

哈爾濱工農大學

電力系統動態模擬

科學研究報告集

DIANLI XITONG DONGTAI MONI

1

1960. 3

电力系统动态模拟

(第一集)

編輯者：哈尔滨工业大学电力专业委员会

出版者：哈尔滨工业大学科学研究处

印刷者：哈尔滨工业大学印刷厂

第一次印刷 1—1500 册

定价 1.00 元

1960 年 3 月出版

目 录

前言.....	(1)
大型电机及变压器的物理模拟.....	(3)
原动机模拟研究报告.....	(21)
巨型同步电机不带电压变换机的励磁系统模拟试验报告.....	(31)
交磁电机放大机作为负电阻使用的研究.....	(35)
三极管差动电路相位计.....	(45)
阴极射线式相位指示仪.....	(53)
电子管时间继电器.....	(57)
电流互感器模拟.....	(59)
利用动态模拟法来研究电力系统自动控制问题.....	(65)

前 言

电力系统动态模拟是研究电力系统运行问题的有力的试验工具。由于1955年苏联考斯琴柯院士来华时所给予的支持以及我们自身的需要，我校于1956年即开始进行建立动态模拟实验室的研究工作。但由于仅只依靠少数人动手，因此进展很慢。五八年教育大革命以来，轰轰烈烈的群众运动在高等学校里开展起来，空气顿时转变，过去几年没有完成的东西，群众在几天几十天之内就完成了。我校的第一套动态模拟在当时也是全国第一套动态模拟，就是在这样的情况下于五八年“八一”诞生了。因此它是教育革命的产物，是党领导的革命群众运动的果实。

动态模拟实验室初步建立后，即开始为科研工作、为生产服务，在应用的过程中逐步提高质量。在五九年的一年中共进行过离子励磁系统的试验、强力式调节器的试验、新型整流式差动保护继电器的试验，阿城继电器厂生产的330千伏高压及距离继电保护的鉴定试验以及东北系统某部份的初步模拟等。我们把应用和模拟质量的改善结合起来，使我们的工作得到初步的开展。

为了开展动态模拟的工作，五九年上半年国家给我们聘请了苏联博士叶尔莫林教授，在他的热情指导下，我们完成了全部动态模拟实验室的扩建的设计以及许多提高质量的研究工作。叶尔莫林专家的指导大大地推动了我们的工作，对此我们深为感激。

虽然我们在这方面初步地开展了一些工作，但水平还较低，尤其是我们的机组还很少，尚不能模拟较复杂的电力系统，在这方面还需要虚心认真地向兄弟单位学习。收集在这本小册子里的只是我们所进行的几个个别的工作，限于水平难免有错误和缺点。仅提出与国内兄弟单位交流，以便达到向各单位学习的目的。尚希各方面多加指导。

大型电机及变压器的物理模拟

電力系統的動態模擬近年來——特別是在蘇聯——有很大的發展，實踐已經證明，它是研究電力系統和大型电机中不少複雜問題的有力工具之一。我國电机製造工業和電力工業，在黨的正確領導下，已經取得了很大的成就，並正在飛速地發展着，在工業的發展中，提出了大量需要研究解決的問題，特別是建立以長江三峽電站為中心的全國統一動力系統的任务，已經提到日程上來後，就更迫切地要求在我國建立起一批動態模型實驗室。

在我國關於動態模型方面的工作，最早是從1955年在我校開始進行的，第一套模型电机的設計在1956年初完成。由於某些原因，這台电机直到58年7月才製成，8月份就已經安裝調整好投入運行了。

本文敘述模型發電機、模型變壓器及發電機轉子回路電阻補償等問題。

一、模型發電機的設計

1. 對模型發電機的要求：設計模型發電機，就是要獲得一個小容量的發電機，其電磁及機械參數與大容量發電機一樣（用標幺值表示時）。具體說來就是要求各個回路的電阻和電抗，機組的機械慣性常數（ H ）和空載特性相同。正常系列小容量的同步电机不能滿足這些要求，因為其各回路的電阻大大超過大型电机中的值。

關於模型电机的容量，我們不希望它太大，因為太大了做實驗不方便，而且模型电机容量一大，相應地原動機模型、原動機的電源（當原動機是用直流機來模擬時）及負荷模擬等等都要增大，這樣整套設備就很笨重和昂貴，從這方面來看發電機的容量應以大約不大於30仟伏安為宜，而且似乎是愈小愈好。但從另一方面來看，過小了也有壞處，太小以後使測量、使用繼電接觸器及調節器等複雜化，這時為了不影響試驗的準確性，常常要求另加放大環節，因此模型發電機有足夠大的容量有它方便之處，例如3—5仟伏安以上。

