

大型高压发电机绝缘译文集

第一机械工业部电器科学研究院桂林筹备处

一九七二年六月

编 者 的 话



几年来国内广泛应用环氧粉云母绝缘于大中型高压电机定子线卷绝缘上，取得了很大的成绩，但也出现了一些问题。由于我们各方面条件限制仅对其中某些问题收集了有关国外文献和专利如绝缘机械性能，槽内紧固问题以及环氧树脂硬化剂、阻聚剂等。遵照伟大领袖毛主席“洋为中用”的教导，结合我国具体情况将这些文献编印成册，以供参考。

由于水平所限，有不妥之处，请批评指正。

一九七二年六月

目 录

1. 高压旋转电机的绝缘系统.....	(1)
2. 罗贝尔线棒的制造和试验.....	(8)
3. 对高出力发电机定子绕组楔固定方法的实样研究.....	(14)
4. 高压定子绝缘系统的机械试验.....	(20)
5. 环氧树脂组成物.....	(27)
6. 电工绝缘材料.....	(39)
7. 硬化环氧树脂的组成物.....	(42)
8. 环氧树脂的硬化阻聚剂.....	(44)
9. 新型的多环氧化物、聚酯和多羧酸酐的热固化混合物.....	(46)
10. 用多羧酸酐异构体热硬化环氧树脂的混合组成物.....	(56)
11. 改进制备偏苯三酸酐酯和酰胺的方法以及由其制出的产物.....	(60)
12. 环氧树脂——酸酐硬化物之电气及机械性能.....	(66)

高压旋转电机的绝缘系统

本文回顾了 Brown Boveri 对于高压旋转电机绕组绝缘的制造工艺，近几年来发展的一个特点是采用 Micadur 合成树脂绝缘，1955 年这种绝缘第一次用于大型电机，由于它在整个中型高压电机中应用的卓越成效，现已推广到最大型的突极和隐极发电机上采用。文中描述了线棒和线卷绕组的 Micadur 系统，讨论了许多专题以及摘录了所积累的经验数据。

引 言

最初，Brown Boveri 采用虫胶云母箔作为高压旋转电机定子绕组的绝缘，从 1930 年起，在高压电机上主要采用沥青云母箔绝缘，这二种方法都是以大整张绝缘围绕线棒在电机铁芯部分的长度卷包一定数量的绝缘层，然后热压。这二种绝缘的运行性能很好，即使在今天有时还采用。根据我们的经验此种绝缘和另一种系统搭接特别是美国采用窄的云母带用沥青真空浸渍，搭接处是不会发生爬电的。

但是随着电机出力迅速增加，势必导致铁芯增长（目前正在制造铁芯长度为 8 米的电机）以及机械和电气应力增高，显然限制了采用云母箔绝缘。例如当定子铁芯大于 4 米时卷烘法（Haeefely Process）显得非常复杂，同时，设计者偏向于在整个全长都用连续绝缘，这对于端部绕组的处理、热稳定性以及对外界影响的敏感性如潮气等等提供了十分有利的条件。

1955 年紧接着的一个发展阶段是 Brown Boveri 生产出第一批用 Micadur 合成树脂连续绝缘的高压电机〔1〕，这标志着欧洲旋转电机绝缘历史新纪元的开始，引起了旋转电机绝缘重大的改革和前进。自此以后，Micadur 绝缘开始用于全部中型高压电机，并发展到最大型的突极和隐极发电机上。在整个过程中基本做法是一致的，仅在于应用方法上有所改变以适合各种类型的电机。自从 Micadur 绝缘出现以来，已制造出 300 多台电压等级达 26 千伏的大型电机，总容量为 5600 万千伏安，目前这种结构的单机容量达 130 万千伏安〔2〕。

1967 年已并入 Brown Boveri 的 Oerlikon 工程公司（MFO）所使用绝缘方法是相类同的，而且发展过程也相一致，开始采用虫胶云母箔和沥青云母箔，在 50 年代出现预浸渍合成树脂箔，不久又发展一种称为 Orlitherm 的真空浸渍连续绝缘带。Brown Boveri 和 MFO 合并以后，发现在许多场合其发展和制造工艺明显的相似，这可以查一查二个公司的基本工艺过程来说明。表中摘录了 Brown Boveri 和 MFO 所采用的合成树脂绝缘系统，由此表很清楚的看出 MFO 绝缘系统的组合和 Micadur 是相类同的，虽然它们都多少要求有不同的生产设备，在介电性能和机械性能上也有小小的差别，但是为了使生产更合理，今后只采用 Micadur 工艺过程。整个来看，两个公司的合并提供了广泛的试验设备和多年来使用合成树脂绝缘系统的实践经验。

Micadur 绝缘的组合和应用

Micadur 绝缘是一种用带连续缠绕于线棒或线缆的全长上，然后用合成树脂真空浸渍并固化的绝缘结构。在进行了大量的研究和试验后，最后决定带子的材料是由编织玻璃纤维作为衬垫和实际作为高级绝缘材料的粉云母纸组合，用特殊改性的无溶剂环氧树脂作为浸渍剂。

