

電源開発株式会社納

## 佐久間発電所用 93,000 kVA 交流発電機

The 93,000 kVA Alternator for the Sakuma Power Station,  
Electric Power Development Co.

後藤恒夫\* 菊地弥十郎\*

## 内 容 梗 概

電源開発株式会社佐久間発電所用の 93,000 kVA 交流発電機が昭和 30 年 3 月日立製作所において完成した。本機は本邦の最大容量機である許りでなく、傘型構造を採用せるものとして注目の的であつたものである。このような大容量でしかも 200 rpm という高い回転数に対する傘型構造は、数年来われわれが製作してきた傘型の限界をはるかに越えるのみならず、世界においても例のないところである。種々の新機軸を盛つて製作された本機は、工場試験の結果、振動もなくきわめて安定度の高いことが証明された。すでに現地における据付作業もほぼ完了し、発電も間近に迫っている。

## 〔I〕 緒 言

斯界の注目を浴びていた佐久間発電所用 93,000 kVA 交流発電機 2 台が昨年 3 月日立製作所で完成し、現地における据付作業もほぼ完了し、運転も間近に迫つて来ている。

本機はいうまでもなく、今日まで日本最大であつた関西電力丸山発電所の 72,500 kVA 交流発電機をさらに約 30% も上廻る、日本における新記録であるばかりでなく、世界でも有数の大容量機である。この記録的製品を製作するに当つては上記 72,500 kVA 発電機などの最近の製作経験を基礎とし、さらに一段と飛躍を試み、例えばこの容量でこの回転数においては世界にも例のない傘型——回転子の側には軸受がない——の構造を採用するなど多くの独創的なものを取り入れ、あらゆる角度から慎重な検討を加えた。その結果往年の発電機の概念をもつてしては到底想像もし得ない劃期的な発電機をつくることができ、工場試験の成績は期待した通りの非常にすぐれた成績をおさめた。

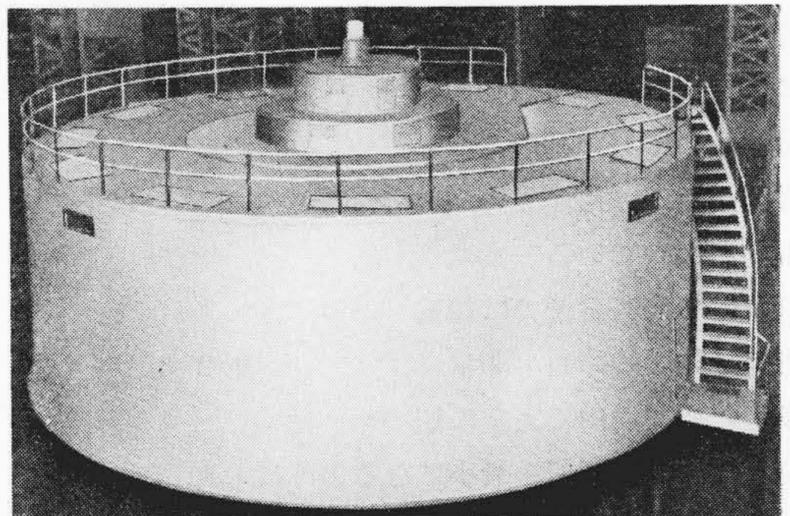
本機がこの優秀な性能を遺憾なく発揮し、日本の重要な動力源となつて活躍する日も間近にあり、こゝにこの記録的製品の内容を明らかにすることは又意義深いものがあると考え、参考に供する次第である。

## 〔II〕 発 電 機 仕 様

発 電 機…傘型、閉鎖風道循環型、空気冷却器付、  
凸極回転界磁式、制動巻線付

出 力……………93,000 kVA 連続定格  
電 圧……………13,200 V  
電 流……………4,070 A  
周 波 数……………50/60~  
回 転 数……………167/200 rpm  
力 率……………90% (遅れ)

\* 日立製作所日立工場



第 1 図 93,000 kVA 傘型交流発電機  
Fig. 1. 93,000 kVA Umbrella Type  
Alternator

短 絡 比……………50~時1.65 60~時 1.35  
GD<sup>2</sup>……………10,800 t-m<sup>2</sup>  
主励磁機 550 kW, 440 V, 堅軸, 開放型, 他励磁式  
副励磁機 50 kW, 110 V, 堅軸, 開放型, 複巻式  
调速機用発電機 0.5 kVA, 110/130 V 永久磁石付

## 〔III〕 発 電 機 の 構 造

発電機の外觀は第 1 図のごとく、傘型であるために大容量機であるにもかかわらず扁平な形となつている。またその内部構造についてはそれぞれ各項において詳述するが、綜括的な構造を示すと第 2 図 (次頁参照)のごとくである。

記録的大容量機であるだけに、発電機の全重量は励磁機を含み約 800 t という非常に大きなものであつて、外径は 11 m, 高さはパーレル上端より 5 m で、径に比し非常に低い。機械に少しも無理を与えず、この高さの中に十分な内容をおさめるために種々の周到な計画によつて斬新な構造がとられたことは勿論である。以下本機の各部にわたつて興味ある点について述べたい。