另外，由於常常要求用一個模型电机來模擬許多不同的對象，要求模型电机的參數能在足夠大的範圍內變化，顯然在能保證足夠準確度和方便的條件下，參數能調節的範圍愈大愈好（在需要的範圍內）。

2. 確定模型發電機的主要尺寸和電磁負荷。

為了初步確定模型电机的主要尺寸和電磁負荷，可以從下面幾個主要的相似條件出發。

(1) 直軸電樞反應電抗 $X_{ad}^{(m)} = X_{ad}^{(or)}$

- (2) 机械惯性常数 $H_J^{(m)} = H_J^{(op)}$;
- (3) 激磁回路电阻 $r_t^{(m)} = k r_t^{(op)}$;
- (4) 空载特性 $E = f(i_t)$ 接近同步电机的标准空载特性;
- (5) 給定的模型发电机的容量。

其中:

上标 (m) 表示模型, (op) 表示模拟对象。

k 表示轉子电阻补偿倍数。

如果是专用的模型, 即有完全确定的模拟对象时, 則 $X_{ad}^{(op)}$ 、 $H_J^{(op)}$ 、 $r_t^{(op)}$ 很容易确定。如果要求設計一个比較通用的模型电机, 能模拟比較广泛的对象。那就要从分析大型电机的参数着手, 然后問題可以这样来解决: $H_J^{(op)}$ 选其中較小的值因为要增大 H_J 时可以加飞輪片, 很容易实现 (当然要获得負的轉动惯量也是可以的, 但要复杂得多, 不方便)。 $X_{ad}^{(op)}$ 可以选几个不同的数值, 設計几个不同的轉子, 将来可以換轉子, 以模拟不同的对象。 r_t 可以用負电阻机来补偿, 一般能在相当大的范围内变化, 但补偿倍数 (k) 不宜太大, 一般 $k=3\sim5$ 倍还較容易实现, k 过大时, 为了获得足够的准确性, 就必需采取特殊的綫路, 甚致难于实现, 因此在設計模型电机时, r_t 也力求尽量小一些。

主要尺寸、电磁負荷与参数之間存在着下面的关系式 (下面的式子可以直接用在三对極的凸極模型电机中, 如果不是三对極的凸極机时, 則式中的一些常系数要作适当的修正, 公式的証明見附录)。

$$B_{s1} \delta_{min} = 1.6 \tau^2 \quad (1)$$

$$X_{ad} = 0.4 \frac{A}{B_{s1}} \cdot \frac{\tau}{\delta_{min}} \quad (2)$$

$$H_J = 3300 \frac{\tau^2}{AB_{s1}} \quad (3)$$

$$r_t = \frac{1}{0.045} \cdot \frac{l_e/l_t \cdot A}{\tau^2 \cdot B_{s1}} \quad (4)$$

$$l_t = \frac{0.71\tau}{\frac{l_e}{l_t} - 1} \quad (5)$$

$$P = 39.4 \cdot 10^{-10} \tau^2 l_t AB_{s1} \quad (6)$$

从 (1) — (6) 式很容易得出:

$$A = 4\tau X_{ad} \quad (7)$$

$$B_{s1} = 325 \frac{\tau}{X_{ad} H_J} \quad (8)$$

$$\delta_{min} = 0.00194 \tau H_J X_{ad} \quad (9)$$

$$\frac{l_e}{l_t} = 9.3 \frac{r_t \tau^2}{X_{ad}^2 H_J} \quad (10)$$

$$l_1 = \frac{0.71 \tau}{\left(9.3 \frac{r_1 \tau^2}{X_{ad}^2 H_1} - 1\right)} \quad (11)$$

$$p = 9.2 \cdot 10^{-6} \frac{\tau^3}{\left(9.3 \frac{r_1 \tau^2}{X_{ad}^2 H_1} - 1\right) H_1} \quad (12)$$

用式 (7) — (12)，在给定 X_{ad} 、 H_1 和 r_1 的条件下，给出一系列的“ τ ”，可以设计出一系列容量不同的模型电机来，在这些电机中可以找到一个最小的容量 (P_{min})，再小于此容量，就不能满足给定参数的要求。如果让 r_1 、 X_{ad} 和大型电机一样， H_1 取大型电机中一般的值，则模型电机的容量将太大，例如由图 (1) 可以看出，当 $r_1 = 0.005$ ， $X_{ad} = 0.725$ ， $H_1 = 6$ 秒时， $P_{min} \approx 175$ 千伏安（对应于 $\tau_m = 38$ 厘米， $p = 3$ ）。这样的容量对实验室来讲显然是太大了，但如果让 r_1 的值大一些， P_{min} 的值很快下降。例如 $r_1 = 0.002$ 时，可得 P_{min} 约为 5 千伏安。