Brown Boveri和Oerlikon工程公司所发展的高压旋转电机绝缘系统

绕组类型	系统和结构的名称		备 注
	Brown Boveri	Oerlikon工程公司	
线棒绕组	Micadur [1] ; 玻璃布粉云母带, 用改性环氧树脂 真空浸渍	Orlitherm [4] ; 玻璃布粉云母带, 用环氧树脂 真空浸渍	主绝缘, 连续 包绕
	Semicadur; 铁芯部分用Micadur 端部用传统绝缘带	Orlitsa [3] ; 用纸补强和粉云母纸组 成的预浸渍环氧树脂箔, 端部同Semicadur, 或 预浸渍玻璃布云母带	特殊用途, 例 如重绕时, 不 连续绝缘。
线圈绕组	Micadur—Compact [7] ; 与Micadur相同的材料 和浸渍	Orlitsaband绝缘 [5] ; 预浸渍玻璃布粉云母带	作为中型高压 以下电机的主 绝缘, 浸渍之 前先下线(Bro- wn Boveri), 成型弯曲法 (MFO)
	Micadur—Silast [7] ; 与Micadur相同的材料和 浸渍, 端部绕组用硅有机 树脂预处理。	Orlisilast [5] ; 槽部: 预浸渍环氧玻璃 纤维粉云母带, 端部: 硅有机玻璃布云母带。	下线前线缆全 部绝缘

单排和双排罗贝尔线棒的导线股间通常用玻璃丝缠包，现在一般用环氧树脂加压粘结在一起，特别是对长的铁心，由于线棒的重量习惯上用的酚醛胶已不再适用〔6〕。绕组元件大部分用机包（图1）（略），这样带子张力非常一致，迭包均匀，形成均一的绝缘层。包带后的线棒干燥然后放入一个压力很低的罐内，用改性无溶剂环氧树脂浸渍，接着加压一定时间，从罐中取出绕组元件，在模子内加压，最后在烘箱中高温固化，然后每根线棒的直线部分和端部进行适合于电机电压等级的防晕处理，以防止运行中的电晕放电以及通过电压试验。

生产检验

整体绝缘的质量和以后它的运行性能完全取决于上述所进行的每一道生产工序的协调和效果。生产过程中所作的检验，从原材料的常规检查到下线之前每根线棒的最终试验，涉及范围很广。这些绕组元件的有用数据登记在记录纸上，从而可以对每台电机进行统计评价，这种方法多年来已证明是非常有用和重要的。只有这方式方可能发现和纠正一些极微小的缺陷，（多半在某几种原材料），在特定情况下，可能会对绝缘结构的运行性能带来一些不良的影响。

发现下列试验对检验绕组元件的制造特别有效：

——用交流 110V 检验罗贝尔线棒导体股间短路和用适当的高频检验线圈绕组内部匝间绝缘的短路。

——在两倍额定电压下测量成品绕组元件的损耗系数 $\text{tg}\delta$ 。

——以四倍的电机额定电压进行一分钟工频耐压试验，同时检验端部绕组防晕层。

工频高压试验例如对一台 24 千伏级的电机以 96 千伏作为测量损耗系数的一个补充，业已证明对检验绝缘性能特别有价值。在生产中，通过比较在安装准备就绪的线棒上测量 $\text{tg}\delta$ 的结果（图 2），也可通过几年来实际上没有返修这一事实来说明质量高度的均匀。

热固性绝缘的柔软性比以云母箔为基础的绝缘小，处理不当会引起破坏。因此，在绕组下线过程中要进行仔细的检验，几年以前就已采用的逐级减低电压的一系列工频耐压试验（图 3）特别有用，当一台电机出厂时，这就绝对保证绝缘情况十分完善。

