



# 發電所並列運轉時の過渡安定度及び負荷分擔

有 賀 浩\*

## Transient Stability and Load Distribution at Parallel Operation of Power Stations

By Hiroshi Ariga  
Taga Works, Hitachi, Ltd.

### Abstract

The transient stability problem is concerned with the stability of the system under disturbances or abnormal conditions of operation as follows :

- (1). Sudden change of load.
- (2). Dropping of section of a multi-circuit line as a normal switching operation.
- (3). Grounding, short circuit or snapping faults on the system with the subsequent clearing of the faulted line section.

They may be of differing severity, the most serious disturbance being caused as a rule by short circuits. But here as an example I will investigate the transient stability and load distribution for the sudden increase of load at parallel operation of two hydraulic power stations mentioned below :

- 1. Yamabe Power Station of Japanese Government Railways whose machines are now under construction by Hitachi, Ltd.
- 2. Senju Power Station of ditto whose machines were manufactured and supplied by Hitachi, Ltd. also.

### [I] 緒 言

一般に送電系統の過渡安定度は次の様な擾亂時について考えられる。

- (1) 負荷の急變
- (2) 並行回線の一部遮斷
- (3) 送電線の地絡、短絡又は斷線故障並びに故障回線の遮斷

之等による擾亂の程度はそれぞれ異なるが、この中で最も不安定に陥り易いのは一般には系統の短絡故障の場合である。

本文に於ては日立製作所に於て目下製作中の日本國有鐵道山邊發電所と已納千手發電所との並列運轉時に於て負荷を急に増加した場合の過渡安定度及び負荷分擔を論ずることとする。

### [II] 前提條件

\* 日立製作所多賀工場

今全系統が安定運轉をしている時、電車負荷が急に増

加した場合を考える。その時果して脱調せずに而も適當に負荷を分擔しつゝ、運転を繼續出来るかどうかが問題であり、その目安をつけるために調査した。

但し後にも述べる通り負荷は2秒間に102,400kWより122,400kWに直線的に増加(約20%増加)するものと假定した。

依つて瞬間的に同量だけ増加した場合よりも條件は相當樂であり、従つて脱調の心配は先づなからうとの豫想のもとに算定した。(附録参照)

なお負荷は水車调速機が動作を開始する迄は兩發電所の水車發電機が速度減少によつて放出する處の運動エネルギーに正比例してかゝり、その後は案内羽根の開きに應じてかゝる筈である(但し調相機及び水流等の過渡現象の影響を無視した場合)から發電所の並列運転時に於てはこの點に注意を要する。

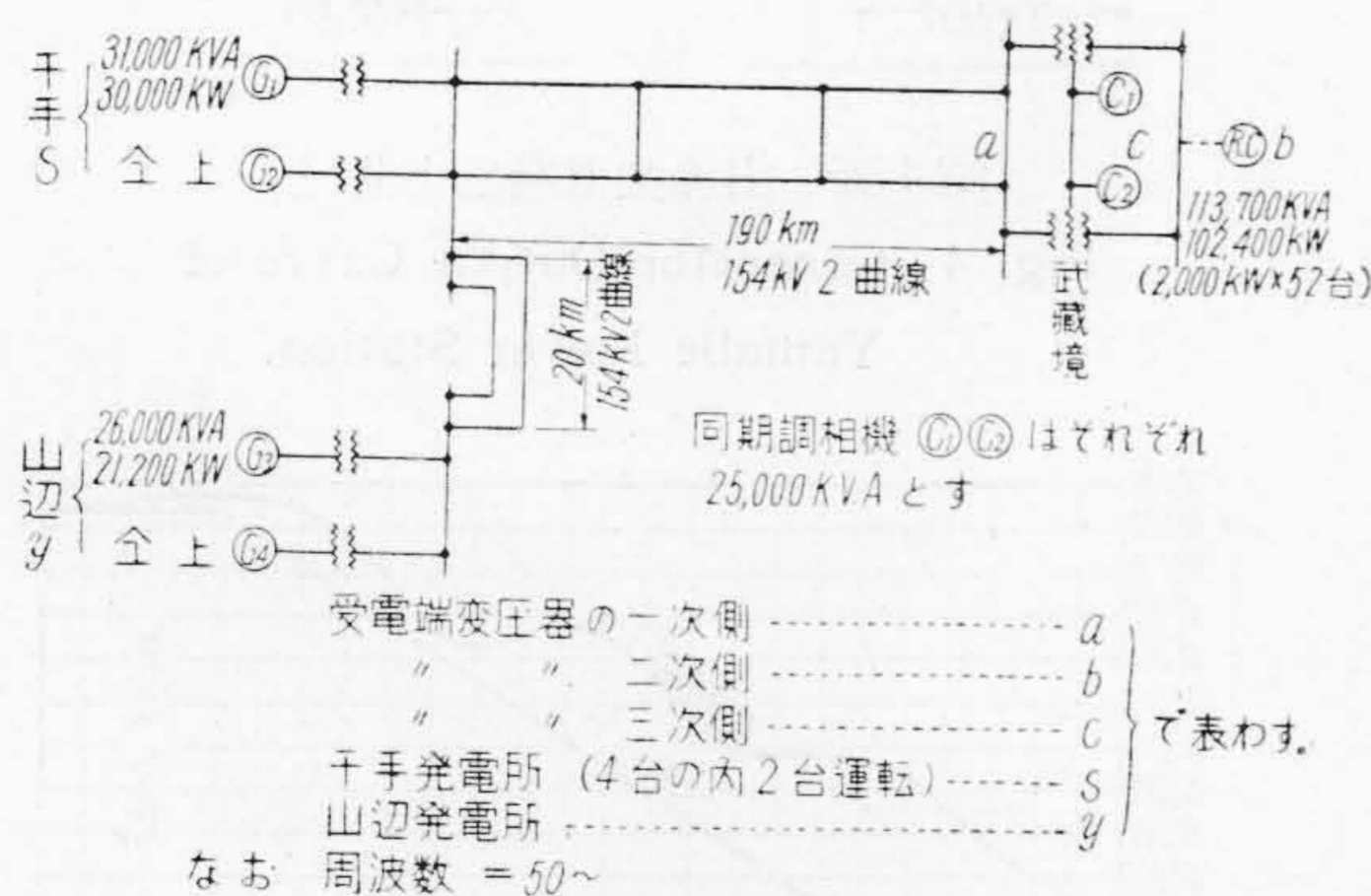
一般に速度減少によつて放出する回轉機の運動エネルギーは次の式で與えられる。

$$E = 5.475 \left( \frac{GD^2}{4} \right) \frac{n_0^2 - n_1^2}{1000^2} \text{ kW} \cdot \text{sec} \dots (1)$$

