電解用變流設備の撰擇に就て

On the Selection of the Converter Set for Electrolysis

前田七之進
（工　場）

内容梗概

電解用變流設備としては、電動發電機、廻轉變流機、水銀整流器等があるが、之等は其のサービスの條件に應じて、又夫れ夫れ一長一短を持つて居る。本篇は之等の諸條件から見た各種變流設備の特徴を詳述したものであつて、機器撰擇の上の指針となるものである。

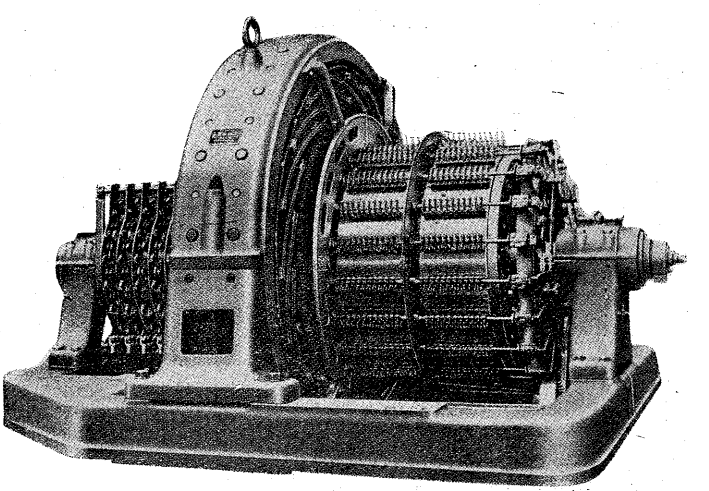
序

最近電氣化學工業、輕金屬工業の著しい勃興に伴つて、之等工業の重心をなす電解槽用の變流設備の需要が盛んになつて來た。特に大電流ものゝ要求が殖えて、例へばアルミニウム電解槽用のものなどには 10,000 A 乃至 30,000 A 位迄のものまでが用ひられる傾向である。

一面變流機としては、從來の電動發電機並びに回轉變流機の外に、水銀整流器が之に仲間入りをすることになつた爲め、需要者側或は吾々製作者側としても、果して其の孰れを採用すべきやと云ふ問題に相當頭を惱まさねばならぬ狀態に在る。之には色々の外的若しくは内的の條件が組合はさつて在存するのであつて、同じ電解用と一口に云つても、更に夫れ夫れのサービスに依つて各々條件の相違に應じて、或は回轉變流機が有利ともなり、或は電動發電機に限られねばならない場合等が生ずるのであつて、茲には之等の諸條件を基として變流機個々の特徴を求め、順次に比較研究をして見たいと思ふ。

隨つて需要家は之に依つて、夫れ夫れ自家計畫の條件を分解し、之に代入することによつて自ら其の結論を求めらるゝことを期待し、此の一文が多少とも御企業の上の御參考ともなるならば、之は筆者の望外の光榮であらう。

曾つて獨逸のジーメンス社技師ライヘル氏が、



第一圖　回轉變流機
2550 kW 300 R.P.M. 300 V 8500 A

ETZ 誌に於て電氣鐵道用の變流設備に就て恰も筆者が今試みる如き比較研究を發表せられたことがあつた。同論文の譯文は曩に本富士電機時報第五卷第十號に掲載せられた。併せ參照されるならば興味も深く、又或意味に於て本拙文の補充の役を力めて呉れる事と思ふ。電鐵用の變流設備に關する斯の種の文献は上記ライヘル氏のものゝ外、其の後割合に多く發表されて居る。たまたま電氣化學工業、輕金屬工業の勃興期に當つて、之等電解用としての所謂大電流變流設備に就ては、餘り纒つた文献を見ないやうに思つたので、茲に敢へて愚論を訴へて、大方の叱正を仰いだ次第である。

能　　率

化學工業用大電流變流機に於ては、能率の點では回轉變流機が殆んど常に最も優勢である。隨つて後に述べる電壓の調整其の他の特殊の羈絆が無い限り、原則として回轉變流機が採用される所以である。

化學工業　輕金屬工業等に於て電力費は生產費の相當なファクターになる。能率を1％でも2％でも良いものを採用する事は製品原價の上に相當の影響を及ぼすのである。夫れに就ては後に項を更めて今少し檢討して見る積りである。