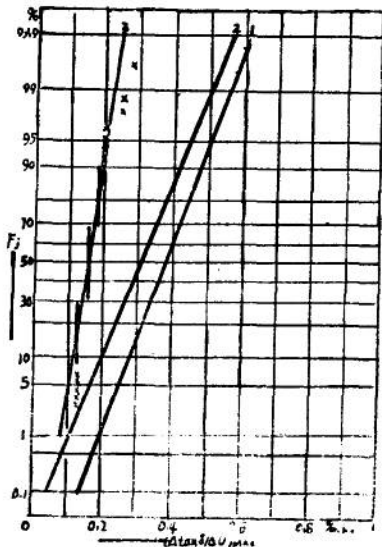


图 2 下线准备就绪的线棒最大损耗增量的累加频数 F_j

1 = 8 万 6 千伏安，
12 千伏水冷突极发电机
2 = 28 万 千伏安，26 千伏，

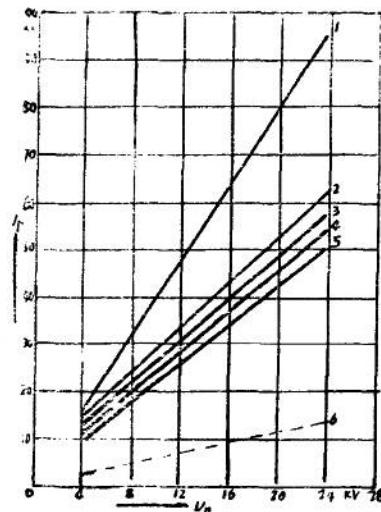


图 3 在绕组安装中的逐级电压试验

1 = 单个绕组元件的试验电压
2 ... 4 = 绕组安装中的试验电压
5 = IEC34-1/1960
颁布的公承试验电压

油冷汽轮发电机

3 = 40万千伏安, 21千伏,

水冷汽轮发电机

tgδ = 损耗系数

b = 运行中最大电应力

u_n = 额定电压

u_p = 试验电压

线棒和线圈绕组的Micadur系统

起先, Micadur 绝缘原则上是计划用在线棒绕组的直线部分, 事实上现在突极和隐极发电机的整个绕组都用上述的Micadur 绝缘, 例如图 4 (略) 表明的一台用 Micadur 绝缘的40万千伏安发电机的定子。在特殊情况下, 如重绕旧电机而欲保留它的原始结构时, 考虑到经济偶尔采用沥青云母箔或采用一种折衷方案即所谓 Semicadur 的绝缘系统, 后一种方法只是在线棒的直线部分用 Micadur 绝缘, 受力较小的处于铁心外的端部绕组绝缘直到最近尚未采用Micadur绝缘而是用沥青云母布带或硅有机云母玻璃布带, 因为要从槽部绝缘过渡到端部绝缘, 因此那种电机一般会长一些。出力在几百到几千千瓦的感应电动机和同步电机通常做成成型线圈, 也就是线圈预先成型及绝缘, 但在下线时根据极数的不同线圈要经受一定的变形, 以上述方法用固化后的合成树脂绝缘的线圈太硬, 因此线圈在包完绝缘带以后就在直线部分进行防晕处理, 然后在浸渍之前就下入槽内, 电压等级在 6 千伏以上的电机端部也作专门的防晕处理, 绕组用一种新型的脱蜡玻璃纤维绑扎带绑扎然后接线, 接着进行特定的试验保证匝间绝缘和对定子铁芯的绝缘是处于良好的状态, 最后绕组被干燥和真空浸渍, 树脂渗透进和充满每一可被浸渍的部分, 再在高温下固化。因为伸出槽外部分通过支撑一般是刚直的, 因此要采用同样的基本材料和采用本质上与 Micadur 相同的浸渍工艺, 这种方法称谓“Micadur—Compact”, 与Micadur 工艺的差别仅仅在于它是所有的部分都浸渍和固化。现在Micadur—Compact 已成为中型电机线圈绕组的标准方法。图 5 (略) 表明了用这种方法绝缘的一台定子。

在某种特殊情况下, 如要求很方便的能把线圈取出或当 Micadur—Compact 制造有困难时 (例如因浸渍罐的尺寸限止) 采用一种称为Micadur—Silast系统, 此方法是槽部和端部用玻璃云母带连续包绕, 在浸渍罐中只是槽部绝缘吸收树脂, 而端部绝缘预先用硅有机树脂浸渍, 这样在固化后线圈仍然可以弯曲变形, 在防晕处理以后和下线之前作和线棒绕组相同的介电试验。这种方法费用略为大些, 但就绝缘和性能来说具有同样高的水平。图 6 (略) 例举了用Micadur—Silast绝缘的一台定子实例。

Micadur 绝缘 的 性 能

第一批用 Micadur 绝缘的电机已运行十多年了, 我们定期对其中一些作直观和电气上的检验, 因此对各种模型线棒以及在完整的定子模型和原形电机上得到的许多试验结果, 目前更能较好地来介绍和评价, 这样, 对各种试验方法的效果现在有了一个清楚的概念, 同时知道了对一些特殊要求, 那几种试验方式最合适。

实验室试验

在发展 Micadur 绝缘的最初阶段，是通过大量的用上述方法绝缘的小线棒使其经受在运行中所遇到的所有应力象温度、电压等来研究它的性能，这些实验一直做了几年。这种方法可以全面地看一看许多不同类型的带子（用各种纸和玻璃纤维补强、各种形状和类型的云母、树脂的组合和各种生产工艺）对于整个绝缘性能的影响并互相比较。起初，把得到的数据与同时试验的沥青云母箔绝缘相比较，但后来证明价值有限，因为在热和机械性能方面，热固性的Micadur远比热塑性绝缘来得优越，因此真正的比较是不可能的。

模拟试验中，在高温和高压下长期试验特别有效，与此同时，主要是测定损耗系数与电压的关系、介电强度的下降以及某些机械性能来检查绝缘性能的变化，在比较相类似的组合时，它有助于画出寿命时间曲线，而单个性能的测量如游离指数、绝缘电阻只作为参考。

从开始第一次，在Micadur中就用粉云母纸代替云母箔系统中常用的剥片云母，粉云母纸是用不含有粘结剂的高级云母鳞片做成，鳞片是借助于静电力集拢在一起。追想起来，这是一个成功的选择，做成的绝缘均匀完整，同时进一步改进了机械性能和介电性能。非常巧的是很早就从各种可以用的编织型和片状的合成材料中选中了最佳的玻璃纤维作为云母的补强材料，虽然有些地方有时还用含有纤维类的补强带，但因它的机械性能和热性能太差，我们把它完全排除了。

