卸连接结构。

[0044] 为解决达里厄风机起动力矩不足的问题,本发明又在轴心处增加S型风叶风机。S型风叶风机又称萨沃纽斯型(Savonius)垂直轴风机(3),具有部分升力,但主要还是阻力型,萨沃纽斯装置有较大的启动力矩,在本发明的短主轴双臂达里厄风叶结构轴心区增加S型风叶,可有效解决垂直轴风机的起动问题。

[0045] 萨沃纽斯风机总成(3),包括了上端固定架(11)、下端固定架(12)和二个半圆柱形叶片;萨沃纽斯风机安装在轴心处,二个半圆柱形叶片反向对称布置、分列在主轴(1)两边,并牢固植入两端固定架;叶片与主轴间留有足够间隙,以使进入半圆柱内的风流能自由流出。

[0046] 增加萨沃纽斯风机有三个原因,第一个原因是需要解决达里厄垂直轴风机的起动力矩不足的问题,第二个原因是需要克服二叶片达里厄风机在转动过程中力矩的大幅波动问题,第三个原因是为了增加机组总功率。

[0047] 由于二叶片的达里厄风机结构,在风向风速一定时,涡轮机运转过程中由风能所产生的旋转力矩是随叶片与风向所处角度位置而不断变化的,当风机的叶片中轴线与风向垂直时,力矩最大;当风机的叶片中轴线运转到与风向平行位置时,涡轮机所产生的力矩最小,也就是说,在该位置时,起动力矩也几乎为零。对萨沃纽斯S形叶片而言,S形叶片风机也

存在运转过程中由风能所推动的旋转力矩不断变化的情况,但当双臂达里厄风叶与S风机叶片的对称轴成直角安装、位置相互交错布置时,即在双臂达里厄风叶由风推动的力矩为最小位置,恰好是S形叶片风机风推动力矩最大位置;同理,在双臂达里厄风叶风机风推动力矩最大位置,恰好是S形叶片风推动力矩最小位置。也就是说,二者的对称轴相互垂直且力矩方向一致时,就能使二者在同一风向下产生的力矩方向一致,且达到最佳的丰歉互补效应,能使涡轮机系统的总推动力矩较稳定并趋于平衡。双臂达里厄与萨沃纽斯复合风机平视结构简图见图3。

[0048] 本发明对双臂达里厄风机所做的进一步改进,是为进一步提高其强度刚度,方案是将由上下风叶和主轴构成的单三角形结构,改变为由达里厄风机的上下风叶、萨沃纽斯风机的上下端固定架和主轴构成的双三角形结构。其具体结构为,双臂达里厄风机的远端,由上叶片(22)通过端部Φ叶片(21)连接下叶片(23)而成为一个整体风叶,而双臂达里厄风机的叶片近端连接为,其上叶片(22)连接于萨沃纽斯风叶的上端固定架(11),其下叶片(23)则连接于萨沃纽斯风叶的下端固定架(12),而且他们的连接点也是相互交错的,即如果他们的上叶片(22)连接于萨沃纽斯风叶的上端固定架(11)的一条对角线,则他们的下叶片(23)连接于萨沃纽斯风叶的下端固定架(12)的另一方向的对角线上。这样就使得主轴(1)、牢固连接于主轴的两块固定架(11和12)和上下叶片(22和23),构成具有坚固结构强度的双三角形的结构,即每一张达里厄风叶,通过上下叶片、固定架和主轴组成的一体结构,在水平投影和垂直投影中都呈现三角形,双三角形结构比单三角形结构有更大的抵抗风推力的结构强度。由于同一臂上的两叶片高度不同,所以不会相互阻挡迎风、阻碍从风中截获能量。

[0049] 本发明的双臂双叶片结构反映在水平投影和垂直投影面都呈现稳固的三角形结构,这样一种结构能有效抵抗来自垂直方向和水平方向的外力作用,降低叶片应力和形变。例如,水平面投影的三角形结构可以抵抗风推力影响,增加风推力下的结构强度,而垂直面投影的三角形结构可以抵抗叶片重力影响。所以说,本发明的作为主力产能的双臂双三角结构达里厄风机具有比现今任何一款传统水平轴涡轮机或垂直轴涡轮机高得多的结构强度和刚度。在高结构强度的基础上,就可以扩展风力发电机的工作风速范围,例如,可以把涡轮机的切出风速从一般的15~20米/秒提高到20~25米/秒,甚至25~35米/秒,从而扩展涡轮机的产能风速范围,从高风速风中获取更多的能量。

[0050] 图3和图4就是本发明所改进的双臂双三角形风叶达里厄与萨沃纽斯复合风机平视和俯视结构简图。

[0051] 图3中,发电机(5)安装在基础(6)上,主轴(1)通过上下轴承自由转动,轴承座安放在轴心(10)上,轴心埋入底座或基础。如果采用无齿轮箱直驱方案,则主轴(包括涡轮机轴和发电机轴)为一体结构。

[0052] 图4为改进的双臂达里厄与萨沃纽斯复合风机俯视结构简图。简图为去除上端固定架所能观察到的结构。从图4中可以分析得出,如果风从图中水平方向吹入,则达里厄风机所获得的力矩很小,但是萨沃纽斯风叶所产生的力矩很大;如果风从图中垂直方向吹入,则达里厄风机所获得的力矩很大,而萨沃纽斯风叶的力矩可能最小。因此,萨沃纽斯风机与达里厄风机的对称轴相互垂直安装并且使二者在同一风向下产生的力矩方向一致,以达到最佳的产能互补效应。安装应使萨沃纽斯风机与达里厄风机各自产生最大力矩或最小力矩

的风向角相互交错,例如,在 $0^{\circ}$ 或 $180^{\circ}$ 方向的风可使萨沃纽斯风叶产生最大力矩,而 $90^{\circ}$ 或 $270^{\circ}$ 方向的风则可使达里厄风机所获得的力矩最大。二者的对称轴相互垂直且力矩方向一致时,就能产生最佳的互补效应,能使涡轮机系统的总推动力矩趋于稳定和平衡。

[0053] 图5为几种萨沃纽斯风机S形叶片形状图。S形叶片形状对于萨沃纽斯风机的截风效率、运行转速有很大影响。图5仅为S形叶片的结构形状的几种简要例子,不代表全部可能的设计案例。由于S形叶片的大小和形状的产能效率,将决定该种涡轮机从风动能中获取所转化为机械能的数量,所以其设计的要求很高。特别是形状,在一定的材料成本基础上,应该根据空气动力学设计计算出S形叶片形状和大小,设计计算水平的高低至关重要,首先要考虑他们所受到的风推力,推力越大,所获风能也大,其次考虑风阻力,通常如果一边叶片受到风推力,则另一边叶片必定受到风阻力,二者之差才能形成驱动力矩。最简单的叶片形状是半圆柱形,如图5a)所示,半圆柱形叶片可以用最省的材料得到最大的风推力,但其风阻力也很大,所以并不是最佳的叶片形状。图5b)为椭圆柱形或流线柱型叶片,由于流线柱型叶片的风阻力较小,但风推力却与流线形状无关,所以其风推力与风阻力的差值增大,截风能力优于半圆柱形。图5c)为不对称边形的S形叶片,利用不对称边产生的升力,可以更多地增加S形涡轮机的升力力矩,提高风能转化效率。由于S形叶片兼具阻力型和升力型的两种不同类型的产能特性,所以通过理论和实验,可以设计出多种形状。本发明只能配合10WM大型机组的需要,举出三种形状的实例,不可能概括更多种类形状。

