

水銀周波数変換装置の運転特性

Operational Characteristics of the Mercury Frequency Changer

高 林 乍 人*

Hayato Takabayashi

内 容 梗 概

水銀周波数変換装置は静止形でかなり広い範囲の可変周波数交流電源になりうるが、従来の回転機類とかなり違った特性をもっている。ここでは同期発電機と接続して負荷をもつ場合の運転特性について述べ、その運転しうる範囲について論じた。

転流電流の計算を示したあと、変換装置の出力による交流回路電圧の変動状況を明らかにし、電圧に関する安定条件や、変換装置の接続される回路における同期機間の同期化力を求めた。

つづいて、2,000 kW 変換装置における実例をかかげ、実際運転で問題になる回路定数間の関係と、過渡状態の現象に対する対策を明らかにしている。

1. 緒 言

水銀周波数変換装置が安定に運転されるためには、消イオン時間の短い逆耐圧の強いすぐれた水銀整流器や、品質良好な各種補助機器よりなりたつことはもちろんであるが、水銀周波数変換装置が従来よく理解されている回転機類と非常に異なった特性を有することを十分につかんで、その運用を適切にすることが重要な要素になっている。

日立製作所では 2,000 kW 水銀周波数変換装置を東洋紡績株式会社に納め、130~150~電源として、世界的な並列同期機容量の少なさをもちて誘導電動機を負荷とし、すでに数年の運転をつづけている。

ここにこの実例をあげつつ、水銀周波数変換装置の運転について述べ、交流回路にある機器としての特長を記述する。

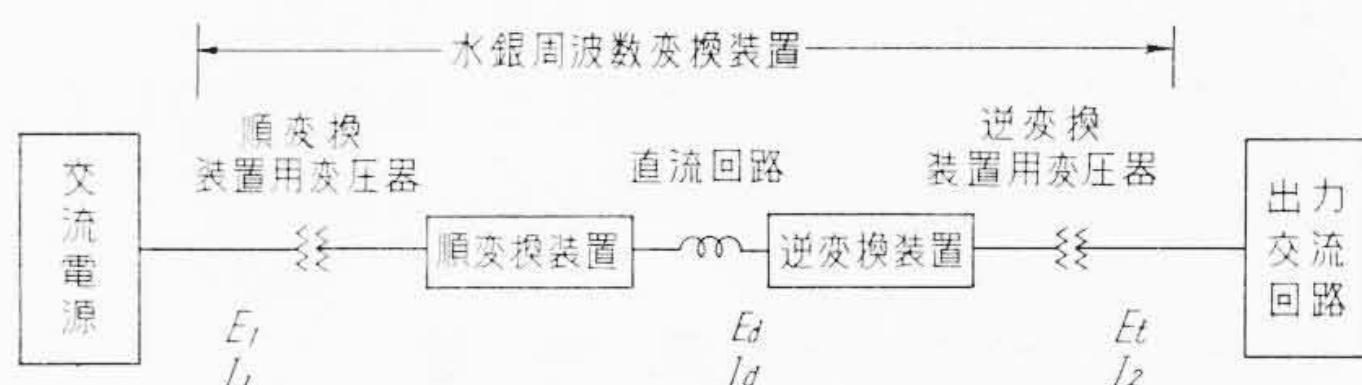
水銀周波数変換装置は直流送電と密接な関係をもっている。水銀周波数変換装置は直流回路に単にリアクトルを有するのみであって、その値も小さいのが普通であるが、直流送電ではこの部分が長距離の架空送電線やケーブル送電線となり、リアクトルも持っているので、過渡状態での現象が複雑になる。しかし運転という立場よりみれば、その状況に差異はなく、この資料も参考になるであろう。

2. 同期発電機との比較

水銀周波数変換装置の動作原理や、無限大母線に接続された場合の簡単な特性は、すでに幾多の発表があり、ここにあえて再記される必要はないであろう。本文においては特に明示されないかぎり、自制式の、すなわち交流出力側の母線電圧によって格子制御の行われる方式の場合について述べられるものとする。

水銀周波数変換装置の特性中最初に上げられるものは

* 日立製作所日立工場



第1図 水銀周波数変換装置系統図

(そこに適当な変換定数を与えられるであろうが)受電交流電圧と出力端交流電圧の差に比例して、出力電流が生じること、および、その出力電流の力率が一定なることである。第1図を参考にして式で示せば、

$$I_1 \propto I_d \propto I_2 \propto E_1 - E_d \propto E_d - E_t \propto E_1 - E_t \dots (1)$$

ただし I_1 : 受電交流電流

E_1 : 受電交流電圧

I_d : 直流電流

E_d : 直流電圧

I_2 : 出力交流電流

E_t : 出力交流電圧あるいは端子電圧

また

$$\dot{I}_2 = I_\alpha + jI_\beta = I_\alpha(1 + jk) \dots (2)$$

$$k = \tan\left(\gamma + \frac{u}{2}\right)$$

ただし γ : 制御進み角

u : 重なり角

I_α : 出力交流電流の有効分

I_β : 出力交流電流の無効分

とすることができる。 γ が一定で、 u は小さいとして出力電流の力率がほとんど変化せず一定として(1)式を考えるのであるが、基本的な特性の掌握には都合がよい。

ここで同期発電機と比較してみると、同期機では次式が成立する。

$$\dot{E}_0 = \dot{E}_t + jx\dot{I} \dots (3)$$

ただし $\dot{E}_0$: 同期機の内部誘起電圧

$\dot{E}_t$: 同期機の端子電圧

x : 同期機のインピーダンス

I : 同期機の実出力電流

(1)(2)式で定められる関係と相当な差違がある。たとえば、同期発電機の場合は端子電圧に対し任意の力率の電流をうることができるが、水銀周波数変換装置においては一定の力率の電流しか取り出されない。

あるいは、もし水銀周波数変換装置で、内部電圧、内部インピーダンスなるものを想定すれば、内部電圧は端子電圧に対しある一定の固定された位相をもつものであるとの考えが導入されねばならない。すなわち、同期機は内部誘起電圧がその端子電圧に対し自由な位相を取りうるに対し、内部電圧を固定しなければならないように、水銀周波数変換装置は同期発電機に比し、自由度の一つ不足している交流電力発生装置となっている。むしろ内部抵抗をもち端子電圧に対して一定の位相の起電力をもつ交流の電池のごとき性格をもっている。

3. 電 源 特 性

交流電源として出力の出しうる限界を回路要素のみによって定められる範囲で検討してみるに、同期発電機の場合は、たとえば無限大母線に接続されているときは位相角が90度までというような限界がある。一般には出力を P として $dP/d\delta > 0$ の範囲にある。しかして同期発電機にてはその容量が与えられると、その概略特性はおおよそ見当づけられ、同期インピーダンスは100%前後であるというようなことがいえる。

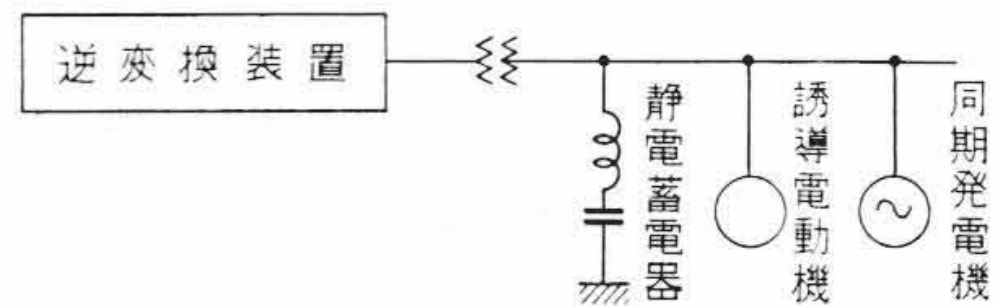
水銀周波数変換装置においては、その重要な運転特性を定める内部抵抗にしてもまだ明らかにしておらず、適当に選択されている。これらは今後幾多の経験のもとに次第に形造られてゆくであろうが、いまでは水銀周波数変換装置の容量から、その運転状態を述べることは困難で、いきおい特性定数から論議されることとなる。

さて水銀周波数変換装置の回路的にみた運転限界を検討するに、二つの事がらが存在する。その一つは転流限界であり、ほかの一つは電圧の安定条件である。

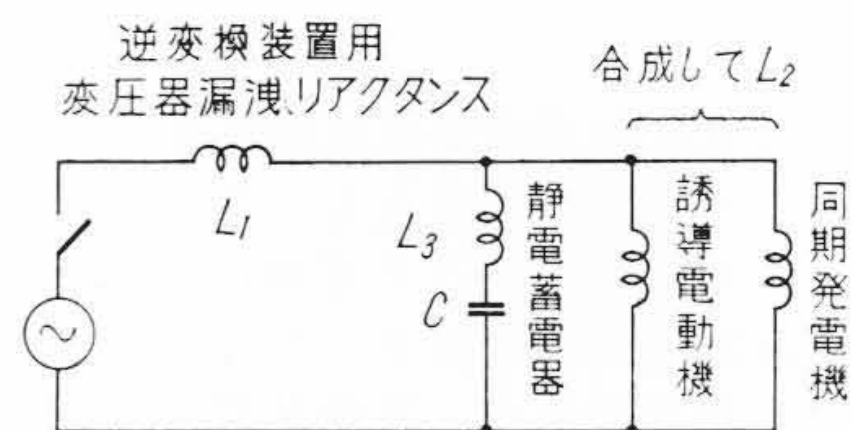
3.1 転 流 限 界

強制転流を行わないかぎり、逆変換装置は制御角を20~40度進みとし、消イオン時間10~20度の余裕を残して転流を終らしめなければならない。これらはその系統に生じうる擾乱の量を推定して定められるが、転流の行れる時間は転流の行れる極間の短絡電流が、転流される直流電流に等しくなるまでの時間で、出力交流回路があたえられると計算でき、鳳テブナンの定理などを利用するのが都合がよい。

