

行政院及所屬各機關出國報告

(出國類別：) 實習

可變速抽蓄機組

服務機關：台灣電力公司

出國人 職 稱：電機工程師

姓 名：羅桂林

出國地區：日本

出國日期：89.12.4~17

報告日期：90.01.12

G7/
C09000010

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：可變速抽蓄機組

頁數 22 含附件：是否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話：台灣電力公司/

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話

羅桂林/台灣電力公司/營建處/電機工程師/02-23666967

出國類別：1 考察2 進修3 研究4 實習5 其他

出國期間：89.12.04~89.12.17 出國地區：日本

報告日期：90.01.12

分類號/目

關鍵詞：抽蓄(pumped storage)、可變速(adjustable speed)、GTO(Gate Turn Off) thyristor、Cyclo^器converter、奧清津(Okukiyotsu)、自動頻率控制(AFC：automatic frequency control)

內容摘要：(二百至三百字)

本公司現正計劃於北部增設一座抽蓄電廠，而此增設之抽蓄電廠計劃採用可變速之機組。採用可變速機組最主要之目的是要在抽水(Pumping)時調整從系統取得之入力。而調整入力之目的是做系統之自動頻率控制(Automatic Frequency Control)(AFC)。

本篇報告之內容，主要包括下述項目：為何需要可變速機組、可變速之原理、可變速機組之構造、如何決定速度變化之範圍、可變速機組對於土木及建造成本之影響、目前世界上使用及製造可變速機組之情形。

本文電子檔已傳至出國報告資訊網 (<http://report.gsn.gov.tw>)

目

錄

一.國外公務之內容與過程：.....	1.
(一) 為何需要可變速機組？.....	1.
(二) 可變速之原理。.....	4.
(三) 可變速機組之構造。.....	6.
(四) 如何決定速度變化之範圍？.....	14.
(五) 可變速機組對於土木及建造成本之影響。.....	17.
(六) 目前世界上使用及製造可變速機組之情形.....	19.
(七) 是否需要可變速機組？.....	20.
二.國外公務之心得與感想。.....	20.
三.出國期間遭遇的困難與特殊事項。.....	21.
四.對公司之具體建議。.....	21.

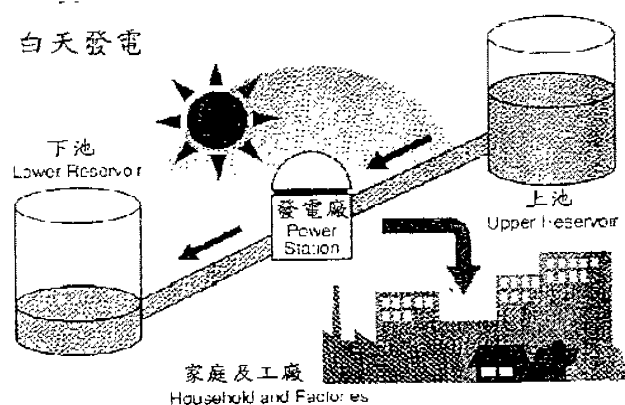
一、國外公務之內容與過程

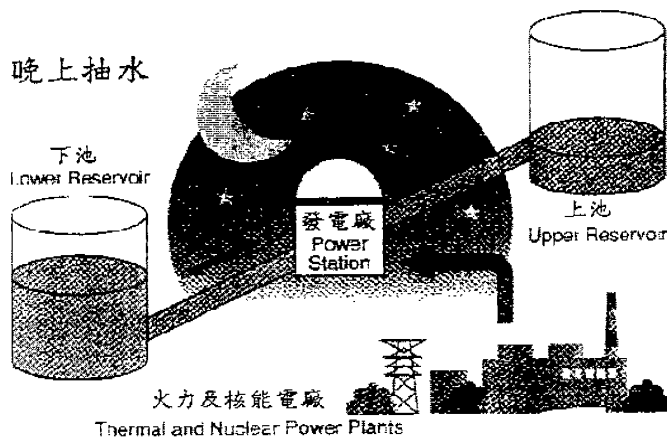
本公司現正計劃於北部增設一座抽蓄電廠，而此增設之抽蓄電廠計劃採用可變速之機組。由於本公司並未有可變抽蓄機組之使用經驗，而日本為全世界使用及製造可變速抽蓄機組最多之國家。因此，此次至日本之電源開發株式會社(EPDC)及製造廠家東芝(Toshiba)及日立(Hitachi)與其工程師討論可變速抽蓄機組之構造、特性等問題。其間並到新瀉縣奧清津第二抽蓄電廠參觀。此電廠有兩部機，其中一部機為定速，另一部為可變速。茲將此次研習做如下之報告：

(一)為何需要可變速機組？

首先討論為何要採用可變速機組？抽蓄電廠之運轉模式為，白天發電，晚上抽水，如下圖所示

抽蓄電廠運轉方式





採用可變速機組最主要之目的是要在抽水(Pumping)時調整從系統取得之入力。而調整入力之目的是做系統之自動頻率控制(Automatic Frequency Control)(AFC)，即，當系統負載增加時，降低入力，系統負載減少時，增加入力，以使得系統頻率穩定。理論上，抽水時要調整入力之方法有二：