[0054] 关于S形叶片的上下端两块固定架,图4中所标示的是长方形形状,在图5中显示为三种不同的形状,例如,图5a)和图5c)为椭圆形,而图5b)为根据特定S形叶片的不对称柱形,其材料成本最低。当S形叶片的形状和位置确定后,就可设计出固定架的确实形状,从节约材料、减轻整机重量的目标出发,固定架也可采用其他结构件,例如非整块的固定架。

[0055] 由于固定架不单是萨沃纽斯风机S形叶片的支架,也是主轴与达里厄风叶的近端连接件,在传递萨沃纽斯风机力矩的同时也传递着达里厄风机产生的力矩,所以其总体结构强度,安装固定和连接方式对整机强度有重大影响。考虑到长方形形状加工方便,所以图中以长方形形状标示。但是采用长方形后,与叶片的连接是斜面,安装并不方便。本发明建议采用多边形的设计,使得固定架与叶片的连接是一个正交的平面,可能更好,有待叶片设计确定后再确定固定架的具体结构形状。

[0056] 在AerogeneratorX设计中的风叶顶端,有一个称为刚性帆的端部风叶。在本发明中,则将刚性帆改变成支撑风叶的形式移动到双臂达里厄风叶之间,在能产生更多能量的前提下,又兼作叶片的支撑件,进一步增加涡轮机叶片的刚度,使之在大风中不易发生振动。而原有刚性帆的端部位置,则以远端风球代替。

[0057] 图6为本发明的叶间支撑风叶示意图。图中,支撑风叶(24)将硕长的双臂风叶切割成为一个个短小三角形,使作为达里厄风机涡轮机主叶片的强度刚度得到提升,防止了大风对叶片的机械冲击或致振力的作用,也扩大了系统工作风速范围,提高了系统功率容量。支撑风叶属于升力型结构,是将刚性帆换成支撑风叶(24)的结果,一条或多条支撑风叶处于翼型结构达里厄风机(2)双臂之间,将双臂风叶切割成为一个个短小三角形,所以支撑风叶既能提高达里厄风机的强度刚度,本身也能截获风中能量。

[0058] 在本发明中,达里厄风机的风叶的顶端处,固定安装一个风球,总计两个风球对称分布。风球从风中截能的原理,简要叙之,可以从风量计中得到启示。



[0059] 图7为被改进前的带远端风球复合型垂直轴涡轮机平视结构简图。图中达里厄风机远端采用平面连接而省却 $\Phi$ 叶片,风球(4)则固定安装在达里厄远端平面上,安装方向相同。

[0060] 风球的对称轴与达里厄风机风叶的中轴线接近直角相交但不宜采用直交,因为直交后的达里厄风机风叶与风球受风向变化的受力状况完全相同,达里厄风机和风球风机所产生的合力矩不易越过零力矩风向,相交一个小角度就可以避免二者共同的零力矩区,所以建议不采用直交布置。另外,风球风机与达里厄风机没有力矩补偿作用,这一点与萨沃纽斯风机和达里厄风机之间的关系不一样,所以风球和萨沃纽斯风机二者不能相互取代。由于萨沃纽斯风机处于轴心位置,力臂短,而风球处于风叶外端,力臂特别长,所以用相同的材料成本的话,风球风机对机组输出功率的贡献比萨沃纽斯风机大得多。当然从另一侧面考虑,在运行过程中,由于线速度不一样,风球风机的阻力也比萨沃纽斯风机大得多,所以对机组转速的负面影响也比萨沃纽斯风机大。这就需要对各部位的功率分配作合理设计安排。

[0061] 图8为几种风球形状图。风球也可以像萨沃纽斯风叶一样选取不同的形状,只要将萨沃纽斯风叶的平面柱体改为立体球体就可以了。例如球形、椭球形,或不对称球形。图8a)为半球形,相当于有一定厚度的半球,将半球的下部牢固安装在达里厄上风叶或端部 $\Phi$ 叶片上即可,半球型的端部风球材料最省,也比较容易制作。图8b)为椭球形风叶,椭球形为流线型椭球形状,椭球形状的风球风阻力较小,比半球型的端部风球有较大的阻力差,效果较好,但流线形设计需要一定的精确计算。图8c)为不对称球形的端部风球,不对称球形的风球,可以利用一定的翼型边,在一定方向的风流动时同样可能产生升力,这时候的风球就可能具备既有阻力型又有升力型的特征,是一种阻力升力混合型风叶,应该具有比前二者更好的截能效果。椭球形或不对称球形的安装方法与半球型相同。

[0062] 图9就是本发明的经支撑风叶加固改进的带半圆风球的复合型垂直轴涡轮机平视结构简图。

[0063] 由于图9中的风球单边布置在风叶的上侧,受到风力的作用,会对风叶产生一个扭力,为此,可以在风叶的下部固定安装一个相同或相似的风球,成为双风球机组,双风球不但可以消除单风球的扭力,还能增加风机功率输出,可谓一举双得。

[0064] 图10就是本发明的双风球复合型垂直轴涡轮机平视结构简图。双风球复合型垂直轴涡轮机就是在单边布置风叶的下侧位置,按上侧样式固定安装一个相同或相似的风球,那么不管是受到的风推力或风阻力,上下两个风球产生的力基本一致,风的推力阻力可以叠加,扭力则可以相互抵消,达里厄风叶就不会受单边扭力作用而产生形变。同时,如将风球也改为更高效率的不对称结构,就可构筑成升力阻力复合型风机,提高风机截风效率。

[0065] 图11为具有升力的不对称球形双风球风叶平视简图和俯视简图。两图中,上叶片(22)和下叶片(23)在远端汇合,成为一个小结合平面,平面上安装双风球叶片(4),上下叶片(22、23)的近端分别连接到萨沃纽斯风叶(3)的上下端固定架(11、12),上下端固定架则与主轴(1)连接,发电机(5)安装在基础(6)上,主轴安装在轴心的轴承座上。

[0066] 对于超大型风力涡轮机而言,巨大的转动惯性在大风或强风下,靠机内制动器是很难达到有效制动目的的,因此如果超大型风力涡轮机没有空气动力制动功能的话,机组的安全性是无法得到保证的。众所周知,大型水平轴机早就解决了空气动力制动的问题,在