## (1) 固 定 子

固定子は輸送の関係で六つ割とした。第 3 図 (次頁参

照)は機械加工中の固定子枠である。

機械の寸法は、莫大な量を使う固定子鉄心によつて定められるのが普通であるが、最も合理的な機械とするために、先ず理想とする機械の寸法を定め、これに合う特殊寸法の珪素鋼板を用いた。

固定子線輪はマイカ、ガラスを主体としたB種絶縁で、1回巻きの亀甲型線輪を2層重巻とした。したがつて従来線輪の事故の大部分を占めていた層間絶縁の必要がなく、信頼度の高いものとなつている。またこれだけの大容量機では線輪内の導体素線の数も非常に多いため、溝内で完全に転位を行い、渦流損を最小になるようにした。

またコロナに対しては溝内および溝外で抵抗値を適当に変化させ、溝出口部分における電位傾度を適当な値にとり、インパルス侵入に対しても有効なようにした。(新案 380345)

第4図は完成された固定子である。

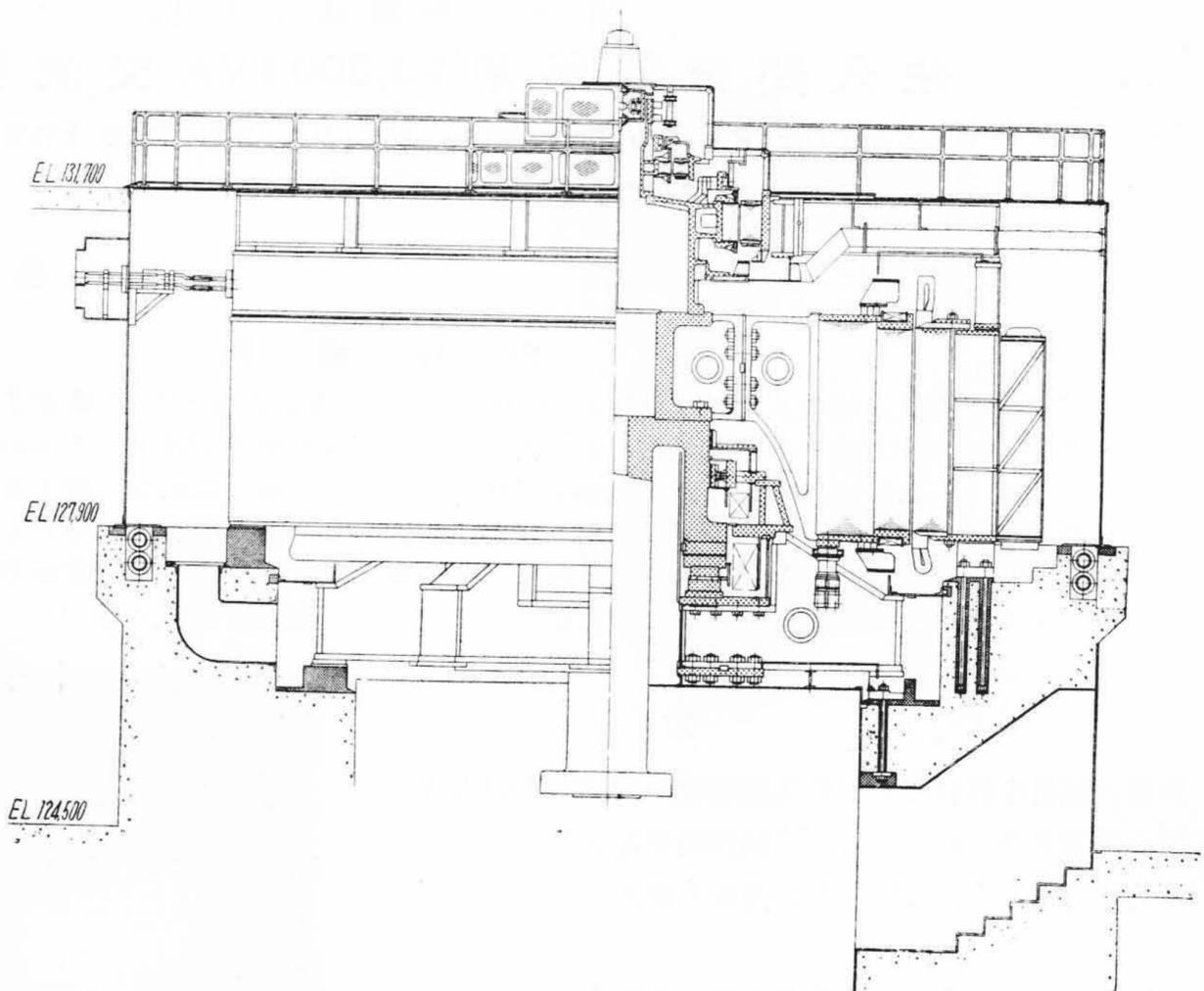
## (2) 回転子

界磁線輪は固定子と同様にB種絶縁であつて、特に冷却効果のよい形にした。これは継鉄に設けた特殊な通風孔と相俟つて非常に効果を上げた。

