

哈爾濱工業大學

學生科學研究報告選集

(電工部分)

慶祝國慶十週年

1959

目 录

以环氧为基础的新型电机絕緣材料的研究.....林永兴.....	(1)
应用磁放大器——飽和电抗器控制的电弧炼鋼爐电極自动調节器工企专业交流电弧爐小組.....	(9)
电力系统內过电压模拟設備中变压器模型的非綫性元件的研究王函林.....	(18)
2500/5安培直流互感器的研究.....电測专业張金城等.....	(25)
QS—501交流电桥設計 电測专业沙琳等.....	(36)
电动式0.5級寬頻帶低功率因数瓦特表的設計.....电測专业赵国权等.....	(46)
带步式选择器的自动数字补偿器研究.....电測专业梁志魁等.....	(60)

以环氧为基础的新型电机絕緣材料的研究

林 永 兴

22

絕緣在电机中不可避免的要受到强电场、高温及机械振动等作用。在一些特殊情况下还要受到潮湿化学腐蚀和各种不同类型的过电压的作用。在这些因素的作用下絕緣不断地老化，渐渐地会使其性能变坏，导致事故的发生。要想提高电机的运行寿命加强其抗老化的能力，对用于电机的絕緣材料及絕緣的结构都要提出较高的要求。对电机用的絕緣材料所提出的复杂的要求大大的限制了适用于电机絕緣的电工絕緣材料的种类。从上世纪末叶一直到今天云母为基础的电机絕緣还是被广泛应用的。对以云母为基层的电机絕緣进行很多有价值的試驗，进行了很多有益的研究工作，累积了许多运行和制造的經驗和方法。五十多年来各国广泛的运用剝片云母作为电机絕緣材料經驗証明用云母作为絕緣的电机足够的安全性，有高的介电性能，良好的耐热性，耐潮性，寿命也比较长。但随着电力系统的发展輸电能量和距离的增加，电压等級不断的提高。高压电机对絕緣材料提出了更高的要求。满足这种要求仅用剝片云母为基础的材料量达不到的。首先以剝片云母为基础的电机絕緣最高工作温度为 105°C ；最高的抗电强度为 20 千伏/毫米同时云母比较脆在下綫和电机运用中材料受振动等使其介电性能变坏，同时由于云母比较稀少；在所采用的云母矿中只有 7—8% 用于电气工业中，在 7—8% 之中仅有 40% 的云母片的面积达 $10\sim 40$ 厘米²，其余 60% 以上云母片面积只有 $4\sim 6$ 平方厘米。这就是云母絕緣材料昂貴的原因之一。这就要求人們去寻找新的絕緣材料，首先想到的是利用面积較小的碎块云母将其在特殊处理之后制成分云母紙用环氧树脂漆作为粘合剂所成的絕緣在电制上已經成功的得到了运用。如捷克列宁工厂用环氧树脂漆 30~40%（以丙酮为溶剂）作粘合剂制成分云母紙以玻璃布袋补强的 40000 千瓦 汽輪发电机完子綫圈。用热压的方法除去丙酮而形成象浇注絕緣的整体，使保护层絕緣内不致发生气泡。試驗証明：它的介質損失角正切 $\text{tg}\delta$ 值比用真空浸胶絕緣大 10%。耐压約为 30 千伏/毫米 試驗同时証明 13~15 层的云母紙可以一次烘焙成型不必多次压制，节省了很多时间。但是目前对环氧的应用尚不熟。尤其用环氧树脂浇注尚存在二个待以解决的問題：1) 老化問題；2) 热膨胀系数的問題未得到圓滿的解决。

我們与哈尔滨电机一起对环氧粉云母和环氧玻璃布的綫择进行了制試和研究。各国对粉云母絕緣材料的研究証实了它有以下优点：

- 1) 厚度均匀；
- 2) 机械性能高；
- 3) 电气性能良好；
- 4) 耐热性高。

但在我們研究中尚存在二个問題未得到解决。

- 1) 环氧粉云母在高温时 $\text{tg}\delta$ 太大。在工作温度下 (105°C) 可达到 60%，以

使其在高溫 (120°C) $3.5 U_n$ 時很快熱击穿其壽命很低。

2) 环氧玻璃布耐壓很低很脆彈性差。

一、材料與工藝

粉云母袋是用哈爾濱絕緣廠生產的其平均厚度為 0.2 毫米 膠貼粘劑為环氧酚醛， $\frac{1}{2}$ -疊繞，層與層之間刷以环氧酚醛。

工藝上開始時與電機廠正常剝片云母的工序相同，即排綫繞白布袋彎折成形，加虫膠紙袋浸漬熱壓（溫度在 $140\sim 160^{\circ}\text{C}$ 下約 $20\sim 30$ 分鐘硬化）。

根據電機廠過去一個階段的摸索和我們初步的嘗試，發現運用粉云母紙絕緣碰到的第一個頭痛的問題是高溫時介質損失角正切太大。（ 105°C 時大於 60%）因此在進行電壓老化時即在 $2.5 U_n = 21$ 千伏 120°C 下很快就產生熱击穿，因此怎樣改善降低絕緣的 $\text{tg}\delta$ 和確定切合實際的電壓老化，老化的試驗條件就成了迫不及待的問題。

二、介質損失

介質損失角正切 $\text{tg}\delta$ 太大，分析有如下幾種因素：

- 1) 粉云母紙比較鬆軟；
- 2) 所有的溶劑為強極性的酒精，殘存的溶劑使電導增大 電導損耗 增加 而引起 $\text{tg}\delta$ 增大。
- 3) 熱處理的時間掌握的不好。熱處理的時間不夠時环氧未能由綫性結構變成網狀和空間結構；熱處理時間太長又相當熱老化了使其電性能降低。
- 4) 鋼綫與銅綫圈有空隙存在，由於空氣的強烈游離而引起。
- 5) 所用的环氧树脂電氣性能較差。