(A) 調整導翼之開度

由於水輪機導翼在半開時效率會變差，機組亦會產生振動，因而此法不可行。

(B) 採用可變速機組

因 P 正比於 QgH

P : 入力， Q : 水量， g : 重力加速度， H : 水頭

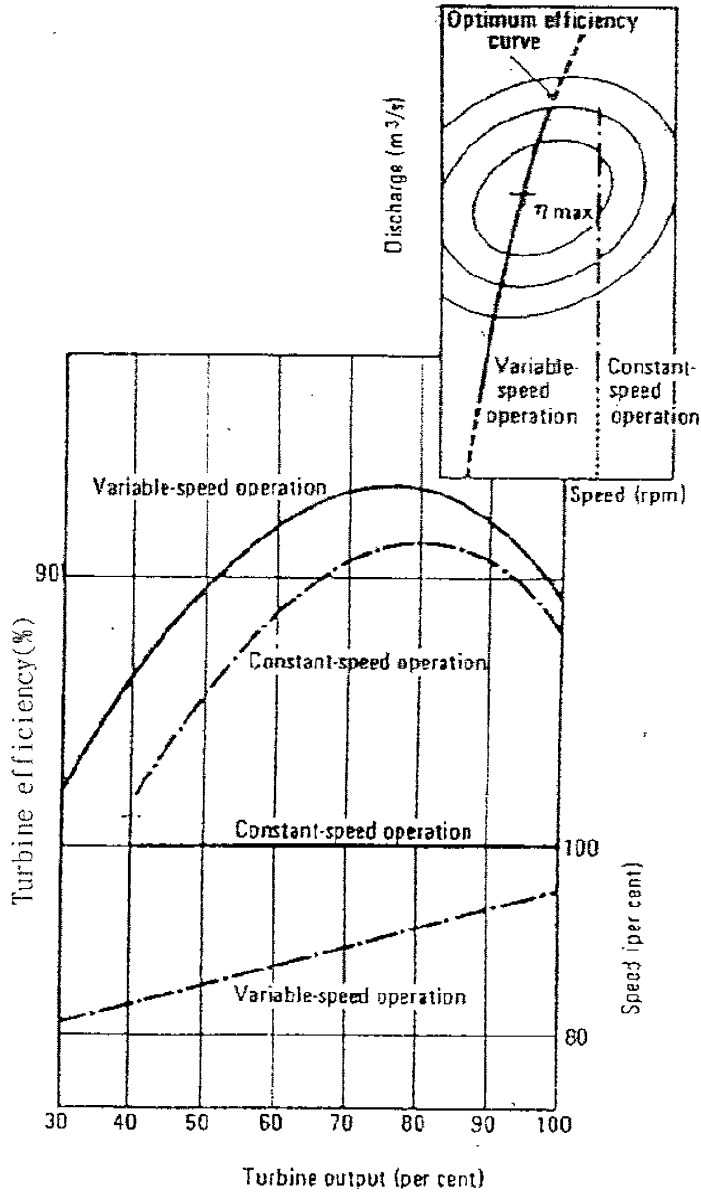
在轉速一定，且導翼開度一定時，抽水水量及水頭一定，所以入力一定。因而抽水時要調整入力，唯一之方法為改變機組之轉速。

至於採用可變速機組其他之優點如下：

(1)在發電運轉時，機組可運轉於較佳效率

尤其在高、低水頭差異大時，效率差異大。約可提高 10%之效

率。其原理圖如下



(2)抽水啟動時不再需其他啟動設備，並可減少啟動電流以減少對電力系統之衝擊。

因同步電動機無法自行啟動，因而有 Back-to-Back、Pony Motor、SFC 等啟動方式。本公司明湖電廠即採 Back-to-Back 及 Pony Motor 啟動方式，明潭電廠則採 Back-to-Back 及 SFC 啟動方式。可變速機組則利用變頻激磁系統，在抽水時可自行啟動。

(3)可減低抽水入力再停止機組以減少對電力系統之衝擊。

(4)高速控制發電機之輸出有助於系統之穩定。

(5)水質不佳時，可減少水輪機動輪之磨損。

(二)可變速之原理

要了解可變速之原理，首先需知道兩個電機機械之基本原理：

(1) 多相繞組通過多相平衡電流將於空間產生一旋轉磁場，此磁場之旋轉速度是正比於電源頻率。

(2) 不管發電機或電動機，定子磁場之轉速必定等於轉子磁場之轉速，否則將失去同步。

即 定子磁場之轉速=轉子磁場之轉速

=轉子實際之轉速+轉子繞組所產生磁場之轉速

上式中，定子磁場之轉速，因是從系統受電，因而為定值。轉子實際之轉速，即為機組之實際轉速。

原理圖如下所示

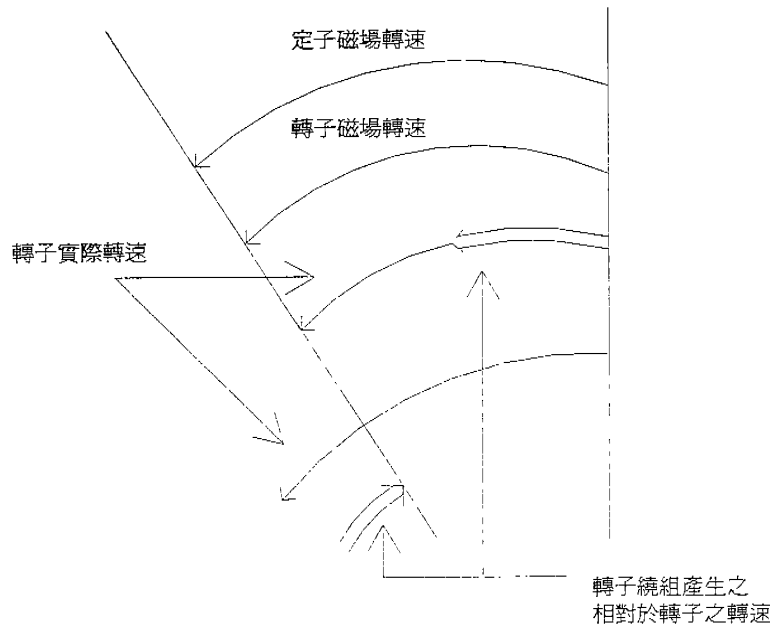


圖1 可變速原理圖

傳統同步發電機與可變速發電機之比較如下：

傳統同步發電機

定子：三相繞組通過三相平衡電流

轉子：直流繞組通過直流電流

可變速發電機

定子：三相繞組通過三相平衡電流

轉子：三相繞組通過三相平衡電流

由上比較可知，兩者之差別在傳統同步發電機於轉子加上直流電，因而無

法變速(即保持在由系統頻率決定之同步轉速上)。可變速發電機則於轉子加上交流電，控制激磁之頻率，即可控制機組之轉速。

事實上，改變機組轉速之另一方法為將加於定子之電源頻率加以改變，而在轉子仍加直流電，亦即，發電機仍採用傳統同步發電機。此方法即本公司明潭電廠在抽水啟動時所採用之 SFC(Static Frequency Converter) 啟動設備。但 SFC 設備無法在機組正常運轉時使用。理由是，若要在機組正常運轉時使用，則 SFC 容量必需與發電機容量相同，會大得不合理。