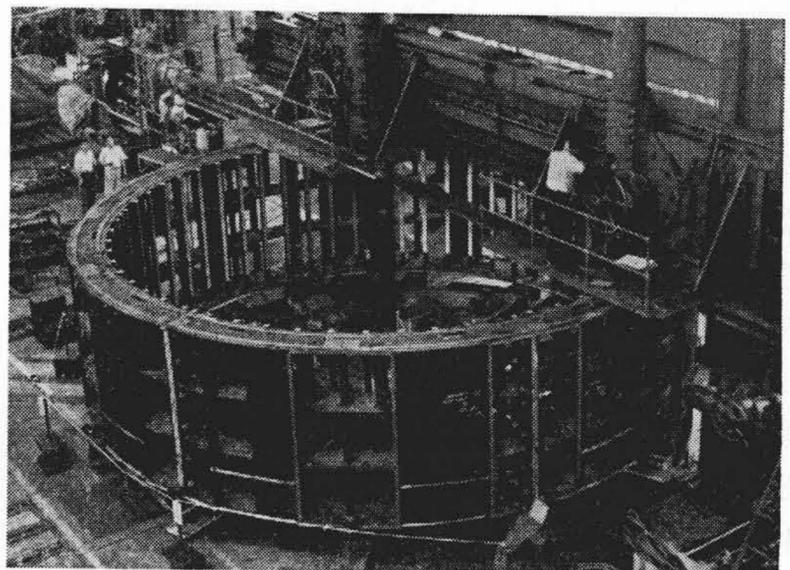
継鉄は薄鋼板製扇形片の積層式継鉄である。輸送の面から扇形片の積層式とすることは当然であるが、60〜時の183%すなわち366rpmの無拘束速度に達しても絶対安全であり、しかも傘型として内側に軸受を入れるに足る空間をつくるため特殊な構造とそれを満足するに足る工作を行った。

継鉄については実質的強度を増すためにつぎのごとき方法を用いた。

一般に扇形鋼板を積んで行く場合には一層ごとに一極ずつずらして積んで行くのが普通である。したがつて扇形の大きさによつて、幾層目かにはならず扇形と扇形との合せ目があられ、合せ目のところの一つの断面をとつてみると、合せ目の数だけ有効面積は減少している。したがつて同じ寸法の扇形の場合、磁極数の倍の鳩尾溝を設け鳩尾溝一箇ずつずらして積めば、一つの軸方向の



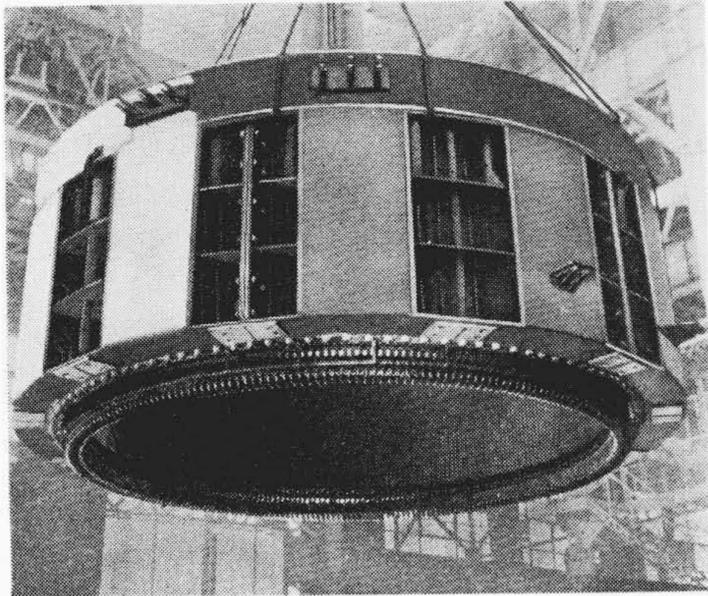
第2図 発電機断面図 Fig. 2. Section of Alternator