針對上邊問題做了如下的改進：

i) 在真空下干燥以除去絕大部分溶劑和部分空氣。干燥時我們希望溫度稍高一些溶劑容易跑掉節省時間，但又防止其硬化，故溫度應是不引起硬化的最大可能的溫度（大概在 70°C 左右）。真空度不低於 10 毫米 Hg 同時提出以苯二甲酸酐代替酚醛以除掉熱性溶劑酒精的作用。另外也作了一種含膠量比較大的作了嘗試。

ii) 對熱處理時間之長短進行研究，企圖找出較合適的時間，既能使其結構反應的完滿又能節省時間得出較良好的電氣性能。

iii) 對各種類型之环氧树脂加以試驗選擇。

iv) 企圖尋找一種新的試驗絕緣壽命的方法。根據蘇聯經驗 $3.5 U_n$ ，空氣溫度在 120°C 之下應該經受 200 小時的考驗，但我們的絕緣最多只支持 2~3 個小時就击穿了。是否可以在低一些電壓或較低的溫度下進行試驗，進而推出絕緣的壽命。

三、工藝改進中的試驗

环氧酚醛云母綫棒以 №0，№3 為代表做了如下試驗：

① 對熱處理時間研究

如图1为 6.0 千伏 下綫棒 $\lg\delta$ 的平均值对热处理时间的关系。由图可以清楚的看出 $\lg\delta$ 对热处理时间的关系在前 2~3 小时降低的比较显著, 在三小时以上 曲线变化不大基本上平了。在以后进一步研究中得知三小时的热处理是不足的。大概在 6 小时左右

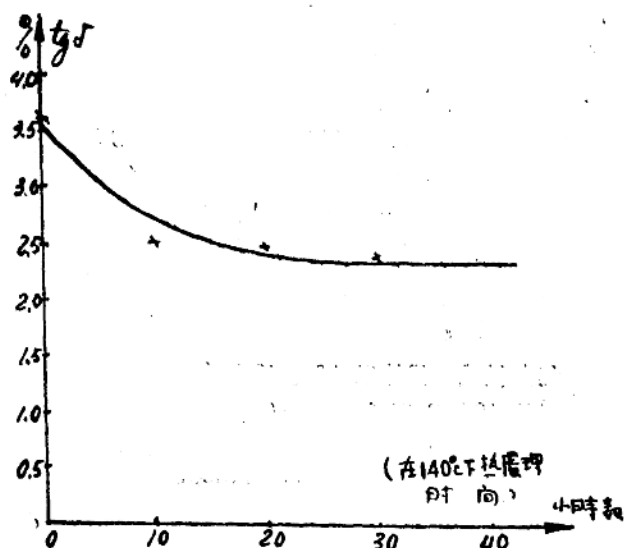


图 1 $\lg\delta = f(\tau)$

或稍长一点时间为恰当。当然时间更长还会降低, 因为它的挥发物等跑掉的更多了, 但与此同时不可避免的绝缘也在老化使其电抗性能下降。因此对热处理时间的长短应该全面考虑, 老化后虽然降低但并无实际意义。

热处理之后在常温 20°C 测量

电压	$\lg\delta\%$	R_3	$\Delta\lg\delta$
3 千伏	1.3	1521	
6 千伏	2.4	1508	2.0%
9 千伏	3.3	1482	

在高温 104°C 下测得平均 $\lg\delta = 59.4\%$ (电压为 6kV)

由下边所测得的结果可以看出: 常温下 $\lg\delta$ 及 $\Delta\lg\delta$ 均很小。这是我们所希望的, 也是工艺上改进以后所得的良好的效果。但是在 104°C 时, $\lg\delta > 20\%$ 。因此必须进一步解决 $\lg\delta$ 在高温时过大的问题。进一步就提出了用苯二甲酸酐代替酚醛作硬化剂。

③ 苯二甲酸酐代替酚醛作为硬化剂

苯二甲酸酐来代替酚醛作为硬化剂是考虑到酚醛是以强极性的酒精为溶剂, 降低了绝缘的介电性能。尤其当溶剂挥发不掉时更为严重, 苯二甲酸酐是以甲苯为溶剂。酚醛不溶于甲苯那么为了除掉酒精的不良影响用苯二甲酸酐作为硬化剂可为上策。同时将二种硬化剂作成了标准选择进行了试验比较。

各种试样的成份

試樣№1, №3

配方: 环氧树脂100%,
苯二甲酸酐30%,
苯二甲酸二酐酯20%热处理,
140°C经过6小时,

介質損耗 ($105 \pm 2^\circ\text{C}$, 6千伏測)

№1. $\text{tg}\delta = 45.8\%$, $R = 3200\text{欧}$;

№3. $\text{tg}\delta = 23.6\%$, $R = 376\text{欧}$;

試樣№5, №6

配方:

环氧甲苯80%溶剂,
酚醛酒精95%以7:1混合成,
140°C经过6小时。

№5. $\text{tg}\delta = 111\%$, $R_3 = 567\text{欧}$ 。

№6. $\text{tg}\delta = 110\%$, $R_3 = 1637\text{欧}$ 。

由上边試驗可以看出以苯二甲酸酐为硬化剂电性能較好。用酚醛 $\text{tg}\delta > 100\%$ 这是我們采用苯二甲酸酐作为硬化剂的根据。但后来研究得知用苯二甲酸酐在工艺方面有不可克制弱点——昇华跑掉了, 又回头来研究酚醛。可能因为酚醛含有游离酚的量太大的原因而引起的。

苯二甲酸酐为硬化剂做成的綫棒以 №5, №6 为例热处理 5 小时后 $\text{tg}\delta = 33.5\%$, $R_3 = 1390\text{欧}$ 但在处理前 105°C 时为 $\text{tg}\delta = 64\%$ 。