第2図はこの例にして、同期発電機を表わすリアクタンスは次過渡リアクタンスを、誘導電動機については拘束試験時の電圧電流より求められるリアクタンス



(1) 運転回路



(2) 転流電流計算回路

第2図 転流時間を求める計算回路例

を利用すればよい。第2図の場合、転流電流は(三相星形)

$$i = \sqrt{2} \frac{\sqrt{3} E_t}{2 \omega (L_1 + L_2)} \times \frac{1 - \omega^2 C (L_2 + L_3)}{1 - \omega^2 C \left(L_3 + \frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2} \right)} \times \left[\cos(\gamma - u) - \cos \gamma + \left(\frac{\omega}{\beta} \right)^2 \frac{\cos \gamma}{\cos \varphi} \right. \\ \left. \times \frac{\left\{ \cos \left(\varphi - \frac{\beta}{\omega} u \right) - \cos \varphi \right\} L_2^2}{\{1 - \omega^2 C (L_2 + L_3)\} \{L_1 L_2 + L_2 L_3 + L_3 L_1\}} \right] \quad \dots\dots\dots (4)$$

ただし

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{\beta}{\omega} \tan \gamma \right) \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{C \left(L_3 + \frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2} \right)}} \quad \dots\dots\dots (6)$$

γ : 制御進み角

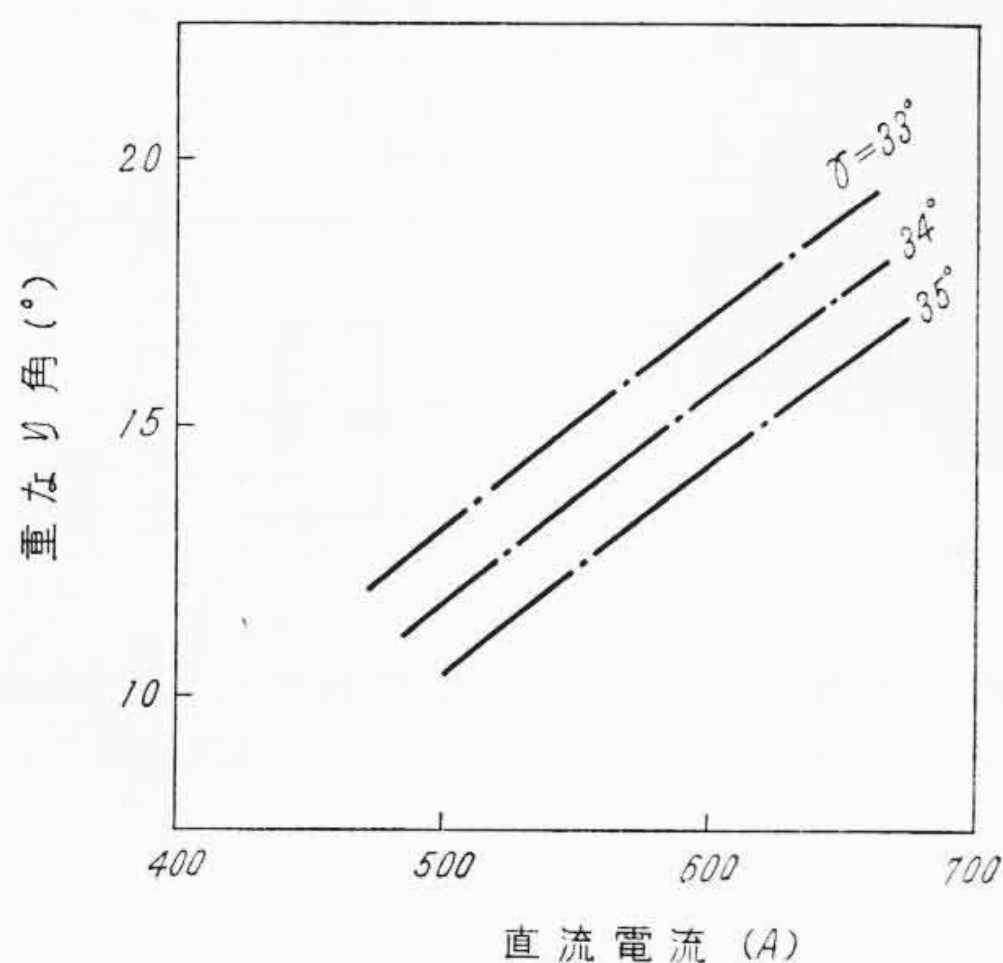
通常、同期発電機の容量が小さくとも、負荷誘導電動機や力率改善用静電蓄電器より与えられる転流電流で十分であるが、それでも端子電圧が30~40%低下すると限界にくるので大きな余裕はない。

第3図は2,000 kW 水銀周波数変換装置にて約1,800 kW の誘導電動機負荷を数台(台数が変化してもほとんど変らない)の600 kVA 同期機と並列して電力を与えた場合を示す。

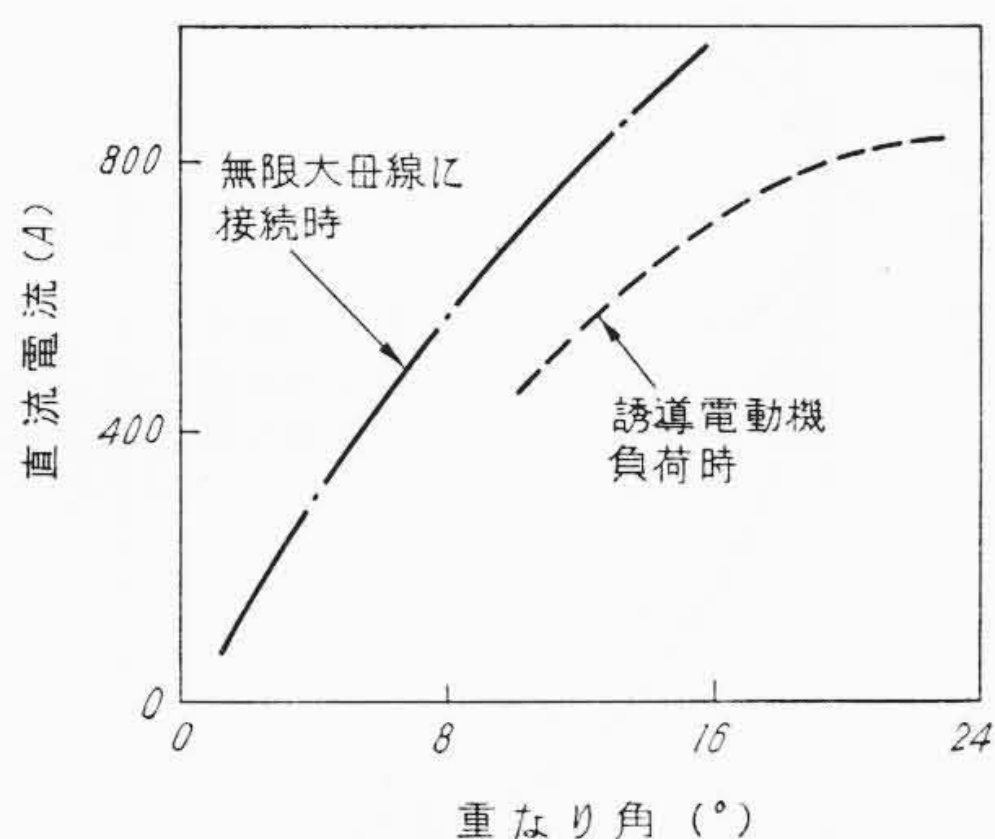
比較のため無限大母線と接続された場合の計算結果を第4図に示すが、かなり減少することはみられる。

3.2 電圧の安定条件

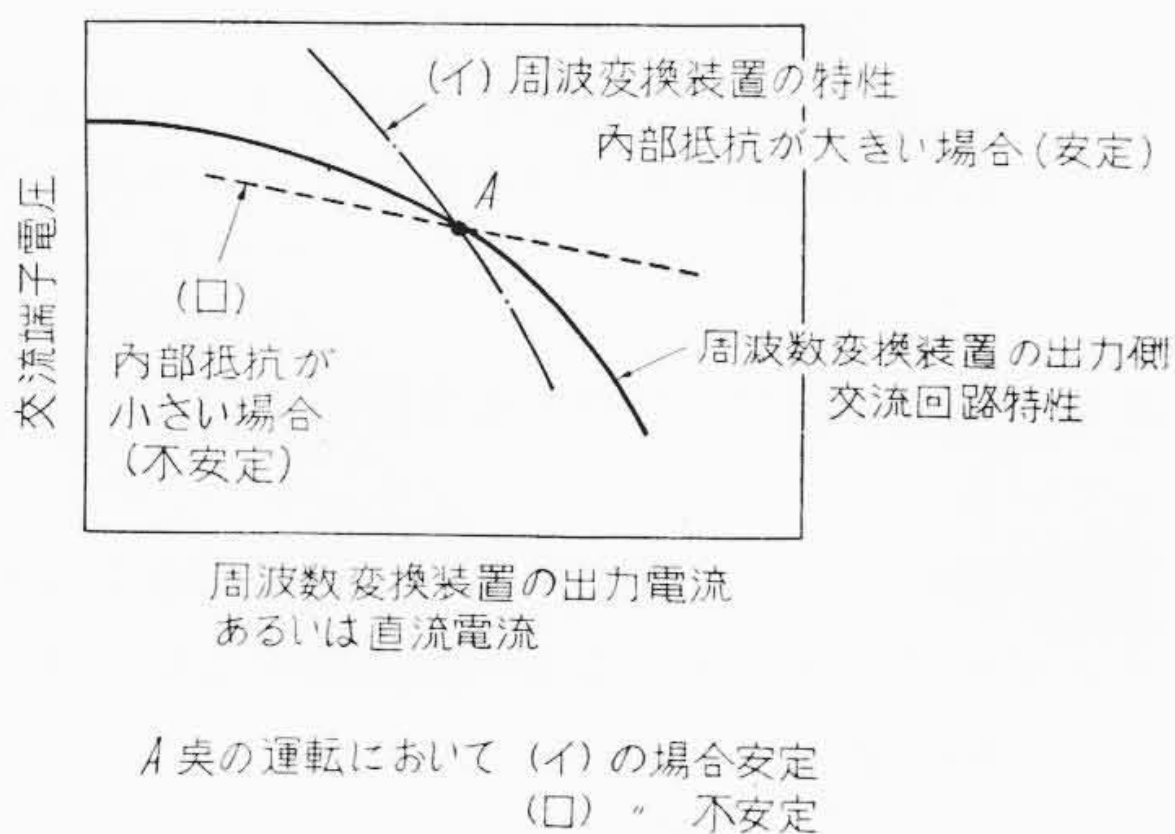
水銀周波数変換装置は出力交流回路電圧が下ると(1)式でわかるように出力電流がまし、同時に(2)式で与えられるごとく、無効電流を出して、同期機や誘導機の電圧を下げる方向に働く。よって、端子電圧の下



