

上海市电机工程学会论文选集

1962

上海市电机工程学会編

上海科学技术出版社

1962

上海市电机工程学会論文选集

上海市电机工程学会 編

上海科学技术出版社

內 容 提 要

本书是从1962年上海市电机工程学会年会宣讀的124篇論文中評选的較优秀論文的一部分,各篇論文都針对近年来上海市电机工业的一些生产实际問題,也反映了上海市电机工程界近年来科研的概貌。适合电机工程技术人員参考。

1962

上海市电机工程学会論文选集

上海市电机工程学会 編

上海科学技术出版社出版(上海瑞金二路450号)

上海市书刊出版业营业許可証出093号

上海市印刷三厂印刷 新华书店上海发行所发行

开本787×1092 1/16 印張9 8/16 排版字數179,000

1963年12月第1版 1963年12月第1次印刷

印數1—3,500

統一書号 15119·1769 定价(十四) 1.35 元

高压电动机采用粉云母带絕緣的研究

上海电机厂 許惠麟

高压电动机一般都采用云母带連續絕緣,但由于大片云母的資源稀少,价格昂貴,影响电机工业的发展。本文针对这个关键,进行了粉云母带在高压电动机上的应用試驗,通过了电气性能、机械强度、热老化性能的試驗和实际运行的經驗证明,采用片云母带与粉云母带的混合結構,具有优良的性能及緩和云母供应不足的紧张局面,并降低电机的成本。

1. 引 言

云母是电机工业中的主要絕緣材料,它具有优良的电气性能、耐热性能和机械强度,由于大面积云母的資源稀少,剝成薄片要耗費大量的手工劳动,使云母成为价格昂貴、数量稀少的絕緣材料,在电机工业生产上一直是一个薄弱环节。最近十几年以来,工业比較发达的国家都在积极研究云母的代用品。主要在塑料、粉云母和合成云母三方面进行工作。到目前为止,氟素塑料的耐电量性能和硅橡胶的长期耐热性能还都不如云母,合成云母則由于成本太高,不能大量采用,而粉云母則具有云母的基本性能,而且利用云母廢料进行化学处理后,在专用的造紙机上进行机械化生产,制成成卷的粉云母紙,价格非常便宜,几乎成为云母的主要代用品。許多国家小自低压小型电机,大至高压巨型的汽輪发电机,都大量采用粉云母制品作为主要的絕緣材料。

上海电机厂选择了需用云母制品較多的高压电动机进行了粉云母带的应用試驗。綫圈是真空浸胶連續式絕緣,电压等級是6千伏,綫圈具有优良的耐潮性能和电气性能。这种絕緣結構自1930年以来世界各国都普遍采用,在高压电动机方面已取得了較好的运行經驗,在这个基础上,以綫底补强的粉云母带代替了部分片云母带。通过材料性能的分析,絕緣的工艺試驗,綫圈成品的电气和机械强度試驗,热老化比較試驗和电机采用部分粉云母带絕緣后的运行情况調查,证明了采用粉云母带与片云母带混合絕緣的性能是能保证电机长时期的安全运行;此外,对玻璃布补强的粉云母带也进行試驗,亦证明了有較好的电气性能。

2. 試驗結果

(一) 瀝青綢底粉云母帶、玻璃底粉云母帶与片云母帶的各种性能比較 粉云母帶的厚度均匀、平均击穿电压强度較高,性能見表 1。

表 1

項 目	單 位	綢底片云母帶			綢底粉云母帶			玻璃底粉云母帶		
		平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值
厚 度	毫 米	0.128	0.14	0.121	0.117	0.13	0.11	0.142	0.148	0.135
揮发物含量	%	11.1	—	—	20.5	20.88	20.3	9.15	—	—
含 胶 量	%	24	24.7	23.4	22.7	23.9	20.8	27.2	—	—
补强材料含量	%	17.9	18.7	16.4	27.5	29.1	26.4	31.1	—	—
表 面 质 量		良		好	略 有 分 层			略 有 分 层		
抗 張 强 度	公斤/毫米 ²	2.34	2.5	2.2	1.971	—	—	7.95	9.95	5.84
云 母 含 量	%	58.2	60.2	57	49.8	50.1	49.7	41.7	—	—
击穿电压强度	千伏/毫米	23.5	28.1	20	27.1	36.3	18.7	33.2	35.6	26.2

綢底片云母帶系一面甲級紡綢和一面云母帶紙补强,以油改性瀝青漆粘合,綢底粉云母帶仅将云母片改成粉云母紙,玻璃底粉云母帶系一面无碱玻璃布和一面云母帶紙补强以油改性瀝青漆粘合。粉云母帶厚度均匀的主要原因是粉云母紙的厚度均匀,制成云母帶时不象片云母帶那样要采用 1/3 面积的鱗片状貼片方法。由于厚度均匀的原因,使粉云母帶的平均击穿电压强度亦高于同厚度的片云母帶的击穿电压强度。通过厚度的測定,綢底粉云母帶有 71% 的測定值在 0.115~0.12 毫米范圍內,而綢底片云母帶則仅有 42% 在 0.13~0.135 毫米范圍內。

