

三相无刷同步发电机转子绕组不同连接方式 可靠性分析*

刘登元, 郭福柱, 冯艳琴, 王淑英, 岳跃进
(中船重工电机科技股份有限公司, 山西 太原 030027)

摘要: 电励磁三相无刷隐极同步发电机可通过改变励磁绕组电流大小改变气隙磁场强度, 从而实现宽范围电压调节。转子绕组是三相无刷隐极同步发电机的重要组成部分, 其一般采用同心式绕组。并联支路数为 1 的转子绕组极间、重间连接后, 引出线正端与负端在铁心端面固定并直接引出。而并联支路数大于 1 的转子绕组不仅需要极间、重间连接, 还需选择恰当的并联连接方式。不同的连接方式直接影响转子绕组的复杂性与可靠性。以 10 极 5 MW 三相无刷隐极同步发电机为例, 对并联支路数为 2 的转子绕组不同连接方式进行比较。结合工艺性与可操作性, 选择最优转子绕组连接方式, 制作了发电机转子绕组以及样机。结果表明, 该连接方式简单可靠, 可提高产品工艺性, 有效避免转子绕组绝缘故障。

关键词: 三相无刷隐极同步发电机; 转子绕组; 连接方式; 并联支路数; 可靠性

中图分类号: TM314 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2023)06-0043-09

doi: 10.12177/emca.2023.057

Reliability Analysis of Different Connection Methods of Rotor Winding for Three-Phase Brushless Synchronous Generator*

LIU Dengyuan, GUO Fuzhu, FENG Yanqin, WANG Shuying, YUE Yuejin
(CSIC Electrical Machinery Science and Technology Co., Ltd., Taiyuan 030027, China)

Abstract: Electro-excited three-phase brushless hidden pole synchronous generator can change the air-gap magnetic field strength by changing the magnitude of excitation winding current, thus realizing wide-range voltage regulation. Rotor winding is an important part of three-phase brushless hidden pole synchronous generator, which generally uses concentric winding. After the rotor winding with a parallel branch number of one is connected between pole and pole and between coil and coil in same pole, the positive end and negative end of the lead line are fixed on the end face of the iron core and directly led out. The rotor winding with a parallel branch number more than one not only needs to be connected between pole and pole and between coil and coil in same pole, but also needs to select the appropriate parallel connection methods. Different connection methods directly affect the complexity and reliability of the rotor winding. Taking a 10 pole and 5 MW three-phase brushless hidden pole synchronous generator as an example, the different connection methods of rotor winding with two parallel branches are compared. Combining the manufacturability and operability, the optimal connection method of rotor winding is selected, and the generator rotor winding and prototype are manufactured. The results show that this connection method is simple and reliable, which can improve the product manufacturability and effectively avoid the insulation faults of rotor winding.

Key words: three-phase brushless hidden pole synchronous generator; rotor winding; connection method; parallel branch number; reliability

收稿日期: 2022-10-23; 收到修改稿日期: 2023-03-01

* 基金项目: 国家重点研发计划项目(SQ2018YFB150133)

作者简介: 刘登元(1982—), 男, 学士, 高级工程师, 研究方向为三相无刷发电机设计与开发。

郭福柱(1986—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为三相无刷同步发电机设计与开发。

0 引言

船舶电站通常以柴油机拖动同步发电机,组成柴油发电机组^[1]。当前,柴油发电机组正朝着大功率、高功率密度方向发展^[2]。成本低、励磁可控且设计方法成熟的电励磁三相无刷同步发电机可通过改变励磁绕组电流大小调节气隙磁场强度,从而实现宽范围输出电压调节或转速调节,是船舶电站最重要的动力设备之一,其运行状态直接决定整个船舶电力用电设备能否稳定运行^[3-5]。转子绕组作为三相无刷同步发电机的核心部件,易受运行环境影响,绝缘状态经常会发生劣化。当绝缘电阻下降到一定程度时,如果机组仍继续保持运行,三相无刷同步发电机绕组会短路,形成短路电流。短路电流则会导致转子绕组局部过热,从而引起绝缘损坏,引发严重的发电机故障,威胁电力设备的安全稳定运行。另外,转子绕组匝间短路故障特征不明显,故障初期对发电机的正常运行几乎没有影响,易被忽略。

三相无刷同步发电机转子绕组重间、极间连接方式以及引出线正端与负端的复杂程度是影响转子绕组绝缘故障的主要因素。目前三相无刷同步发电机转子绕组绝缘故障的研究主要集中在对短路故障的分析和识别上^[6-18],缺少在转子绕组设计过程中避免绝缘故障的有效措施,尤其是在转子绕组并联支路数大于1的情况下,选择合适的转子绕组重间、极间以及并联连接方式可有效避免转子绕组端部绝缘故障。本文以10极5 MW电励磁三相无刷隐极同步发电机为例,对转子绕组重间、极间以及并联连接方式进行了对比分析,选择合适的连接方式应用于此台发电机,经验证其满足性能要求。