第3図 2,000 kW 水銀周波数変換装置の誘導電動機負荷時の重なり角



第4図 2,000 kW 水銀逆変換装置の重なり角と直流電流との概算比較



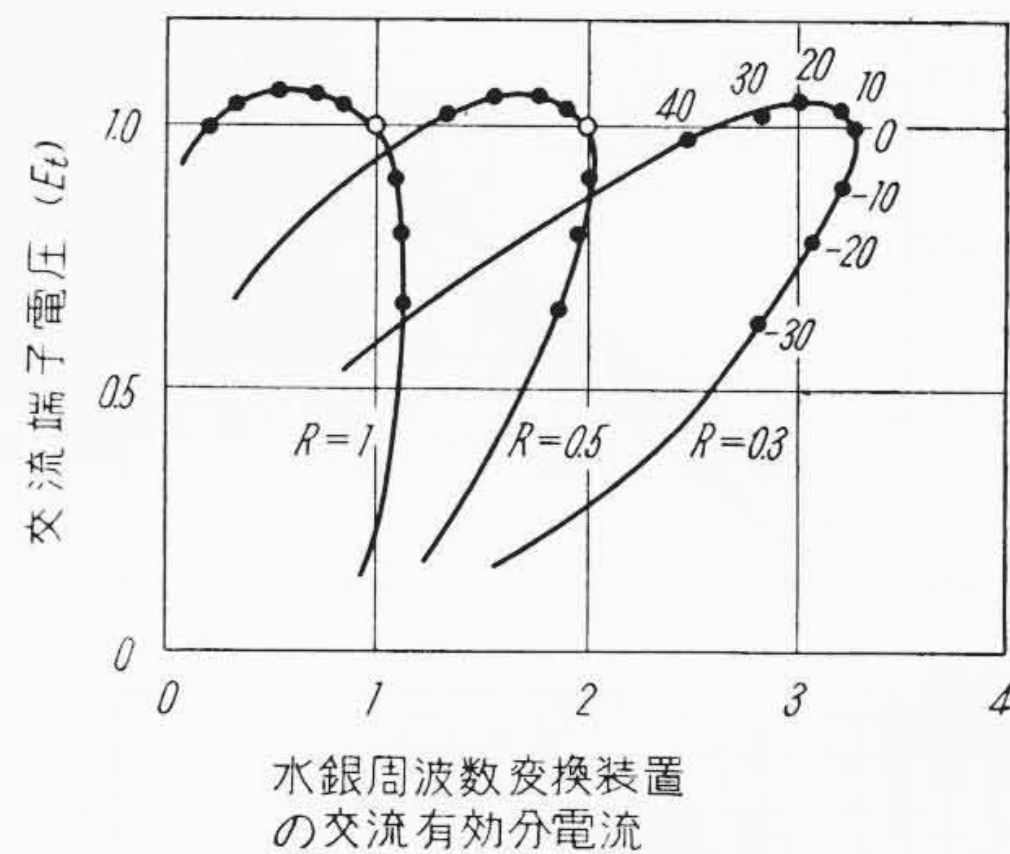
第5図 電圧の安定条件の説明図

る量が多くなれば結果が原因を上回ってついに破滅に達する。第5図はその図解例である。

水銀周波数変換装置、並列負荷および同期機が接続されている場合の端子電圧変動は次式で与えられる。

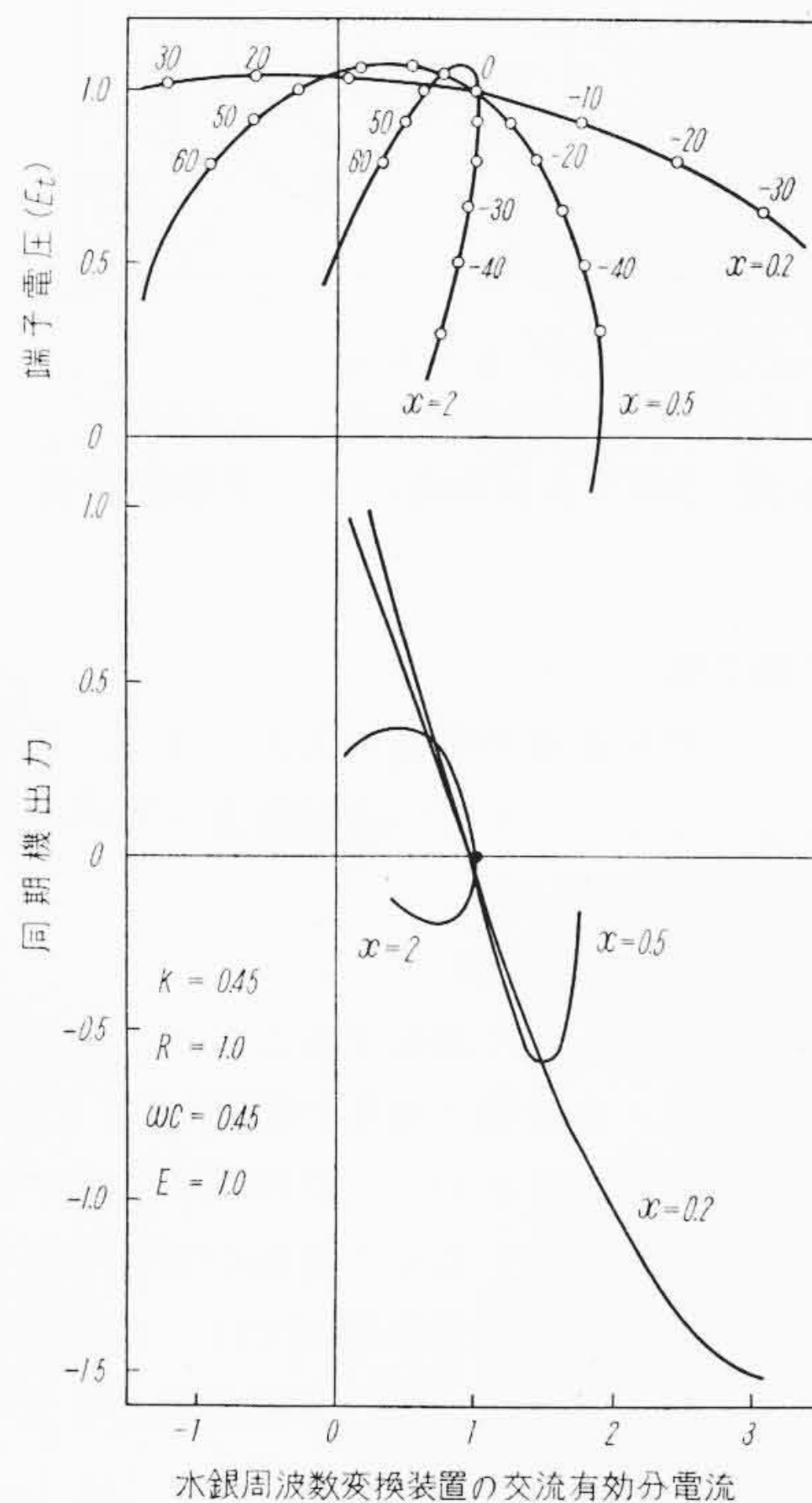
$$I_d = \sqrt{1+k^2} \times \frac{E_0 \left[\cos \delta - \frac{R}{x} (1 - \omega C x) \sin \delta \right]}{R(1 - \omega C x) + kx} \quad (7)$$

$$E_t = \frac{E_0 R (\cos \delta + k \sin \delta)}{R(1 - \omega C x) + kx} \quad (8)$$



