人絹工業用水銀周波数変換装置

技術部整流器課　北　村　泰　男

Static Frequency Changer for Rayon Works

By

Yasuo Kitamura
(Rect'. Div., Eng'g. Dep't.)

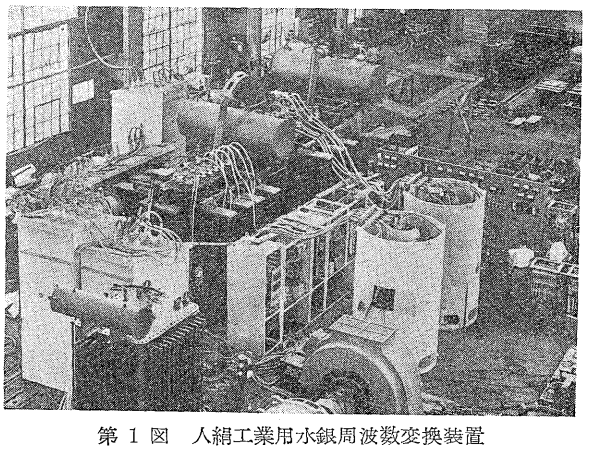
Synopsis

The paper has outlined the practical and theoretical problems involved in the 1,500 kW static frequency changer which has been delivered to Asahi Kasei Co. in order to convert power from 50 cycles A. C. systems to 130～150 cycles A. C. systems.

In the world, this set is the first one of 130～150 cycles static frequency changer which is able to be operated in parallel with the rotary frequency changers for rayon works.

近時周波数変換装置として建設費低廉，効率良好，保守運転が容易でそれだけ保守運転費が節約され，安定した変換電力の供給も格子制御により可能であるため，回転機に代って静止型水銀周波数変換装置が使用される傾向にある．電力用としては東芝による日本パルプ日南工場および富士製鉄釜石工場，三菱による三菱鉱業高島炭坑，富士による同和鉱業花岡鉱業所において，それぞれ実施をみているが，いずれもポンプ付水銀整流器による 50～ 60～ 両系統連繋の商用周波数変換である。

わが国においてポンプ無し封じ切り水銀整流器も，当社において始めて製作されるようになり，整流器応用分野が拡大され，動力用として一般に広く使用される機運にあり，その1例として 50～ 150～ 周波数変換による人絹工業用ポットモーター電源として静止型水銀周波数変換装置が，旭化成工業延岡工場において実負荷運転をみるに至った．50～ 150～ 水銀周波数変換装置としては世界最初の記録品であり，種々の考慮苦心が払われたものである．ここに静止型水銀周波数変換装置の原理および特長，ならびにその設備の概要について説明する。



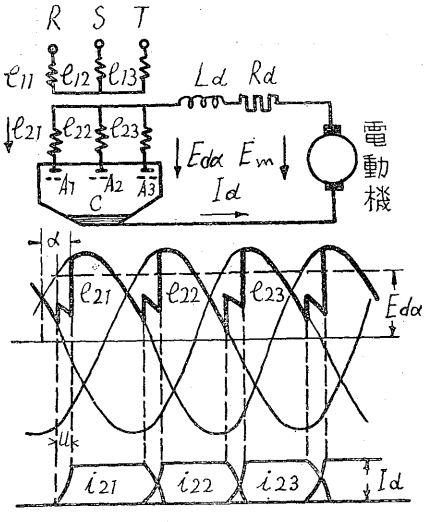
第 1 図　人絹工業用水銀周波数変換装置
Fig. 1. Static frequency changer for rayon works

I. 水銀周波数変換装置の原理

（1） 水銀順変換装置と水銀逆変換装置

水銀順変換装置（整流器）の動作原理を簡単のために3相半波整流回路について示すと 第2図のようになる。

一般に直流巻線電圧を $e_{21}=e_{22}=e_{23}=\sqrt{2}E_2$ とすれば，



第 2 図　水銀順変換装置動作説明図
Fig. 2. Performance of ordinary rectifier

格子制御を行なわない場合の無負荷直流電圧 E_{d0} は整流器の相数を p とすれば次式で表わされる。

$$E_{d0}=\sqrt{2}E_2\frac{\sin(\pi/p)}{(\pi/p)}\cdots\cdots(1.1)$$

格子位相遅れ角 α の格子制御を行なった場合は次式となる。

$$E_{d\alpha}=E_{d0}\cos\alpha\cdots\cdots(1.2)$$

変圧器の転流リアクタンスを X, 回路の抵抗を R, アーク電圧を E_a とすれば, 直流出力電圧 E_{dr}, 直流出力電流 I_d の特性は一般に次式で表わされる。

