

变频牵引电机线圈绝缘电老化规律的研究

任文娥¹, 于钦学¹, 钟力生¹ 何恩广²

(1. 西安交通大学电气绝缘研究中心, 710049, 西安; 2. 株洲电力机车厂, 412001, 湖南株洲)

摘要: 为了解决大量变频电机线圈绝缘过早损坏的问题, 采用变频牵引电机线圈作为试样, 施加高压脉冲方波电压进行电老化试验, 研究脉冲电源的电压幅值、脉冲频率、温度对变频牵引电机线圈试样寿命的影响规律. 试验结果表明: 电机线圈寿命随电压幅值和温度的增加成指数性衰减, 而在 13~20 kHz 范围内, 试样寿命与频率成负线性关系; 在老化条件相同时, 同批次试样的寿命差距较大; 试样击穿点几乎都发生在电磁线的弯曲部分和铜线棱角处.

关键词: 牵引电机; 线圈绝缘; 老化; 寿命

中图分类号: TM835 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)12-0074-04

Electrical Aging Law of Winding Insulation for Pulse Width Modulation Inverter-Fed Traction Motor

REN Wen'e¹, YU Qinxue¹, ZHONG Lisheng¹, HE Enguang²

(1. Electric Insulation Research Center, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Zhuzhou Electric Locomotives Group, Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: Aiming at a large number of premature failures of wingding insulation of PWM inverter-fed AC traction motor, the inverter-fed AC traction motor wingding is taken as a sample, and square-wave high-voltage pulse is imposed to carry out electric aging test. The influences of pulse supply voltage, pulse frequency, and temperature on the life of traction motor wingding sample are investigated. It is shown that the wingding life decays exponentially with the increasing voltage and temperature. Within frequency range form 13 kHz to 20 kHz, the relation between winding life and frequency gets negatively linear. Under the same aging conditions, the winding life in the same batch can be quite different. The almost all winding sample breakdowns occur in the electromagnetic wire's bent portion and copper corner.

Keywords: traction motor; winding insulation; aging; life

据报道, 在世界范围内, 发电厂所发出的电能有超过一半以上是消耗在电动机上的, 发达国家达 70% 以上^[1], 我国也在 60% 以上. 为了节约电能, 合理有效地使用能源, 许多国家早在 20 世纪 80 年代就开始生产和使用交流变频调速电机, 与传统恒速电机相比, 采用变频调速电机不仅可以节约电能 15%~20%^[2-3], 而且具有一些突出的优点, 如: 能实现电机高速运转和高电压运行, 实现电机软启动及快速制动, 电机结构简单、体积小、造价低和维修省

力等等. 随着科学技术的发展, 变频调速电机得到日益广泛的应用.

但是, 近年来国内外大批变频调速电机不断出现绝缘过早破坏的现象^[1-4], 有些变频电机的使用寿命只有 1~2 a, 甚至有些在试运行期间电机绝缘就被击穿破坏, 并且击穿通常发生在匝间绝缘. 这引起了国内外相关学者和专家的特别关注, 也是应用电力电子逆变技术带来的电气绝缘技术的新课题. 因此, 研究脉冲宽度调制(PWM)变频调速牵引电机绝

缘老化机理和剩余寿命无疑具有重要的理论价值和实际应用意义。

国内外学者在这个方面已经进行了一些初步的研究探索,例如采用人工绕制的模拟线圈进行试验研究,或对小功率 PWM 电机绝缘进行试验研究,但是对于 100 kW 以上的 PWM 型交流异步牵引电机绝缘的老化性能研究相对很少. 因此,本文重点研究牵引电机线圈绝缘电老化产生的原因及特点。

1 试验线路及试样准备

1.1 试验线路

试验线路基本原理如图 1 所示,整流电路将交流变为直流,逆变电路将直流电压信号变为脉宽调制的方波脉冲信号,变压器将电压幅值比较低的方波脉冲变成高压方波脉冲输出,见图 2. 图 1 中 R-C 串联电路主要用于减小过冲电压,控制调试电路主要控制 PWM 电源的输出信号的上升沿、占空比、频率、电压等以及过压、过流保护. 变压器输出方波的