早期的固定桨恒速机组中,是采用叶尖扰流器实现空气动力制动功能的,在需要制动时,叶尖扰流器动作,改变桨叶角度,使与整个风叶相同的桨角位置转动到相反的桨角位置,因此形成一个相反方向的转矩,在该转矩的作用下,涡轮机才有可能减速直至停止转动,然后,也才能让机内制动器抱闸制动。进展到目前的变速变桨机组中,则直接利用桨距角的变化,就可以实现空气动力制动。所以说,水平轴机的运行安全是有保障的。但是,垂直轴机,特别是大型垂直轴机,要靠叶尖扰流器或变桨器实现制动在结构上较难实施,所以垂直轴机的空气动力制动是一个亟待解决的技术难题。

[0067] 在本发明中,不管是单风球复合型还是双风球复合型,增加风球的一个更大的原因,还在于风球可以固定安装在风叶上,也可以在风球靠风叶的一侧增加一个垂直底轴,在风叶上安装轴承,风球就成为可绕其轴旋转的结构,这样一种风球,称为可转动型风球。

[0068] 由于风球上存在巨大的风推力,所以风球转动时的风力大小将极大影响到风球转动的速度,为此,风球的转轴应设计在平衡轴的位置上,所谓“平衡轴的位置”,即在无制动约束状态下,从任意方向吹向风球的风力,使风球自行旋转的可能性最小。采用平衡轴转动的风球,可使驱动电机更容易驱动风球,不易受到风推力的影响。平衡轴的概念可以用船舶上的“平衡舵”类似的原理来理解。

[0069] 采用可转动风球,可以使风球既可以像上文所述的安装在固定位置时的风球一样,产生与其他风叶相同方向的驱动力矩,截获风能,增大机组功率,也可以使他们偏转 $180^{\circ}$ ,产生与机组其他部分相反方向的力矩,从而成为一种阻力矩,阻力矩可以使机组迅速减速,当阻力矩足够大时,在阻力矩的作用下,机组能很快停下来。这就解决了本发明的复合型风力涡轮机组的制动问题。可转动型风球的作用相当于水平轴涡轮机中的叶尖扰流器,当需要制动时,将风球转向就可以实现了。

[0070] 风球转动可以有两种方式,分别称为直接驱动式和脱扣释放式。风球有两个位置,一个是工作位置,一个是制动位置,风球必须择一停留在其中一个位置上。风球在不转动时,通常由抱闸装置制动,以防止风力作用下产生晃动,只有在转动时,才使抱闸装置松开,允许其转动。

[0071] 所谓直接驱动式,就是风球的两个位置,工作位置,和制动位置,两个位置的权重相同,在安全方面是等价的。在两个位置间的转换则靠驱动电机的正反向驱动而实现。其工作方式,在风球“工作”位置,由风球抱闸装置制动成为相对固定不动的风球,然后当需要使涡轮机制动时,先使风球抱闸装置脱离制动,通入正向驱动电流,使风球转动到“制动”位置,驱动到位则撤除电流,风球制动器复进入抱闸制动。需要使风球回复正常工作位置时,同样先使风球抱闸装置脱离制动,通入反向驱动电流,使风球反向转动回复到工作位置。

[0072] 所谓脱扣释放式,就是风球的两个位置,工作位置和制动位置,两个位置的权重不同,在安全方面是不等价的,通常是制动位置的权重大于工作位置,虽然涡轮机正常运行时必须处于工作位置,但考虑到安全第一,不运行时必须处于制动位置。脱扣释放式的抱闸装置与直接驱动式相同,但涡轮机开始工作前一直处于制动状态,所以必须先使风球的抱闸装置松开,用电动机驱动风球转动到工作位置,涡轮机靠风力的作用才能起动、加速进入正常工作状态。到达工作位置后,电动机停电,但抱闸装置始终松开,待脱扣器钩动作扣住脱扣器后,抱闸装置才制动风球,不会使风球转轴制动,所以只有电动机通电与抱闸装置脱离制动同时发生允许风球转轴转动。但电动机只有一个运行方向,无须设置倒顺车接触器。一旦

涡轮机需要制动,脱扣器脱扣后抱闸装置自动松闸,风球靠蓄能自动转动回复到制动位置,同时抱闸装置也动作抱闸。脱扣器的原理类似于自动开关。

[0073] 本发明的可转动风球的制动原理,有些类似于水平轴机中的叶尖扰流器的制动扣,扰流器使叶尖的桨距角翻转,风叶总转矩降低到零,涡轮机停转。在本发明的可转动的风球中,也可以像叶尖扰流器一样设置工作位置和制动位置,制动时,风球翻转使助转力矩变为制动力矩,就可以迅速实现制动。当然空气动力制动后,还得依靠发电机主轴上的主制动器实现真正的安全制动。在主制动器合闸后,不再允许涡轮机工作转动。

[0074] 风球的驱动电动机和电机抱闸制动器安装在达里厄风机叶片远端的内部,通过电机轴上的主齿轮和与之啮合的风球轴上的从齿轮,驱动风球转动改变位置。电动机的供电电缆和控制电缆在叶片内穿越。由于以上部件都处于涡轮机的转子上,所以必须设置滑环电刷对和信号收发装置,以输送电力和信号。电动机的控制器则放置在叶片的轮毂中。

[0075] 采用本发明的可转动型风球,就解决了空气动力制动问题,实现了空气动力制动的机组安全目标。

[0076] 综上所述,风球(4)可以是单风球,也可能是双风球,其特征是,达里厄风机远端采用平面连接而省却 $\Phi$ 叶片,风球(4)固定安装在达里厄远端风叶平面上下,安装方向一致;风球形状为半球形、椭球形或不对称球形。

[0077] 本发明的传动体系不建议采用齿轮箱增速,而采用无齿轮箱直驱,发电则采用直驱多极同步发电机,该种同步发电机也有永磁型和励磁型,但没有无刷型。

[0078] 发电机处于将涡轮机的机械能转化为电能的能流链的重要环节,所以发电机也是整个风电系统中的重要部件。对于无齿轮箱直驱的同步发电机,由于10MW垂直轴复合型涡轮机的设计转速大约在1.5~3转/分钟之间,这样低的转速,发电机的体积、重量会相当大,成本也非常高,而且运输也相当不便,为此,本发明推荐采用一种新型发电机——开心式发电机。

[0079] 所谓开心式发电机,就是一种大直径的、轴心部为开放式布置的多极同步发电机。由于发电机的重量、体积、成本与其转速关系密切,原因是转速低使发电机对磁场的切割速度低,因此发电机的感应电压太小,电压与电流的乘积即发电机功率无法提高。如果发电机直径增大,切割速度相应提高,功率将跟着上升。而开心式结构的发电机增大直径后的成本,包括运输成本增加的幅度并不大,开心式发动机中部空间位置宽敞,便于散热和维护保养,此外开心式结构还有一些其他优点适合超大型垂直轴风电系统。