但し

$GD^2$  は  $\text{kg} \cdot \text{m}^2$  單位で表わすものとし、  
 $n_0$  は最初の回轉數、 $n_1$  は減少後の回轉數  
 とし何れも R.P.M. で表わすものとする。

(1) 回路



第1圖 主回路結線圖

Fig. 1 Connection Diagram of Main Circuit.

(2) 受電端に於ける電力(P)及び無効電力(Q)

電車負荷を分擔する機器は回轉變流機のみと考え、そ

の力率を90%遅相とする。同期調相機の所要調相容量を46,000kVA進相とする。然るときは

$$\begin{cases} P_a = 102,400 \text{ kW} & P_c = 0 \text{ kW} \\ Q_a = -3,500 \text{ kVA} & Q_c = +46,000 \text{ kVA} \\ p.f._a = 99.94\% \text{ 遅相} & p.f._c = 0\% \text{ 進相} \end{cases}$$

$$\begin{cases} P_b = 102,400 \text{ kW} \\ Q_b = -49,500 \text{ kVA} \\ p.f._b = 90\% \text{ 遅相} \end{cases}$$

但し損失は一切無視するものとする。

(3) 諸數値

1、リアクタンス

A. 回轉機

横軸リアクタンスを  $x_q$  直軸過渡リアクタンスを  $x'_d$  で表わし計算には  $x = \sqrt{x_q x'_d}$  を用う。

第1表 回轉機のリアクタンス

	$y^*$	$s^*$	$c$	$b$
$x_q$ %	51	33	100	30
$x'_d$ %	31	28	35	15
$x$ %	40	31	59	21
base kVA	52,000	62,000	50,000	113,700

\* 印欄の數値は設計値を表わす。

B. 送電線

0.42  $\Omega/\text{km}$  とし分布静電容量を閉却する。

C. 變壓器

山邊	11%	26,000 kVA	基準
千手	11%	31,000	"
武藏境	P-S 間	11%	18,000 "
	S-T 間	2.3%	8,500 "
	T-P 間	7.7%	8,500 "

