

最近の水車発電機概観

後藤恒夫* 高木正*

Water Turbine Generator in Recent Times

By Tsuneo Goto and Tadasu Takagi

Hitachi Works, Hitachi, Ltd.

Abstract

Urged by the need for more power, many hydro-electric power projects are being planned by Japan Power Generation and Transmission Co. and there industrial companies.

This paper deals with some features newly developed in water wheel generators.

In Construction, a new ventilating system for the rotor was adopted for the 28,000 kVA alternators for the Yamabe P. S. as shown in Fig. 2. Some vertical alternators have been equipped with a segmental type bearing for its upper guide bearing as illustrated in Fig. 5.

In insulation, coils for around 20,000 V can be made without no fear.

The problem of surging is being studied from various points of view. If the impulse strikes the generator coil, a maximum 95 kV between the ground in the case of a 154 kV transmission line and 2,000 V between layers could be given rise under the worst conditions. (though not possible).

Exciters of high voltage rise and ceiling voltage have come to be used to obtain quick response excitation.

The driving of turbine governor speeder is in most cases going to be made by electric methods. Two methods are now used. One uses a double current generator type sub-exciter and the other a generator of permanent magnet type which is more reliable than the former.

Developments in protecting devices are; over-voltage restricting device, layer circuit protecting device, and earthing protecting device for field coils.

[I] 緒言

我國が繁榮するためには、唯一の資源たる水力資源を

開發する事が急務であり、電力の増強は國を挙げての要望である。

現に日本發送電初め國鐵、各縣、各事業會社等で膨大なる發電計畫が建てられ、既に二三建設途上にある事は

* 日立製作所日立工場

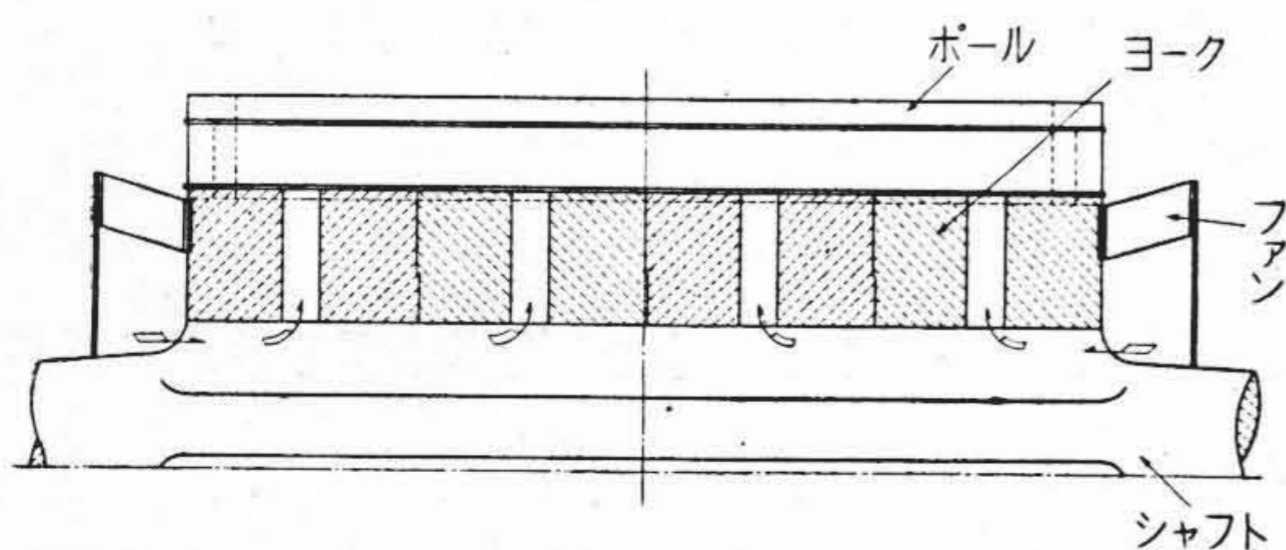
誠に喜ばしい事である。この時に當り最近の水車發電機の構造その他に關する二三の傾向に就いて述べ、今後の諸計畫の参考に資したいと思う。

[II] 構造上の二三の進歩

最近に於ける水車の設計は、能率向上及び經濟的の觀點から、殆んどその特有速度の許容限度ぎりぎりに設計される場合が多い。又速度上昇率を大きくとつても發電機の電壓上昇が、危険なる程度まで上昇せぬ様な保護装置が設けられているため、速度上昇による電壓上昇の問題は心配がなくなつた。以上二つの理由から、最近では漸次大容量まで比較的高速が採用され、且つ慣性能率の要求が減少して來ているので、發電機は漸次外径に比し積厚さの長い機械が製作される傾向にある。茲に於て問題となる點は通風方式である。普通の方法による、幅流ファンと磁極の送風作用とにより、ファンから極間を通過し、固定子通風渠に通風する方式では、固定子通風渠に必要にして充分なる風量を通すためには極間面積の不足を來たし、更に極間にある界磁線輪支え金具のため中央部は通風困難となり、固定子線輪中央部の温度が高くなる心配がある。このため従來比較的高速大容量機では鐵の中央部に孔をあけこの孔より磁極間に通風する方法が採用されていた。(第 1 圖)日立製作所に於て目下鋭意製作中の日本國有鐵道山邊發電所納 28000 kVA 167 RPM の機械に對しては、強度に影響を及ぼさざる簡単な方法により、セグメントヨークに極めて有效なる通風孔をあける方法を案出し採用している。

(第 2 圖)