[0080] 图12为本发明的开心式发电机半剖结构图,图中发电机为大直径外转子型。

[0081] 从图12可以看出,涡轮机的主轴(1)同时也是发电机的主轴,主轴套在轴心(10)上,轴心的下部插入地基或地基地座中,主轴和轴心间的下轴承(13)在电机室内,上轴承在图中未标出。

[0082] 发电机(5)包括电机室(50)、转子体及磁场(51)、定子体及绕组(52)、转子滑环(53)和电机室门(54)。电机室实际上相当于一个较大的电机外壳,底部有门可供人员进入发电机内部进行维修保养。转子体上有磁极,永磁式的磁极是一块块的磁体,磁体的S极和N极按相邻间隔的方式交错布置在转子体磁轭的内侧,如果是励磁型,则磁极上镶嵌有转子励磁绕组。定子体的外圆柱面槽孔中镶嵌有电枢绕组,定子磁轭的内侧和下部为定子支架,定子支架的下端安装在地基或底座中,支架为钢结构体,也可做成圆筒型,通过结构体空隙

或筒体上的门,人员可以进入心区。电机内部空间大,有利于配置散热器件。热量由电机室顶部的热吸收器排出。

[0083] 开心式发电机也可以设计为内转子型,两种型式中都可采用永磁转子或励磁转子。

[0084] 开心式发电机的优点表现在,增大直径后的发电机电枢绕组的切割速度提高,可弥补电机速度降低的影响。例如,通常2~3MW水平轴直驱机的额定转速约在9转/分,发电机定子直径约6米,AerogeneratorX设计的额定转速约在3转/分,如果将开心式发电机定子直径设计在18米的话,二者的性状参数接近,功率可自然提高到6~9MW。或者说相当于系统内增加了一台速比为3倍的半直驱增速齿轮箱,稍将定子轴向长度提高,就可达10MW。由于现有3MW的直驱发电机因超高超宽,陆上运输已十分困难,可想而知,10MW的发电机根本无法运输,采用开心式发电机的结构,可以像水电站的发电机在现场组装一样,将发电机部件分散运输到现场组装,运输问题得到解决。虽然10MW机将来主要用于海上风电场,可以采用船运解决问题,但也不排除陆上也有许多适合10MW机使用的场所,特别是在10MW样机开发初期,必须先进行样机检测和观察使用,待通过运行试验,克服工艺缺陷后再发展成为海上产品,所以不可完全排除运输条件的制约,开心式发电机采用部件分散运输,在现场组装成整机,可有效克服运输中的困难。

[0085] 目前的直驱风力发电机,都是变速驱动发电,所产生的电能频率和电压是变化的,不能直接并网,所以必须有一个直流中间环节进行解耦,为减少直流整流电流对发电机的谐波影响,部分大型发电机不采用三相交流电制,改而采用双三相的电枢绕组。本发明中的发电机既可以采用三相电制或双三相电制,但采用先进高效的多相结构,例如五相或七相电制的电枢绕组,电气效果更好。原则上相数越多谐波频率越高,谐波的不良影响越小。但相数太多,电机的设计制造难度会增加,成本也会相应提高,而五相或七相的难度接近双三相,电气技术效果却比双三相更佳。

[0086] 转子滑环是为发电机转子和涡轮机转子供电所需,因为可转动风球需要驱动电源,涡轮机上的许多控制器和传感器都需要供电。滑环有三片,可使转子获得三相电,这样驱动电机可以使用经济可靠的交流感应电机。与滑环对应接触的电刷则安装在轴心(10)上(图中未画出)。

[0087] 由于励磁型发电机磁场需要的是可调节的直流电,而所输送到转子上的却是恒压交流电,所以需要靠安装在转子上或转子轴上的励磁控制器或称自动电压调节器AVR将交流电进行整流和调压,然后才能将励磁电流送入到转子励磁绕组。转子上所有输入输出的控制信号,包括AVR整流和调压信号、风球运转等信号,可以采用无线传输的方法通过转子上的收发信机与地面收发信机保持连续通信,也可采用光控信息传输。传输信息采用模拟量或数字量,但采用微电脑或工控机控制的数字量传输比较合适。光控信息可减少电磁干扰,抗干扰性和可靠性较高。

[0088] 本发明的变流器采用电子变流或电机变流,变流器通常以四象限的PWM或SPWM脉宽调制方式工作,既可输出有功功率,也可输出一定的无功,帮助电网维持电压稳定,因此,变流器必须符合电网并网标准,具有低电压穿越功能。按照传统,本发明可以采用AC/DC/AC电子变流器。

[0089] 为提高系统机械性能,本发明还增加了轴系的磁悬浮结构。

[0090] 图13为本发明中通用型发电机的磁悬浮化结构原理图。图中所示发电机也可采用传统的立式水力发电机的结构,凡是采用径向磁场的发电机,均可采用本发明的磁悬浮结构。

[0091] 推荐的磁悬浮结构称为磁悬浮弹簧,磁悬浮弹簧是一种半磁悬浮结构,可以消除立式发动机的重力摩擦,相对来说,风力发电机的重力摩擦大于风推力摩擦。

[0092] 其简要原理叙述如下:在传统的轴承设计中,转动部件如本文所述发电机转子和涡轮机转子的重力,是由轴承的轴向力所平衡的。假如不采用止推轴承,会认为转子必定会向下掉。但实际情况与我们的实验证实了这样一种结果,转子只稍微往下掉一点点就稳定地停住了,这一性状,就像发电机内有一个弹簧在阻止转子继续往下掉,这一结构被首次提出并应用在风力发电机中,详见中国专利授权201520534983.7,《风电机组中的磁悬浮弹簧》。

[0093] 结合图13,可明了其作用原理。图中的主轴(1)上直接附着发电机转子(51)、转动平台、平台上的各种风机和涡轮机转子(2)等构成,包含这机组全部转动体的重力,如果将普通止推轴承换成转动和轴向移动的二自由度结构。当重力作用在发电机转子上后,转子向下移动,带动转子永磁体下移,转子与定子间的磁力线被拉长,拉长的磁力线力图缩短就会产生一个向上的合力。当这种磁合力与重力相等时,则主轴不再上下移动,这是一种自适应平衡的磁悬浮力,比任何附加磁体产生的磁悬浮力更理想,因为它没有任何附加成本。

[0094] 从本质上来讲,既然轴承不再承受重力,那么由重力引起的摩擦损耗也就被完全消除。也就是说,重力通过发电机中的磁悬浮弹簧,直接转移到发电机定子,并通过发电机底座传导到基础(6)中。