茲に電動發電機、回轉變流機、水銀整流器の三種の變流機に關して、二三の例を採つて實際に當つた數字を表示し、概念的な御參考に資することとした。

次表に掲げたものは何れも定格電壓から 70 ％迄電流一定の許に電壓を調整出來る最も普通な化學用變流機に就いて、定格電壓及び 70 ％電壓に於ける全負荷電流に對する全設備の綜合能率を示したのであつて、回轉變流機及び水銀整流器の能率には誘導電壓調整器の損失をも含めてある。

例一、直流全負荷電流　6500 A
　　直流電壓　230/160 V
　　容　　量　1495 kW

第　一　表

電　　壓	230 V	160 V
回轉變流機	92, 0	88, 0
電動發電機	90, 0	85, 0

例二、直流全負荷電流　15000 A
　　直流電壓　300/210 V
　　容　　量　4500 kW

第　二　表

電　　壓	300 V	210 V
回轉變流機	94, 0	91, 9
電動發電機	91, 5	89, 0
水銀整流器	88, 7	85, 0

例三、直流全負荷電流　15000 A
　　直流電壓　600/420 V
　　容　　量　9000 kW

第　三　表

電　　壓	600 V	420 V
回轉變流機	94, 6	92, 5
電動發電機	92, 5	90, 0
水銀整流器	93, 0	90, 5

第二表で見る通り、水銀整流器は 300 V程度では他の二者に比し一顧の價値もない。500V から

600V 前後になると著しく能率良好となり、

第三表に於ては電動發電機よりも良好となつて居る。

云ふ迄もなく水銀整流器の損失は、殆んどその大部分が弧光電壓降下であつて、之は電流に就いて一定である。他の回轉機の如く端子電壓を下げて減少する鐵損と云ふものは含まれて居ない。變壓器、誘導電壓調整器を除いて、水銀整流器そのものの能率は略ほ次の式で與へられる。

$$\text{能率}\quad \eta = \frac{\Delta E}{E}$$

茲に ΔE ＝弧光電壓降下

E＝端子電壓

大電流のものに對し、弧光電壓降下 ΔE は 28－32V前後の値を持つて居る。

今　　$\Delta E = 30V$ とすれば

端子電壓　300V に對し　$\eta = 90\%$

端子電壓　900Vに對し　$\eta = 95\%$

〃　　1000V　〃　　$\eta = 97\%$

となる。即ち 600V に於ては回轉變流機と略々同等、更に 1000V に於ては遙かにそれを凌駕することになる。

尙水銀整流器の能率は、他の二者に比し輕負荷に於て優れて居る。回轉機では負荷が輕くなつても無負荷損、即ち摩擦損並に鐵損が變らない爲めに機械の能率は一般に輕負荷に於ては下つて來る。

所が水銀整流器では先に述べた通り弧光電壓降下だけであるから、電流が減つた丈け損失は減少する。½ 負荷位では弧光電壓降下は全負荷の場合より減少する傾向を持つて居るから、第四表に見る如くその綜合能率も ½ 負荷で却つて良くなると云ふ結果を示すのである。

例三と同じものに就いて

第　四　表

負　荷	全負荷	½負荷
回轉變流機	94, 6	93, 2
電動發電機	92, 5	91, 3
水銀整流器	93, 0	93, 5

茲に第四表は電壓を 600V に一定に保つて、負荷電流のみを全負荷から ½ 負荷に下げた時の全裝置の綜合能率を示したものである。

企業費と能率

大電流變流設備に於ける能率と云ふものゝ意味を明確にする爲めに、杜撰な計算ではあるが企業費、生產費等に關する數的の見積りをして見たい。

尤も企業費と云ひ、生產費と云つても茲では單なる電氣機械を中心として限られたもので、實際には此の上に更に建築費とか、人件費とか夫れ夫れ併せ考ふべき事柄が殘されて居る事を御承知置き願ひ度い。