前面的公式及讨论可以用来帮助初步确定模型电机的主要尺寸。

3. 关于其他相似条件的满足及参数的改变。模型电机的定子电阻，可以用增大定子外径，增加定子用铜的办法来减小，在模型水轮发电机中，甚至可以达到比模拟对象还要小的程度。

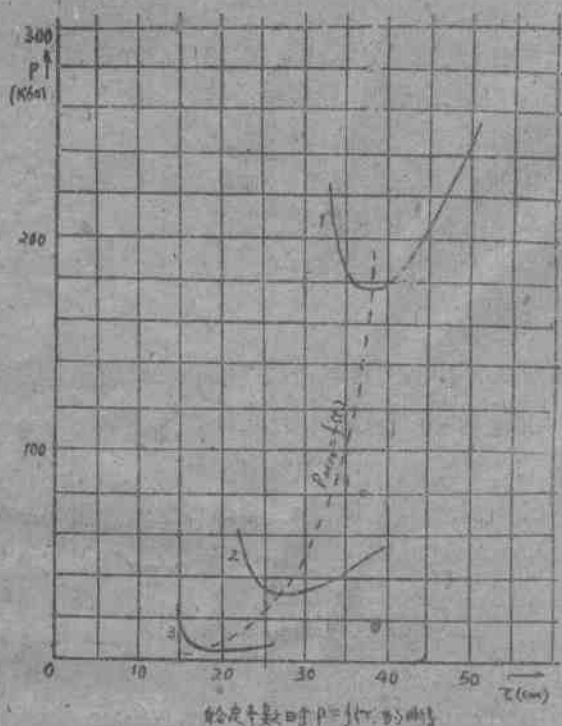


图 1

曲线:

1. $H_1 = 6$ 秒
- $X_{ad} = 0.725$

$$\gamma_T = 0.0005$$

$$2. H_T = 6 \text{ 秒}$$

$$X_{ad} = 0.0010$$

$$3. H_T = 6 \text{ 秒}$$

$$X_{ad} = 0.725$$

$$\gamma_T = 0.0020$$

由于模型电机的 A 很小 (A/B_{sl} 小), 如果采用一般电机的定子槽形, 则定子漏抗 (X_s) 将太小, 为此必须设法人为地增大定子漏磁导, 如把定子槽做成半闭口的 (这与减少转子表面损耗的要求是一致的), 且使槽顶缝隙很长, 即使这样, $X_s^{(m)}$ 比起 $X_s^{(0)}$ 还是常常偏小, 要求在定子回路内再附加可变的低电阻电抗器 (例如 $R/X < 0.05$), 这样还可以使定子漏抗能在一定的范围内改变。

由于模型电机的主气隙常很小, 采取一般的转子结构时, 设计出的电机, 激磁绕组漏抗 X_{f0} 将很小, 故设计时, 应设法增大磁路漏磁导, 例如减小相邻极尖间的距离, 这一点与要求获得足够大的 X_n 值 (或一定的 X_q/X_d 值) 的要求也是一致的, 同时转子回路内还可以加可变的低电阻电抗器 (例如 $R/X < 0.01$), 使 X_{f0} 达到所要求的值, 并使它能在一定的范围内变化, 但外加电抗不能太大 (定子回路也一样), 因为外电抗器必然加进了不少电阻, 故受到补偿倍数的限制。

阻尼笼的参数, 可以在选择阻尼条的截面积和槽形时考虑, 一般阻尼槽顶的缝隙也需要做得深而窄, 或者采用磁性槽楔, 以获得足够的漏抗值。阻尼笼可以做成能拆换的结构, 这样可以使其参数在更广泛的范围内改变。

另外, 模型电机的额定容量 P 也只是一个计算值, 在使用时可以略加变化, 以便其参数 (主要是 X_{ad} , X_{aq}) 的标么值更接近被模拟的对象, 但由于这时所有的参数都同时改变, 故互相受到牵制, 不能作幅度太大的变化, 例如受定子回路漏抗、机械惯性常数模拟条件的限制等。