③ 对材料本身加以检查

a) 将所用之环氧分别做成了标准試样, 进行試驗。試驗結果証实了环氧树脂本身的性能較差在高温时 $\text{tg}\delta$ 达 100% 以上。有必要对环氧进行选择。

b) 在对材料进行試驗中还研究了不同配方对电性能的影响。对苯二甲酸酐含量 30% 及 35% 之間差別并未引起 $\text{tg}\delta$ 的显著变化。在常温时含苯二甲酸酐为 30% 的 $\text{tg}\delta$ 为低; 而在高温时含量 35% 的为低但二者相差不大无实际意义。

④ 对含胶量大小的研究

当我们进行电压老化試驗时($3.5U_H$, 120°C)綫圈在較短的时间內损坏。损坏以后将其切开发现层与层之間粘貼的不好。这是由于含胶量不适宜所造成的。含胶量大的我們也进行了試驗但其結果指出 $\text{tg}\delta$ 在高温时无显著的改善。经过較长時間的处理之后仍在 50% 以上。含胶量大可以粘貼得好些但尺寸太大; 溶剂太少反而起不了粘貼作用故一般应该采用 50% 左右为宜。

四、對 $\text{tg}\delta = f(\tau)$ 的研究

我們做了許多的特性曲綫如图 2

由图 2 可以看出用苯二甲酸酐为硬化剂的环氧粉云母的 $\text{tg}\delta$ 值上升的較快。同时在 $50 \sim 60^\circ\text{C}$ 左右即达到 20% 。对云母浸胶 綫圈和环氧玻璃布在 $105 \sim 110^\circ\text{C}$ 时才上升。在前一阶段的 $\text{tg}\delta$ 值很低很平。由这一点看苯二甲酸酐作为硬化剂, $\text{tg}\delta$ 在高温时太大就会使絕緣在运用溫度下由于热而击穿之。

五、 $\text{tg}\delta = f(u)$ 介質損耗與電壓的关系

图 3 示出的为环氧酚醛粉云母的 $\text{tg}\delta = f(u)$ 。

图 4 示出的为环氧玻璃布的 $\text{tg}\delta = f(u)$ 。

图 5 示出的为各种不同材料所制成的电机綫棒的 $\text{tg}\delta = f(n)$ 的比較。

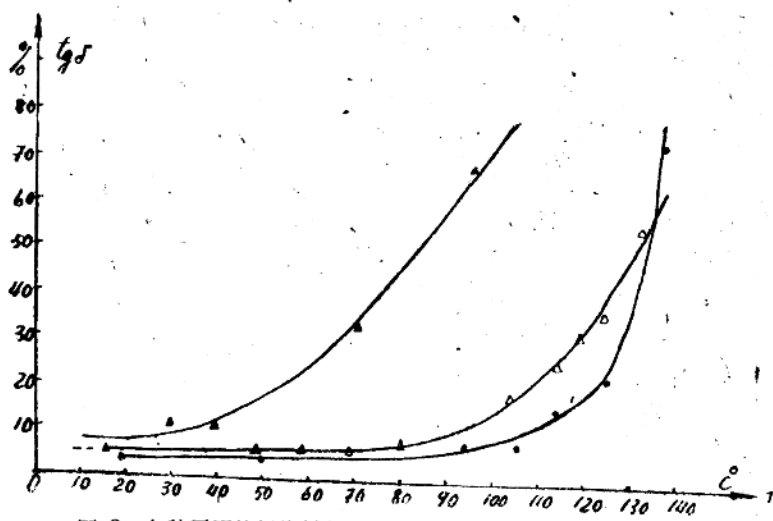


图 2 各种不同的絕緣材料組成絕緣的 $\text{tg}\delta = f(T)$ 的比較

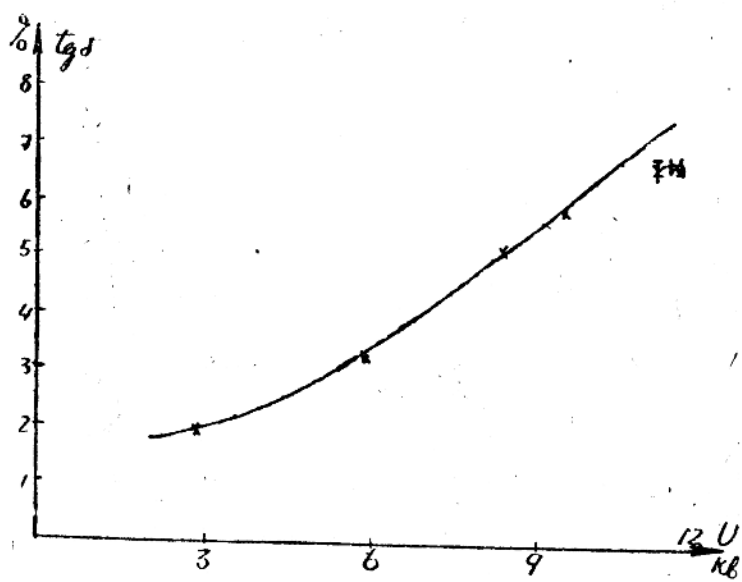


图 3 环氧粉漆粉云母在室温 20°C 时的 $\text{tg}\delta = f(u)$ (电压为 6kV 下测得)