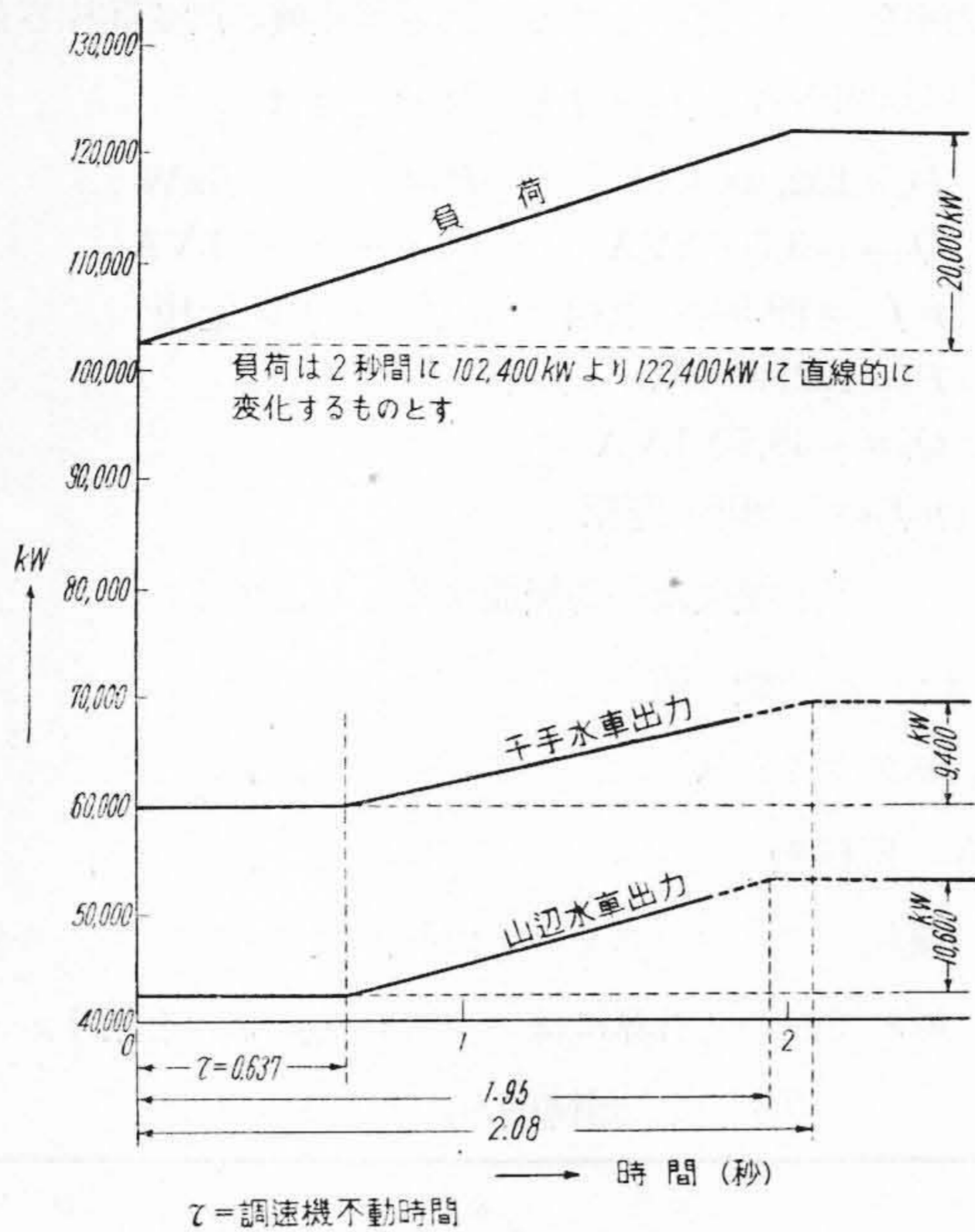
2、回轉機の  $GD^2$  (1臺當り) 及び回轉數

第2表 回轉機の  $GD^2$  (1臺當り) 及び回轉數

	$y^*$	$s^*$	$c$	$b$
$GD^2$ $\text{kg} \cdot \text{m}^2$	2,000,000	6,660,000	117,500	3,400
R.P.M.	167	150	600	750

\* 印欄の數値は設計値を表わす。

(4) 負荷及び水車出力曲線



第 2 圖 負荷及び水車出力曲線

Fig. 2 Load Curve and Water Turbine Output Curves.

