

多层叠绕大截面线圈制作及多种线圈 交替换向嵌线工艺优化

郭江平, 陆超, 丁禄振
(中车株洲电机有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘要: 针对高功率密度鼠笼式异步风力发电机(FYS02)采用不同叠绕结构的大截面线圈交替换向嵌线的工艺难点,进行了定子线圈制作和嵌线工艺的系统分析及优化。通过分步绕线、单边线圈鼻部绝缘补强、涨型设备程序调整、线圈绝缘结构优化及嵌线定位优化等工艺的创新,解决了样机制作中的难题,顺利完成产品的批量生产,确保了新型结构风电产品从研发理念到产品产出的顺利过渡,为风电产业的海外发展奠定了技术基础。

关键词: 风力发电机; 高功率密度; 多层叠绕; 大截面线圈; 换向嵌线

中图分类号: TM 315; TM 303.1 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)08-0098-06

doi: 10.12177/emca.2020.084

Process Optimization of the Production of Multi-Layer Stacking Coil with Large Section and the Alternative Reversal Inserting of Multiple Coils

GUO Jiangping, LU Chao, DING Luzhen
(CRRC Zhuzhou Electric Co., Ltd., Zhuzhou 412001, China)

Abstract: To solve the technological difficulties of squirrel cage asynchronous wind generator (FYS02) with high power density, whose stator uses different multi-layer and large section coils and alternative reversal inserting, systematic analysis and optimization of coil production and inserting are implemented. Problems in prototype trial production are settled by innovations of step-by-step winding, insulation reinforcement of single coil nose, adjustment of expansion equipment program, optimization of coil insulation structure, and optimization of the inserting positioning, which make it possible to successfully complete the mass production. This is an important transition of new structure wind power products from research and development concept to actual output, which establishes a technical foundation for the overseas development of wind power industry.

Key words: wind generator; high power density; multi-layer stacking; large section coil; reversal inserting

0 引言

随着风电技术的不断提高及性能的不断优化,风力发电机的功率密度也成为衡量性能的主要参数之一。高功率密度风力发电机与同容量普通风力发电机相比,具有效率高、结构简单、节能

效果明显、噪声低等优点,因此高功率密度风力发电机的研究对于风力发电性能的改善和效率的提高有着重要的推动作用^[1-7]。由于高功率密度风力发电机定子空间紧凑,散热及噪声要求高,在设计时采用了大截面线圈及多种线圈交替换向嵌线的结构。目前绝大部分风力发电机(包括异步风

收稿日期: 2020-04-30; 收到修改稿日期: 2020-06-21

作者简介: 郭江平(1989—),女,硕士,工程师,研究方向为绝缘工艺技术。

力发电机、双馈风力发电机、直驱风力发电机等)定子均采用单种线圈、单向嵌线工艺,关于多种大截面线圈交替换向嵌线工艺的研究较少。本文将针对定子制造过程中多层叠绕大截面线圈制作及多种线圈交替换向嵌线存在的问题,就工艺分析和优化调整方案展开详细论述,旨在为高密度风力发电机定子制作提供更多的参考。

1 大型成型线圈结构电机线圈制作及嵌线工艺介绍

高功率密度鼠笼式风力发电机(FYS02)定子线圈制作工艺与双馈风力发电机定、转子线圈一致,主要工艺流程为:线圈梭绕—包保护带—引线去砂—线圈涨型—引线弯头—主绝缘包扎。普通的风电产品定子线圈结构与制作参数均是单一化的,而该电机定子线圈共有4种(即线圈1,正涨双列双排;线圈2,正涨双列三排;线圈3,反涨双列双排;线圈4,反涨双列三排),均由截面较大的电磁线绕制而成,根据线圈结构不同分为双列双排[见图1(a)]和双列三排[见图1(b)],根据涨型方式分为正涨和反涨。

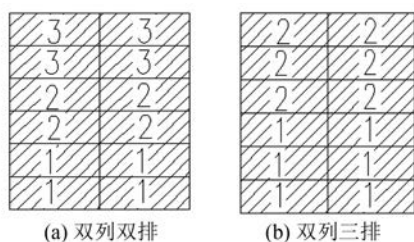


图1 线圈截面图

异步风力发电机成型绕组嵌线是将绕组嵌入到铁心槽内并加以固定的工艺过程。一般来说,定子线圈只有一种,只需一种涨型程序便可制作出整台线圈^[8-13],按照节距依次将所有线圈嵌入到铁心槽中,线圈端部可以用硬端箍及绑扎带进行固定。该高功率密度风力发电机定子含有4种线圈,且线圈要求交替和换向嵌线,即按照2-1-2-1-2-1-4-3-4-3-4-3的规律进行嵌线,其中线圈1和线圈2的引出线在传动端,而线圈3和线圈4的引出线在非传动端,因此对4种线圈涨型成型后的端部形状一致性要求非常高。