数字は同期機の位相角を示す。
ただし $E=1$ $X=1$ $\omega CR=k=0.5$

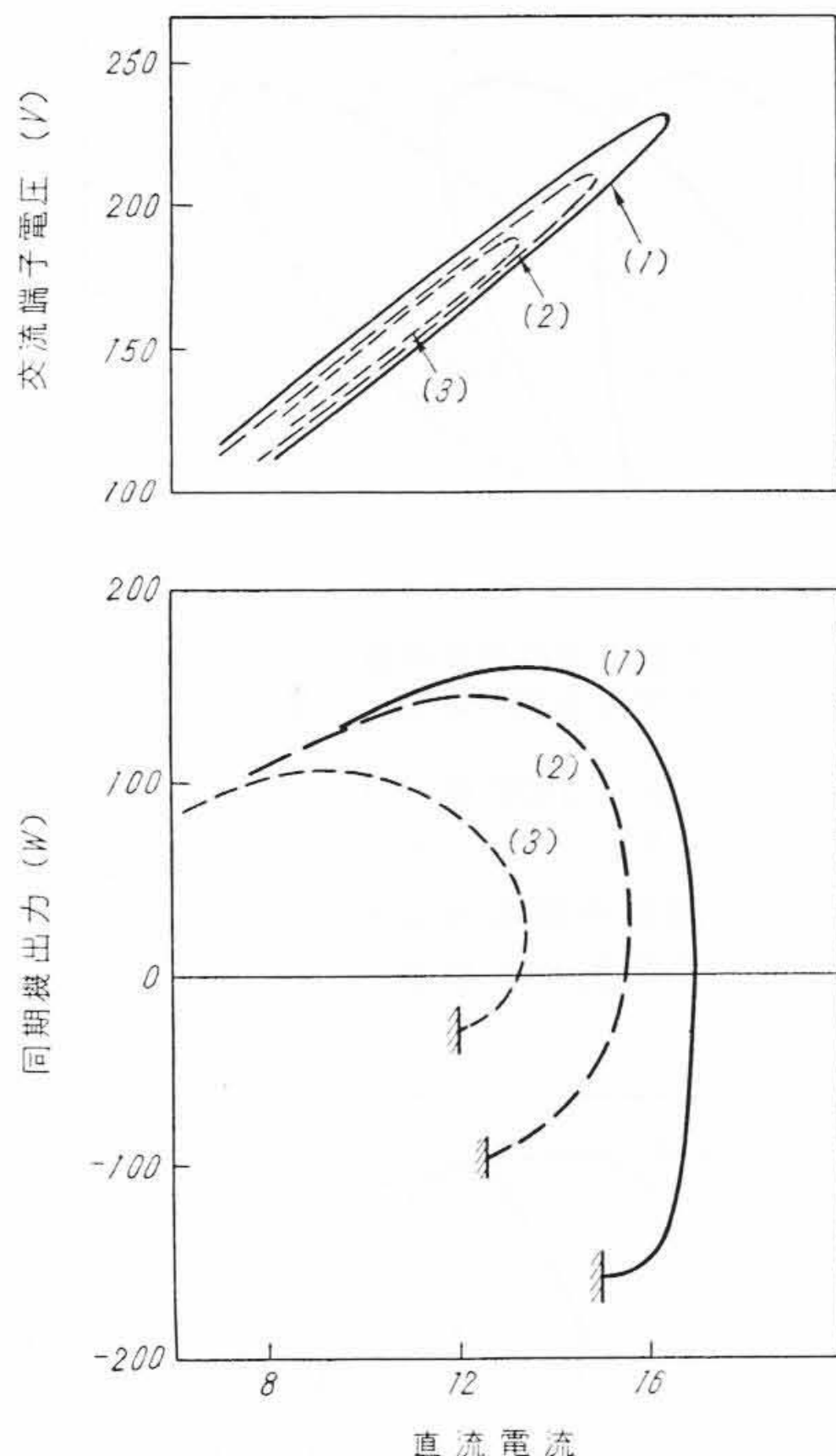
第6図 水銀周波数変換装置の出力と端子電圧の関係、負荷抵抗の影響



第7図 水銀周波数変換装置の出力と端子電圧および同期機出力との関係

ここに E_0 : 同期機の内部誘起電圧
 x : 同期機のリアクタンス
 R : 並列負荷の並列に考えた抵抗分
 C : 並列負荷の並列に考えた静電容量分
 δ : 同期機の位相角
 $k = \tan \gamma$
 I_d : 水銀周波数変換装置の電流
 E_t : 端子電圧

I_d と E_t との関係は長円となる。その計算例を 第6



(1)(2)(3)は変換装置内部抵抗の変化の影響

第8図 500V A同期機による実験結果例

図および第7図に示す。

これより同期発電機の容量の大きいほど、その負荷のかかっているほど、あるいは制御進み角の小さいほど運転が安定になる。

3.3 同期機の電動機運転

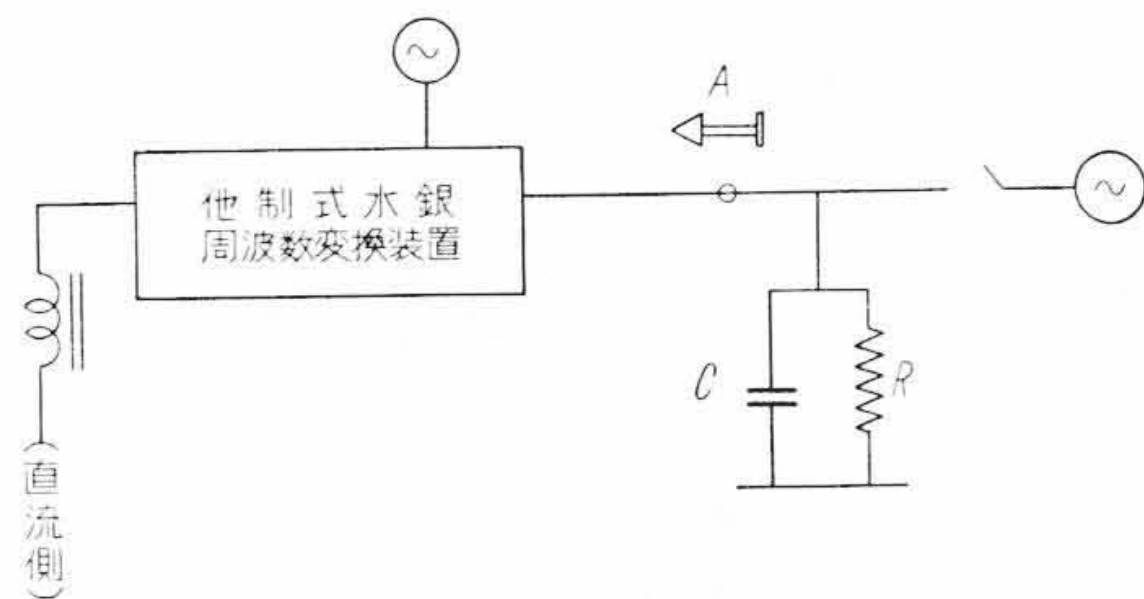
同期機を電動機として運転することは、水銀周波数変換装置の出力と交流端子電圧の関係(たとえば第6, 7図より)からわかるとおり、位相角の小さい付近は電圧の安定条件が成立しにくく運転が困難である。

また同期機が電動機である範囲では、水銀周波数変換装置の出力電流が減少するほど電動機としての出力が増加するような現象が起りうる。

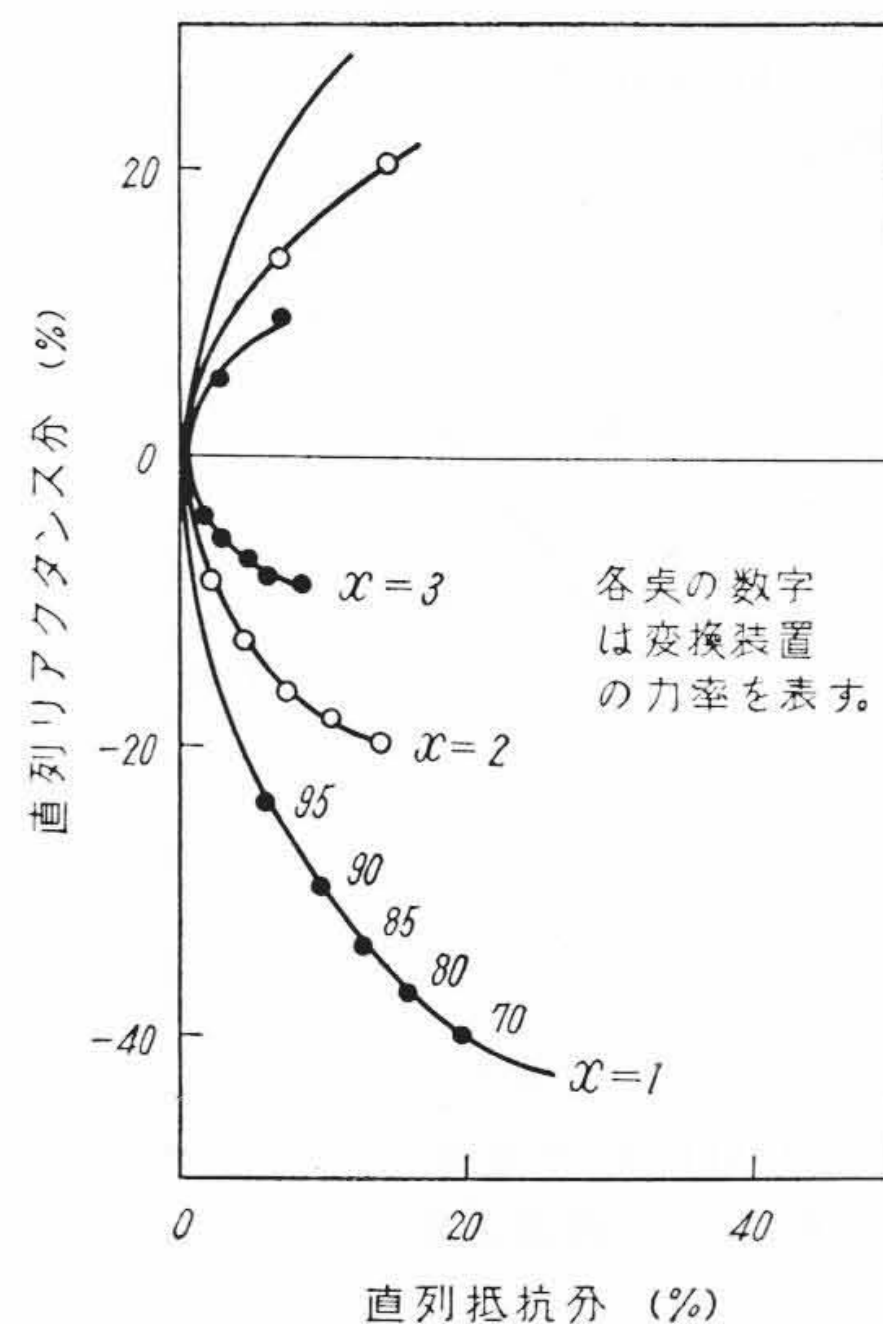
第8図は同期機容量が並列に接続されている抵抗負荷より相当に小さい場合の実験結果で、同期機容量が小さいため、その慣性による系統の乱れを起さず若干の周波数変動が生じて安定条件を克服して運転されたものである。しかして安定度より来る運転限界の位相角は端子電圧に対して90度よりはるかに小さい所に生じている。

