(19)中华人民共和国国家知识产权局

(12)实用新型专利

(10)授权公告号 CN 201956846 U
(45)授权公告日 2011.08.31

(21)申请号 201020629876.X

(22)申请日 2010.11.29

(73)专利权人 余虹锦
地址 400041 重庆市九龙坡区石桥铺南方花园C1区科元五路100号4-3室

(72)发明人 余虹锦

(51)Int.Cl.
H02K 16/04(2006.01)
H02K 1/27(2006.01)
H02K 15/00(2006.01)
H02K 1/26(2006.01)

(ESM)同样的发明创造已同日申请发明专利

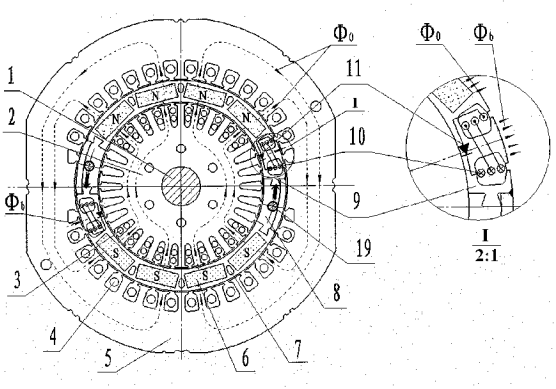
权利要求书 1 页 说明书 6 页 附图 4 页

(54)实用新型名称

一种新型结构的复合励磁无刷单相同步发电机

(57)摘要

一种新型结构的复合励磁无刷单相同步发电机，适用于汽油机发电机组作备用电源使用。其特征是：发电机采用“双定子+空心永磁转子”及“稀土永磁+感应无刷电励磁”的复合励磁结构，内、外定子铁芯2和5上嵌装单相绕组3、4，转子为永磁式空心圆桶形结构，安装于内外两定子之间，磁路为多片并排安装构成一磁极的同极性永磁体6的两异极性面通过内外气隙直接串联两台定子而闭合的复合磁路结构，各磁极间用不锈钢连接环8铆焊成圆桶形状；永磁体提供每磁极下的空载气隙磁场 Φ_0，维持负载电压稳定的强励磁场 Φb 由顺旋转方向的空心永磁转子后极靴附近的电励磁绕组10感应负载时的负序磁场并经二极管11半波整流后提供的励磁电流而产生。



CN 201956846 U

1. 一种具有高功率密度和复励稳压特性的、新型结构的复合励磁无刷单相同步发电机，其特征是：一、发电机采用“内外双定子 + 空心永磁转子”结构，内、外定子铁芯 (2) 和 (5) 上嵌装独立的单相绕组 (3)、(4)，转子为无磁轭铁芯的永磁式空心圆桶形结构，安装于内外两定子之间，与双定子间均有气隙，发电机磁路为多片并排安装构成一磁极的同极性稀土永磁体 (6) 的两异极性面直接串联两台定子而闭合的复合磁路结构；二、发电机采用“稀土永磁 + 感应无刷电励磁”的复合励磁磁路结构，发电机磁路由两部分组成：提供每磁极下空载气隙磁场 Φ_0 的多片并排安装的同极性稀土永磁体 (6) 构成永磁磁路，设置在空心永磁转子顺旋转方向后极靴附近槽中的辅助电励磁绕组 (10) 和半波整流用二极管 (11) 构成可产生强励磁场 Φ_b 的辅助电励磁回路。

2. 根据权利要求 1 所述的新型结构的复合励磁无刷单相同步发电机，其结构特征是：圆桶形的空心永磁转子异极性永磁体之间无转子磁轭铁芯联接磁路，稀土永磁体 (6) 为平板矩形结构并内嵌入由铁磁材料制成的磁极导磁环 (9) 的矩形方槽内，磁体排列方式为多片同极性稀土永磁体组成一个磁极，磁路为同极性稀土永磁体并联、异极性稀土永磁体串联的复合磁路结构，组成每个磁极的同极性稀土永磁体并联个数与尺寸决定于电机磁极数和极弧系数、发电所需的磁通量以及稀土永磁体制造工艺要求；各异极性稀土永磁体之间采用不导磁的不锈钢连接环 (8) 铆焊成整体圆桶形状，圆桶形的空心永磁转子沿轴向两端装有前后旋转支架 (14) 和 (15) 并通过滚动轴承与内定子支撑轴 (1) 连接。

3. 根据权利要求 1 所述的新型结构的复合励磁无刷单相同步发电机，其结构特征是空心永磁转子磁极导磁环 (9) 为非对称结构，在顺旋转方向的每个磁极导磁环 (9) 的后极靴附近设置有嵌线槽，槽中安装有电励磁绕组 (10)，该绕组头尾线按磁场和电流方向由二极管 (11) 连接形成半波整流电路。