2 多层叠绕大截面线圈制作及多种线圈换向嵌线难点分析

FYS02 风力发电机结构紧凑,定子线圈线规大、并绕根数多、截面大,但嵌线后绕组端部间隙和鼻部间隙均比普通风力发电机小,线圈成型后端部若有偏斜角度,由于正反涨线圈的端部偏斜方向相反,线圈换向时就会抢占线圈端部嵌线空间,造成后续线圈嵌线下线干涉。若像普通双馈风力发电机一样,依靠人工整形调整下线,最后的翻槽线圈端部就会没有空间、无法落线^[14-16]。该电机共4种线圈,嵌线后为双边出线,因此4种线圈在嵌线时会存在12次正反涨型线圈换向嵌线。要保证换向嵌线过渡时不过度占用端部空间,且需确保不同线圈嵌线后端部高度相同,就需要在线圈涨型过程中严格保证不同线圈端部的一致性。

该高功率密度风力发电机的制作难点在于:如何解决大截面线圈制作过程中存在的成型困难、鼻部错位等问题,并在嵌线绕组间隙较小的情况下优化线圈制作及嵌线过程,以充分利用有限的空间,顺利完成大截面线圈嵌线,同时保证绝缘性能稳定。

3 线圈制作工艺改善

3.1 线圈梭型绕制工艺优化

定子线圈制作使用的电磁线采用聚酰亚胺薄膜-聚酰亚胺薄膜粉云母带绕包铜扁线,导线绝缘即为匝间绝缘。由于电磁线线规较大,且线圈结构及绕线方式为双列双排绕制3匝,双列三排绕制2匝,其绕制时单匝电磁线截面也比较大。绕线机夹具所夹电磁线截面尺寸偏大,不仅可能损伤电磁线本体绝缘,还会有过线线夹易跑线、绕线臂上行过程中电磁线打滑脱落损伤的现象发生。

为了避免上述问题,考虑从制作工艺进行优化,将线圈按照两根叠绕及三根叠绕的绕线方式进行绕制,将两根同结构线圈通过包保护带拼接在一起,如图2所示,组合成一个所需线圈,再进行涨型。涨型后结构如图3所示。通过分步绕线的方式,解决了线圈绕制过程中的跑线、打滑等问题,避免了线材浪费,节约了原材料。

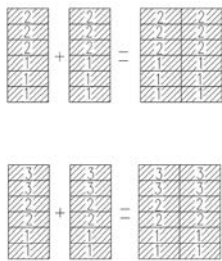


图2 分步法绕制线圈



图3 涨型后线圈结构

3.2 线圈鼻部成型后错位改善

定子线圈结构为双列双排及双列三排,存在的问题一是梭形线圈在涨型过程中线圈两端鼻部电磁线会出现错位;二是电磁线线规和刚度比较大,其线圈鼻部与涨型插销接触,受拉力成型,会存在集中应力较大的现象。因此,线圈涨型过程中鼻部错位挤压位置及鼻部插销接触位置易发生匝间绝缘破损^[17],造成线圈质量不合格,如图4(a)所示。



(a) 改善前涨型错位

(b) 改善后涨型错位

图4 线圈涨型鼻部错位改善

为了解决上述匝间绝缘破损问题,首先从电磁线生产源头入手,在保证线圈成型效果的前提下,通过延长裸铜线退火时间及电磁线本体绝缘绕包速度的方式来降低电磁线整体刚度,改善后电磁线入厂检验刚度由 140 N/mm^2 降至 $115 \sim 120 \text{ N/mm}^2$,提高了线圈成型的工艺性。线圈绕制完成后,在单个线圈鼻部拐角位置半叠包一层聚酰亚胺薄膜粘带,然后将2个线圈拼接在一起

包保护带固定后进行涨型。这样的工艺优化,既可起到薄弱点绝缘补强的作用,又可对鼻部匝与匝之间进行隔离,可有效防止涨型时线圈鼻部发生错位,改善线圈匝间绝缘破损的问题。改善后效果如图4(b)所示。