なお各同期機の内部誘起電圧の大きさは不変と見做す。この場合受電端變壓器の一次、二次、三次の分岐點電圧の大きさを基準に採り、これを 1 とすれば

$$E_y = 1.26 \quad E_s = 1.25 \quad E_c = 1.57 \quad E_t = 0.93$$

[III] 結 果

0.1 秒間隔で段々法 (Step-by-step method) により算出した。結果は第 3 圖乃至第 7 圖となる。

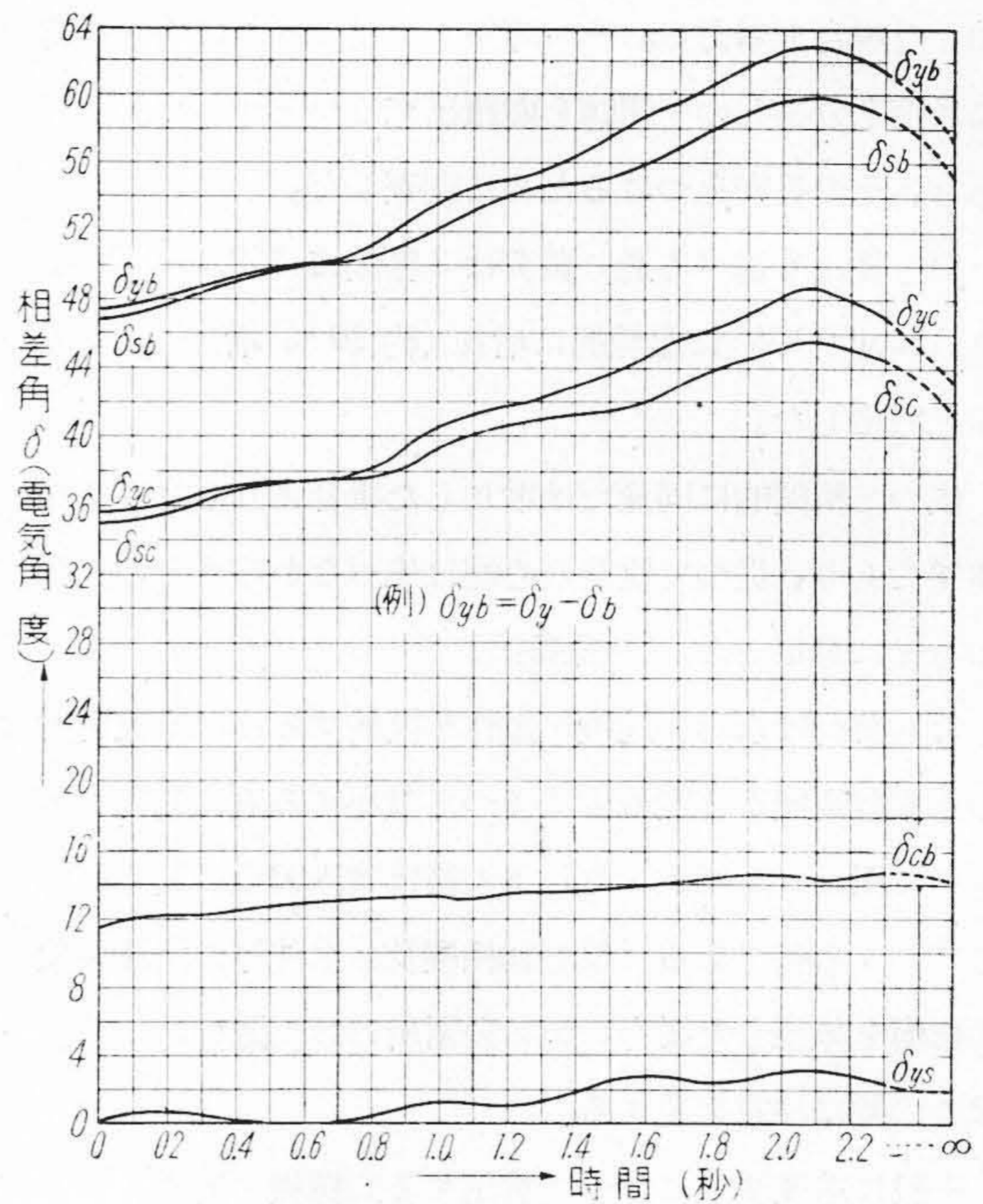
[IV] 結果の検討

以上の結果より次の事柄を述べたい。

(1) 段々法は一般に 0.05 秒間隔又は以下で求めるのが通例の様であるが、この場合は過渡現象としては甚だ緩慢であるから 0.1 秒間隔で求めた。

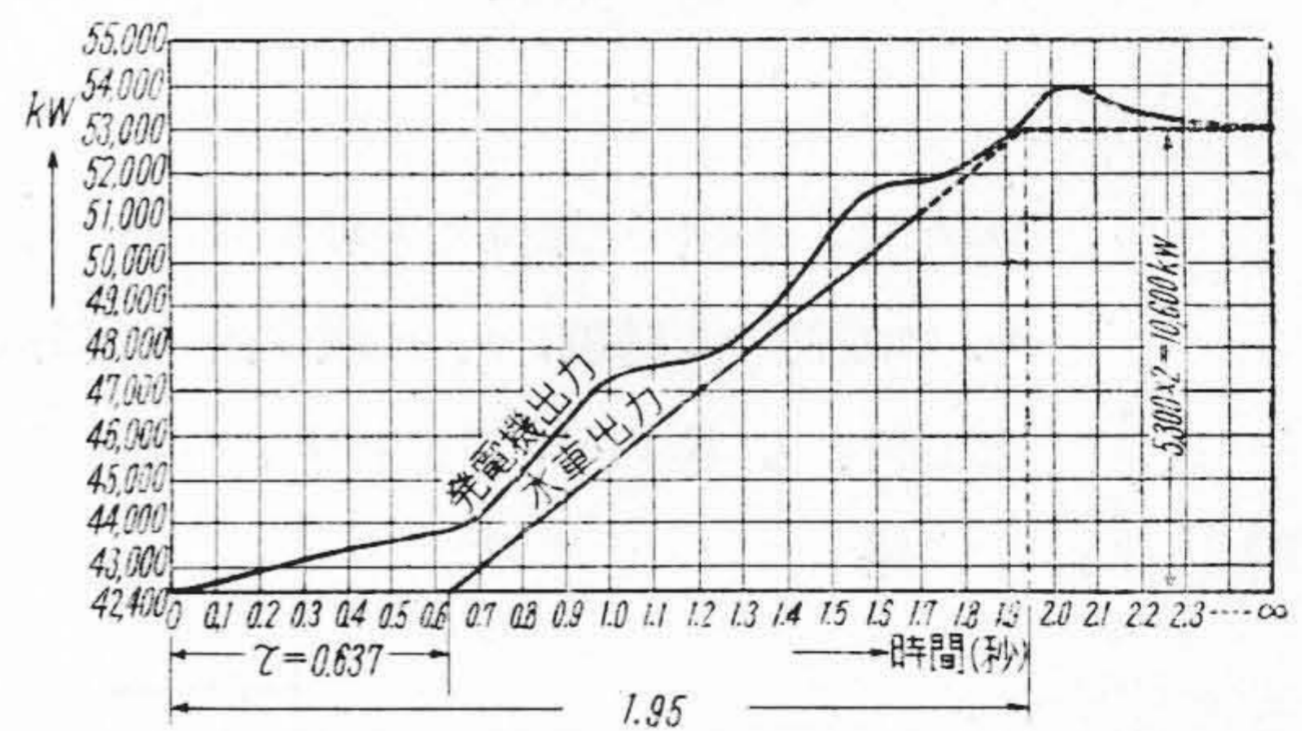
(2) 負荷分擔について

山邊發電所に比し千手發電所の方が最初の間多量の負荷を分擔するのは緒言に於ても述べた通り、後者の回轉機の放出する運動エネルギーが前者のそれより大きいからである。更に今少しく具體的に述べると、この場合兩發



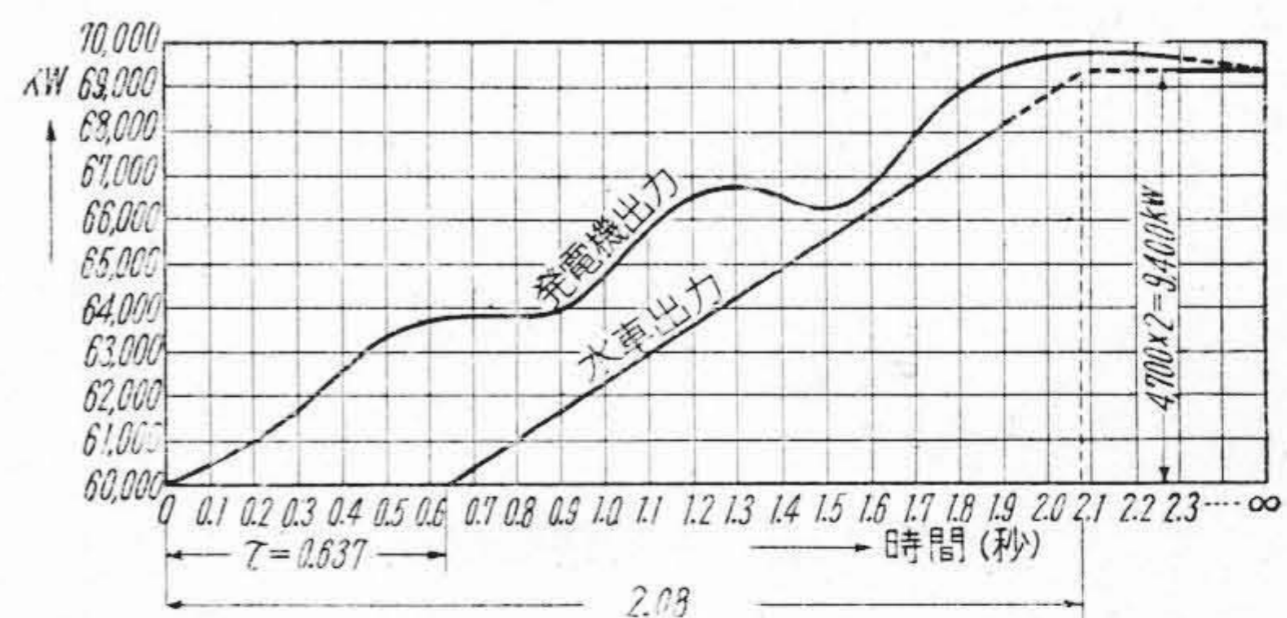
第 3 圖 相差角變動曲線

Fig. 3 Swing Curves.