$$E_{dr}=E_{d0}\cos\alpha-\frac{p}{2\pi}XI_d-RI_d-E_a\cdots\cdots(1.3)$$

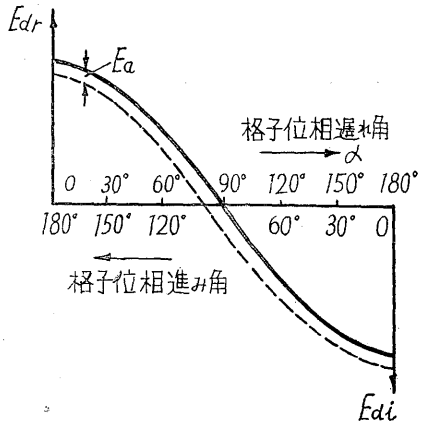
定格直流電流を I_{dN} とし $i=I_d/I_{dN}$, $E_x=p/2\pi XI_{dN}$ とし, アーク電圧, 回路の抵抗を無視すれば次式で表わされる。

$$E_{dr}=E_{d\alpha}-E_{xi}\cdots\cdots(1.4)$$

直流出力電流は直流出力電圧 E_{dr} と電動機逆起電力 E_m との差によって流れるから次式で求められる。

$$i=\frac{E_{d0}\cos\alpha-E_m}{E_x}\cdots\cdots(1.5)$$

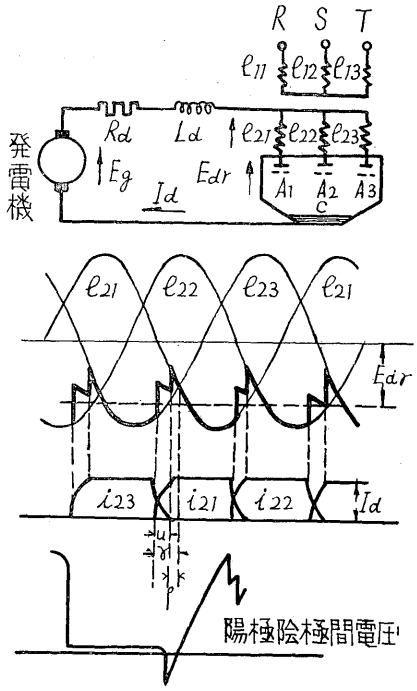
直流出力電圧は(1.2)式に従って格子制御により全電圧より零電圧 ($\alpha=90°$) 迄非常に容易に変えられ, その関係は第3図に示すようになる. 逆変換装置はこの格子位



第 3 図　直流電圧—格子位相角曲線

Fig. 3. Curves between D.C. voltage and grid phase angle

相遅れ角を 90° を越えてなお進めると, 変換装置の直流出力電圧は逆方向となり, その際に逆起電力の方向を変えて発電機起電力 Eg とすると直流回路から交流回路に電力を逆流することが行なわれるようになる. この動作原理を3相半波回路で示すと第4図のようになる. 格子位相遅れ角を第3図のように格子位相進み角 γ で表わすと次の関係がある。



第 4 図　水銀逆変換装置動作説明図

Fig. 4. Performance of inverter

$$\gamma=180°-\alpha\cdots\cdots(1.6)$$

したがって順変換装置の各式に(1.6)式を代入しその符号を変えて逆変換装置の式が得られる. すなわち直流出力電圧を E_{di} とすれば

$$E_{di}=E_{d0}\cos\gamma+\frac{p}{2\pi}XI_d+RI_d+E_a\cdots\cdots(1.7)$$

$$E_{di}=E_{d\gamma}+E_{xi}=E_{d0}\cos\gamma+E_{xi}\cdots\cdots(1.8)$$

ただし逆変換装置の場合は第4図よりわかるように転流時の重なり角を u とすれば, 次式の必要条件がある。

$$\delta=\gamma-u>\delta_0\cdots\cdots(1.9)$$

δ_0 はいわゆる制御能回復時間と呼ばれるもので, 陽極電流消滅後格子制御能力を回復するために必要な時間で整流器に個有のものである. $\delta=\delta_0$ となると転流が行なわれず, いわゆる転流の失敗となり直流回路の短絡を生ずる. したがって逆変換装置では δ_0 の小さい整流器を使用し, $\delta>\delta_0$ となるように運転を行ない, なお変圧器等系統の転流リアクタンスを少くし重り角 u を小さくすることが必要である. この転流限界は次式によって求められる。

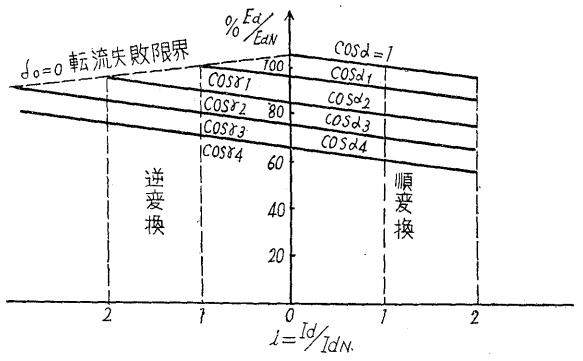
$$\cos(\gamma-u)=\cos\gamma+2E_x/E_{d0}\cdots\cdots(1.10)$$