4 定子嵌线工艺优化

4.1 定子嵌线工艺参数分析

4.1.1 端部间隙

定子线圈嵌入定子铁心槽后两相邻线圈上层边端部斜边的最小距离为端部嵌线间隙 X_i ,如图5所示。

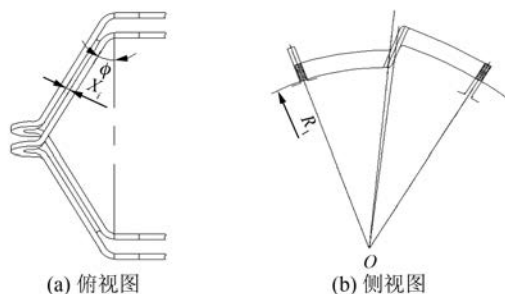


图5 定子嵌线端部间隙

线圈上层边斜边部分所张角度 ϕ 如图5(a),其计算公式为

$$\sin \phi = \frac{Q_1 \cdot W}{2\pi R_1} \quad (1)$$

式中: Q_1 为定子槽数; R_1 为线圈上层边裸铜线底面相对定子圆心的回转半径,如图5(b)。

$$W = W_s + X_i \quad (2)$$

式中: W_s 为线圈端部绝缘后总宽度。

由式(1)和式(2)可知,端部嵌线间隙 X_i 为

$$X_i = \frac{2\pi R_1 \cdot \sin \phi}{Q_1} - W_s \quad (3)$$

4.1.2 鼻部间隙

定子线圈嵌入定子铁心槽后,假设线圈引线与鼻部贴合无缝隙,则线圈引线与相邻线圈鼻部间的间隙为鼻部间隙 X_t ^[18],如图6所示。

鼻部间隙的计算公式为

$$X_t = \frac{2\pi R_2}{Q_1} - W_{bs} - W_{ys} \quad (4)$$

式中: R_2 为线圈鼻部中心相对定子圆心的回转半径; W_{bs} 为线圈鼻部绝缘后总宽度; W_{ys} 为线圈引

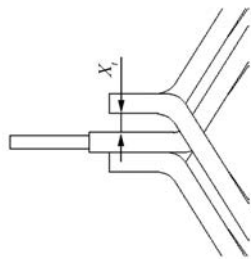


图6 定子嵌线鼻部间隙 X_n

线绝缘后总宽度。

4.1.3 内径槽深比

定子铁心内径 D_1 与定子铁心槽深 h 的比值即为内径槽深比 K , 可用于衡量定子嵌线操作性, 即定子嵌线及翻槽难度。该比值越小, 线圈翻槽难度越大。

通过计算得出 FYS02 电机定子端部间隙 X_t 为 1.73 mm, 鼻部间隙 X_n 为 0.4 mm, 而内径槽深比 K 为 10.75。FYS02 风力发电机与其他几种型号风力发电机的嵌线工艺参数对比如表 1 所示。

表 1 风力发电机嵌线参数对比

型号	FYS02	FYS01	FYKK17	FYKK07
线规/mm	4.3×7.9	3×6.8	4.5×7.8	3.6×8
槽型尺寸/mm	19.4×70.7	17.2×55.1	18.8×43.1	19.2×45.7
端部间隙/mm	1.73	2.31	2.32	2.32
鼻部间隙/mm	0.40	2.58	0.91	0.26
内径槽深比	10.75	13.61	15.08	14.22

从表 1 可以看出: FYS02 电磁线线规大, 槽深大, 线圈制作困难, 定子端部嵌线间隙、鼻部间隙及内径槽深比相较于其他型号的风力发电机要小很多, 且其定子线圈线规和定子槽深也相对其他风力发电机明显增加, 因此嵌线相对困难, 需对嵌线过程进行工艺优化。由于线规、槽型尺寸和内径槽深比不可调, 只能从增大端部间隙和鼻部间隙两方面着手, 降低定子嵌线难度。

4.1.4 端部间隙改善

由于定子端部间隙小, 且定子线圈需进行换位嵌线, 若线圈两侧端部形状有差别, 将引起换位线圈的下线困难及端部间隙不均匀, 后续线圈下线空间不足, 如图 7 所示。因此, 在线圈涨型时, 需要严格控制线圈两侧端部的一致性, 且确保端部垂直无倾斜。

为了保证多种线圈端部的一致性, 线圈采用

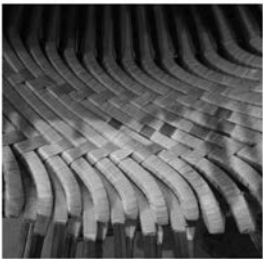


图7 端部间隙不均匀

正涨、反涨两套涨型程序, 多次修正涨型顶弧上升、前进位置参数, 使得正反涨型线圈端部成型后一致性良好, 并规范顶弧模具角度、靠板位置, 使线圈端部成型形状稳定。线圈涨型顶弧路径参数如表 2 所示。