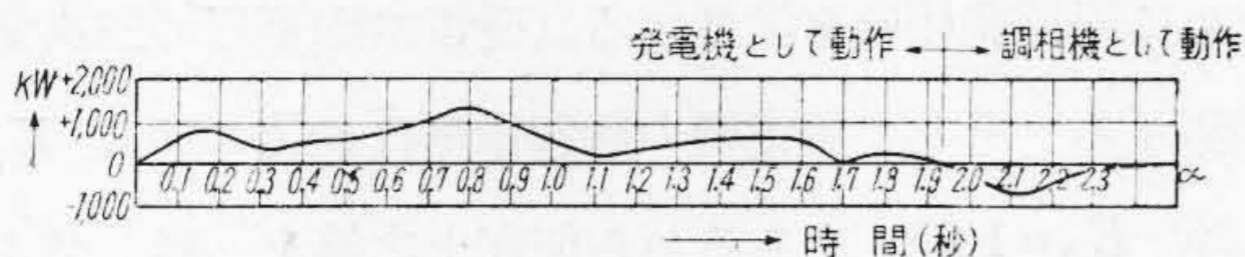
第 4 圖 山邊發電機出力曲線

Fig. 4 Generator Output Curve of Yamabe Power Station.



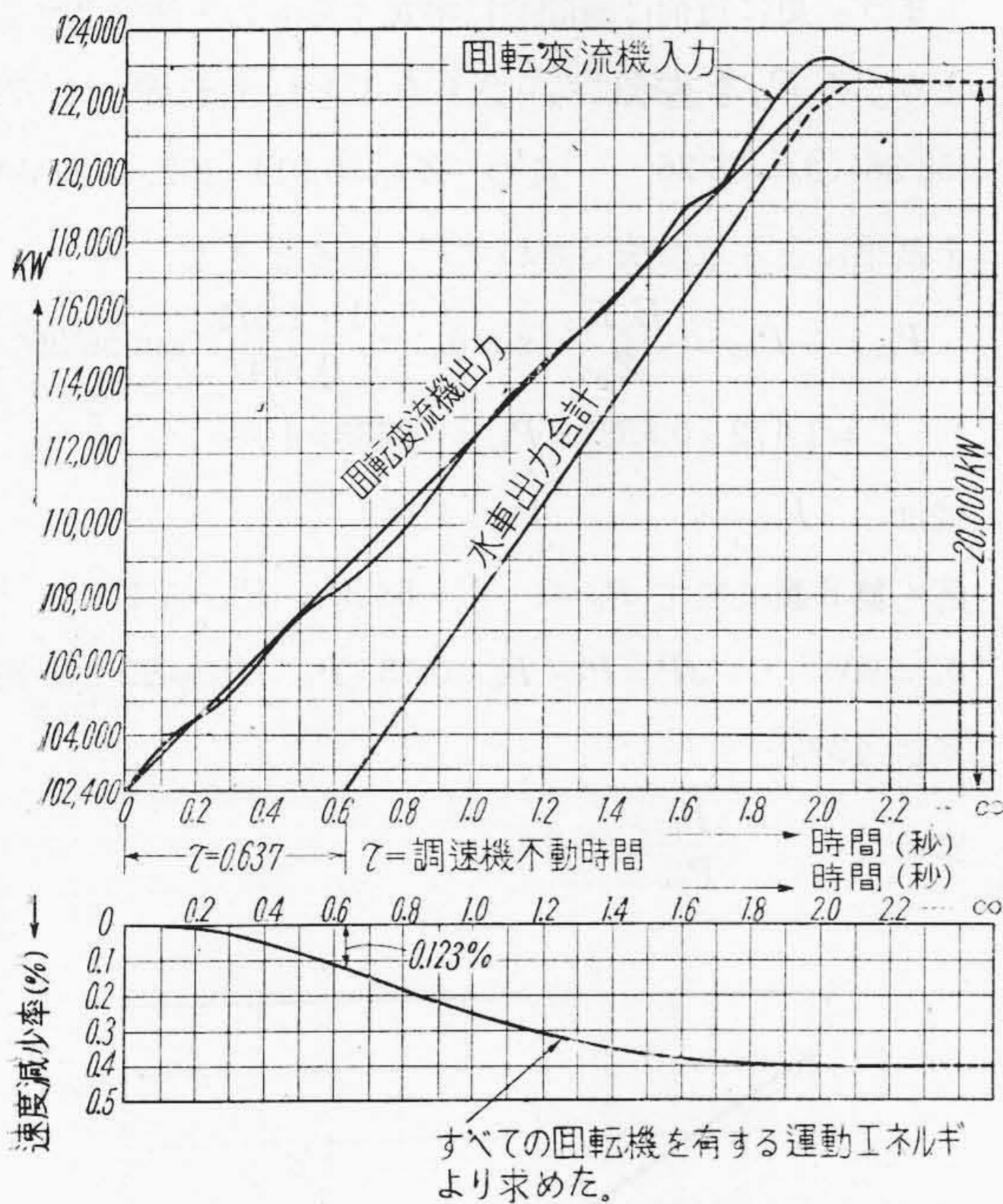
第 5 圖 千手發電機出力曲線

Fig. 5 Generator Output Curve of Senju Power Station.



第6圖 調相機特性曲線

Fig. 6 Phase Modifier characteristic Curve.



第7圖 回轉變流機特性曲線並びに速度減少率曲線

Fig. 7 Rotary Converter characteristic Curves and Speed Decreasing Curve.

