

38-41

· 38 ·

电机 F 级绝缘材料和绝缘结构

陈黎明

(马钢动力厂 安徽省马鞍山市 243000)

TM303.4
TM21

【摘要】 重点介绍了电机 F 级绝缘材料的性能分析和选择,从介电性能和相容性角度,阐述了高、低压电机 F 级绝缘结构的设计要点。

【关键词】 相容性 绝缘 绝缘材料 绝缘结构

电机

F-Level Insulation Material and Insulation Structure of Motors

Chen Liming

【Abstract】 Characteristics and selection of F-level insulation material of motors are introduced in detail. Design keys of F-level insulation structure of high voltage motors and low voltage motors are Presented from the point of view of dielectric characteristics and consistency.

【Keywords】 consistency, insulation, insulation material, insulation structure

1 前言

随着材料工业的高速发展,在电机制造业中,B 级绝缘结构的电机已面临淘汰。如何不降低绝缘等级检修电机以保证电机检修质量和使用周期是冶金电修行业的课题。过去,我们也曾尝试过 F 级绝缘改造,但在绝缘材料的经济性和结构的相容性还存在着不尽合理之处,对此,我们进一步加强了电机 F 级绝缘材料和绝缘结构的研究工作,以期实现绝缘的更新换代。

2 F 级绝缘材料

2.1 匝间绝缘

F 级漆包线漆目前较为通用的是聚脂亚胺树脂,聚脂亚胺漆保留了聚脂漆的优点,提高了耐热性和耐热冲击性,涂漆工艺幅度大,适应性强,质量稳定,易于加工高质量的圆线和扁线,并且当聚脂亚胺中环氧含量增加时,可获得 H 级聚脂亚胺漆,其与 DMD、FD-MD、NMN 和环氧浸渍漆,3240 等绝缘材料

的相容性较好,但从相容性和其它性能上看,改性聚脂亚胺漆更好。

对玻璃丝包线,由于未经浸漆的玻璃丝是多孔性材料,其电气强度与同样厚度的空气电气强度相当,一般电工玻璃丝的击穿场强为 25~30 kV/mm。无碱玻璃丝理论击穿场强犹高于电工玻璃丝,因此,对主要电气性能影响的是浸渍漆,例:0.12 mm 玻璃丝包线击穿场强 $E=0.4$ kV/mm,但一经浸漆处理后,击穿场强提高到 70 kV/mm。过去,我们曾使用过的 F 级双丝扁线,其浸渍漆为二苯醚树脂 1449,1449 的相容性未被证实,并且其性能亦不如聚脂亚胺漆和改性聚脂亚胺漆,因此,对 F 级双丝包线应优先选用聚脂亚胺或改性聚脂亚胺漆。

2.2 粉云母带

粉云母带,亦被称为“三合一”材料,是由粉云母纸和双面辅强材料经胶粘剂粘合而成,在电机中常常作为绕组对地主绝缘材料。

我们知道,粉云母纸和常用的辅强材料—无碱玻璃丝布的耐热等级已达C级,常用的胶粘剂为环氧树脂,其本身具有良好的介电性能、机械性能、耐热性和良好的防潮性,因此,云母带主要性能取决于环氧树脂的固化剂,常用的B级和F级粉云母带的差别亦在于固化剂不同。用途最广泛的B级粉云母带5438-1,固化剂是环氧桐油酸酐胶,简称TOA(5438-1有时亦称TOA粉云母带),目前常用的F级粉云母带固化剂有:马来酰

亚胺桐油酸酐固化剂、硼胺固化剂和有机羧酸盐固化剂,这三种固化剂组成的环氧胶,均使云母带机械强度得到较大提高,有着较高的热稳定性。但是,马来酰亚胺桐油酸酐云母胶(简称桐马酸酐环氧云母胶)有着来源丰富、制造成本低的优点,从性能上看,仅有硼胺环氧胶的抗弯强度略高于它,其他两种固化剂组成的环氧胶其它性能均低于它,因此,在F级环氧胶中应首推桐马酸酐环氧胶,其性能与TOA相比见表1。

表1 TOA与桐马酸酐环氧胶性能比较表

材料名称	固体含量	介电强度 kV/mm	体积电阻率/ Ω			相对介电常数 ϵ_r			介损 $\tan\delta$			绝缘等级
			室温	130℃	155℃	室温	130℃	155℃	室温	130℃	155℃	
TOA	>66%	>25	$(1\sim6)\times10^{14}$	$(1\sim3)\times10^{13}$	—	3.9	4.8~5.2	—	<1%	<6%	—	B
桐马酸酐环氧胶	>60%	105	7×10^{14}	7×10^{14}	1×10^{14}	3.18	3.9	3.92	0.34%	2.5%	0.98%	F