(二) 絕緣結構与絕緣工艺 6 千伏高压电动机采用 0.13 綢底片云母帶絕緣槽部半叠包八层,端部半叠包七层,槽內单面的絕緣厚度为 2.9 毫米。粉云母帶在絕緣层中的分布是在槽部五层,端部四层,綫圈的外面二层和最里面一层均采用片云母帶。这种絕緣結構的选择是考虑到粉云母帶的机械强度較差,使片云母帶起一定的机械保护作用,而使粉云母帶則承受大部分电气强度。粉云母帶在絕緣工艺方面与一般片云母帶絕緣工艺沒有显著的区别,仅在包扎粉云母帶时注意勿使粉云母帶受到机械損伤。

(三) 綫圈击穿电压的比較 采用粉云母帶絕緣后,綫圈与全部片云母帶絕緣的綫圈下綫前和下綫后再从槽中取出,进行工頻击穿試驗,其平均击穿电压都处于相近的水平。数值見表 2 和表 3。

表 2 綫圈直綫部分击穿电压(千伏)

絕 緣 种 类	下 綫 前				下綫时未經翻綫的綫圈				下綫时經過翻綫的綫圈			
	样品数量	平均值	最大值	最小值	样品数量	平均值	最大值	最小值	样品数量	平均值	最大值	最小值
綢底片云母带包八层的綫圈	20	55.88	68	40	14	57.2	68	43	6	57	64	42
綢底粉、片云母带混包八层的綫圈	46	53.07	65	37	26	52.3	72	32	13	48.3	61	29
玻璃底粉、片云母带混包七层的綫圈	6	59.1	60	58	—	—	—	—	—	—	—	—

表 3 綫圈弯角部分的击穿电压(千伏)

絕 緣 种 类	下綫时未經翻綫的綫圈			下綫时經過翻綫的綫圈		
	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值
綢底粉、片云母带混包八层的綫圈	48.3	57	25	49.8	62	22
綢底片云母带包八层的綫圈	48.5	63	15	47.5	63	20

(四)介质損耗角正切的比較 介质損耗角正切是評定絕緣质量的主要指标,在各种不同的电压下测定介质損耗角,从絕對值和損耗角正切的增量,可以区别絕緣层有无空隙,浸胶工艺是否正常,数值見表 4。

表 4 介质損耗角正切与电压的关系

絕 緣 种 类	tgδ (室 温)			Δtgδ
	$\frac{1}{2}U_H$	U_H	$1\frac{1}{2}U_H$	
綢底片云母带包八层的綫圈	4.2%	4.3%	4.5%	0.3%
綢底粉云母带混包八层的綫圈	3.5%	3.7%	4.1%	0.6%
玻璃底粉、片云母带混包八层的綫圈	2.6%	2.8%	3.1%	0.5%
大电机研究所規定的一等品綫圈指标(参数)	—	小于 4%	—	小于 1%
4000~6000 千瓦发电机綫圈指标(参数)	—	小于 12%	—	小于 4%

注:表中的各种絕緣的介质損耗角正切都达到指标。

(五)热击穿試驗 在溫度为 105°C 和 3.5 倍額定电压 (21 千伏) 进行长期耐压試驗,以評定綫圈的耐电弧、耐电量 and 长时耐电压的性能。試驗結果是:

紙底片云母带絕緣 50 小时以上 (苏联全苏电工研究院試驗数据)
綢底粉、片云母带混合絕緣 124 小时 26 分

由于粉云母带的組織均匀,加热后不易松脹,热状态的綫圈的耐电压性能有所改善。

(六)热老化的比較試驗 为了证明粉、片云母带混合絕緣的耐热性能,按国际电工协会所推荐的热老化試驗方法,在 180°C 进行周期性的热老化試驗,其中还包括振

动、受潮和耐压試驗等項目。試驗結果是綢底片云母帶絕緣的平均熱老化壽命是 374 小時，綢底粉、片云母帶混合絕緣的平均熱老化壽命是 345 小時，兩者熱老化試驗的數值是相接近。從原材料組成來看，粉云母與片云母的雲母含量都在 40~50% 左右，粘合劑和補強材料均相同，如果製造工藝上能保證質量，兩種絕緣結構的壽命應該相接近的。

(七) 電動機連續多次啟動試驗 為了考驗粉、片云母帶混合絕緣線圈的機械強度是否能滿足使用的要求，除了通過下綫後的耐压檢查外，電動機在啟動時使線圈各部分受到了複雜的電動應力。為此，選擇了一台線圈截面小、剛性差、端部長和啟動時受到應力較大的 290 千瓦 2 極電動機，在額定電壓（6 千伏）直接啟動了 1000 次，並定期進行 10 千伏的耐压試驗，以檢查絕緣有無損壞。經過了 1000 次的直接啟動試驗後，異相線圈有較大的變形，但是絕緣仍舊完好；通過工頻 10 千伏一分鐘的耐压試驗，最後將線圈在槽內進行击穿試驗，仍保持着較高的击穿水平，證明它具有足夠的機械強度。數值見表 5。