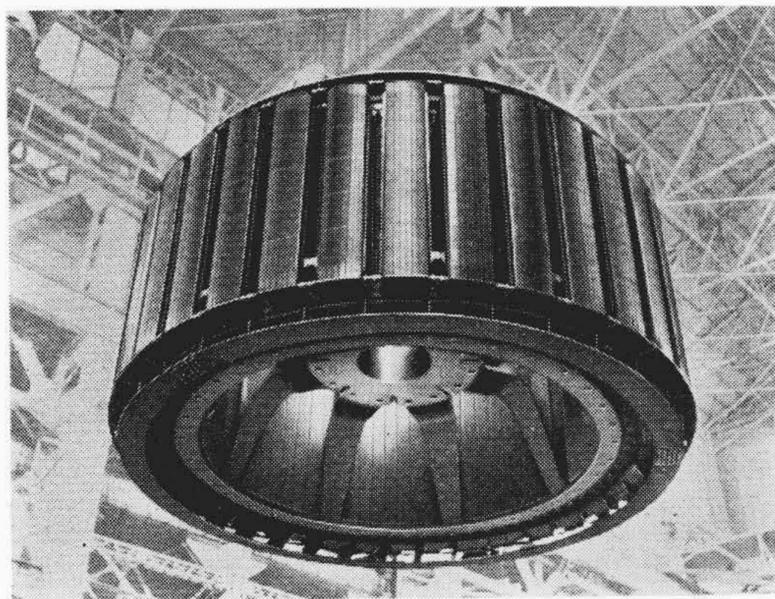
第3図 機械加工中の固定子枠 Fig. 3. Machining of Stator Frame

断面における合せ目の数は、一極ずつずらして積んだ場合の半分となり、それだけ有効断面積は増加する。したがつてこの方法は同じ材料を使用した場合はるかに強度が増加することは当然である。さらに一つおきにできた遊びの鳩尾溝に梯形の楔を入れることによつて、継鉄自体の剛性を増すことができる。

また扇形片は多くのリーマボルトによつて一体のものとされるのであるから、一鳩尾溝ずつずらして積んで、全体のボルト孔が完全に一致することは絶対に必要であつて、これが完全であつてはじめて現地における回転子の組立作業も容易にして迅速になされう。このためにはいずれの扇形片をとつても完全にリーマ孔、鳩尾溝、



第4図 完成した固定子  
Fig. 4. Stator



第5図 回 転 子  
Fig. 5. Rotor

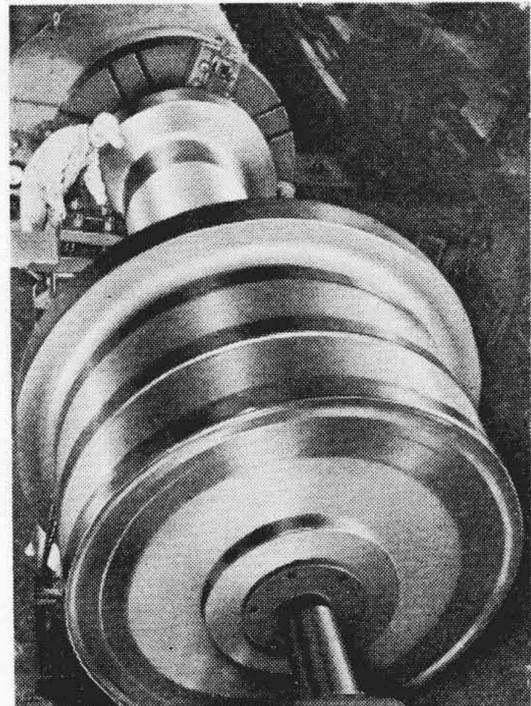
内周，キー溝などが一致するものでなければならない。したがってこの扇形片の抜型には一段と苦心し，一つの抜型を用いプレスを能力以上に働かせるような特殊設計をした。このプレス作業の苦心は見事に成功し，非常に精度の高い扇形片をつくることができた。

また扇形片の一部には端を切断したものを用い，これを回転子の中央部附近へ入れて積み，少しも強度上の低下を来たすことなく，最も冷却風の行きにくい中央部へ，容易に冷却風を導く通風孔を設けた。(新案374078)

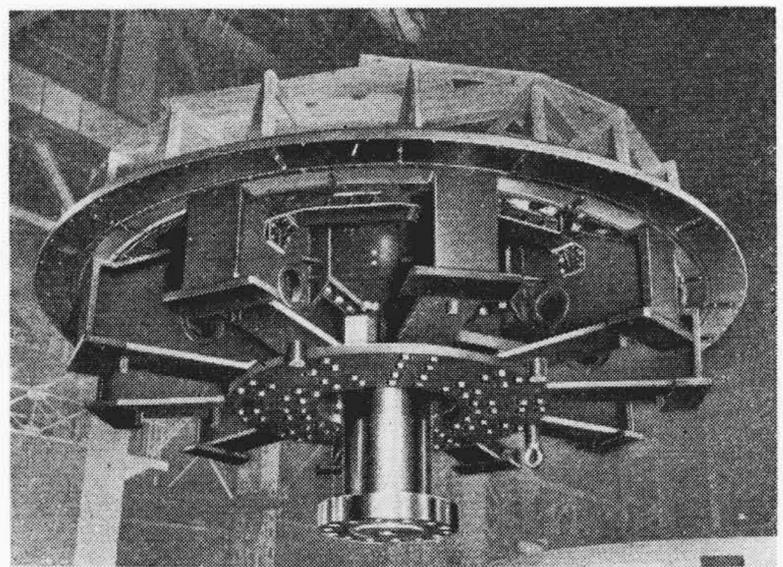
輻鉄は鋳鋼製で輸送のため各アームごとにボスの近くで継ぐ方式とした。

第5図は完成した回転子である。

シャフトはシャフトカラーと一体鍛造とし，特殊な接線キーを介して，輻鉄下面にボルトで強固に取付けてある。したがって回転子を吊り上げる場合はこのボルトをはずすことによつて，シャフト以下推力軸受などを分解することなく抜き出せるし，シャフトは推力軸受を分解することなく取出せる構造となつている。(新案393066)