1 转子绕组类型及连接方式

按照结构形式,同步发电机可分为旋转电枢式和旋转磁极式两类。旋转磁极式结构是大中型以及高压同步发电机的基本结构形式。在旋转磁极式电机中,按照主极形状又可分为隐极式和凸极式。隐极式电机转子气隙均匀,转子绕组分布于转子铁心表面槽内。转子绕组也称励磁绕组,发电机运行时,必须在转子绕组中通以励磁电流

来建立磁场,旋转磁场切割定子绕组,在定子绕组中感应三相交流电势。容量较大的三相无刷同步发电机转子绕组通常用扁铜线或漆包扁铜线绕成同心式线圈,简称“硬线圈”。容量较小的三相无刷同步发电机转子绕组通常用漆包圆铜线绕成同心式线圈,简称“软线圈”。船用柴油发电机组功率越大,发电机功率也越大,受旋转整流模块正向平均电流的限制,转子绕组需要多路并联。然而在不同的转子绕组重间、极间以及并联连接方式下,转子绕组正负端出线位置不同,连接的复杂程度也不同,这直接影响转子绕组的可靠性。对于凸极转子绕组和软线圈转子绕组来说,由于其结构的特殊性以及软绕组的柔韧性和附着性,转子绕组重间、极间以及并联连接方式对转子绕组正负端出线位置影响不大。因此,以转子绕组为硬线圈的10极5 MW电励磁三相无刷隐极同步发电机为例,对转子绕组重间、极间连接方式以及正负端出线位置进行研究,其参数如表1所示。

表1 发电机基本参数

参数名称	参数值
功率/kW	5 000
额定电压/kV	10.5
额定转速/(r·min ⁻¹)	600
额定频率/Hz	50
额定功率因数	0.8
空载励磁电压/V	46
额定励磁电压/V	98
额定励磁电流/A	313
极数	10
转子铁心外径/mm	1 244
电磁线绝缘线规/mm	3.4×8.75
转子虚槽数	90

转子铁心槽号与极数均按顺时针标注,槽号依次为1、2、…、90,极数依次为第1极、第2极、…、第10极,如图1所示。

转子绕组每极共三重线圈,每重线圈37匝,为单层同心式,并绕根数为2,并联支路数为2。以一个极下的绕组为例,对转子绕组第一、二、三重线圈进行定义,第3槽与第7槽中的同心式线圈为第一重线圈,第2槽与第8槽中的同心式线圈为第二重

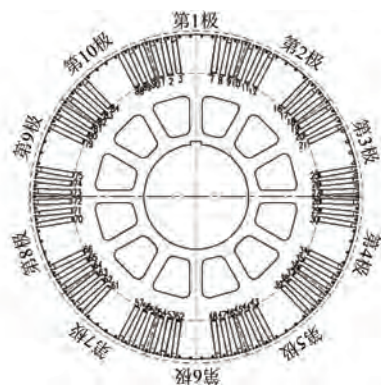


图1 转子铁心槽号与极数示意图

线圈,第1槽与第9槽中的同心式线圈为第三重线圈,第一、二、三重线圈之间互称为重间,其他极下的第一、二、三重线圈定义同理,如图2所示。

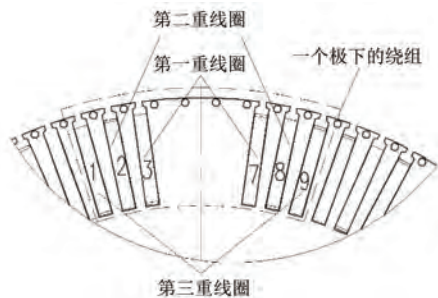


图2 转子绕组线圈重数示意图

每重线圈按绕线模尺寸绕制,以第1极、槽号为1、2、3、7、8、9为例,绕制方法为第一重线圈逆时针绕制,首端第1匝在第7槽,末端第37匝在第3槽;第二重线圈顺时针绕制,首端第1匝在第2槽,末端第37匝在第8槽;第三重线圈逆时针绕制,首端第1匝在第9槽,末端第37匝在第1槽。同理也可将第一重线圈顺时针绕制,首端第1匝在第3槽,末端第37匝在第7槽;第二重线圈逆时针绕制,首端第1匝在第8槽,末端第37匝在第2槽;第三重线圈顺时针绕制,首端第1匝在第1槽,末端第37匝在第9槽。