A）今 10,000 kW の變流設備の機械の値段を假りに ￥400,000,－とする。

10,000 kW と云つてもユニットは二つなり三つなりに分割されて居るものと考へ、電流は 10,000 A とか 20,000 A 位の程度のものである。

電壓は定格電壓から 70 %位迄の夫れ夫れ電壓調整裝置を含んでるものと考へて居る。

￥ 400,000 資本投下に對し、其の資本利子並び

に償却費合計は一年約￥50,000,－と考へてよい。本項では之を今後簡單に投下資本利子と呼ぶ。

B）設備機器の能率2％の相違は然らば一年に積つて幾何になるか。電力料金を假りに1キロワット時當り￥0,007とすれば

￥0,007×200×24×360

＝￥12,100,－

即ち能率2％の相違は、投下資本利子￥50,000,－に比し、その約24％に迄當る。能率の優劣が如何に機器購入上の重要なファクターであるかは、之れでも分る。

C）序でにこゝで三種の變流機の運轉時に於ける消耗品費に就いて比較して見やう。

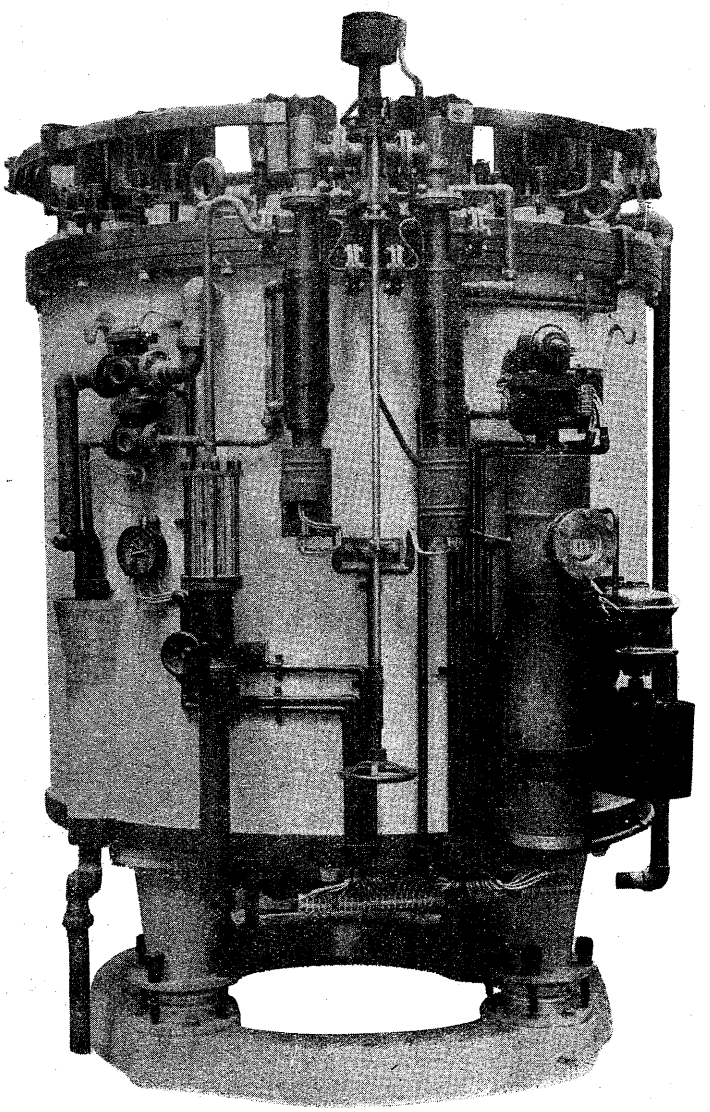
電動發電機及回轉變流機の運轉に當つては、刷子の消耗と云ふことを忘れることは出來ない。特に化學用等の大電流機械に於ては決して閑却出來ないファクターとなる。

處が刷子の摩損程度と云ふものは誠に ambiguous なものであつて、之を rigidly に算定することは頗る困難である。直流側と交流側とによつても多少相違を認めねばならないが、直流用として現在使はれて居る最も高級な刷子に就いて、手入れさへ充分であれば連續使用して大體600日と云ふ記錄がある。今之を約半分と見て即ち一ヶ年に一回刷子を全部取り換へるとすると、その經費は10,000 kW に對し、

電動發電機で約 ￥3000,－

廻轉變流機で約 ￥5000,－

となり、之を投下資本利子￥50,000,－に對比すると夫れ夫れ前者に對しては6％、後者に對しては



第二圖 水銀整流器
3000 kW 1500 V 2000 A

10%と云ふ事になる。案外相當なものと云へやう。

水銀整流器に於ては、斯る刷子損のやうな大きな消耗費は全然無いと云つてよい。

D）床面積の比較

先に引例した 10,000 kW の plant として次に三種の變流設備の合計床面積を比較して見た。

電動發電機	80平方米
回轉變流機	100 〃
水銀整流器	70 〃

茲に掲げたものは各機器の占める正味面積を合計したものである。

尙交流電源の電壓は 11000 V と假定して、電動發電機の交流側には變壓器を置いて居ないから、若し之が 20,000 V 以上になれば電動發電機のそれは回轉變流機と同等或はそれよりも少し位大きくなる筈である。