電所共水車調速機の感度を 0.18% とすれば、回轉數が 100% より  $100 - 0.18 = 99.82\%$  迄減少する間に兩發電所水車發電機の放出する運動エネルギーは (1) 式及び第 2 表により次の様になる。

山邊 2 臺分  $E_y = 548 \text{ kW} \cdot \text{sec}$

千手 2 臺分  $E_s = 1,476 \text{ "}$

而して  $E_y : E_s = 548 : 1,476 = 1 : 2.69$

一方第 4, 5 圖の  $\tau = 0.637$  秒に於ける發電機出力の増加分、即ち負荷分擔を求めれば略 1 : 2.69 の比になっていることが分る。

なお 1.5 秒附近に於て千手發電所の發電機出力が減少しているのは調相機出力増加の影響による。

(3) 第 6 圖により調相機は過渡時に於て電力の出入

のあることが分る。

(4) 速度減少率に關する日本國有鐵道の要求値は 4% 以下であるが、之れは第 7 圖に示す通りその  $1/10$  以内である。

(5) 負荷及び水車出力曲線

本例に於ては第 2 圖に示す様に何れも直線的に變化するものと假定したが、之れは必ずしも直線的でなくてもよい。寧ろ一般には曲線的變化をするのが普通であるが、その場合でも同様にして求められることを附記しておく。

(6) 内部誘起電壓について

前述の通り各同期機の内部誘起電壓の大きさを一定と考えたが、實際問題として本例の様に 2 秒程度の變化を取扱う場合には若干無理があると思う。

しかし一方この様な面倒な計算に更に電壓の大きさの時間的變化をも採り入れることは極めて煩雜となるので一般の例に倣い一應この様に假定した。

[V] 結 言

(1) 第 3 圖で明らかな通り、この場合は脱調しないと考えられる。且つ各曲線とも變化量は極めて少ない。

(2) 負荷は前述の様な條件のもとでは水車調速機が動作を開始する迄は、兩發電所の水車發電機が速度減少によつて放出する處の運動エネルギーに正比例してかゝり、以後は案内羽根の開きに應じてかゝる。

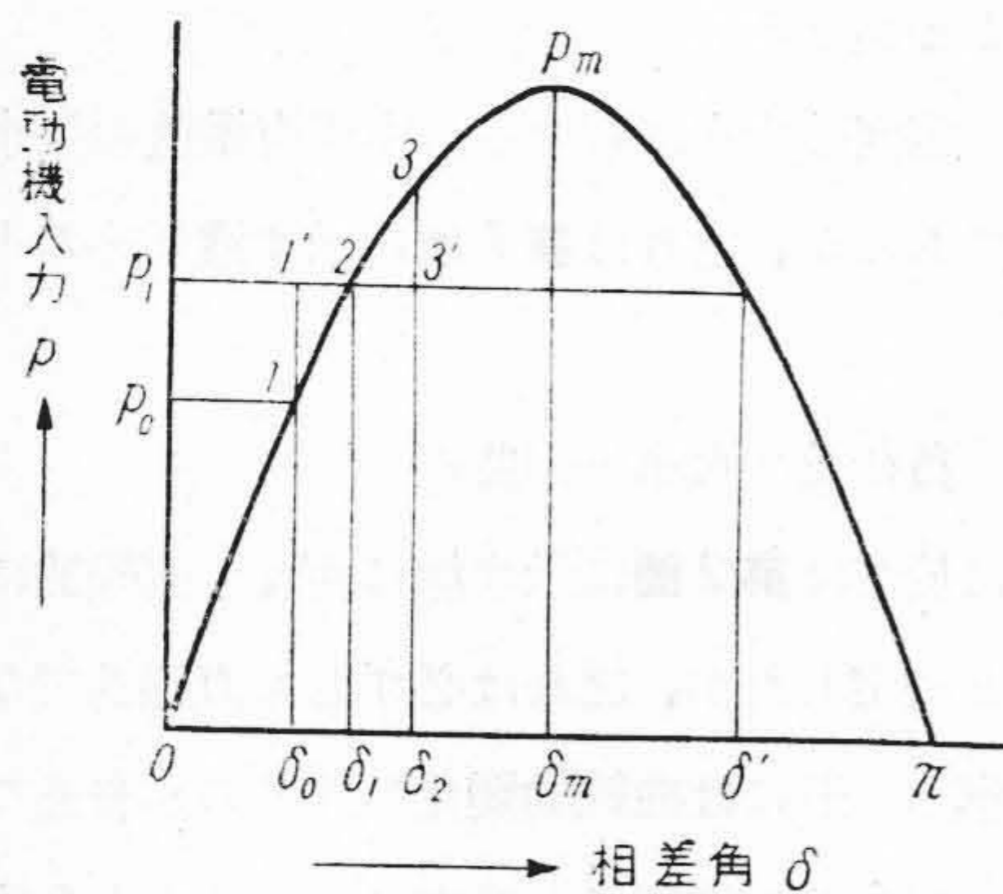
従つてこの場合は最初の間千手發電所の方が多量の負荷を分擔する譯である。

附 録

今發電機と同期電動機と 1 臺宛を送電線に結ぶ場合、即ち純二機系統の場合を考えてみる。但し抵抗分を無視する。そして第 8 圖に示す様に最初  $P_0$  なる負荷がかつていた時、急に  $P_1$  迄増加したとする。扱この場合相差角  $\delta$  對電力  $P$  の間には次の關係式が成り立つ。

$$P = \frac{E_G E_M}{Z_{GM}} \sin \delta \dots \dots \dots (2)$$

但し  $E_G$  : 發電機の内部誘起電壓



第 8 圖 電力—相差角曲線  
Fig. 8 Power-angle Curve.