軸受は従來の構造のもの(第 3 圖)の他に、セグメント式(第 4 圖)がある。これは米國では最近の標準とし

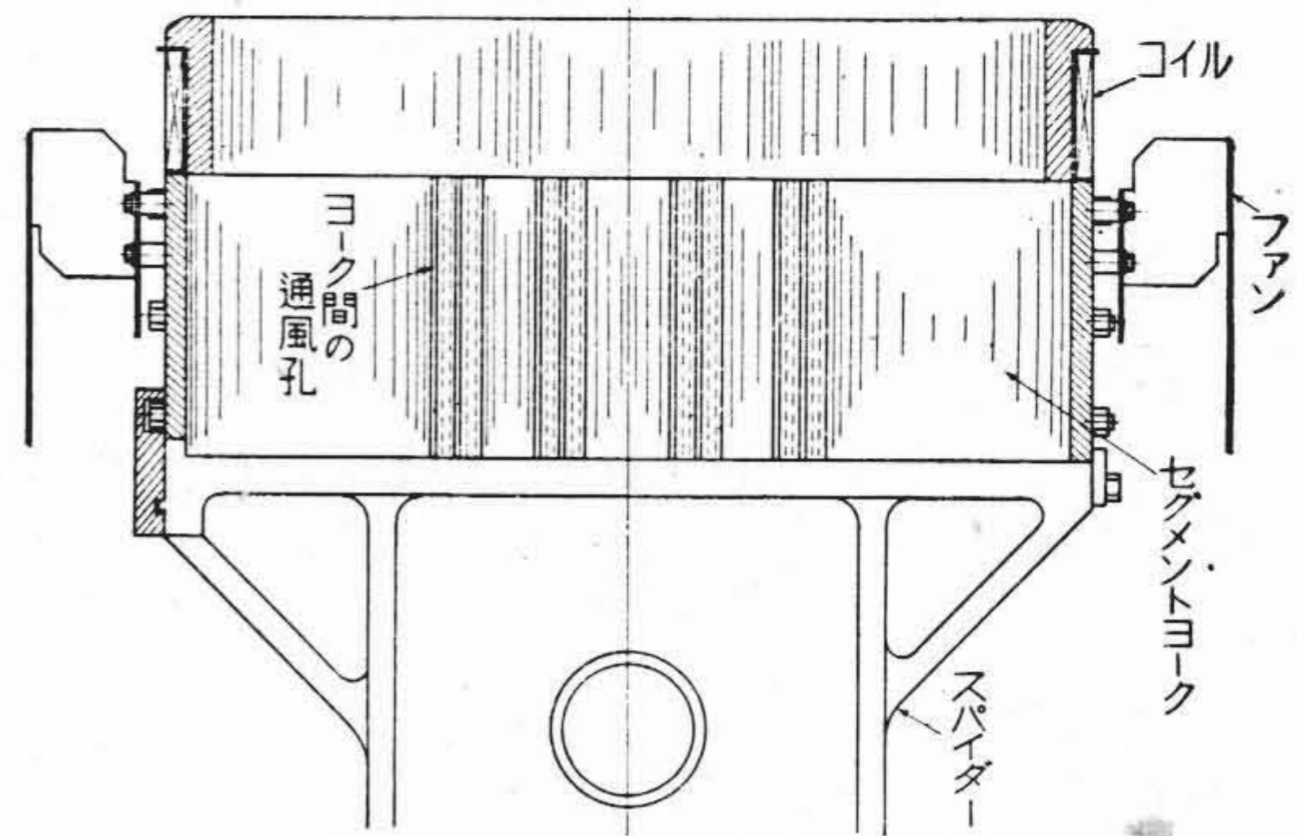


第 1 圖 回轉子の通風方式

Fig. 1 Method of ventilation of Rotor.