二、转子回路电阻的补偿和负电阻机

前面已经讲过, 要求模型电机激磁回路的电阻, 不经补偿, 就达到象大容量电机那么小, 又要求模型电机的容量足够小, 而且满足其他模拟条件的要求, 常常是达不到的, 因此就要求在模型电机的激磁回路内加入负电阻元件, 使得激磁回路电阻的补偿成为大型电机物理模拟中的基本问题之一。我们对负电阻元件的基本要求是在稳态及过渡过程中, 它二端的电势和通过它的电流成正比 (在一定的电流变化范围内)。在容量较大的模型电机中 (如 5—30 千伏安), 负电阻元件都是采用电机, 可以用串激整流子电机 (串激直流电机), 交磁电机放大机或带有调节器的他激直流电机等, 以下我们就采用的二种分别加以讨论。

1. 作为负电阻机用的串激整流子电机。如图 (2) 的电路, 其方程式为,

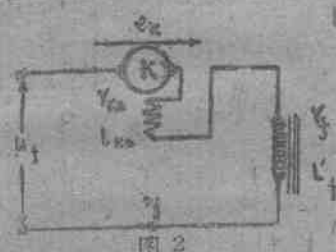


图 2

(K): 负电阻机;
 r_{ka} , L_{ka} 负电阻机电枢和串激绕组的
等效电阻和电感

$$u_t + e_k = i_t(\gamma_t + r_{ka}) + (L'_t + L_{ka}) \frac{di_t}{dt}$$

若

$$e_k = k' i_t$$

$$L_{ka} \gg L'_t$$

則上式為：

$$u_t \approx i_t[r_t - (k' - r_{ka})] + L'_t \frac{di_t}{dt}$$

與沒有 (k) 的情況時

$$u_t = i_t r_t + L'_t \frac{di_t}{dt}$$

比起來，當 $r_{ka} < k'$ 時，很明顯 (k) 在這裡相當於一個負電阻，負電阻的大小為 $(k' - r_{ka})$ 。補償倍數

$$k = \frac{r_t}{r_t - (k' - r_{ka})}$$

為了得到較高的補償倍數，且有較高的準確性，對負電阻機應採取上面的一系列措施：

(1) 磁路在要求的電流變化範圍內應不能飽和，為此應選擇比一般電機低得多的磁密。

(2) 為了使得在過渡過程中，其電勢的變化仍與電流成正比，不發生滯後作用，必需使磁路中的渦流作用減到很小，故其全部磁路都應由矽鋼片疊成。

(3) 磁滯環必需極小，這一點可以由採用特殊的振動繞圈來達到，振動繞圈的布置應這樣，它能在磁路的各部分產生脈動的磁場，但不在電樞回路內產生另外的電勢，與各繞組間的總互感都為零。

(4) 為了使 r_{ka} 為一個比較小的穩定的常數，可採取下列辦法：用低接觸電阻的電刷；用補償繞組和附加極，以減小交軸電樞反應和換向電流電樞反應的非線性影響；電流密度取得低一些，以減小由溫度變化而引起的電阻變化。

(5) L_{ka} 不應大，這一點一般容易滿足的，因為同步電機激磁回路的電感很大，另外串激繞組的匝數應可以改變，以便調節負電阻的大小。

我們做的一台負電阻機是利用 DMY-25 的沖片和全部另件，只改變了定轉子繞組做成的，其定子繞組布置如圖 3、圖 4 和圖 5 是他的空載特性和負載特性。對振動繞圈進行較詳細的試驗後看出：（負電阻機由異步電機帶動的）

(1) 在振動繞圈中通入 50 週/秒的交流電時，負電阻機的電勢中有一個脈動的分量，因此是不好的，通入 60 或 70 週/秒的交流電時，就很穩定，沒有這種現象。