4. 根据权利要求 1 所述的新型结构的复合励磁无刷单相同步发电机，其内定子绕组 (3) 和外定子绕组 (4) 接成单相交流电路结构对外电阻性负载供电，其外定子铁芯 (5) 按单相磁路原理设计成截边的腰圆形状，内外定子单相绕组分布均按 120° 相带设计布置。

一种新型结构的复合励磁无刷单相同步发电机

技术领域

[0001] 本发明是一种具有高功率密度和复励稳压特性的、新型结构的复合励磁无刷单相同步发电机，与汽油机或柴油机配套组成发电机组，可作为便携电源及备用应急电源使用。

背景技术

[0002] 目前，汽油发电机行业主流机型是以铜线和铝线为主的有刷电励磁类型发电机，功率范围涵盖 1kW ～ 20kW ；另外，对于功率为 1 ～ 5kW 的小型单相同步发电机组，还有一种采用转子励磁绕组感应定子负载电流建立的负序磁场而进行整流电励磁的无刷电励磁方式。

[0003] 采用 AVR 调节励磁电流的有刷电励磁单相或三相交流发电机是汽油发电机组的主流励磁方式，这种发电机的最大优势就是其磁场可以通过调节转子励磁电流来实现自动调整，从而使单机运行的发电机可以在空载到额定负载的全范围保持输出电压的稳定。图 5 是现有技术普遍采用的传统有刷电励磁交流同步发电机结构原理示意图，图中 :标号 4 为定子主绕组，标号 5 为定子铁芯，标号 21 为电刷与集电环，标号 22 为定子副绕组，标号 23 为 AVR 励磁调压器，标号 24 为励磁绕组，标号 25 为转子铁芯，标号 26 为驱动转轴。此种类型发电机核心部件是定子和转子各一套，其定子铁芯 5 和转子铁芯 25 上设置铜线或铝线做成的定子主绕组 4 和励磁绕组 24，其中定子主绕组 4 对外供给电力，转子上的励磁绕组 24 用来建立电机气隙磁场，使电机产生电磁感应，定、转子铁芯属于导磁部件，电励磁产生的两异极性磁极磁场通过转子铁芯磁轭部分构成闭合磁路，转子铁芯 25 固定于驱动转轴 26 上。同时，为调节磁场，发电机组还必须配置相应的定子副绕组 22、AVR 电压调节器 23、引入转子电流的电刷和集电环 21 等部件。

[0004] 图 6 是一种普遍采用的常规无刷全电励磁类型单相发电机结构原理示意图，图中 :标号 4 为定子主绕组，标号 5 为定子铁芯，标号 11 为二极管，标号 22 为定子副绕组，标号 24 为励磁绕组，标号 25 为转子铁芯，标号 26 为驱动转轴，标号 27 为电容器。在定子铁芯 5 和转子铁芯 25 上设置铜线或铝线做成的定子单相主绕组 4、副绕组 22 和励磁绕组 24，其中定子主绕组 4 对外供给电力，转子励磁绕组 24 用来建立电机气隙磁场，使电机产生电磁感应，定、转子铁芯属于导磁部件，转子铁芯固定与驱动转轴 26 上。电机空载时，转子剩磁在副绕组中逐步产生感应电势，副绕组 22 与串接的电容 27 构成单相电流回路，该单相电流将在气隙中分别产生旋转方向相反的正、负序磁场，而负序磁场将在转子励磁绕组 24 中感应两倍频率的交变电势，通过串接于转子励磁绕组两端的二极管 11 构成半波整流回路，在转子励磁回路流 过直流电流，从而产生维持空载电压 U_N 稳定的空载气隙磁场。电机负载时，定子主绕组同样流过单相负载电流，与空载时同样的原理及电磁感应过程，将在转子励磁绕组中流过与定子负载电流成正比的负载励磁电流，从而在电机气隙中产生一个补充加强了的负载磁场来维持发电机端电压 U_N 在一定范围稳定 ;其中，二极管 11 半波整流回路的接线方向决定于电机磁场 N、S 极方向和电流方向。

[0005] 以上两种全电励磁方式的发电机励磁容量较大，转子电励磁回路的损耗比例占电

机全部损耗的 55％～ 65％，因此发电机的能量效率难以提高，而且该类型发电机转子用铜量也占电机全部用铜量的 55％～ 65％，故其成本也较高，铜、铝等有色金属的资源消耗也大。我国是世界上稀土永磁材料最丰富的国家，但同时也是铜、铝等有色金属资源贫乏的国家；因此，大力发展稀土材料的应用对我国有现实的意义。随着控制技术的进步，稀土永磁电机在电动机行业驱动领域已经得到广泛应用，稀土永磁材料做成的电动机产品，其单位体积材料传送的功率密度大，电机效率高而能耗小，显示出其稀土电机巨大的优越性；但稀土永磁材料用到发电机领域却一直受到电压稳定技术的瓶颈制约，由于永磁材料制成的发电机磁场无法调节，从而导致发电机端电压控制很困难，电机带负载后电压下降很厉害，进而影响永磁发电机组的发电质量，限制了永磁材料在此类发电机上的应用范围。而且，按传统电机惯例简单地采用稀土材料代替电励磁发电机转子绕组，也并不能充分而彻底地利用稀土材料传送高能量密度的优点。因此，拓展稀土材料在独立运行的移动电源领域的应用范围就必须得解决以下技术难题：一、为充分利用稀土材料的优势，必须研究设计能传送高功率密度的永磁发电机新型结构；二、研究克服永磁电机无法调节磁场而稳定发电机电压的技术途径和有效方法。