3.4 他制式の場合

自制式を制御角 γ が一定で周波数が変化し安定化せんとする回路とみるなら、他制式は周波数が一定で γ の変化する回路であり、電圧に関する安定条件がないので電源インピーダンスを小さく取りうるから場合に



第9図 他制式水銀周波数変換装置の見掛けのインピーダンスを求める点を示す説明図



(ただし $E=1, R=1$ (14) 式による)

第10図 同期機に対する($\delta=0$ のとき)他制式水銀周波数変換装置の見掛けの電源側インピーダンス

より都合がよいが、特性として非常に特殊な様相をもっている。

第9図においてA点よりみた交流電源としての内部インピーダンスを求めると(同期機のないとき)

$$E_d - E_t \cos \gamma = r I_d \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$I_d \cos \gamma = \frac{E_t}{R} \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$I_d \sin \gamma = \omega C E_t \quad \dots\dots\dots (11)$$

の条件より、微少な負荷変化を想定して電源インピーダンス Z_0 を求める。 r が小さいものとしてこれを無視すると、抵抗分変化に対し

$$Z_0 = R \sin \gamma (\sin \gamma - j \cos \gamma) \quad \dots\dots\dots (12)$$

リアクタンス ($j\omega L$) 分の変化に対し

$$Z_0 = \frac{1}{\omega C} (\sin \gamma \cos \gamma + j \sin^2 \gamma) \quad \dots\dots\dots (13)$$

同期機が存在するときは、その無負荷同期電動機に対し

$$Z_0 = \frac{x}{1 + \frac{R}{x} \sin 2\gamma + \left(\frac{R}{x}\right)^2 \sin^2 \gamma} \times \left[\frac{R}{x} \sin^2 \gamma - j \left\{ \frac{R}{x} \sin \gamma \cos \gamma + \left(\frac{R}{x}\right)^2 \sin^2 \gamma \right\} \right] \quad (14)$$

となる。(14)式の計算例を第10図にかかげる。同期機をつなぐとき、電源インピーダンスに抵抗分と直列静電器に相当するリアクタンス分が存在し、これがため同期機の負制動現象を生じる。

250 kW 同期電動機で実験すると $r/x_q - x_c$ が 20% 以下になるとほぼ安定になる (ただし (14) 式で $Z_0 = r - jx_c$ とし x_q は横軸同期リアクタンスとす)。

3.5 強制転流

進み制御角で運転される通常の方式の場合には、出力側交流系統にリアクトル追加などによる無効電力の増加があると、その交流電圧は降下せんとする。このとき水銀周波数変換装置は、その端子電圧の降下に従って有効分の電力のみならず、多くの進相無効電力をも出してますます系統電圧を下げんとする働きをなす。

他制式の場合は制御角が小さくなって転流失敗が生じやすくなる。

これは普通運転される交流系統が回転機類よりなり、周波数が一定の運転で、無効電力によって系統電圧が左右されやすい特長をもっている。

同期発電機では端子電圧が下れば遅相無効電力を出して、系統電圧を上げる作用をなすが、水銀周波数変換装置においては、有効分電力を増加させるが、周波数が一定であると系統電圧の上昇には大きな効果がなく、その無効電力の増加は、さらに系統電圧を下げる方向に働く。

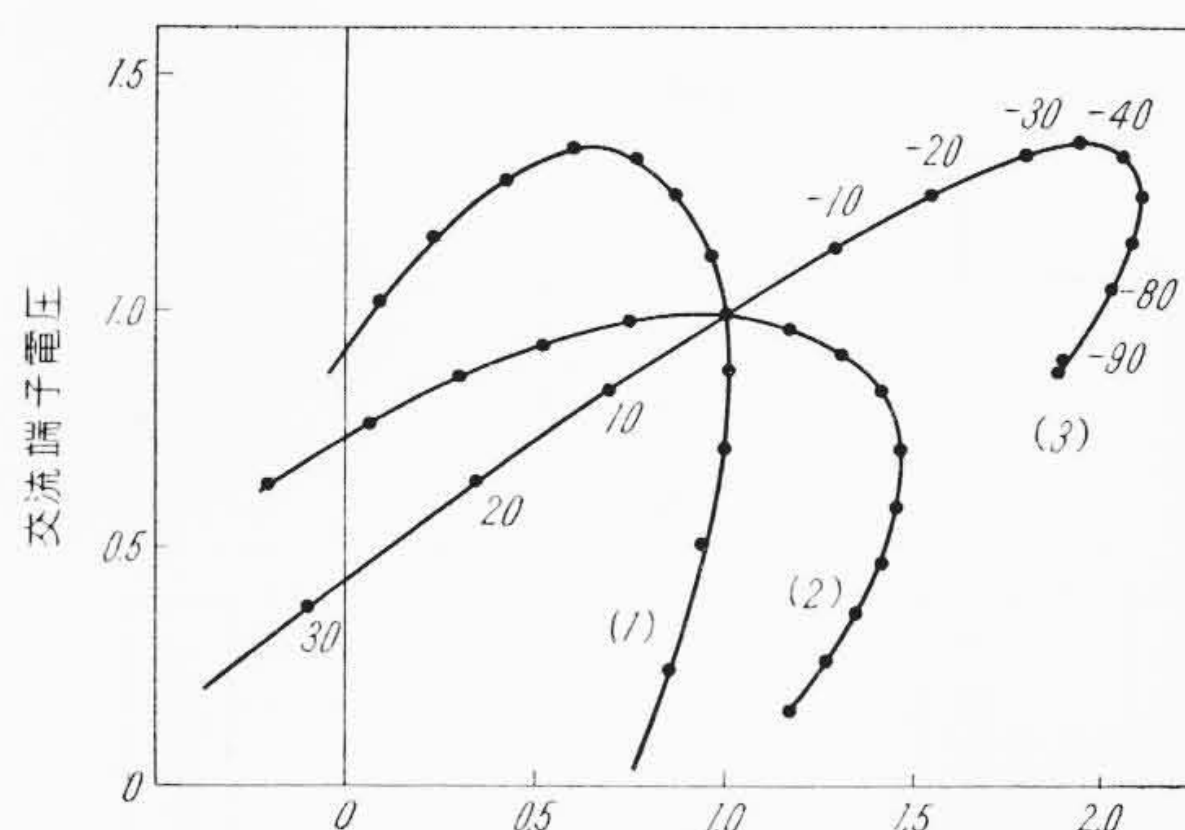
回転機の接続していない回路ならば、有効分電力は有効に働き、周波数の変化と相まって電圧の上昇が起りうる。

回転機の存在する交流系統で水銀周波数変換装置が存在すると、この電圧変動に対し弱い点があり、案外めんどろな問題が生じるわけである。

強制転流方式は、遅れ制御角で運転する方式で、これらの欠点がほとんど改善され非常に都合がよい。系統電圧が下ると、有効電力のみならず、遅相無効電力をも出して、系統電圧降下を止めるように、同期機のように作用する。

この強制転流方式にはすでに幾多の発表がなされているので、発表は省略するも、その運転特性を述べると第10図ならびに第11図がそれである。同期機の電動機運転も容易になることがわかる。

われわれは工場の 3,000 kW 試験装置で二、三の実験を試みたが、誘導電動機の起動に対しても気楽になり、



水銀周波数変換装置の交流有効分電流

$$(1) \quad k = \tan \left(\gamma - \frac{u}{2} \right) = 0.9$$

$$(2) \quad k = \tan \left(\gamma - \frac{u}{2} \right) = 0$$

$$(3) \quad k = \tan \left(\gamma - \frac{u}{2} \right) = -0.9$$

第11図 水銀周波数変換装置の出力と端子電圧との関係

接続された同期機に対しても、電源インピーダンス特性が同期発電機に似てきて、負制動現象を避けることができた。

欠点は現方式では逆変換装置の水銀整流器にかかる逆電圧が大きくなること、ならびに周波数が高くなると消イオン時間などが問題になり、使用しにくいことなどである。しかしこれらは状況によって検討すべきものであろう。