(2) 齒振動繞圈的作用很小，故可以不用，這樣可使電阻機的結構簡化，並使有效材料利用好一些。

(3) 振動繞圈不僅能使磁滯回環變窄，且能使激磁特性的起始部分（低磁密部分）變直，這是很有利的。另外振動繞圈通交流時，對磁路的平均磁導也有些影響，在

磁路不飽和的情況下通入不大的交流振動電流時，平均磁導略有增加。此現象在這里是次要的。

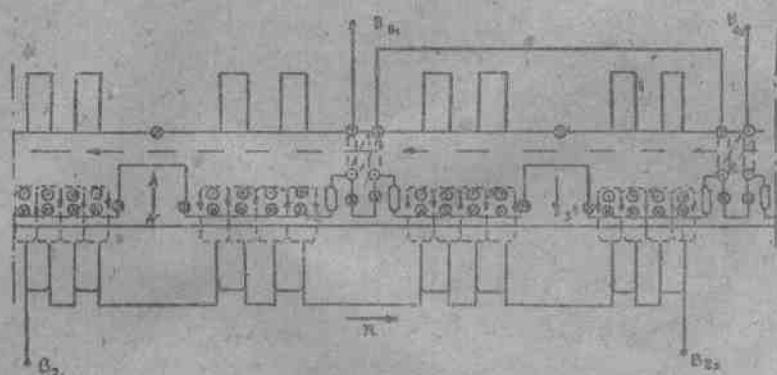


圖 3 負電阻機 K-250 定了繞組布置圖

Г. II. 主校繞組；

Д. 附加校繞組；

К. 補償繞組；

B_{21}, B_{22} 軛部振動繞組；

B_{21}, B_{22} 齒部振動繞組。

註：也可以把 B_{21}, B_{22} 放在圖中(а)(а)的部位。試驗結果表明，在本電機中取消 B_{21}, B_{22} 更合理。

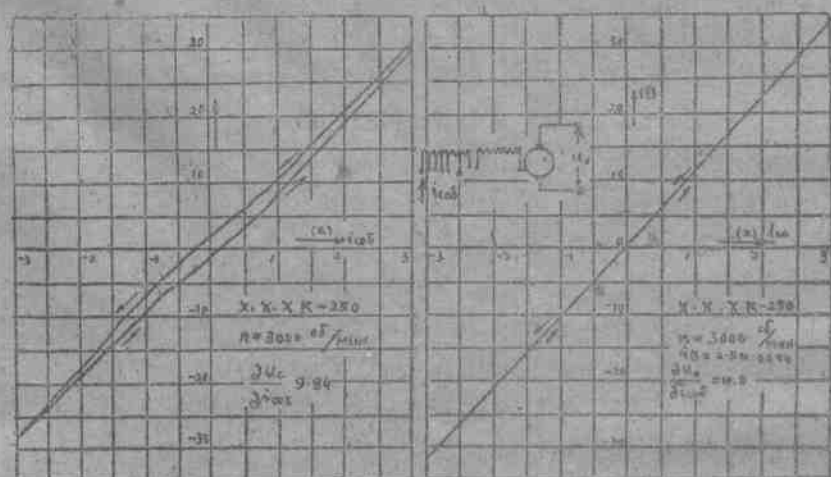


圖 4 負電阻機的空載特性

左圖：軛振動繞組電流 $i_B=0$ 齒振動繞組電流 $i_O=0$ 。

右圖：軛振動繞組電流 $i_B=2.5$ 安 60週/秒；齒振動繞組電流 $i_O=0$ 。

交磁电机放大机加上振动线圈后，作为负电阻元件使用的性能还可以进一步改善，振动线圈可以绕在放大机的转子上，一般有 30~50 安匝也就足够了，图 (6) 是加振动线圈通入电流后对放大空载特性影响的示例。

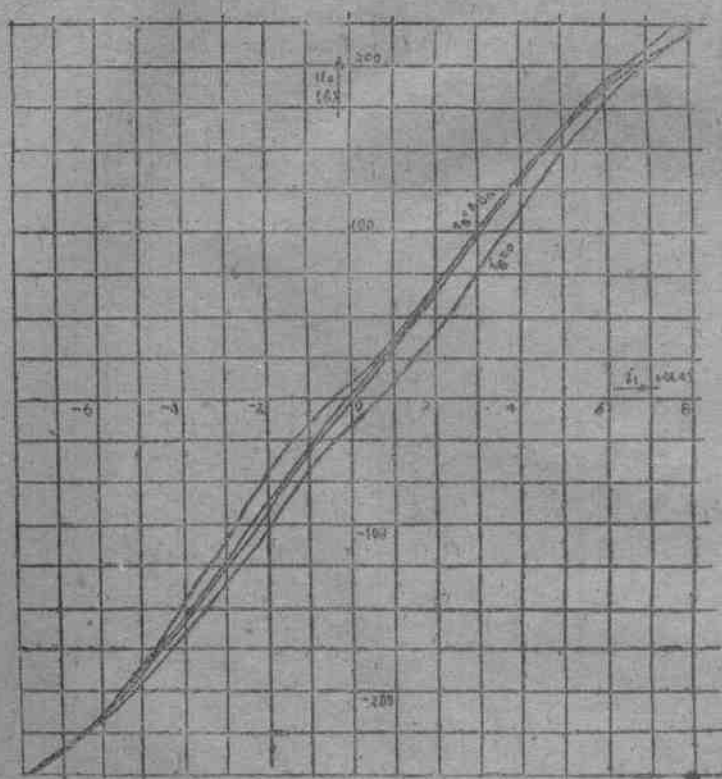


图 6 3MY-50 的空载特性

I_{ν} 为振动线圈电流，每匝振动线圈共 40 匝。

3. 关于电压变换机。在模型电机中，励磁电压常不是直接加在激磁绕组上的，而是通过一个所谓电压变换机再加到发电机的激磁回路中，如图 7。这样做的好处是方便灵活，使得一个模型发电机有可能采用各种不同电压的激磁，如用不同电压的激磁机或采用离子励磁等都可以，只要改变一下电压的励磁电阻 R_{in} 就可以了。