(三)可變速機組之構造

可變速抽蓄機組與傳統抽蓄機組構造上最大之不同在於發電機之轉子(Rotor)。傳統抽蓄機組之轉子為凸極(Salient Pole)，此乃因轉子線圈是通過直流電。而可變速抽蓄機組之轉子為隱極(Cylindrical Pole)，其構造與定子(Stator)相同，皆為三相繞組。而主軸上之集電環(Collector Ring，或稱滑環 Slip Ring)，傳統同步發電機為兩個，可變速發電機則為三或四(Hitachi 之機組為四個)。

下圖為兩種機組構造之示意圖

傳統機組

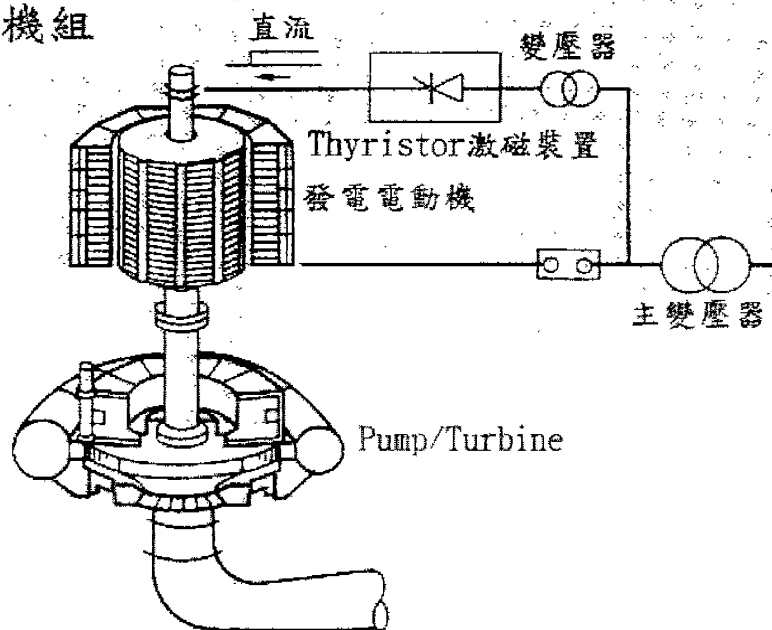


圖2 傳統機組構造示意圖

可變速機組

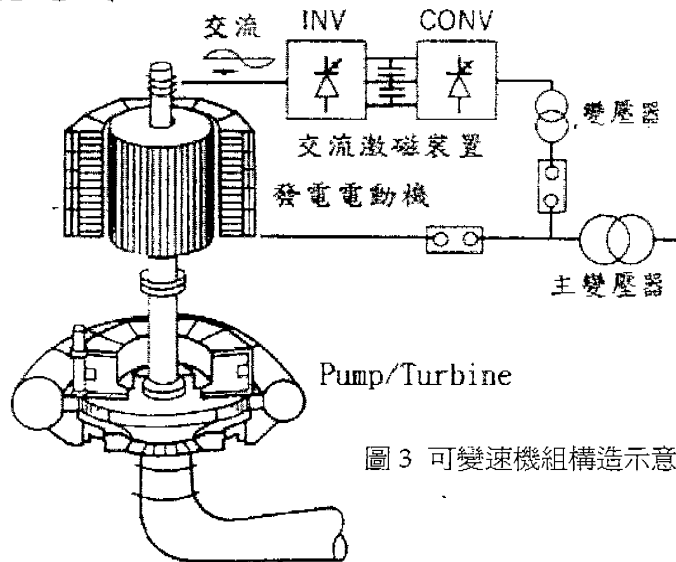
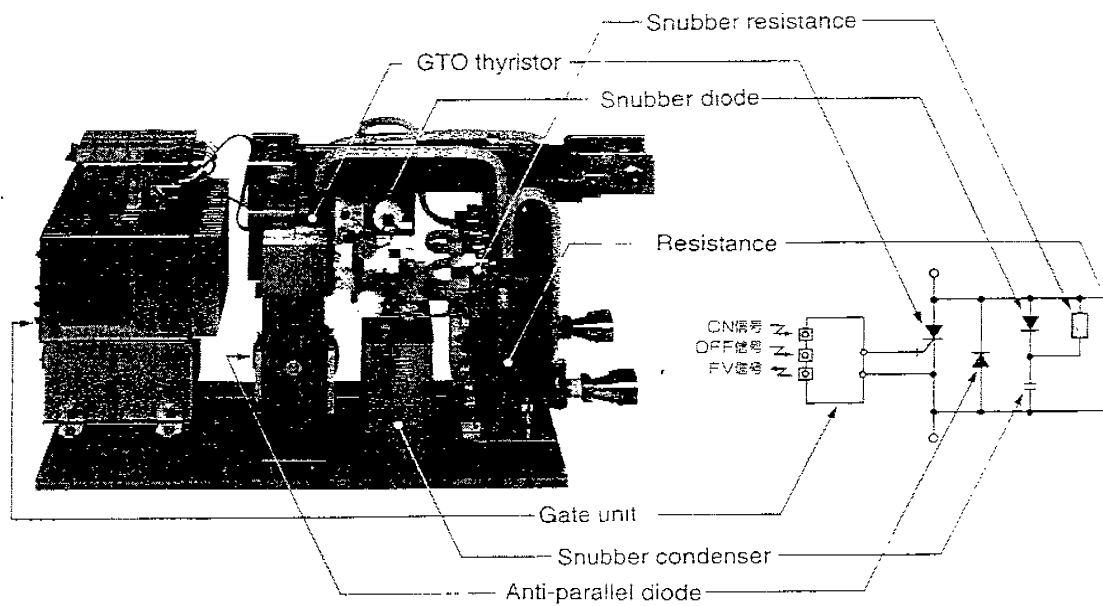