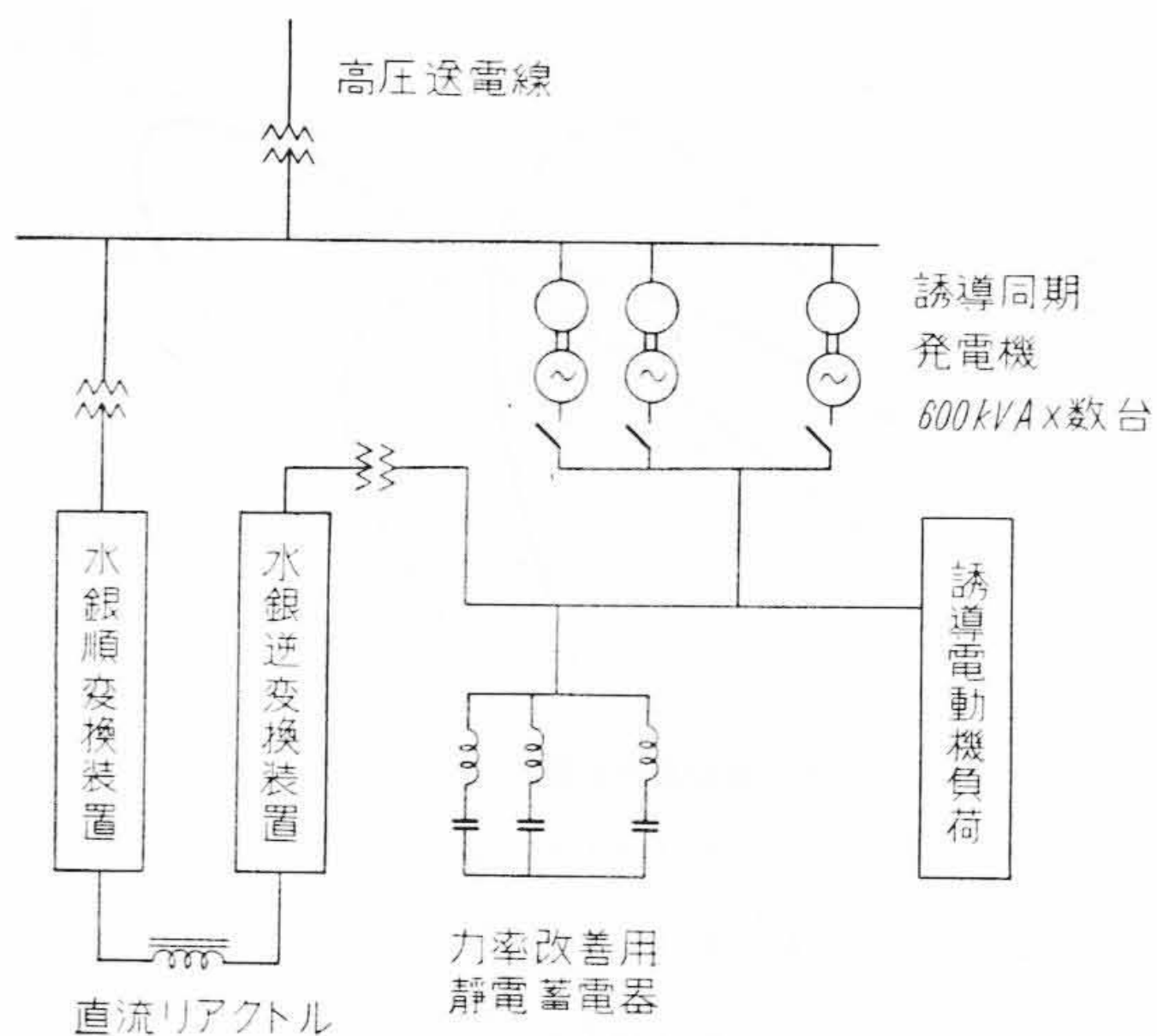
4. 2,000 kW 水銀周波数変換装置の運転特性

大容量機器の運転も別に実験室で行う数 kVA の少容量機器の結果と異なった特殊な現象は生じない。転流失敗しないこと、電圧に関する安定条件を十分に満足できるように計画し運転方法を正しくすることで安定に運転が続けられている。

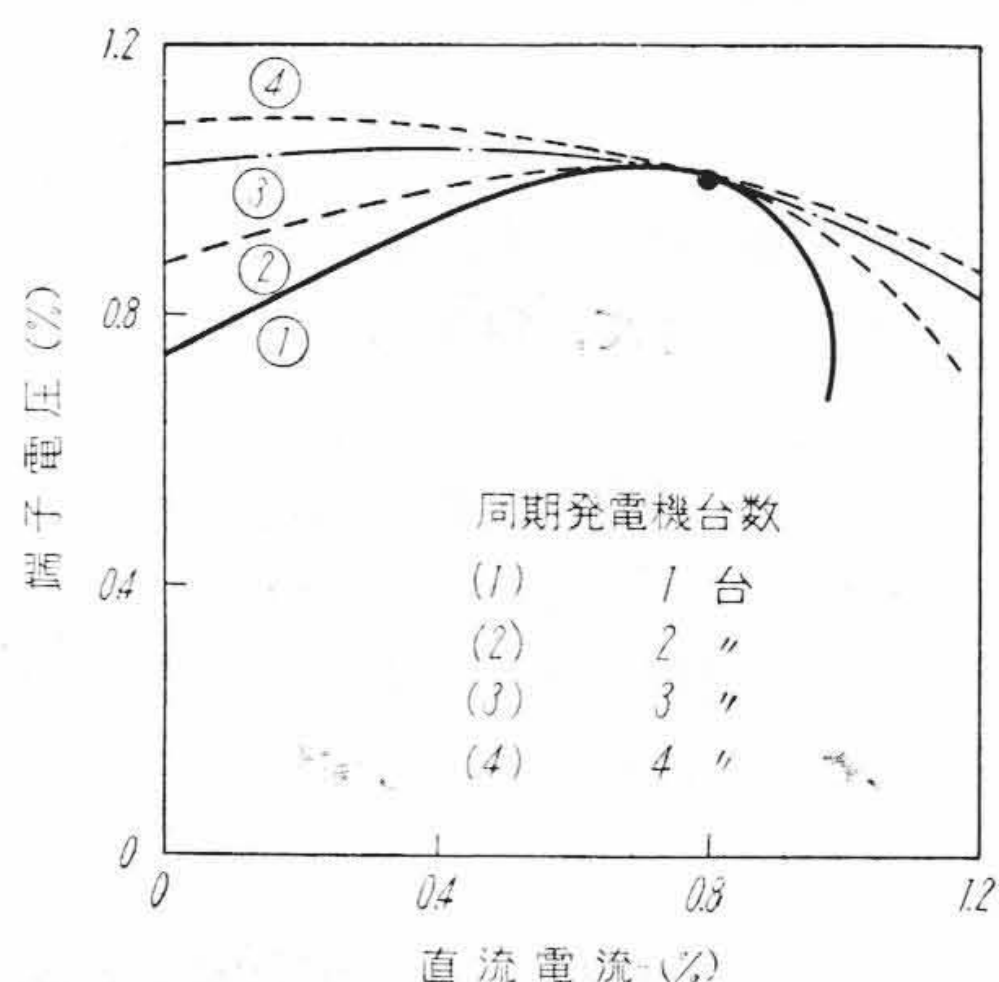
この系統は第12図にかかげられている。その特性例として第13図は負荷が約 1,850 kW に対しその80%を変換装置、残りを同期発電機でもち、水銀周波数変換装置の力率改善には 400 kVA の静電蓄電器を用いる場合について同期機台数をパラメータにして計算されたものである。

実際は重なり角が変動し、よって等価な制御進み角 $\gamma - u/2$ が変化するとともに、端子電圧によって γ 自身が適当に変化するようにくふうされていて、同期発電機が1台の場合でも、第14図のような電圧変化特性が得られ安定化されている。

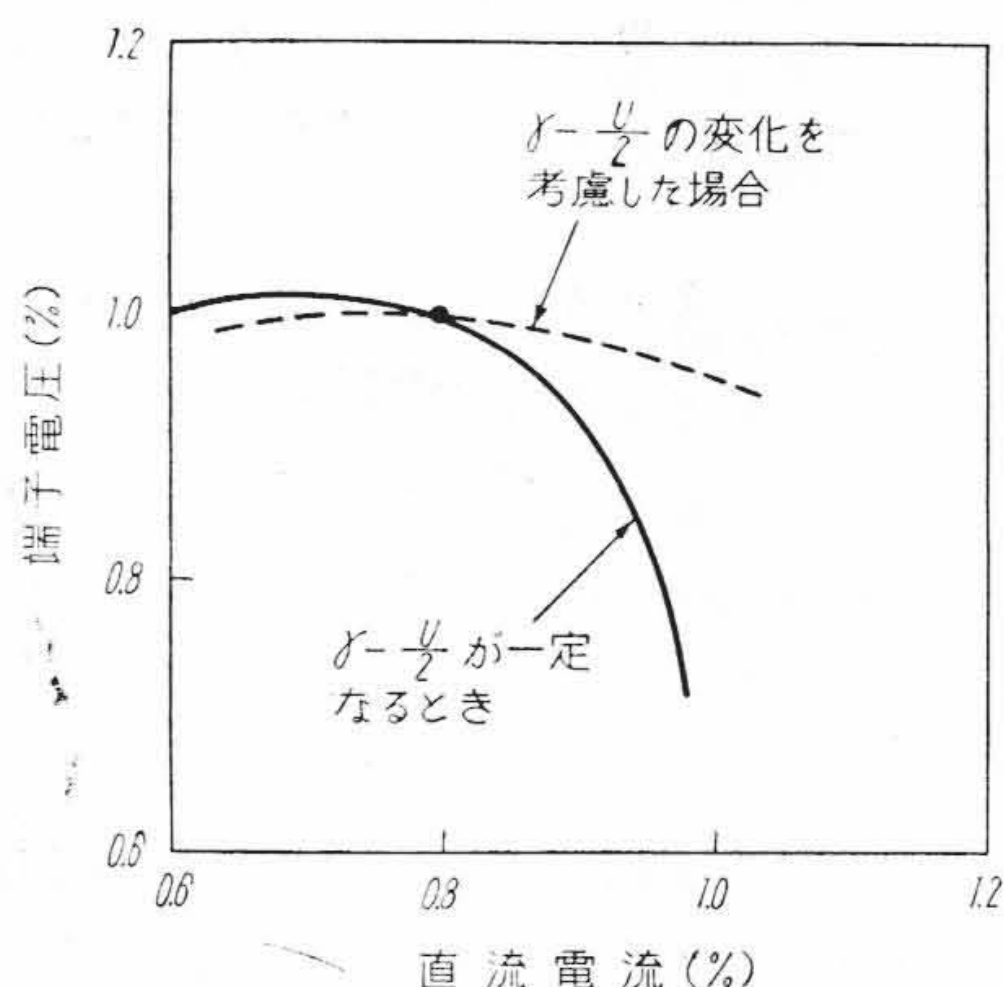
運転特性は水銀逆変換装置の内部抵抗を大にし、端子電圧の変動に対して出力電流の変化が少ないほど、その無効電流の処置が容易になるであろうが、系統の電力の



