

# 普通散绕绕组绝缘结构优化试验研究

张生德<sup>1</sup>, 高鑫<sup>2</sup>, 马赫然<sup>2</sup>

(1. 上海电器科学研究所, 上海 200063;

2. 上海电机系统节能工程技术研究中心有限公司, 上海 200063)

**摘要:** 在保证定子绕组绝缘结构可靠性的前提下, 通过控制漆包线导体直径(负公差)、漆膜偏心度( $\leq 1.5$ )和漆膜厚度, 减薄槽绝缘及槽楔厚度等方法, 优化普通散绕绕组绝缘结构, 提高定子槽满率, 有利于提升电机效率。对采用优化设计组合的3种典型绝缘结构进行热老化评定, 结果表明优化设计的3种绝缘结构温度指数均超过160℃, 达到155(F)级。采用优化的绝缘结构方案, 可以对高效电机的设计与开发提供帮助。

**关键词:** 绝缘结构; 偏心度; 模型线圈; 寿命; 耐热等级

中图分类号: TM 302 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)05-0070-05

doi: 10.12177/emca.2020.028

## Experimental Study on Optimization of Insulation Structure of Ordinary Random Winding

ZHANG Shengde<sup>1</sup>, GAO Xin<sup>2</sup>, MA Heran<sup>2</sup>

(1. Shanghai Electrical Apparatus Research Institute, Shanghai 200063, China;

2. Shanghai Engineering Research Center of Motor System Energy Saving Co., Ltd., Shanghai 200063, China)

**Abstract:** On the premise of ensuring reliability of insulation structure of stator winding, the insulation structure of ordinary winding is optimized by controlling the diameter of enameled wire conductor (negative tolerance) and the eccentricity ( $\leq 1.5$ ) and thickness of paint film, and reducing the thickness of slot insulation and slot wedge, so as to improve the full ratio of stator slot and the motor efficiency. Thermal aging experiment is carried out for three insulation structures. The results show that the temperature indices of three insulation structures are all over 160℃, reaching 155(F) grade. The optimized insulation structure can help the design and development of high efficiency motor.

**Key words:** insulation structure; eccentricity; model coil; life; temperature classification

## 0 引言

由于全球资源约束趋紧, 主要发达国家均把提高电机能效作为重要的节能措施。美国、欧盟各国和日本等国家在已制定相应的法律法规强制推行高效和超高效电机。国际电工委员会(IEC)在2008年制定了全球统一的电机能效分级标准(IEC 60034-30), 并统一了测试方法(IEC 60034-

2-1)。中国在2006年发布了中小型三相异步电动机能效标准(GB 18613—2006), 2012年又发布了参照IEC标准修订的电机能效标准(GB 18613—2012), 能效限定值为IE2; 目前正在重新修订GB 18613, 能效限定值为IE3。能效限定值的不断提高使电机的设计和制造难度不断加大, 绝缘结构的优化设计迫在眉睫。

中国在20世纪80年代定型的Y系列电机

收稿日期: 2020-02-28; 收到修改稿日期: 2020-04-08

作者简介: 张生德(1963—), 男, 高级工程师, 研究方向为电机绝缘结构及材料。

高鑫(1992—), 男, 工程师, 研究方向为高电压与绝缘技术。

马赫然(1987—), 男, 工程师, 研究方向为高电压与绝缘技术。

采用 B 级 (130 °C) 绝缘结构, 20 世纪 90 年代定型的 Y2 系列电机采用 F 级 (155 °C) 绝缘结构, 最近几年开发的 IE3 系列电机基本沿用了原 Y2 系列电机的 F 级绝缘结构。由于 IE4 系列电机在设计上沿用了 IE3 电机的定子槽形和三圆尺寸, 如果在制造工艺和绝缘结构上没有重大改进, 制造难度很大, 甚至某些小机座号规格电机将难以制造。因此, 优化绝缘结构、降低加工难度和制造成本, 是亟待解决的问题。随着绝缘材料行业和漆包线行业的发展, 其产品的工艺水平和质量有较大的提升, 为绝缘结构优化设计提供了空间。