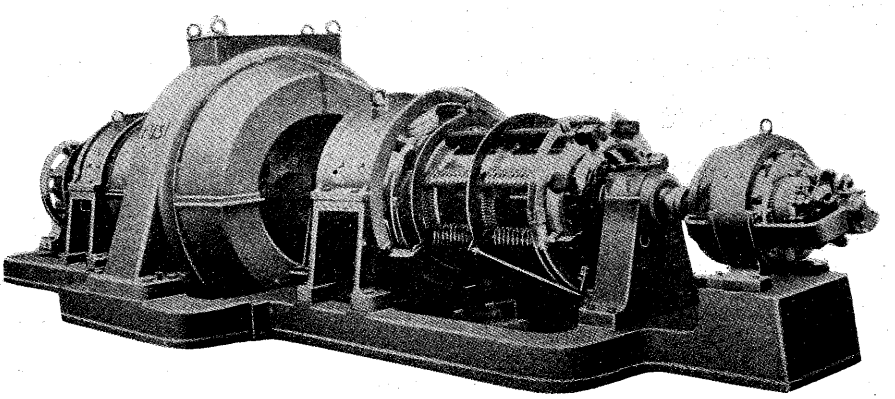
茲に水銀整流器が他の二者に比し床面積は斷然小さいと同時に、水銀整流器に於ては他の回轉機方式の二者に比し、建屋の基礎を殆んど必要としないと云ふことも忘れてならない特徴であらうと思ふ。

電壓の調整

電鐵用の變流機では、併行運轉に必要な程度の極狹い範圍のものを除いては電壓の調整と云ふことは殆んど要求されない。處が電氣分解では、殆んどすべての場合之れが必要とされるのであつて、其の範圍は電解槽の種類、或は操業上の見解等から色々であるけれども、多くの場合定格電壓の 70%、50%、或は更に 30 %位迄を負荷電流一定の許に調整することが要求される。

A）電動發電機

電動發電機では直流發電機の界磁電流を加減することに依つて、相當廣い範圍に、且つ容易に、しかも細い段階を以て其の電壓を調整することが出來る。小容量の界磁電流を加減するのであるから、加減界磁調整器は極めて小型のもので濟み、



第三圖　電動發電機

D. C. Generator	A. C. Synchronous Motor	D. C. Exciter
2×750 kW.　2×3250A	2200HP.　11.000V.	14kW.　110V.
230－24V.　750RPM.	50C.　750RPM.	750RPM.

隨つて値段も廉く、また操作も容易である。

直流發電機ではその界磁調整に依つて定格電壓の 30 %位迄は定格負荷電流の儘で運轉することが出來る。尙電流を少くするならば更に定格電壓の 10 %程度迄安定な運轉をすることが出來る。

第三圖に示したものは二基の直流發電機が併列に接續されて居る。各の界磁調整器は共同軸に聯結された一個の操作電動機によつて運轉せられて常に二基同一の端子電壓に保たれるやうになつて居る。本器の電壓範圍は頗る廣く、230Vから 80 V迄は定格電流 6500Aで、更に 80 Vから 24 V迄は

$$6500\,\mathrm{A} \times \frac{(\text{電壓})-10}{70}$$

なる式による電流を出し得る設計になつて居る。

直流發電機に於て、定格電流を其の儘にして置いて、電壓を先に述べた限界値 30 %以下に下げやうとすればどうなるかと云ふと、電流は一定であるから電機子電流に依つて生ずる反磁束に比して、主界磁束が段々に小さくなつて、終には界磁電流の加減によつて主磁束を調整して見ても、其の影響が誠に不確實となり、隨つて安定な電壓の調整は不可能となつて了ふのである。勿論電機子電流によつて生ずる反磁束は、主磁極面に施した補償捲線に依つて出來得るだけの程度には之を抑へるのであるけれども、電壓が 30 %以下にもなつて來ると、其の殘留磁束だけが既に主磁束と comparable な量となつて來て安定を失ふに到るのである。