第6図 シ ャ フ ト  
Fig. 6. Shaft



第7図 下部ブラケット  
Fig. 7. Lower End Bracket

ブレーキリングは数箇に分割した鋼板からなり，摺動面に生ずる極く薄い層の過熱に対して，熱膨脹を自由にし，全体に熱応力をおよぼさないよう特殊な溝を切つたものとしてある。(新案申請中)

### (3) その他

上部ブラケットは単に励磁機の固定部分を支持するだけで，他に軸受などから受ける力が全然かゝらないため，強度の点からはなんら問題はないが，非常に大きいスパンであるため，基礎などからくる低い周波数から，電氣的に起りうる比較的高い周波数のものまでも，共鳴などの起らないよう，振動の面から十分の注意を払つた。

下部ブラケットは 1,100 t にもおよぶ支持能力を持つ推力軸受を支え，さらに案内軸受——上部案内軸受がないため発電機の半径方向に起る力を全部支える——も支えるもので，強度，変形，輸送の面から，従来の傘型機に用いた構造とは大分異つたものとした。第7図はその一部であつて，構造の合理化をはかり，力を受け持つべ

き要素と、構造上必要とする要素とをはつきり区別し、変形も非常に少ない組立式構造を採用した。すなわち推力軸受油槽を中心として、各別箇のアームと上下の主板とを組合せて、非常に強固なブラケットとなる構造とした。これは傘型としての支持点をできるだけ回転子の重心近くにおき、機械の安定度を増す上から非常に苦心した点であつて、実負荷試験の結果も所期の通りきわめて変形の少ない、堅牢なものであることが実証された。

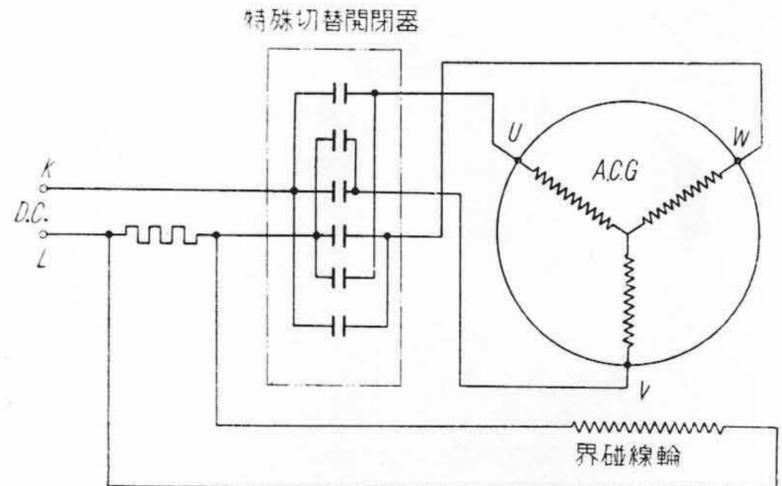
推力軸受は日立独特のキングスベリ型の軸受であつて、2, 3rpm 程度の低い回転でも絶対に油膜が切れず、安全に廻わせることは勿論、無拘束速度においてもなんら不安のない推力軸受である。この軸受は一体につくられた油槽におさめられているため、油漏れの心配が絶対にない。また推力軸受の水平調整には、油槽外から簡単に行えるようにしてある。この推力軸受はシャフトの鏝が自由に通りうるだけの内径をとり、非常に大きなものであるから、最も合理的な支持条件とするため、十数箇のセグメントとしてある。これがいずれも均等の支持をしていることを確認するため、調整用のボルトの内部を特殊加工し、ストレインゲージをとりつけた。これによつて簡単に水平は勿論各セグメントの荷重を均等に調整するをえた。

案内軸受は傘型であるから、回転子の下側にのみあつて上側にはない。したがつて機械の安定をよくするためには、できるだけ軸受位置を回転子の重心に近くすることが望ましい。本機は大容量機で積厚が非常に大きく、しかも強度上から、従来の傘型機のごとく推力軸受の中へ案内軸受をも包蔵せしめて、回転子の重心近くへもつて行くに十分な空間が回転子の内部にえられないため、推力軸受と切り離して、推力軸受の上に別箇の案内軸受を配する形の構造とした。この特殊構造とした結果、回転子の中で十分重心近くまで持つて行くことができ、非常に安定のよい機械とすることができた。

さらにこの構造においては、シャフトカラーの上面が案内軸受油槽の底面となるような形となるため、このカラーのフランジによるポンプ作用によつて、最も冷却した底面の油を循環せしめることができ、非常に有効な冷却効果を示し、軸受温度を低くした。