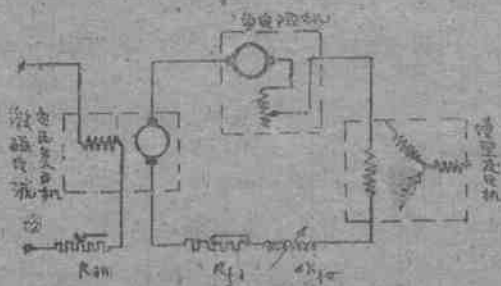


图 7 模型发电机的激磁回路

电压变换机实际上是一个变比可变的直流变压器，对他的要求主要是变压比的线性，同时它串联在发电机的激磁回路内，也要求它电枢回路的等值电阻不稳定的影响很小，为此对它也应采取在负电阻机中所采用的一系列措施，即取低的电磁负荷；叠片的磁路；振动线圈 补偿绕组；附加和低接触电阻电刷等。

另外，电压变换机和负电阻机也可以合併在一起，用放大机做负电阻机时，放大机同时也可以用作电压变换机，即模型发电机的激磁电源可以加在放大机的一个控制线圈上。

三、模型變壓器的設計

1. 对模拟变压器的要求。用来研究电力系统内稳态及过渡运行情况的模型变压器，要求满足下列相似判据：

$$(1) \text{ 短路損耗 } p_k\% = idem;$$

$$(2) \text{ 空載損耗 } p_0\% = idem;$$

$$(3) \text{ 短路电压 } u_k\% = idem;$$

$$(4) \text{ 激磁电流及其非线性特性}$$

$$I_m\% = idem, u_0\% f(I_m\%) = idem.$$

在研究不对称运行的問題时，还要求另序电抗 $X_0 = idem$ 。

仔細分析上述相似判据和变压器尺寸之間的关系后，可以得出下面的結論：即用小容量的，体积和重量为实验室条件所容許的小变压器去模拟电力系统中的巨型变压器，要求完全滿足上述相似判据，在采用相同材料和不提高模型频率的条件下，是达不到的。

用研究电力系统动稳定等問題的模型变压器，可以先不考虑 $u_0\% = f(I_m\%)$ 的条件，首先使它滿足 $p_k\% = idem$ 的条件，并使 $p_0\%$ 和 $I_m\%$ 尽量的小，即尽量与模拟对象接近，一般由于模拟变压器的磁路常是不饱和的，故激磁电流滿足相似条件的程度比空載損失要好一些。 $p_0\%$ 比大变压器的大 4—6 倍以內还認為是容許的[1]。 $u_k\%$ 的条件可以由改变繞組的排列，改变每鉄心柱上安匝不对称的程度來滿足，或者人工地加大漏磁导，例如加磁分路等。

2. 模型变压器最好几何尺寸比的討論。由上面的討論可以看出，設計模型变压器的任务，是在滿足 $p_k\% = idem$ 和限定总重量 ($\Sigma G = G_{cu} + G_{Fe}$) 的条件下，获得使 $p_0\%$ 、 $I_m\%$ 尽量小、 $u_k\%$ 能滿足要求的小容量变压器。

50 週/秒 单相二繞組的变压器，其鉄損与几何尺寸比之間的关系可以用下式來表示 (証明見附录 II)：

$$p_0\% = \frac{0.17 p_{30}}{p_{cu}\% \Sigma G^{2/3}} \cdot \varphi(k_a, k_d, k_j) \quad (13)$$

$$\varphi(k_a, k_d, k_j) = \frac{1 + \frac{k_a}{k_j} + \frac{2k_d}{k_j}}{k_a} \cdot \frac{2k_d + k_a}{k_a^2} \left[9.8k_a^2 (1 + k_1k_a + 2k_1k_d) + \right. \\ \left. + 5.6k_a(2k_d + k_1) \right]^{2/3} \quad (14)$$