发明内容

[0006] 针对现有永磁发电机技术存在的问题，本发明的目的在于以中小型汽油发电机组为依托，提供一种可传送高功率密度且具有复励稳压特性的、“内外双定子＋空心永磁转子”结构及“稀土永磁＋感应无刷电励磁”复合励磁方式的新型结构无刷单相同步发电机。本发明的基本构思是突破常规永磁电机异极性永磁体之间必须用铁磁材料来构成轭部磁路的传统电机理论限制，直接利用稀土永磁体两面异极性的特征，同时在内外两定子与空心永磁转子之间建立起内外两个它励气隙主磁场，其具体结构特征是：发电机采用“双定子＋空心永磁转子”及“稀土永磁＋感应无刷电励磁”的复合励磁磁路结构，内、外定子铁芯上嵌装单相绕组，转子为永磁式空心圆桶形结构，安装于内外两定子之间，磁路为多片并排安装构成一磁极的同极性永磁体的两异极性面通过内外气隙直接串联两台定子而闭合的复合磁路结构，各磁极间用不锈钢连接环铆焊成圆桶形状；发电机采用“稀土永磁＋感应无刷电励磁”的复合励磁结构，发电 机磁路由两部分组成：提供每磁极下空载气隙磁场 Φ_0 的多片并排安装的同极性稀土永磁体构成永磁磁路，设置在空心永磁转子顺旋转方向后极靴附近槽中的辅助电励磁绕组和半波整流用二极管构成可产生强励磁场 Φ_b 的辅助电励磁回路。该新型结构的永磁式交流同步发电机的空心永磁转子没有磁轭铁芯，传统电机的转子磁轭铁芯部位材料正好利用来增加内定子，从而使发电机具有功率密度大而材料消耗少的明显优势。

[0007] 为达到上述目的，以下结合附图来阐明本发明涉及的发电机技术方案和特点：

[0008] 一、图 1 是本发明涉及的新型结构的复合励磁无刷单相同步发电机的结构原理示意图，发电机为“双定子＋空心永磁转子”结构，空心永磁转子安装于内定子铁芯和外定子铁芯之间，与双定子间均有气隙，发电机磁路为多片并排安装构成一磁极的同极性稀土永磁体 6 的两异极性面通过内外气隙直接串联两台定子而闭合的复合磁路结构，多片并排安装的同极性稀土永磁体提供每磁极下能保证内外定子单相绕组感应出额定空载电压的空载气隙磁场 Φ_0，这种结构的双定子完全等同于两台发电机定子，图 3 显示了此类单相交流

同步发电机的内外双定子铁芯的立体展开结构示意图。内定子铁芯和外定子铁芯上均嵌装两套独立的绕组，两套定子绕组接成 120° 相带分布的单相交流绕组结构，空心永磁转子旋转时永久磁场将同时切割内外定子上的主绕组，从而使内外定子均可同时对外输送电功率。

[0009] 二、图 2 展示了本发明所涉及的新型结构的复合励磁无刷单相同步发电机的轴向结构装配图，图 4 为空心永磁转子与内定子装配的立体结构展开示意图，空心永磁转子沿轴向两端装有前、后旋转支架，并通过滚动轴承与内定子支撑轴连接；该空心永磁转子采用多片同极性稀土永磁体组成一个磁极的磁体排列方式，稀土永磁体为平板矩形结构并内嵌入由铁磁材料制成的磁极导磁环内的矩形方槽中，磁路为同极性稀土永磁体并联、异极性稀土永磁体串联的复合磁路结构，组成每个磁极的同极性稀土永磁体并联个数与尺寸决定于电机磁极数和极弧系数、发电所需的磁通量以及永磁体制造工艺要求，各异极性磁极之间采用不导磁的不锈钢连接环联结并铆焊成整体圆桶形状；前、后旋转支架内外适当位置设置有辐射状筋板，前旋转支架与汽油机动力输出轴连接并装配有散热风扇，以加强内定子和转子的散热效果。

[0010] 三、在图 1 和图 4 所示的示意图中，为解决永磁发电机负载时电压降过大的缺陷，本发明在空心转子磁极导磁环上设计引入了起辅助励磁的辅助电励磁极，其结构特征是空心永磁转子磁极导磁环采用非对称结构，在顺旋转方向的每个磁极导磁环的后极靴附近设置有嵌线槽，槽中安装有辅助电励磁绕组，该绕组头尾线按磁场和电流方向由二极管连接形成半波整流电路。电机负载时，定子单相主绕组流过的单相电流将在气隙中分别产生旋转方向相反的正、负序磁场，而负序磁场将在空心永磁转子的辅助电励磁绕组中感应两倍频率的交变电势，通过二极管半波整流后在该辅助励磁绕组中流过直流电流，从而产生维持负载电压 U_N 在一定 范围稳定的负载补充磁场 Φ_b。