本文以 Y2 系列电机绝缘结构为基础对其进行优化, 漆包线的导体尺寸采用负公差, 漆膜厚度为 GB/T 6109.1—2008<sup>[1]</sup> 中规定的最小漆膜厚度, 漆包线漆膜偏心度  $\leq 1.5$ ; 槽绝缘、槽楔厚度适当减薄。根据优化方案组合 3 种绝缘结构按照 GB/T 17948.1—2018<sup>[2]</sup> 制作模型线圈, 进行常规热老化评定, 结果表明优化设计的绝缘结构耐热等级均达到 155 (F) 级。证明绝缘结构优化设计方案可保证电机绝缘结构的可靠性。

## 1 定子绕组绝缘结构优化方案

定子绕组绝缘结构是由同一种或几种绝缘材料通过特定的工艺组合在一起所形成的结构, 主要涉及匝间绝缘、对地绝缘、外包绝缘, 三相电机还会涉及相间绝缘<sup>[3]</sup>。图 1 所示为三相异步电机定子绝缘结构示意图。

### 1.1 漆包线

原 Y2 系列电机大部分采用 QZY-2/180 聚酯亚胺漆包铜圆线。对于中心高为 63~280 mm 的电机允许使用 QZ(G)-2/155 改性聚酯漆包铜圆线, 漆膜厚度取最大厚度和最小厚度的平均值; 在电机设计时对直径  $< 1$  mm 的电磁线, 漆膜厚度取 0.06 mm, 对直径  $\geq 1$  mm 的电磁线, 漆膜厚度取 0.08 mm。实际在漆包线加工过程中, 漆包线漆的固有特性、涂漆工艺及过程等因素均会导致漆包线漆膜不完全均匀, 引起漆包线漆膜偏心, 进而影响漆包线的电气性能、绝缘连续性、机械性能和漆包线的适用性<sup>[4]</sup>。漆包圆线漆膜偏心度是指垂直于漆包线某一截面上的最大漆膜厚度与最小漆膜厚度的比值, 如图 2 所示, 偏心度为  $a/b$ 。从图 2

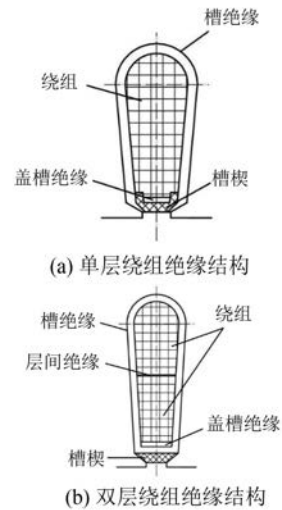


图 1 三相异步电机定子绝缘结构示意图

中可以看出, 在铜导体截面处周围包裹的绝缘厚度不同, 导致绝缘承受的击穿电压也不同, 绝缘厚的位置击穿电压高, 绝缘薄的位置击穿电压低。通常低压电机采用散绕绕组, 绕组为随机下线, 如果漆包线漆膜偏心度较大, 在绕组下线过程中, 漆包线漆膜薄弱的位置有可能绞合在一起, 且在绕组端部整形过程中漆包线漆膜薄弱的位置更易受损, 将增加电机定子绕组匝间绝缘失效的可能性。因此对于优化的绝缘结构, 对漆包线漆膜的偏心度要求较高, 应不大于 1.5。该要求将增加定子绕组的绝缘可靠性。

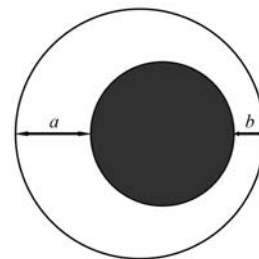


图 2 漆包线漆膜偏心示意图

对散绕绕组绝缘结构, 匝间绝缘损坏是绝缘结构失效的主要原因。为加强匝间绝缘, 同时提高槽满率, 优化方案选用耐热等级 180 级及以上漆包线, 其导体尺寸采用负公差, 漆膜偏心度  $\leq 1.5$ 。漆膜厚度为 GB/T 6109.1—2008<sup>[1]</sup> 规定的最小漆膜厚度。部分典型规格漆包线的参数如表 1 所示。导体导电性要求为  $\geq 101\%$  国际退火铜标准 (IACS)。