2 正/负端引出分布与极/重间连接方式

根据发电机转子虚槽数与实槽数、极数以及并联支路数绘制出转子绕组接线图,不同连接方式如附录A图A1~图A12所示,分别对应连接方式1~连接方式12。每个极下的第一、二、三重线圈嵌线完成之后,需要进行第一与第二重线圈、第

二与第三重线圈的重间连接、极间连接以及正负端引出。

2.1 转子线圈重间连接方式

转子绕组每重线圈有两种绕制方式。以第1极为例,第一种绕制方式为第一重线圈逆时针绕制,第二重线圈顺时针绕制,第三重线圈逆时针绕制,第一重线圈第37匝(第3槽)与第二重线圈第37匝(第8槽)相连,第二重线圈第1匝(第2槽)与第三重线圈第1匝(第9槽)相连,第一重线圈第1匝(第7槽)与第三重线圈第37匝(第1槽)作为转子绕组正端或负端引出,也可作为重间连线与其他相邻极相连,如附录A中图A1、图A2图A5、图A6、图A7和图A8所示。三重线圈依次按逆-顺-逆时针绕制,第一与第二重线圈间连接所跨槽号与槽数如表2所示。

表2 第一与第二重线圈间连接所跨槽号与槽数

连接方式	第一、二重线圈间连接所在槽号	所跨槽数
1	3,8;12,17;21,26;30,35;39,44; 48,53;57,62;66,71;75,80;84,89	5
2	3,8;12,17;21,26;30,35;39,44; 48,53;57,62;66,71;75,80;84,89	5
5	3,8;12,17;21,26;30,35;39,44; 48,53;57,62;66,71;75,80;84,89	5
6	3,8;12,17;21,26;30,35;39,44; 48,53;57,62;66,71;75,80;84,89	5
7	3,8;12,17;21,26;30,35;39,44; 48,53;57,62;66,71;75,80;84,89	5
8	3,8;12,17;21,26;30,35;39,44; 48,53;57,62;66,71;75,80;84,89	5

三重线圈依次按逆-顺-逆时针绕制,第二与第三重线圈间连接所跨槽号与槽数如表3所示。

表3 第二与第三重线圈间连接所跨槽号与槽数

连接方式	第二、三重线圈间连接所在槽号	所跨槽数
1	2,9;11,18;20,27;29,36;38,45; 47,54;56,63;65,72;74,81;83,90	7
2	2,9;11,18;20,27;29,36;38,45; 47,54;56,63;65,72;74,81;83,90	7
5	2,9;11,18;20,27;29,36;38,45; 47,54;56,63;65,72;74,81;83,90	7
6	2,9;11,18;20,27;29,36;38,45; 47,54;56,63;65,72;74,81;83,90	7
7	2,9;11,18;20,27;29,36;38,45; 47,54;56,63;65,72;74,81;83,90	7
8	2,9;11,18;20,27;29,36;38,45; 47,54;56,63;65,72;74,81;83,90	7

第二种绕制方式为第一重线圈顺时针绕制,第二重线圈逆时针绕制,第三重线圈顺时针绕制,第一重线圈第 37 匝(第 7 槽)与第二重线圈第 37 匝(第 2 槽)相连,第二重线圈第 1 匝(第 8 槽)与第三重线圈第 1 匝(第 1 槽)相连,第一重线圈第 1 匝(第 3 槽)与第三重线圈第 37 匝(第 9 槽)作为转子绕组正负端引出,也可作为重间连线与其他相邻极相连,如附录 A 中图 A3、图 A4、图 A9、图 A10、图 A11、图 A12 所示。三重线圈依次顺-逆-顺时针绕制,第一与第二重线圈间连接所跨槽号与槽数如表 4 所示。

表 4 第一与第二重线圈间连接所跨槽号与槽数

连接方式	第一、二重线圈间连接所在槽号	所跨槽数
3	7,2;16,11;25,20;34,29;43,38; 52,47;61,56;70,65;79,74;88,83	5
4	7,2;16,11;25,20;34,29;43,38; 52,47;61,56;70,65;79,74;88,83	5
9	7,2;16,11;25,20;34,29;43,38; 52,47;61,56;70,65;79,74;88,83	5
10	7,2;16,11;25,20;34,29;43,38; 52,47;61,56;70,65;79,74;88,83	5
11	7,2;16,11;25,20;34,29;43,38; 52,47;61,56;70,65;79,74;88,83	5
12	7,2;16,11;25,20;34,29;43,38; 52,47;61,56;70,65;79,74;88,83	5