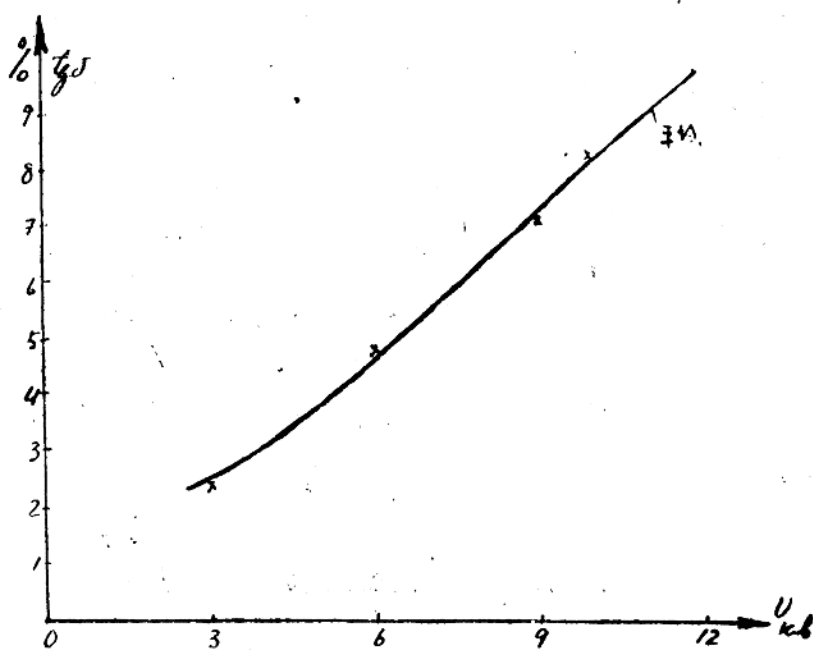


图4 环氧玻璃布 $tg\delta = f(u)$ (20°C 下测得)

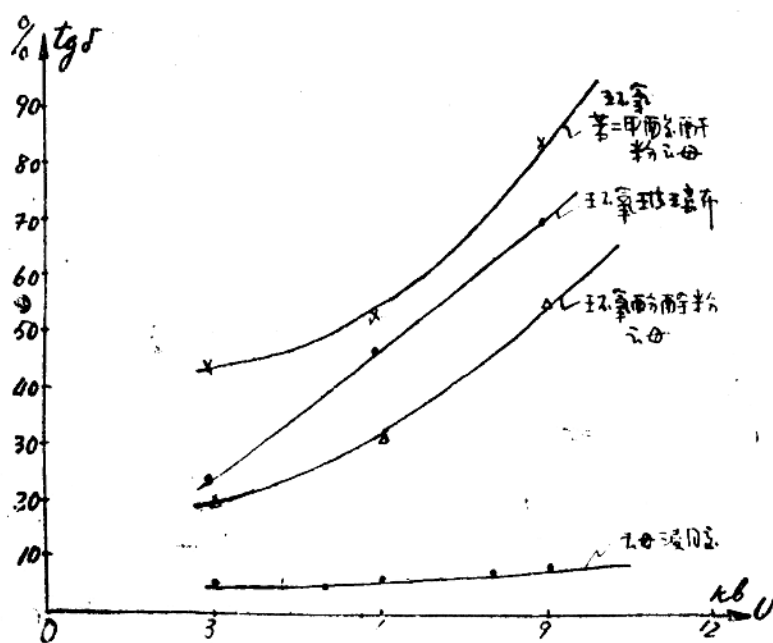


图5 各种不同绝缘 $tg\delta = f(u)$

由这些曲线的形状可以得出絕緣的損耗主要是电导損耗，極化損耗不起作用。各种絕緣的 $tg\delta = f(u)$ 特性的比較可以看出以苯二甲酸酐为硬化剂的粉云母 綫棒 $tg\delta = f(u)$ 上升的較快且其絕對值較高，环氧玻璃布它的特性近于直綫，（图中每一点均为平均值得出）环氧酚醛的 $tg\delta$ 值最低，上升的梯度与苯二甲酸酐大致一样。浸胶云母綫圈具有最低的值且随电压上升比較緩即曲綫較平这也是云母浸胶綫圈的具有良好的抗电老化特性的原因之一。

因为以环氧为基础的絕緣在我們研究試制中它的 $tg\delta$ 太大且随电压和温度 升高增加的很快，所以要想用新的环氧为基础的材料必須进一步解决 $tg\delta$ 使在高温时具有較低的数值。