表 5

項 目	平均击穿电压 (千伏)	最高击穿电压 (千伏)	最低击穿电压 (千伏)
粉、片云母帶混合包綫圈	36	45.5	27.5
片云母帶包的綫圈	37.7	45	32

上述各項試驗都是粉、片云母帶混合絕緣的方式，是否有可能全部採用粉云母帶或者採用紙底補強的粉云母帶，在這方面也進行了試驗工作。上海電機廠曾採用全部紙底補強的粉云母帶試制 6 千伏高壓線圈，結果是線圈壓型後 90% 通不過 21 千伏的耐压試驗，由於粉云母紙的組織受到機械應力的破壞，同時也進行了全部用綢底補強的粉云母帶試制 6 千伏的線圈，雖然耐压水平比紙底補強的粉云母帶有所提高，有 91% 的線圈通過 21 千伏的耐压試驗，但是下綫時仍有击穿現象，因而亦未能採用。這證明了混合絕緣具有較好的機械和電氣性能，綢底粉、片云母帶混合絕緣雖然通過了上述的各種試驗，在成批生產時質量能否保證，是生產實踐的一個關鍵問題。上海電機廠在 1959 年開始進行小批的投入生產，剛開始時，線圈成品合格率（工頻耐压 21 千伏）為 97.5%，隨著絕緣包紮、線圈成型和真空浸膠質量的提高，線圈合格率逐步提高；1960 年初，線圈合格率提高到 99.3%，至 1962 年合格率提高到 99.5% 左右，下綫後的合格率也一直保持在 98% 以上。

(八) 電動機實際運行的情況 通過生產的實踐證明，這種絕緣結構是能符合生產廠的質量要求，但是運行後是否會產生其他質量事故呢？因此，在 1962 年 3 月在上海地區訪問了上海第三鋼鐵廠、上海楊樹浦水廠和閔行發電廠，對 6 千伏電動機的運

行情况进一步了解,調查了 100~1000 千瓦的感应电动机共有 50 台。其中粉、片云母混合絕緣的电动机約占 30 台,都运轉了一年至二年的时间,其中絕大部分絕緣良好,仅有一台在进行了預防性耐压檢查时主絕緣击穿,损坏原因尚未查明,說明这种絕緣結構是可靠的。

3. 結 語

采用粉云母制品作为高压电动机的主絕緣是今后电机絕緣的一个主要方向。本試驗采用油改性瀝青作粘合胶,目前有不少国家在研究以聚酯或环氧树脂作粘合胶,并取得很优越的成績。結合我国的具体情况,选用玻璃底补强的粉云母带以环氧或聚酯树脂粘合和浸漬仍然是有很多优点,值得我們研究的。采用現有的結構具有很大的經濟意义,因为粉云母带的价格仅为片云母带价格的 34%,因此,可以使电动机成本下降 4% 左右,同时亦緩和了云母供应的緊張局面。

参 考 文 献

- [1] An Advanced Concept for Tubor Generator Stator Winding Insulation. A. I. E. E. Transactions, 1958, pt. III, p.358.
- [2] Справочник по Электротехническим Материалам. том 1, часть вторая, 1959.
- [3] Micadur, A New Insulation for the Stator Windings of Electrical Machines. B. B. C. Review, vol. 47, № 5/6, 1960.
- [4] Изоляция Электрических Машин. том 1 и 2, НИИ Эл, 1958.
- [5] 改进粉云母带质量的經驗介紹. 电机工业, 1959, 第 12 期.
- [6] 粉云母絕緣材料. 电工技术, 1958, 第 12 期.
- [7] 粉云母带的电气絕緣性能. 电工文摘, 1960, 第四期.

使用电磁模拟設計超高压变压器防雷結構

上海电机厂 赵志清

电磁模拟能够相当准确地模拟超高压变压器繞組中的波过程,对变压器絕緣結構的設計有很大帮助。事实上,它是一种用費少、收效好的設計工具,对于发展超高压巨型变压器的絕緣結構具有重大的意义。

本文首先简单地綜述研究变压器繞組波过程的几种方法与模拟,以及电磁模拟的准确度;继之,介紹制作 30,000 千伏安、220 千伏变压器电磁模拟的情况,以掌握这一方法的参数选择、模拟与原型的实测比較、分析誤差的原因;然后介紹 330 千伏巨型超高压自耦变压器防雷結構成功地使用电磁模拟进行設計的情况,对模拟与原型的实测进行初步的分析;最后提出一些存在的問題与改进的意見。

1. 引 言

超高压电力变压器的設計中,絕緣結構的設計甚为重要,而絕緣結構的选择在很大程度上决定于冲击电压作用时在繞組上的电压分布,預先知道設計中的变压器繞組上的冲击电压分布,对于該变压器在保证足够的絕緣水平的情况下,节省絕緣和金属材料、減輕重量、降低成本等具有重大的意义。

要預先知道繞組上的冲击电压分布,一般有两种方法:一种是計算方法,另一种是模拟試驗法。过去波过程的理論很少可能应用来設計一个变压器,尤其是繞組結構复杂的超高压电力变压器,近年来由于电子計算技术的迅速发展,已經有可能利用电子計算机来計算变压器的冲击电压分布^[1]。这肯定是一个方向。另一方面,模拟試驗法也是解决这一問題的一个好办法。通过理論分析与实际测量证明,采用模拟試驗法經濟实用,同时可以保证必要的准确度。