$$\gamma_m-u=\delta_0$$

$$\cos\delta_0=\cos\gamma_m+2E_x/E_{d0}\cdots\cdots(1.11)$$

したがって直流出力電圧電流特性上では(1.8)式に代入して

$$E_{di}=E_{d0}\cos\delta_0-E_xi\cdots\cdots(1.12)$$



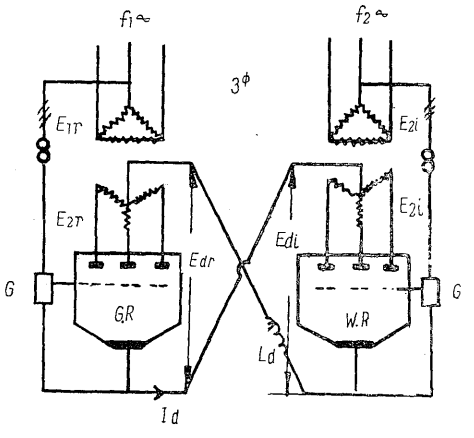
第 5 図　直流電圧一直流電流特性曲線

Fig. 5. Characteristic curves of D.C. voltage and current

により表わされる．これを第5図に点線で示す。

（2） 水銀周波数変換装置

水銀周波数変換装置は前述の順および逆変換装置を第6図に示すように組合せたもので，両変換装置の電圧変



第 6 図　水銀周波数変換装置接続図

Fig. 6. Connection diagram of static frequency changer

動率を同一とすればその特性は次式で示される。

$$\left.\begin{aligned} E_d &= E_{d\alpha} - E_x = KE_{2r}\cos\alpha - E_x \\ E_d &= E_{d\gamma} + E_x = KE_{2i}\cos\gamma + E_x \end{aligned}\right\} \cdots\cdots(2.1)$$

$$i = \frac{E_{d\alpha} - E_{d\gamma}}{2E_x} = \frac{K(E_{2r}\cos\alpha - E_{2i}\cos\gamma)}{2E_x} \cdots(2.2)$$

直流変換電力を W とすれば次式で表わされる。

$$W = E_d I_d \cdots\cdots(2.3)$$

すなわち変換電力の大さは格子位相角 α, γ が一定のときは両系統の電圧 E_{2r}, E_{2i} の変動に応じて変化するが，格子位相角を自動制御して両系統の電圧および周波数変動に無関係に一定に保つこともできる．また格子消弧により事故時に事故電流を遮断後再投入することも迅速かつ容易に行なえる。

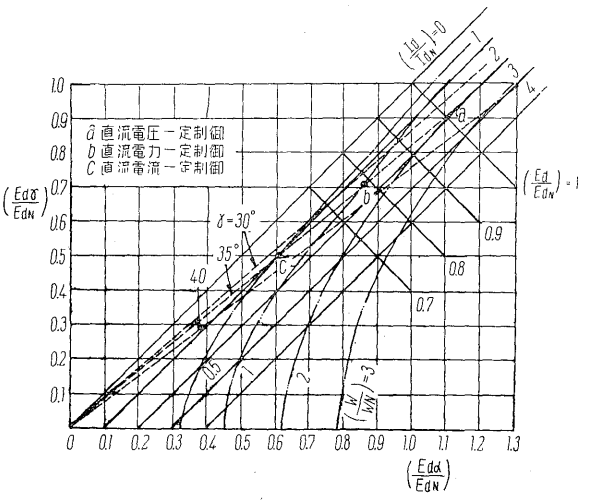
周波数変換装置の格子自制御をいかに行なうかは種々の方式があるが，一般的に考えると直流電圧一定制御，直流電流一定制御，直流電圧一定制御等の方式があるが直流出力をほぼ一定とし転流限界を広くとるには直流電流一定制御が広く使用されている．各種制御の様子は理論的に次式から求められる。

$$\left.\begin{aligned} E_{d\alpha} - E_{d\gamma} &= 2E_x \\ E_{d\alpha} + E_{d\gamma} &= 2E_d \end{aligned}\right\} \cdots\cdots(2.4)$$

$$\frac{\left(\frac{E_{d\alpha}}{E_{dN}}\right)^2 - \left(\frac{E_{d\gamma}}{E_{dN}}\right)^2}{4\left(\frac{E_x}{E_{dN}}\right)} = \frac{E_d I_d}{E_{dN} I_{dN}} = \frac{W}{W_N} \cdots\cdots(2.5)$$

ここに $W_N = E_{dN} I_{dN}$ は定格直流変換電力である。

例えば，両変換装置の $E_x/E_{dN}=5\%$, $\gamma=35°$ の場合の転流限界を求めると第7図のようになり直流電流一定制御が一番転流限界が大きいことがわかる。