三重线圈依次顺-逆-顺时针绕制,第二与第三重线圈间连接所跨槽号与槽数如表 5 所示。

表 5 第二与第三重线圈间连接所跨槽号与槽数

连接方式	第二、三重线圈间连接所在槽号	所跨槽数
3	8,1;17,10;26,19;35,28;44,37; 53,46;62,55;71,64;80,73;89,82	7
4	8,1;17,10;26,19;35,28;44,37; 53,46;62,55;71,64;80,73;89,82	7
9	8,1;17,10;26,19;35,28;44,37; 53,46;62,55;71,64;80,73;89,82	7
10	8,1;17,10;26,19;35,28;44,37; 53,46;62,55;71,64;80,73;89,82	7
11	8,1;17,10;26,19;35,28;44,37; 53,46;62,55;71,64;80,73;89,82	7
12	8,1;17,10;26,19;35,28;44,37; 53,46;62,55;71,64;80,73;89,82	7

由表 2~表 5 可知,无论第一、二、三重线圈依次逆-顺-逆时针绕制还是依次顺-逆-顺时针绕制,虽然转子绕组每重线圈重间连接不同,但重间连接所跨槽数相同,均为 5 与 7,因而重间连接线

长度相同,重间连接对转子绕组的可靠性影响较小且一致。值得注意的是,如果重间连接为线圈第 37 匝时,需进行足够的绝缘处理,避免匝间绝缘引起发电机转子绕组故障。

2.2 转子线圈极间连接方式

转子绕组极间连接跨度大,不同极间连接方式直接影响连接线长度,极间连接有两种方式。第一种连接方式为第 1、2、3、4、5 极根据电流方向先依次相连,然后第 6、7、8、9、10 极根据电流方向再依次相连,最后第 1~5 极与第 6~10 极依据电流方向一致性并联,如附录 A 中图 A1~图 A4 所示,其极间连接方式所在槽号与所跨槽数如表 6 所示。

表 6 不同极间连接方式所在槽号与所跨槽数

连接方式	极间连接所在槽号	所跨槽数
1	9,18;12,21;27,36;30,39; 54,63;57,66;72,81;75,84	9
2	3,12;18,27;21,30;36,45; 48,57;63,72;66,75;81,90	9
3	7,16;10,19;25,34;28,37; 52,61;55,64;70,79;73,82	9
4	1,10;16,25;19,28;34,43; ;46,55;61,70;64,73;79,88	9

第二种连接方式为奇数极先相连,即第 1、3、5、7、9 极根据电流方向先依次相连,然后偶数极相连,即第 2、4、6、8、10 极根据电流方向再依次相连,最后奇数极与偶数极按电流方向一致性并联,如附录 A 中图 A5~图 A12 所示,其极间连接方式所在槽号与所跨槽数如表 7 所示。

表 7 不同极间连接方式所在槽号与所跨槽数

连接方式	极间连接所在槽号	所跨槽数
5	9,21;18,30;27,39;36,48; 45,57;54,66;63,75;72,84	12
6	9,21;12,36;27,39;30,54; 45,57;48,72;63,75;66,90	12/24
7	3,27;12,36;21,45;30,54; 39,63;48,72;57,81;66,90	24
8	3,27;18,30;21,45;36,48; 39,63;54,66;57,81;72,84	12/24
9	7,19;16,28;25,37;34,46; 43,55;52,64;61,73;70,82	12
10	7,19;10,34;25,37;28,52; 43,55;46,70;61,73;64,88	12/24
11	1,25;10,34;19,43;28,52; 37,61;46,70;55,79;64,88	24
12	1,25;16,28;19,43;34,46; 37,61;52,64;55,79;70,82	12/24

根据表 6 和表 7 可知,两种不同的转子绕组极间连接方式对连接线的长度影响很大,第 1~5 极先连接,第 6~10 极连接后与第 1~5 极并联连接方式的转子绕组极间连接线较短,连接线所跨槽数为 9。而奇数极与偶数极并联极间连接方式绕组极间连接线较长,所跨转子槽数为 12 与 24。转子线圈极间连接线较长,可能导致极间、重间连线交错,极易发生匝间短路故障。同时为保证转子绕组端部电磁线厚度相同、受力均匀,需要在转子绕组端部沿外圆周包一层玻璃布层压板,沿圆周包两层复合纸,最后用无纬带沿圆周包 10 层,这样不利于转子绕组端部散热。三相无刷同步发电机在长期运行过程中,容易引起转子绕组端部局部过热,绝缘损坏,导致发电机转子绕组故障。因此,应选择第 1~5 极、第 6~10 极先后相连,然后第 1~5 极与第 6~10 极依据电流方向一致性并联连接的方式。

2.3 转子绕组正负端引出位置分布

转子绕组正负端可从第一重线圈首端第 1 匝或末端第 37 匝引出,也可从第三重线圈首端第 1 匝或末端第 37 匝引出。根据转子绕组正端与负端引出位置分布以及转子绕组接线图可知,正负端所在槽号以及所跨槽数如表 8 所示。