模拟試驗法有三种类型:(一)几何模拟(或称物理模拟);(二)电磁模拟(或称复式模拟);(三)長時間标度模拟。我們采用的是电磁模拟。現在簡述三者的特点与实用价值。

一、几何模拟(物理模拟)

几何模拟是应用在尺寸上按比例缩小的模拟变压器, 来研究其波过程保持几何模拟与原型上电磁过程相似条件为^[3,4]

$$\mu\gamma l^2 = t \quad (1)$$

$$\text{及} \quad \mu\varepsilon l^2 = t^2 \quad (2)$$

式中, l 、 t 、 μ 及 ε 分别为长度、时间、磁导系数、电导系数及介电常数的比例尺(即模拟与原型中相应的量之比)。

通常总是使用与原型同样的材料来制造模拟, 即 $\mu = \gamma = \varepsilon = 1$, 由此得到 $l = t = 1$, 也就是说, 只有在模拟与原型同样大小的情况下, 才能保持相似, 可是, 这样也就失去了模拟的意义。

如果不要求模拟与原型中波过程的衰减完全相似, 也就是不考虑电导系数的比例尺寸, 这在一定程度下是可以允许的。这样, 根据式(2), 可得到相似条件为 $l = t$, 即几何模拟上的时间比例尺等于长度比例尺。我们当然希望模拟做得较小, 即采用较小的长度比例尺, 这时, 时间比例尺也随着缩小。因此, 在试验时就必须采用很陡的冲击波, 这将给测量技术带来很大困难, 与测量引线引起很大的误差, 并且按严格的长度比例尺来制作很小的模拟, 工艺上也是非常困难的。由于这种几何模拟有这样的缺点, 实际上一般都不采用, 而采用以下两种方法之一。

二、电 磁 模 拟

电磁模拟是在变压器的几何模拟(绕组自感与互感系统)上面并联上一组电容链(绕组各部按比例放大倍数的电容系统), 这样, 就相当于使比例尺 $\varepsilon > 1$, 就有可能使时间比例尺接近于 1 或比 1 更大, 从而克服了测量上的困难, 提高了准确度, 满足了式(2)相似条件。

在电磁模拟中, 波的衰减还是难于满足相似条件的^[5]。但实际测量时, 只要求测定振荡电压的第一个峰值, 而振荡电压在这时一般还不致有显著的衰减, 因此, 利用电磁模拟来研究冲击电压分布, 是可以保证必要的准确度的。

我们采用的正是这种模拟。关于采用电磁模拟方法的研究工作情况, 在下节中再作较详细的介绍。

三、长时间标度模拟^[5]

时间比例尺选择在 30~1050, 长度比例尺选择为 1/15~1/2, 同时采用具有较小内阻的多次作用的脉冲发生器(每秒 10 次), 可产生约 10 伏直角脉冲电压, 这种低压有利于仪器的工作。由于模拟瞬变过程的时间非常长, 所产生的频率较低, 因此, 连

接綫的电感与电容对測量所引起誤差較小,繞組上各測量点接头与轉換开关相連,可迅速記錄繞組各点的脉冲現象。这样,利用各接点电压曲綫的位移,可以获得空間电压曲綫的示波图(即对地电压是時間和繞組起点距离的函数),也可以获得最大对地电位与繞組占总匝数百分率的示波图(即最大对地电位包綫),以及起始电压分布的示波图。

如采用两只轉換开关,同时在測量接点間移动时,則可摄取接点的最大电压梯度。

这种長時間标度模拟的优点,是所摄取的电压可放大到 200 倍而无失真現象。此外,除了减小測量困难与誤差外,在进行測量时要比在制成的变压器上直接測量快 20~30 倍。

这类型的模拟,国内还没有正式采用。

四、电磁模拟的准确度

文献 [6] 中引用了华格納 (Wagner) 式圓筒式綫圈的等值电路分析,經過数学推导,最后得到如下的結論:

当元件数为一定时, $\frac{K}{Cl^2}$ 愈大,愈能正确地符合于实物。这里, K ——单位长度內的匝間电容, C ——单位长度內的对地电容, l ——繞組的軸向长度。

根据理論,模拟瞬变过程振幅的可能偏差为 10%。当 $\frac{K}{Cl^2} = \frac{1}{100}$ 时,具有接地端和絕緣端繞組的必要元件数約为 10 个。当 $\frac{K}{Cl^2} = \frac{1}{10}$ 时約为 3 个。

本文的两台电磁模拟,經比較原型与模拟的波分布測量数据,其振幅的誤差分別为:对地电位 6.29% 及 7.95%, 梯度电压 7.88% 及 26%。一般地說,可以滿足工程設計中的要求。