通过对线圈和线棒绕组采用同样的带子组合与选定的特殊类型改性环氧树脂（从许多配方中）以及整个采用标准生产工艺，经过几年以来的实践现在可以保证绝缘是均匀的高性能的。绝缘的主要特征摘录如下：

——根据通用标准（例如 IEC 颁布的 216 / 1966 文）进行一次全面的老化试验证明 Micadur 能满足 F 级温度的要求（图 7）。

——优良的介电性能，特别是击穿强度和长期耐压值高（图 8），损耗系数小（图 2）和耐电晕性突出。

- 1 = 树脂的粘结强度下降 30 %
- 2 = Micadur 绝缘的击穿强度
（1 分钟试验值）下降 10 %
- t_1 = IEC 颁布的 216/1966 文中规定的寿命界限

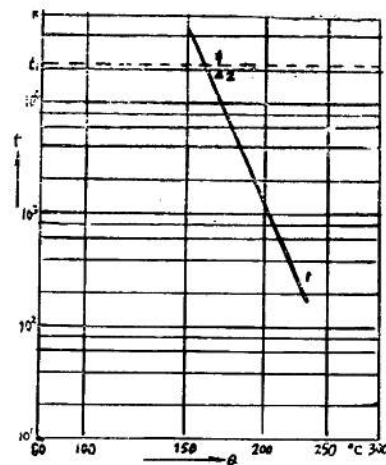
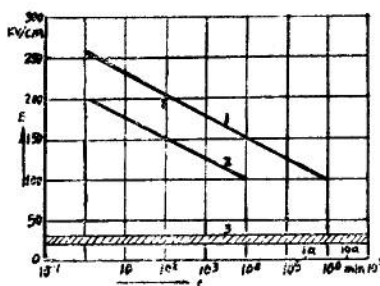


图 7 树脂和绝缘的极限温度 Q

图8 在室温下确定的寿命时间曲线

- 1 = Micadur绝缘
2 = 沥青云母箔
3 = 运行场强范围
E = 场强
a = 年



——良好的耐油性，耐水性和耐现今作为冷却定子和转子铁心以及绕组的而在事故中绕组绝缘有可能接触到的其它冷却剂(图9)。

——Micadur绝缘也具有极好的机械性能，〔1〕

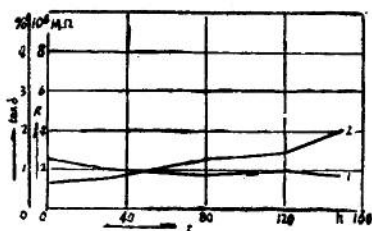


图9 用Micadur绝缘导杆的绝缘电阻R(曲线1)和在2千伏下测量的损耗系数 $\text{tg}\delta$ 与浸水时间的关系

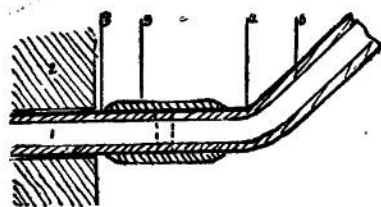


图10 高压线棒端部的防晕结构

- 1 = 导杆 2 = 铁芯迭片
3 = 直线部分的低电阻漆
4 = 端部的非线性电阻漆
5 = 加包绝缘
6 = Micadur绝缘

这些特点对设计有利，例如就有可能大大地减薄绝缘厚度同时提高可靠性，加上整个绕组采用连续绝缘可以减短导杆在铁芯外的长度，使电机做的更短或同样体积而容量更高。

使用性能

运行性能可靠不单单取决于良好的电气机械性能，而且根据现代热固性绝缘系统的特点作一些设计改革如打槽楔的方法和端部绝缘的支撑方法也是十分重要的。大型汽轮发电机端部支撑的方法是用二个由玻璃环氧树脂材料做成的坚固的环把端部绕组夹紧(图4)(略)，业已证明和已用于高压电动机的无纺玻璃纤维绑扎带一样特别有效(7)。还有，现在较高的电压等级(相当数量的电机运行电压为26千伏)，常常有更严格的要求，对此已找到新的解决办法，如采用具有非线性电压/电阻特性的漆和在最高应力点加以特殊的绕包方式以防止不同相位导杆之间端部的电晕放电或线棒在出槽口处的电晕放电(图10)。

用全尺寸模型定子在加严条件下研究使用性能已有多年的，有三个这样的试验装置作为模

拟特定的运行状态和机械应力，目前仍在使用图11（略）。研究整个绝缘系统特性的方法是通电加热铜导杆到 160°C ，然后迅速冷却到室温，同时加一比运行值高得多的电压。图12表明了一次试验的结果。在那次试验中，汽轮发电机线棒长约7米，1小时不到些加热到 140°C ，2小时内通过直接冷却以及端部绕组用鼓风冷却到 20°C ，从测量值中可以看出，尽管在极严重的温度条件和因之而引起的迅速变化的机械应力以及二倍于额定值的电场强度下，经过几千个周期后事实上绝缘没啥变化。