桐马环氧粉云母带以马来酰亚胺桐油酸酐固化环氧树脂粘合501粉云母纸和双面辅强无碱玻璃丝布,(0.04+0.05+0.04mm)其工艺性能好,柔软爽手,贮存期长,其性能优于其它F级粉云母带,价格便宜,能够适用于模压技术,击穿场强为35kV/mm(5438-1击穿场强为27kV/mm),介电常数 $\epsilon=4.0$ (155℃时 $\epsilon=4.5$),并且据有关资料介绍,这种粉云母带随着温度上升,其介损值反而下降,这是其特点之一。

2.3 槽绝缘材料

槽绝缘材料一般为环氧板和柔软复合材料,环氧板(3240)有着良好的机械性能和介电性能,是很通用的F级绝缘材料,柔软复合材料是我国发展极为迅速的材料,随着国外Nomex纸的引进,国内柔软复合材料由DMD(B级)迅速发展至NMN(F级)和NHN(H级),这些材料都有着稳定和优异的介电性能、机械性能和耐热性能和其它绝缘材料良好的相容性。但是,NMN和NHN的价格昂贵,F级绝缘中小型电机以NMN取代DMD,成本较高。因此,从确保性能和

可行性来看,选用NMN是很好的。从成本角度出发,可以选用FDMD,它属于F级聚脂纤维无纺布聚脂薄膜复合柔软材料,由两层聚脂纤维纸中间一层聚脂薄膜经层间粘合,表面涂以高温绝缘漆。这种材料价格相对比较便宜,其性能能够保证F级绝缘的需要,但主要问题是这种材料的相容性无从考证。

2.4 绝缘浸渍漆

对F级绝缘浸渍漆,我们参照有关资料经过多方考察和分析,认为1040漆较为合适,其漆基成分为环氧树脂,固化剂为桐马酸酐,粘度12~30St,固体含量70%,工频介电强度70kV/mm,体积电阻率常态 $1\times10^{13}\Omega$,浸一遍即可满足要求,特别是适应于修理单位适用,其粘度低、固体含量高、浸透性好、固化速度快、流失少、挂漆量大,可以降低劳动强度,提高生产效率。并且粘连强度适宜,不象无溶剂漆那样,使修理后的电机拆线困难。与无纬带相容性好,价格便宜。

3 绝缘结构

绝缘结构的设计考虑:

(1)介电性能要求,包括介电强度、体积

和表面电阻系数、介电常数、介质损耗 $\text{tg}\delta$ 、耐电晕、电弧性能、泄漏和表面放电等。

(2)机械性能,包括抗拉、压、剪、弯曲的强度、抗冲击和撕裂强度、硬度、延伸性、可挠性、加工性等。

(3)热性能,包括耐热性、热导性、热膨胀系数、闪点、软化点。

(4)化学性能,包括耐腐蚀、电化学稳定性、抗老化、氧化、可溶性和耐溶剂性,与其它材料的相容性等。其中,电气性能是主要的,但不是决定性的,对不同的电机,绝缘结构设计的要点亦不同。对高压电机,介电性能起着决定性作用。对低压电机,耐热性能、相容性以及机械性能起到决定性作用。对转子,机械性能起着决定性的作用。由于B级绝缘材料与结构的研究比较成熟,许多性能可以有据可查,而对新型F级绝缘结构的研究还不是很成熟,特别是相关材料的威布尔曲线,长期耐电 $U-t$ 曲线以及机械方面抗拉、压、弯曲以及锤击后性能变化参数难以查到,因此,某些分析只能是粗略的定性分析。

3.1 介电性能

3.1.1 瞬时工频耐电强度

一般 $U_b = K \cdot U_N = E_1 \cdot d_1^n$

式中: K ——过电压倍数,取 8~10

U_N ——工作电压 kV

E_1 ——材料击穿场强 kV/mm,对桐马环氧云母带 $E_1 = 35$ kV/mm

d_1 ——单边绝缘厚度 mm

n ——电场均匀系数, n 取 0.7~0.9

对 6 kV 电机,取 $K=10$,则:

$10 \times 6 = 35 \cdot d_1^n$ 可求得:

$d_1 = 1.82 \sim 2.17$

桐马环氧云母带厚度 0.14 采取半迭包方式,需 7~8 层可满足要求,考虑 B 级绝缘粉云母带绝缘规范,对 6 kV 级采用 8~10 层 5438-1 粉云母带,对 6 kV F 级绝缘亦可采用 8~10 层粉云母带的绝缘规范将可满足要

求。

3.1.2 长期耐电压性

$t = K \cdot E^{-n}$

式中: t ——寿命时间

K ——常数

n ——主绝缘的耐压和时间关系,即 $U-t$ 曲线的斜率,取决于绝缘结构、工艺以及老化因子等。

E 外施电场强度:

$$E = \frac{U}{r_0 \cdot \ln(1 + a/r_0)}$$

式中: a ——偏导线厚度

r_0 ——导线曲率半径

由此式可见,B、F 级绝缘结构对长期耐电压性能的要求区别在于 $U-t$ 曲线的斜率不同,由于 F 级绝缘结构主绝缘为桐马环氧粉云母带,其击穿场强大于 TOA 粉云母带,可以得出 F 级的 $U-t$ 曲线下降速度将缓于 B 级,因此,相同条件下,F 级绝缘的长期耐电压性要将好于 B 级绝缘。

