

第一机械工业部
水力机组生产考察团

赴蘇考察專業报告

(五)

水輪发电机設計部分

1958年5月



水輪發電機設計專業報告

(一) 概 述

1. 考察任務及完成情況——我們的考察目的是學習蘇聯在設計大型水輪發電機方面的最新技術成就及先進經驗，以及在電氣及結構設計方面的發展方向，為我國在將來設計中水頭大型發電機（如三門峽、劉家峽機組）和高水頭大型發電機（如以禮河機組）作好準備。蘇聯在過去 30 年中低水頭水電站建設較多；最近幾年開始發展中水頭大容量的水電站，如布拉次克及克拉斯諾雅爾斯克水電站；但由於地理條件的限制，高水頭水電站建設很少。因此我們在中水頭發電機方面的考察項目基本上得到解決，而高水頭發電機方面只作了一般的了解。

2. 蘇聯生產水輪發電機的一般情況——蘇聯在目前有四個生產大型水輪發電機的工廠：列寧格勒的“電力”廠，斯維爾德洛夫斯克的烏拉爾電器廠，哈爾可夫電氣機車廠和新亞伯利亞汽輪發電機廠。其中以“電力”廠生產水輪發電機的歷史最久，烏拉爾電器廠較遲，其他兩廠投入生產還不久，雖然也自行設計，但主要還依賴“電力”廠提供設計和製造上的幫助。烏拉爾電器廠歷史雖較短，但已有許多新的創造，具有強烈的革新精神。這次由於事先未能聯繫妥當，沒有去烏拉爾電器廠考察，只從側面了解到一些情況。

蘇聯前電工部科學研究院（簡稱電工研究院）在列寧格勒“電力”廠內沒有分院，進行大型水輪及汽輪發電機的設計工作。實際上分別與“電力”廠設計科的水輪及汽輪發電機設計組聯合辦公，不過工作項目有所分工而已。

我們在電工研究院列寧格勒分院（“電力”廠）考察了 12 星期（1957 年 12 月至 1957 年 3 月），在電工研究院大電機研究所（在莫斯科）考察了二星期（主要是關於通風的研究）。

3. 當前的幾項主要水輪發電機設計任務

- (1) 伏特金發電機 100,000 瓩，62.5 轉/分，
施工圖設計已在 1958 年 2 月完成。
- (2) 布拉次克發電機 200,000 瓩，125 轉/分
正在進行施工圖設計，預定 1958 年底完成。
- (3) 三門峽發電機 150,000 瓩，93.6 轉/分，
即將開始技術設計。
- (4) 伊歐夫斯克發電機 40,000 瓩，136 轉/分
技術設計原已完成，後來改為縱橫軸勵磁的發電機，正在進行技術設計。
- (5) 伏克新發電機/電動機 14,300/17,300 瓩，57.7/68.2 轉/分，
已完成初步設計。
- (6) 薩拉托夫發電機 57,700 瓩，50 轉/分，

尚在初步設計階段。

- (7) 赫拉姆發電機 55,000 瓩, 428轉/分, 1957 年底完成技術設計。
- (8) 達利雅里發電機 64,000 瓩, 500轉/分, 1956 年完成初步設計, 現未繼續進行。
- (9) 超容量發電機 本任務系針對我國三峽水電站而進行, 研究製造極限量發電機的可能性, 現在研究的對象是 500,000 瓩, 125轉/分, 預定 1958 年底可得出初步意見。

以上設計工作均在“電力”廠進行。此外烏拉爾電器廠正在進行克拉斯諾雅爾斯克 300,000 瓩, 107轉/分發電機的技術設計, 其進行情況不詳, 但在“電力”廠看到了它的初步設計。

我們在“電力”廠期間, 詳細了解了布拉次克發電機的設計, 對其他發電機只作了一般的了解。因此, 本報告也以敘述布拉次克發電機的設計為主, 而對其他發電機只能就所見到的內容略予敘述。

(二) 布拉克發電機的設計過程

“電力”廠在 1953 年底接受了設計布拉次克發電機的任務。1954 年初開始草圖設計, 同年四月及七月分別提出了 15 萬及 20 萬瓩發電機的初步設計, 後來由於電力部門的要求, 又考慮了容量更大的機組。1955 年 7 月提出了正式的初步設計, 在此以前曾對機組的容量、轉速及電壓進行多方面的研究。初步設計中提出了 20、23 及 25 萬瓩的三個方案, 每一方案均考慮了不帶下導軸承的懸型結構和推力軸承放在水輪機頂點上的傘型結構, 同時考慮了外勵磁系統和電機勵磁系統。初步設計的結論認為最好的方案為 20 萬瓩, 125轉/分, 15,750 伏; 結構型式在技術設計中確定; 勵磁系統則決定於對勵磁頂壓的要求。

1955 年 10 月電工部審查了上述初步設計, 同意在這樣的基礎上進行技術設計。

“電力”廠在 1957 年 2 月完成 20 萬瓩發電機的技術設計。在技術設計期間, 各有關方面曾對發電機的轉速、電氣參數、勵磁系統、結構型式等問題繼續交換了意見, 並編制了該發電機的技術條件。關於选型問題, “電力”廠曾與列寧格勒金屬工廠及莫斯科水電設計院開會討論, 一致同意採用懸型結構。烏拉爾電器廠, 新西伯利亞汽輪發電機廠和哈爾可夫電機車廠都對“電力”廠所作的技術設計書面提出了自己的意見。烏拉爾廠和新西伯利亞廠主張用傘型, 而哈爾可夫廠同意用懸型。1957 年 4 月電工部審查並批准了該技術設計, 同意採用懸型結構, 但同時也指定由烏拉爾廠作出傘型發電機的建議書, 請水電設計院在電站的技術設計中考慮採用幾台傘型發電機的可能性。1957 年 11 月莫斯科水電設計院在分析了“電力”廠及烏拉爾廠的設計以後, 認為仍以採用懸型為宜。在這一點上, 並未與烏拉爾廠取得一致的意見。