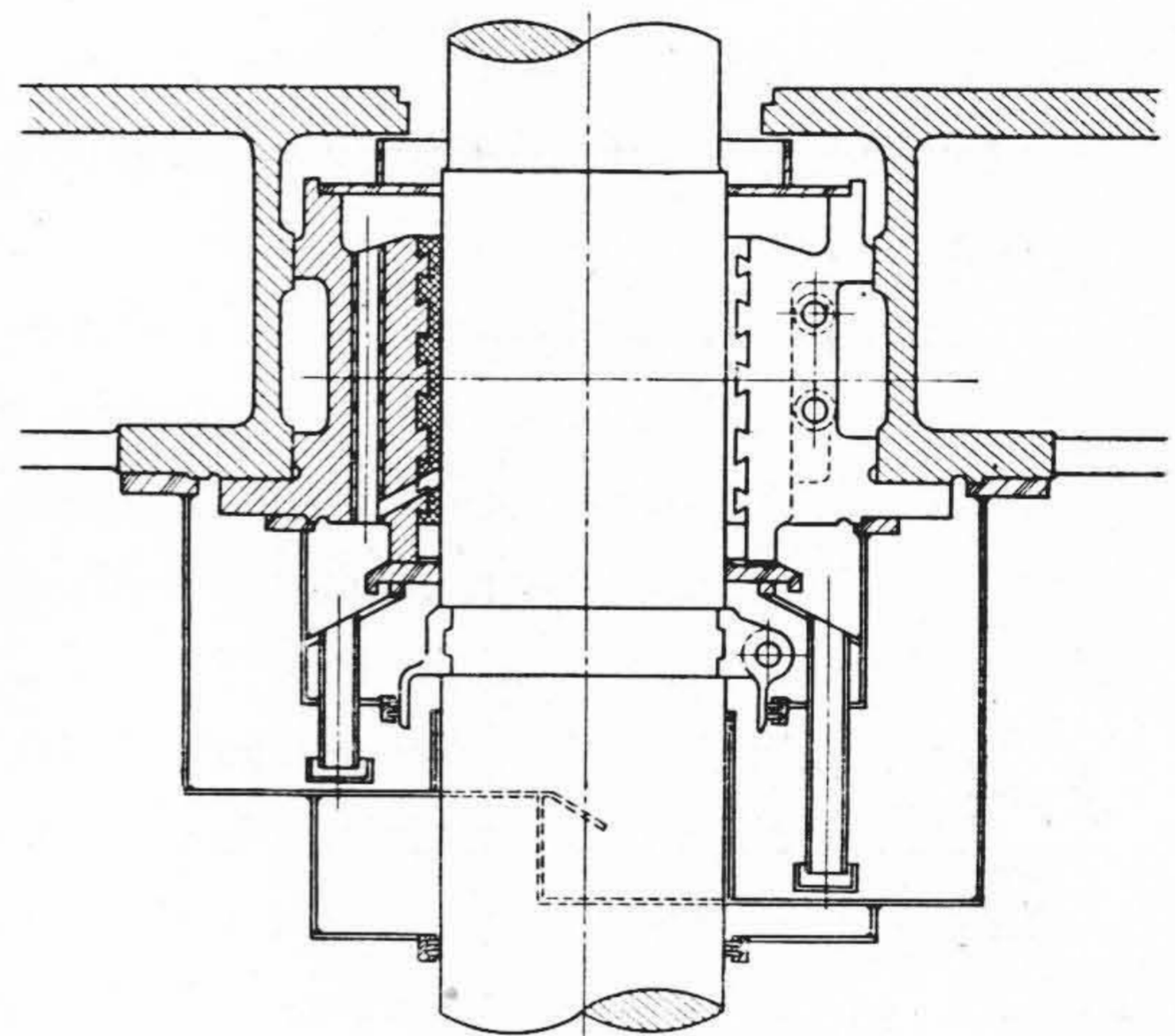
て廣く採用されている方式で下記の如き利點がある。

- 1、潤滑油循環装置が不要になる。



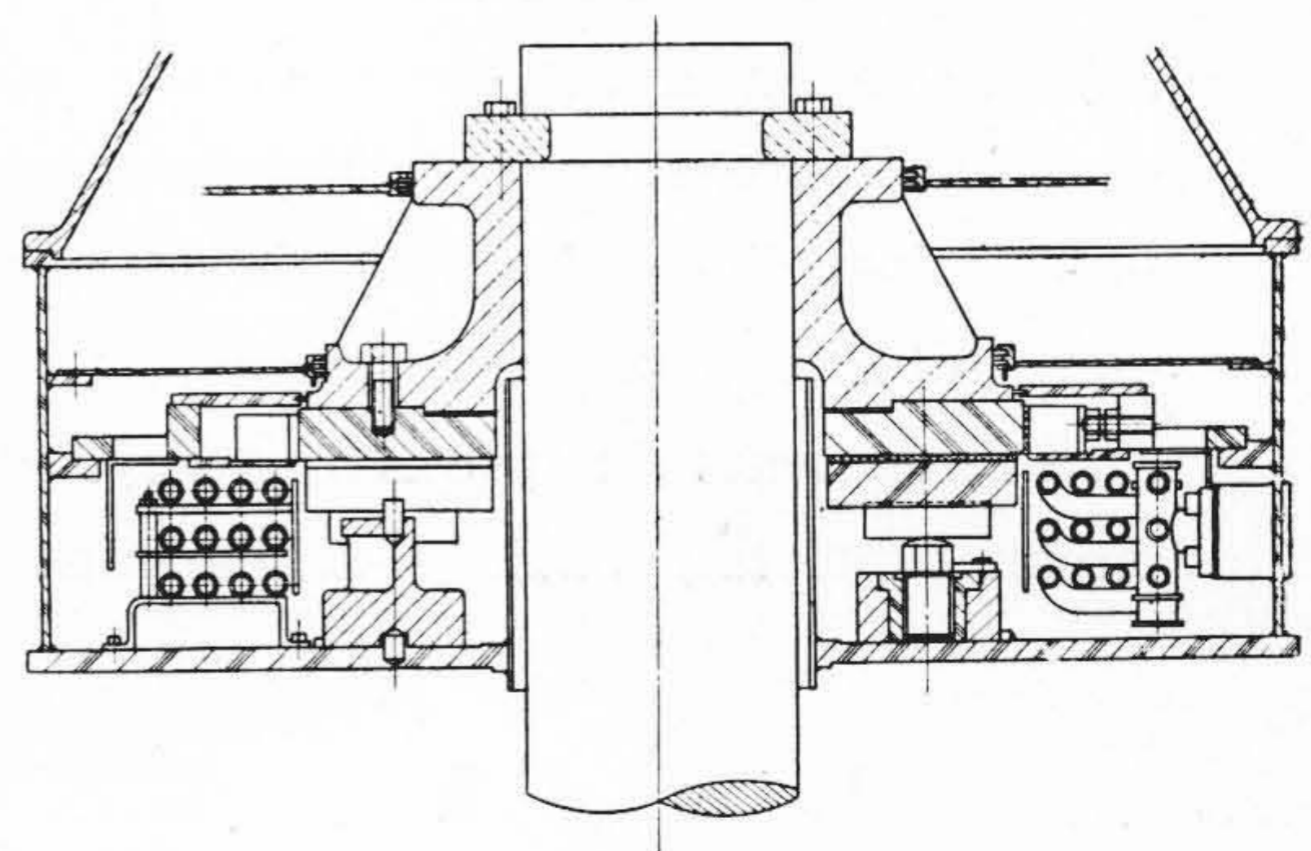
第 2 圖 回轉子の新通風方式

Fig. 2 New method of Rotor ventilation through laminating yoke.



第 3 圖 上部案内軸受

Fig. 3 Upper guide bearing.



