

# 基于介质损耗分析研究变频电机绝缘老化特性

何景彦, 吴广宁, 高波, 郭小霞

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

**摘要:** 变频牵引调速电机匝间绝缘承受来自逆变器的连续高压脉冲方波的作用, 其老化机理与工频正弦电压作用下具有很大差异。笔者通过采用两种电压源对模拟变频电机匝间绝缘和对地绝缘的绞线对试样进行老化试验, 测量了  $\tan\delta$  随老化时间的变化趋势, 分析了电压形式对匝间绝缘和对地绝缘介质损耗产生和发展的作用机理。试验结果表明: 脉冲电压下, 匝间绝缘内部有放电发生时, 放电与空间电荷协同作用使绝缘缺陷迅速增多; 无放电时空间电荷反复注入和抽出造成绝缘损伤。交流电压下绝缘介质发热主要由局部放电造成, 而脉冲电压下主要是由空间电荷所导致。对地绝缘由于其绝缘结构, 呈现槽放电现象, 空间电荷的引入大大加速了绝缘的老化。

**关键词:** 变频电机; 匝间绝缘; 老化; 介质损耗

中图分类号: TM922.72; TM245

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2008)03-0243-03

## Study on Aging Characteristics of Insulation in Inverter-fed Traction Motor Based on Dielectric Loss

HE Jing-yan, WU Guang-ning, GAO Bo, GUO Xiao-xia

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** Stator insulation of inverter-fed motor experiences continuous impulses with significant harmonic and transient. The insulation aging mechanisms are quite different under the effects of continuous impulse and under sine wave. Contrast aging tests are carried out on twisted pairs simulating inter-turn insulation and insulation to ground of inverter-fed traction motor under AC and square wave pulse conditions. The variations of  $\tan\delta$  concerning different aging factors with aging time and measuring voltage are investigated. The mechanism of a form of voltage and the turn-to-turn insulation to insulation dielectric loss and development are analyzed. The experimental results show that when measuring voltage is pulse voltage and the discharge occurring within the interturn insulation, partial discharge (PD) and space charge result in sharp increase of insulation defects. When no discharge into space charge repeatedly and extract insulation caused insulation injury. PD results in insulation heat under AC voltage, and space charge results in insulation heat under square wave pulse condition. Slot discharge occurs due to the special insulation structure of insulation to ground. Space charge is likely to be the key factor resulting in aging of insulation materials under continuous impulse.

**Key words:** inverter-fed traction motor; inter-turn insulation; aging; dielectric loss

## 0 引言

变频调速电机广泛使用脉宽调制(PWM)变频电源, 其变频器输出的连续脉冲导致变频电机绝缘过早损坏的问题, 引起了国内外学者的广泛关注。研究表明: 局部放电、高频脉冲电压引起的介质发热以及空间电荷是导致定子绝缘过早失效的主要原因<sup>[1,2]</sup>。然而, 国内外对连续脉冲方波下绝缘材料老化的微观机理至今仍没有统一的观点。

介质的功率损耗与损耗角正切  $\tan\delta$  成正比, 介

质损耗角正切值  $\tan\delta$  可以反映绝缘的整体性能、绝缘中有气隙等。在电力设备预防性实验规程中以及机械行业标准中, 电机绝缘的  $\tan\delta$  是一个重要指标<sup>[3,4]</sup>。所以, 研究脉冲电压下绝缘材料老化的  $\tan\delta$  变化趋势对研究变频电机绝缘老化状态评估技术、提高运行可靠性具有十分重要的意义。

为了探讨高压方波脉冲下绝缘的老化机理, 笔者主要针对 JD117 变频调速电机绝缘进行试验研究, 设计了一种与电机绝缘具有相同绝缘结构、工艺的绞线对试样, 并采用两种电压源进行老化试验, 分析了不同测试电压等级下的  $\tan\delta$  及  $\Delta\tan\delta$  随老化时间的变