表 2 线圈涨型顶弧路径参数

程序类型		上层边	上层边	下层边	下层边
		左侧	右侧	左侧	右侧
正涨	上升位置/mm	245.0	262.4	295.7	305.5
	前进位置/mm	235.3	224.7	185.6	189.2
反涨	上升位置/mm	242.0	265.4	292.7	307.5
	前进位置/mm	235.3	224.7	186.6	185.2

同时, 通过在线圈涨型顶弧工步时手动暂停涨型机, 人工使用整形钳对端部倾斜角度进行整形, 使得线圈端部与顶弧模具靠板贴合服帖, 保证线圈端部垂直, 如图 8 和图 9 所示。

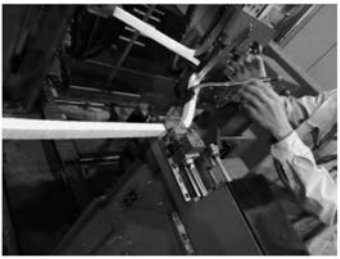


图8 用整形钳进行端部整形

通过线圈整形程序参数优化及人工整形的设定, 定子线圈端部形状一致性得到稳定的保证, 满足设计与嵌线需求, 使得嵌线时换位线圈端部间隙可以均匀过渡, 从而保障了产品质量, 如图 10 所示。

4.1.5 鼻部间隙改善

(1) 线圈引线弯头工艺改善。

由于线圈刚度大、线规大, 导致引线弯头后难

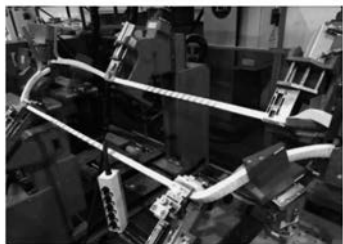


图9 端部贴合顶弧靠板

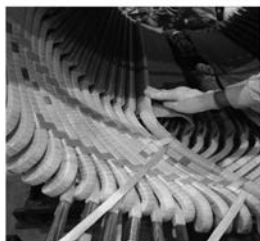


图10 换位线圈端部间隙均匀过渡

与线圈鼻部贴合。在嵌线时,引线头不服帖,抢占鼻部空间,导致引线端的鼻部间隙过小,增大了嵌线难度。为了解决该问题,设计制作了引线弯头工装,如图11所示,辅助引线弯头。使用弯头工装前后效果对比如图12所示。弯头工装可保证引线弯头后与线圈鼻部贴合,不影响嵌线,且不影响引线绝缘。

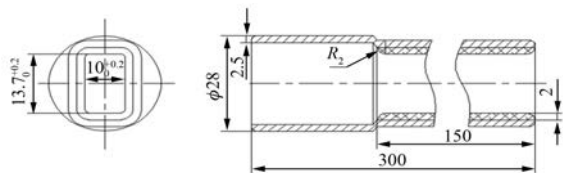


图11 弯头工装



(a) 使用弯头工装前 (b) 使用弯头工装后

图12 使用弯头工装前后效果对比

(2) 线圈鼻部抬高及引线绝缘结构优化。

在线圈试嵌线过程中发现引线所占空间较大,即2个线圈的鼻部距离要小于引线宽度,导致

线圈引线端下线困难。通过对3匝线圈引线进行90°扭转后出线(见图13),能使线圈顺利嵌入定子槽中,但由于定子并头空间影响,引线在有限的空间里无法扭转成原状态。



图13 引线扭转出线验证

通过测量线圈鼻部宽度和引线宽度,发现实物的截面尺寸要比理论值大,这是由于鼻部存在扭转弧度,因此实际叠包率比理论值高很多。由于引线套管不服帖,导致套管褶皱,增大了引线宽度。在满足绝缘电气要求的前提下,可通过绝缘结构优化的方式调整线圈鼻部间隙^[19-20]:(1)将线圈引线出线直径增加25 mm,即将线圈鼻部抬高,增大线圈鼻部之间的距离;(2)线圈端部中胶云母带由1/2叠包2次更改为1/2叠包1次,线圈鼻部中胶云母带由2/3叠包2次更改为2/3叠包1次,以此减小线圈端部及鼻部宽度;(3)根据引线截面积的不同,定子线圈引线套管规格由Φ18和Φ16更改为Φ16和Φ14,避免套管起皱引起引线部位尺寸增大。定子引线出线间隙对比如表3所示。由表3的对比结果可以看出,优化后的定子鼻部间隙由-2.63 mm提升至0.40 mm,从而解决了嵌线过程中由于引出线装配空间不足而导致的线圈端部挤压、后续线圈无法顺利