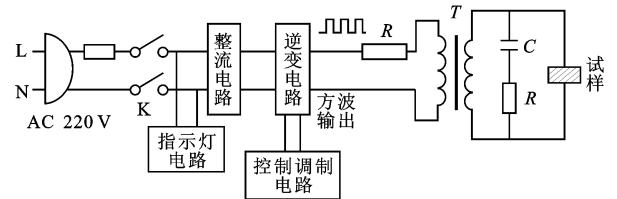
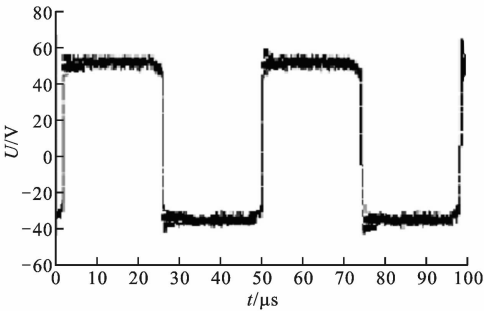
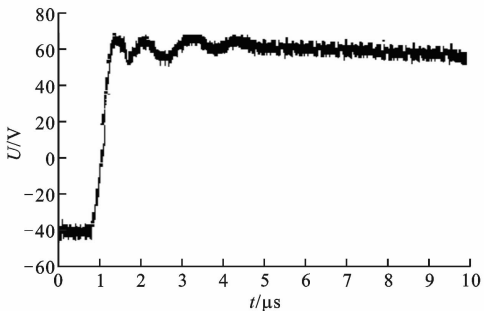


图 1 高频高压脉冲电源的基本原理框图



(a) 变压器输出方波的波形



(b) 放大的方波前沿波形

图 2 变压器输出方波的波形和放大的方波前沿波形

波形是通过纯电阻分压器输出到数字存储示波器上得到的,其基本性能参数:频率为 5~20 kHz, 占空比为 50%, 上升时间约为 600 ns, 过冲电压约为 10%。

1.2 试样准备

试验所用的试样为高速牵引电机专用电磁线,将高速牵引电机实际线圈截取一部分,做成如图 3 所示的结构和尺寸. 电磁线内部是扁铜线,外部以耐电晕聚酰亚胺薄膜 2/3 叠包绝缘,厚度为 0.21 mm, 2 根电磁线外面首先用薄膜云母带半叠包 2 次,然后再用玻璃丝带平包一次. 图 3 中的电极部分是将绝缘层剥去剩下的纯铜导体,以便于接线施加电压,进行电老化试验。

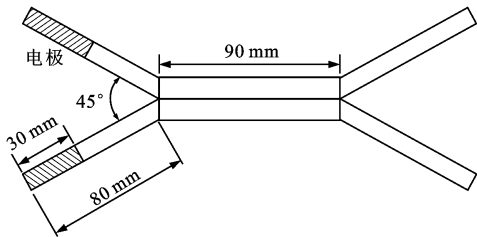


图 3 电磁线试样

2 试验结果与讨论

2.1 电压幅值对电磁线绝缘寿命的影响

将 4 个相同的试样并联接入试验线路的试样位置(见图 1). 在室温状态下,保持电压频率为 20 kHz、方波上升沿为 600 ns 和占空比 50% 不变,在相同条件下同时给 4 个相同的试样施加某一电压,在此电压下老化 4 个试样直至所有试样都击穿为止,记录下老化的电压值和每个试样从加压到击穿所用的时间,此时间就是每个试样在此电压下的寿命. 然后更换试样,改变施加的电压幅值,再进行另一个电压幅值的电老化试验,老化过程与上面相同. 记录的试验数据如表 1 所示,电压幅值与电磁线寿命的关系曲线如图 4 所示. 根据试验曲线以及寿命与电场强度成反幂关系^[5],可以得出下面试样寿命与电压幅值的经验关系式

$$t_U = 2.852 \times 10^{25} / U^{7.255} \quad (1)$$

表 1 中的计算寿命是根据式(1)计算得出的,从中可见计算值与试验值比较接近。

表 1 电磁线寿命与电压幅值关系的试验数据

U/kV	t _U /h	平均寿命/h	计算寿命/h
±1 470	247,304,312,326	297.3	299.4
±1 540	151,195,238,266	212.5	213.6
±1 740	59,78,92,105	83.5	88.1
±1 880	31,47,51,75	51.0	50.3