目前施工設計大約已完成 50%, 在個別部件的設計上對技術設計中所提出的原則又有所修改, 使設計更為先進。計劃在 1959 年底完成施工設計。

就目前的決定, 布拉次克發電機將在新西伯利亞汽輪發電機廠製造, 最早在 1960

年制出第一台。

(三) 电磁方案的确定

为大型水电站的水輪發电机选择合适的电磁方案，是一个复雜的技术問題，也是一个复雜的經濟問題。我們在“电力”厂看到，他們在設計大容量水輪發电机的过程中，都經過了多次反复的方案比較。有时为了得到更大的技术經濟效益，在技术設計甚至施工設計阶段还有改變容量等基本数据的情况。

布拉次克發电机在“电力”工厂及“烏拉尔电器”工厂都做了技术設計，兩厂最后所选的方案都达到了很高的技术經濟指标。在“电力”厂，我們看到經過詳細計算的方案就有 25 个之多。在这 25 个方案中，比較了不同容量 (20; 23; 25 万瓩。实际上，在以前还做过 15 万瓩的方案) 轉速、(100; 107; 115.4; 125 轉/分) 电压 (15.75; 18; 20 仟伏) 不同的几何尺寸及槽数、普通矽鋼片和冷軋矽鋼片、不同功率因数等等，还做了一个水冷定子的方案。实际上，發电机的初步設計是与电站的初步設計同时進行的。在初步設計阶段，經過設計院、發电机制造厂 (“电力”厂) 和水輪机制造厂 (金属”工厂) 几方面反复的协商討論，根据制造的可能以及整个电站的技术經濟指标，大致上確定了电机的容量及轉速。而在技术設計阶段，則就一定的容量及轉速進行更深入的电磁方案比較。(这时容量也不是絕對不變的。我們看到，沃特金电站的电机初步設計是 9 万瓩，技术設計是 9 万 7 千瓩，而施工設計却是 10 万瓩)。

在詳細的电磁方案比較中，着重考慮以下几方面的問題：

1. 經濟方面，如电机常数；矽鋼片及銅的消耗，絕緣材料的消耗；电磁方案对結構材料消耗的影響；对厂房高度的影響；效率，损失的分配等等。
2. 运行的可靠性，如降低額定电压、減少槽数可減少絕緣打穿的可能；溫昇等

表 1

电站名称	設計制造年份	$\frac{P}{\text{万伏安}}$ $\frac{\text{万瓩}}{\text{万瓩}}$	$\frac{n}{n_y}$ $\frac{\text{轉/分}}{\text{轉/分}}$	定子內徑 D_i M	定子鉄心長 l_t M	定子鉄心重 G_{Fe} T	銅 重 G_{Cu} T
雷賓斯克	1937—41	$\frac{6.87}{5.5}$	$\frac{62.5}{165}$	11.8	1.7	67.8	59.6
高 尔 基	1952	$\frac{7.15}{5.72}$	$\frac{62.5}{134}$	12.9	1.5	68	50.4
沃 特 金	1957—	$\frac{11.76}{10}$	$\frac{62.5}{145}$	14.3	1.7	105.6	53
电站名称	总 重 G_o T	$g_{Fe} = \frac{G_{Fe}}{P}$ kg/kBa	g_{Cu} kg/kBa	$g_o = \frac{G_o}{P}$ kg/kBa	电 机 常 数 $C = \frac{D^2 l n}{P} \times 10^4$		
雷賓斯克	1150	0.987	0.807	16.6	21.7		
高 尔 基	1080	0.95	0.695	15.0	21.9		
沃 特 金	1150	0.898	0.55	9.78	18.9		

等。

3. 工藝性及運輸的可能，运行的方便。

4. 参数，如短路比等。

縮小电机的尺寸，提高电机的經濟指标。我們感到苏联同志在这方面做了許多工作，正在進行設計的电机比过去制造的电机有着高得多的技術經濟指标。从上面的(表1)中所列三个轉速相同电机的比較可以看出，1957年設計的沃特金电站电机，比1952年生產的高尔基电站的發电机僅由于电磁方案的改進使單位容量的电机有效体積降低了15.5%，加上結構的改進，單位容量的电机重量減輕了三分之一以上。我們感到这一方面標誌着苏联电机制造方面的高度成熟，同时为了制造更大容量的巨型發电机，客观上也要求尽可能縮小电机的尺寸。

为了進一步分析提高电机經濟指标的因素，再挑几个“电力”厂現在正在設計的，和过去生產的大型水輪發电机，就其几个数据列一个比較表。(表2)

表 2

电 站 名 称		型 号	容量 P 万千瓦安	$C = \frac{D^2 l n}{P} \times 10^4$	AS a/cm	τ	v_y 飛逸轉 速时周速
过 去 生 產 的	第聶伯(新)	CB $\frac{1160}{180}$ 72	9	20.2	530	48	96
	丰 滿	CB $\frac{850}{190}$ 48	8.55	17.0	577	51.2	96.5
	高 尔 基	CB $\frac{1340}{150}$ 96	7.15	21.9	504	42.3	90.8
	古 比 雪 夫	CB $\frac{1500}{200}$ 88	12.35	22.1	436	51	104.5
在 正 設 計 的	三門峽(初)	CB $\frac{1240}{230}$ 64	17.7			57.4	107
	布 拉 次 克	CB $\frac{1130}{250}$ 48	23.5	14.7	707*	68.7	124
	沃 特 金	CB $\frac{1500}{170}$ 96	11.77	18.5	553	46.8	108.5
	三 峽(草)	CB $\frac{1430}{360}$ 48	58.8	13.5	733**	87	139.0

* 布拉次克用 $\Theta 330$ 冷軋矽鋼片，在用 $\Theta 43$ 矽鋼片的方案中 AS=667。

**也是用冷軋矽鋼片。

从电磁設計方面看，值得提出的有下列几点：

1. 采用冷軋矽鋼片。

布拉次克的設計中采用了 $\Theta 330$ 冷軋矽鋼片(表3)，由于它在順磁压方向(电机定子齒部)的導磁率比普通矽鋼片高，比損較低，可以將齒部磁密提高到17500高斯左右，提高了有效体積的利用。由于齒部磁密增加，有可能采用更高的綫負荷(AS)(稍微改變一下槽寬与齒寬的比例。)布拉次克采用 $\Theta 330$ 冷軋矽鋼片以后，电机的有效体