2. OДТГ 30,000/220 变压器电磁模拟

为了掌握电磁模拟方法,并檢驗模拟的准确度,1959 年在广西大学、西安交通大学、上海交通大学的协作下,制成了 OДТГ 30,000/220 三綫圈变压器的电磁模拟。在模拟上进行了測量試驗,并与在原型上的測量結果相比較,說明模拟是成功的,其准确度超过了国外同类型的模拟装置。下面将簡單介紹制作中考虑的問題以及測量試驗結果。

一、ОДТГ 30,000/220 电磁模拟比例尺(表 1)

表 1

名 称	比 例 尺 符 号	所 采 用 比 例 尺
长 度	l	1/5
时 間	t	$1/\sqrt{2} = 0.707$
匝 数	N	1/2
磁 导 系 数	μ	1
电 感	$L = lN^2$	1/20
电 容	$C = t^2/lN^2$	10
电 抗	$X = lN^2/t$	0.0707

在选择比例尺时,作如下的考虑:

(一)长度比例尺及匝数比例尺 采用小的长度比例尺可以节省制作模拟所需材料,但过小时,则波的衰减比较严重,而且制作的材料与工艺也较困难。我们根据所得到的最小截面的扁铜线,并采用匝数比例尺为 1/2,才决定长度比例尺为 1/5,这样,所用材料重量将为原型的 1/125。

(二)电容比例尺及时间比例尺 在选择电容比例尺时,考虑到:第一,所选择电容比例尺能使时间比例尺保持在 1 左右;第二,电容比例尺为 10,这时电容链上最小的电容(高压线饼对油箱)达 100 微微法以上,这样,引线的影响很小。这时,时间比例尺等于 0.707。

(三)其他比例尺 由于铁心的非线性,对冲击量测引起的误差是很小的^[4]。因此,在电磁模拟中没有必要保持电压与电流比例尺。在文献[3]推导得到交流电阻的比例尺 $R_w = N^2 n / \sqrt{t}$ 以及衰减率的比例尺 $\delta = R_w / X = n \sqrt{t} / l$, 式中, n 为垂直于主漏磁场方向的绕组层数,在我们的模拟中, $n = N = 1/2$, 因此, $R_w = 0.149$; $\delta = 2.11$ 。

二、模型变压器及电容板

(一)模型变压器部分 主要控制了以下几个主要尺寸的相似:

(1) 各个绕组的内外径、绕组压缩后高度,以及各线盘轴线的相对位置保持相似;低压绕组则只考虑其平均直径的相似,至于各线盘高度及油道宽度,则不要求完全相似。

(2) 铁心的平均直径、窗口高度及宽度保持相似,至于铁心的级数、铁轭截面形状都不要相似。

原型变压器包括两个柱,模拟上的绕组只做了一个柱的铁心则与原型一样,铁心

所用的硅鋼片与原型所用的一样。

(二) 电容板部分 电磁模拟电容板的組成及接綫如图 1 所示。

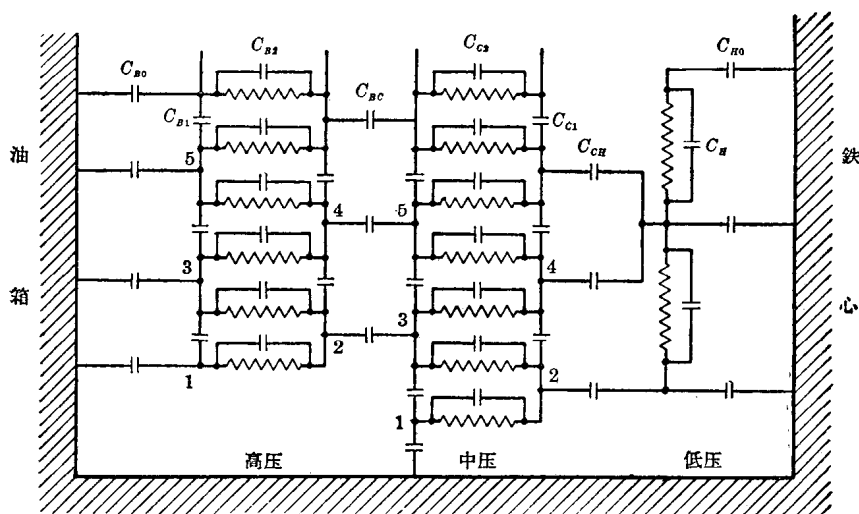


图 1 ODTG 30,000/220 电磁模拟电容鏈連接示意图

电容值主要由計算决定, 图上电容所代表的意义及决定的方法如下:

(1) C_{B1} 、 C_{C1} ——高压、中压綫盘电容, 把相邻的两个綫盘看作一个平板电容器的电极进行計算, 所得結果乘以 $1/3$ 。

(2) C_{B2} 、 C_{C2} ——反映高压及中压綫盘匝間电容, 計得平均匝間电容后, 除以 $(n-1)$ 即得。 n 为綫盘总匝数, 电容跨接在每一綫盘的两端。

(3) C_{BC} 、 C_{CH} ——高、中压繞組間及中、低压繞組間电容, 按照同軸圓筒电容器的公式計算, 把相邻两油道中心綫間距离当作綫盘的高度, 并把各繞組油道中心綫作为纵坐标, 繪出各繞組綫盘的相对位置图, 在图中找出各繞組間相对的綫盘, 計算其电容。