收稿日期: 2007-07-05; 修回日期: 2007-11-22

基金项目: 国家自然科学基金(50377035); 霍英东教育基金(91060); 教育部博士点基金(20050613008)。

作者简介: 何景彦(1981-), 女, 硕士研究生, 主要从事高速机车变频牵引电机绝缘性能评估的研究。

化趋势,研究了变频电机定子绝缘的老化特征。

### 1 试验装置与试样

绞线对试样见图1,其绝缘材料和工艺与实际牵引电机相同。电磁线是以FCR耐电晕聚酰亚胺薄膜2/3叠包绝缘,厚度为0.21mm,2根电磁线外面首先用薄膜云母带半叠包2次,再用玻璃丝带平包一次。匝间绝缘试验时,绞线对试样两个电磁线作为电极;对地绝缘试验时,采用锡箔纸绕包电磁线并行部分作为接地电极,绞线对两根电磁线作为高压电极。

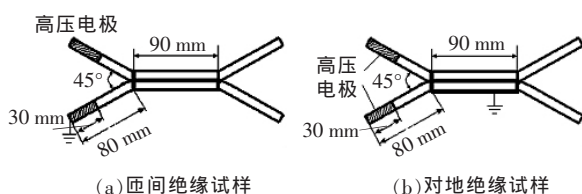


图1 绞线对试样

为了使实验数据不受试样参数离散性的影响,对试样进行了预处理,包括烘干、屏蔽、防晕等措施使试样达到实验的预期要求。每组试验老化3个试样,根据试验结果选择具有代表性的试样,见表1。

表1 老化试样编号

编号	老化电压	评估绝缘
1号	50 Hz, 正弦交流, 4.242 kV (峰-峰值)	匝间
2号	10 kHz, 方波脉冲, 3.500 kV (峰-峰值)	匝间
3号	50 Hz, 正弦交流, 4.242 kV (峰-峰值)	对地
4号	10 kHz, 方波脉冲, 3.500 kV (峰-峰值)	对地

由于实际的PWM脉冲电压随负载和连接电缆不同而改变,且输出电压也比较低,IEC 62068建议用双极性脉冲电压代替真实的PWM脉冲作为绝缘测试用。因此笔者采用频率和上升时间可调、占空比为0.5的双极性脉冲电压进行老化。

根据JD 117,牵引电机承受连续高压方波脉冲峰值为1.5kV,交流电压下试样对地绝缘起始放电电压为1200V,为了研究局部放电对绝缘材料的影响,确定交流老化试验电压为1.5kV(峰-峰值为4.242kV),对应选择方波脉冲峰值为3.5kV(峰-峰值)。在变频牵引电机的实际运行中,绝缘材料所处的运行环境温度达到100℃以上,确定老化试验温度为100℃。老化时间以10h为一周期,共10个周期。

### 2 试验及结果分析

#### 2.1 介质损耗角正切测量基础

对于绞线对试样来说,介质损耗主要来自4个方面:由绝缘体内直流泄漏电流引起的电导损耗,由偶极子取向极化所造成的松弛极化损耗、空间电荷引起的夹层极化损耗以及在高场强下由介质内部局部放电产生的损耗<sup>[5-7]</sup>。

通常工程上规定测试tanδ的电压是额定电压的0.2、0.4、0.6、0.8、1.0倍。为了反映局部放电对老化的影响,工程上对Δtanδ进行研究,采用的表达式为:Δtanδ=tanδ<sub>U<sub>n</sub></sub>-tanδ<sub>0.2U<sub>n</sub></sub>。式中tanδ<sub>U<sub>n</sub></sub>是定子绕组线圈额定工作电压下的正切值,tanδ<sub>0.2U<sub>n</sub></sub>是定子绕组线圈在0.2U<sub>n</sub>下的正切值。

#### 2.2 匝间绝缘tanδ随老化时间的变化

工频正弦电压下老化的匝间绝缘的tanδ随老化时间的变化曲线见图2。tanδ在老化50h前呈现下降趋势,这是因为温度的作用使原来残存在绝缘中的水分、溶剂等不断挥发,相应地降低了绝缘内部低分子偶极子数量和离子载流子的迁移率,这就造成极化损耗大大减少。随着老化试验的继续进行,电热联合作用使得绝缘材料分子链断裂,内部缺陷增加。当测试电压为0.2U<sub>n</sub>时,绝缘内部基本上不发生放电,介质损耗主要由电导损耗组成,tanδ变化趋势不大。当外加测试电压为U<sub>n</sub>时,内部缺陷造成局部放电,由此引发的损耗分量导致tanδ上升。从图3可以看出浸漆工艺并没有完全消除匝间绝缘的内部气隙,沿电磁线边缘存在一个垂直于匝间电场的长气隙。当老化时间超过70h的时候,tanδ值略有下降。经过局部放电的长时间作用,FCR薄膜表面析出大量白色的纳米材料,见图3,白色物质经能谱分析显示,包含元素主要是铝和氧,纳米材料可能是Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>。纳米粒子具有比聚酰亚胺材料更好的导热、导电性能,还能够吸收放电产生的高能粒子和紫外线,减少了局部放电对绝缘材料的破坏。