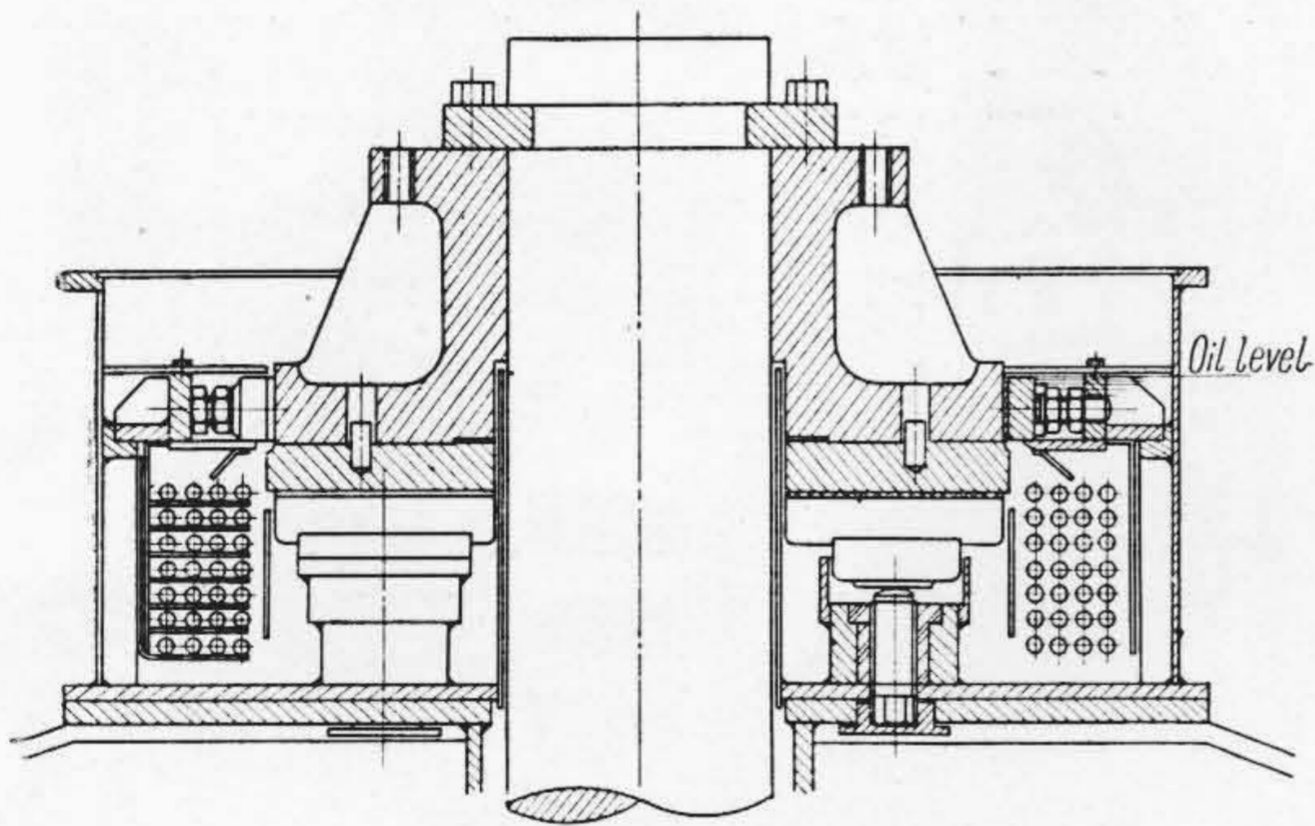
第 4 圖 上部案内軸受としてのセグメント軸受の構造

Fig. 4 Upper guide bearing with segmental metal.

- 2、軸受が軽量になるので組立据付が容易となる。
- 3、発電機の寸法、重量が減少し、建家及び資材の節約となる。
- 4、軸受の一部が焼損した場合にもバビットの詰替を要せず、調整のみにてすむ。
- 5、強制給油式では、油の循環が止まれば直ちに軸受が焼損するに比し、セグメント式では冷却水が停つても直ちには焼けぬ故、信頼度が高くなる。

この方式は特に低速度の機械に適している。日立製作所に於てはこの方式を昭和 17 年頃より二三の発電機に採用し、その実績と経験とにより、以来幾多の改良を施し、現在のものは第 5 圖の如き構造になつている。又スラストベアリングの調整ボルトは圖に見る如く外部より調整出来る。(新案出願中)

消火装置は最も簡単確實なる注水消火装置が設けられるのが普通である。この装置に對しても、發火の瞬時になるべく多量の水を有効に線輪に注水すべく改良が加え



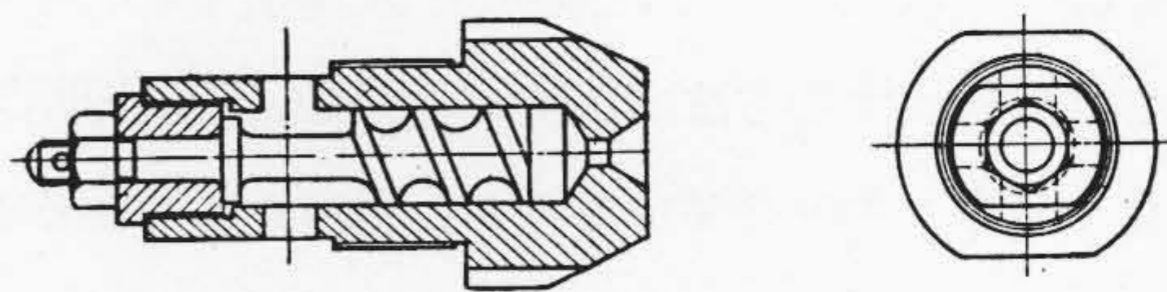
第 5 圖 上部案内軸受としてセグメント軸受を用いる場合の最近の構造

Fig. 5 Upper guide bearing with segmental metal.

られ、線輪の上下兩方に設けられた多數の噴出孔から同時に多量の水が、噴霧状に噴出す如き構造が考案されている。この噴出孔は第 6 圖の如き構造で、水が噴出孔から噴き出す直前に、螺旋状の通路を通る事により遠心力が附加され、噴出孔を適当な形状に設計すれば、完全に放射状に噴出さす事が出来る。(新案出願中)

[III] 絶 縁

電気機械の生命である絶縁物に關しては、最も眞摯な



第 6 圖 注水消火装置用ノズル

Fig. 6 Water spraying nozzle.

る研究が續けられ、絶縁材料そのもの及び絶縁處理の進歩の結果 20000 V 級までの線輪は何ら不安なく製作出来る。線輪の絶縁法には、コンパウンド注入式とワニス焼付式との二方法があるが、日立製作所に於ては兩者の長所を共に具備する事をねらつて兩者併用の方式を採用している。この場合コンパウンドは軟化點の適當なものを撰ぶ必要があり、焼付ワニスは熱硬化性の良好なるものが望ましい。最もよきコンパウンドとして吾々は軟化點は 110°C 位のものを撰んでいる。又焼付用ワニスは熱硬化性のよきものとの意で、米國では特にサーモセットワニスと云つて宣傳しているが、吾々の使用しているのもこれと似た性質をもつたものである。又最近米國では難燃性絶縁物を用いている事が報ぜられている。我國に於ても難燃性ビニール樹脂系絶縁物を用いた絶縁線が、通信線其他に既に實用に供されているが、經濟的見地、熱特性及び腐蝕性等の點から未だ一般回轉機には不適當である。又絶縁處理の方面に於ては、高周波誘電加熱による乾燥が實用の域に達しているが、從來の外部加熱又は内部加熱の方法に比し、極めて短時間に目的とする箇所のみ加熱しうる點に於て極めて結果は良好である。日立製作所に於ける實驗に於ても 11000 V 級線輪に對し、 $10 \times 10^6 \sim$ 程度の高周波にて加熱せる結果は、乾燥加熱時間を $1/2$ 以下に短縮する事が出来た。更に將來 $1/5$ 以下に短縮しうる豫定である。又 6000 V 級以上の線輪の表面には有效なるコロナ防止塗料が塗布されている。

[IV] 衝擊波に對する線輪絶縁の問題

落雷による衝擊波により發電機の線輪が焼損する事故はかなり多い。この場合焼損箇所は端子に近い部分が多く、中性點が非接地のものに於ては、中性點からの反射

波が重疊する事により中性點近くが焼損する場合もある。これを防止する方法は、線輪の絶縁、特に層間絶縁を強化する事も勿論必要であるが、根本的にはかかる衝撃波が線輪に浸入しない様保護する事が必要である。