圖3 可變速機組構造示意圖

其中，可變速機組需大容量之變頻激磁設備。目前日本廠家所採用之

變頻激磁設備有兩種(1) Cycloconverter 系統 (2) GTO(Gate Turn Off Thyristor) Inverter-Converter 系統，前者為 Hitachi 及 Toshiba 所採用，為最早發展出來之系統。後者為 Toshiba 及 Mitsubishi 所採用，為較新之系統。單位 GTO 模組之外形如下圖所示

GTO THYRISTOR 模組



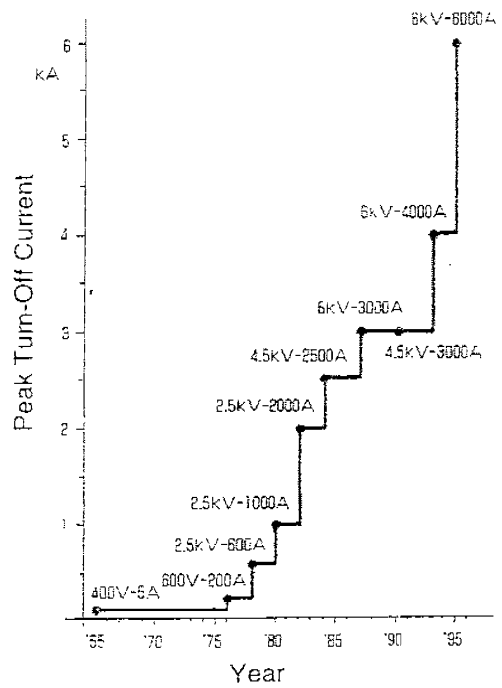
GTO 閘流體之外形及規格演進，如下圖所示

GTO 閘流體元件

Repetitive Peak Off-State Voltage	Max	4500V
Peak Turn-Off Current	Max	3000A
RMS On-State Current	Max	1200A