表 1 优化绝缘结构所用的部分漆包线参数 mm

导体直径	导体公差	最小漆膜厚度	最大外径
0.560	-0.006~0	0.047	0.607
0.630	-0.006~0	0.050	0.680
0.710	-0.007~0	0.053	0.763
0.800	-0.008~0	0.056	0.856
0.900	-0.009~0	0.060	0.960
1.000	-0.010~0	0.063	1.063
1.120	-0.011~0	0.065	1.185
1.250	-0.013~0	0.067	1.317
1.400	-0.014~0	0.069	1.469
1.600	-0.016~0	0.071	1.671

### 1.2 槽绝缘

原 Y2 系列电机绝缘结构槽绝缘采用耐热等级高于 155(F) 级的薄膜、纤维纸或布柔软复合材料。复合材料中聚酯薄膜厚度应不小于 0.075 mm, 其性能应满足 GB/T 5591.3—2018<sup>[5]</sup> 的要求。大机座号采用较厚的槽绝缘是为了避免大机座号电机绕组在嵌线时槽内冲片“毛刺”刺破槽绝缘而破压。原则上在保证冲片质量的前提下, 对于相同电压, 槽绝缘厚度应相同。对于槽绝缘的优化, 在保证薄膜厚度的前提下, 考虑不同机座号电机的嵌线工艺, 可以适当减薄。相间绝缘要求与槽绝缘相同。优化绝缘结构的槽绝缘厚度如表 2 所示。

### 1.3 槽楔

槽楔的作用是保护绕组线不从槽内溢出。槽楔通常采用 3240 层压板、聚酯玻璃纤维或环氧玻璃纤维引拔槽楔。较大机座号对应的槽楔较厚,

不利于高效率电机设计。为了提高效率, 对槽楔厚度适当减薄。不同机座号对应的槽楔厚度如表 3 所示。

表 2 不同机座号对应槽绝缘尺寸 mm

机座号	槽绝缘厚度	
	Y2 系列	优化结构
80~112	0.25	0.20
132~160	0.30	0.20
180~280	0.35	0.25
315~355	0.40	0.30

表 3 不同机座号对应槽楔厚度 mm

机座号	槽楔厚度	
	Y2 系列	优化结构
80~112	2.0	1.0
132~160	2.0	1.0
180~280	2.0	1.0
315~355	3.0	1.5

## 2 试验方案

### 2.1 模型线圈

为了验证优化后绝缘结构的可靠性, 本文根据优化设计方案, 设计组合了 3 种典型绝缘结构 A、B、C, 按照 GB/T 17948.1—2018 的附录 A 制作模型线圈, 进行热老化评定<sup>[2]</sup>。模型线圈组分材料如表 4 所示。其中: 漆包线采用最小漆膜厚度, 漆膜偏心度  $\leq 1.5$ ; 槽绝缘/相间绝缘厚度为 0.20 mm; 槽楔厚度为 1 mm。模型线圈外观如图 3 所示。