今送電線電壓 154 kV、發電機電壓 11 kV とした場合に就て考えて見るに、154 kV 側避雷器の制限電壓を 700 kV とすれば、如何なる衝撃波が來ても避雷器が健全である限りこれ以上の電壓が變壓器の一次側に入る事はないが、萬一避雷器が働かないとしても、碍子の閃絡電壓以上に上る事はあり得ない。普通 154 kV 側碍子の閃絡電壓は 950 kV 位と考えればよい。

又使用者、官廳、製作者の協同研究機關である雷害防止委員會で實驗された、西窪、賤母、大桑、讀書各發電所及び茨城縣變電所に於ける測定結果及び日立研究所に於ける實驗結果を綜合検討すると、變壓器一次側（高壓側）に衝撃波を印加した場合、その二次側（低壓側）にあらわれる電壓に関しては大體次の事が言い得る。即ち變壓器の二次側に表われる衝撃波の波高値は、一次側に印加される衝撃波が一線印加の場合、三線一括印加の場合、變壓器及び發電機の中性點が接地している場合、非接地の場合、サージアブソーバーがある場合、無き場合等諸種の條件によつていちぢるしく異なるものである。然し最悪の條件の場合に於ても、發電機が接続されておれば、二次側の値は一次側の値の 20 % を越える事はない。従つて雷撃が變

$$950 \text{ kV} \times 0.2 = 190 \text{ kV}$$

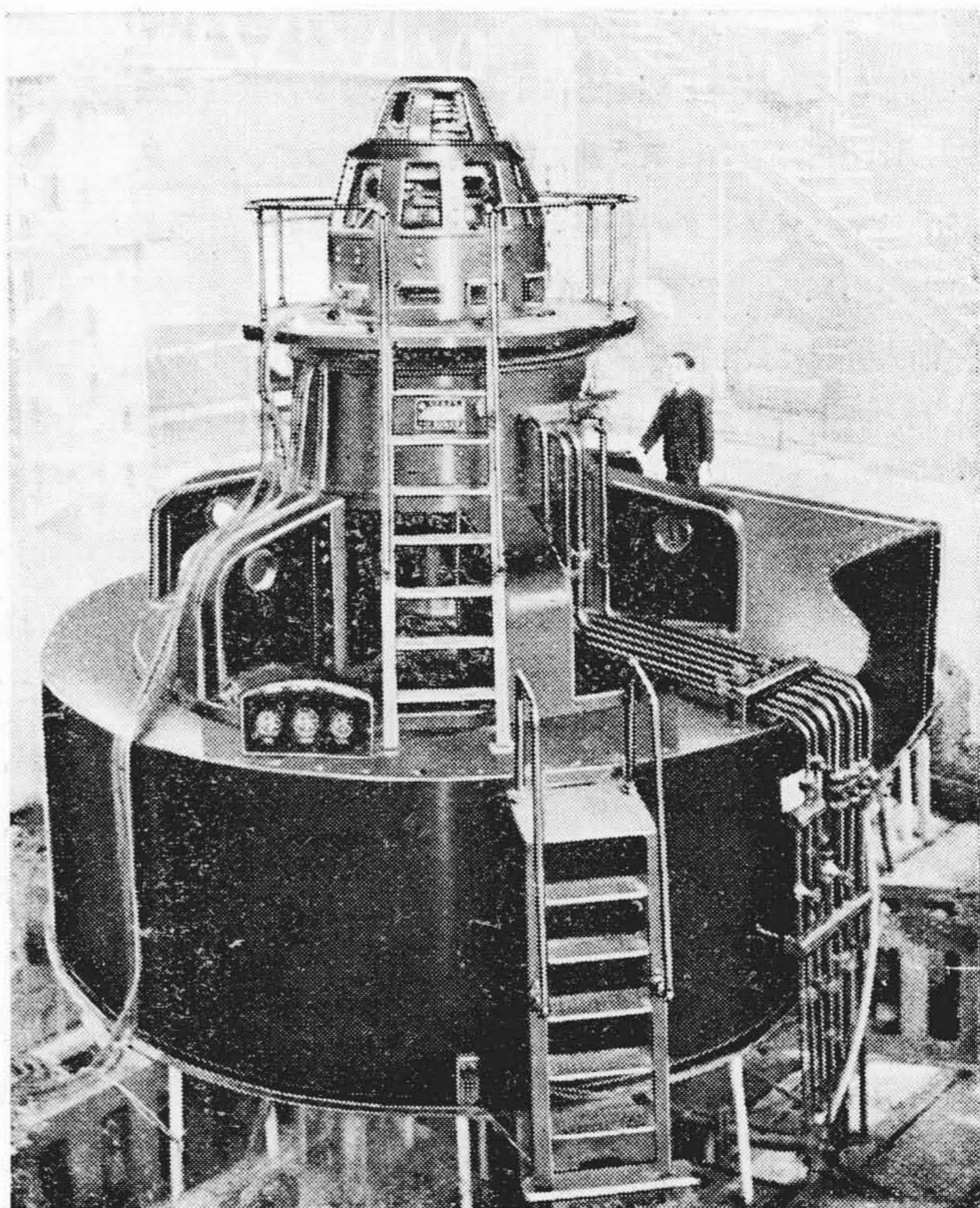
壓器の一次側に於てその端子に接近せる位置に加えられた最悪の場合に於ても、二次側にあらわれる最高電壓は

程度である。又最近の發電機は必ずサージアブソーバーが設置される。これの効果に就ては上記各試験に於ても夫々測定されているが、その結果によると、0.5 μF の蓄電器を挿入せる場合、波高値は 25~50 % に低下している。蓄電器の容量を増加すれば更に低下する。故にサージアブソーバーを設置した場合、發電機端子に加われ

る最大電壓は

$$190 \text{ kV} \times 0.5 = 95 \text{ kV}$$

という事になる。然し發電所内に落雷するチャンスは極めて稀であり、送電線に落雷した場合には、送電線内の減衰分だけ波高値は低くなる。アレスターが健全なる場合にもこの電壓より低下する事は勿論である。又變壓器を通して衝撃波が浸入する場合、二次側の電壓は電磁誘導によるものよりも、静電的に傳達されるものの方が遙かに強大であるため、一次と二次との巻線比の影響は比



第 7 圖 宮崎縣電石河内 13750 kVA 11000 V
50/60~300/360 RPM 豎軸交流發電機

Fig. 7 13750 kVA 300 RPM Vertical shaft
water turbine generator for Miya-
zakiken Ishikochi Power Station.