第 7 図　水銀周波数変換装置動作説明図

Fig. 7. Performance of static frequency changer

（3） 所要無効電力

水銀周波数変換装置の唯一の欠点は，出力系統側容量が小さい場合にも逆変換装置に必要な遅相無効電力を必ず系統から供給せねばならないことである．所要無効電力 Pb は次式で求められる．ただし $e_x = E_x/E_{d0i}$ とする。

$$Pb = W\tan\phi \cdots\cdots(3.1)$$

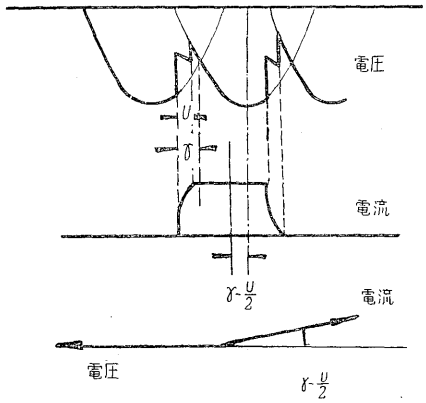
$$\cos\phi \fallingdotseq \cos\left(\gamma - \frac{u}{2}\right)\cos\left(\frac{u}{2}\right) \fallingdotseq \cos\left(\gamma - \frac{u}{2}\right) \cdots\cdots(3.2)$$

$$\cos\phi = \cos\gamma + e_x = \cos\delta_0 - e_x \cdots\cdots(3.3)$$

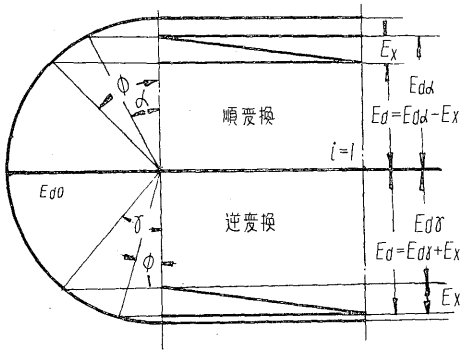
この関係は第8図および第9図より直ちに求められる。

この無効電力は変換電力に比例して増大するため，並列回転機の出力を低下させかつ系統の電圧を低下させる。

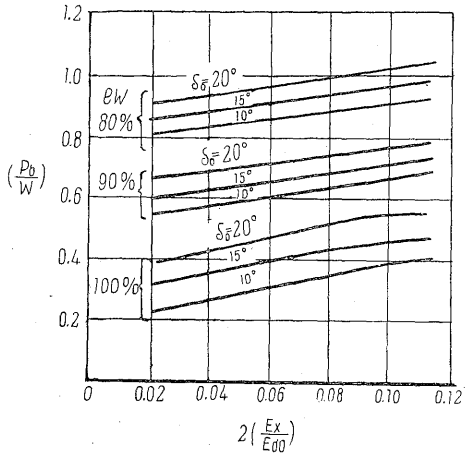
したがって極力この無効電力を少くするよう γ, u, δ_0 を小さくするのであるが，一番大きな影響を与えるのは



第 8 図　水銀逆変換装置力率説明図
Fig. 8. Power-facter of inverter



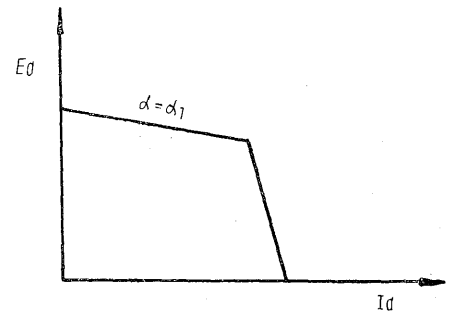
第 9 図　水銀周波数変換装置力率説明図
Fig. 9. Power-factor of static frequency changer



第 10 図　所要無効電力曲線
Fig. 10. Required wattless curves

出力系統側電圧の変動であって，制御能回復時間 δ_0=10°, 15°, 20° の場合について，出力系統側電圧降下値 e_ω=100%, 90%, 80% とせる場合の値は第10図に示す通りである。

出力系統電圧降下に伴う所要無効電力の増大は直流出力電流の増大に伴うものであるから，順変換装置を迅速



第 11 図　直流電流制限特性
Fig. 11. Characteristics of D.C. current limitting

に格子自動制御し第 11 図のように電流を制限すると，所要無効電力を増大せず系統に余り大きな影響を与えないですむ．したがって格子自動制御速度が迅速なことが大切である．なお所要無効電力に応じて静電蓄電器を分割投入することが広く行なわれる。

（4） 回転機との並列運転

水銀周波数変換装置を出力交流側からみた場合，その特性は回転機と甚だ異った特性を示す．周波数変換装置出力電圧 E_2 は，見掛けの入力電圧 E_1，見掛けの内部インピーダンス $\dot{Z}$ とすると次式の関係がある。