[0011] 采用上述技术方案所达到的技术经济效果是：

[0012] 一、产品技术性能优势和效果

[0013] 本技术发明适用于功率为 1 ～ 12kW、铁芯外圆为 Φ160、Φ190 及 Φ270 等规格系列的单相汽油发电机组，利用该技术设计的发电机组可达到表 1 所述的设计性能指标，其单位材料消耗所输出的功率密度以及发电机能量转换效率明显优越于传统电励磁发电机组性能。

[0014] 表 1 发电机材料消耗、能量效率及功率输出对比表

[0015]

传统电励磁发电机主要性能指标				本发明技术的发电机主要性能指标					
输出功率 P_N	效率 η_N%	稳态电压调整率 δu_N%	铁芯外圆×铁芯长	输出总功率 P_N	外定子输出功率 P_{N1}	内定子输出功率 P_{N2}	效率 η_N%	稳态电压调整率 δu_N%	铁芯外圆×铁芯长
1kW	62～64%	≤3%	Φ160×55	1.5kW	1kW	0.5kW	70～72%	≤6%	Φ160×55
2kW	65～70%	≤2.5%	Φ160×85	3kW	2kW	1kW	72～76%	≤6%	Φ160×85
2.5kW	68～72%	≤2.5%	Φ160×110	4kW	2.5kW	1.5kW	75～80%	≤5%	Φ160×110
2.8kW	68～74%	≤3%	Φ160×120	4.5kW	3kW	1.5kW	76～81%	≤5%	Φ160×120
3kW	70～74%	≤2%	Φ190×85	5kW	3kW	2kW	80～83%	≤6%	Φ190×80
4kW	72～75%	≤2%	Φ190×125	6.5kW	4kW	2.5kW	82～85%	≤6%	Φ190×95
5kW	72～76%	≤2%	Φ190×140	8kW	5kW	3kW	84～88%	≤5%	Φ190×110
6.5kW	74～78%	≤3%	Φ198×148	10kW	6.5kW	3.5kW	85～88%	≤5%	Φ190×140
7.0kW	74～78%	≤3%	Φ198×155	12kW	7.0kW	5kW	86～88%	≤5%	Φ190×165
8.0kW	77～81%	≤3%	Φ198×165						

[0016] 本技术发明产品由于转子减少了传统转子的电励磁容量，所以空心转子励磁绕组的电阻发热损耗很小，而且桶形转子转动惯量小，使发电机机械损耗降低显著，故电机效率提高，温升得到显著下降。

[0017] 由于取消了 AVR 励磁调压器、电刷和集电环等零件，没有了传统发电机的转子零件磨损，也彻底杜绝了转子带电绕组常见的匝间短路、绝缘击穿等故障，以及 AVR 调压器电子元件失效等缺陷，从而提高了发电机的整机可靠性，而且使得用户维护及其简单。

[0018] 二、产品的经济成本优势和效果

[0019] 使用本发明技术，可以使发电机转子节约铜线成本、绝缘材料及绝缘处理工艺成本，同时减少转子电刷和集电环，单位材料消耗的综合成本比同容量铜线发电机下降 30％以上。

附图说明

[0020] 图 1 是本发明涉及的“新型结构的复合励磁无刷单相同步发电机”的结构原理示意图；

[0021] 图 2 是本发明所涉及的“新型结构的复合励磁无刷单相同步发电机”的轴向结构装配图；

[0022] 图 3 是本发明所涉及的“新型结构的复合励磁无刷单相同步发电机”双定子铁芯结构立体展开示意图；

[0023] 图 4 是本发明所涉及的“新型结构的复合励磁无刷单相同步发电机”空心永磁转子及内定子装配结构的立体展开示意图；

[0024] 以上图中：1. 内定子支撑轴，2. 内定子铁芯，3. 内定子单相绕组，4. 外定子单相绕组，5. 外定子铁芯，6. 稀土永磁体，7. 阻尼铜条与端环，8. 不锈钢连接环，9. 磁极导磁环，10. 辅助电励磁绕组，11. 二极管，13. 风扇，14. 前旋转支架，15. 后旋转支架，16. 后安装支架，17. 电机后盖，18. 滚动轴承，19. 长螺杆，20. 汽油机输出轴。

[0025] 图 5 是现有技术的传统有刷全电励磁交流同步发电机结构原理示意图；

[0026] 图中：4. 定子主绕组，5. 定子铁芯，21. 电刷与集电环，22. 定子副绕组，23. AVR 励磁调压器，24. 电励磁绕组，25. 转子铁芯，26. 驱动转轴。