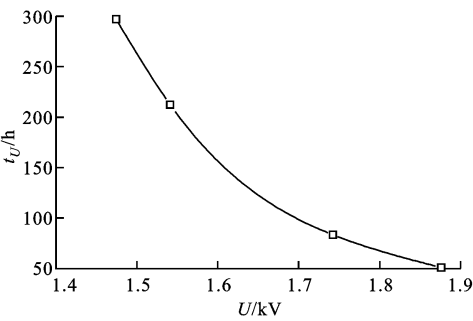


图 4 电磁线寿命随电压幅值的变化

2.2 电压频率对电磁线绝缘寿命的影响

试样制备与试验过程基本与上节相同,在这里只是改变电压频率而保持电压幅值恒定(±1 880 V),试验结果分别如表 2 和图 5 所示.在试验电压频率范围,试样寿命随着频率的增加而减小.随电压频率的增加,单位时间内的放电次数增加,则累加放电量、累加放电能量、累加放电功率、累加放电电流等都会增加,因此导致了试样寿命随着频率的增加而减小.在 13~20 kHz 范围内,试样寿命随频率的变化关系基本是一条直线,电老化寿命与频率成反比.根据试验曲线,得出试样寿命与电压频率的经验关系式

$$t_f = 1\,011.4/f \tag{2}$$

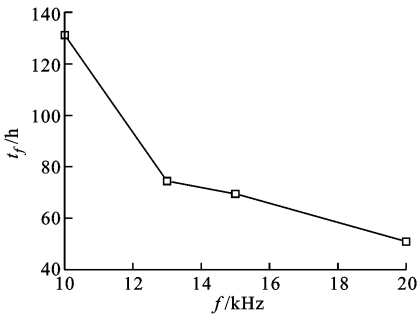


图 5 电磁线寿命随电压频率的变化

表 2 电磁线寿命与电压频率关系试验数据

<i>f</i> /kHz	<i>t_f</i> /h	平均寿命/h	计算寿命/h
10	73,86,159,207	131.3	101.1
13	67,73,76,83	74.8	77.8
15	58,68,75,77	69.5	67.4
20	31,47,51,75	51.0	50.6

表 2 中的计算寿命是根据式(2)计算得出的,当频率为 10 kHz 时,试样的寿命明显高于计算值.

2.3 电、热同时作用对电磁线绝缘寿命的影响

把试样放入烘箱中,改变温度而保持电压幅值和电压频率恒定(±1 880 V,20 kHz),试验数据和试验曲线分别如表 3 和图 6 所示.在试验温度范围,

试样寿命随着温度的升高而减小,高温下的寿命比常温下短得多.温度升高,放电起始电压降低,放电强度增加,放电产生的化学腐蚀和白色析出物因温度升高而加剧.放电可在试样内部产生高温,此热量在试样外部同样是高温时更不容易散发出去,造成试样内部的温度进一步升高,导致放电进一步加剧,形成恶性循环,以至试样最终被击穿.

根据试验曲线,得出试样寿命与温度的经验关系式为

$$t_T = 1.648 \times 10^{10} / T^{3.653} \tag{3}$$

表 3 寿命与温度的关系

<i>T</i> /℃	<i>t_T</i> /min	平均寿命/min	计算寿命/min
90	1 080,1 090,1 110,1 140	1 105.0	1 197.0
130	190,270,270,280	252.5	312.4
170	90,90,120,140	110.0	117.3
200	50,60,70,90	67.5	64.8

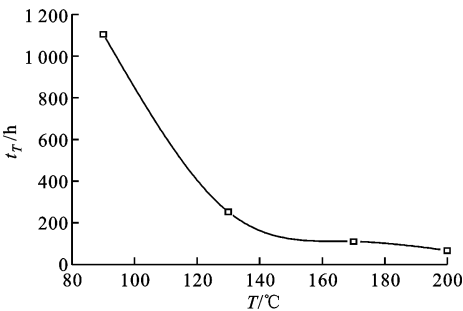


图 6 电磁线寿命随温度的变化

表 3 中的计算寿命由式(3)计算得出.

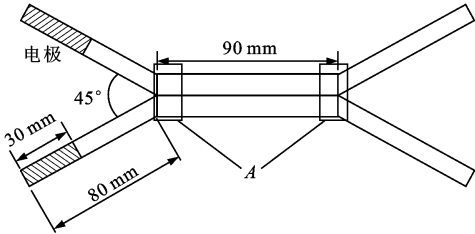
2.4 试验结果讨论

(1)在试验电压范围内,试样寿命随电压、频率和温度的增加而减小.主要是放电引起老化,电压、频率和温度的增加使得放电更为剧烈,放电次数、最大放电量 and 放电能量等的增加,同时加快了从局部放电到击穿的过程.在相同老化电压作用下,试样寿命差距较大,最长的与最短的甚至相差一倍多,这主要是由于试样的分散性造成的.