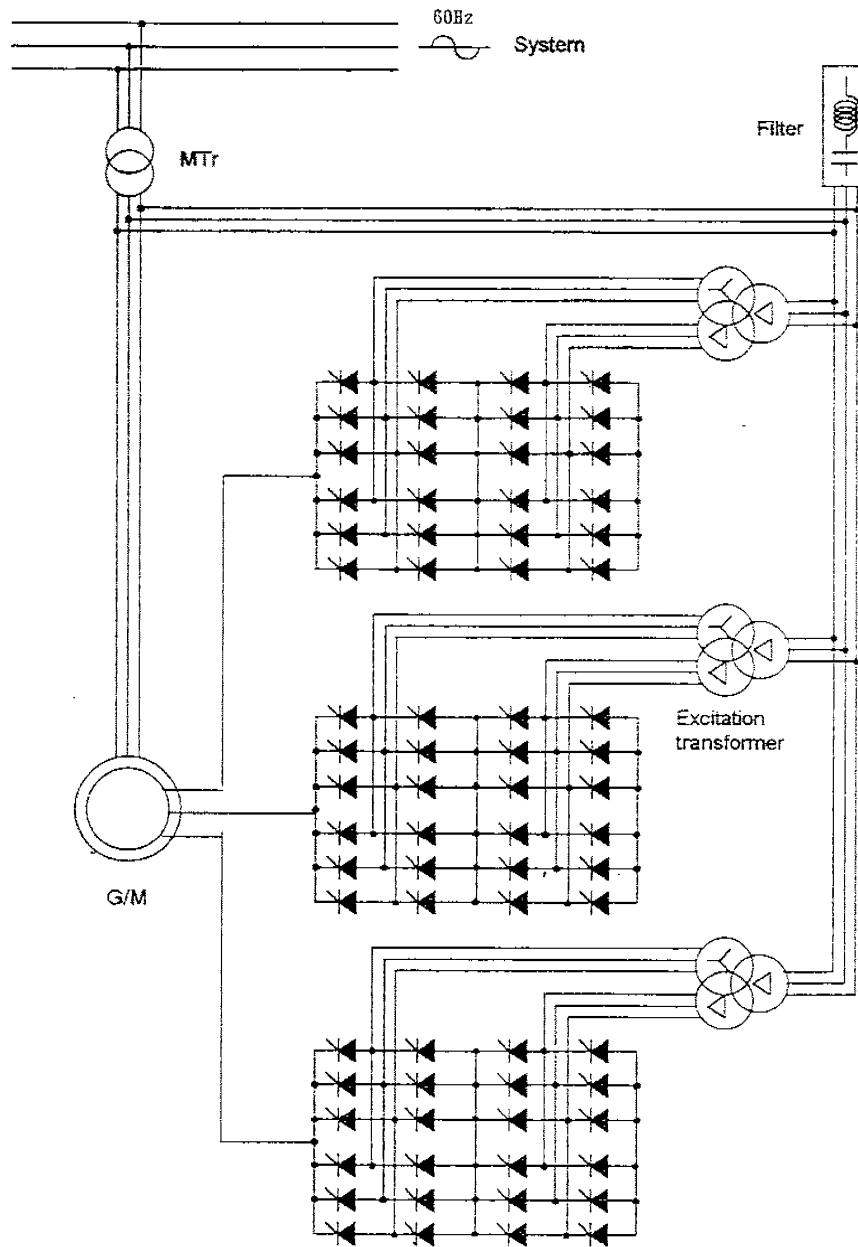


GTO 閘流元件及規格演進

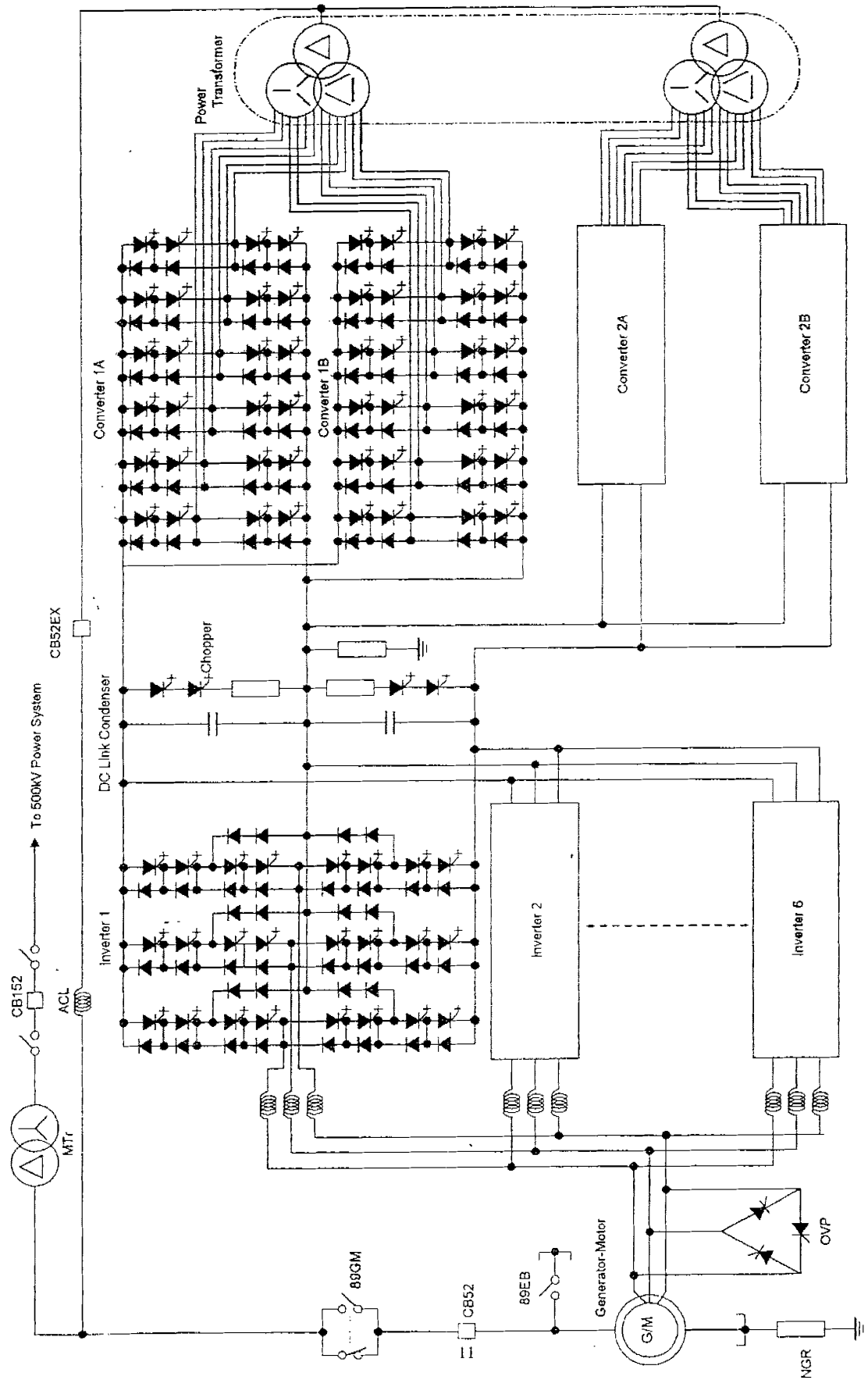


Progress of GTO element capacity

下兩圖則為 Cycloconverter 簡化線路圖及奧清津第二電廠之 GTO 系統



Cycloconverter簡化示意圖



奥清津第二電廠之GTO系統

兩系統之比較如下

(1) 所需虛功之差別

Cycloconverter 需要大量之虛功，而此虛功需由發電機或其他設備提供，需使用較大容量發電機。相對的，GTO 設備可運轉於 100% 功因，因而發電機容量較小。

(2) 可靠性

Cycloconverter 在水力電廠有許多使用實績，GTO Converter 在其他工業領域，如火車、工廠、抽水馬達上使用多年，且最近亦有水力電廠使用實績。兩者在可靠性方面是相同的。

(3) 在系統擾動時之性能

Cycloconverter 是由系統取得電源，直接變頻。因而，當系統擾動時(尤其在系統故障，電壓下降時)，要控制 Cycloconverter 之輸出電壓、電流、頻率、相角變得很困難。而且，當系統故障時，在轉子會有暫態直流成份從轉子繞組流向 Cycloconverter，因 Cycloconverter 僅能單向導通，因而會在轉子產生高壓，因而需 Voltage Clipper 或 OVP(Over Voltage Protection System)之類的設備來限制電壓。但當 OVP 等設備動作時，Cycloconverter 將停止作用，此將持續幾百毫秒，此期間會減少對系統穩定之作用。相對的，GTO 系統因有 DC Link Condenser 可供給 Inverter 所需之電源，因而系統短時間擾動時並不

會影響 GTO 系統之控制。在系統故障時因有 Flywheel Diode 可將能量貯存於 DC Link Condenser 中。於故障點遠離電廠時，DC Link 之電壓可由 Chopper 控制，並迅速恢復控制，有利於系統穩定。