$E_M$  : 電動機の "  
 $Z_{GM}$  : 発電機電動機間の相互インピーダンス

或は 
$$P_m = \frac{E_G E_M}{Z_{GM}}$$
 とおけば

$$P = P_m \sin \delta \dots\dots\dots (3)$$

依つて所謂等面積法 (Equal-area method) の原理により

$$\begin{aligned} \text{面積 } 11'2 &= \int_{\delta_0}^{\delta_1} (P_1 - P_m \sin \delta) d\delta = P_m \\ &\times \left\{ (\delta_1 - \delta_0) \sin \delta_1 + (\cos \delta_1 - \cos \delta_0) \right\} \dots\dots (4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{面積 } 23'3 &= \int_{\delta_1}^{\delta_2} (P_m \sin \delta - P_1) d\delta = P_m \\ &\times \left\{ -(\cos \delta_2 - \cos \delta_1) - (\delta_2 - \delta_1) \sin \delta_1 \right\} \dots\dots (5) \end{aligned}$$

そこで (4)、(5) 式の右邊を互に等しいとおけば  
$$\cos \delta_0 + \delta_0 \sin \delta_1 = \cos \delta_2 + \delta_2 \sin \delta_1 \dots\dots (6)$$

且つ  $\delta'$  を  $\delta_2$  の安定極限值とすれば  $\delta' = \pi - \delta_1$  であるから、 $\delta_2 = \pi - \delta_1$  を (6) 式に代入して  
$$\cos \delta_0 + \delta_0 \sin \delta_1 = -\cos \delta_1 + (\pi - \delta_1) \sin \delta_1 \dots\dots (7)$$

この式より  $\delta_0$  に対する  $\delta_1$  或は  $P_0$  なる當初負荷に対し安定範囲内に於て附加し得る最大負荷を求めることが出来る。即ち第 9 圖はこの関係を示す曲線で、横軸は當初負荷  $P_0$  縦軸は之れに附加し得る最大安全負荷  $\Delta P = P_1 - P_0$  を表わす。なおこの曲線は概略次の方程式で示すことが出来る。  
$$\Delta P = 0.75 (P_m - P_0) \dots\dots (8)$$

扱、以上の理論を今回の實例に應用してみる。それが

ために同期調相機を除外する。(受電端變壓器の三次側を開路する) そして発電機の誘起電壓は前述の通り  $E_g = 1.26$   $E_s = 1.25$  であるから便宜上之等を一括して 1 臺の等價発電機で代表させる。回轉變流機も同様に 1 臺で代表させる。然る時は所謂純二機系統の問題に歸着してしまう。更に負荷は瞬間的に増加するものと假定してみよう。今  $E_g$  を基準に採り之れを 1 とおけば  $E_b = 1.071$   $58^\circ 36'$   $\delta_0 = 58^\circ 36'$  且つ  $Z_{gb} = 0.914$  (102,400 kVA を基準にとり單位法で表わす) 然るときは

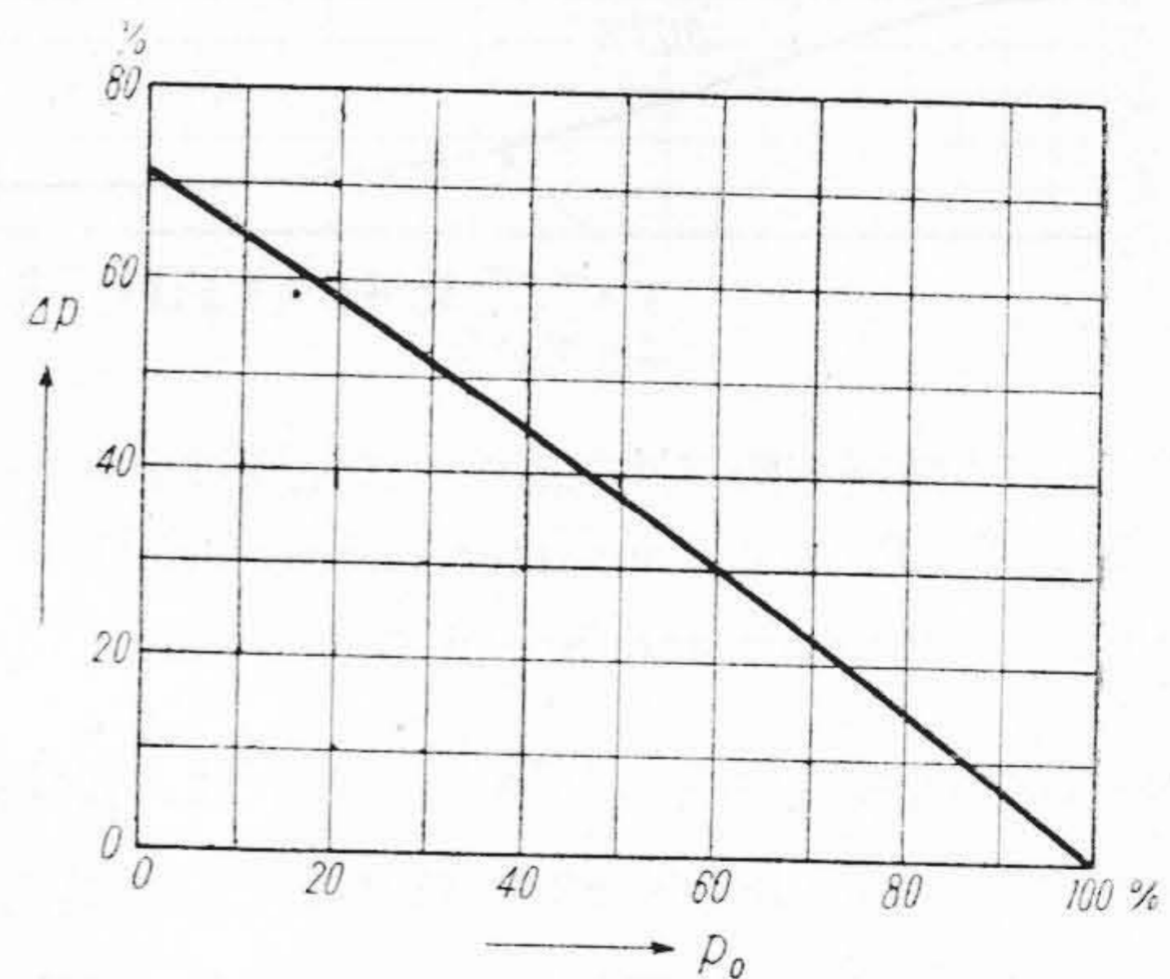
$$\begin{aligned} P_{g0} = -P_{b0} &= \frac{E_g E_b}{Z_{gb}} \sin \delta_0 = \frac{1 \times 1.071}{0.914} \sin 58^\circ 36' \\ &= 1.172 \times 0.8535 = P_m \times 0.8535 = 1 \end{aligned}$$