(4) C_{B0} 、 C_{H0} ——高压对地(油箱)及低压对地(铁心)电容, 計算法和上項相似, 先須計算高压繞組对油箱的平均距离, 决定等值圓筒油箱的半徑。

(5) C_H ——低压匝間电容, 低压繞組为单螺旋式, 电容的計算和(1)項相似, 但不乘以 $1/3$ 。

在計算电容时, 是根据器身浸在油中的情况, 考虑了电极間的不同絕緣材料(油、綫匝及綫盘外包絕緣、紙圈、紙筒、垫块等), 分別計算出各部分电容的等值介电常数, 然后进行电容計算。

为了檢驗上述計算方法的准确程度, 曾在电解槽上組織了一些試驗, 初步得到下述結果:

(1) 高压对地电容, 曾分別測量及比較单个綫盘对地电容, 几个綫盘对地电容以

及用整块电极代表几个线盘所得电容。说明上述计算中把相邻油道中心线距离当作线盘高度的做法是正确的,不会引起显著的误差。

(2) 高压线盘间电容由于边缘效应,将使电容值较不考虑边缘效应时计算的数值为大。在电解槽上比较测量结果,证明在所有各种不同的高压线盘距离下,由于边缘效应使电容增大的数值都在 5% 左右(由于测量时电容已配好,因此这项误差未进行修正)。

(3) 由于绕组两端附近接地部分(如压圈)和下铁轭的影响,将使电场分布不对称,增大了端部附近线盘对地电容。在电解槽上测量结果,说明由这原因引起的误差,只在端部附近的 4 个跨越(例如如图 1 高压绕组的接头 1、3、5、7)的对地电容需要修正,其余部分的误差都很小。

应该指出,这几个线盘都是位于中点附近,在中点接地的正常试验条件下,这些电容的误差对波过程的影响将是很小的。

由上可得结论,模拟上的电容值完全可以依靠计算来决定,其中个别不规则的电容,可以利用简单的模拟方法(例如在一个简化的电解槽上测定)或其他方法进行修正,而且这样做还可以避免由电解槽本身所引起的误差。例如电解槽本身的水平、水深、电极尺寸及距离、电极表面电阻等,都是可能引起误差的原因。又如各线盘间由于绝缘情况不同,而有不同的等值 ϵ ,在制造电解槽时,也很难正确模拟。

由上面方法求得变压器各部分的电容值后,乘以电容比例尺,就得到模拟电容板上的电容值。

电容板上的电容采用一般电信用的纸质电容器,每组电容都经过测量,其误差控制在 $\pm 5\%$ 以内。

装配完成后的电磁模拟见图 2。

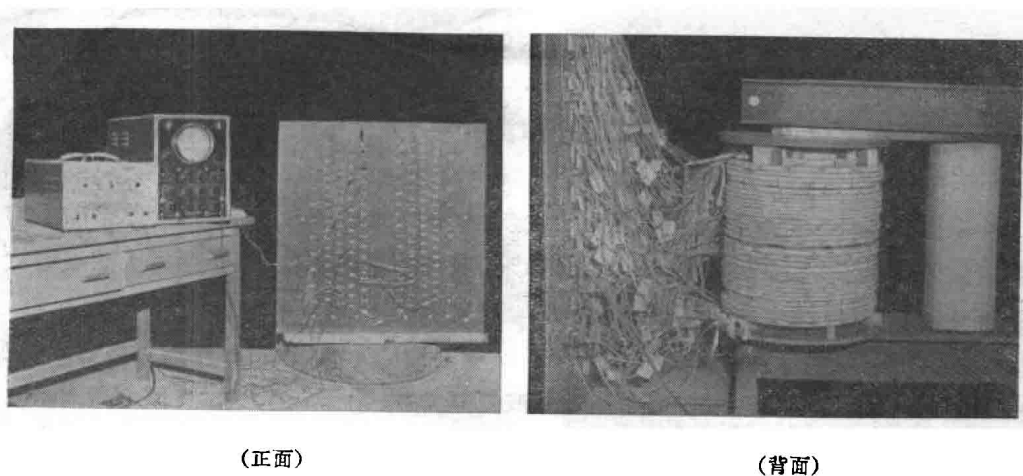


图 2 ОДТГ 30,000/220 电磁模拟外型

三、电磁模拟及原型上测量结果的比较

为了检查模拟的准确度,在模拟上进行测量并与在原型上的测量结果相比较,现将部分结果介绍如下:

(一)起始电位分布 曲线见图 3。由图中可看出,模拟上的起始分布曲线较低于原型上的,这是合理的,因为前者所模拟的是变压器处在油箱中在油中的情况,而后的测量则在空气中进行的(没有油和油箱),前者比后者,其对地电容的增加将比线圈间电容的增加来得大。因此,使 α 增加,起始分布曲线变坏。