(4) 濾波器之設計

12-phase Cycloconverter 會產生 $12n + 1$ 之諧波及其 sidebands。因有 sidebands，所以設計濾波器變得很複雜。相對的，GTO 系統諧波之頻率是由 PWM 調變頻率決定(約為 500Hz 或 750Hz)，屬於較高頻率，要設計濾波器較簡單。以沖繩海水抽蓄為例，僅裝有 $4n$ 及 $10n$ (n 為 PWM 調變頻率)之濾波器於主變低壓側，則主變高壓側之諧波失真小於 1%。

(5) 安裝空間

Cycloconverter 及 GTO 系統所需之安裝空間皆遠大於傳統直流激磁系統。此因激磁系統容量很大。在激磁系統，兩系統所需之空間差不多。但全部系統(包括激磁變壓器等)，則 GTO 系統所需之空間較小。

(6) 方案之比較(以沖繩海水抽蓄(30MW 級)為例)

Item	GTO system	CYC system
Rating	GTO Inverter: 3.96MVA-915V-2500A GTO Converter: 2.8MVA-860V-1880A	7.45MVA-1520V-2830V
Installation space	100%	120%
Energy loss	100%	140%
Harmonics distortion	Approximately 1.0%(with 6.5MVA Filter)	Approximately 0.5%(with 7.5MVA Filter)
Element number	GTO :30, Diode 30	Thyristor :72
Controllability	Individual control for active and reactive power and high speed control can be made	Individual control for active and reactive power and high speed control can be made
Generator capacity	⊙ Comparatively small	○ Comparatively large
Gate block interruption	⊙ Comparatively short	○ Comparatively long

Cycloconverter與GTO系統之比較

在 Converter 設計上應注意的另一地方，在於應採用 12-pulse Converter。本公司明潭電廠 SFC 之設計是採 6-pulse Converter，結果，由於五次及七次諧波太大(12-pulse Converter 並不會產生五次及七次諧波)，因而再加裝濾波器。

(四) 如何決定速度變化之範圍？

要決定速度變化之範圍需考量下列因素：

--(1) 系統需要

要決定速度變化範圍，需先了解速度變化範圍大小之影響。

首先，水頭 H，流量 Q，電力 P，轉速 n 三者間之關係為

$$H = k_h \times n^2$$

$$Q = k_q \times n$$

$$P = k_p \times n^3 \quad \text{其中 } k_h, k_q, k_p \text{ 為常數}$$

因此， $\pm 10\%$ 的速度變化可對應於 $\pm 30\%$ 電力的變化，因此需考量系統負載變化之情況、系統調頻方法(如 Load Shedding 等)及系統其他機組調頻能力之大小，以決定所需速度變化範圍。