或は  $P_{b0} = 1$   $P_m = 1.172$

即ち第 8 圖に於て  $P_0 = 1$   $\delta_0 = 58^\circ 36'$   $P_m = 1.172$

$\delta_m = 90^\circ \therefore \Delta P = P_1 - P_0 = 0.75 (P_m - P_0) \doteq 12.9\%$  即ち約 13%

或は又  $\frac{P_0}{P_m} \doteq 85.3\%$

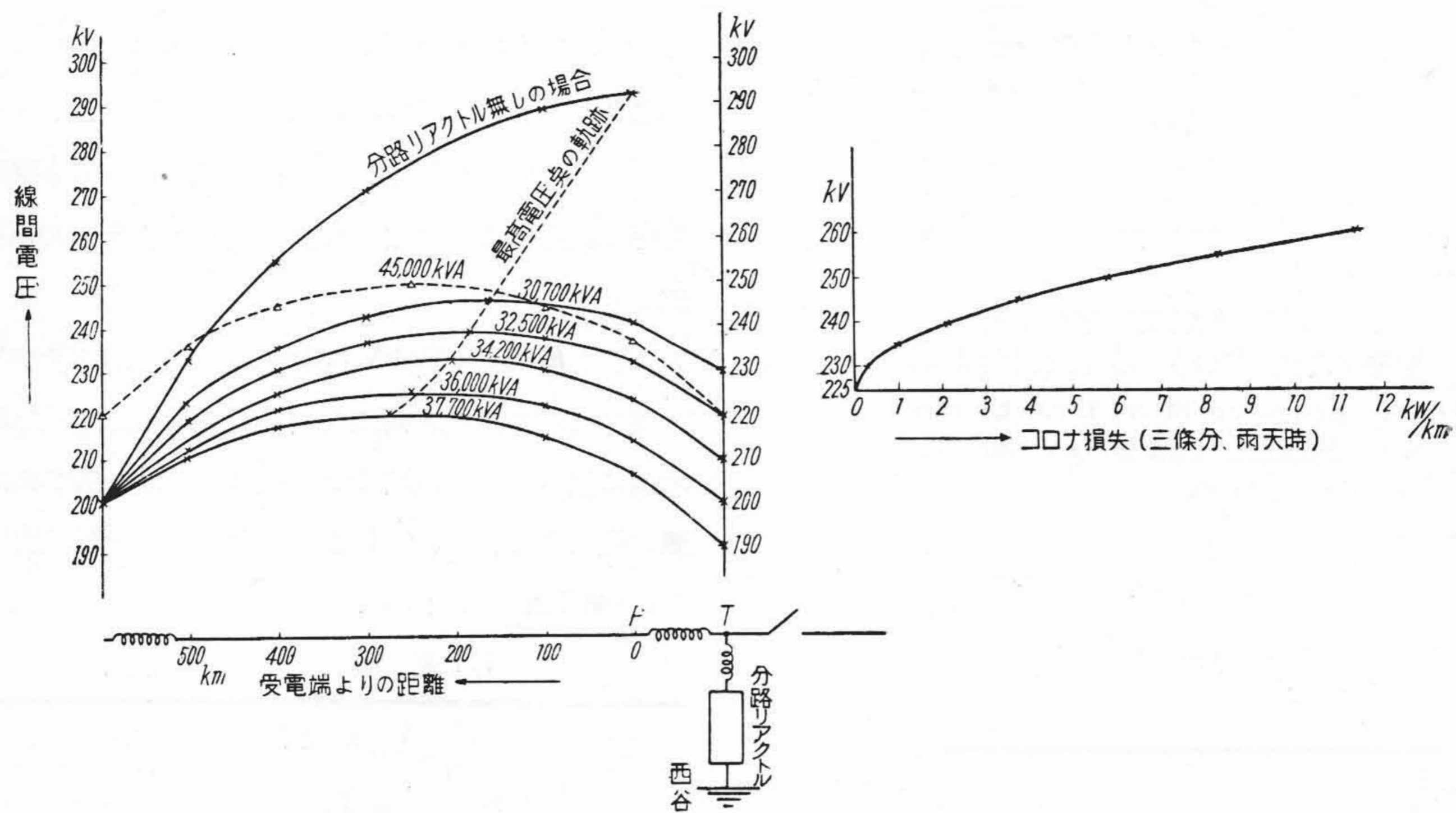


第 9 圖 當初負荷對附加許容負荷曲線

Fig. 9 Curve showing relation between Initial Load and allowable additional Load.

依つて第 9 圖より  $\Delta P \doteq 13\%$  を得て何れも同一結果を得る。扱以上の結果は最初にも述べた通り全體を純二機系統と考え、且つ負荷は瞬間的に増加するものとの苛酷な條件のもとに於て求めた。即ちこの様に苛酷な諸條件のもとに於てさえも 13% 迄負荷を増しても安定なことが分つた。實際には調相機あり且つ負荷は瞬時に増加するのでないから條件は遙かに樂となり、従つて 13% よ

(以下第 86 頁につゞく)



第 3 圖 無負荷充電時に於ける電壓分布並びにコロナ損失曲線

Fig. 3 Voltage Distribution and Corona Loss Curves at no Load charging.

参 考 文 献

Nesbit: Electrical Characteristics of Transmission Circuits

(第 68 頁よりつづく)

### 発電所並列運転の過渡安定度及び負荷分擔

有 賀 浩

りは相当大きくとることが出来よう。即ち約 20% 負荷が増加しても先づ脱調の心配はなかりと大體の豫想をつけ、然る後に詳細な計算を行つた次第であり、結果は案に違わず安定運転の出来ることが分つた。

つまり本例の様に相当複雑な諸条件のもとに算定する

場合には豫め以上の様な簡略化した回路条件につき豫備計算を行つて大體の傾向を調べておくことは強ち無意味でもあるまいと考え茲に附録として蛇足を加えた次第である。