表 8 正负端引出线所在槽号及所跨槽数

连接方式	正端所在槽号	负端所在槽号	正端所跨槽数	负端所跨槽数
1	3,90	45,48	3	3
2	9,84	39,54	15	5
3	1,88	43,46	3	3
4	7,82	37,52	15	5
5	3,90	12,81	3	21
6	3,18	81,84	15	3
7	9,84	18,75	15	33
8	9,12	75,90	3	15
9	1,88	10,90	3	21
10	1,16	79,82	15	3
11	7,82	16,73	15	33
12	7,10	73,88	3	15

由表 8 可知,转子线圈极间连接方式对引出线正负端并联连接影响很大,第 1~5 极先连接,第 6~10 极连接后与第 1~5 极并联连接方式转子

绕组正负端所跨槽数较少,最少为 3 与 3,最多为 5 与 15,并联连接线较短,适于转子绕组两路并联。奇数极与偶数极并联,转子绕组正负端所跨槽数较多,最少为 3 与 15,最多为 15 与 33,并联连接线较长,不适于转子绕组两路并联。

对于第 1~5 极先连接,第 6~10 极连接后与第 1~5 极并联连接的方式来说,第一、二、三重线圈依次逆-顺-逆时针绕制与第一、二、三重线圈依次顺-逆-顺时针绕制,转子绕组正负端所跨槽数取决于是否从第 5 极与第 6 极相邻极间引出,相邻极间引出正负端所跨槽数较少,为 3 与 3,有利于转子绕组两路并联。

3 试验结果与分析

本文研究的三相无刷隐极同步发电机转子绕组连接完成后实物图如图 3 所示。转子绕组引出线两路并联的正负端分别焊接完成并引出的实物图如图 4 所示。同时对不同连接方式的转子绕组质量(不含铁心)进行测量,测得的理论值与实际值如表 9 所示。



图 3 转子绕组连接实物图



图 4 正负端两路并联焊接完成并引出图

表 9 不同连接方式转子绕组质量

连接方式	理论值/kg	实际值/kg
1	1 800.3	1 801.5
2	1 801.3	1 802.8
3	1 800.5	1 802.0
4	1 801.3	1 802.7
5	1 806.5	1 808.4
6	1 810.2	1 811.0
7	1 815.3	1 817.6
8	1 810.2	1 811.3
9	1 807.5	1 808.1
10	1 810.2	1 812.0
11	1 815.3	1 816.8
12	1 810.7	1 812.1

根据转子绕组正负端引出线位置分布,转子绕组重间、极间连接可靠性分析以及不同连接方式的转子绕组质量大小可知,连接方式 1 正负端所跨槽数最少、极间连接线最短、重间连接最可靠以及质量最轻,可提高可靠性,节约成本,因而选择其作为最优转子绕组连接方式。

转子绕组嵌装焊接后对其进行对地耐压试验,试验电压为 2 500 V,历时 1 min 不得击穿;无纬带绑扎后,进行对地耐压试验,试验电压显 2 000 V,历时 1 min 不得击穿。

真空浸漆(VPI)后对转子绕组进行对地耐压试验,试验电压为 2 000 V,历时 1 min 不得击穿。VPI 后进行耐压试验,试验电压为 DC 2 400 V,历时 1 min 不得出现闪络和击穿现象。经试验可知,转子绕组各阶段耐压试验结果全部满足技术要求。按照试验大纲对此台发电机进行型式试验与出厂试验,如图 5 所示。

对发电机进行空载与短路特性测定,测得额定励磁电压为 95 V,空载励磁电压为 48 V,额定励磁电流为 310 A,空载励磁电流为 145 A,均在设计值允许范围内,其余所有试验项目也满足性能要求。

4 结 语

三相无刷隐极同步发电机转子绕组重间、极间不同的连接方式以及正负端的分布会影响转子绕组端部绝缘性能。本文从转子绕组正负端并联



图 5 发电机试验图

出线位置距离近,重间、极间连线短入手,以转子绕组电磁线为铜扁线的 10 极 5 MW 三相无刷隐极同步发电机为例,对转子绕组不同的正负端出线位置以及极间、重间连接方式进行分析,并对其引线的可靠性进行对比,选择本文所提的连接方式 1 作为转子绕组最优接线方式,制作了三相无刷同步发电机转子绕组以及整机。试验结果表明,该连接方式简单可靠,实用性强且成本较低,为其他并联支路数大于 1 的转子绕组选择合适的连接方式提供了借鉴与参考,并且可提高发电机制造工艺性,有效避免转子绕组绝缘故障。

【参 考 文 献】

[1] 赵宸翦,丁宇翔,王恒,等. 船用高速大功率柴油发电机组减振降噪设计与试验[J]. 船舶工程,2021, 43(5): 5.