六 熱處理時間對的影響

图 6 示出的为环氧酚醛粉云母的 $tg\delta$ 与热处理 (140°C 下) 时间的关系。

图 7 示出为环氧以苯二甲酸酐为硬化剂的粉云母的 $tg\delta = f(\tau)$ 的关系。

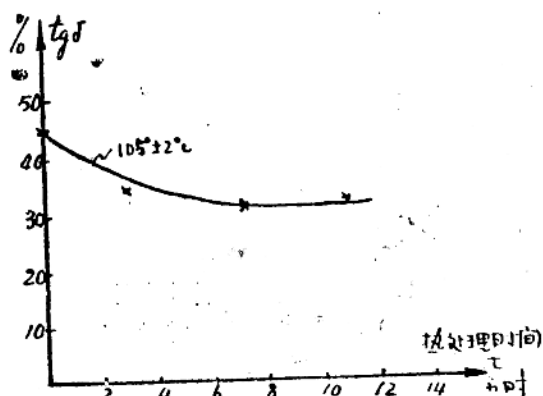


图6 环氧酚醛粉云母之 $tg\delta = f(\tau)$

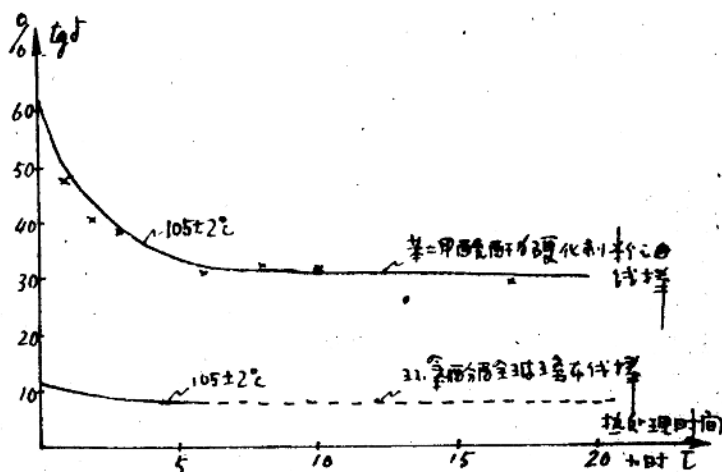


图 7 环氧酚醛玻璃布及环氧苯二甲酸之 $tg\delta = f(\tau)$

兩圖均在 6.0 千伏 下測得

由圖知，在未處理前具有較高的數值。在處理 5~6 小時的時間 $\lg \delta$ 內下降的比較顯著。這是因為以環氧為基礎的材料在 140°C 時其結構發生變化，使原來的綫性結構向網狀成空間立體結構發展，空間結構有較高的介電性能，其損失也比較大故 $\lg \delta$ 下降。經過一個階段之後結構的變化趨於穩定則其介電性能也穩定了，故 $\lg \delta$ 值在 6~7 小時以上的熱處理之後，處理時間再增加則其 $\lg \delta$ 也基本上不變了。

七、抗電強度

這次研究中因為時間緊，注意力多放在改善介質損耗對抗電強度研究得不充分。

① 對環氧粉云母（不論何種硬化劑）其抗電強度一般的可達到 30 千伏左右击穿。絕大部分均安全的通過 21 千伏的耐压一分鐘的考驗。

② 環氧玻璃布的击穿电压太低，大部分不通過 21 千伏，一分鐘 耐压試驗，均在 $10 \div 18 \text{KV}$ 上击穿。追其原因可能因為玻璃布繞的不緊所至。

八、電壓老化

① 環氧粉云母（酚醛為硬化劑）

№1 綫棒在 120°C 下，21 千伏支持 9'15''

№3 綫棒在 $100 \pm 2^{\circ}\text{C}$ ，18 千伏支持 17 小時 10'

№2 綫棒在 $100 \pm 2^{\circ}\text{C}$ ，18 千伏支持 22 小時 11'

② 苯二甲酸酐為硬化劑的環氧粉云母

№7 號綫棒 110°C ，18 千伏支持 4 大時 16'35''

№9 號綫棒 110°C ，零時 26'

№3 號綫棒 110°C ，2 小時 19'19''

③ 環氧酚醛玻璃布

№15 綫棒 $100 \pm 5^{\circ}\text{C}$ ，18 千伏支持 5 小時 50'29''

蘇聯對 6.6 千伏的電機的絕緣浸膠云母綫圈的老化研究能在 120°C ，21 千伏之下經受 200 小時的考驗，顯然我們這裡得出的低了很多。總之上邊結果指出我們所採用的新絕緣不管是常溫時击穿电压或抗老化的強度都是低的。其中重要的一個原因是因為在高溫高壓下 $\lg \delta$ 很高，如上節中所提到的。在作壽命試驗時會因發熱而很快地被击穿。環氧玻璃布的击穿电压太低可能是因為玻璃較厚而且硬，包紮不緊的緣故。

總結以上我們對新的環氧為基礎的絕緣材料在電機上的應用進行了初步的嘗試。找出了一些問題但還存在着如前所述的尚待解決的問題，此外對以新絕緣材料作為電機絕緣的綫圈的结构尚待研究。環氧樹脂在澆注互感器方面已得到成功的運用，相信電機方面不久在我們也會很快的被實現。今後在這方面可否將粉云母與玻璃混合起來用。象捷克列寧廠試制的以玻璃布作為補強同時用丙酮作為溶劑，這樣既可以消除強極性酒精的作用，同時在混合運用中能更好的注意玻璃布與粉云母的特性改善，使其包紮的更緊。

应用磁放大器—飽和电抗器控制的 电弧炼鋼爐电极自动調节器

工业企业电气化专业

交流电弧爐小組

§ 1.

自从党中央提出了以鋼为綱全面跃进的号召以后，在全国范围内掀起了全民性大办鋼铁的轟轟烈烈的群众性运动，在1958年11月召开的中国共产党八届中央委员会第二次全体会议上，曾討論了1959年发展国民經济的主要任务和方針，提出了四大指标，其中就有鋼产量一千八百万吨(这数字几乎为1958年的一倍)。从这个发展的数字来看我国鋼鉄工业的发展速度是很迅速的随着工业的，发展需要优質鋼材的数量越来越多而其中的相当一部份优質鋼材都需要用电弧炼鋼爐进行冶炼。目前世界上工业較发达的国家采用电弧炼鋼已占相当大的比重，我們国家也不能例外，而目前国内外电弧炼鋼爐电极的自动調节器絕大部份都采用电机放大机(ЭМГ)或直流系統，这种系統目前在运行和实践的过程中已发现了不少缺点，因此产生想用无触点元件(如飽和电抗器、磁放大器)所組成的交流传动系統来代替現有的 ЭМГ 式直流系統的想法，这也是在电力传动領域内发展方向之一，然而新的磁放大器—飽和电抗器(MB-ДН)式交流传动系統的方案存在着一系列新的技術問題尚未得到解决，所以很長時間以来沒有被采用。去年我国大跃进以来，如上所述对电弧炼鋼爐的需要量大大增加，但是国产的电机放大机和直流机从数量上和質量上都远远不能滿足日益发展的电爐的需要，如仅北京市就有十三台爐子由于只缺乏电控部份而不能投入生产，正由于这个原因使得許多电弧爐不能为1200万吨而發揮其应有的作用更嚴重的还在于1200万吨鋼的指标的實現受到阻碍，鉴于上述情况采用 MB-ДН或交流传动系統已提到日程上来，而且已經成为当前生产中迫切需要解决的問題。