積降低了5%，效率提高了0.1%。电机工業的發展，要求冶金工業部門供应質量更高的冷轧矽鋼片。“电力”工厂已不止一次地向冶金部門提出供应比損更小，（例如小于0.9瓦/公斤）導磁率沒有方向性的冷轧矽鋼片的要求。据說西德已制出比損为0.7瓦公斤的冷轧矽鋼片來。如能有更好的冷轧矽鋼片，电机的尺寸將可能更为縮小。

苏联在制造巨型發电机中（巨型汽輪發电机及水輪發电机）已广泛采用了冷轧矽鋼片。但目前 3330 的供应数量还不能充分滿足需要，因而象沃特金这样大的机組，暂时还采用普通的热軋矽鋼片。

2. 提高轉子的圓周速度

由“表 2”可以看出，正在設計的电机采用了比过去高出 10—30% 以上的圓周速

3330 与热軋矽鋼片的比較

表 3

部 密 (高斯)			7000	10000	13000	15000	17000	18000	
磁化强度 H rc/cm	軋部	34AA	1.21	2.48	4.88	12.0	33		
		3330	0.81	1.37	4.37	13.9	31.5	42.8	
	齒部	34AA	1.92	4.14	10.8	38.5	130	23.6	
		3330	0.65	1.10	1.95	3.3	10	19	
磁 密 (高斯)			19000	20000	23000	磁 密 α		10000	
磁化强度 H rc/cm	軋部	34AA				比損 BT/KT	軋部	343	1.25
		3330	54.8	70.5	510		齒部	3330	1.40
	齒部	34AA	340	700			齒部	343	1.25
		3330	35.5	110	2100		齒部	3330	1.02

度。（額定轉速时的週速及飛逸轉速时的週速都是如此。）适当地提高圓周速度在經濟上及制造上帶來了顯著的好处。首先， τ 提高后有时可以節約有效材料（銅綫及矽鋼片），由于週速增加，通風改善，有可能采用更高的綫負荷（AS）。其次，当直徑增加时，可以大大縮短鉄心長度（如 D^2l 不變， $l_1 = \frac{1}{D_1^2}$ ）。这样不但可以相应降低电站厂房的高度，更重要的是減少巨型水輪發电机制造上及运输上的困难。

飛逸轉速时的周圓速度提高了，也相应地提高了轉动部份的机械应力。“电力”厂及烏拉尔厂已广泛采用 35 号、40 号鋼代替 3 号鋼做轉子磁軋冲片。布拉次克設計中采用 35 号鋼，应力用到 2300 公斤/平方公分，其屈服点为 3100 公斤/厘米²，安全系数为 1.35。（“电力”厂水輪發电机組的工程师們認為：安全系数还可用到 1.30）还采取了錯半个極距疊片等办法來減少磁軋中的机械应力。

3. 提高綫負荷 (AS)

过去“电力”厂設計的大型水輪發电机的綫負荷大約为 450—550 安/厘米，現在設計的

新电机則多半采用 550—650a/cm，（參看“表 2”）而采用冷軋矽鋼片后，則可能用到 700a/cm 以上。相应地，可以大大降低电机的尺寸。如進一步改善电机的通風，綫負荷还有可能進一步提高。

4. 合理地选择电机的参数

合理地选择电机的参数，是減少电机的尺寸及重量，从而節約大量資金的重要因素。象布拉次克这样大的机組，从运行的角度看，希望它的各种参数具有更高的水平。但是經過詳細的技術經濟比較以后，考慮了实际制造的可能性，最后大都降低了原來的要求，使其参数保持在普通大型水輪發電机的水平上。下面列表說明几个主要参数的變動及其原因：

主 要 参 数 變 化 情 况 表 4

	設計院曾提出	实际采用	理 由
1	$X_d'=0.2$ $T_{Mex}=11$ 秒 (与古比雪夫同一水平)	$X_d'=0.345$ $T_{Mex}=10.7$ 秒 ($GD^2=50000\text{ TM}^2$)	a. 每台可節省約 200 万盧布。 (每台估价为 900 万盧布。)。 b. “电力”厂同意允許用負荷后速度上升由 30% 提高到 35%
2	$T_{d0}'=6$ 秒	$T_{d0}'=7-8$ 秒	要多耗費很多材料才可能提高到 6 秒
3	額定电压 $U_H=20000$ 伏	$U_H=15750$ 伏	a. 20 仟伏比 15.75 仟伏的电机要貴 8-10%。 b. 最后取得“电器制造厂”的同意。
4	效率 $\eta=98.5\%$	$\eta=98.2\%$	实际上，即使增加有效材料也达不到

在布拉次克發電机技術設計的过程中，考慮过定子采用導綫直接水冷的方案。采用定子水冷后，鉄心長度縮短了 36%，由 2.5 米縮短到 1.6 米。 $\left(CB \frac{1130}{160}-48\right)$ 但是由于参数太坏， $X_d=2.44$ ， $X_d'=0.92$ ，沒有被采用。

下面是布拉次克發電机技術設計采用的方案的主要数据。（表 5）我們离开以前聽說，發電机的容量还可能增加 10%，但主要尺寸是不致于大變動了。

表 5

1. 型号	$CB \frac{1130}{250}-48$	
2. 額定容量	23.5	万千伏安
	20	万千瓦
3. 功率因数	$\cos \varphi=0.85$	
4. 額定电压	15750	伏