[2] 尚前明,姜苗,陈辉,等. 基于 PSO-ELM 算法实现船舶发电机组故障识别[J]. 船舶工程,2021, 43(1): 87.

[3] 黄曼磊,李殿璞. 船舶电站同步发电机调压系统 H ∞ 控制器的研究[J]. 船舶工程,2003(6): 55.

[4] 付兴贺,江政龙,吕鸿飞,等. 电励磁同步电机无刷励磁与转矩密度提升技术发展综述[J]. 电工技术学报,2022,37(7): 1689.

[5] 宋双. 电励磁无刷同步发电机的方案设计与仿真分析[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2014.

[6] 孙宇光,郝亮亮,王祥瑞. 同步发电机励磁绕组匝间短路的数学模型与故障特征[J]. 电力系统自动化,2011,35(6): 45.

[7] 张永会,滕跃,张洪坤,等. 水轮机转子绕组绝缘故障原因分析及对策[J]. 仪器仪表与分析监测, 2021(2): 27.

- [8] 武玉才,马倩倩,王逸仙,等. 负序磁场中同步发电机转子绕组匝间短路故障恶化的分析[J]. 电机与控制应用,2018,45(10): 126.
- [9] 孟永奇. 同步发电机转子绕组匝间短路故障的谐波传递分析[J]. 电机技术,2011(6): 52.
- [10] 武玉才,马冠华. 核电汽轮发电机转子绕组匝间短路的定子环流特征[J]. 电机与控制学报,2020,24(3): 45.
- [11] 李旭,丁勇,李勇,等. 虚拟同步发电机的相角控制方法[J]. 电力工程技术,2017,36(1): 43.
- [12] 王云峰,冀顺林. 一起发电机转子绕组动态匝间短路故障的诊断与分析[J]. 电工技术,2021(17): 170.
- [13] 李永刚,王罗,李俊卿,等. 基于多源信息融合的同步发电机转子绕组匝间短路故障识别[J]. 电力系统自动化,2019,43(16): 162.
- [14] 李永刚,马明哈,武玉才,等. 汽轮发电机转子绕组匝间短路故障程度诊断方法[J]. 电机与控制学报,2018,22(6): 62.
- [15] 沈利平,马明哈,李永清,等. 基于无功相对偏差的无刷励磁发电机转子绕组匝间短路故障诊断新判据[J]. 电机与控制应用,2017,44(11): 106.
- [16] 尹文俊,李挺. 1 000 MW 汽轮发电机转子绕组匝间短路故障的诊断与分析[J]. 电力科学与工程,2013,29(11): 17.
- [17] 张超,夏立,吴正国,等. 同步发电机转子绕组匝间短路故障特征传递规律[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(14): 52.
- [18] 李天辉,唐明,贾伯岩,等. 发电机转子匝间短路故障的建模仿真及诊断分析[J]. 高电压技术,2019,45(12): 3932.