其中

$p_{cu}\%$ 主銅損

p_{10} 磁密 $B=10,000$ 高斯时的

的比鉄損 (瓦/公斤)。

$$k_a = \frac{a}{l}$$

$$k_d = \frac{d}{l}$$

$$k_j = \frac{\text{軛的截面积}}{\text{鉄心柱的截面积}} = \frac{A_j}{A_c}$$

a, l, d, A_j, A_c 见图 8。

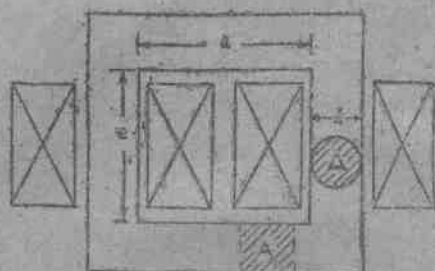


图 8

p_{10} 由所用的磁性材料决定, 在给定 ΣG 和 $p_{cu}\%$ 时, 显然:

$$p_{10}\% = \varphi(k_a, k_d, k_j)$$

由式(14), 在给定某一 k_j 值时, 变化 k_a, k_d 的值, 可以找到一个 φ 的最小值 (φ_m) 及对应于此 φ_m 的 k_{am} 和 k_{dm} 。图 (9) 给出 $\varphi_m, k_{am}, k_{dm} = f(k_j)$ 的曲线, 由曲线上看, k_j 略大于 1 时, φ_m 相当迅速地减小, 在 $k_j=2.5, k_a=0.5, k_d=0.4$ 时, φ_m 为最小。

但是由于在推导公式时, 没有考虑到軛内磁密分布的不均匀, 所以上面的式子和讨论只有在 k_j 不很大时才是正确的, 而且考虑到

$$p_k\% = p_{cu}\% + p_{kx}\%$$

其中 $p_k\%$ 是短路时的附加损耗。

当 k_j 增大时, 模型变压器的用铜量减少, 用铁量增加, 特别是軛部分用铁量大大增加, 这将使 $p_{kx}\%$ 增大, 因此模型变压器合理的几何尺寸比应该是:

$$k_j \approx 1.8$$

$$k_a \approx 0.35$$

$$k_d \approx 0.35$$

3. 计算公式。确定几何尺寸以后, 就可以用下面的公式来计算求出模型变压器的主要尺寸和电磁负荷。

$$\frac{l}{10} = \left[\frac{\Sigma G}{9.8k_d^2(1+k_j k_a + 2k_j k_d) + 5.6k_a(2k_d + k_a)} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (15)$$

$$d = k_d l \quad (16)$$

$$a = k_a l \quad (17)$$

$$A_j = k_j A_c \quad (18)$$

$$\frac{B}{10000} = \left[\frac{0.48P}{2.8p_{cu}\%} \cdot \frac{2k_d + k_a}{k_d k_a^2} \left(\frac{10}{1.8} \right)^5 \right]^{\frac{1}{3}} \quad (19)$$

$$\frac{\Delta}{100} = \frac{p_{cu}\%}{0.48} \cdot \frac{k_d^2}{2k_d + k_a} \left(\frac{B}{10000} \right) \left(\frac{l}{10} \right) \quad (20)$$

式中 l, a, d 的单位为厘米;

B ——高斯;
 Δ ——安/厘米²;
 P ——仟伏安;
 ΣG ——公斤。

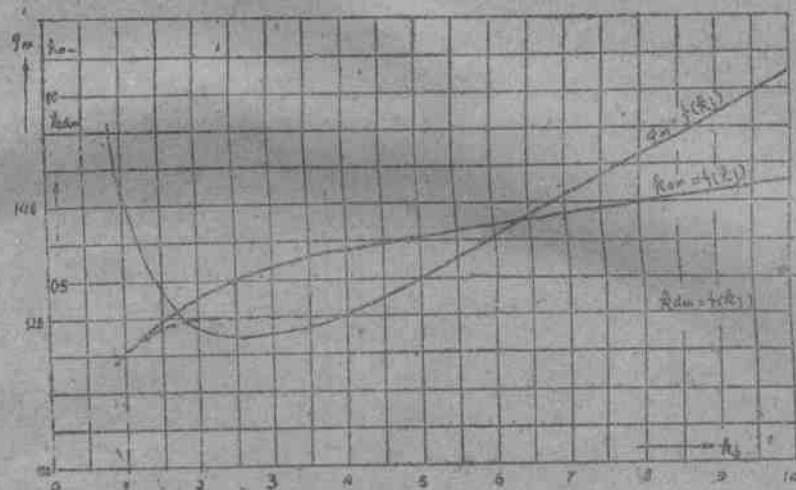


图 9

另外当模型线路电压不高时，模拟变压器可以做成自耦变压器的型式，在特殊情况，当模型线路的电压和发电机电压一样时，这种自耦变压器就变成一个“T”形的电路，如图(10)这时使变压器的模拟大大简化。但线路电压的选择还要考虑其他的问题，例如接触电阻的影响等。