また一つしかないこの案内軸受に加わる半径方向の力が合理的に下部ブラケットへ伝わる形をとつたため、振動もなく傘型にした不安は微塵もない。

ブレーキについては制動時これから発生する粉末が固定子のエアダクトなどにつまり通風を悪くし、折角空気冷却器を用い密閉型とした効果を半減せしめることを防ぐため、従来ブレーキリングを囲つて粉の飛散防止を行つてきたが、さらにここに集積した粉を真空掃除器の



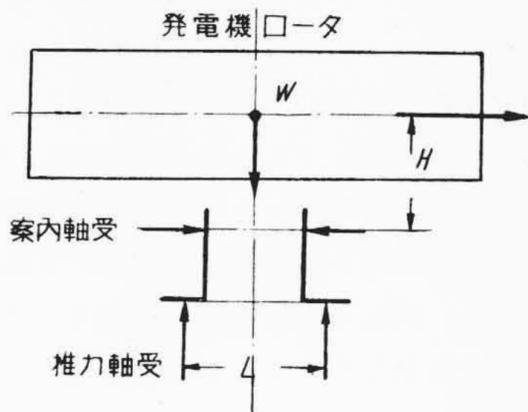
第 8 図 回 転 装 置 回 路  
Fig. 8. Connection Diagram of Rotating Device

原理を用いて外へ引き出し、常に発電機内を清浄に保つようにした。(新案 374079, 433961)

空気冷却器は対称 12 箇を固定子の風の出口に直接取付け、風洞内の空気に含まれた水分によつて、空気冷却器に水滴が附着したり、運転休止時巻線の吸湿を防ぐために、小型の電気除湿機を用いた。従来用いられていたスペースヒータなどに比しはるかに安全で便利であることはいうまでもない。

調速機用発電機は第 2 図に示すごとく、発電機の頂部の副励磁機の内部におさまる小型のものとし、主発電機回転子と非常に細長い軸で直結し、十分の可撓性を持たせ、多少発電機に振れなどがでて、全然調速機に悪影響を与えないものとした。(新案申請中)

これらはそれぞれ各構成部分の特長を十分発揮できるよう、新しい考えをとり入れたものであるが、現地における発電機の組立は最後の仕上として非常に重要なことである。中でも軸の振れの調整は直接回転につながるため重要であつて、これは軸心と摺動面の直角の正確さによつて決定され、回転子の支持方式には無関係である。この直角が正確である程推力軸受の油膜の形式を安定にし、引いては軸受温度、損失などを少なくする。したがつて最後の姿においてこれを調査し、調整する必要がある。これを行うには種々の方法があるが、少なくともある程度は回転子を廻わすことが必要である。廻わす以上非常に低速で回転し、そのときの軸の振れを直接見るのが最も簡便な方法である。しかしながらこれだけの重量物の回転子を油膜のないところから起動せしめることは人力などでは到底不可能である。したがつてこれには第 8 図のごとき回路を用い、直流電源を利用して、電機子に通電すると同時に、界磁線輪を適当な強さに励磁し、特殊の切替開閉器によつて電機子の 3 相を順次切り換えて行けば発電機は一種の電動機として回転することになる。これによつて容易に軸の振れの調整を行うことができるの