[0095] 在本发明中,正如上文所述,发电机有足够强的磁场和绕组以得到效率非常高的发电性能和非常低的散热要求件,所以也有足够大的磁悬浮力托起整个风机。

[0096] 图14为本发明的风电系统结构框图。图中,由风力复合型涡轮机总成(1、2、3、4)截取风中动能,改变为涡轮机的机械能,该机械能输入发电机(5),转化为电能,由变流器(7),将电压和频率都随风速的变化而波动的交流电,变换为恒频恒压的交流电送入电网,变流器(7)是一台电力电子AC/DC/AC装置。

[0097] 本发明首先是解决了涡轮机的结构强度问题,采用达里厄、萨沃纽斯和风球三种复合型垂直轴组成协调高效的超大型风机,最后借助可转动风球实现空气动力制动。

[0098] 综上所述,本发明的大型垂直轴风电系统,所述涡轮机为10MW级或以上功率级超大型机组,主风叶由支撑叶片加固的二叶片双臂达里厄、萨沃纽斯、风球等复合而成,风球解决了空气动力学制动的难题,发电机采用永磁直驱,整个轴系采用无需额外磁体的磁悬浮弹簧结构,是目前国内外结构强度最高、发电效率最高、安全性最好、工业化覆盖面最广的风力涡轮发电机组之一。