表3 定子引线出线间隙对比 mm

引线出线间隙	优化前	优化后
引线出线位置直径	879	904
单个线圈分配空间尺寸	38.35	39.44
鼻部包扎后总厚度(理论)	18.52	17.96
鼻部包扎后总厚度(实际)	20.76	19.12
引线包扎后总厚度(理论)	18.96	18.64
引线包扎后总厚度(实际)	19.12	18.82
玻璃丝套管厚度	1.1	1.1
单个线圈实际总宽度	40.98	39.04
鼻部间隙	-2.63	0.40

入槽的问题,且嵌线后端部线圈排列整齐,端部间隙保持一致(见图14),同时改善了定子的绝缘性能与外观质量。

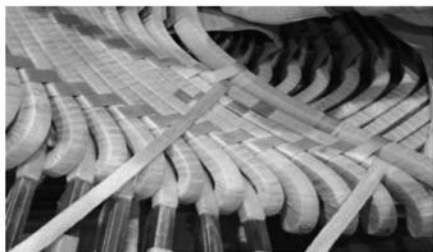


图14 更改后引线出线效果

4.2 定子嵌线定位优化

定子嵌线方式为正涨2匝及3匝线圈交替嵌入6根后,再反向交替嵌入6根反涨2匝及3匝线圈,如此循环直至整台线圈嵌完。由于线圈形状一致,为了方便操作员工取线,避免嵌错线圈,在嵌线前在定子线圈和定子铁心压圈上分别做好槽数标识。线圈引线端鼻部电磁线匝数要比非引线端少1匝,因此嵌线时在定子同一端,4种定子线圈鼻部最高点距定子压板的距离不一致。为了使线圈嵌入后线圈端部不互相干涉,嵌线时以线圈鼻部内孔到定子压板的距离为定位标准,以保证线圈引线端与非引线端端部弧度一致,如图15所示。



图15 定子嵌线端部效果图

5 结 语

FYS02型高功率密度风力发电机是中车株洲电机有限公司首个独立出口、批量交付的海外项目,具备重量轻、温升低、并网转速低、转速范围宽、电能质量好等优势,同时有低转速点效率高、整机噪声低的特点。为了满足客户的要求,通过对定子线圈制作及嵌线工艺不断探索与优化,首次实现了定子多类型线圈交替嵌入嵌线。经过近

一年的技术优化及生产制造,总结了该类型发电机线圈制作及嵌线的技术要点:

(1) 大截面多根电磁线并绕线圈制作可采用分步式绕线再合并涨型的方法减小绕线难度并改善线圈鼻部错位。

(2) 适当降低电磁线刚度、对涨型受力部位进行绝缘补强,可以改善线圈涨型时绝缘破损问题。

(3) 定子换向嵌线必须保证线圈端部垂直无倾斜且一致性良好。

(4) 设计弯头工装使线圈引线鼻部贴合紧密,防止引线挤占鼻部空间导致线圈无法下线。

(5) 定子嵌线鼻部间隙偏小时,可通过线圈鼻部抬高及引线绝缘结构优化进行改善。

(6) 定子换向嵌线定位应以线圈鼻部内孔到定子压板的距离为定位标准。

该工艺不仅适用于高功率密度风力发电机的定子线圈制作及嵌线,对于类似结构的大型成型线圈结构电机定子制作也具有很好的借鉴意义。

【参考文献】

- [1] 汪旭旭,刘毅,江娜,等. 风力发电技术发展综述[J]. 电气开关,2013,51(3): 16.
- [2] 王志新,张华强. 风力发电技术与功率控制策略研究[J]. 自动化仪表,2008,29(11): 1.
- [3] 王广军. 大型风力发电机的发展状况[J]. 科技风,2011(16): 73.
- [4] 侯喆瑞,张鑫,张嵩. 风力发电的发展现状与关键技术研究综述[J]. 智能电网,2014,2(2): 22.
- [5] 程明,张运乾,张建忠. 风力发电机发展现状及研究进展[J]. 电力科学与技术学报,2009,24(3): 2.
- [6] 钟伟强. 国内外风力发电的概况[J]. 风机技术,2005(5): 44.
- [7] Global Wind Energy Council. Global wind energy outlook 2010[R]. Brussels: Global Wind Energy Council,2010: 1-10.
- [8] 乔长帅,唐子谋,张建安. 一种交流牵引电机单叠绕组线圈的参数化建模方法[J]. 电机技术,2018(1): 5.
- [9] 钱小军. 电机成型线圈制造技术研究[J]. 输配电工程与技术,2018,7(2): 43.
- [10] 李广. 永磁同步风力发电机定子线圈的工艺难点及对策[J]. 电机技术,2008(4): 44.

(下转第110页)