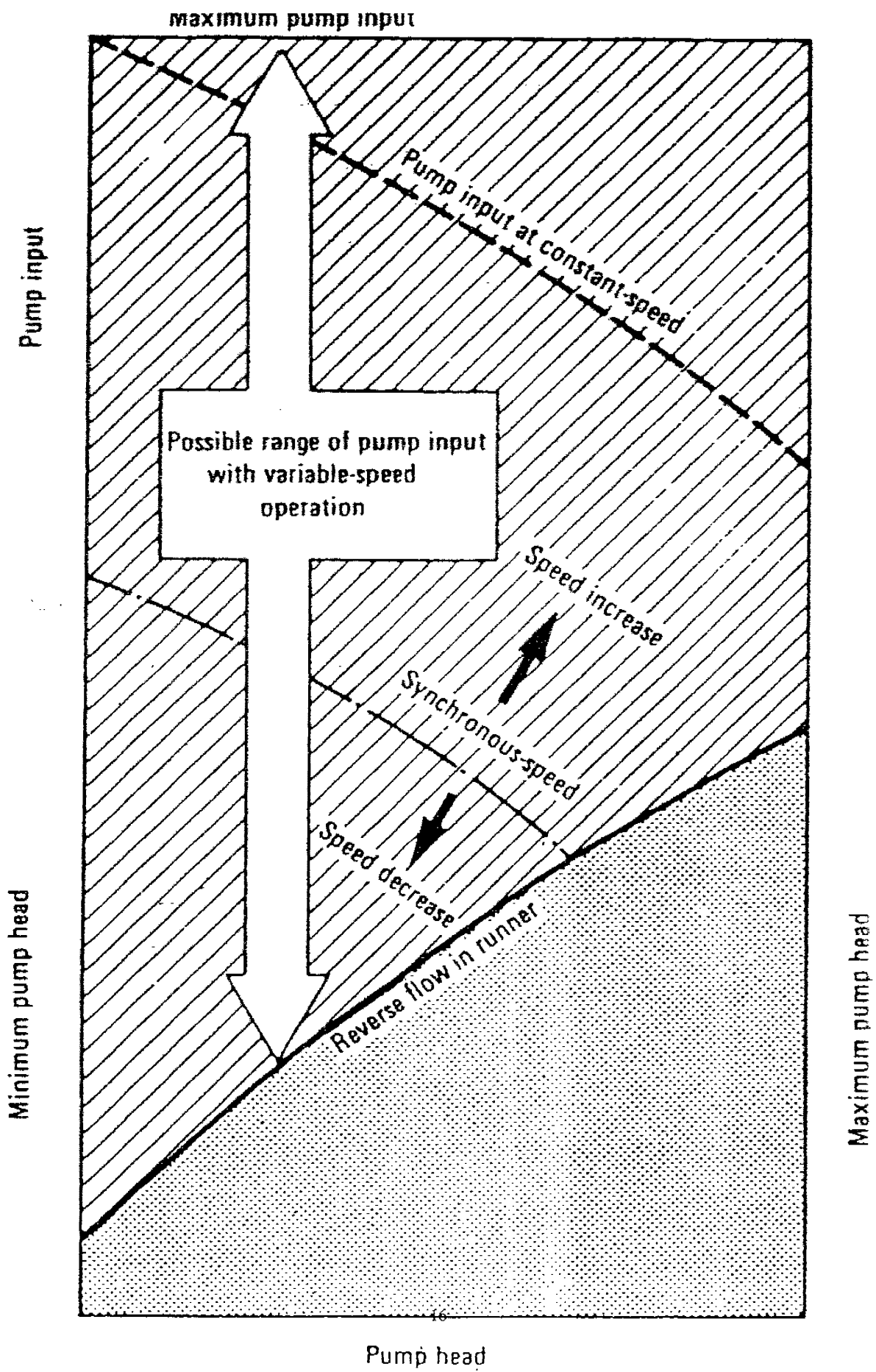
(2) 成本考量

其次應知道，速度變化範圍愈大，所需 Converter 之容量也愈大，發電機轉子容量也愈大，建造成本將大幅增加。

(3) 水輪機可運轉範圍

其次應考量水輪機之運轉範圍。因水輪機會有穴蝕(Cavitation)等問題，因而並非每一點皆可運轉。變速範圍應將此因素加以考慮。

下圖為一水輪機運轉範圍圖

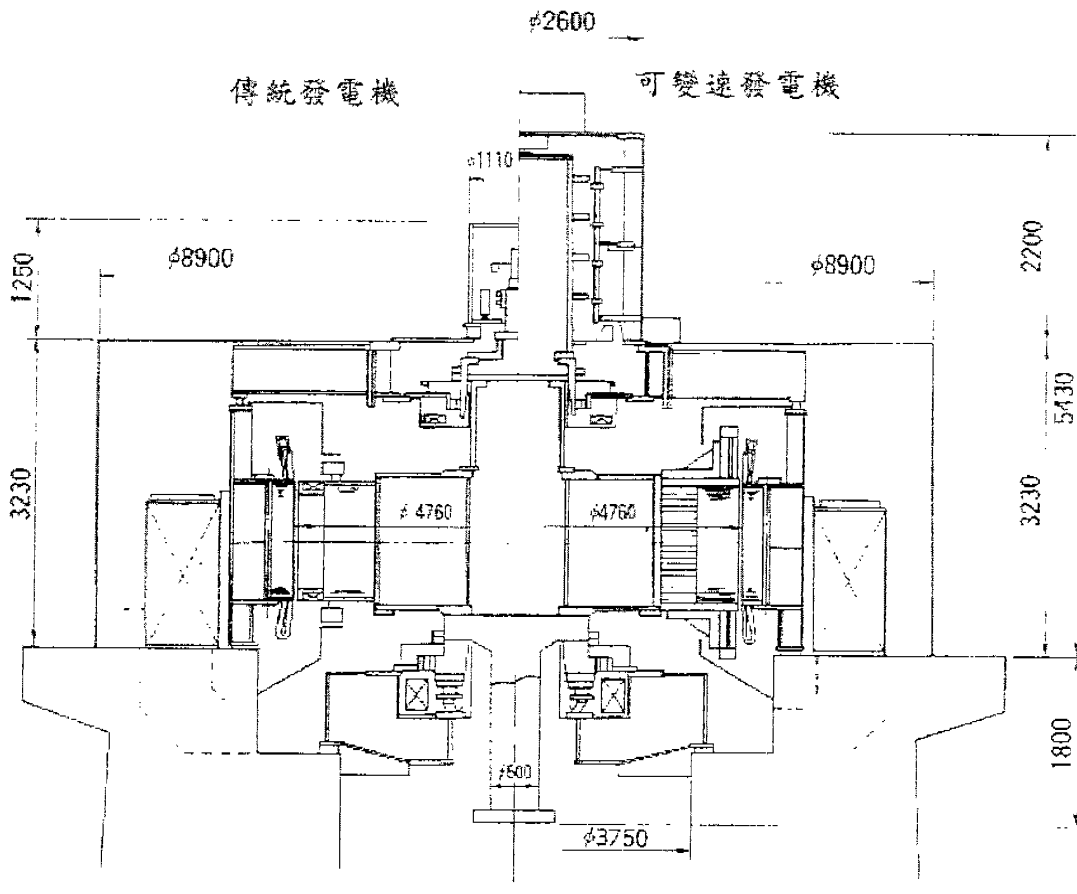


(五) 可變速機組對於土木及建造成本之影響

(1) 發電機之轉子比傳統機組大、重量重，廠房高架吊車容量大，土木設計強度需提高。

(2) 發電機之主軸長度，由於集電環數量及磁場電壓增加而變長。因而廠房高度亦需增高。

下圖為關西電力公司 22000KVA 可變速發電機與傳統發電機之比較

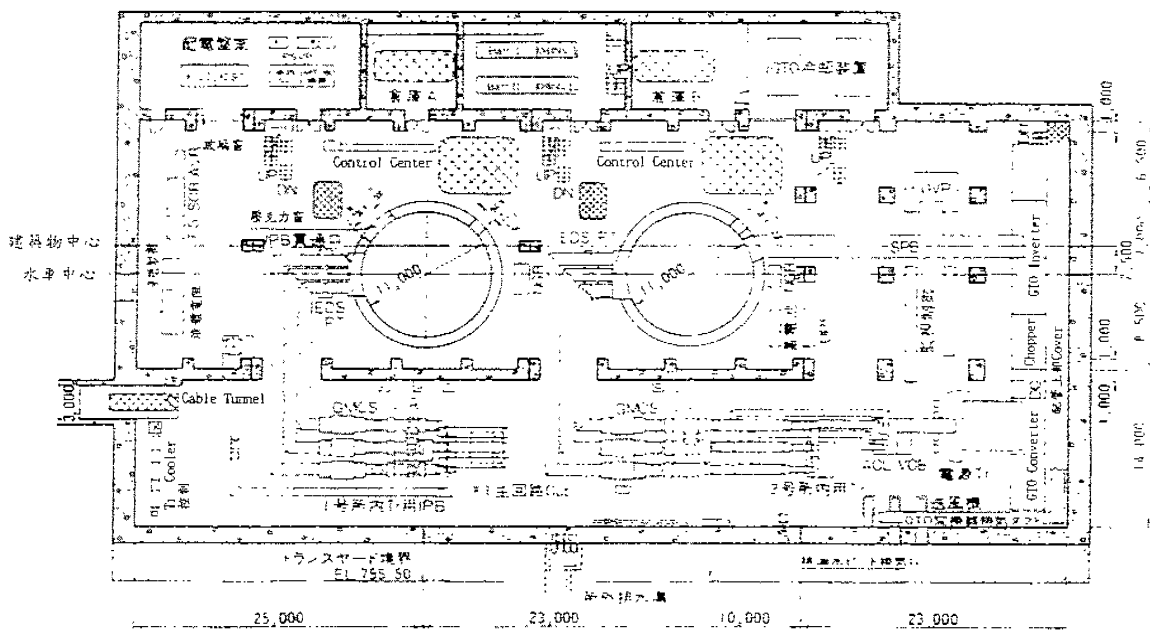


(3) 可變速機組對土木影響最大者，在於激磁設備需要很大之空間，因

而會使得地下廠房開挖量變得很大。

下圖為奧清津第二抽蓄電廠之設備平面尺寸圖。由圖中可看出 GTO 設備長寬約為 30m X 3m，高(圖中未示)為六米多，可以說是龐然大物。

奧清津第二發電機室平面圖



另由於激磁設備需純水來做冷卻，因此另需一水處理及冷卻室(如上圖所示，約為 10m X 7m)。

那到底可變速機組會增加多少費用？這要視可變速範圍、土木開挖成本、電力電子元件之發展等等因素而定。以日本 1996 年之情形為例，為 US\$100~120/KW。

(六)目前世界上使用及製造可變速機組之情形

(1)使用情形

目前世界上僅有日本有使用可變速抽蓄機組之經驗，2002年德國 BEAG 之 Goldisthal 抽蓄電廠將有兩部 300MW 之可變速機組進行商轉。日本部份可變速機組抽蓄電廠之資料如下

商轉日期	激磁系統型式	發電機電壓(KV)	速度變化範圍(rpm)	額定轉速(rpm)	單機容量 X 機組數	製造廠家 (G/M/T/P)	電力公司	電廠名稱
1996	Cycloconverter	6.6 (60Hz)	510~690 ± 15%	600	26.5MVA /	Toshiba (G/M)、Hitachi (T/P)	Okinawa EPC	1.Chujowan (海水抽蓄)
1996	GTO Converter-Inverter	16.5 (50Hz)	407~450 +4.9% - 5.1%	429	345MVA /340MWX1	Toshiba	EPDC	2.Okuyotsu No. 2
1995	Cycloconverter	16.5 (50Hz)	345~405 ± 8%	375	360MVA /330MWX1	Toshiba (G/M)、Hitachi (T/P)	Tokyo EPC	3.Shib-ara