$$\dot{E}_2=\dot{E}_1-\dot{I}_1\dot{Z}_1 \quad \cdots\cdots(4.1)$$

$$\dot{E}_1=\frac{\cos\alpha}{\cos\gamma}E_1e^{j\phi} \quad \cdots\cdots(4.2)$$

$$\dot{Z}_1=\frac{R}{K^2\cos\gamma}e^{-j\tau} \quad \cdots\cdots(4.3)$$

$$R=\frac{KE_1\cos\alpha-KE_2\cos\gamma}{I_d} \quad \cdots\cdots(4.4)$$

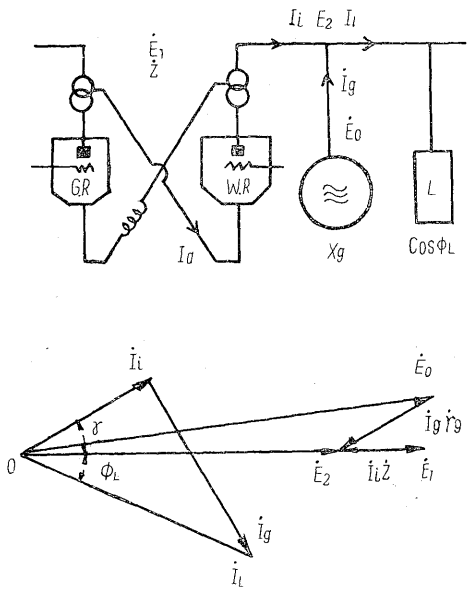
その関係は第 12 図で示す通りであって，E_1 と I_1Z_1 とは常に同位相にあり，γ 一定とすると力率 $\cos\gamma$ は常に一定である．したがって回転機との負荷の分担はその電圧変動率により定り，γ が小さく x_{ll}/Z が小なる程安定な負荷分担が行なわれる。

（5） 水銀周波数変換装置の特長

従来の周波数変換機と比較して，その特長は次の通りである。

a） 周波数変換機では両系統の周波数は常に一定の関係があり，出力周波数を変えるため極数切換，クレーマ速度制御等が行なわれるが，本装置では両系統の間に直流中間回路があり，両系統の結合に柔軟性があり，一系統の周波数変動が他系統に波及しない。

b） 周波数変換機の変換電力は速度調整器により調整



第 12 図　並列運転動作説明図
Fig. 12. Performance of parallel running

されるが，本装置では格子制御により精密に迅速かつ簡単に行ないうる。

c) 周波数変換機のように起動装置を必要とせず，本装置の交流遮断器を投入後，格子に制御電圧を印加するだけで起動し，かつ同期化，同期外れ等の厄介な問題もなく，停止も容易で保守運転が楽である。

d) 本装置では変換装置の内部または両系統に事故が発生した場合，格子消弧により事故電流を遮断し，直ちに再起動することを簡単迅速に行なえるので系統への擾乱が少い。

e) 水銀整流器を使用しているので効率がよく，かつ軽負荷でも余り効率が低下しない．すなわち総合変換能率がよい。

f) 静止器であるので振動騒音が小さく，かつ据付輸送が容易であり，なおかつ基礎その他の点で変電所建設が簡単である。

g) 本装置の出力系統側に逆起電力が存在し励磁を行ない，かつ無効遅相電力を供給することが必要で，この無効電力の大いさは系統の変動状況と制御方式で決定される。

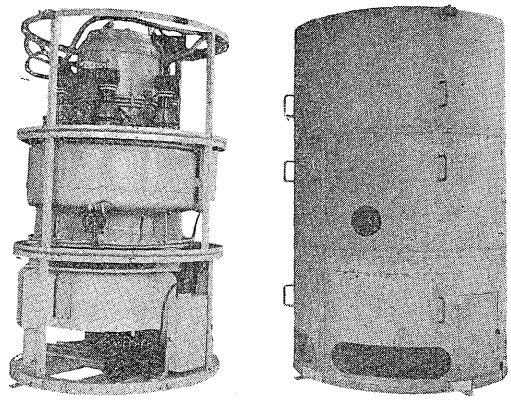
h) 本装置の交流入力側および出力側系統の電圧および電流に高調波が生ずる．したがって通信線，ラジオ等への誘導障害を生じないようにあらかじめ考慮することが必要である。

II. 人絹工業用周波数変換装置

旭化成延岡工場に納入された人絹工業用ポットモータ一電源の周波数変換装置は周波数 50～，電圧 3,300V の交流入力側系統から，周波数 130—140—150～，電圧 2,680—2,890—3,100V の交流出力側系統へ，1,500 kW の変換電力を周波数変換するもので，負荷は人絹工業用ポットモーター数十台が同時に投入増加し，数百kW の 1 系列の負荷が遮断することがあるが，常時設定される負荷の変動は少く安定している．並列機器としては非同期—非同期型および非同期—同期型の周波数変換機数台が並列運転される。

出力交流側系統の容量が小さく周波数が高いため種々の考慮がなされ，また新方式が採用された．その概要を以下に述べることとする。

（1） **水銀整流器**　水銀整流器としては保守運転の便を計り風冷式ポンプ無し封じ切り型とし，格子制御特性が完全である多陽極整流器を使用した．格子は二重格子構造とし150～運転のため 50～ の場合に比し特に消イオン時間の減少を計り，格子制御能時間を短くとられている．冷却扇，陽極加熱器，陰極加熱器等よりなる温度調整装置は水銀サーモスタットにより全自動運転され保守上人手を要しない．なお保護円筒で整流器を掩い高圧保護柵を不要とした．その外観を第 13 図に示す。