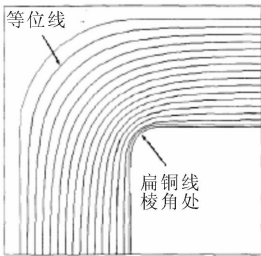
(2)在相同老化电压下,试样寿命与局部放电起始电压有关.局部放电起始电压较高时,寿命相对较长,而寿命最短的不一定是局部放电起始电压最低的,有一定的偶然性,即弱点击穿.通过剖析发现,寿命较长试样的击穿点一般为一条细的黑线或较大面积的黑点,而寿命较短试样的击穿点多多为针孔大小的黑点或有时无法找到击穿点.这表明,绝缘的均匀性(无缺陷)是保证试样寿命的重要基础.

(3)通过剖析发现,试样击穿点几乎都发生在图 7a 中所示的 A 区域的扁铜线棱角处.这主要是 A

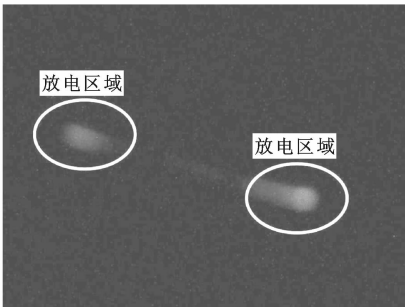
区域是电磁线的弯曲部分, 电场比较集中; 另一方面两根电磁线试样在这里从粘合到分开, 在两根电磁线分叉处容易产生气隙缺陷. 通过理论仿真计算, 铜线拐角处的等位线分布如图 7b 所示, 从图中可以看出铜线拐角处的电场最集中, 根据模拟计算得到拐角处的场强是平均场强的 2 倍左右. 图 7c 是实际放电情况, 可以看出只有在 A 区才有放电光.



(a) 试样 A 处为击穿区域



(b) 理论仿真计算扁铜线棱角处的等位线分布



(c) 试样在 A 区局部放电照片

图 7 试样击穿区域和放电区域的分析

(4) 通过外绝缘被烧黑的试样判断, 局部放电在试样内部(两根电磁线的中间交界面)产生了高温. 电磁线的中间交界面绝缘由于局部放电而烧黑炭化, 而且有两个试样在外部就可以直接看到两条烧黑炭化的痕迹, 如图 8 所示. 出现这种情况主要是由于电压低, 放电强度弱, 而试样制做得很好, 薄膜耐局部放电能力强, 这时两根电磁线的中间交界面通过小强度的局部放电逐步老化、炭化. 由于这种老化比较慢, 因此会波及到周围介质, 使两根电磁线中间交界面的外绝缘老化、炭化.

(5) 在两个电磁线试样之间有一层白色的固状

物析出, 刚开始是液态的, 过了一段时间, 就变成了固状物, 对于该白色固状物进行了微观分析.

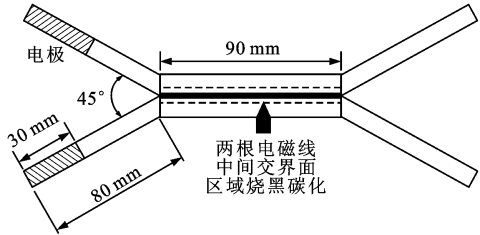


图 8 两根电磁线中间交界面区域烧黑炭化

3 结 论

(1) 在老化条件相同时, 同批次试样的寿命差距较大, 最长与最短寿命甚至相差一倍多, 这主要是由于试样的分散性以及弱点击穿造成的.

(2) PWM 电源的电压升高、脉冲频率增加、温度升高都使试样寿命降低, 但是寿命降低的速度有所不同.

(3) 通过剖析发现, 试样击穿点几乎都发生在电磁线的弯曲部分和铜线棱角处, 主要是电场比较集中造成的.

参考文献:

[1] YIN Weijun. Failure mechanism of winding insulations in inverter-fed motors[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 1997, 13(6):18-23.

[2] CENTURIONI L, GUASTAVINO F, CERUTTI B, et al. An experimental optimization of preliminary tests on enameled-copper wires adopted for motor windings of PWM controlled solid state drives[C]// Power Engineering Society Summer Meeting. Piscataway, NJ, USA: IEEE,2000:2449-2452.

[3] KAUFHOLD M, SCHAFFER K, BAUER K, et al. Interface phenomena in stator winding insulation; challenges in design, diagnosis, and service experience[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2002, 18(2): 27-36.

[4] FABIANI D, MONTANARI G C, CONTIN A. Aging acceleration of insulating materials for electrical machine windings supplied by PWM in the presence and in the absence of partial discharges[C]// Proceedings of the 2001 IEEE 7th International Conference on Solid Dielectrics. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2001: 283-286.

[5] 邱昌荣,曹晓珑. 电气绝缘测试技术[M]. 北京:机械工业出版社,2001:229.

(编辑 杜秀杰)