然し乍ら一般電解槽として要求せらるゝ電壓の調整範圍は、多く上記の主流發電機の出し得る限界値 30 %以内であつて、後に述べる廻轉變流機に比較して屢〻電動發電機が重寶がられる長所の最も著しい點であることを牢記して置く。

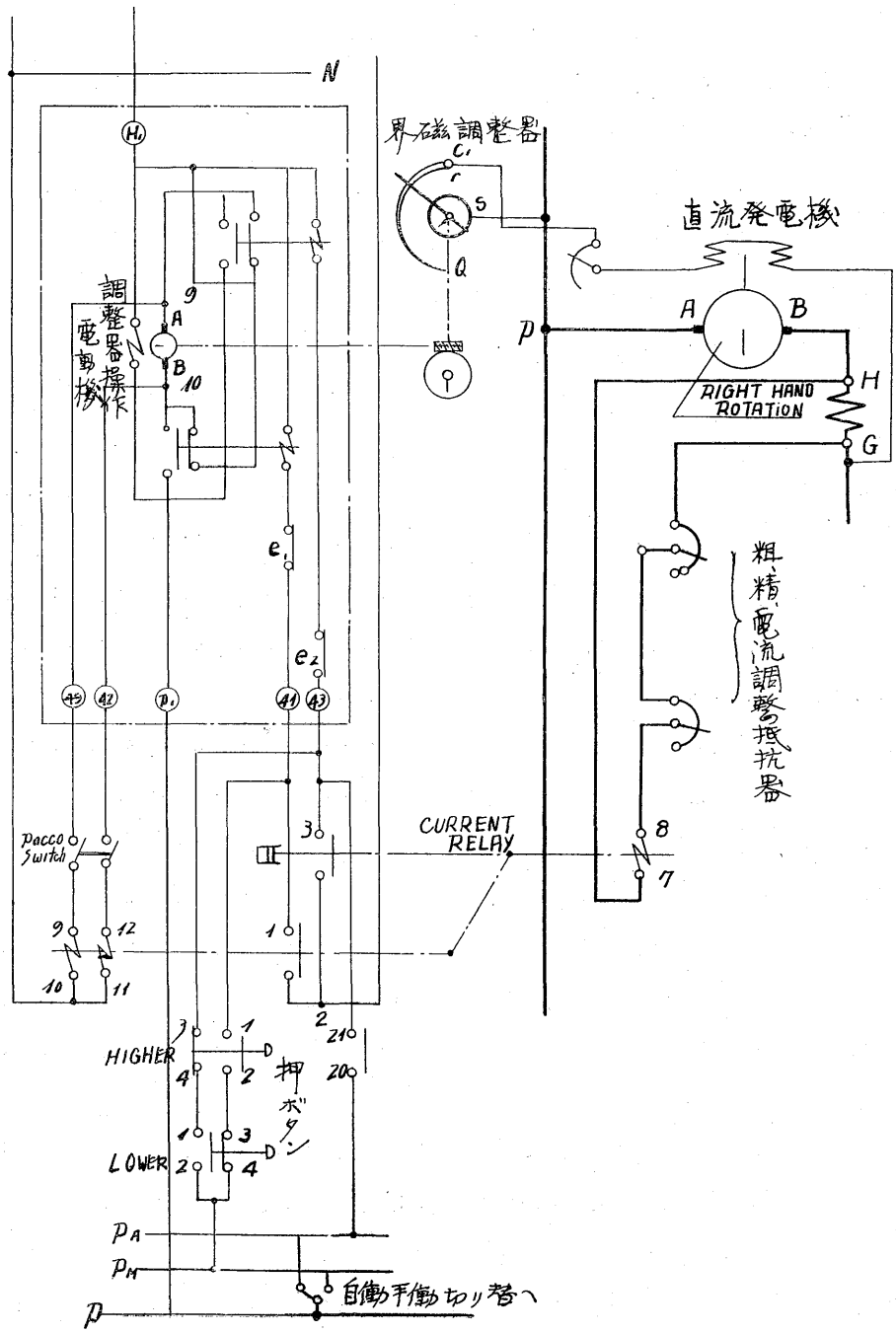
電解用の電源としては、電極或は電解液の狀態に應じて電壓の昇降が要求されるが、其の變化する電壓の許に、常に電流を一定に保つ必要がある。