第 13 図　風冷式ポンプ無し封じ切り整流器 1,500kW, 1,500V
Fig, 13. 1,500kW, 1,500V air cooled pumpless, sealed mercury rectifier

（2） **水銀整流器用変圧器その他**

屋外用油入自冷式順変換用変圧器相間リアクトル付

定格容量	2,300 kVA
定格電圧	3,400—3,250—3,100—2,950—2,800 /1,920V
定　格	連　続
定格電流	428/294A
結　線	△/人丫
定格周波数	50～

屋外用油入自冷式逆変換用変圧器相間リアクトル付

定格容量　1,900 kVA
定格電圧　3,100/1,878—1,820—1,770—1,720V
定　格　連　続
定格電流　354/248 A
結　線　△/人丫
定格周波数　150～

屋外用油入自冷式3相直列リアクトル
定格容量　850 kVA
定格電圧　1,210—933—695—490 V
定　格　連　続
定格周波数　50～

屋外用油入自冷式直流リアクトル
定格電流　1,000 A
定格インダクタンス　20 mH

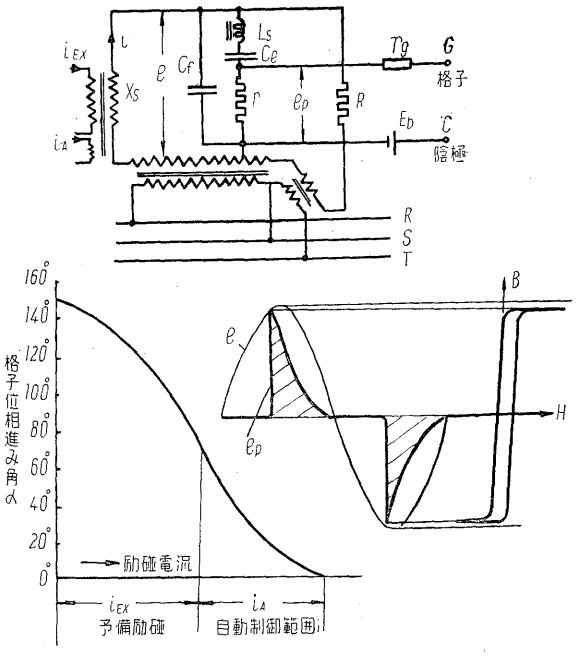
インピーダンスは順変換用変圧器16.4%，直列リアクトル最高39%，逆変換用変圧器2.4%である．周波数変換装置の見掛けの内部インピーダンス Z は並列周波数変換機との安定な並列運転が行なえるよう充分大きくとられている．逆変換用変圧器インピーダンスは特に減少した構造がとられ，重り角 u の減少を計り余裕角 δ の増大が計られている。

直流リアクトルは特にインダクタンス値の大きなものを使用し以下に述べる急速格子自動制御と相まって，事故時ならびに過渡時の変動を非常に減少させた。

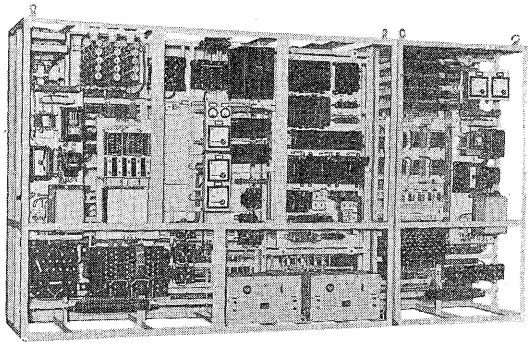
屋外用油入自冷式静電蓄電器直列リアクトル付
定格容量　250 kVA
定格電圧　3,300 V　3相 △結線
定　格　連　続
定格周波数　140～
全 容 量　2,500 kVA

逆変換装置の所要無効電力に応じて，すなわち負荷に応じて10段に切換開閉が自動的に行なわれ，全静電蓄電器は変換装置の運転停止と共に系統から遮断される．全容量はかなり大きいがこれは負荷の力率による分も供給せねばならないためである．なお全容量はタップ変圧器により調整可能である。

（3） **格子制御装置**　新方式の格子制御装置は移相リアクトル X_s，平衡抵抗 R とよりなるツーローン移相回路と尖頭波発生装置 L_s，C_e，r，C_y とを直接組合せたもので第 14 図にその動作を説明する通りである．飽流線輪 L_s は直角 B–H 特性特殊鉄心よりなり，印加電圧 e の最高値付近で飽和する一種の開閉器で，直列蓄電器 C_e の充放電を行なう．この電流を抵抗 r の電圧降下としてとらえ e_p なる尖頭波形電圧をうる．本装置の特長