較的小である。

従つて發電機の線輪の絶縁は、11000 V の線輪で上記 95 kV に耐える事が理想である。日立製作所で實驗した結果によると 1.5 \times 40 μS の標準波で試験した結果は 100 kV 以上の波高値に耐える事を確認した。又この大

地間電圧は発電機の中性点が接地してある場合には、中性点に近い部分では殆んど0となるので主として端子に近い部分のみの問題である。中性点が非接地の場合に於ては、中性点からの反射波のため、中性点の電圧が却つて端子に於けるそれよりも高い場合も生じるので、発電機の中性点は必ず接地すべきである。

さてかゝる高電圧が端子にかゝつた場合、層間絶縁は如何に考えるべきか。前記雷害防止委員会の実験結果及び日立製作所にて試験せる 13750 kVA 300 RPM 11000 V 発電機 (第7圖) に於ける試験結果より見るに、大體端子側から 20 %位の線輪に 40~50 % 位の電圧が集中している。従つて上記 13750 kVA 発電機を例に挙げると、層間にかかる最大電圧は

$$\frac{95000 \text{ V} \times 0.5}{126 \times 0.2} = 1890 \text{ V}$$

狀に 126 は一相の直列巻回数である。

日立製作所にて実験せる結果は 11000 V 線輪の層間絶縁は $1.0 \times 40 \mu\text{S}$ の標準波を加えた場合 20 kV 以上の耐力を示している故充分安全なりという事が出来る。

[VI] 勵磁機

勵磁機は普通発電機軸に直結せられ、勵磁容量が數十 kW 以上の場合は、副勵磁機が設けられる。送電線の安定度をよくするため速應勵磁方式が用いられるが、最近はその速應度及び範囲が更に擴大されて來た。

速應勵磁を行うには、副勵磁機を設けたり、振動式自動電圧調整器を用いたりする。自動電圧調整器を用い勵磁機の頂上電圧はオーバーシュージングの作用を與えるために、自動電圧調整器の動作特性に應じて、或程度高くとるのがよく、送電線の状態、発電機の大きさにより定格電圧の 130~150 % を普通とするが、特に負荷變動の激しい発電機に對しては 180 % 以上もとることがある。一般に抵抗式自動電圧調整器を用いる方式のものでは 130~150 % 程度にし、振動式自動電圧調整器を用いる方式のものは稍高く、150~185 % にとるのがよい様に考えられる。

速應勵磁のため、頂上電圧と共に今一つ問題になるのは電圧上昇率である。副勵磁機のない普通の勵磁機では定格電圧に對し 50~200V/秒であるが、副勵磁機を併用する速應勵磁機では 260~600 V/秒の値にする。副勵磁機を併用した場合の電圧上昇率は電圧零の附近で最大で頂上電圧の點で零になるが、一方この値は頂上電圧の大きさに依つて非常に左右されるもので、單に電圧上昇率何秒と云つても之で充分勵磁機の電圧確立速度を表わすものとは云えないのであつて、頂上電圧の値を規定して、この値を云わねば意味がない。

速應度を増し、又接點のある制御器を用いしないで自動電圧調整の作用をもたせるため、最近、増幅率が大きく時定數の小さい勵磁機により、負饋還を與える自動制御方式を用いようとする機運が急激にきざして來た。この方式は、交流電圧が標準値から外れた僅かな變化量を、増幅率の大きい副勵磁機で増幅し、増幅された電圧を主勵磁機の界磁に負饋還して、交流電圧の標準値からのズレを元に戻そうとする方式と、負饋還作用により、發生現象 (この場合は交流電圧) を或標準値に強力に保とうとする作用をもつた特殊勵磁機により勵磁する方式とに大別できる。兩方式とも亂調防止装置に相當考案を施さねばならない。日立製作所では目下、後者の方式につき鋭意研究中で近く完成される豫定である。

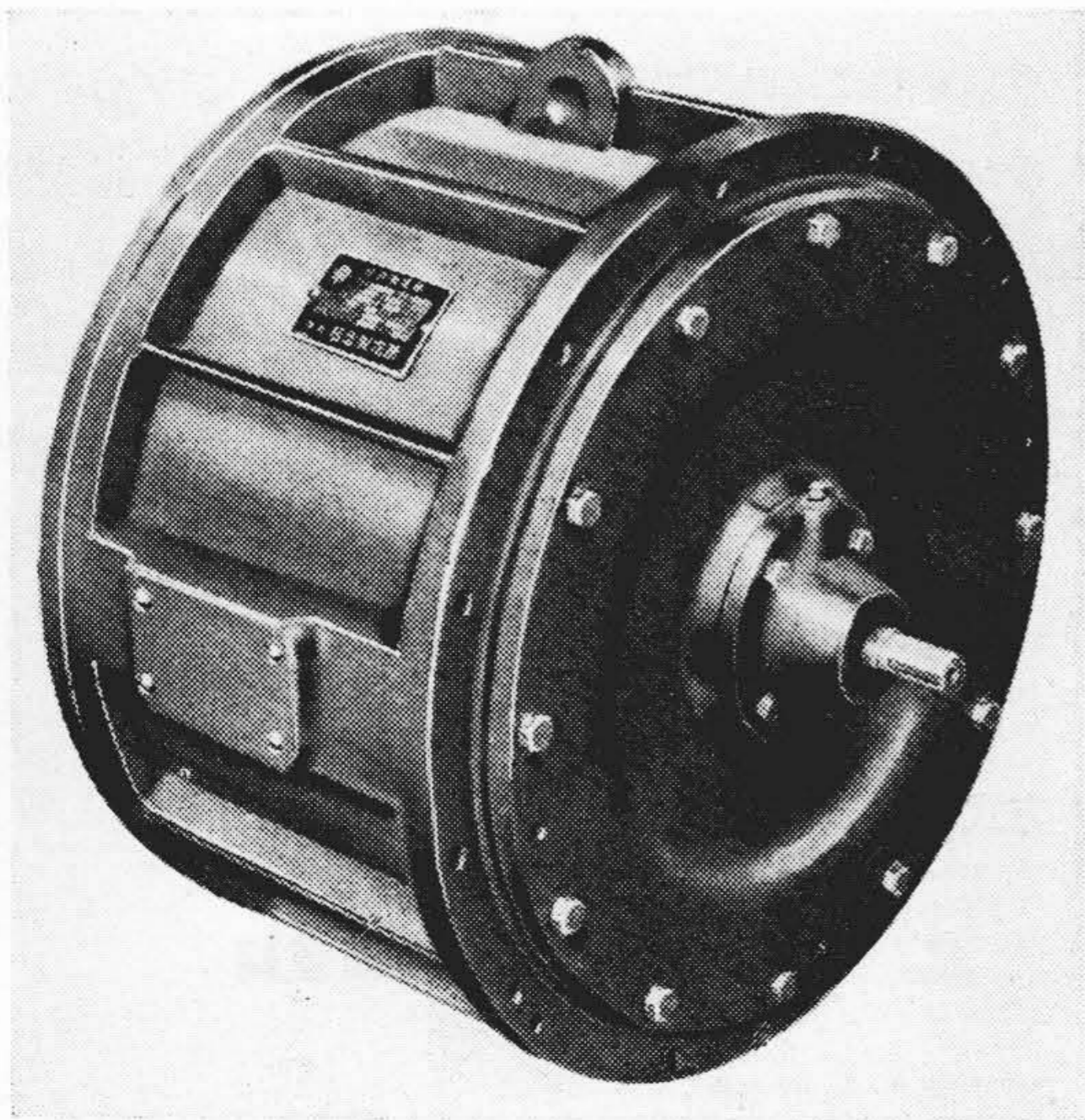
速應勵磁には時間的おくれの少ない事が望ましいのであるが、これを完全に解決する一つの方法は、眞空管勵磁方式である。米國では既に火力発電所に實施された例がある。この例ではターボ発電機に勵磁に必要な容量の六相交流発電機を直結し、その各相に各々單極整流器を入れ、これにより発電機の界磁を勵磁する方式である。電圧調整は整流器の格子制御にて行う。我國でも最近の水銀整流器は極めて信頼度が高くなつていたので、本方式は何時でも採用する事が出来る。