表 4 模型线圈组分材料

模型线圈	漆包线	槽绝缘/相间绝缘	浸渍树脂	槽楔	绑扎材料	套管
A	Q(ZY/XY)-2/200 聚酯亚胺/聚酰胺酰亚胺复合漆包铜圆线(公司 1)	6640 聚酯薄膜聚芳酰胺纤维纸柔软复合材料(公司 2)	环保型耐高温浸渍树脂(公司 2)	环氧玻璃纤维引拔槽楔(公司 3)	聚酯纤维绑扎带(公司 3)	丙烯酸酯玻璃纤维软管(公司 3)
B	Q(ZY/XY)-2/200 聚酯亚胺/聚酰胺酰亚胺复合漆包铜圆线(公司 1)	6648 聚酯薄膜云母芳纶混抄纸柔软复合材料(公司 4)	不饱和聚酯亚胺树脂(公司 5)	环氧玻璃纤维引拔槽楔(公司 3)	聚酯纤维绑扎带(公司 3)	丙烯酸酯玻璃纤维软管(公司 3)
C	Q(ZY/XY)-2/200 聚酯亚胺/聚酰胺酰亚胺复合漆包铜圆线(公司 6)	6648 聚酯薄膜云母芳纶混抄纸柔软复合材料(公司 4)	改性聚酯亚胺无溶剂浸渍树脂(公司 6)	环氧玻璃纤维引拔槽楔(公司 3)	聚酯纤维绑扎带(公司 3)	丙烯酸酯玻璃纤维软管(公司 3)

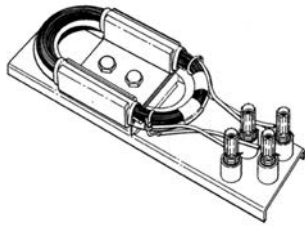


图3 模型线圈外观

2.2 试验方案

试验按照 GB/T 17948.1—2018<sup>[2]</sup> 规定进行。老化温度和对应的老化分周期长度如表 5 所示。每一老化温度下的模型线圈试样数为 10 个。在第一个热老化周期前应进行质量保证试验,包括外观检查与交流耐电压试验;在热老化分周期后进行诊断分周期试验,诊断分周期包括振动试验、潮湿试验和耐电压试验;直到试样全部失效。根据阿伦尼乌斯原理计算模型线圈绝缘结构的耐热温度指数。

表 5 老化温度和分周期长度

老化温度/°C	每个老化分周期长度/d
180	28
200	7
220	2

3 试验结果及分析

根据 3 个温度点常规热老化试验,得到 3 种模型线圈每一试样的失效周期与寿命,如表 6~表 8 所示。

阿伦尼乌斯方程为

$$\ln L = m + \frac{n}{T} \quad (1)$$

式中:  $L$  为寿命, h;  $m, n$  为拟合系数;  $T$  为温度, K。

表 6 180 °C 热老化后模型线圈试样的寿命

模型线圈	试样编号	失效周期	寿命/h
A	1~4	10	6 384
	5	7	4 368
	6	5	3 024
	7,10	8	5 040
	8,9	6	3 696
B	1,4,8,9	10	6 384
	2,3,10	7	4 368
C	5~7	11	7 056
	1~5,7~10	11	7 056
	6	10	6 384

表 7 200 °C 热老化后模型线圈试样的寿命

模型线圈	试样编号	失效周期	寿命/h
A	1,6	6	924
	2~5,7~10	7	1 092
B	1~10	7	1 092
C	1~10	7	1 092

表 8 220 °C 热老化后模型线圈试样的寿命

模型线圈	试样编号	失效周期	寿命/h
A	1,2	5	216
	3,4,9	8	360
	5	7	312
	6	10	456
	7,8,10	6	264
B	1,2,8,9	8	360
	3,5~7,10	5	216
C	4	11	504
	1	10	456
	2,8	5	216
	3,5,6,10	11	504
	4,7	12	552
	9	8	360

根据式(1)拟合得到热老化寿命图,如图 4 所示。图 4 中的散点代表实测线圈试样失效的数据,直线为根据实际数据拟合得到的模型线圈与

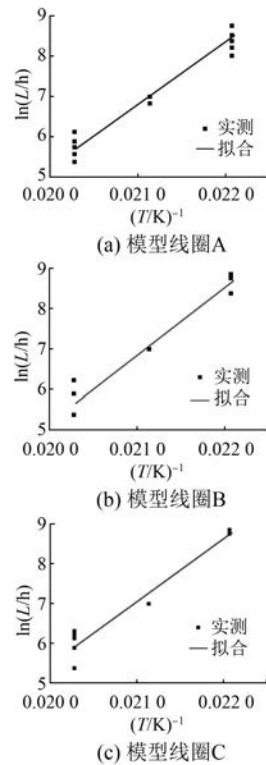


图 4 模型线圈寿命与温度的关系

温度的关系。

从图4中散点可以看出,每种线圈的寿命均随着温度的升高而降低。拟合得到的直线完全符合线圈寿命的变化规律。根据拟合曲线计算当寿命为 $2 \times 10^4$  h时对应的温度。表9为3种线圈的拟合系数和温度计算结果。