我校在党中央指出了“教育为无产階級政治服务，教育与生产劳动相結合”的方針以后，在党的领导下把当前生产上提出的迫切需要解决的課題作为这次我們小組的结业工作題目并与北京起重机厂在一起研究来解决这个問題。在研究的过程中克服了种种困难(如資料不足，材料不全，經驗沒有……等)，在各級党組織的领导下，领导干部、工人、技術人員、教师、学生五結合，既动脑又动手，發揮了敢想敢說又敢做的共产主义风格，經過几个月的苦战，终于在今年七月初在北京起重机厂胜利地炼出了第一爐工具鋼，經過技術鑑定，証明 MB-ДН式交流传动系統性能良好，能滿足电爐所提出的要求，同时通过静态与动态的計算与分析，結果也与鑑定相符，肯定了 MB-ДН式交流传动系統可用于生产。

我們专业与北京起重机厂合搞的这套设备是用在1.5吨的爐子上,在过去所收集的实验資料的基础上还将进一步从实践运行中和理論分析作出最后的技术經驗結論,下面仅就我們小組所作过的工作做一般性的技术經驗交流,希望得到有关单位和同志們指正。

§ 2. 與 MY 式直流傳動系統比較

MY 系統	MY-DH系統
技術上: ① 高速旋轉体有振動噪音 ② 有磨損 ③ 經常发生电枢短路,炭刷脫落炭刷移动等故障。 ④ 制造維護检修困难 經驗上: ① MY ③与直流电机造价貴,且需要十二台电机,初步計算造价为12956元 ② 要增加厂房基建面积	技術上: ① 无旋轉,无振動噪音,系无触点元件 ② 沒有磨損 ③ 沒有 ④ 制造簡單,維護检修容易 經驗上: ① MY-DH 造价便宜,只需用四台交流机,計算造价为 5594 元 ② 不需要

§ 3. 基本工作原理

通过电弧爐的几种自动調節器技術性能和經驗比較,这里包括 MY-DH 式交流传动系統方案在內最后确定采用 MY-DH 式交流系統中的电比較方案是比較好的,本系統的工作原理見附图所示。

图中,电弧电压和电弧电流是分別取自电流互感器和电压变压器通过矽整流片整流后加到平衡电阻 R_i 和 R_H 上,磁放大器控制綫圈接到平衡电阻的两端,而磁放大器輸出电流分別接到饱和电抗器的直流控制綫圈,正常工作时,平衡电阻平衡,因此 MY 不工作,此时 DH 不饱和和电流电压几乎大部份降落在电抗器上,电动机不能起动。

当爐內发生短路时,电流信号加大,于是 MY-1 控制信号增加,而此时 MY-2 由于控制綫圈并联一硒片短路輸入信号值因此不能工作,随着 MY-1 輸入信号增加, DH-3,4 饱和也增加,从而使电动机端电压也增加。电極即向上提,电机平衡臂又保持平衡时即产生制动。

反之,当爐內断弧时, MY-2 工作而相应控制之 DH-1,2 工作,此时加于电动机上的相序相反,电动机即往反方向起动。

系統的手动控制是由附图中的手控开关 KK 来操縱的,手动控制保证了电極移动机构的手动提升及下降电極,手动控制仍借外加整流电源“BC”供給磁放大器信号来达到的。

§ 4. 系統幾項主要技術問題

本系統在做开路試驗时发现 (i) 电动机起動轉矩不够,起制动所需之过渡过程時間很长 (ii) 調節器的灵敏度差,調節过渡过程慢,控制不灵,饱和电抗器饱和和不

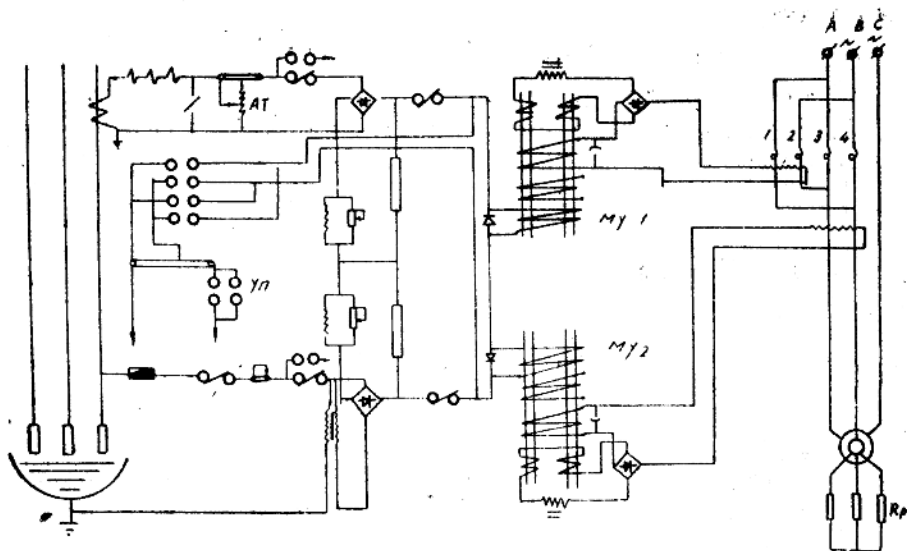


图 1

好等，且經測得在飽和電抗器反接和電源所構造的回路中，環流電流值相當大，(iii)試驗時測得本系統的電流的不靈敏區很大高達百分之五十(iv)在試制元件過程中由於選用材料及製造缺乏經驗，使得在作試驗時曾連續發生過直流繞圈間短路及絕緣選用不當繞圈發生變形，從而安裝不上去等問題，結果使試驗無法進行。在做閉路試驗時發現本系統不穩定不能工作，根據上述情況經我們小組討論和參考文獻Ф.Е.Ефроймова Феагин 電弧爐自動調節提到的電爐的工藝要求後一致確定下列幾個問題為本系統的幾個主要技術問題：(i)電動機的起動轉矩問題；(ii)環流問題；(iii)MY的放大系數問題；(iv)元件的結構及工藝問題，(v)穩定問題等，只有解決了上述五個問題本系統才能運用於生產下面就針對上述存在的五個技術問題進行研究和解決。