且不说这些大量的实验室试验，来看一看在运行中已对许多线棒所作的定期全面观察和按最新和最有效的方法进行测量的结果，这些测量有损耗系数和游离特性与电压的函数关系，直测到额定电压为止；用直流500伏充电电压作充电电流和放电电流与时间的关系；用直流电压逐步升压法直测到二倍额定电压下的绝缘电流；加上每相承受 $1.5U_H$ 1分钟工频耐压试验。这些都证实了在实验室中得到的结果，即使运行十多年以后的电机，除测量值略微下降表示树脂进一步变硬一些以外，没有发现能说明绝缘劣化或老化的变化。

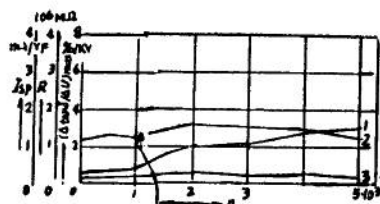


图12 用实验线棒在一个模拟定子
上试验所得测量结果的实例

温度周期： $20^{\circ}\text{C} \rightarrow 140^{\circ}\text{C} \rightarrow 20^{\circ}\text{C}$ 、
所加的工频电场强度为60千伏/厘米

1 = $(\Delta \text{tg} \delta / \Delta u)_{\text{max}}$

2 = 1分钟绝缘电阻R

3 = 特定的1分钟放电电流 I_{sp}

n = 周期数

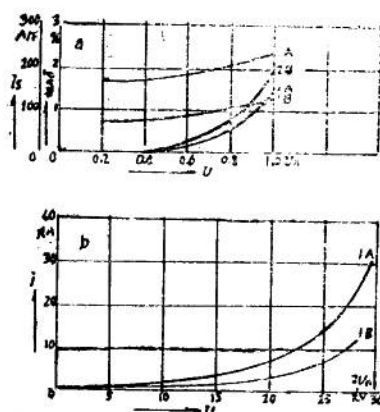


图13 运行10年以后电机的Micadur
绝缘绕组测量结果的实例

A = 制造后

B = 10年后

a: 用工频电压测量

1 = $\text{tg} \delta = f(u)$

2 = 局部放电的测量游离电
流 $i_s = f(u)$

b: 用直流电压测量

1 = $\text{tg} \delta = f(u)$

R_1 = 1分钟绝缘电阻

2 = 游离指数

$R_{1A} = 1.05 \times 10^8$ 兆欧 $P_A = 2.1$

$R_{1B} = 2.24 \times 10^8$ 兆欧 $P_B = 3.6$

举二个例子来说明即使是运行要求十分严酷的情况下它的高超的性能。一台28万千伏安电机错误地将同步机构的相位接反,承受了极度严重应力但并未损坏。另一个例子是一台31万4千千瓦安发电机,因装配错误使许多通水直接冷却的线棒没水流过,历时1000多小时,相应的铜的温升在 250°C 以上,当发现此错误取出线棒并仔细检查,事实上绝缘没发现有变化,其击穿强度还是和新的一样,这清楚的说明绝缘有优良的热稳定性,而且如果温度偶尔超过IEC规定的 155°C 级对绝缘几乎没有影响。

结 论

现在Micadur合成树脂绝缘在许多不同类型和各种尺寸的电机上已使用多年,根据这些经验可以说根据实验室获得的数据而预期效果已在实践中得到证实。采用Micadur绝缘不管利用系数如何提高总是可以改善运行可靠性的。因此,从中型高压电动机到最大型的突极和隐极汽轮发电机都可以采用,并已从实践中完全得到证实。

参 考 文 献

(略)

译自Brown Boveri Rev

1—70 15—24

罗贝尔线棒的制造和试验

本文讨论了罗贝尔线棒的绝缘和制造,概要介绍了在高压电机上对罗贝尔线棒的要求以及在特别提及直接液态冷却的情况下叙述了导线绝缘的结构、制造和试验。

引 言

中、大出力交流电机中最重要的组成部分之一是经典的罗贝尔线棒。这类导体的特点是涡流损耗相对比较小,所以在1912年它一被提出之后就立即得到成功现在已广泛地被使用了。近年来直接冷却铜导线〔1,2〕及绝缘和制造方面的改进导致其更大发展。今天的罗贝

尔线棒能制造的长度到12米以及截面达几千平方毫米，对工艺及生产方法两方面要求都更为严格。

罗贝尔线棒绝缘的要求

一根罗贝尔线棒由许多彼此绝缘的扁铜线组成。这些导线在铁芯的整个长度上换位，也有些在伸出部分上进行换位〔1〕。原则是每根导线所连的漏磁通尽可能相等，整个导线束以通常为几毫米厚的主绝缘对定子铁心绝缘。

由于每根线棒连有磁场，所以在运行条件下特别是在短路的情况下就在单根导线之间产生了电位差。假如在一个槽内的每根线棒属于同相，则在上层线棒这些电位差是最大〔3〕。在导线间损伤绝缘导致某些类型短路情况如图1所示。在一定情况下，这些短路能够造成在短路处及导线大量发热。在最坏情况下，这能损害线棒对铁心的主绝缘甚至使一些导线熔化。表中给出了不同类型电机的罗贝尔线棒导线间可能发生的最高电压。从表上可以见到在平行导线之间的电位差〔图1〕是低的，在0.08到0.2v之间范围内。因此短路对二个紧邻导线不会产生任何损害，事实上即使在最大的电机中这也是可以的。假如短路发生在两根交叉导线之间则情况就不同，在此种情况下，线棒的中间部分电位差可达到20v。于是在短路处的损耗将以几百到几千瓦来计量了，所以避免这类故障是十分重要了。