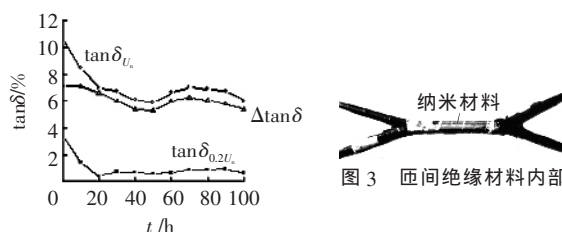


图2 1号试样tanδ随老化时间的变化曲线

脉冲电压下老化后tanδ与老化时间的关系见图4(a),试样在老化98h后击穿。tanδ随老化时间是先下降然后上升的趋势。

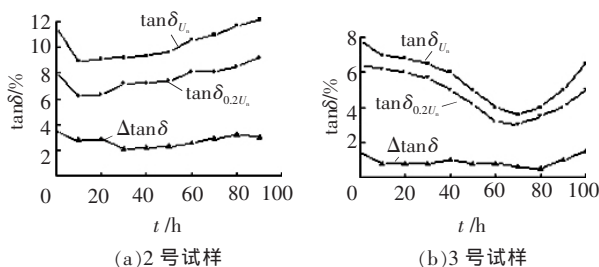


图4 2号、3号试样tanδ和Δtanδ随老化时间的变化

比较图2与图4(a)可知,高压方波脉冲老化后绝缘材料的tanδ<sub>U<sub>n</sub></sub>和tanδ<sub>0.2U<sub>n</sub></sub>都高于工频正弦电压老

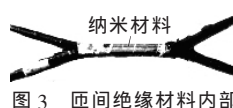


图3 匝间绝缘材料内部

化下的。工频正弦电压老化下的  $\tan\delta$  反映的主要是电导损耗、松弛极化损耗和局部放电损耗增加的情况。高压方波脉冲老化下,  $\tan\delta$  还反映界面处空间电荷引起的夹层极化损耗。外加电压为  $0.2U_n$  时, 由于高压脉冲下绝缘材料内部形成了很多极性基团, 增强了捕获电荷的能力, 使得空间电荷带来的极化损耗大大增加, 造成  $\tan\delta$  是正弦交流下的 10 倍之多。外加测试电压为  $U_n$  时, 局部放电带来的附加损耗也随之增加; 由于高压脉冲老化后绝缘材料内部缺陷增多, 陷阱增加, 空间电荷脱陷时电机械能的释放造成绝缘结构的变化<sup>[8]</sup>, 引发的夹层极化损耗大大增加, 放电与空间电荷的协同作用使得高压方波老化后的  $\tan\delta$  要比正弦交流老化后的大得多。

从图 2、4(a)中可以看出:工频交流电压下老化的匝间绝缘的  $\Delta\tan\delta$  值是脉冲电压下老化的 2 倍之多, 这正说明脉冲电压下绝缘介质发热原因已和交流下不同, 主要是由空间电荷所导致。另外, 老化后期两种情况下  $\Delta\tan\delta$  都出现下降趋势, 表明临近击穿时空间电荷对绝缘的破坏起主要作用。