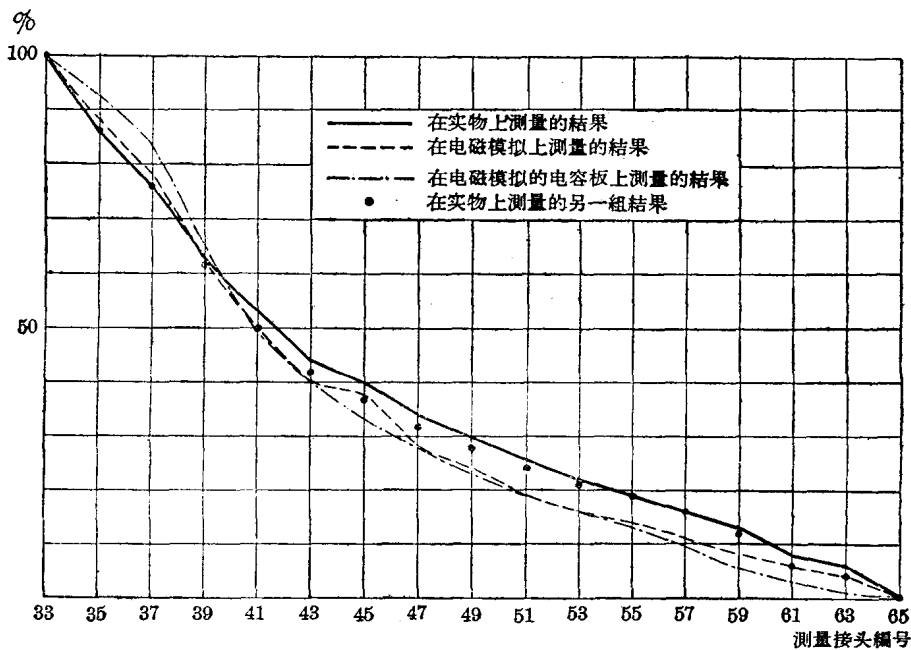
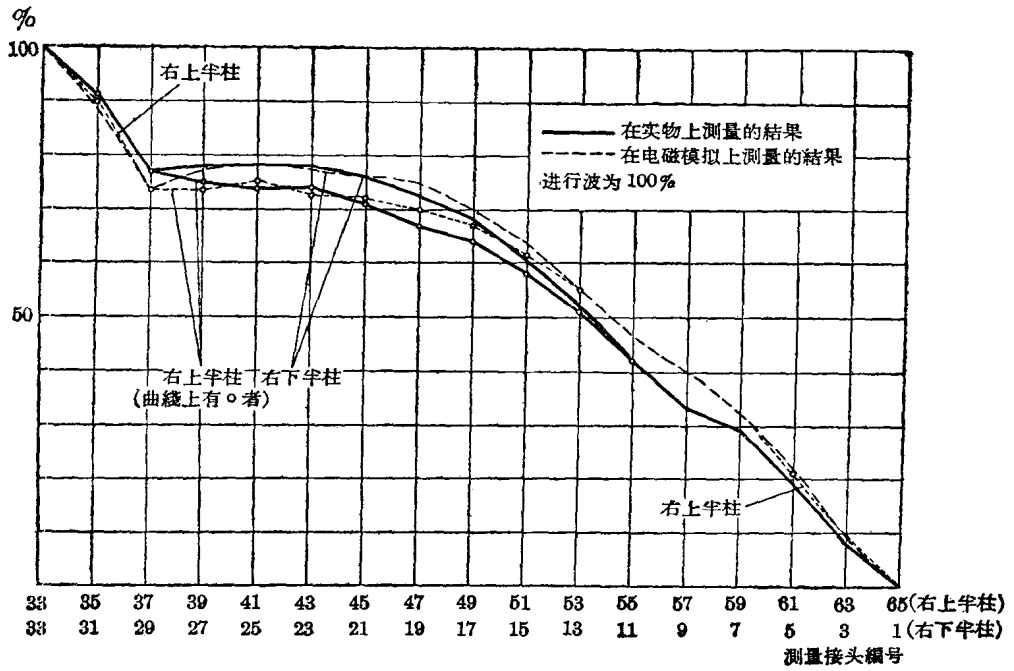