續表 5

5. 額定轉速	125	轉/分
飛逸轉速	225	轉/分
6. 空載勵磁電流 (i_{B0})	855	安
滿載勵磁電流 (i_{BH})	1465	安
額定勵磁電壓	435	伏
7. 轉動慣量 (GD^2)	50000	噸-米 ²
8. 總重量	1450	噸
9. 定子鐵心外徑	$D_a=11300$	MM
10. 定子鐵心內徑	$D_i=10500$	MM
11. 定子鐵心長度	$l_t=2500$	MM
12. 極距	$\tau=68.7$	CM
13. 氣隙	$\delta=28$	MM
14. 定子槽數	$Z=540$	
15. 并聯路數	$a=4$	
16. 定子銅線電密	$j_a=2.45$	a/MM ²
17. 線負荷	$AS=707$	a/CM
18. 氣隙磁密	$B\delta=7100$	gc
19. 勵磁線圈電密	$j_p=2.29$	a/MM ²
20. 定子線圈溫升	$\theta_{Cu1}=67.3$	°C
21. 轉子線圈溫升	$\theta_p=72.5$	°C
22. 計算效率	$\eta=98.325$	%
23. 同期電抗	$X_d=0.915$	
24. 同期過渡電抗	$X_d'=0.345$	
25. 每仟伏安耗銅	$g_{Cu}=0.327$	KG/KVA
26. 每仟伏安耗矽鋼片	$g_{Fe}=0.68$	KG/KVA
27. 電機常數	$C=14.7 \times 10^4$	

(四) 選型問題 (懸型和傘型的比較)

“電力”廠過去生產的水輪發電機，懸型及傘型都有。(表 6) 懸型電機，推力軸承放在上機架上，有兩個導軸承：上導軸承在上機架中心部份里面，下導軸承固定在特制的下機架上。傘型電機，有的把推力軸承放在荷重的下機架上，(如高爾基、謝爾巴可夫便是) 有的則直接將推力軸承支座放在水輪機頂蓋上，省去下機架。(納爾瓦及古比雪夫發電機便是這種類型。) 不管怎樣，傘型電機都有一個上導軸承。高爾基發電機在設計時曾經打算不用上導軸承，但是大家認為這樣不可靠，製造時又將上導軸承加上了。我們只見到謝爾巴可夫沒有上導軸承，算是一個例外。這台電機採用了向下彎的轉子支架，以降低轉子的重心，結構複雜。

“电力”厂生产的五万千瓦伏安以上的发电机

表 6

电 站	型 号	額 定 容 量 (万千瓦安)	推力軸承負荷 T	型 式
丰 滿	CB $\frac{850}{190}$ 48	8.55	850	懸
大第聶伯	CB $\frac{1100}{152.5}$ 68	7.75	960	懸
新第聶伯	CB $\frac{1160}{180}$ 72	9.0	1030	懸
納尔瓦(齐姆梁河)	CB $\frac{1030}{120}$ 68	5.2	1200	傘
上西伯利亞	CB $\frac{1100}{145}$ 88	5.0	1500	傘
謝尔巴可夫	CB $\frac{1250}{170}$ 96	6.875	2100	傘
高尔基	CB $\frac{1340}{150}$ 96	7.15	2000	傘
古比雪夫	CB $\frac{1500}{200}$ 88	12.35	3400	傘

通常，对于低水头，低轉速的巨型电机來說：（如古比雪夫及正在進行設計的沃特金电机）傘型具有顯著的优点：①如用懸型由于直徑大，推力軸承負荷大，荷重的上机架必須做得很重、很大。不但不經濟，制造及運輸上都有困难。而用傘型，上机架不承受重量，重量及尺寸都可大为減少。②傘型結構可以降低电机高度，从而降低厂房高度。特別是推力軸承座放在水輪机頂盖上的結構更为明顯。而对中水头的大型水輪發電机來說，則往往需要進行兩種方案的詳細比較，最后才能確定采用那种型式更合适。

从表 6，可以看出來，“电力”厂过去生产的大型水輪發電机中，凡是定子鉄心外径超过十米，同时推力軸承負荷超过 1200 吨的，都采用了傘型結構。再看最近正在進行設計の三台巨型發電机，它們初步的方案如（表 7）所示。

表 7

电 站	型 号	額 定 容 量 (万千瓦安)	推力軸承負荷 T	型 式
布 拉 次 克	CB $\frac{1130}{250}$ 48	23.5	1450	懸
三 門 峽(初)	CB $\frac{1240}{230}$ 64	17.7		懸
沃 特 金	CB $\frac{1500}{170}$ 96	11.765	3000	傘

懸型的适用范围擴大了。（各个不同的工厂由于其具体条件及对結構，处理不同，

懸型、傘型的適用範圍是各不相同的。列舉上述數字，只不過是為了便於說明問題。）影響這個比較的，是下述兩個重要措施：

1. 取消下導軸承，相應地取消懸型電機的下機架。根據多年製造及運行的經驗，不久以前得出這樣一個看法：只要發電機轉子結構具有足夠的剛度，即當沒有發電機下導軸承時，轉子的臨界轉速超過飛逸轉速 20—30% 以上，不管懸型與傘型，一律可以取消發電機的下導軸承。這給懸型電機帶來很大的好處：縮短軸的長度，（布拉次克發電機由於取消下機架，軸縮短了約二米。）相應地減少廠房的高度；發電機重量可以減輕約 5—10%。“電力”工廠正在設計的布拉次克，三門峽、以沃夫等懸型發電機，都採用了無下機架的結構。這個措施是得到設計院和“金屬”工廠一致同意的。

2. 增加懸型電機上機架（荷重支架）的允許撓度，從而減輕上機架的重量。過去設計懸型電機上機架時，限制其總撓度不得超過 3mm。現在他們認為由於機組轉子本身重量引起的靜負荷不影響工作的可靠性，由它引起的撓度，只要在安裝時予以補償就行了。因而，設計時只需要限制由動負荷（水推力）所引起的撓度，這樣就可以大大減輕上機架的重量。如果將動負荷所引起的撓度限制為 3 mm，則布拉次克發電機上機架總的撓度可達 8 mm，上機架的重量可減少到原來的 $\frac{1}{3}$ 。（原來上機架重量約為200噸。）實際上，布拉次克的設計將總撓度選為 5mm 左右，此時上機架的自然頻率在 500周/秒左右，超過發電機飛逸轉速一倍以上。