[0027] 图 6 是现有技术的传统无刷全电励磁类型单相发电机结构原理示意图；

[0028] 图中：4. 定子主绕组，5. 定子铁芯，11. 二极管，22. 定子副绕组，24. 电励磁绕组，

25. 转子铁芯，26. 驱动转轴，27. 电容器。

具体实施方式

[0029] 下面结合附图及具体实施方式对本发明做进一步的说明：

[0030] 在图 1、图 2、图 3 和图 4 所展示的实施例中，本发明所述的新型结构的复合励磁无刷单相同步发电机外定子铁芯 5 和外定子主相绕组 4 与传统的电励磁同步发电机基本相同，仅定子部分尺寸和线圈参数随电机结构及永磁材料性能而有所变化，基本可沿用现成的各系列状态定子，便于系列化、标准化生产。

[0031] 本发明所述发电机与传统有刷电励磁发电机所不同的在于整机装配结构及装配工艺、空心永磁转子结构和内定子结构：

[0032] 首先，在图 2 所示的本发明涉及的发电机轴向装配结构图中，该发电机的整机结构特征是：“双定子 + 空心永磁转子”结构，其磁路连接方式为稀土永磁体的两异极性面直接串联两台定子而构成闭合磁路。这决定了该发电机的装配工艺比传统电机略微复杂，装配工艺要求也相对高些，结合图 1、图 2 和图 4 描述其装配工艺流程如下：

[0033] 第 1 步、装带风扇 13 的前旋转支架 14 于汽油机输出轴 20 上；

[0034] 第 2 步、装包括内定子支撑轴 1、内定子铁芯 2 和内定子单相绕组 3 在内的内定子组件；

[0035] 第 3 步、装包括稀土永磁体 6、阻尼条与端环 7、不锈钢连接环 8、磁极导磁环 9、辅助

[0036] 电励磁绕组 10 在内的空心桶形转子组件；

[0037] 第 4 步、装后旋转支架 15 并紧固长螺杆 19；

[0038] 第 5 步、装包括外定子铁芯 5 和外定子单相绕组 4 在内的外定子组件；

[0039] 第 6 步、装后安装支架 16 并固定内定子组件；

[0040] 第 7 步、联接内外定子引出线并装好电机后盖 17。

[0041] 第二，在图 1 和图 4 所展示的实施例中，本发明涉及的空心桶形永磁转子结构是本技术 发明的核心，其关键的技术特征和实现方法如下：

[0042] 一、在图 4 的空心永磁转子立体结构展开示意图中，空心永磁转子由稀土永磁体 6、磁极导磁环 9、不锈钢连接环 8、阻尼条及端环 7、辅助电励磁绕组 10、二极管 11、风扇 13、前旋转支架 14、后旋转支架 15 等零件组成。

[0043] 二、永磁体材料选择广泛应用的烧结钕铁硼材料，稀土永磁体设计成平板矩形结构一是为提高稀土磁性材料利用率，同时也简化稀土永磁体制造工艺，使成本适合于大批量生产，稀土永磁体 6 在装配时内嵌入由铁磁材料制成的磁极导磁环 9 的矩形方孔内，转子装配工艺简单。

[0044] 三、参见图 1，磁极导磁环 9 由内外定子落料后的圆环状边角硅钢板料冲制成冲片形状，其上分布有多个磁钢方孔、阻尼条孔、隔磁孔、后极靴部位的嵌线槽和两端与不锈钢连接环 8 铆接的燕尾，磁极导磁环矩形方槽两边硅钢材料不对称也不相等，后极靴部位设置有两个嵌线槽，装配时应根据电机旋转方向置于每个磁极的后极靴部位，片状的磁极导磁环 9 采用叠压成与内外定子铁芯等长后氩弧焊接成整体，与多片同极性稀土永磁体 6 装配后即构成一个磁极，每个磁极的同极性稀土永磁体并联个数与尺寸决定于电机磁极数和

极弧系数、发电所需的磁通量以及永磁体制造工艺要求，多片并排安装的同极性稀土永磁体提供每磁极下能保证内外定子单相绕组感应出额定空载电压的空载气隙磁场 Φ_0。

[0045] 四、参见图 4，空心永磁转子的各异极性磁极之间由两个不导磁材料制成的不锈钢连接环 8 燕尾铆合后再氩弧焊接成整圆空心桶状，并经内外圆精车到规定尺寸，以保证气隙长度。

[0046] 五、在图 2 所示的本发明涉及的发电机轴向装配结构剖面图和图 4 所示的空心永磁转子立体结构展开示意图中，沿轴向的两端前、后旋转支架 14、15 采用普通钢板或压铸铝件加工而成，用来安装固定空心永磁转子，且通过滚动轴承 18 与内定子支撑轴 1 连接，确保空心转子能正常旋转，前后旋转支架 14、15 内外适当位置设置有辐射状筋板，前旋转支架 14 与汽油机动力输出轴 20 连接并装配有散热风扇 13，以加强内定子和转子的散热效果。