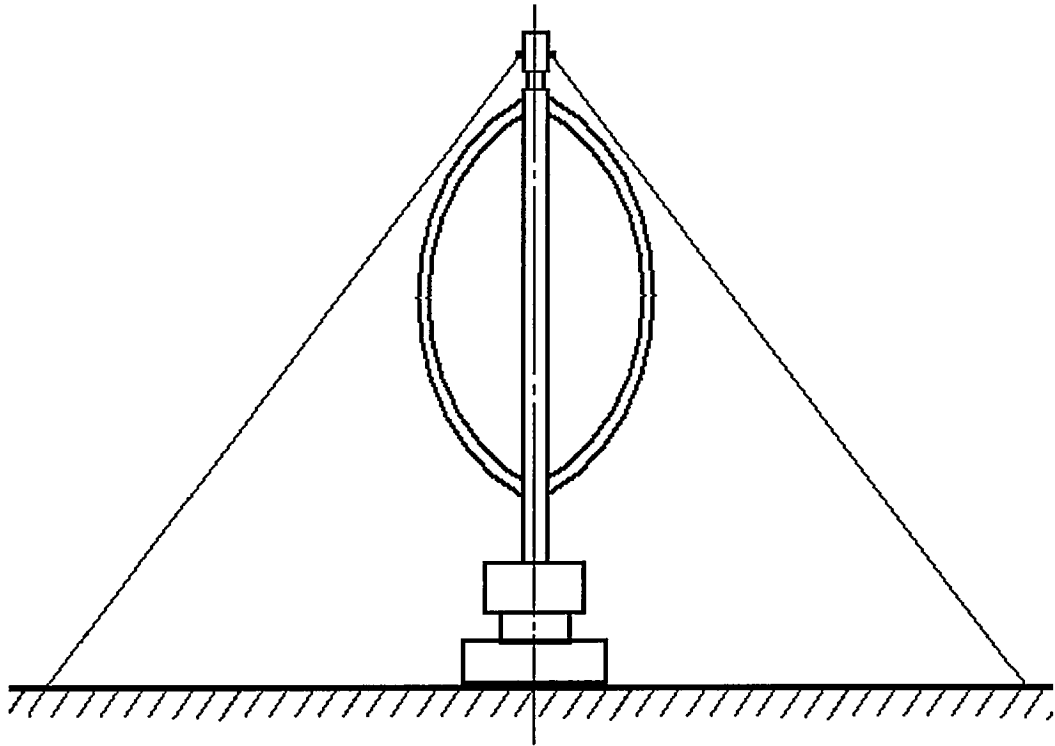


图1

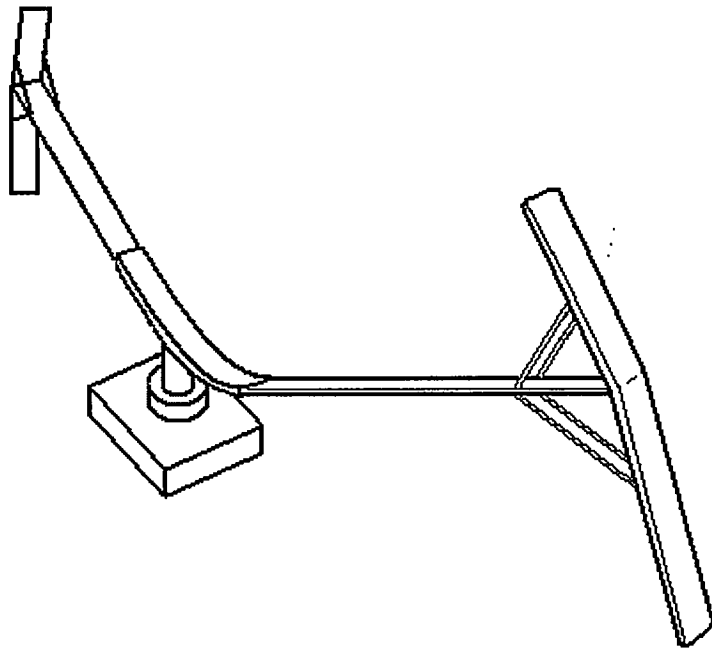


图2

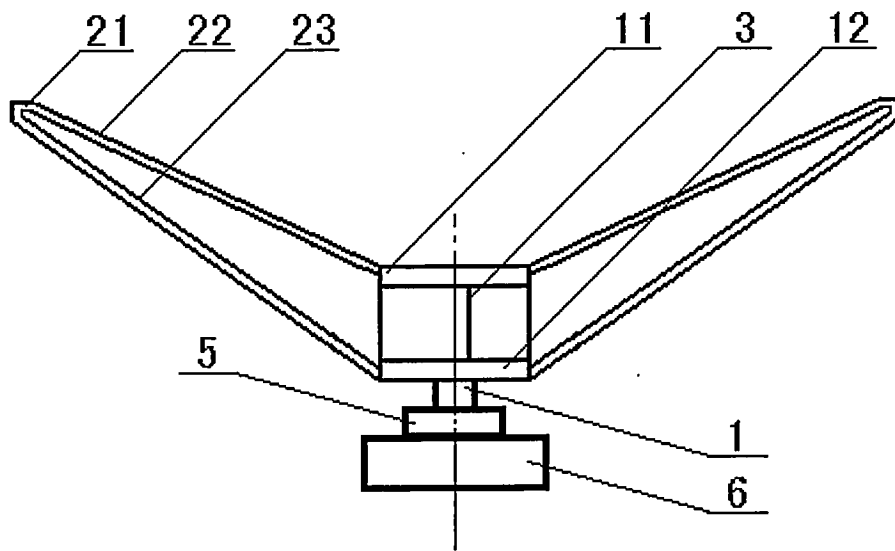


图3

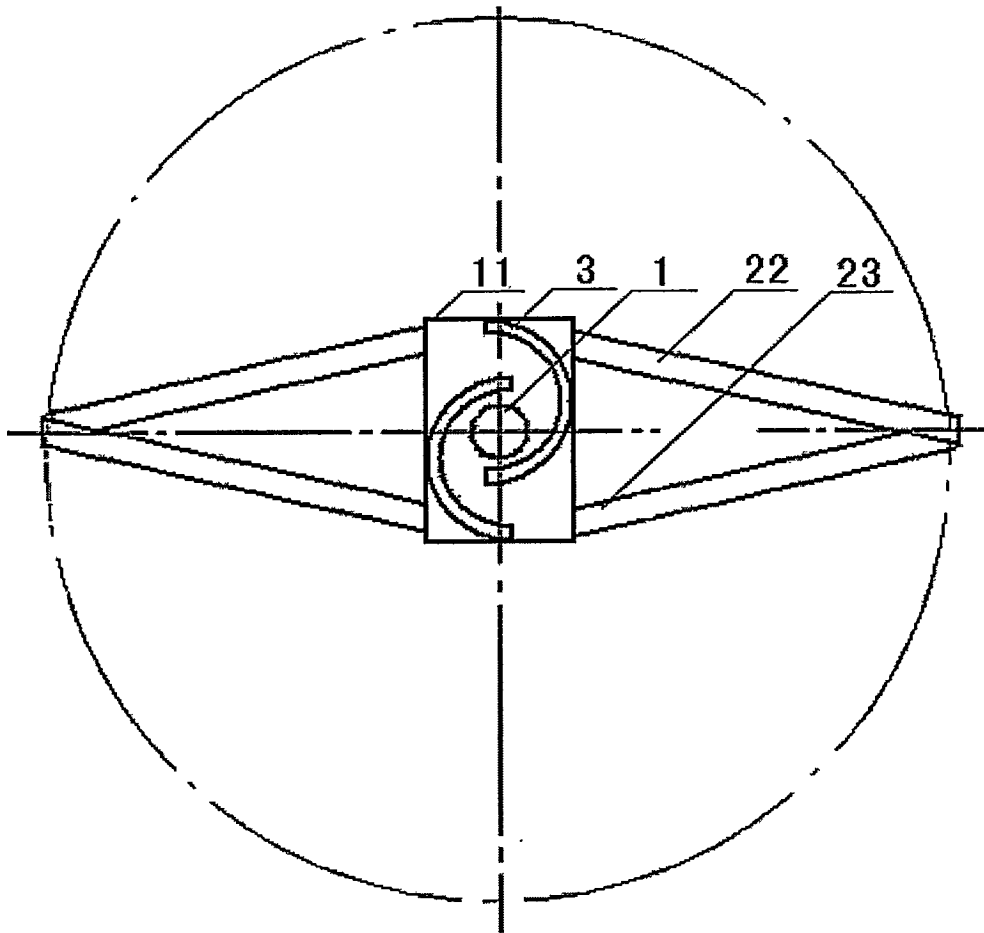


图4

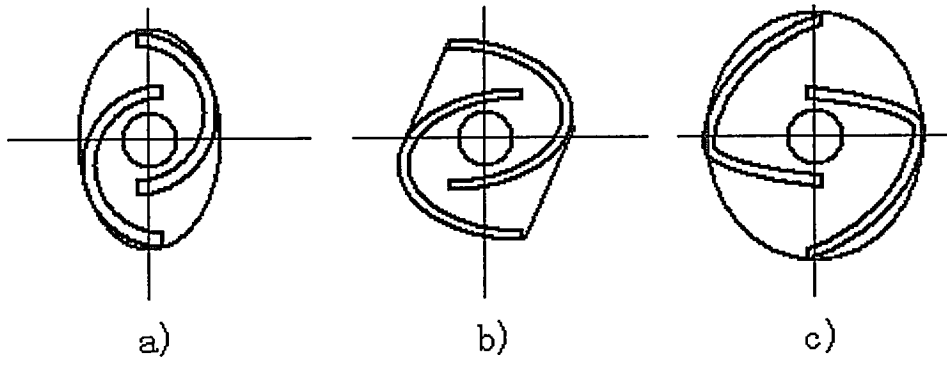