布拉次克的選型問題

在初步設計里，“電力”廠就三個不同容量方案做了傘型及懸型的比較，（表8）。傘型的將推力軸承座直接放在水輪機順蓋上，發電機只有一個導軸承，放在上機架內。懸型則取消了下機架。比較結果，認為 25 萬及23萬瓩的最好用傘型，20萬瓩則做傘型或懸型都可以。

表 8

型 號	CB- $\frac{1280}{290}$ -52	CB- $\frac{1280}{260}$ -52	CB- $\frac{1200}{230}$ -48	
容 量 MBT/MBa	$\frac{250}{295}$	$\frac{230}{270}$	$\frac{200}{235}$	
推 力 負 荷 T	2300	2150	1650	
每 千 伏 安 重 g _o кг/KBa	$\frac{6.4}{6.9}$	$\frac{6.6}{7.0}$	$\frac{6.1}{6.3}$	*
初 步 估 價 百萬盧布	$\frac{12}{12.5}$	$\frac{11}{11.5}$	$\frac{9}{9.4}$	*

* 分子代表傘型結構的數字，分母為懸型結構的數存。

“電力”廠和“烏拉爾電器”廠兩廠都做了技術設計。在技術設計里，“電力”廠

采用了懸型方案（圖 1），而烏拉爾廠則主張用傘型。烏拉爾廠的設計（BГC¹¹³⁰₂₅₀-48）总重量比電力廠的設計輕 250 吨（只有 1200 吨）高度少 3.6m。关于选型問題，兩方面爭論很多。莫斯科水电設計院及列寧格勒“金屬”工厂贊成用懸型，新西伯利亞汽輪發電機厂（HTГЗ）却積極支持傘型，并附了自己的总裝圖。莫斯科水电設計院在兩