(1) 本系統中設法解決加大電動機的起動轉矩問題

在這裡我們採用了電機定子不對稱接法，且定子有一相直接接電源，在不增加附加設備的情況下來改善電動機的起制動所用的理論分析

方法是对称分量法，根據文獻 М. П. Костенко 著電機學“特殊部份”定子不對稱電機的起動轉矩為正序轉矩分量與負序轉矩分量之差，在此我們給定不同的 x 值可以求出相對應的起動轉矩 M_n 若 M_n 的值大於靜摩擦轉矩 M_c (即 $M_n > M_c$) 則電機可以起動，我們就根據此 x 值來設計飽和電抗器交流繞圈匝數 W_r ，從而標出飽和電抗器的其它參數。

不對稱接法如圖 2 所示。前提假定：

① 飽和電抗器視為近似線性元件，電機磁

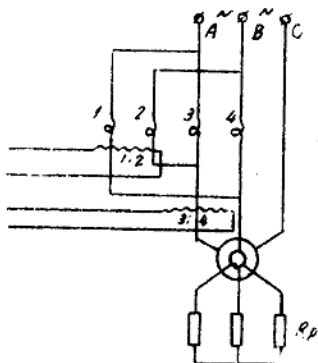


图 2

路也视为不饱和。

- ② 电网送来的电压为对称；
 - ③ 忽略饱和电抗器的电阻；
 - ④ 每一个饱和电抗器参数认为是相同；
- 计算的方法：

(i) 转换的等值线路图 (图 3)

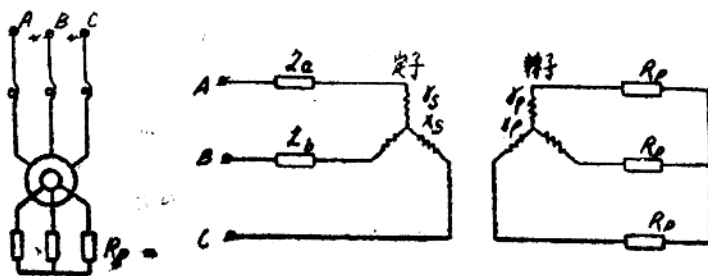


图 3

(ii) 正序分量 (图 4)

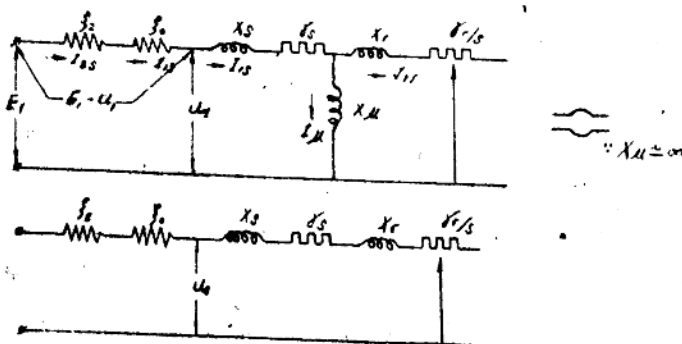


图 4

(III) 复序分量 (图 5)

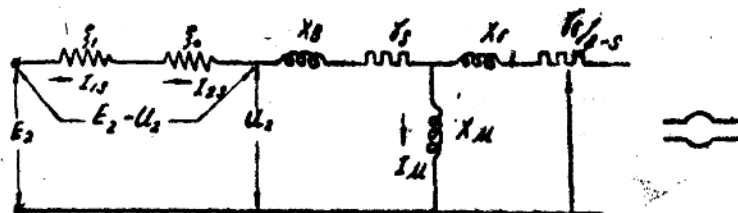


图 5

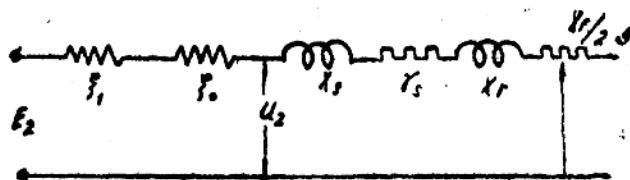


图 6

其中: x_r, γ_r 为转子折合到定子上的 x_p, γ_p

ξ_0, ξ_1, ξ_2 各为定子绕组中串接不平衡阻抗的另序分量、正序分量和负序分量。

$\therefore$ 无另线 $\therefore$ 无另序分量 x_n 很大, $\therefore I_n \approx 0$ 。

根据不对称分量法可写成方程式如下:

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_0 &= \xi_0 \dot{I}_0 + \xi_2 \dot{I}_1 + \xi_1 \dot{I}_2 + \dot{U}_0 \\ \dot{E}_1 &= \xi_1 \dot{I}_1 + \xi_0 \dot{I}_1 + \xi_2 \dot{I}_2 + \dot{U}_1 \\ \dot{E}_2 &= \xi_2 \dot{I}_0 + \xi_1 \dot{I}_1 + \xi_0 \dot{I}_2 + \dot{U}_2 \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_0 &= \dot{I}_0 z_0 \\ \dot{U}_1 &= \dot{I}_1 z_1 \\ \dot{U}_2 &= \dot{I}_2 z_2 \end{aligned} \right\}$$

式中: z_0, z_1, z_2 分别为感应电动机的另序阻抗, 正序阻抗和负序阻抗。

I_0, I_1, I_2 分别为另序电流、正序电流和负序电流 $\therefore$ 电机无性点, $\therefore$ 另序分量为零 $U_0 = 0$ 。转子电阻用 $R_p = 3$ 欧, 3 欧, 3 欧理论计算结果得