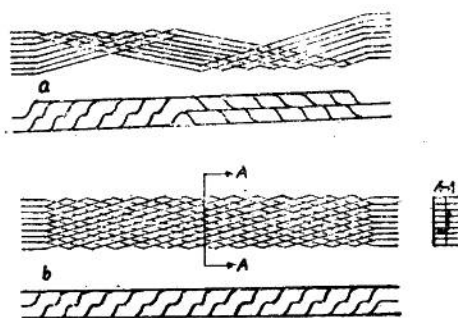


图1 罗贝尔线棒的结构

a: 导线换位编织后的1/2线棒

b: 由二个1/2线棒组成罗贝尔线棒

✓=由于股间绝缘损坏在两根交叉导线之间短路

✓✓=由于导线绝缘损坏在两根平行导线之间短路

在不同的1/2线棒上的两根交叉导线之间的最大电位差 (U_A) 以及一根罗贝尔线棒上两根平行导线之间的最大电位差 (U_B)

	汽轮发电机			凸极发电机
额定容量 [MvA]	75	722	1333	60
额定电压 [kv]	10.6	22	26	13.8
运行频率 [HZ]	50	60	60	60

额定电流 [A]	4090	9475	8550	2510
u_A [V]	3.2	15.2	11.3	0.9
u_B [V]	0.18	1.2	1.13	0.08
换位	360	360	720	360

除了上述的组成导线之间发生的电位差外，必须给予足够注意的是在运行中作用于罗贝尔线棒的其它应力，如温度，对地电压，机械负荷等等。电机多年运行积累经验表明，绝缘设计时对这些因素的考虑是更为重要。例如，导线因高温或者温度很快的改变，如起动时，所引起的导线束和主绝缘间的不同膨胀，将引起绝缘层从铜线上剥离，绝缘层对铁心的场强达20到30kV/Cm，存在微小的空气隙，就可以导致电晕放电以至于危害导线绝缘。这类危害在热塑性绝缘系统中常会碰到，因为那种系统本身性质对导线束不可能很好粘结起来。（图2略）

我们必须做到对所选择绝缘类型必须保证能够承受从线棒制造直到下线过程中的各种机械应力。

罗贝尔线棒的结构

过去作为绝缘导线元件的通用方法是采用薄纸或云母箔条子并用酚醛漆将整束线棒粘在一起，现在各种场合都已不再采用。现在单根线棒重量达到200kg，并且从制造观点出发，要求在各单一导线之间有更好的粘结。同样在运行中已发生了酚醛二次聚合及和电晕放电有关的某些不希望的效应。由于这些原因，现在的罗贝尔线棒，尤其在大型电机中，是采用无溶剂环氧树脂将玻璃丝包线和冷却元件粘合成整体，这对作为热固性 Micadur 主绝缘提供了好的粘合剂〔4〕这一点对于长时期性能来说是很重要的，同时保证了空冷导线和其他导线间以及线棒与铁心之间有效的热传导。

与液冷线棒相连的问题

液体冷却的罗贝尔线棒可制成多种形式，Brown Boveri所用的线棒由导体或非导体材料〔I〕的分散式空心导线所组成。所用的少量的冷却导线从产品观点来看可形成以下几方面的优越性：

- 在制造过程中，经常的严格的试验冷却导线成为一件容易可行的事。
- 每根线棒的6—10冷却导线可简单可靠的联于线头盒（header boxes）
- 空心导线通道的高度是在2.0到2.5mm之间，所以比起高度比较小的导线来说，轻微的歪扭对此种导线的影响较小。

供应者采用一个涡流裂痕探测器在每一根空心铜线的全长进行试验，这些试验能够发现以下几方面的缺陷：

- 裂痕、分裂和重量。
- 几何尺寸上的严重错误。
- 导磁率的改变如反磁钢管的情况
- 化学组分的重大改变

导线的供应者或是接收者要测量弹性极限，抗张强度及延伸，以及还要进行弯折试验和

内应力试验。当线棒完全成型及准备进行绝缘前，对每个空心导线要经受以下试验：

——气体介质 $15\text{kgf}/\text{Cm}^2$ 的压力试验，保持15分钟压力不变。

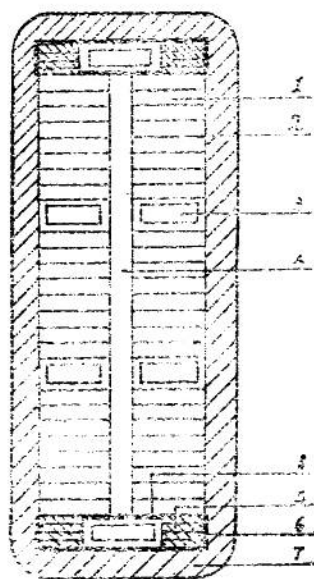
——用水进行流速测量（图3略）

在这些情况的同时，对罗贝尔线棒每一根导线进行短路试验。我们认为，现在一般使用的110V工频电压对此试验是很合适的，因为它相当于在运行中可能产生的最大电压值（表）的数倍。假如我们称 n 是罗贝尔线棒的导线数目，每根线棒进行试验数目为 N ：