[0047] 第三，在图 1 和图 4 所展示的实施例中，空心永磁转子每个磁极后极靴部位设置有两嵌线槽，槽内设置有辅助电励磁绕组 10，该励磁绕组的绕线、嵌线、浸漆与绝缘处理工艺与传统的电机绕组制造工艺完全相同，在稀土永磁体安装后该辅助电励磁绕组两端应串接二极管 11 构成半波整流回路，二极管 11 半波整流回路的接线方向决定于电机磁场 N、S 极方向和电流方向。

[0048] 第四，在图 3 所示的双定子铁芯立体结构图中，外定子铁芯 5 按单相电机磁路原理设计成截边的腰圆形状，铁芯材料采用 0.5mm 厚硅钢板叠压并氩弧焊接成整体，与传统发电机工艺一致，内定子铁芯同样采用 0.5mm 厚硅钢板叠压后与轴紧配合压入，内外定子铁芯长度完 全相等，铁芯长度取决于发电机输出功率大小；而内外定子嵌线、浸漆、检验等工艺要求也完全等同于传统的发电机绕组制造及电装工艺；内外定子绕组均接成 120° 相带分布的单相交流绕组结构。

[0049] 以上所述的仅是本发明的优选实施方式，对于本领域的技术人员来说，在不脱离本技术发明结构的前提下，还可以作出若干变形和改进，这些也应该视为本发明的保护范围，这些都不会影响本发明实施的效果和实用性。