图5

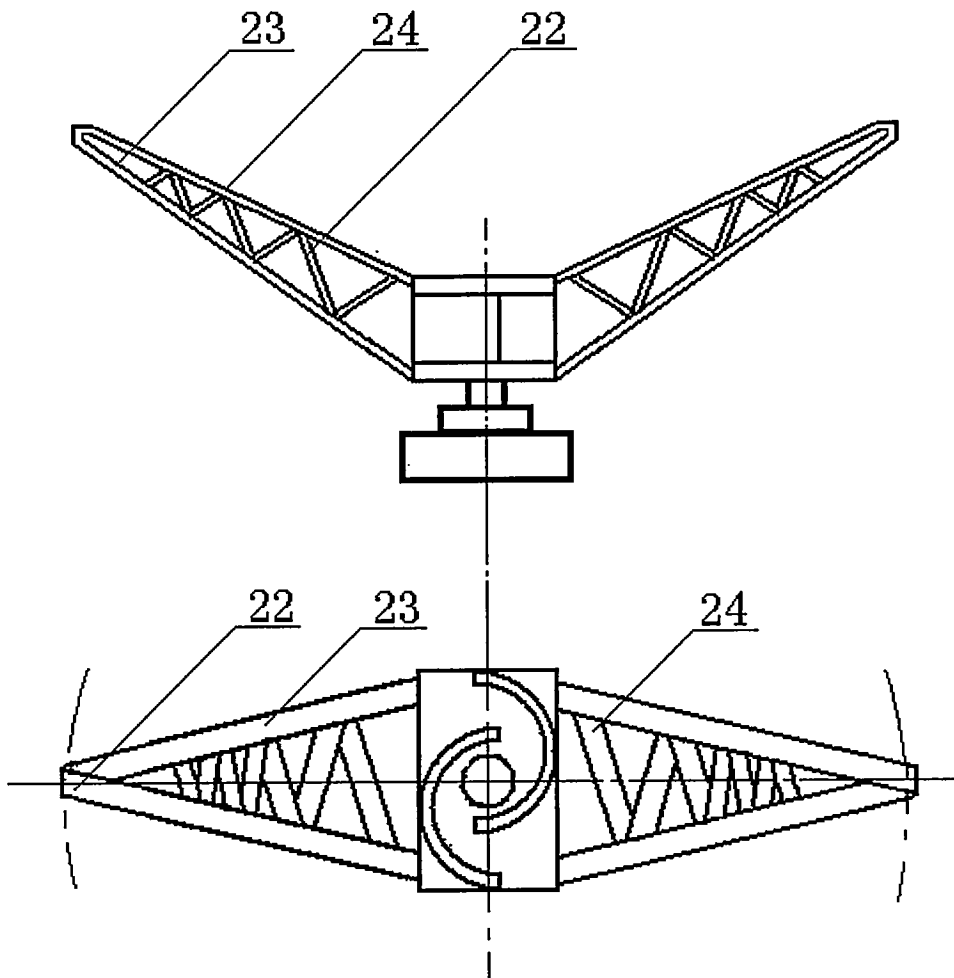


图6



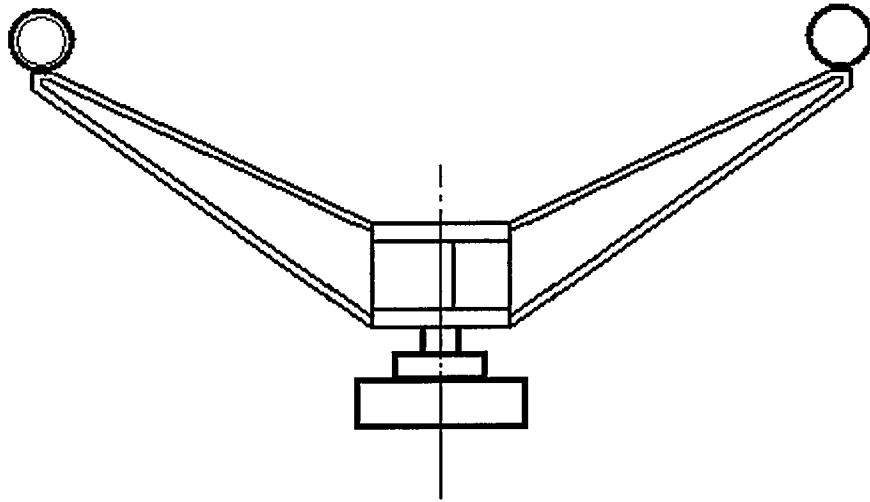


图7

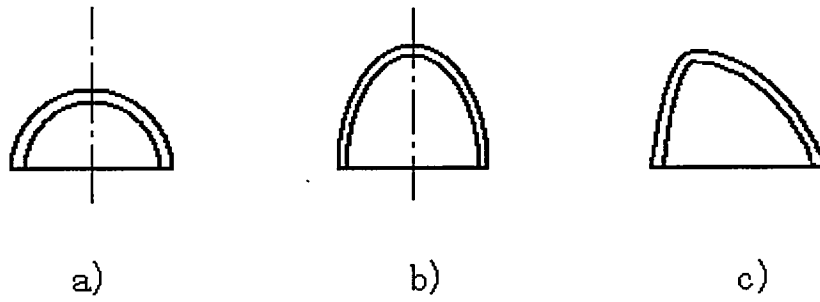


图8

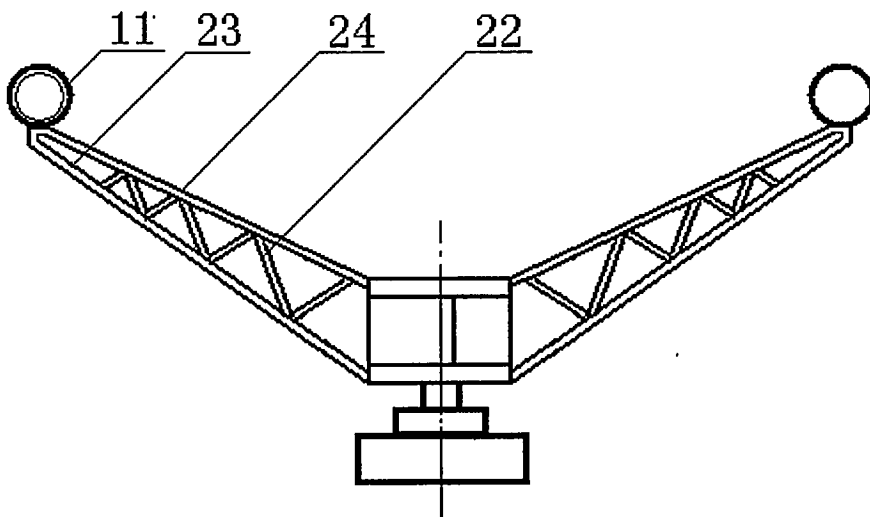


图9