其の爲に發電機に自働電流調整器を設備する。第四圖は其の接續を示す。

發電機の整流磁極線輪並びに補償線輪に併列に鋭敏な電流繼電器の勵磁回路を接續して置く。發電機の發電子電流が增減すると、それによつて上記二直列線輪の端子電壓が增減して電流繼電器を働作せしめる。電流繼電器の接觸子は、發電機の界磁調整器の操作電動機を制御して發電機の端子電壓を調整し、增減しやうとした電流の變化を喰ひ止めて常に一定の値に保つことが出來るのである。

電動發電機に於ては先に述べた通り、電壓の調整回路が小容量であり、且つかなり細い段階に調整出來るところからして自働電流調整器の設置に當つても可成り精密な、而して敏速な裝置を備へることが出來る。電動發電機に於ては、充分よく調整された自働調整器を働かせることによつて、其の電流値を略々 ±0,5 %の誤差の範圍に保持することが容易である。

後に述べる回轉變流機並びに水銀整流器では、この點電動發電機に到底及ばないのである。



第四圖　自働電流調整器の接續

B）回轉變流機

廻轉變流機に於ては、直流側の電壓（E_d）は交流側の電壓（E_a）と略々次の様な關係にある。

$$E_a = E_d \cdot \sin\frac{\pi}{m} / \sqrt{2}$$

隨つて直流側電壓 E_d を調整する爲めには、交流側電壓 E_a を調整することが必要である。電動發電機に於けるやうに界磁電流の調整によつては電壓の調整を行ふことが出來ない。回轉變流機の界磁電流を調整することは單に變流機が交流電源から受ける入力の力率を加減するのみであつて、直接電壓の調整には役立たぬものである。尤も極狹い範圍の電壓の調整は回轉變流機に於ても界磁電流に依つて行ふ事がある。即ち此の場合は變流機の交流側回路にリアクタンスを挿入して置き、回轉變流機の界磁調整に依つてその入力電流の相の進遲を制御し、交流側に挿入されたリアクタンスに於ける電壓降下（電流が遲相であれば電壓降下は正となり、電流が進相であれば電壓降下は負となつて逆に變流機の滑動環電壓を高める）を利用する方法である。然し此の方法は回轉變流機を進相又は遲相に於て運轉することを前提とするものである。一體回轉變流機は進相又は遲相に於ては交流波と直流波との相殺部分少くなり、隨つて銅損を增し、著しく機械のサイズを大きくする必要が生ずる爲めに、此の電壓調整法は實際には極めて狹い範圍のものに限られるのである。

回轉變流機では先に述べた通り、直流電壓と交流電壓との間に一定の關係式がある故、直流電壓を加減しやうとすれば、原則として交流側電壓を調整する裝置を必要とする。それには普通二つの方法が用ひられる。

其の一つは誘導電壓調整器を用ひる方式である。

即ち主變壓器の一次側に誘導電壓調整器を入れて之に依つて變壓器の一次電壓を加減し、以て回轉變流機に apply される滑動環電壓を制御するのである。誘導電壓調整器は云ふまでもなく無段階調整器であつて、最も圓滑な電壓調整を行ふ事が出來る。唯その範圍が廣くなると誘導電壓調整器は容量大となり、比較的高價な機器である故に、全體としても相當値高になつて來る。

電流一定で、電壓がEから hE まで調整を要する場合、誘導電壓調整器の容量は次の式で簡單に求められる。

kVA ＝誘導電壓調整器の容量

kW ＝回轉變流機の出力

η_1 ＝回轉變流機の能率

η_2 ＝主變壓器の能率

$$\frac{\text{kVA}}{\text{kW}} = \frac{1-h}{2\eta_1 \cdot \eta_2}$$

誘導電壓調整器は先に述べたやうに無段階調整器であるから、電動發電機で述べたやうに鋭敏なる自働電流調整器を聯動させることが出來る。唯電動發電機の場合に比較すると其の界磁調整器に比較して、誘導電壓調整器の方は mass が大きい丈けに、操作電動機にかゝる慣性能力が大きいから、界磁調整器の場合の如く速起動、速停止が困難となり、隨つて餘り早く廻轉させると繼電器が hunting を起す事になる。同じ意味で餘り繼電器

を鋭敏にすれば同様の結果になる。斯くて回轉變流機は時間に於て電動發電機の場合の約三倍遲く、感度に於ても約二倍鈍くなるものと思つてよい。

然し實際問題としては、サービスにも依るけれども、此の事は左程重要性のある問題とはならないやうに思ふ。參考の爲めに大體夫れ夫れのオーダーを示す意味で兩者の感度及び電流恢復時間を凡その數字で表はして置かう。