1993, 1995	Cycloconverter	18 (60Hz)	330~390 ± 8.3%	360	395MVA /388MWX2	Hitachi	Kansai EPC	4.Obkawachi
1992	GTO Converter-Inverter	16.5 (50Hz)	208~254 ± 10%	231	105MVA /140MWX1	Mitsubishi	Hokkaido EPC	5.Takami
1990	Cycloconverter	13.8 (50Hz)	130~156 +4% - 13.3%	150	85MVA /85MWX1	Toshiba	Tokyo EPC	6.Yagisawa

(2)製造情形

至於製造廠家，日本有日立、東芝、三菱三家，歐洲有 ELIN(發電機之製造，變頻激磁部份由 CEGELEC 製造)(即，德國 Goldisthal 電廠之發電機承製廠家)。至於 ABB，曾於西班牙，將一橫軸 10MW 之發電機改為可變速(非抽蓄電廠)。

(七)是否需要可變速機組？

由上述之討論知，採用可變速機組會增加建造成本。但因可變速機組有許多優點，是否要採用，需逐一評估這些優點，再整體做決定。其中關於機組效率之提昇，在 37 屆於巴黎舉行之 CIGRE 會議中曾提出討論。結論是，單單效率提昇並無法彌補所增加之投資費用。因而，採用可變速機組唯一之理由應為系統有此需要。

二、國外公務之心得與感想

本次到日本實習為本人第三次到日本，第一次是明湖抽蓄至 EPDCI 研習，第二次則是新天輪水力電廠之發電機工廠試驗，前後近 20 年，一切變化也相當大。首先，EPDC 因即將民營化，組織重整，EPDCI 已併回 EPDC。訪問 HESCO(Hitachi Engineering Service Company)時，發現許多 HESCO 公司的人是從日立工廠水輪發電機部門調至此公司，工作則轉為做維修或其他之設計，如風力發電之設計。原因為，目前日本之水力電廠建廠數量由於環保及民眾反對而大幅縮減。台電目前也面臨民營化問題，國內產業

由於生產成本高，有產業外移，失業率上升之問題。似乎組織重整，調整經營方向為世界共同之問題。

三、出國期間遭遇的困難與特殊事項

並未遭遇困難。

四、對公司的具體建議

由於抽蓄電廠為一事涉百億為單位之投資，一抽一放間又有 30%-35% 之能量損耗。因此要建抽蓄電廠之首要條件應是系統有此需要。此點需要調度處及系統規劃處做詳細之研究。同樣的，是否要採用可變速機組，亦需調度處及系統規劃處做詳細之研究。因這決定涉及以十億為單位之投資。但，可以確定的是，可變速機組對於系統之運轉有許多好處，尤其在穩定度及電力品質方面。

其次，由於公司將民營化，若在公司民營後覺得系統有需要建可變速抽蓄機組，則主管機關(負責頻率穩定之單位)應提供一補助辦法，因可變速會大幅增加投資金額。以日本為例，東京電力於 1996 年付給電源開發株式會社 30 億日元以補助電源開發株式會社於奧清津第二建一 300MW 之可變速抽蓄機組。