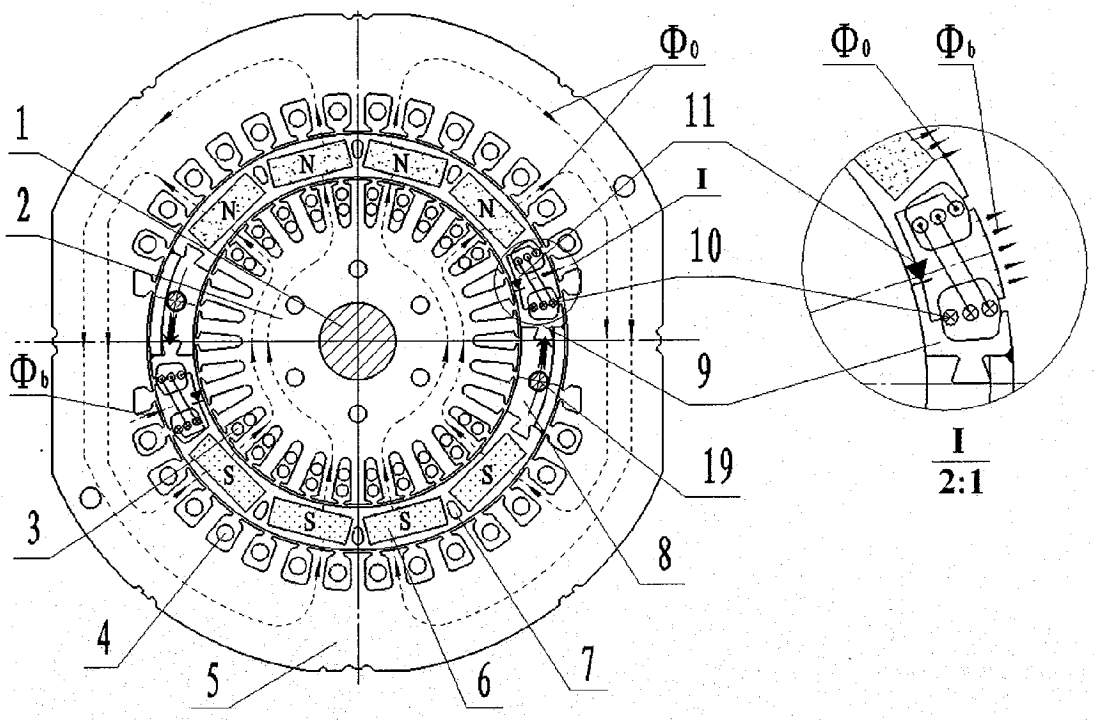

Φ0
Φb
1
2
11
I
10
9
19
8
3
4
5
6
7
N
S
I
2:1

图 1

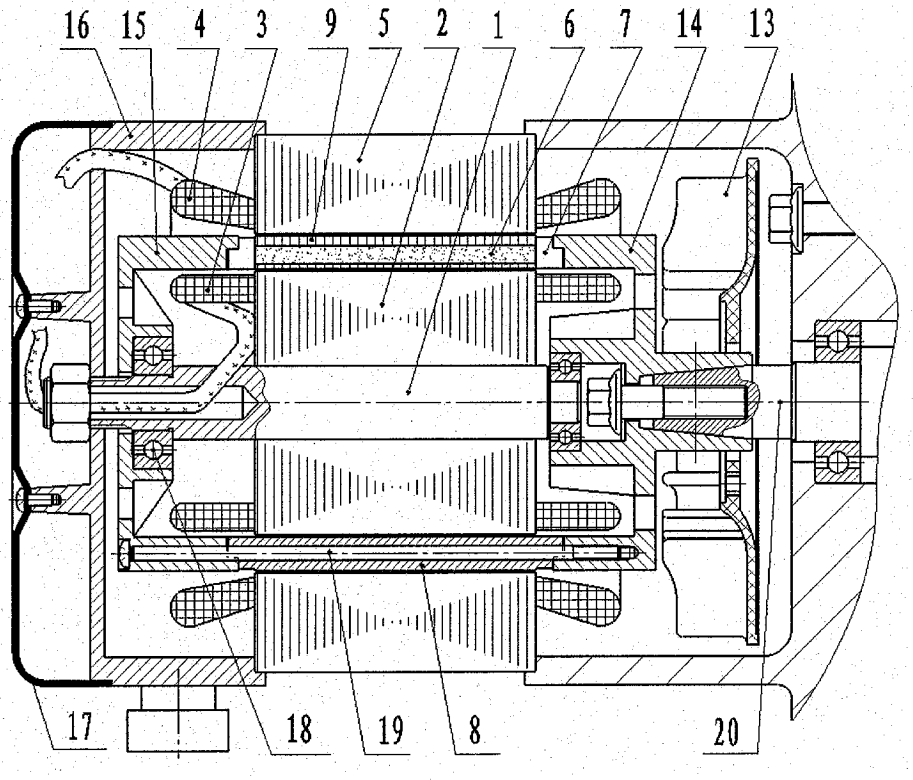

16
15
4
3
9
5
2
1
6
7
14
13
17
18
19
8
20

图 2