[VI] 調速機の電氣運轉

調速機を水車主軸よりベルト掛運轉するか又はギヤー掛運轉する方式は、ベルト切斷、調速機設置場所の束縛、発電所の美觀を害する等種々の缺點があるので、最近で

は殆んどすべて電氣運轉が採用される。この方式は主發電機及び送電線回路より全く獨立して常に水車發電機の回轉數に比例した周波數を發生する交流電源を有し、この電源により運轉される電動機で調速機のアクテーターを回轉し、水車の回轉數と調速機の回轉數とが常に一定の比を保つ如くせるものである。交流電源としては、發電機軸に直結して、永久磁石發電機を設ける場合と、直結勵磁機を複流發電機とする場合とがある。何れの場合にも調速機運轉用電動機には $1/10$ HP の反動電動機を用いる。反動電動機は同期電動機的一種であるが、直流勵磁不要、構造簡単な點で理想的なものである。

勵磁機を複流發電機とする場合必要な交流電力は 0.5 kVA、3 ϕ 、25 \sim 或は 30 \sim 程度のものであるから、勵磁機の電機子巻線の 120° づゝ位相の違つた點からリード線を出し、スリップリングに接續して簡単に交流を得ることができる。この場合、電機子線輪には勿論直流と交流の重疊した電流が流れ、然も交流分の力率は可成り低いので合成電流の波形は複雑なものになるが、直流分に比し交流分は僅かであるから整流、溫度上昇等には大きな影響を與えない。尙小容量低速の勵磁機を複流發電機とするときは、周波數の關係から極數が多くなる事あり、このため機械の寸法が大きくなつたり、或は磁極



第 8 圖 永久磁石發電機

Fig. 8 Actuator generator with permanent magnet.

間隔が狭くなるため整流に注意せねばならない場合がある。

一般に常時運轉時に於ける調速機の働きに對しては、この複流發電機の方式にて充分であるが、この式では起動時に於ては、電壓の確立の時間的おくれのために大體定格速度の 80 % 位まで、回轉數が上らねば調速機電動機が起動しない缺點がある。この點永久磁石發電機を用いる場合には零速度より、調速機が主機の回轉數に完全に比例せる回轉數にて廻る事が出来る。従つて調速機に設けてある回轉計にて、主機の回轉數を起動時に於ても完全に見る事が出来る利點がある。又常時は界磁巻線を使用せざる故にそれだけ信頼度が高い。

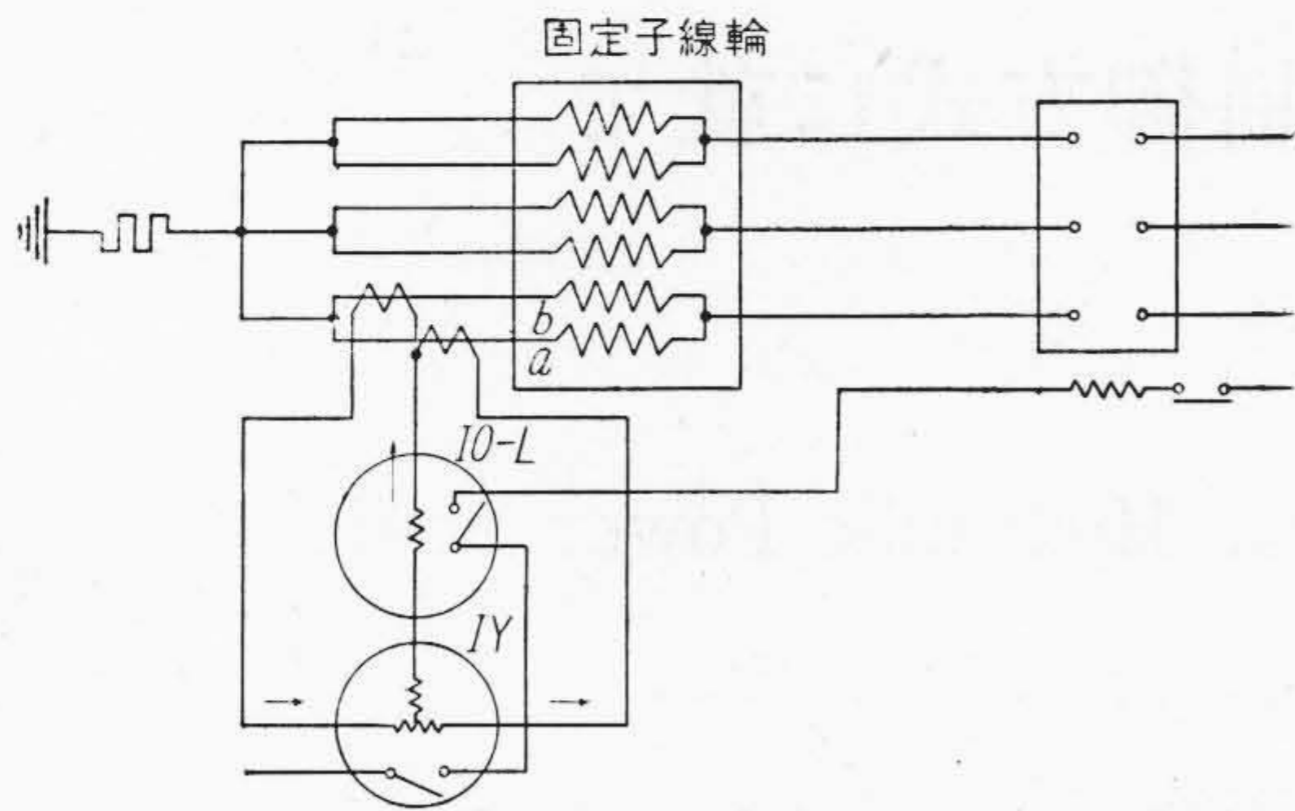
永久磁石發電機には回轉電機子型と回轉界磁型とがあるが、後者ではスリップリングが不用となる。然し永久磁石は MK 鋼又は KS 鋼等が使用されるが、何れの場合に於ても加工が困難であるので、回轉界磁型では構造が複雑になる。日立製作所では回轉電機子型を採用してゐる。第 8 圖は永久磁石發電機の外觀である。