第9図 傘型機の力と支持の関係  
Fig.9. Relation between Force and Support for Umbrella Type

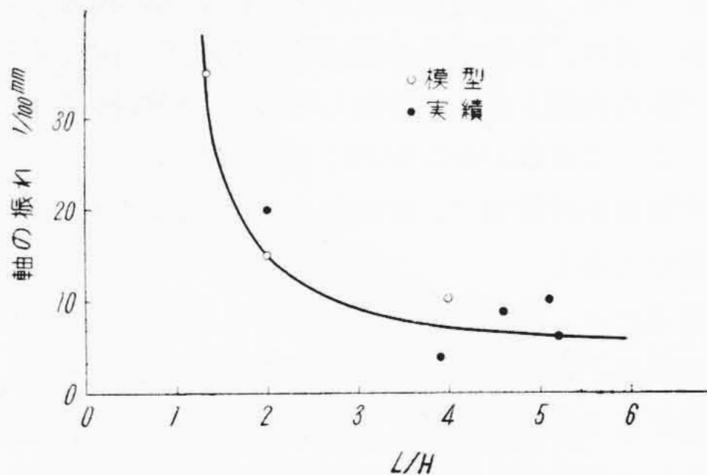
でこの方式を採用し、軸の振れのないことを確認して組立を完了した。

[IV] 傘型について

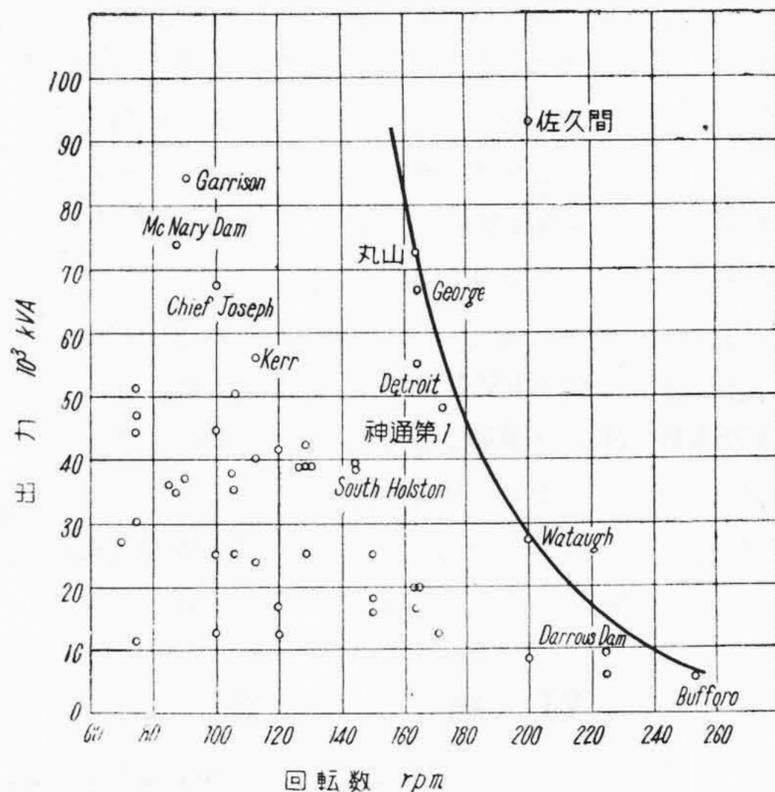
本機の最も大きな特長は傘型\* としたことである。傘型では回転子の上方に軸受がないため、傘型の可否は機械の安定度によって決定せられる。本機は相当積厚も大となるため、従来のごとく簡単に回転子の重心近くを支持することは困難であるため、いかに安定をよくするか苦心した。機械の安定度は普通第9図に示すように、回転子の重心から案内軸受の中心までの距離  $H$  と推力軸受の平均直径  $L$  の比  $L/H$  の値をとつてある。この値が小さくなる程不安定となることはいうまでもない。この大容量機に対して未だ世界に例のない傘型を採用しうるか、慎重に検討した。傘型の安定の限界を求めるために模型を用い、 $H$  を種々変化させ、軸の最頂部の振れとの関係を求め、現在運転に入っている傘型機の状態とを比較した。その結果は第10図である。勿論この結果は一つの例であつて、構造その他によつて変り、振れも 30/100 mm くらい振れていてもなら支障なく運転している機械もあるので、一概に論ずることはできない。この不安定限がさらに拡張されることは想像に難くないが、本機においては従来の方式ではあきらかにこの限度に近くなるため、前述のごとき特殊構造を用いることによつて、 $L/H$  を大きくとることができ、工場試験の結果も非常に良好な成績であつた。

一方実際に製作されて運転に入っている傘型機の回転数と容量との関係を求めてみると第11図のごとくなり、

\* 外国の例を見ても、傘型の名称は回転子の下側に一つの案内軸受と推力軸受とがあり、上側には軸受がないものをいつており、上側に軸受のあるものは傘型ではない。日本ではこれらが混同されている嫌いがあり、両者は機能的にも異り、後者は準傘型といつてゐる。なお水車に推力軸受があり、発電機にないものを低支持型と称し、軸受の位置と数によつて型の区別を明瞭にしておくことが望ましい。



第10図 傘型の安定度  
Fig.10. Stability for  $L/H$  (Ref. Fig.9)



第11図 傘型機製作例  
Fig.11. Approximate Manufacturing Limit of Umbrella Type

一つの曲線の中に入つていた。本機は図においてもわかるごとく、これらから一段と飛躍した点にあり、今後の機械に対する一つの大きな指針として注目に値するものといえよう。

[V] 励磁機

主励磁機は出力 550 kW、定格電圧 440 V、連続定格縦軸開放型他励磁式である。副励磁機は出力 50 kW、定格電圧 110 V、連続定格開放型複巻式で、いずれも 50/60 両用機である。励磁機には主軸を使用せず、主励磁機のスライダーを主発電機の主軸に直結し、また副励磁機はそのスライダーを主励磁機のスライダーに直結して取付けてある。调速機用発電機は副励磁機の内部におさめてある。

副励磁機の固定子は、主励磁機の整流子スライダーの内部に落とし込む構造とし、励磁機全体の高さをきわめて

低くしてある。冷却用空気は各励磁機上部の吸気口兼点検窓から採り、各励磁機の固定子、整流子、電機子表面および鉄心内側を通して冷却した後、主励磁機下部のファンによつて排気口から室内に放出する。