- ① 定子不对称 $R_p = 3$ 欧
- ② 定子不对称 $R_p = 1.5$ 欧
- ③ 定子对称 $R_p = 1.5$ 欧
- ④ 定子对称 $R_p = 3$ 欧

$$M_c = 0.7 \text{ 公斤米}$$

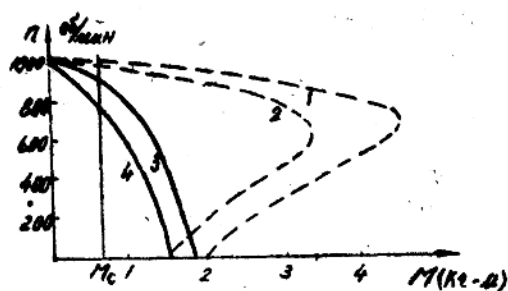


图 7

实验结果

	定子电阻 R_c 欧	转子电阻 R_p 欧	ΔH 直流电流微安
1	10	3 3 3	580 起动
2	10	3 2 3	650 起动
3	20	3 3 3	不起动
4	3	3 3 3	550 起动
5	0	3 3 3	530 起动
6	0	3 2 3	550 起动

结论：① 实验结果与理论计算分析的结果相符；

② 采用了定子不对称从 $n = f(M)$ 看，转矩大对起动转矩很有利，试验也证明了电机容易起动且起动后速度很快上去；

③ 可节省八个饱和电抗器减少投资。

$$\left\{ \begin{aligned} \xi_0 &= \frac{1}{3}(z_a + z_b + z_c) = \frac{1}{3}j(x_a + x_b + x_c) = \frac{1}{3}jx_a \times 2 \\ &\quad [\text{依假定: } \lambda_a = \gamma_b = 0, x_a = x_b, x_c = 0] \\ \xi_1 &= \frac{1}{3}(z_a + az_b + a^2z_c) = \frac{1}{3}(\gamma_a + a\gamma_b + a^2\gamma_c) + \frac{1}{3}j(x_a + ax + a^2x_c) \\ &\quad - \frac{1}{3}j(x_a + ax_b) \\ \xi_3 &= \frac{1}{3}(z_a + a^2z_b + az_c) = \frac{1}{3}(\gamma_a + a^2\gamma_b + a\gamma_b) + \frac{1}{3}j(x_a + a^2x_b + ax_c) \\ &\quad = \frac{1}{3}x_a + a^2x_b \end{aligned} \right.$$

其中， a 称为相因子

$$a = e^{j120^\circ} = \cos 120^\circ + j \sin 120^\circ = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$a^2 = e^{j240} = \cos 240^\circ + j \sin 240^\circ = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

∴ 电网电压为对称

$$\dot{E}_0 = 0 \quad \dot{E}_2 = 0$$

又无中性点

$$\dot{U}_0 = 0 \quad \dot{I}_0 = 0$$

则上述的方程式可写成

$$\dot{E}_1 = (\xi_0 + z_1) \dot{I}_1 + \xi_2 \dot{I}_2 = \xi_0 \dot{I}_1 + \xi_0 \dot{I}_2 + \dot{U}_1 = E \quad (8)$$

$$\dot{E}_2 = \xi_1 \dot{I}_1 + (\xi_0 + z_2) \dot{I}_2 = \xi_1 \dot{I}_1 + \xi_0 \dot{I}_2 + \dot{U}_2 = 0 \quad (9)$$

$$\dot{U}_1 = z_1 \dot{I}_1 \quad (10)$$

$$\dot{U}_2 = z_2 \dot{I}_2 \quad (11)$$

解方程 (8), (9), (10) 与 (11) 得

$$\begin{cases} \dot{I}_1 = E_1 \frac{\xi_0 + z_2}{(\xi_0 + z_1)(\xi_0 + z_2) - \xi_1 \xi_2} \\ \dot{I}_2 = -\dot{E}_1 \frac{\xi_1}{(\xi_0 + z_1)(\xi_0 + z_2) - \xi_1 \xi_2} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \dot{E}_1 \frac{z_1(\xi_0 + z_2)}{(\xi_0 + z_1)(\xi_0 + z_2) - \xi_1 \xi_2} = \dot{I}_1 z_1 \\ \dot{U}_2 = -\dot{E}_1 \frac{\xi_1 \xi_2}{(\xi_0 + z_1)(\xi_0 + z_2) - \xi_1 \xi_2} = \dot{I}_2 z_2 \end{cases}$$

由于正负电流的存在 ∴ 产生正负序转矩

$$\text{正序: } M_1 = I_1^2 \frac{\gamma_r}{s} \quad \text{负序: } M_2 = \dot{I}_2^2 \frac{\gamma_r}{2-s}$$

总的合成转矩为

$$M = M_1 - M_2 = I^2 \frac{\gamma_r}{2-s}$$

采用 MT 型的感应电动机。

(2) 环流电流问题

由于本系统为正反转调节系统, 因此出现环流问题, 由于环流的存在使调节器灵敏度, 过渡过程等性能均变差, 为了改善系统运行性能, 我们采用了加大饱和电抗器电抗值 (有一定限制, 根据 $M_n = f(x)$ 曲线和 M_c 的值来选, 减小磁放大器的空载电流和串接消磁环节来达到减小环流的其中接入消磁环节, 改善性能良好, 本系统不宜采用串入电阻来减小环流, 因为减小了起动力矩, 这是不希望的。

消磁环节简单工作原理: (如图 2.8) 在电流比较臂回路串接 ДН-3,4 部份控制线圈, 3'-4' 于电压比较臂中接入 ДН-1,2 部份控制线圈 1'-2', 使消磁线圈中产生磁势和