	感　度	電流20%の急變に對する恢復時間
電動發電機	± 0,5%	2－4 秒
回轉變流機	± 1,0%	6－15秒
水銀整流器	同　上	同　上

注意：玆に水銀整流器を併記したのは後に述べる如く水銀整流器の電壓調整にも亦誘導電壓調整器を用ふるのであつて、自働電流調整器に就いては回轉變流機と全然同じ條件となるからである。

回轉變流機の電壓を調整する方法として、今一つは、負荷時電壓調整變壓器を使用する。負荷時電壓調整變壓器のよい所は先づ第一値段の安い點である。誘導電壓調整器の約半分の値段ですむ。さうして今一つよいことは誘導電壓調整器を用ひると入力の力率を惡くする缺點があるが、負荷時電壓調整變壓器ではその事が全然ない。

負荷時電壓調整變壓器とは負荷時に於て負荷のまゝタップの切り替への出來る構造を持つた可變比單捲變壓器であつて、時には別に單捲變壓器を置かずに、主變壓器の捲線にぢかに可變比のタップを設けたものもある。勿論切り替へは構造上からして電流の少い一次側でやるのであるから、調整範圍の廣いものでは、その爲めに主變壓器が異常に大型となる故、上に述べたやうに主變壓器とは別に可變比單捲變壓器を設置するのである。

負荷時電壓調整變壓器では誘導電壓調整器に於けるやうに無段階調整と云ふことは望まれない。然も構造上餘り多くのタップを設けることは困難であるから、せいぜい２％とか３％とかの段階を置くことになる。

隨つて此の方式では鋭敏な自働電流調整器を聯動させることは全然不可能である。

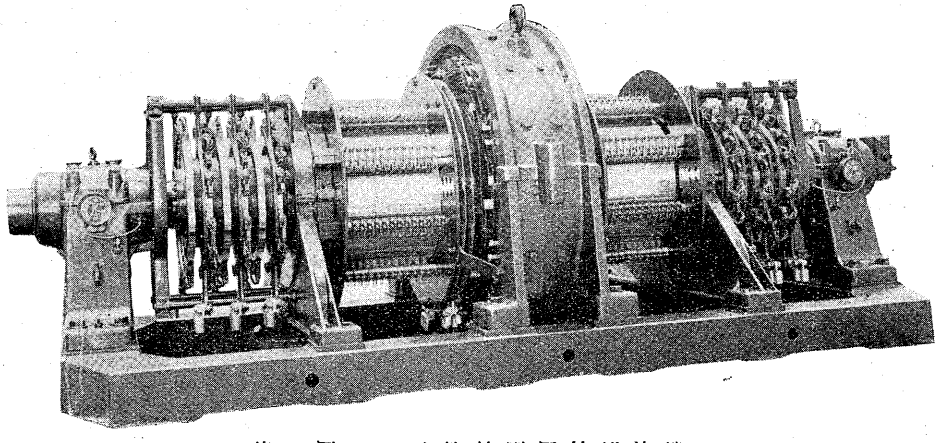
電壓の調整に關し、回轉變流機の主機に就て其の特性を考ふるに、全體回轉變流機は變流機であると同時に一つの同期電動機として運轉して居るものである。凡そ同期電動機は、その定格電壓に於て强磁界で運轉して居る間は强大な同期回轉力を持つて安定に運轉を繼續して居るものであるが、端子電壓をずつと低くしたり、或は界磁電流を少くしてやれば、忽ち同期外れの現象を來すものである。

回轉變流機に於ては、先に述べた通り交流電壓値と直流電壓値との間に略々一定の關係式があつて、低壓の直流電壓を得やうとすればそれに應じて滑動環電壓を下げてやらねばならない。隨つてかゝる狀態に於ては、回轉變流機は頗る不安定な同期機となるのである。今日最も進んだ設計で以て回轉變流機の低壓運轉の安定限界は先づ最低で

定格電壓の 50 %位となつて居る。之れ以下の電壓では回轉變流機の同期回轉力は著しく微弱となつて、運轉は不安定となり、ハンチングの現象を起して來る。整流作用は惡化し、時に負荷の變動、或は電源の電壓又は周波數等にフラクチユエーションか起れば忽ち同期外れを招いて、恐ろしい閃路現象等を起すことになる。