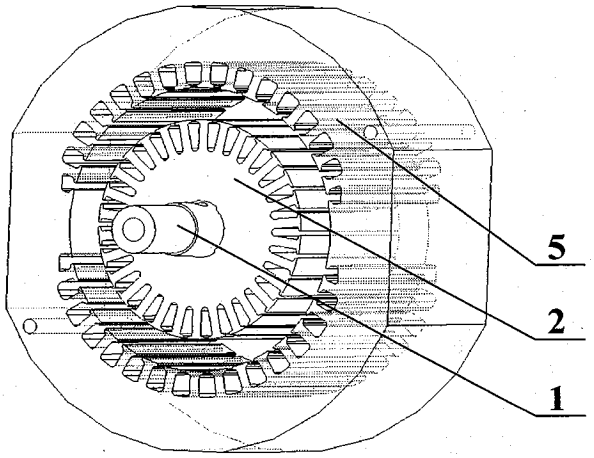


图 3

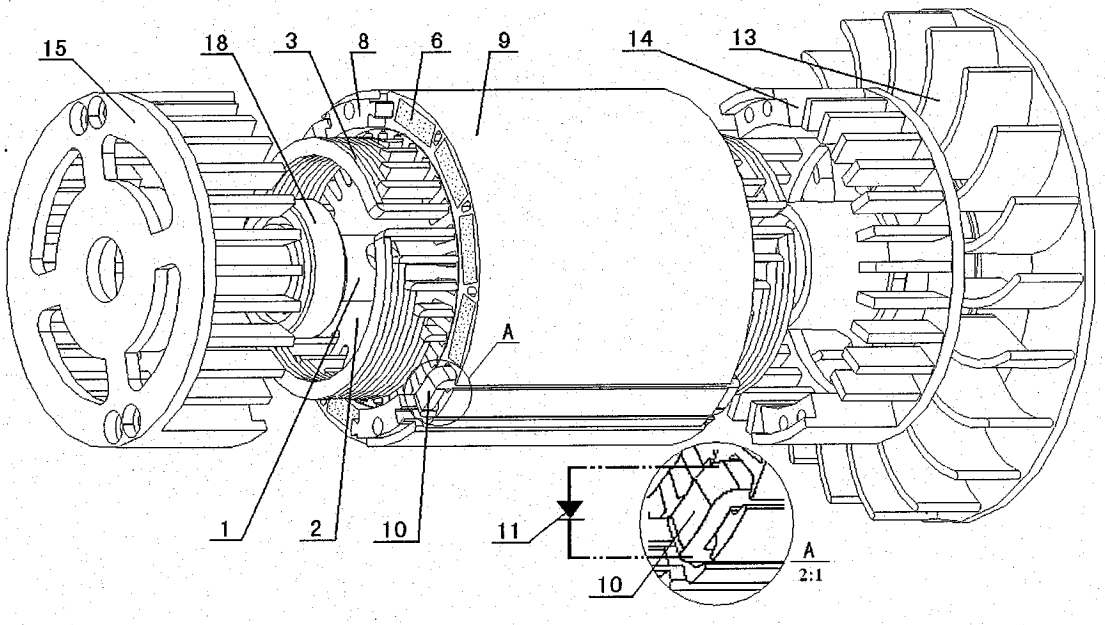


图 4

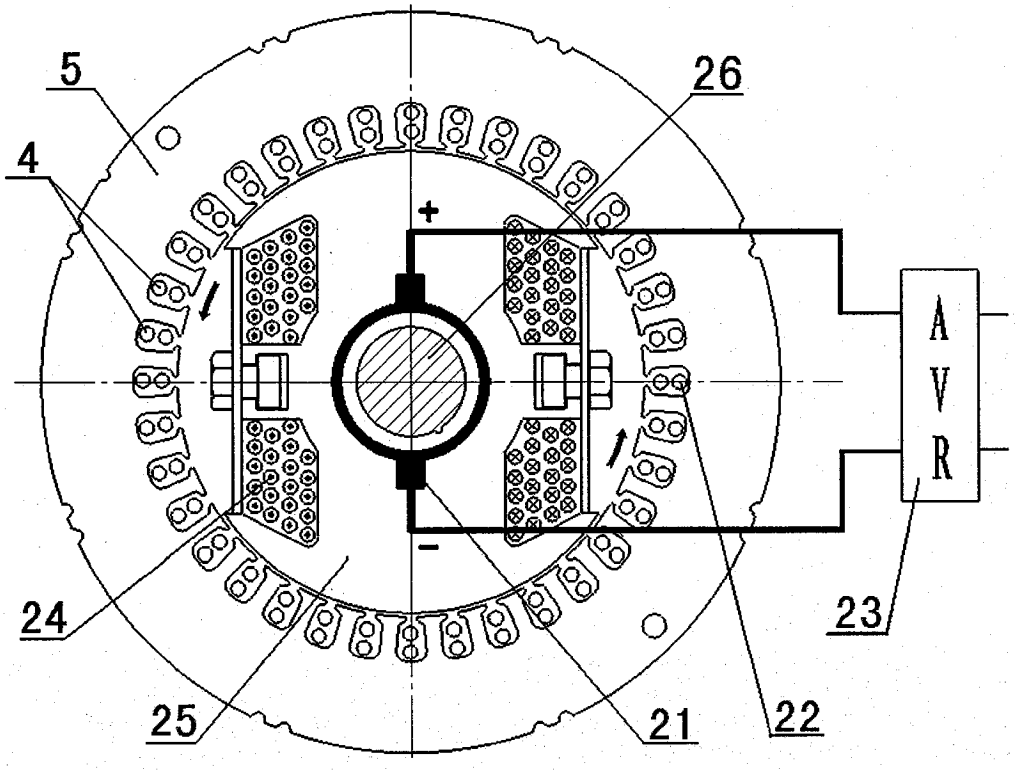


图 5

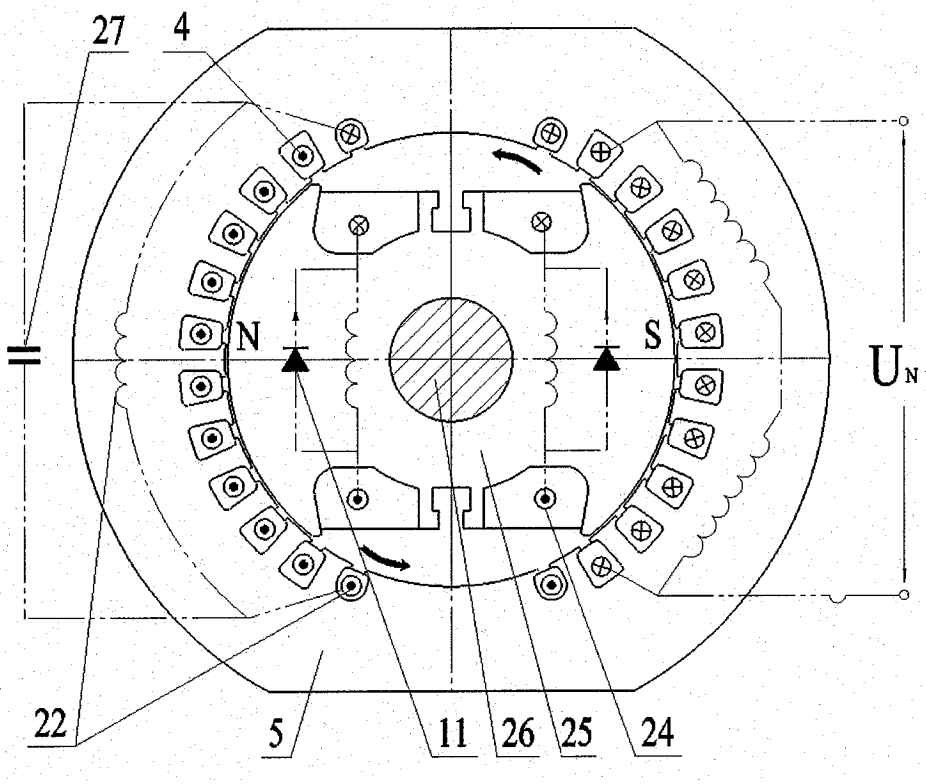


图 6