表9 3种线圈的拟合参数和温度计算结果

线圈型号	$m$	$n$	温度/℃
A	-25.98	$1.561 \times 10^4$	161.86
B	-28.55	$1.685 \times 10^4$	165.04
C	-26.22	$1.584 \times 10^4$	165.35

从表10所示温度计算结果可以看出,3种模型线圈对应寿命为 $2 \times 10^4$  h时,所有线圈对应的温度均大于 $160$  ℃,超过F级耐热等级要求( $155$  ℃)。

## 4 结 语

通过对漆包线导体直径(负公差)、漆包线漆膜偏心度( $\leq 1.5$ )、漆膜厚度加以控制,并减薄槽

绝缘和槽楔厚度,对普通散绕组绝缘结构进行优化,可以有效提高槽满率,降低采用散绕组的高效电机的设计难度和加工制造难度。对采用优化设计组合的3种绝缘结构进行常规热老化评定,结果表明温度指数均超过 $160$  ℃,耐热等级达到155(F)级。优化结果有利于更高效电机设计与开发。

## 【参考文献】

- [1] 中国电器工业协会.漆包圆绕组线 第1部分:一般规定:GB/T 6109.1—2008[S].2008.
- [2] 中国电器工业协会.旋转电机绝缘结构功能性评定 散绕组试验规程 热评定和分级:GB/T 17948.1—2018[S].2018.
- [3] 赵慧春.高压电机定子线棒绝缘结构设计及其性能研究[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2008.
- [4] 王朝霞.漆包线漆膜偏心产生的原因及对漆包线性能的影响[J].中国金属通报,2016(2): 63.
- [5] 中国电器工业协会.电气绝缘用柔软复合材料第3部分:单项材料规范:GB/T 5591.3—2018[S].2018.
- [13] LIAO K, HE Z, XU Y, et al. A sliding mode based damping control of DFIG for interarea power oscillations [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(1): 258.
- [14] HU J, NIAN H, HU B, et al. Direct active and reactive power regulation of DFIG using sliding mode control approach[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2010, 25(4): 1028.
- [15] TABUADA P. Event-triggered real-time scheduling of stabilizing control tasks [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2007, 52(9): 1680.
- [16] BEHERA A K, BANDYOPADHYAY B. Robust sliding mode control: an event-triggering approach [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems: II Express Briefs, 2017, 64(2): 146.
- [17] BORGERS D P, HEEMELS W P H. Event-separation properties of event triggered control systems [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2014, 59(10): 2644.
- [18] BEHERA A K, BANDYOPADHYAY B. Self-triggering-based sliding-mode control for linear systems [J]. IET Control Theory and Application, 2015, 9(17): 2541.
- [19] GIRARD A. Dynamic triggering mechanisms for event-triggered control [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2015, 60(7): 1992.
- [20] HAN R, MENG L, GUERRERO J M, et al. Distributed nonlinear control with event-triggered communication to achieve current sharing and voltage regulation in DC microgrids [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(7): 6416.
- [21] SHI D, XUE J, ZHAO L, et al. Event-triggered active disturbance rejection control of DC torque motors [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2017, 22(5): 2277.
- [22] SU X, LIU X, SONG Y D. Event-triggered sliding mode control for multi-area power systems [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(8): 6732.
- [23] 管萍,董玲玲,杨秀媛.双馈风力发电机终端滑模变结构的直接功率控制[J].电力电子技术.2017, 51(9): 92.
- [24] 年珩,程晨闻,宋亦鹏,等.谐波电网下基于重复控制的双馈风力发电机直接功率控制技术[J].中国电机工程学报.2016,36(2): 407.