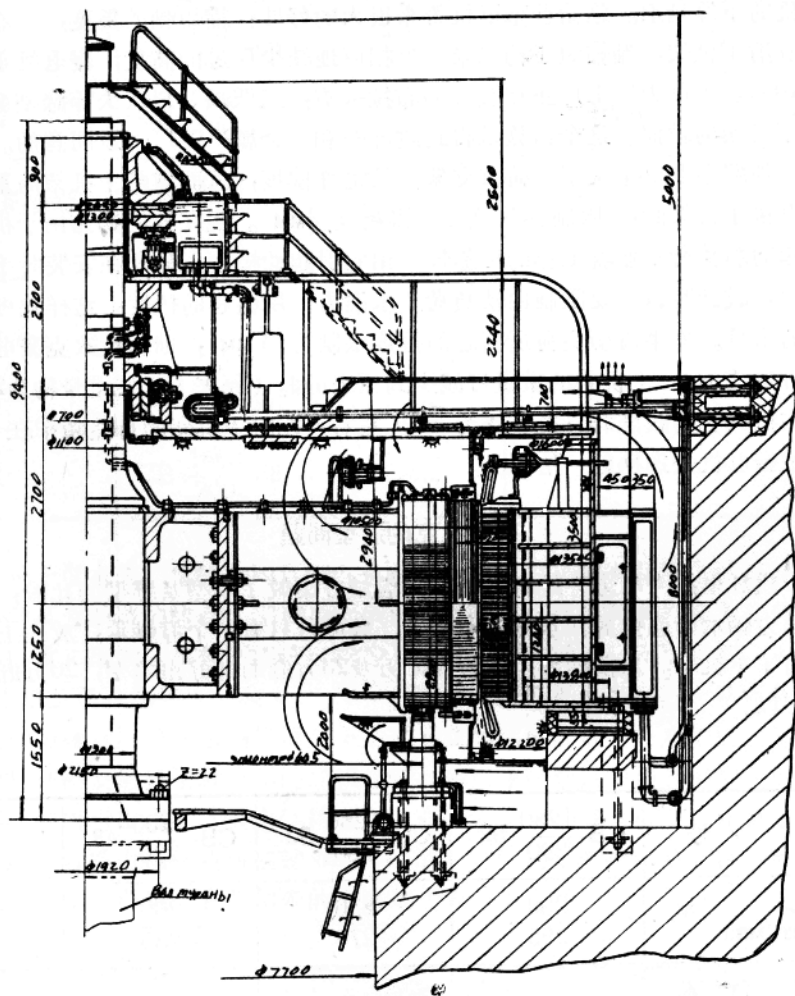


圖 1

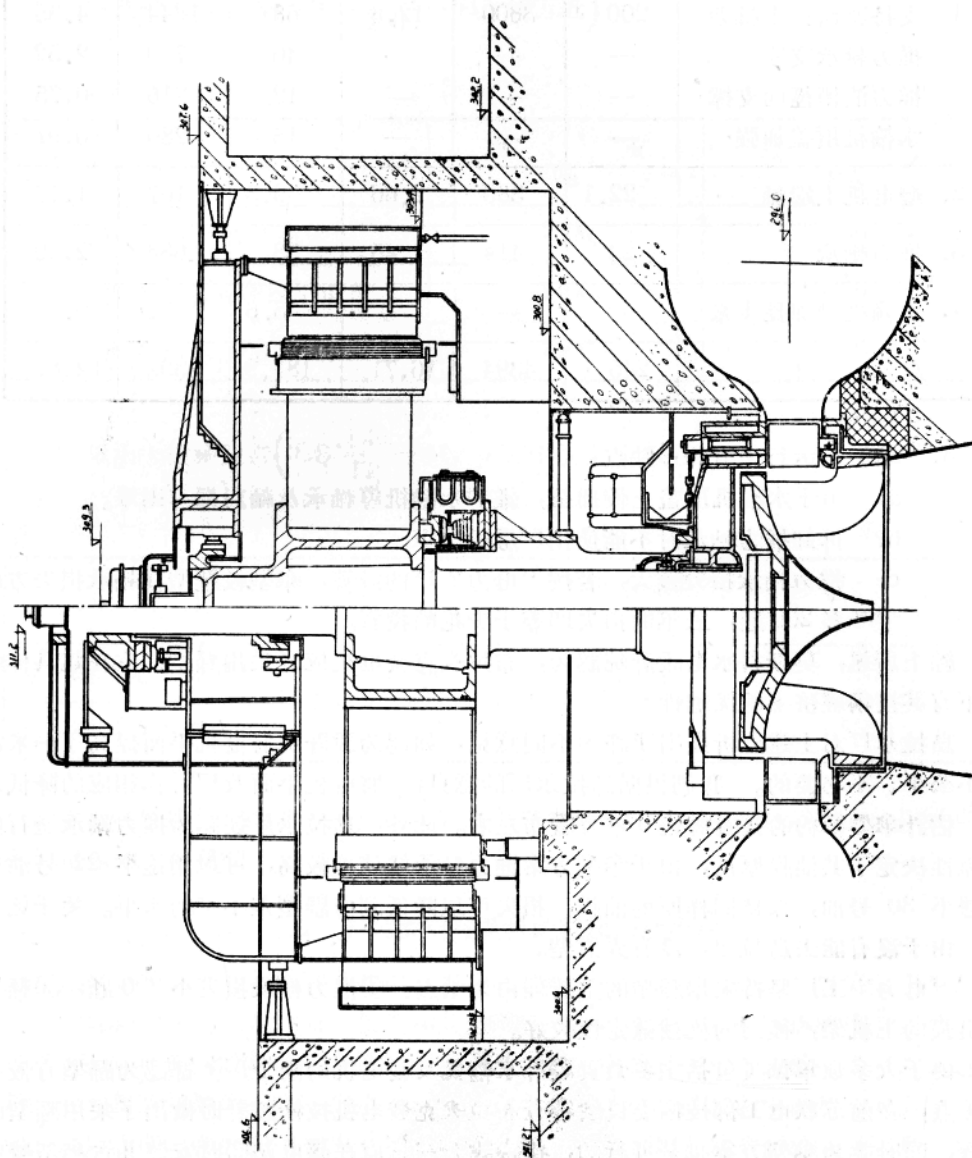
廠設計的基礎上對兩種型式進行了技術經濟比較，比較中只考慮由于推力軸承的位置不同引起的差異，除去由于兩廠不同的結構特點產生的影響。（參看“圖 2”）下面是設計院的比較結果：

1. 重量比較（只考慮那些重量與推力軸承位置有關的部件。）

采用傘型，可節約金屬約 1000 吨，值百萬盧布。

2. 采用傘型电机，厂房平面要提高一米，增加了厂房的混凝土量，（約九千五百方）約值 3 百萬盧布。

1, 2 兩項合計, 共計可節省兩百萬盧布, 約等于機組價格的 0.4%。



2

表 9

	懸 型			傘 型		
	單 件 噸	總 重 噸	總 價 百萬盧布	單 件 噸	總 重 噸	總 價 百萬盧布
1. 支持結構：上机架	200	3600	12.6	68	1244	4.35
推力軸承支座	—	—	—	40	720	2.52
推力油槽徑向支撐	—	—	—	12	216	0.75
水輪機頂蓋加強	—	—	—	15	280	0.97
2. 發電機上端軸	22.1	380	2.66	9.3	167	1.17
3. 推力軸承	23	414	1.45	38	684	2.40
4. 水輪機軸加長 1 米	—	—	—	5.6	101	0.71
總 計	245.1	4394	16.71	187.9	3392	12.87

3. 傘型在運行上有許多缺點：

- 由於水輪機頂蓋上較拥挤，維護水輪機導軸承及軸封都有困難。
- 拆卸推力軸承時不能使用廠房的吊車。
- 推力軸承損失較大，若按“電力”廠的計算，傘型較懸型在軸承損失方面多 200 瓩，三年的損失即等於少花的投資。

綜上所述，莫斯科水電設計院認為，布拉次克發電機應當採用懸型，它在這具體條件下有其技術經濟上的優越性。

烏拉爾廠對上述分析提出了許多不同意見，如認為設計院將電機平面提高了一米，是不公平、不必要的。我們根據烏拉爾廠的意見，將電機平面及廠房作相應的降低以後，估計傘型節約的投資將達 6 百萬盧布左右。此外，烏拉爾廠還認為推力軸承運行的可靠性決定於其油膜厚度，由於傘型方案推力軸承綫速度較高，可以用透平 22 號油來代透平 30 號油，保持同樣厚的油膜，損失可以降低到與懸型差不多的水平。關於這一點，由於沒有能去烏拉爾，沒有弄清楚。

“電力”工廠堅持採用懸型的主要理由為兩點：①推力軸承損失小 200 瓩；②懸型有很強的上机架，徑向的機械穩定性較好。

由於大多數單位（包括主要負責設計水輪機及發電機的兩個廠）都認為懸型有較多的優點，在前蘇聯電工部技術委員會審查布拉次克發電機技術設計時做出了採用懸型的決議，同時認為傘型方案也是可行的，建議設計院考慮在該電站同時安裝幾台傘型發電機，以積累經驗。

總之，我們感到，象這樣的大容量中水頭發電機，选型問題必須從經濟、可靠、維護方便等方面具體地、仔細地進行技術經濟比較，然後才能確定一個比較好的方案。一般說來，只有當傘型結構帶來比較顯著的經濟效果時，才宜於採用。

由于懸型电机在取消下机架后高度降低，帶下机架的傘型布置往往反而比懸型來得高，來得重，因而在懸型面前失去了其經濟上的优点。可以認為，帶下机架的傘型結構，很难与取消了下机架的懸型結構相競爭。今后选型时，只有推力軸承支座放在水輪机頂盖上的傘型結構，才有可能与取消了下机架的懸型結構相比較。下面再举两个例子說明这个观点，并且作为这一段的結束。

1. 三門峽初步設計 $\left(CB \frac{1240}{230} - 64, 15 \text{ 万瓩} \right)$

表 10

		总 重 吨	总 高 MM
懸 型 (无下机架)		1500	12100
傘 型	推力軸承放在透平頂盖上	1400	10950
	推力軸承放在下机架上	1560	12500