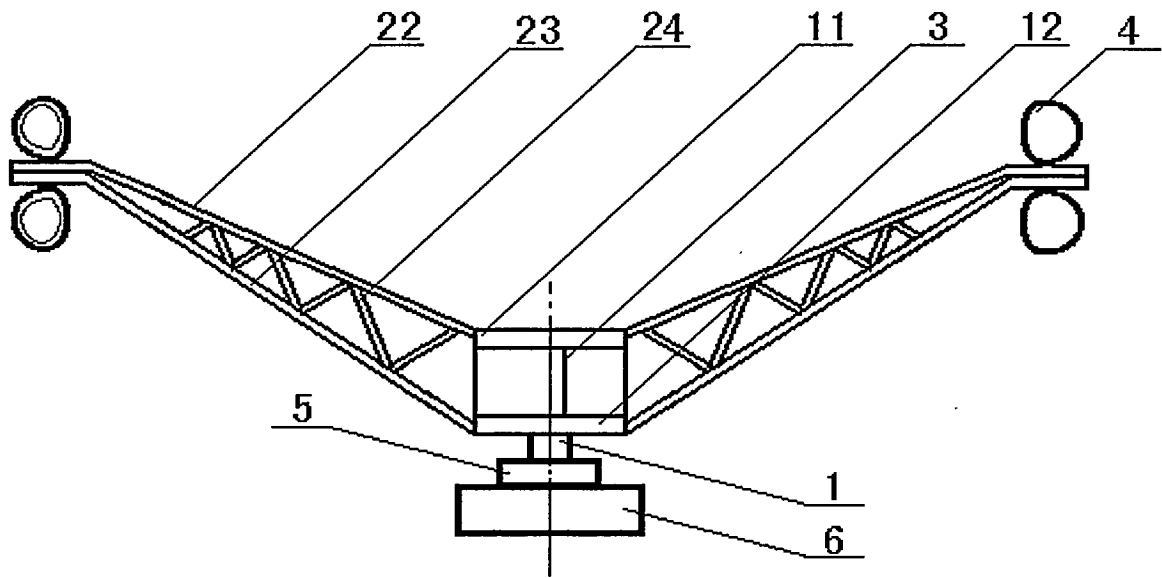


图10

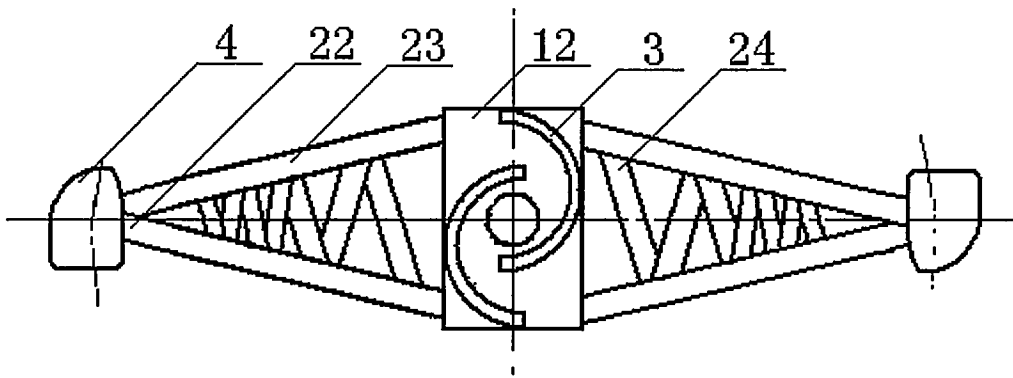


图11

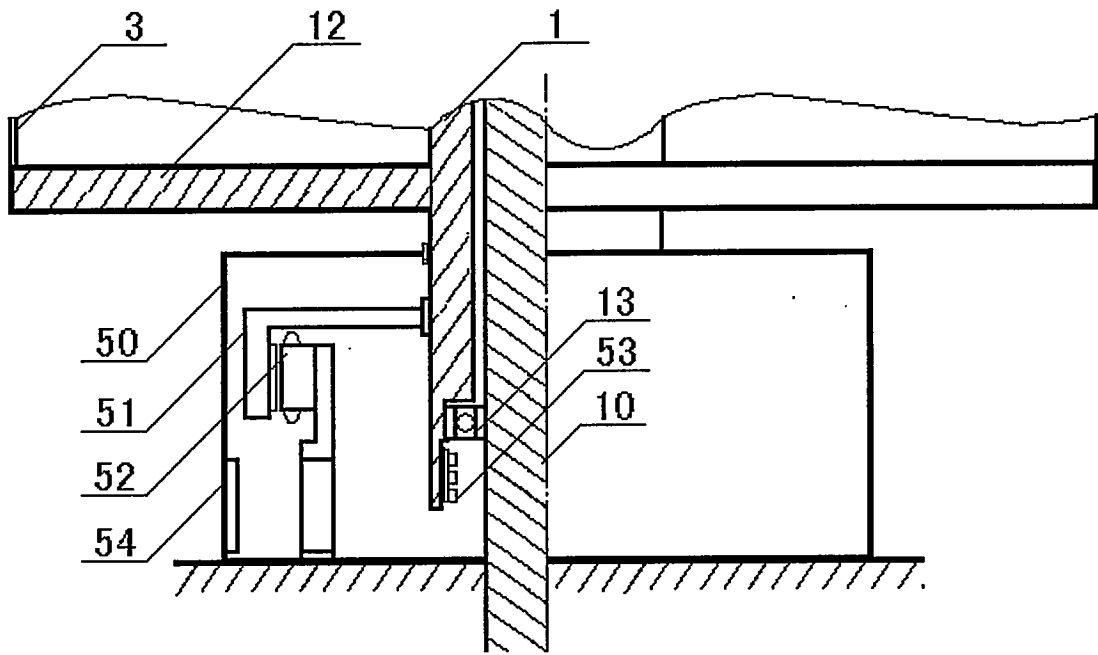


图12

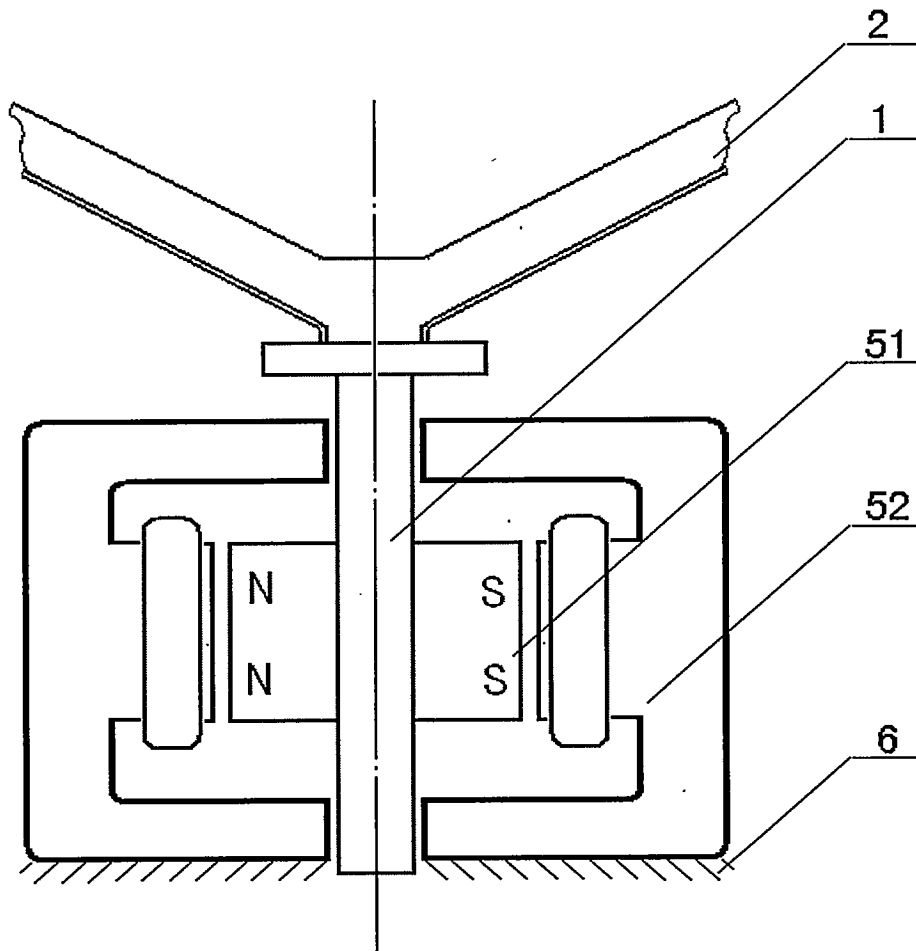


图13

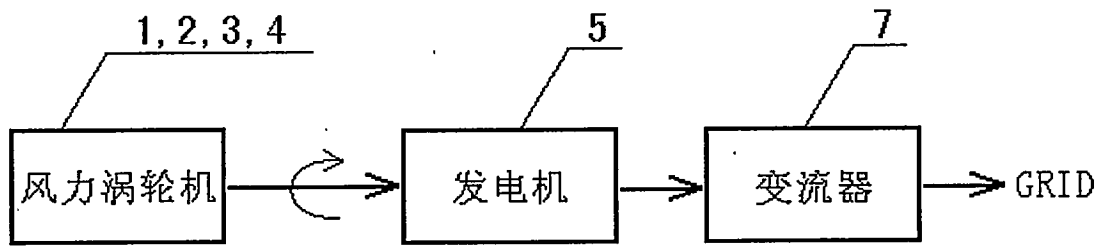


图14