$$N = \frac{n}{2(n-1)}$$

因此，一根线棒有60根导线则须要1770次试验，而一根80根导线的线棒须要3160次试验，只有自动化试验（图4略）才能保证这样大量试验数目所需的一致性。如图所示的试验装置有100个连接点，把每根导线插入一个连接点，然后试验自动进行。例如二根导线间电阻小于 200Ω ，则试验设备立即停止。二台计数器指出那一根导线有问题，为了很快的找出短路的部位间歇地施加工频于有问题股线的末端，用一探索线圈探出磁场变化点。在短路没有被修复以前，试验不能继续进行。

由在每根线棒所做的大量试验看来，基本上是稳定的，生产过程中发生短路是很罕见的。除了每根导线绝缘外，选择合适材料作股间绝缘和转线绝缘（图5）是很必要的，这两种绝缘是特别重要的。当采用空心导线时，由于弯曲单根导线而引起线棒高度的不断起伏是特别明显。在包主绝缘前，最好把这些不平填满。为此已采用了一种很有成效的工艺方法，即用有优良的耐热和机械性能的绝缘材料将间隙填满，为了保持和铜导线等电位，在线棒窄面上覆盖一层半导体涂层（图5）。这样主绝缘不仅可以承受更均一的压力而且填充泥和在涂层下的间隙是电短路。通过长期的试验和正常运行证明此项工艺程序是很有成效的。



- | | |
|----------|---------------|
| 1 = 实心导线 | 2 = 导线绝缘 |
| 3 = 空心导线 | 4 = 股间绝缘 |
| 5 = 填充泥 | 6 = 半导体零电位覆盖层 |
| 7 = 主绝缘 | 8 = 转线绝缘 |

目前除了大型电机以外，几乎所有电机都使用双罗贝尔线棒（2）。它与通常的单一线棒有相同的绝缘结构。仅仅不同的是这种线棒在装配时供给了一个特殊的Z型绝缘层。假如每一单根线棒被分别联结于下接的相当于双线棒的1/2线棒，像经常采用的工艺那样则当电机短路最坏情况时，在线棒间可能出现30—40V电压。因此，使用这种类型结构时，除了上述提到的其它电试验外，还要在二根线棒之间绝缘进行500V试验。当包上主绝缘以后（4）每根空心导线再一次测量水的流速，测量每根线棒的损耗因素及最后进行工频电压试验。

图5——直接冷却的罗贝尔线棒的横截面

进一步改进制造技术可靠性

随着电机变得更大，线棒也是一样生产装备就得不断跟上这些新的要求。小的和中等尺寸线棒借助于专用的叠装式机构进行运输，〔5，6〕。大的线棒也已是机械化的传送以及实际上消除了损坏情况。（图6略）

在制造过程中一个特别重要阶段是将空心铜导线和它们的两个线头盒的连接。这是采用中频感应铜焊进行的，它提供了一个恒温而消除过热的加热方式。由 austenitic 钢做的冷却管由微等离子区焊接，此种方法对薄壁管有很好的均匀性，在材料内不会产生应力（图7略）。最后，在冷却管和线头盒之间的所有连接须用一个高灵敏度的卤素检漏器进行检验。

对这类连接点还要进行连续通水的专门长期试验来考查它们的长期运行性能。没有发生水腐蚀。其它的连接点的模型在一个震动台用不同震幅和频率进行试验，这些试验提供了我们制造可靠的罗贝尔线棒连接的必要知识。

罗贝尔线棒长期运行性能试验

为了确定长期运行性能在异常严酷的条件下在模型装置上进行大量的长期试验。这些试验是附加于装配前绝缘导线的一般试验的。试验的主要目的是研究温度、电场以及机械力如震动等在导线束上的作用，试验装置如图9，举例说明，我们研究假如主绝缘从线棒上脱离时导线绝缘的性能。对这由十根导线粘结成的导线束将经受单向电晕放电。整个装置在导

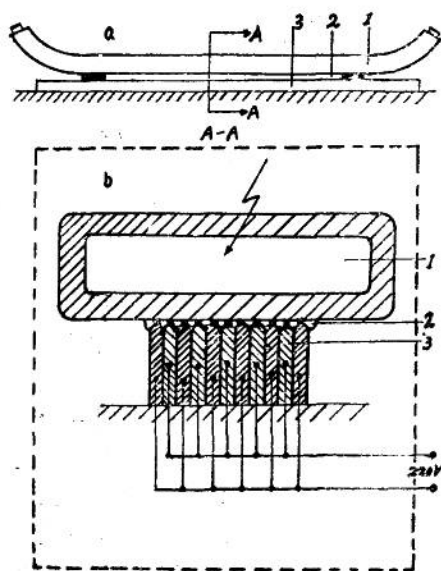


图9 测定不同类型导线绝缘长期运行性能的试验装置

a: 装置简图 b: 剖面 1 = 绝缘高压电极 2 = 在气隙中电晕放电
3 = 在试验状态下的导线束 4 = 加热范围 ($t = 20 \sim 160^{\circ}\text{C}$)