2. 以沃夫技術設計 $\left(CB \frac{840}{115} - 44, 5 \text{ 万千伏安 } 4 \text{ 万瓩} \right)$

表 11

	总 重 吨	推力軸承損失 KBT	总 高 MM
懸 型 (无下机架)	440	170	8150
傘 型 (放在下机架上)	460	225	8550

由于水輪机頂盖上的地方不够，不容許將推力軸承座放在水輪机頂盖上。以致傘型的各項指标都不如懸型。

(五) 布拉次克發電机的結構設計特點

布拉次克發電机的結構設計在由初步設計到施工設計的过程中，曾有过不少的改變——主要在轉子的結構方面。虽然和其他設計一样，也是在保証結構强度和運轉可靠的基礎上，設法提高設計的工藝性和減輕重量；但突出的是在这个設計中更多地通过采用新技術和新的結構型式來达到这一目的。以下將就几項結構設計中的特点及其演變过程逐一加以說明。在說明“電力”厂結構設計的同时，也將其他方面的意見就所了解到的一并列入，以資比較。

(1) 轉子部分

1. 軸 在初步設計中，“電力”厂采用了薄壁的銲接軸，軸上帶有固定轉子支臂的法蘭，与水輪机共同一根軸。这样的結構可以省去一个重量可能达100吨的套筒鑄件。

其主要缺点是軸太長（約 13.5 公尺），加工不便，且轉子支臂與圓盤接合處的螺栓要受很大的剪力（这是由于在磁軛與轉子支架之間採用了較大緊量的緣故）。

此外，在初步設計過程中曾考慮過另外兩個方案。其一是套筒在軸上，軸的上端近套筒處接一根短軸，水輪機與發電機合用一軸。其二也是機組合用一軸，軸的法蘭與轉子套筒的下環相聯，套筒以上另有一短軸，其法蘭與套筒的上環相聯（即所謂“無軸”結構）。在第二種結構中，套筒既要傳遞扭矩，又要承受拉力，應力比較複雜，不易計算，所以未採用。

在技術設計中採用了由鍛造圓筒及鑄造法蘭銲接而成的軸，銲縫在較小的直徑處，發電機與水輪機的軸是分開的。後來巴頓銲接研究院建議將銲縫移到較大的直徑處，這樣可減小銲縫所受的應力，同時可使中段軸壁的厚度減薄。在此以後，為了避免銲縫承受複雜的應力，將銲縫移到轉子套筒的中部，這樣可使銲縫只傳遞一半的力矩，同時使軸的兩段鍛件重量相等。這樣的軸淨重 65 噸，每個鍛件的重量約為 40 噸。由於銲接鑄造法蘭的技術還未掌握，在以上方案中法蘭還是與軸一併鍛出的。

最近又有人提出用新建議，與初步設計曾考慮過的“無軸”結構相似，但有所改進。其利弊當未詳細分析。

烏拉爾電器廠在其傘型結構中，採用鑄造的轉子套筒以代替發電機的軸（見圖 2）。

“電力”廠曾擬定了銲接軸的技術條件，規定軸及銲縫應達到下列機械性能：屈服點 = 25 公斤/公厘²，抗張強度 = 48 公斤/公厘²，延伸率 = 16%，斷面收縮率 = 30%，沖擊強度 = 5 公斤—公尺/公厘²。對鍛件應進行化學成分、機械性能、表面觀察、硫印檢查及銲縫範圍內的超音波檢查。

2. 轉子支架 對於大容量水輪發電機的轉子支架，“電力”廠一向採用轉子套筒與支臂以上下圓盤聯接的結構型式。當採用這種結構時，聯接螺栓除了承受由於扭矩、轉子重量、支臂離心力所產生的合成剪應力外，還要承受由於磁軛與轉子支架間的緊量所引起的巨大的剪應力。為了不使在發電機過速時，磁軛與轉子支架間有間隙，以致可能產生劇烈振動，這一緊量是必需的。發電機的轉速愈高，緊量要求愈大。為了使布拉次克發電機在過速 40% 以內，此處還無間隙，在靜止時此處需要有很大的緊量，因此圓盤螺絲受到很大的剪應力。布拉次克發電機技術設計中所採用的轉子支架結構（見圖 1）就沒有這一問題。轉子套筒原由鑄鋼製成，支臂的外徑為 8500 公厘，其內外圓均可在立旋上加工，因此套筒可做成圓筒形的，便於加工。後來套筒改為由鍛件及鋼板銲接而成，這樣就展開了在工藝上圓筒形與多邊形套筒那個比較合理的爭論。主張圓筒形的人認為這樣的套筒加工簡單，所有的支臂可以在立旋上一次加工到比較準確的直徑，而多邊形套筒的支臂必須單個加工，其長度不易控制而且工作量大。主張多邊形套筒的人認為採用合縫板先加工後銲接的工藝方法比車套筒的外圓和支臂的內圓簡單，而圓筒形套筒在鉗套筒外圓與支臂合縫板上的徑向孔時很不方便，弧形的合縫板不易成型，加工缺陷不易糾正等缺點。在施工設計中，採用了輕型盒形截面的轉子支架，（見圖 3）由 12 個支臂改為 6 個支臂，套筒也由圓筒形的改為六邊形的，支臂鋼板由 40 公厘改為 16 公厘，使整個轉子支架的重量由 125 噸減到 100 噸左右。當我們離開“電力”廠時這部分的設計還未完成，還有待模擬試驗來証實其穩定性。