3.1.3 发热功率,主要是导体发热和介质发热。

$P = I^2 \cdot R_c + U^2 \cdot W \cdot C \cdot \text{tg}\delta$

5438-1 和桐马环氧粉云母带相比,130℃时,5438-1 的 $\text{tg}\delta$ 在 6% 左右,桐马环氧粉云母带的 $\text{tg}\delta = 2.5\%$ 。

对电机 $C \approx (\epsilon_0 \epsilon_r \cdot S)/d$,则 5438-1 的 $\epsilon_r = 4.8 \sim 5.2$;而桐马环氧粉云母带 $\epsilon_r = 3.9$ 可见,发热功率桐马环氧粉云母带将小于 5438-1。

3.1.4 热击穿电压

$$U = 2.3 \times 10^5 \times \sqrt{\frac{h\sigma\lambda}{b f \epsilon_r \text{tg}\delta (h\sigma + 2\lambda)}}$$

由于桐马环氧粉云母带相对环氧粉云母带有着较低的 ϵ_r 和 $\text{tg}\delta$ 值,并且与 B 级绝缘相比,热导率 λ 、表面散热系数 σ 和绝缘厚度 h 基本不变,故热击穿电压和将有所提高。

3.2 相容性讨论

相容性是电机选材的重要指标,重点是浸渍漆和漆包线之间的相容性。

相容性试验方法,目前各国正在探索,尚未被国际公认,但其原理大多利用绞线或漆包线与浸渍漆等组合成简单的试样,模拟电机运行条件中的热、机械、环境等因素,最后以击穿电压、机械强度或漆膜界面开裂程度作比较。相容性试验是一种长期实验,一般检修单位没有条件做,可以参照有关资料介绍的结果。从我们所掌握的资料来看,美国 UL 公司的 UL1446 试验规程是较为先进和科学的,其试验结果的资料相对较全面,可以参照。

现介绍 UL1446 试验结果之一:

绝缘结构:

漆包线:QZY-2 改性聚脂亚胺漆包线

浸渍漆:EIU-环氧无溶剂漆

槽绝缘:NMN

槽楔:3240(由于环氧板性能稳定,可暂不予考虑)

套管:不考虑

结果:对绞线:

击穿电压:原 21.1 kV,后 13.9 kV

外观:完整、光亮

弯曲倍径:4d

槽绝缘抗张力:原 379.5 N,后 183.5 N

槽楔抗张力:原 853 N,后 680 N

套管击穿电压:原 6.96 kV,后 4.88 kV

结论:相容性好。

我们使用的结构基本与其类似。

漆包线:聚脂亚胺或改性聚脂亚胺漆包线

浸渍漆:1040(少溶剂环氧浸渍漆)

槽绝缘:FDMD 或 NMN

槽楔:3240

这种绝缘结构参照 UL1446 的试验结果可以看出,其相容性是较好的,不同点在于①

1040 漆和 EIU 漆相比多了溶剂的成分(溶剂经烘干工艺将挥发)。因此,须做漆包线对甲苯或二甲苯的耐溶剂试验。②若选用 FDMD,其相容性将难以考证,只能通过一些辅助试验和实际使用进行检验,但从相容性角度出发,它不起主要作用,并且一般柔软复合材料的化学稳定性是较好的,根据我们试用情况基本相符。

由于所选择的材料,其性能均高于原 B 级使用的材料。因此,可以说在机械性能和化学性能方面是有所保证的。

4 经济效益初算

采用 F 级绝缘材料代替 B 级绝缘材料,电机运行的最高极限温度提高了 25℃,考虑到影响电机寿命的因素不单是热老化。根据国际电工委员会建议采用的 10℃和 12℃法则,即运行每超过极限温度 10℃或 12℃,电机运行寿命将缩短一半(换言之,在同样运行条件下,如果电机绝缘的极限温度每提高 10℃或 12℃,电机寿命将延长一倍)。只按寿命延长为原来的 2 倍,检修次数减半来计算,若每年大修电机为 500 台,总功率 15 000 kW, B 级绝缘大修修理单价为 130 元/kW, F 级绝缘大修成本提高约 20%,每年可节约费用:

$$15\,000 \times 130 - [(15\,000 \times 130) / 2] \times (1 + 20\%) = 78 \text{ 万元}$$

电机绝缘等级提高后,仍在原来条件下,电机寿命提高,检修次数减少,停机损失将大大减少,这方面创造的间接效益将是巨大的。

因此,聚脂亚胺(或改性聚脂亚胺)漆包线漆,桐马环氧粉云母带、FDMD 柔软复合材料、1040 环氧浸渍漆等主要材料组合的 F 级绝缘结构基本可以满足绝缘更新的需要。至于绝缘套管,无纬带等辅助绝缘材料的选择,需在实践中加以论证。

1999-03-02 收稿