附录 A 转子绕组连接方式

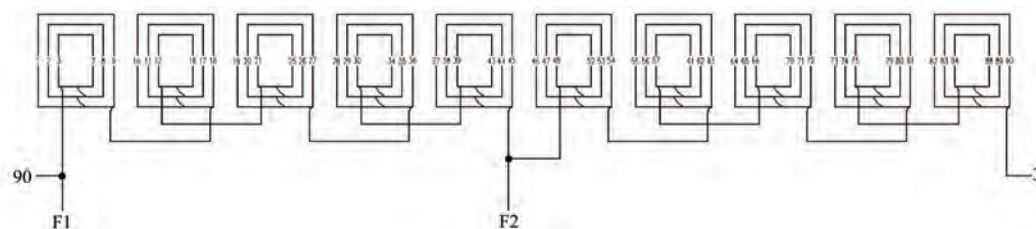


图 A1 转子绕组连接方式 1

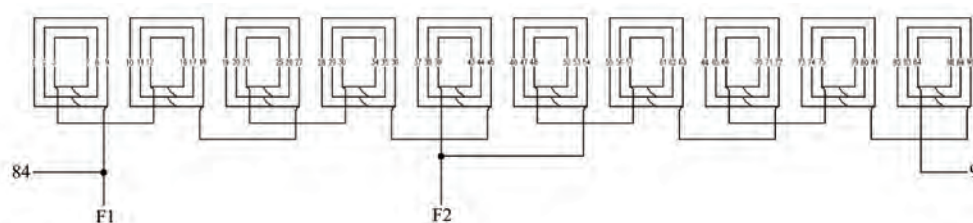


图 A2 转子绕组连接方式 2

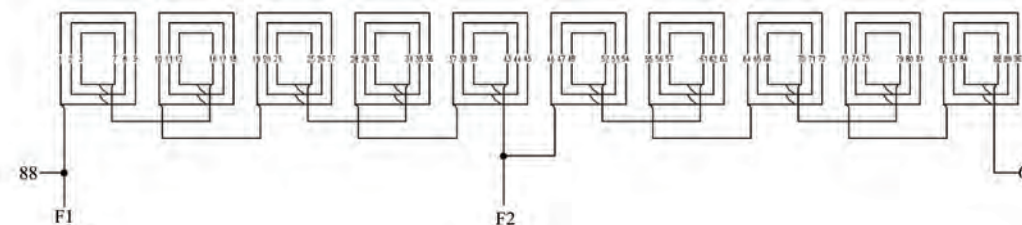


图 A3 转子绕组连接方式 3

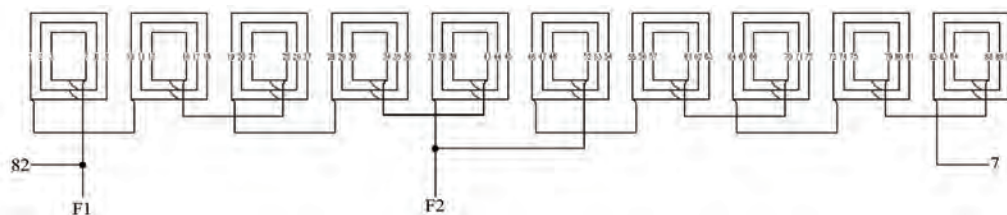


图 A4 转子绕组连接方式 4

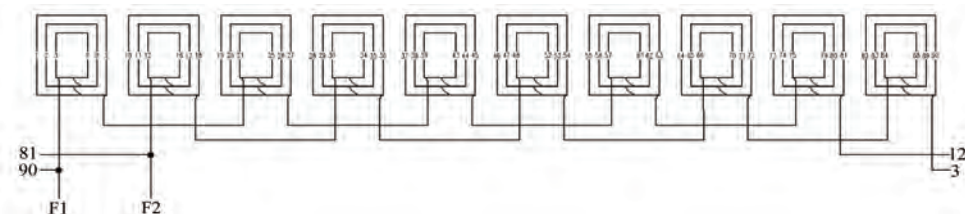


图 A5 转子绕组连接方式 5

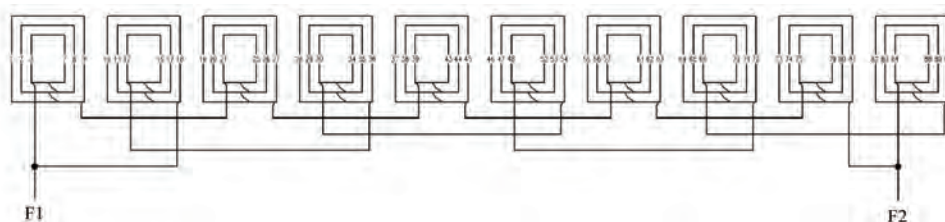


图 A6 转子绕组连接方式 6

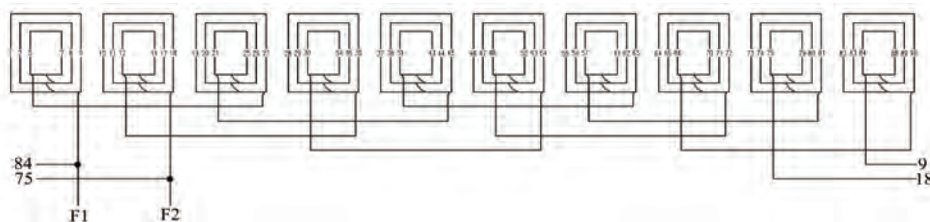


图 A7 转子绕组连接方式 7

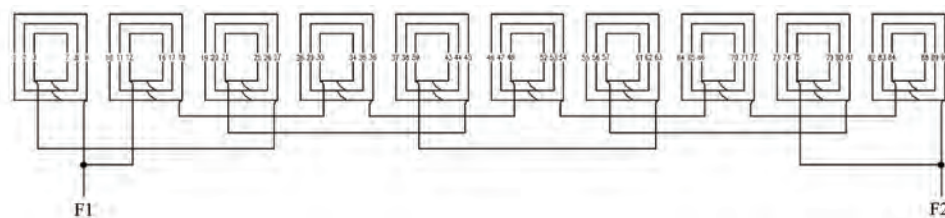


图 A8 转子绕组连接方式 8

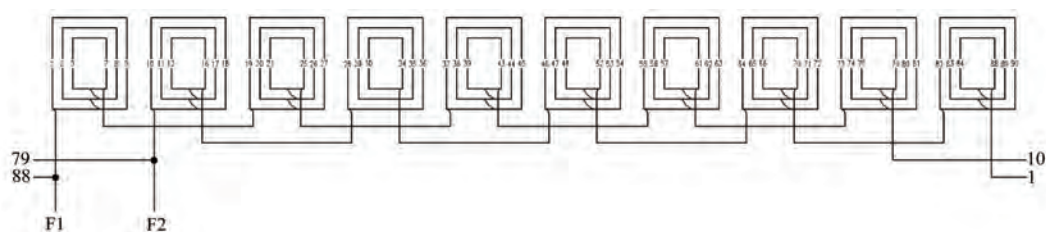


图 A9 转子绕组连接方式 9

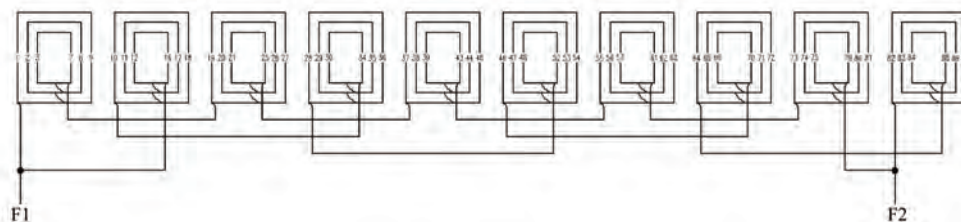


图 A10 转子绕组连接方式 10

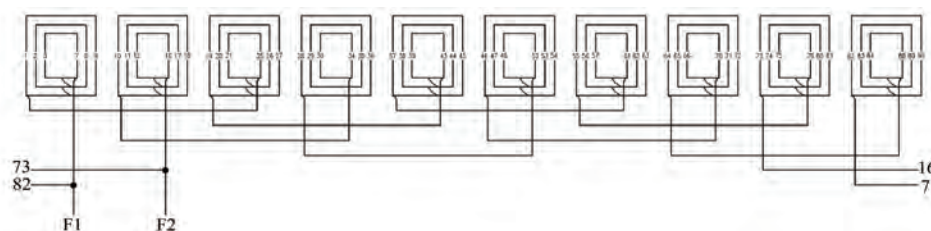


图 A11 转子绕组连接方式 11

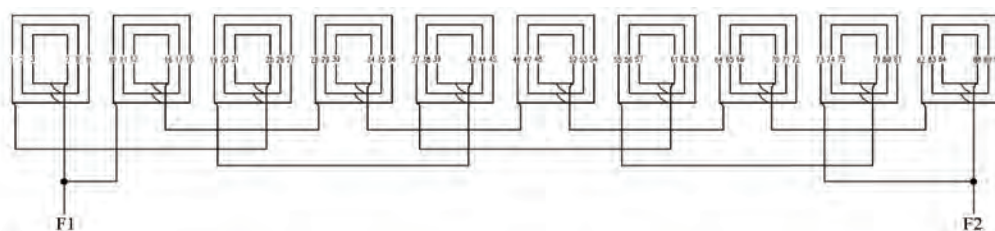