第 14 図　格子制御装置動作説明図
Fig. 14. Performance of grid control device

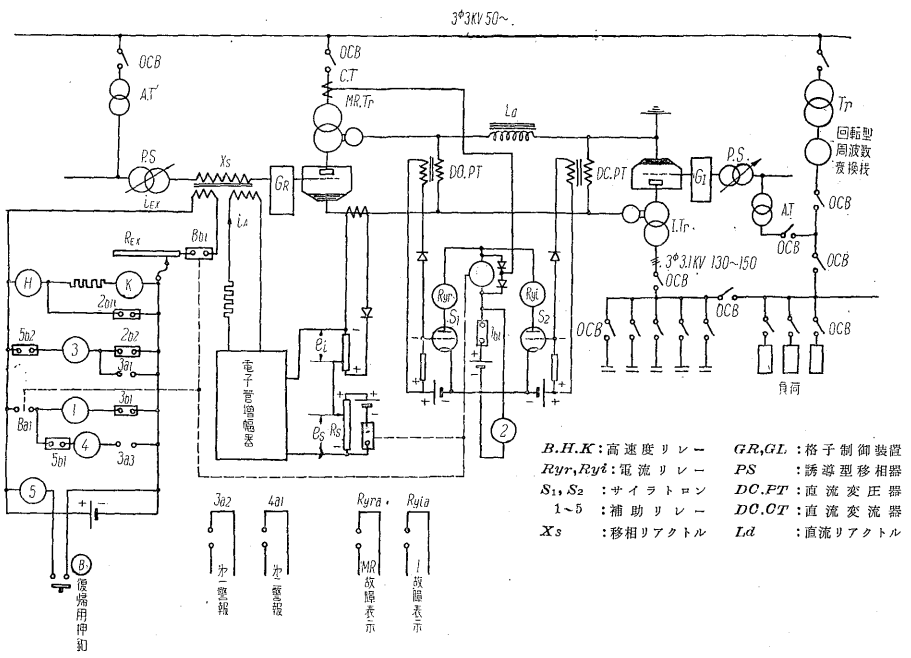


第 15 図　周波数変換装置用補助装置
Fig. 15. Auxiliary equipment of frequency changer

は移相範囲が従来 60° であったものが 180° までに拡がり，自動制御の場合磁気増幅器，電子管増幅器による駆動に適し移相制御速度が早く 5°/ms である．第 15 図の左部が新型制御装置である。

（4） **定電流制御自動再起装置**　（第 16 図参照）

逆変換器順変換器の順に運転準備完了後，主幹制御把手により抵抗 R_{EX} を駆動し移相リアクトルの予備励磁 I_{EX} を増加すれば，順変換装置格子移相遅れ角 α が減じ，その直流出力電圧が高まり，逆変換装置の逆起電力に打勝って変換直流電流が流れる．この場合逆変換装置格子移相進み角 γ をあらかじめ整定した一定値にしておく．直流変流器による変換直流電流に比例した電圧 e_i と基準値 e_s との差を電子管増幅器により増幅して移相リアクトルに加え，自動定電流制御が行なわれるから，変換直流電流の制定は主幹制御把手により基準値 e_s で



第 16 図　定電流制御自動再起装置説明図

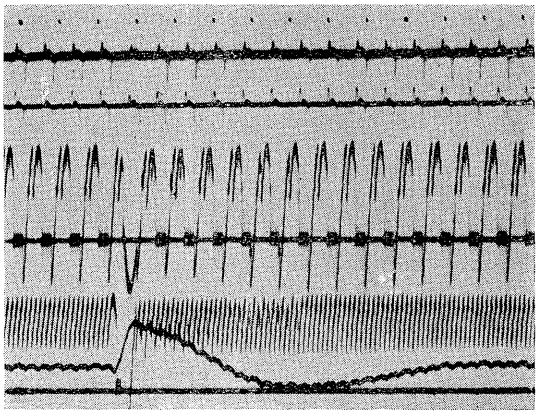
Fig. 16. Automatic restarting equipment by constant current control

決定される．これに連動して開閉接点があり負荷に応じた個数の静電蓄電器が投入される。

変換装置内部事故または両系統の事故に際しては，従来は格子消弧により事故電流を遮断し一定時間後に再起動する方式がとられたが，直流リアクトルのインダクタンス値が大きい場合には格子消弧時間が長くなるので，本装置では順変換装置を格子消弧せず，格子移相遅れ角 α を逆変換領域へ急速に移相する新方式を採用した．その結果直流リアクトルのインダクタンス値を増大し得たので事故の場合また過渡時の系統への擾乱を少くなし得た．なお一定時間後に格子移相遅れ角 α は順変換領域に自動的に復帰し正常運転に入る．この場合第1警報を発し故障表示が行なわれる．再起動後復帰用押釦を押せば全く初期の状態に復帰する．一定時間後再起動しても事故が継続する場合は第2警報を発し変換装置は遮断器を開放し運転を停止する．第 17 図は人工的に転流失敗させた場合の自動再起のオシログラムである．第 18 図の左部にサイラトロン，右部に電子管増幅器がある。