线间施加220V工频电压下保持高温直到导线间产生短路为止然后才测量。一对粘结导体的弯曲强度的减弱也能测定(图10)。虽然在最初情况绝缘类型C试样比较A有高的击穿强度,但后者在长时间作用下在机械和电两方面性能更好。这能够被介释为在类型C中具有占大比例的有机材料的特殊情况,因为当经受电晕放电时这些材料游离更快。因此,我们不能单独就最初的介电强度对长时间性能一般性作出结论。

另外一些试验用于研究导线间的粘结强度作为一定剪切强度下的时间函数。导线保持着高的温度在相同的条件下好几年。同样结构的导线束在100赫交替弯曲试验和高温下承受几个月,此外还进行了作为时间函数的剪切强度和介质强度的试验。

罗贝尔线棒完全绝缘以后下入1:1的定子模型中,经过各种模拟试验,则整个绝缘系统,即主绝缘和导线绝缘的性能和时间的关系就可以验证了。对运行条件中产生的力是采用在高电压作用下将铜线快速加热和冷却的加强方法进行模拟。从而就可以确定性能和试验时间的关系。

在这些试验还未完全结束之前,精选作为导线的绝缘以及完整线棒就被允许投入生产。迄今很多电机提供的经验,其中有一些已经运行很多年了,说明所选择的这种方法是正确的。

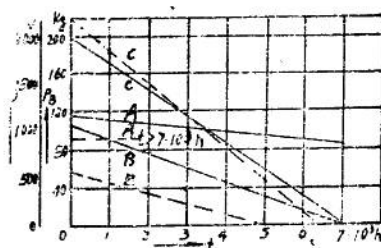


图10 罗贝尔线棒长期试验的一些结果

试验条件: 80°C , 25Kv/Cm

A, B, C = 不同类型的导线绝缘
—— = 最初条件的介质强度或导线间施加220。

对高出力发电机定子绕组楔紧固定 方法的实样研究

经过对大型旋转电机定子绕组所承受的机械应力的检查以后，现在注意力是放在高出力发电机中由于槽内电磁力而导至的两倍于工频频率的附加应力上。这里述说了一项长期试验，试验线棒尺寸考虑了可以用于容量等级在100万千瓦以上的汽轮发电机。试样放在一个模拟定子中，负载电流高达1000A。通过试验得出结论，认为B、B、C的槽子设计及楔紧方法即使对目前正在制造的最大型发电机也能保证它安全运行。

大型旋转电机设计的迅速发展，它的非常高的出力以及相应的巨大外形尺寸必然会导致对某些零部件增加应力，这对大型汽轮发电机定子的绕组绝缘尤其显著。这些作用加在绕组上面的介电和热应力，由Micadur合成树脂绝缘来承担是不会有什问题，因这已为连续多年的实验室的试验以及无数电机实际运行结果所证明。但是考虑将来可能对容量有更大的要求，同时从上述的经验得出，整个槽部的充填和楔紧方式是需要特别加以考核的。这里可以观测到的特殊机械应力可以分成三类。

——由导线·槽绝缘以及定子铁芯之间不同的膨胀而形成的绝缘应力，主要是随电机负荷以及定子铁芯和导线的温度分布而定，因为这里考虑的电机都采用直接水冷却，所以各部份温度以及绝缘因此而受到的剪切力相对地说都比较低。关于温度不均引起的应力问题已进行了长期的老化试验〔1〕。试验说明玻璃布/粉云母纸/合成树脂绝缘承受这类应力没有什么问题，但线卷端部支撑的设计应能承受轴向膨胀而产生的应力，同时在应力除去后能收缩回来。

——由载流导条的交变作用以及漏磁穿过槽部以两倍于工频的频率将导条压向槽底的脉动力，这种脉动力在现在的正常运行条件和最大的电流负载情况下，对槽底所产生的表面压力可以高达3.5公斤——尺/厘米²〔2〕。这项数值比几年前生产的电机要大2~3倍，而且可以预见，在最近的将来加在空心导线及绝缘上的这种连续性的应力还会继续增加。防止因这种脉动力而带来的损坏，要求股线要绑扎良好，主绝缘有优良的性能，同时线棒下槽时不但不能疏忽大意而且要正确的楔紧。为了校核按电流设计原理而估计的，将来可能达到的工作应力进行了一次大型尺寸的模拟试验，对导条和楔紧方式的长期性能作了研究。

——除了上面提到的正常情况下的应力以外，还需要考虑到偶而会碰上的意外情况（短路、错误合闸）所产生的应力这点非常重要，设计中应采取适当措施以避免这种情况下绕组的严重损坏。

绕组设计

关于槽内结构设计，即使在目前所制成的最大的电机中亦和很多年前所采用的极为相似。制作良好的双层换位导条式的绕组已成为标准的设计形式。槽内双层线棒之间隔一层衬