安定用同期電動機の使用： 此の不安定を防止する爲めに、回轉變流機に安定用同期回轉機を直結又は齒車聯結する。此の方法は最近獨逸で考案せられたもので、未だ實際には餘り廣く用ひられて居ないけれども、確かに面白い案である。安定用電動機の容量は回轉變流機の容量の約 10 %以下で充分であつて、同期誘導電動機を使用して回轉變流機の起動電動機を兼務させる事が出來る。容量は主機の 10 %と云つても、之は運轉中常時全負荷が掛つて居るのでなく、主機が低壓運轉に於て同期外れを演じるべく Phase angle の Displacement を起した時のみ始めて荷を負ふのであるから、主機の綜合能率の計算等に於ては、安定用電動機の單に無負荷損のみが加重されるものと考へて差支へない。

二重捲線型回轉變流機： 回轉變流機の單獨安定限界電壓は、上に述べた通り、せいぜい 50 %であるが、更に之を電動發電機の如く 30 %位迄も下げて使用したい場合には二重捲線型變流機 (Double winding rotary Converter) を用ふることが出來る。



第五圖 二重捲線型回轉變流機
1155 kW 550/275 V 2100/4200 A 60 Cy. 900 R P.M.

普通の回轉變流機の回轉子に二群の捲線が施され、その捲線は又夫れ夫れ別々の整流子並びに滑動環を持つて居る。第五圖はその實例を示したもので、二つの捲線を直列に結線することによつて 550 V から 275 V 迄の電壓が得られ、更に此れを併列に結線することに依つて、275 V から 138 V 迄電壓を下げることが出來る。即ち一捲線に就ては最高電壓の 50 %迄下げる事に依つて、結局 25 %迄の端子電壓を接續替へによつて得ることが出來るのである。

全然別個の二基の變流機を Series-parallel に使用する代りに、二個の變流機の固定子、回轉子、鐵心、軸、床盤、軸承等を共通にしたものを用ひたと云ふまでであるが、値段、能率、床面積と云つた樣な諸點で斷然特長を持つて居ると云へやう。

C）水銀整流器

水銀整流器に就いては電壓調整に關し多く述べる必要がない。調整裝置は回轉變流機の場合と同一である。即ち誘導電壓調整器又は負荷時電壓調整變壓器を用ふる。

グリツドに或る電壓を與へることによつて、整流電壓を調整する所謂グリツドコントロール方式に就いては又題を更めて述べるが、之には勿論廣い範圍の電壓調整を望むことは出來ない。化學用變流機の如く大電流であつて速働々作の遮斷器を望み得ない service にあつては、グリツドコントロールに依つて短絡保護裝置を設けることが絶對に望ましい。

水銀整流器そのものゝ特性としては、低壓運轉は少しも問題ではない。唯水銀整流器では先に能率の項に於て述べたやうに、低電壓の運轉に於ては能率が著しく低下することを覺悟せなければならない。

結　　言

能率の點から云ふならば、一般には回轉變流機が最も優れて居る。電壓の比較的高い處、即ち 600V 以上になつて來ると水銀整流器が能率の點でも頭角を表はして來る。それに水銀整流器では他の回轉機の如く、刷子の消耗費を要しないし、又特に述べなかつたけれども、起動、停止その他一般の操作が回轉機に比し簡單であつて、隨つて人件費その他維持費が少くて濟む。水銀整流器は運轉に騷音を生ずることなく、基礎は殆んど不要であり且つその占有面積も一番小さくてすむ。之等一切を併せ考へるならば今後 600V 前後以上の化學用變流機として水銀整流器の流行は必然的のものであることを信ずる。一體水銀整流器の特質から云ふならば、電鐵のやうな高壓で然も變動性の多い負荷よりは、比較的低壓な然も continuous load である電氣分解の方がよくその性に當て嵌つたものとも考へられやう。最近歐羅巴方面では盛んに此の方面に水銀整流機が用ひられ出したと云ふ報告を聞いた。

電壓の調整の點ではやはり電動發電機に分がある。

reliability と云ふ問題になると、之はかなり使ふ人の主觀の問題になるのであり、又實際、handling と云ふ事と不可別の問題ともなるのであるが、水銀整流器は別として、回轉變流機と電動發電機とを比較するならば、外の點で條件が10と10なら先づ電動發電機にと云ふ事は出來やうと思ふ。

e-Front runners

＊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。