### 2.3 对地绝缘 $\tan\delta$ 随老化时间的变化

图 4(b)是 3 号试样  $\tan\delta$  和  $\Delta\tan\delta$  随老化时间的变化。从图 4(b)中可以看出:对地绝缘的  $\tan\delta$  随老化时间也是先减小, 由于对地绝缘由多种材料复合而成, 温度的热清洗作用加上材料内部交联反应持续的时间很长, 降低了绝缘内部低分子偶极子数量和离子载流子的迁移率, 极化损耗大大减少。老化 70 h 后, 两种测试电压下  $\tan\delta$  都出现增大趋势。此时材料内部水分、溶剂挥发完全以及交联反应终止, 局部放电活动很剧烈。图 5 显示对地绝缘材料局部放电发生在薄膜云母带半叠包或玻璃丝带平包部分。Kapton CR 薄膜云母复合带在绕包过程中出现了褶皱, 形成了气隙, 由于气隙靠近接地电极, 所以呈现槽放电现象。放电产生的高能粒子对绝缘造成腐蚀, 使绝缘气隙分层, 热导率上升, 绝缘温升升高, 造成电导损耗增加, 同时分层导致界面增多, 相应地界面极化损耗也增加。当测试电压为  $0.2U_n$  时, 主要由上述两种损耗增加所致。当测试电压为  $U_n$  时, 加上内部气隙局部放电带来的附加损耗, 导致  $\tan\delta$  增加更快。

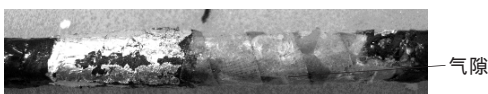


图 5 对地绝缘材料内部

高压脉冲电压下, 由于频率的作用, 老化过程中复合绝缘界面处积累了大量的空间电荷, 由此带来的介质损耗使  $\tan\delta$  在老化 10 h 后一直呈现增长趋势, 见图 6。

从两图中可以看出, 不同测试电压下  $\tan\delta$  变化

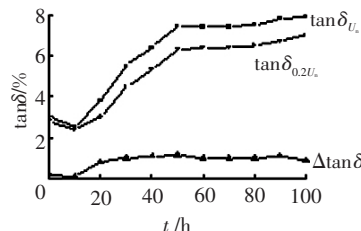


图 6 4 号试样  $\tan\delta$  和  $\Delta\tan\delta$  随老化时间的变化

趋势不大, 这就说明局部放电对对地绝缘的破坏影响较小, 主要是空间电荷所致。老化过程中, 绝缘内部缺陷并未增多, 但是通过电极对复合绝缘内部注入了大量的空间电荷, 由此带来的破坏使绝缘老化大大加速。两种条件下  $\Delta\tan\delta$  值相差不多, 说明绝缘内部的局部放电活动类似, 而绝缘的老化主要是由空间电荷所致。

### 3 结论

(1) 高频方波电压下老化不仅增强了局部放电对匝间绝缘破坏的作用, 而且使空间电荷对绝缘的破坏作用增大, 使绝缘内部缺陷增多。

(2) 交流电压下绝缘介质发热原因主要是局部放电造成, 而脉冲电压下主要是由空间电荷所导致。

(3) 由于对地绝缘特殊的绝缘结构, 其老化中呈现槽放电现象, 绝缘的老化主要是由空间电荷所致。对比脉冲电压下的两种绝缘结构, 复合介质比单一介质的耐老化性能更好。

$\tan\delta$  值反映绝缘材料的整体性能, 判断电机绝缘的优劣, 还需要其他的试验项目共同完善绝缘的老化特性研究。

### 参考文献:

- [1] YIN Wei-jun. Failure mechanism of Winding Insulations in Inverter-fed Motors [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 1997, 13(6): 18-23.
- [2] BONNETT A H. Analysis of the Impact of Pulse-width Modulated Inverter Voltage Waveforms on AC Induction Motors [J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 1996, 32(2): 386-392.
- [3] DLT 596-1996. 电力设备预防性规程[S]. 1996.
- [4] JB/T 56082-1996. 汽轮发电机 产品质量分等[S]. 1996.
- [5] 赵文元, 赵文明, 王亦军. 聚合物材料的电学性能及其应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [6] MOHSEN F, HOSSEIN B, ERNST G, et al. Partial Discharge and Dissipation Factor Behavior of Model Insulating Systems for High Voltage Rotating Machines under Different Stresses [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2005, 12(5): 5-19.
- [7] BELLOMO J P, CASTELAN P, LEBEY T. The Effect of Pulsed Voltages on Dielectric Material Properties [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1999, 6(1): 20-26.
- [8] 郑飞虎, 张冶文, 肖春. 聚合物电介质的击穿与空间电荷的关系[J]. 材料科学与工程学报, 2006, 24(2): 316-320.