[VII] 保護装置

發電機に對する保護装置に關しては、別章配電盤の項に詳細記述される豫定につきここでは重複をさけるため特に重要な二三の保護装置に就てのみ述べる。

1、電壓上昇に對する保護

水車の速度上昇率は普通 30 % 位に撰ばれる。これは發電機が全負荷で運轉している際、急激に負荷を遮斷せる時、水車の調速機が働くまでに、速度の上昇する率を言うのである。この場合自働電壓調整機、電壓抑制装置の何れもない場合には、發電機の磁氣飽和程度により異なるも、發電機電壓は大體 50 % 以上上昇する。殊に 50/60 \sim 共用の發電機を 60 \sim で運轉する場合に於ては 80 % に達する事もある。この程度の電壓に對しては、發電機線輪の絶縁は充分耐える様に製作されているのではあるが、かかる高電壓が度々かゝる事は好ましい事ではない。この電壓は極力抑制すべきである。このため吾々は發電機の端子電壓がある値以上上昇した時は、過電壓繼電器によつて勵磁機の界磁回路に大きな抵抗を瞬間



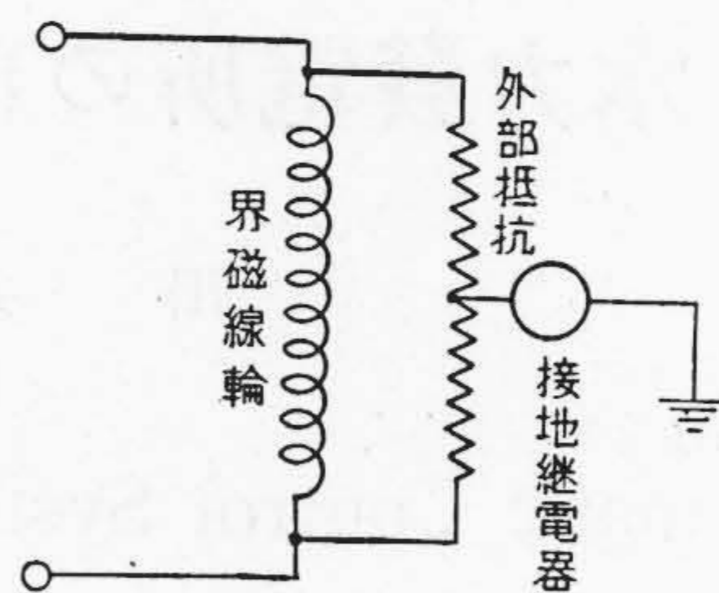
第9圖 層間絶縁保護用継電器接続圖
Fig. 9 Method of layer short protection.

的に挿入し、過電壓を抑制する方式を採用している。この方法によると完全に電圧上昇を 35% 位におさえる事が出来る。

沼ノ倉発電所で実験した結果によると、本発電機は水内発電所から移設した 11000 kVA の機械であつて、沼ノ倉に於ては速度上昇が特別に大きく、50% 以上にも達する特殊の場合であるに拘らず、負荷 9000 kW 遮断時、ガイドベーンの開鎖時間 5.3 秒、速度上昇率 50.3% の場合、電圧上昇率は 33% に抑制する事が出来た。

2、層間短絡保護装置

発電機の各相巻線を 2 本以上の並列回路になる様設計し、第 9 圖に示す如く継電器を挿入する。例へば U 相の a 巻線に層間短絡を生じた場合には、a 巻線と b 巻線とでは當然誘起電圧が、不平衡となる故、a-b 巻線間に横流が流れ継電器が動作して、油入遮断器を切る。この場合発電機空隙の不平衡があると、層間短絡がなくても a-b 巻線の空間的位置の相異から、a-b 巻線間



第 10 圖 発電機界磁線輪の
接地保護方式
Fig. 10 Earth short protection of field coil.

に横流が流れる場合があるので、比率差働継電器の他に誘導型継電器を併用して、常時の横流では動作せず、層間短絡の時のみ動作する様な特殊な接続になっている。

3、界磁巻線の保護

界磁巻線の故障は、電機子巻線に比較すれば少ないので、従来は界磁巻線には保護装置はつけてないが、最近のものには、第 10 圖の如き保護装置がとりつけられている。この方法によれば界磁線輪の大部分の範囲に於ける接地事故に対し、継電器を動かす事が出来る。

4、その他巻線の相間短絡、接地等に対する保護、軸受の過熱に対する保護、軸受の潤滑活の断油に対する警報等の方式は従来と變りがないが、軸受冷却用水の水流継電器に関しては、日立製作所に於ても抵抗式の新型水流継電器が完成されている。

[VIII] 結 言

以上最近の発電機に関して、従来より進歩せる二三の點に就て述べたのであるが、この一文が今後の新設発電所の計畫に對し、何らかの参考ともなれば幸甚である。

蓄電池の充電 多賀工場 若林圭次郎著

A 列 5 判 34 頁 定價 30 圓 7 6 圓

日立評論社發行