第12図 2,000 kW 水銀周波数変換装置系統図



第13図 2,000 kW 水銀周波数変換装置の並列同期発電機台数による運転特性



第14図 2,000 kW 水銀周波数変換装置が一台の同期発電機を並列したときの実際の運転特性計算値

擾乱に対する能力が減少する欠点が生じる。われわれは第14図のように安定した交流系統にして、内部抵抗を等価的に30%以上に選び、かつ自動制御装置によってバ

ックアップしてこれらの欠点を除去した。

交流系統において定常運転特性が安定であることはもちろんのこと、各種の操作に対する過渡特性、特に水銀周波数変換装置を再閉合する場合に問題が生じないことも当然の要求である。この点について若干言及する。

4.1 同期機間の状況

水銀周波数変換装置および負荷の接続されている交流系統において2台の同期機を考え、この同期機間の同期化力という問題がある。

同期化力とは位相角変動に対する出力の変化割合で、負になると同期はずれを生じるのであるが、変換装置の存在する系統で直接同期化力を求めるのは困難であるので位相角の関係より、交流系統を解析するのが都合がよい。

二つの同期機の、その端子電圧に対する位相角について、計算すると次式をうる。

$$\frac{E_1}{x_1} \left(\cos \delta_1 - \frac{a}{b} \sin \delta_1 \right) + \left(\frac{E_2}{x_2} \cos \delta_2 - \frac{a}{b} \sin \delta_2 \right) = \left(\frac{a}{b} + k \right) \frac{E_d}{r_d} \quad (15)$$

ここに

E_d, r_d : 直流回路の無負荷内部電圧ならびに内部抵抗

E_1, x_1, δ_1 : それぞれ同期機の内部誘起電圧リアクタンスおよび位相角

E_2, x_2, δ_2 : クタンスおよび位相角

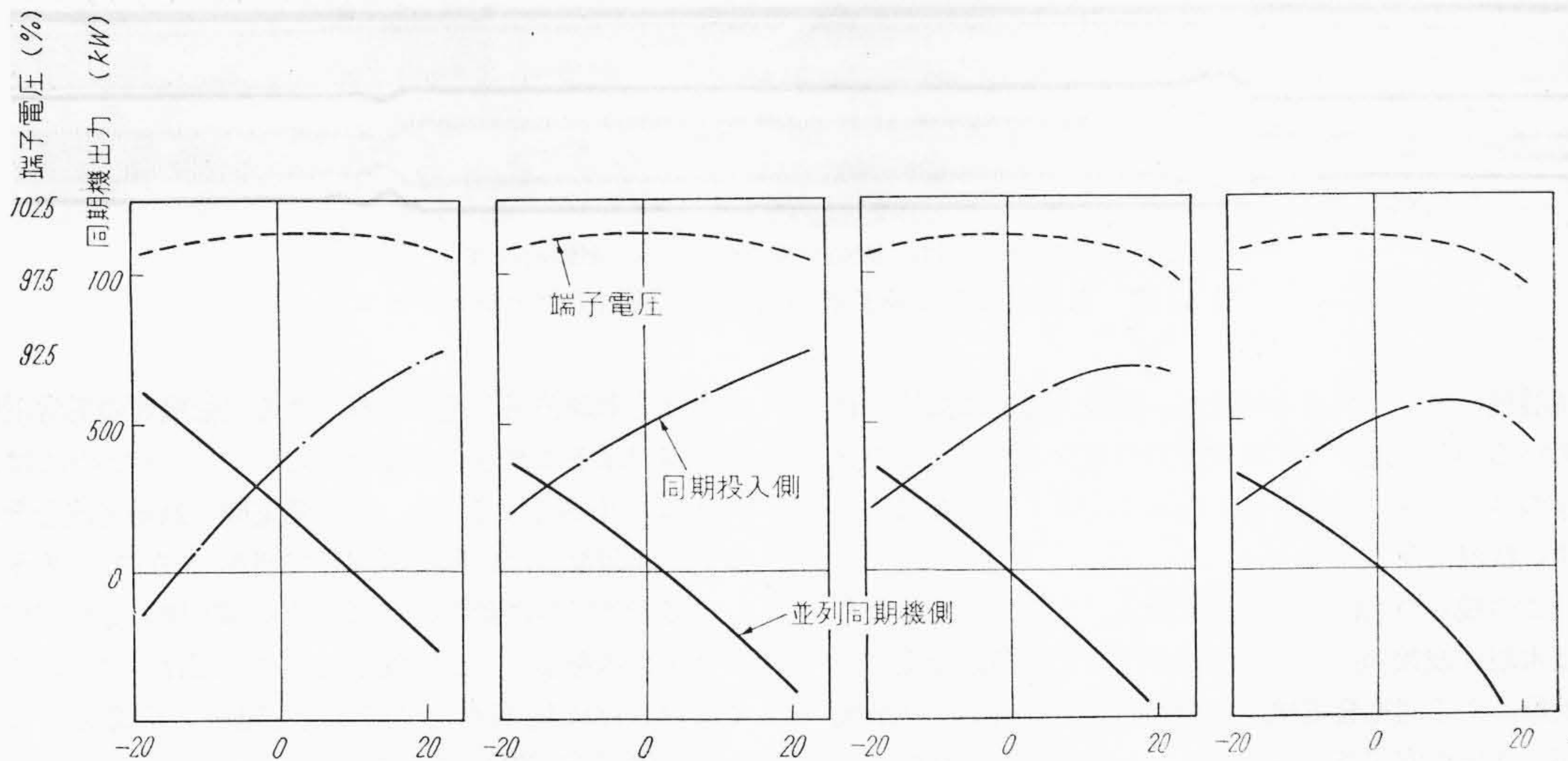
$R, \omega C$: 並列負荷

$$a = 1 / \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{r_d} \right)$$

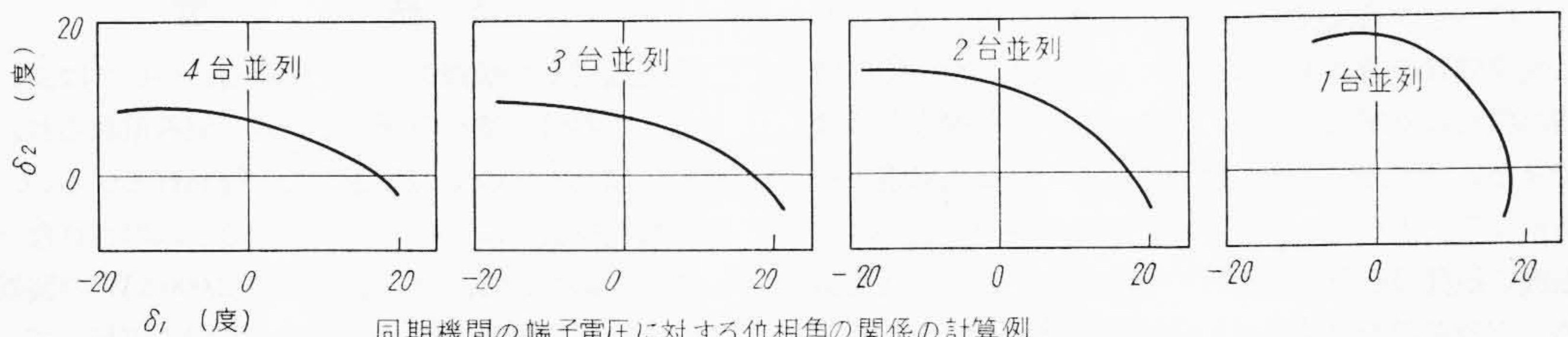
$$b = 1 / \left(\frac{1}{x_1} + \frac{1}{x_2} - \omega C - \frac{1}{r_d} \right)$$

第15図は 2,000 kW 水銀周波数変換装置の存在する系統において、複数台の同期機が並列運転されている場合、1台の 600 kVA 同期機を同期投入したとき生ずる位相角の関係、ならびに出力と端子電圧との関係を求めたものである。同期投入時には大した問題が生じないことが見られる。第16図は実回路における同期投入時のオシログラムで、その振動周波数より同期化力が推定されるが計算とよく一致している。

二つの同期機を考える場合においても、もちろん電圧の安定条件は存在する。その範囲内での論議になるが、同期化力を大きくするには水銀周波数変換装置の内部抵抗 r_d を大きくすればよい。もし2台の同期機が等しいものとすれば、水銀周波数変換装置よりの出力は等しい量で流入し、同期機側よりみれば同期化力については、変換装置の内部抵抗に等しい量のシャン