主発電機用滑動環は、鍛鋼製溝付環で、副励磁機の上部に設けてある。

励磁方式は、回転磁気増幅型正相電圧応動式の自動電圧調整装置と組合せて使用する高速励磁方式である。主励磁機には2界磁を備え、主発電機の無負荷定格電圧に相当する一定分は、定電圧の副励磁機によつて励磁し、主発電機の負荷変化に対応する調整分は15kWの直流発電機によつて励磁することにより、主発電機の電圧を一定に保持する。15kW直流発電機は電力増幅用で、その励磁入力は、一定基準電圧と主発電機電圧との偏差を磁気増幅器により増幅して与えられる。主励磁機の電圧上昇率および頂上電圧は50～運転において、それぞれ1,100V/sおよび800V以上で、またA.I.E.E.による公称励磁機速応度は2.0以上である。

自動電圧調整装置用として、前記15kW直流発電機、磁気増幅器電源用3kVA 400～交流発電機、基準電源用0.75kW HL発電機および駆動用電動機とよりなる電動発電機を別置する。駆動電動機は、系統電圧および周波数変動の影響をさけるために直流定速度電動機を使用し、副励磁機はその電源を兼ねるものである。

## 〔VI〕 結 言

以上日立製作所において製作された本邦最大容量の電源開発株式会社納佐久間発電所用93,000kVA交流発電

機の概要を述べた。この大容量で200rpmの発電機を傘型で製作したことは、未だ世界にも例がないものであつて、容量のみならず構造の上からも記録すべき製品である。したがつて傘型とするため、推力軸受、案内軸受、これらを支える下部ブラケットなどの特殊構造を採用したこと、固定子線輪に一回巻きを採用し、平衡のとれた巻線としたこと、回転子継鉄を特殊構造として、強度および冷却の面を有効ならしめたことなどについて述べた。

各部に新しい考えをとり入れ、この記録的製品にふさわしい機能を発揮するよう考慮した結果は、期待に反せず工場におけるあらゆる試験に優秀な成績をおさめた。また短絡比も保証値をはるかに上廻る十分余裕のある機械とし、電氣的にも機械的にも非常に安定度の高い機械であることが実証された。

特に丸山発電所の72,500kVAの発電機よりさらに大容量機を、上側には軸受のない傘型として、全然不安のない安定度の高いものとして製作しえたことは、傘型機の製作限界の拡大ともなり、斯界に貢献するところ大なるものありと考える。

現地の据付作業もほぼ完了し、日本の技術の最高水準を示す代表的製品として、また日本の主要な動力源として、運転開始を目睫に迫り、大きな関心と期待が持たれていることは誠に喜ばしいことである。

終りに本機の製作に当つて、積極的に新しい試みを支持、御指導御鞭撻を賜つた電源開発株式会社の社長はじめ新原、桑原、加藤、奥野の諸氏ならびに関係者各位に深甚の謝意を表す。



## 新案の紹介



実用新案第415604号

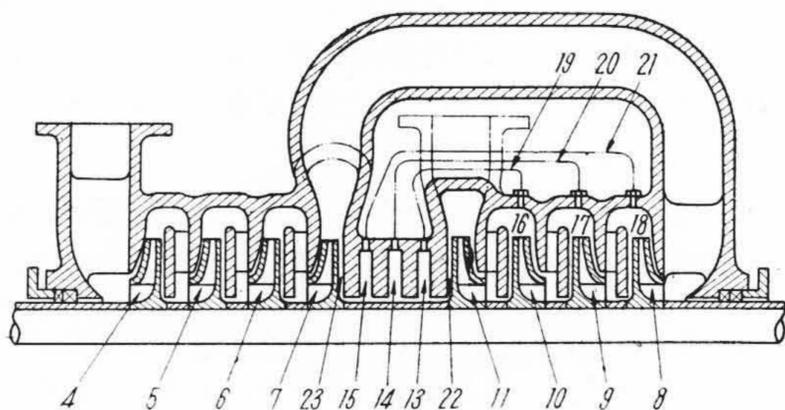
寺田 進

### 自動平衡型多段渦巻ポンプ

この考案は、多段の片吸込型羽根車の中の幾つかを同じ向きにして一緒に並べ、ほかの幾つかを反対の向きにして一緒に並べ、全体として直列に働かせ推力の平衡をえられるようにした自動平衡型多段渦巻ポンプに関するものである。

この考案ポンプの構造上の特徴は、低圧側羽根車群4～7と高圧側羽根車群8～11との境の壁を、壁中に軸方向に並んだ空所13・14・15によつて分割し、境壁の入口22と第1空所13との圧力差、第1空所13と第2空所14との圧力差、第2空所14と第3空所15との圧力差および第3空所15と境壁の出口23との圧力差がそれぞれ羽根車1段分の圧力と等しくなるように各空所をそれぞれ中間圧力室16・17・18に連絡管19・20・21をかいして連通したことである。

この考案によれば、ポンプの構造が簡単で工作しやす



く、通路効率が良く、かつ、低圧側羽根車群と高圧側羽根車群との境壁部の漏洩量を羽根車1段分圧力の漏洩量に等しくすることができるのでポンプ全体としての効率の高い良好な高圧ポンプをえることができる。(富田)