图 3 ODTT 30,000/220 的起始电位分布

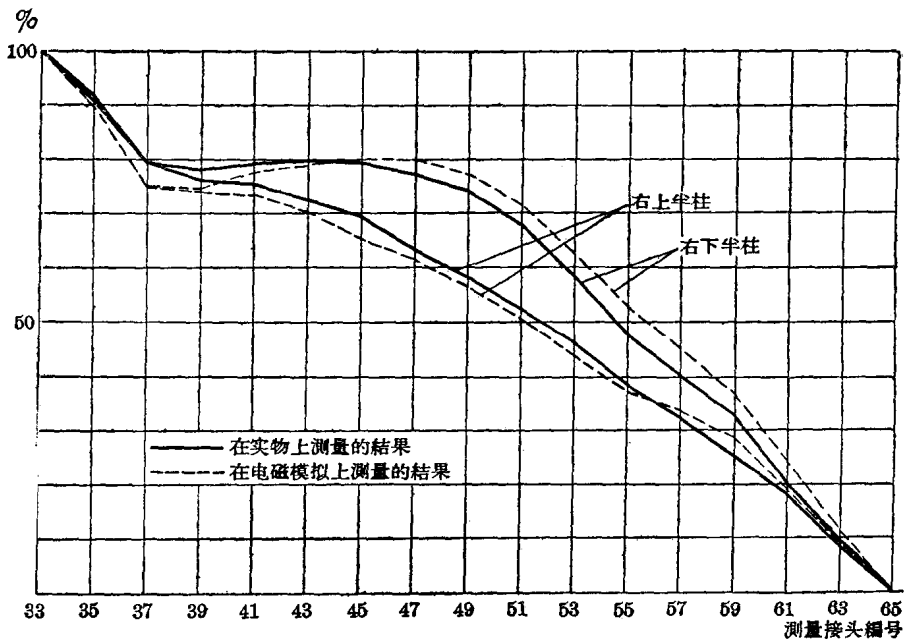
(二)对地电位 曲线见图 4a 及 b。曲线后半部显示由于模拟上起始分布较坏(反映在油箱内情况),因此,振荡电压的振幅比原型稍高。

根据在两种接线情况下,测量 60 点上对地电位的计算结果,模拟对原型的平均绝对误差(对进波幅值的百分数)为 2.59%,平均相对误差(相对于原型上该点电位的百分数)为 6.29%。

图 5 是在原型上及模拟上测得的绕组对地电位的示波图。由示波图可以看出,在模拟上的波形衰减得较快,特别是高次谐波更是如此,由于在原型的波形上高次谐波衰减得较慢,不容易由示波图中决定基波的衰减率,因此无法对前面所得到的衰减率比例尺进行校核。



(a)



(b)

图 4 ОДТГ 30,000/220 的最大对地电位
(a) 上下分接头接通, 有保护; (b) 上下分接头不接通时。

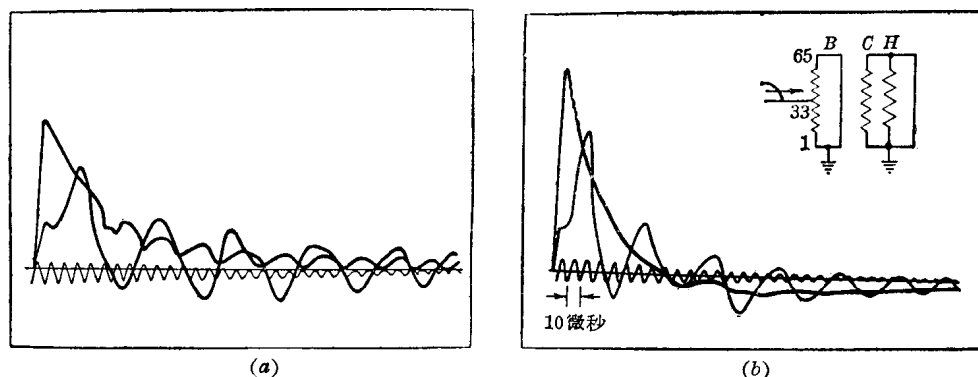


图 5 原型及模拟上的对地电位示波图 B17—0, (右下半柱绕组)

(a) 原型进波 1.5/40 微秒; (b) 模拟进波 1/28 微秒。

在原型绕组上振荡基波周期约为 65 微秒, 而在模拟上约为 45 微秒, 与所用时间比例尺相符合。

(三) 梯度电压 图 6a 及 b 给出一组梯度电压曲线, 模型上的梯度电压分布与原型基本相似, 在首端第 3 油道差别较大, 可能由于静电圈对线盘电容的模拟尚未能很准确(原来的电容值是根据电解槽上的测量决定的, 后来发现有某些误差, 但未及修正)。

根据曲线的对比, 没有发现由于变压器处在油箱中而使梯度显著增大的现象。

根据在两种接线情况下测量 60 点的结果比较, 得到模拟与原型上梯度电压的平均绝对误差(相对于进波)为 0.78%, 相对误差(相对于原型上梯度电压)为 7.88%。

图 7 是原型及模拟上两个梯度电压示波图的对比。

图 8 及图 9 是两台原型与同一台电磁模拟的对地电位示波图。

下面将本厂 OДТГ 30, 000/220 电磁模拟与美国 G. E. 公司^[2]及瑞士 B. B. C. 公司^[3]的模拟的误差在表 2 进行比较。

表 2

电 压	平 均 绝 对 误 差 (对进波电压的%)			平 均 相 对 误 差 (相对于原型上各该点电压的%)		
	美国 GE	瑞士 BBC	本 厂	美国 GE	瑞士 BBC	本 厂
对 地 电 位	6.3	—	2.59	7.3	—	6.29
梯 度 电 压	2.4	2.7	0.78	11	10	7.88

由此可见, 我们的电磁模拟的误差要比美国、瑞士的模拟误差小一些, 特别是绝对误差更是如此。顺便可以指出, 我们现在所做模拟的对象(三线圈变压器)比文献[3]中所介绍的模拟要复杂得多, 后者所模拟的变压器只有两个绕组, 其中一个绕组还是以金属屏蔽来代替的。