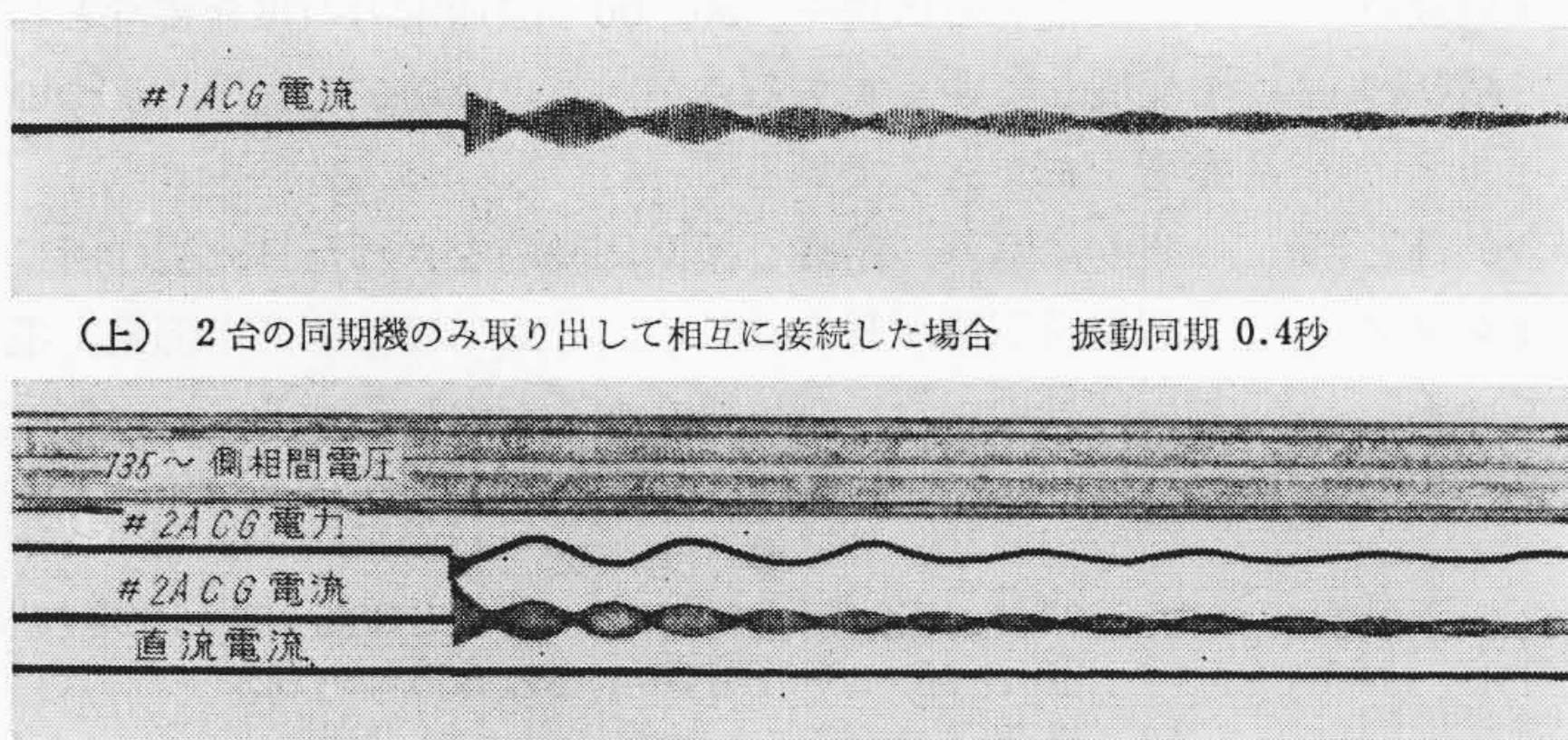


同期機間位相角差 (度) と各同期機出力および端子電圧の計算例



同期機間の端子電圧に対する位相角の関係の計算例

第 15 図 2,000 kW 水銀周波数変換装置に接続された 2 台の同期機間の様子



(上) 2 台の同期機のみ取り出して相互に接続した場合 振動周期 0.4 秒

(下) 水銀逆周波数変換装置と 2 台の同期機で負荷をもっているとき 1 台の同期機を接続せる場合 振動周期 0.39 秒

第 16 図 同期機を並列同期投入したときのオシログラム

テング効果によって減少すると考えられる。われわれが 2,000 kW 水銀周波数変換装置において選定した値は必要にして十分な量となっており、通常運転の交流回路の電力動揺に対しては安定に運転する。

4.2 再 閉 合

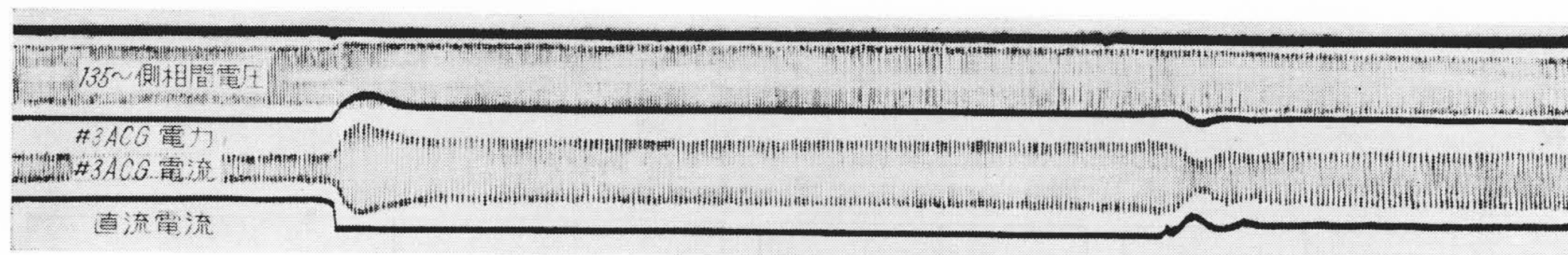
水銀周波数変換装置、誘導電動機負荷、および同期発電機よりなりたつ交流系統において、水銀周波数変換装置の再閉合を、つねに安定に確実に行うことが必

要である。

外部供給電源の極端な電圧の変動など（たとえば送電線事故などによるもの）は悪影響を及ぼし、転流失敗などを誘発せしめるが、これを瞬間的な電力中断として、ふたたび正常運転を続行させることはきわめて重要なことである。

水銀周波数変換装置が転流失敗したときの再閉合時間は、交流送電線のように 20~30ms というわけにゆかず、1~2 秒を整流器再起動時間としてとらなければならない。そのため、水銀

周波数変換装置の中断されている残りの交流系統の状態は大きな影響をもっている。たとえばこの間に、同期機が必要な電力を出しきれずに極限電力をこえて同期はずれをしたり、負荷誘導機がストールして系統が崩壊してしまわないことが必要である。この回路の特長として、負荷側には水銀周波数変換装置の力率改善のための静電蓄電器が存在すること、同期発電機容量が負荷電動機容量より小さくなっているため、負荷側



(並列同期機容量は水銀周波数変換装置容量の約 $1/2$ で軽い制御を行っている場合)

第 17 図 水銀周波数変換装置の再閉合実験結果のオシログラム

誘導機のスリップ出力特性が、無限大母線に接続されている場合に比して、最大出力の減少とともにそのときのスリップの値も小さくなって、ストールを起しやすい状況になる。

この残りの系統が過渡的にせよ、もちこたえるならば水銀周波数変換装置の再閉合は、その急激な電力の供給による同期発電機の電力動揺での位相角の振動が、電圧の安定条件内にあり、かつ同期はずれの生じない範囲にあるならばできる。

このときの過渡現象の解析は可能である。水銀周波数変換装置の過渡現象には前にも言及したが直流回路の状況に支配されるも、リアクトルは左程大きくはできない（直流の遮断を容易にするためと異状電圧を防止するため）こともあって、その回路の時定数は回転機の振動周期などに比して十分小さいのが普通である。直流送電では線路の LC で複雑な振動を生じる。

同期機の出力および同期化力は(8)式より求められる端子電圧を用いて算出できる。もちろん過渡リアクタンスなどを利用しなければならないから、同期機の振動方程式を(7)式で水銀周波数変換装置と結びつけなければよい。

第 17 図は並列同期発電機容量が小さい場合、ほとんど自働制御をあたえずに再閉合した場合のオシログラムであって、これらの現象が明らかにされている。現実には非常によい着想による自働制御がなされて円滑に投入されている。

水銀周波数変換装置を用いるとき、さらに考えておかねばならないことは、その力率改善用に相当な容量の静電蓄電器が必要であり、そのバンクの切り入れで過渡的な交流系統のショックを生じ、転流失敗を生ずることである。われわれはその理論的裏付けを考慮した操作法をとり、400kVA バンクの操作で安定に行われている。

これと同時に、水銀周波数変換装置の中断せる場合、

大きな力率改善用静電蓄電器による回転機類の異常電圧を許容値以下におさえねばならない。そのためには、 $r-u/2$ を小さくすること、同期発電機に無効電流をその能率が問題ならない程度に移して運転するのが望ましい。後者は同時に動作状態における同期機の等価同期リアクタンスを小さくして安定条件にも都合がよく、ここではおおむね $1/2$ 負荷位に同期機を運転して成功している。異常電圧は 30% 位で問題がない。

5. 結 言

交流送電や回転機を含む交流機器については長い歴史をもって非常に多くの研究と経験が積み重ねられ、その運転にはなんらのあぶなさもなく行われているが、水銀周波数変換装置においてはまだ十分とは申されない。

この中において、日立製作所が 2,000 kW の装置を納入しその運転限界を掌握しつつ、安定に運転していることは大きな進歩をもたらしているといえる。

今後水銀周波数変換装置は直流送電回路網と結びついて、大電力の伝送や、50, 60 融通電力の媒介装置として発展してゆくであろうが、この成功がそれらに一つの参考をあたえるであろう。

終りに臨み、始終ご援助御激励をされた日立製作所日立研究所三浦所長をはじめ、日立工場幹部高木部長、毛利副部長のかたがたに厚くお礼を申しあげる。

参 考 文 献

- (1) 高林：日立評論 37, 1495 (昭 30), 37, 1627 (昭 30), 38, 289 (昭 31), 39, 655 (昭 32)
- (2) 電気学会編：水銀整流器 (昭 29)
- (3) 神崎外：東芝レビュー 7, 432 (昭 27)
- (4) 早斐：富士時報 26, (昭 28)
- (5) 已斐：三菱電機 38, 382 (昭 29)
- (6) 執行：電論集 2, 6 (昭 16)
- (7) 熊沢：電気評論 17, 46 (昭 4)