在計算合縫板螺絲上應力時，要考慮輔助發電機轉子的重量。由於輔助發電機轉子

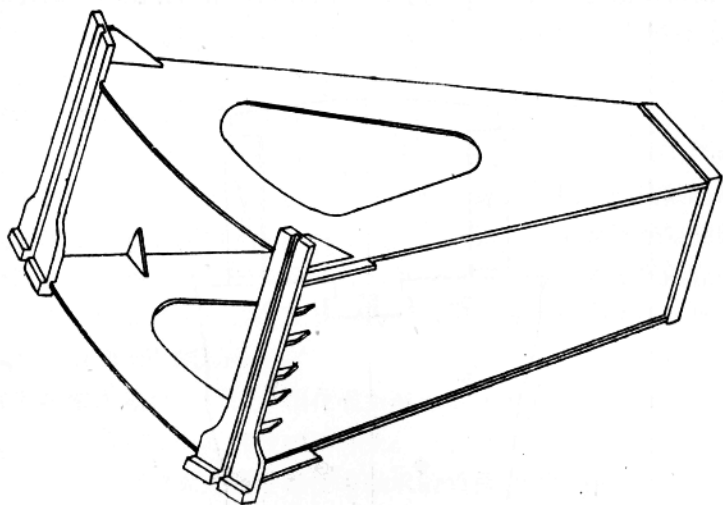


圖 3

是分半的，联接的剛性不大，因此要估計有一半的離心力作用在主机轉子支架的合縫板上。

轉子支架與軸之間採用無鍵的緊配合，在直徑上的緊量為 1.5 公厘。這樣做可以省去開長鍵槽和研配長鍵的困難，而且可以可靠地傳遞扭矩。緊量系按磨擦係數等於 0.2 和三倍額定力矩而求得的。在此緊量下，軸的最大應力為 1950 公斤/公分²（軸孔內表面）。

3. 磁軛 在選擇磁軛寬度時，曾自 600 公厘至 1200 公厘每 50 公厘作一方案，分別按 1 個 T 尾和 1 個鴿尾進行計算應力。得出的結論是：當同樣應力時，鴿尾型的磁軛重量比 T 尾型的少 10% 左右；如取同樣安全係數，用 35 號鋼的磁軛比 3 號鋼的輕 $\frac{1}{3}$ 。由於帶鴿尾槽的磁軛在安裝時比較困難，不易保證質量，還是選用了雙 T 尾型的，其應力並不比鴿尾型的大。最後的選擇結果是：徑向的雙 T 尾，每個 T 尾的負荷為 2180 公斤/公分；磁軛沖片寬度為 600 公厘，厚 4 公厘，用 35 號鋼，斷面應力為 2300 公斤/公分²，磁軛沖片間的接縫相錯半個極距，每片 4 極。

如取 35 號鋼的屈服點為 3100 公斤/公分²，則磁軛的安全係數等於 1.35。烏拉爾電器廠認為計算值是平均應力，未考慮應力集中，此處常用的安全係數為 1.55，現在只有 1.35，應提出根據。烏拉爾廠在自己的設計中採用 40 號鋼，應力為 2200 公斤/公分²。由於採用了接縫錯開 $\frac{1}{2}$ 極距以及特殊的磁極固定方法，其磁軛重量比“電力”廠的輕 9%，但其轉動慣量也比“電力”廠的少 10%。

磁軛沖片接縫由錯開 1 個極距過渡到 $\frac{1}{2}$ 個極距，當每片 4 極時，磁軛斷面的減弱係數由 $\frac{2}{3}$ ，提高至 $\frac{7}{8}$ ，就是說有效斷面增加了 14.3%，而接縫處的通風槽有 $\frac{1}{2}$ 不能通風。

由錯開 $\frac{1}{2}$ 个極距过渡到 $\frac{1}{3}$ 个極距，有效断面的增加就只有 4.6%，而接縫处的通風槽也只有 $\frac{1}{3}$ 有效。所以“电力”厂認為錯開 $\frac{1}{3}$ 極距的設計并不合理。

烏尔拉厂的磁極固定方法（見圖4）。此方法可比常用的方法增加磁軛的有效断面約

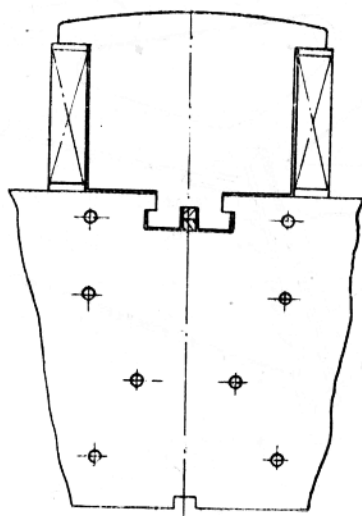


圖 4

10%。其缺点是在打緊磁極鍵后，極身与磁軛之間有不可避免的 2~3 公厘的間隙，因此主气隙就要相应地減少，这将会增加磁極的表面損耗；此外，由磁極切向力所產生的应力也比双 T 尾型的大得多。

4. 磁極“电力”厂在布拉次克發電机的設計中仍旧采用疊片式磁極，帶有正常的阻尼繞組。烏拉尔厂則主張采用整体磁極，无阻尼繞組，僅在極靴間以銅片相連。“电力”厂認為制造 2.5 公尺長的疊片磁極在工藝上并无困难，可使其撓度不超过 1 公厘，由低級工做也不会產生廢品。如用整体磁極則將產生較大的附加損耗，用切削机床加工容易產生廢品而且成本高。新亞伯利亞汽輪發電機厂也認為疊片磁極比整体磁極的工藝性好。烏拉尔厂認為采用整体磁極可以取消阻尼繞組，从而減輕磁極的重量；如將阻尼繞組中省下的銅放到励磁繞組中去，則可降低励磁損耗以补偿極靴中增加的附加損耗。据莫斯科动力学院电机教研室主任彼得洛夫教授說，現在各國还无可靠的計算整体磁極附加損耗的方法，捷克等國已在水輪發電機中采用过整体磁極。有一点可以肯定的，即是損耗問題將不是否定整体磁極的决定因素。至于整体磁極的参数計算方法，莫斯科电工研究院正在研究中。

(2) 定子部分 布拉次克發電机的定子与一般大型發電机并无特殊之处（見圖1）。

由于运输尺寸的限制，机座的上下端是不对称的，定子在工作下綫。根据“电力”厂的經驗，認為只要不受运输尺寸或重量的限制，应尽可能采用上下对称的机座，主要