最后关于模型变压器的结构另件应避免采用铁的，因为否则会使短路损耗大大增加，因此模型变压器的铁心夹件，拉紧螺桿等应用木或胶木板及黄铜等材料制造。

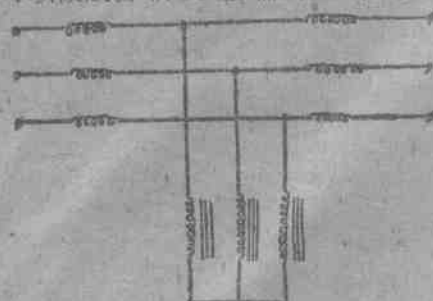


图 10

附 錄 1: 公式①—⑥的証明。

1) 根据饱和特性不变的条件，空气隙的磁位降大致应占每个磁極磁势（安匝）的某一固定部分，即

$$F_g = k_1 F_{\text{nod}} (k_1 < 1) \quad (I-1)$$

或

$$\frac{k_c \delta_{\min} B_s}{\mu_0} = k_1 S_{cu} f j_i$$

在我們设计的模型电机中，極靴形状取得使方形波磁势所产生的气隙磁密分布是接近正弦的，故

$$B_s = B_{s1}$$

式中 S_{cu} ——每極激磁繞組銅的截面积；

j_i ——激磁繞組的电密；

k_c ——卡氏系数。

显然

$$S_{cat} = \frac{\pi D^2}{4} \cdot k_2 \cdot \frac{1}{2p} = \frac{\pi^2 D^2}{2\pi} = \frac{k_2 p}{2\pi} \tau^2$$

故

$$B_{s1} \delta_{min} = \frac{\mu_0 k_1 j_1}{k_c} \cdot \frac{k_2 p}{2\pi} \tau^2 = l k_2 \tau^2 \quad (I-1')$$

由统计一些 $p=3$ 的模型水轮发电机得出 $k_2 \approx 1.6$ 。

(2) X_{ad} 的标么值等于定子通过额定电流的磁势，作用在直轴方向所产生的气隙基波磁密最大值，与额定转速时在定子绕组内产生额定电压时的气隙基波磁密最大值 (B_{s1}) 之比即：

$$X_{ad} = \frac{\mu_0 F_a \cdot k_d}{k_c \cdot \delta_{min}} \cdot \frac{1}{B_{s1}} \quad (I-2)$$

$$F_a = \frac{1}{2} \times \frac{3}{2} \sqrt{2} I_n S_n q k_{os} \frac{1}{\pi} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} k_{os} A \tau$$

$$\therefore X_{ad} = \frac{k_d \cdot 0.4 \sqrt{2} k_{os}}{k_c} \cdot \frac{A}{B_{s1}} \cdot \frac{\tau}{\delta_{min}} = k_4 \frac{A}{B_{s1}} \cdot \frac{\tau}{\delta_{min}} \quad (I-2')$$

F_a 为定子每极电枢反应磁势 (基波)

k_d 为当直轴加上正弦磁势时，气隙基波磁密最大值与实际磁密最大值之比。

在我们这种结构的模型水轮发电机中

$$k_d \approx 0.85$$

$$k_{os} = 0.92 \sim 0.925$$

$$k_c = 1.1 \sim 1.15$$

$$k_4 \approx 0.4$$

(3)

$$P = 3 \times UI \times 10^{-3}$$

$$U = 4.44 f \omega k_{os} \times \frac{2}{\pi} \times \tau l_1 B_{s1} \times 10^{-3}$$

$$l = \frac{p \tau A}{3 \omega}$$

$$P = 14.2 \times 10^{-10} \tau^2 l_1 p k_{os} \times A B_{s1} \quad (I-6)$$

$$P \approx 39.4 \times 10^{-10} \tau^2 l_1 A B_{s1} (k_{os} = 0.92, p = 3) \quad (I-3')$$

(4)

$$H_1 = 2.74 \frac{GD^2 n^2 \times 10^{-6}}{P} \quad (I-4)$$

$$G = \frac{\pi D^2}{4} l_1 k_r = \frac{p^2 k_r}{\pi} l_1 \tau^2$$

$$P = 14.4 \times 10^{-10} \tau^2 l_1 p k_{os} \times A \times B_{s1}$$

$$GD^2 = \frac{p \tau^2 l_1 k_r \tau}{\pi} \times \left(\frac{2 p \tau}{\pi} \times k_r \right)^2 = \frac{4}{\pi^3} \tau^4 p^4 k_1 l_1$$

$$n = \frac{60 j}{p}$$