图 A12 转子绕组连接方式 12

(上接第 42 页)

- [3] WAMPLER R K, MOISE J C, FRAZIER O H, et al. In vivo evaluation of a peripheral vascular access axial flow blood pump[J]. ASAIO Transactions, 1998, 34(3): 450.
- [4] 谭亚,尹成科,谈雪丹,等. 左心室辅助装置脉动载荷下无位置传感器无刷直流电机的速度控制[J]. 电机与控制应用, 2015, 42(6): 43.
- [5] 李雪,王效亮,栾婷,等. 基于无位置传感器电机控制方式的人工辅助心脏控制器研究[J]. 机电工程技术, 2013, 42(3): 43.
- [6] 刘刚,肖烨然,孙庆文. 基于改进反电动势积分的永磁同步电机位置检测[J]. 电机与控制学报, 2016, 20(2): 36.
- [7] 李红伟,范友鹏,张云鹏,等. 轴流式人工心脏泵混合磁悬浮系统的耦合特性[J]. 电机与控制学报, 2014, 18(5): 105.
- [8] 刘鑫,曲洪一,王聪,等. 第 3 代人工心脏泵研究进展及应用[J]. 中国生物医学工程学报, 2022, 41(3): 339.
- [9] 朱俊杰,栗梅,陈程,等. 无刷直流电机反电动势过零检测新方法[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(2): 441.
- [10] 贺玉民,史建萍,崔伟,等. 槽配合对异步电机电磁噪声的影响分析[J]. 电机与控制应用, 2014, 41(4): 34.