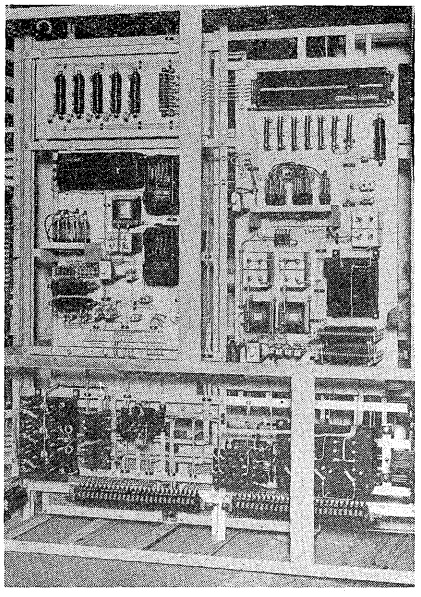
(5) 負荷試験その他　第19図は負荷運転中のオシログラムである．効率は130, 140, 150~の各周波数について，それぞれ 91.9, 92.5, 92.9% であった．出力側高調波による特殊の影響をポットモーターに与えることも考えられたが，試験の結果，損失の増加は 1~2 %，振動試験では騒音も高調波トルクも問題なく，最大振れは 10 gr アンバランスの場合 0.7 mm 以下であった。

現地における電話に対する誘導障害も心配されたが，1,500 kW 程度では 6 相結線方式で問題がないことが実証された。



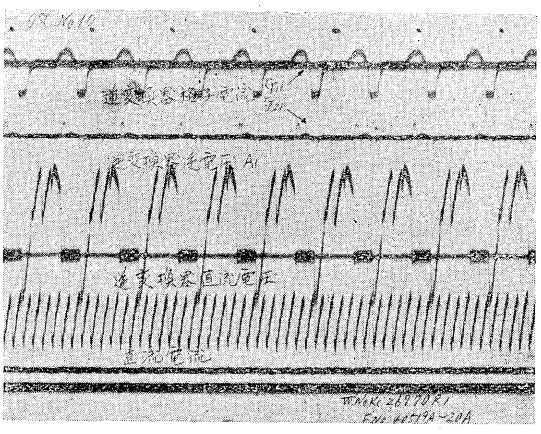
第 17 図　自動再起オシログラム

Fig. 17. Oscillogram of automatic restarting



第 18 図　定電流制御自動再起装置

Fig. 18. Automatic restarting equipment by constant current control



第 19 図　負荷試験オシログラム
Fig. 19.　Load test oscillogram

以上に述べた水銀周波数変換装置は交流出力系統側に並列周波数変換機があり，いわゆる他励式であるが，人絹工業用の場合は所要無効電力供給設備の全くない，いわゆる自励式であることが望ましい場合がある．人絹工業用の場合は負荷がほぼ一定しているから，交流出力系統側に分割して接続される静電蓄電器を，負荷の投入遮断に応じて開閉することにより理論的に可能である．自励式周波数変換装置では直列型と並列型とあり，両者おのおの欠点を有しているので，両者の特長を併用した方式と併せて，安定な変換電力を供給し得るような自動制御方式を研究することが必要である．近い将来に完成され実用化されるものと思われる。

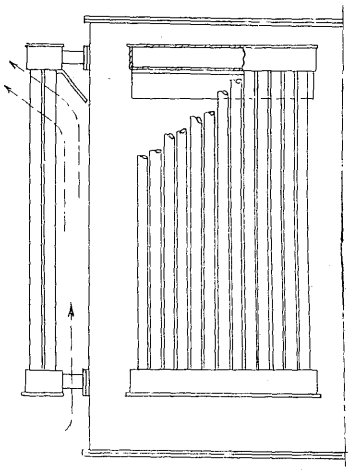
変圧器のラジエーター

（新案登録第 402370 号，第 403680 号）

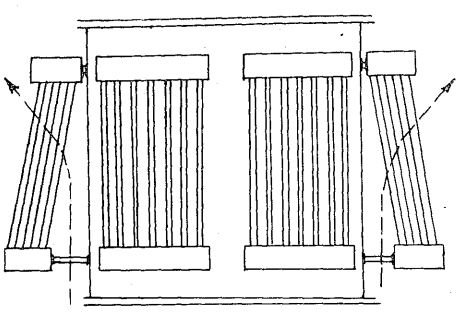
変圧器のラジエーターは上部ヘッダーと下部ヘッダーとの間に多数のパイプが取付けられたものが普通であり，しかもこれが変圧器の側面に垂直に取付けられています．したがって上昇気流は外側のパイプにそって流れるだけであって，内部のパイプには達しません．したがってその冷却効率はあまり良くないことは一般に認められている通りであります．構造を複雑にせず，内部のパイプまで気流が貫流することができれば，この能率は簡単に向上するのであります。

試みとして第1図のように上部ヘッダーと槽壁との間に板を張り，ここを塞いでみますとラジエーターと槽壁との間の上昇気流は必ずパイプの間を通ります．これだけで 4.5% 能率を上げ得る実験データが出ています．更に第2図のように下部ヘッダーを側方に突出させると更に能率が上昇します。

（技術部　池上）



第 1 図



第 2 図

＊本誌に記載されている会社名および製品名は，それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。