

東北電力・第二豊実発電所納入 大容量カプラン水車および発電機

Large Capacity Kaplan Turbine and Generator for Toyomi No.2
Power Station, Tohoku Electric Power Co., Inc.

矢野 公 惟* 井 上 俊 夫**
Masanobu Yano Toshio Inoue

宮 島 武 夫** 米 山 直 人***
Takeo Miyazima Naoto Yoneyama

I. ま え が き

東北電力・第二豊実発電所向けに受注し、昭和48年から設計・製作が進められていた61,000kW立軸カプラン水車、61,000kVA発電機および配開装置一式が完成、出荷され、昭和50年8月の運転開始を目指して、目下現地で鋭意据付が進められている。

本発電所は新潟県阿賀野川の下流に位置し、既設ダムを利用して、既設豊実発電所の対岸に水力調整能力のあるせん頭負荷発電所として新しく建設される。

当社ではすでに本発電所下流の東北電力・第二鹿瀬発電所向けにわが国最大寸法（ランナ外径6,400mm）の58,500kWカプラン水車を納入し、現在好調に運転している。本発電所向け水車は寸法的には第二鹿瀬発電所用水車より約4%小さいが、容量的にはこれを上まわる記録の大容量大形カプラン水車である。さらにこの水車に直結される発電機は低回転速度大容量機で、固定子内径は8mを越え、スラスト軸受荷重は1,000tonを越える大形かさ形発電機である。

このため、機器の設計、製作にあたっては性能あるい

は信頼性の向上についてはもとより、保守の容易さ、経済性についても徹底的な検討が加えられ種々の新技術が採用された。

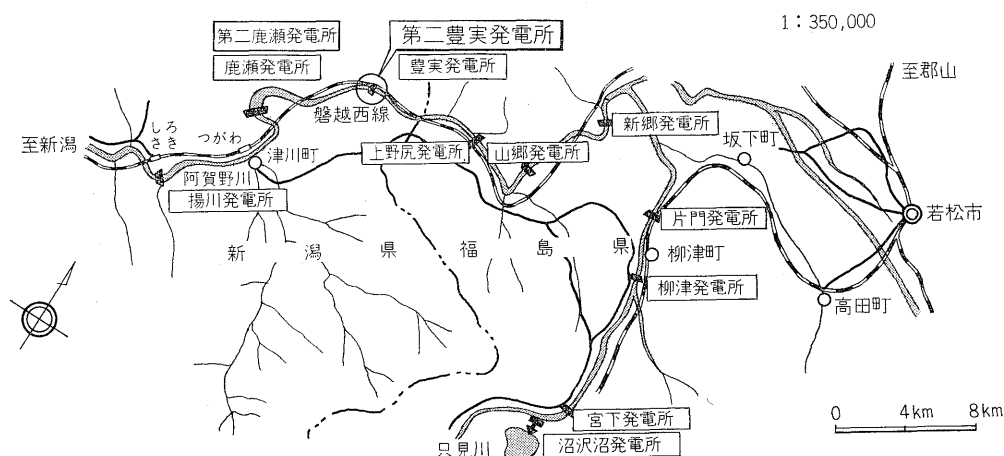
われわれは本機の完成により今後ますます大形大容量化してゆくであろう水車・発電機の設計・製作における経済性および信頼性追求に新たな自信を加えたものとして自負している。

本稿においては、本発電所機器のおもな特長をこれらの新技術を中心にして紹介し参考供したい。

II. 発 電 所 概 要

本発電所は阿賀野川に設けられた既設豊実ダム（重力式コンクリートダム、高さ約34m）の右岸上流約50mの地点に取水口を設け、これより取水し、取水口（約135.9m）導水路（約145.1m）および水圧鉄管（長さ約32.5m、内径8.5m）を経て水車に導水し、発電ののち、放水路（約51m）により再び阿賀野川に放水される。

本発電所は完全無人発電所で、当面は本発電所対岸の既設豊実発電所から直流直送式の遠方監視制御が行われるが、将来は会津制御所よりDPC・AFC制御を含め



第1図 発電所位置図
Fig. 1.
Location of power station

* 川崎工場原動機部

** 川崎工場回転機部

*** 水力プラント部

た集中遠方監視制御が行われる予定である。このため発電所機器に対してはメンテナンスフリーが要求され、圧油装置、給水装置、潤滑方式、各制御装置などにその点が考慮されている。また本発電所は低落差大流量であるため、入口弁は設けられていないが、油圧喪失時にも確実に主機を停止させるための非常用圧油タンクが設けられている。

その他、本発電所機器は寸法の縮小あるいは構造の簡略化などの考慮がはらわれている。なお、水車・発電機の構造、特長については第3図および次項以下を参考されたい。

III. 水 車

1. 水車仕様

台 数	1台
形 式	立軸単輪単流うず巻カプラン水車
有効落差	最大 24.5m
	基準 22.86m
	最低 20.28m
流 量	最高落差時 279.8m ³ /s
	基準落差時 271.6m ³ /s
	最低落差時 255.0m ³ /s
出 力	最大 61,000kW
	基準落差時 55,000kW
	最低落差時 45,600kW
回転速度	115.4rpm
比 速 度	541.4m-kW（基準落差時）
高無拘束速度	305rpm

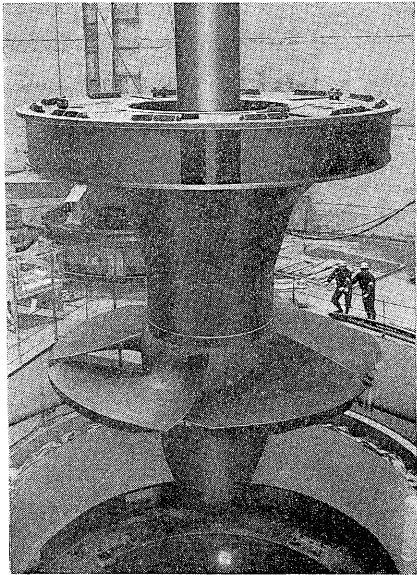
2. 水車の特長

基本的構造は、昭和48年に納入した第二鹿瀬発電所カ
プラン水車とほぼ同じであるが、この第二鹿瀬発電所を
初めとする大形カプラン水車の経験を生かし、さらに検
討・改良を加え、本水車を設計・製作したもので、その
主な特長は次のとおりである。

- 1) 低落差大形水車ながら、鋼板製スパイラルケーシングを採用し、形枠程度の強度を持たせることによりコンクリート打設工期短縮・漏水防止を図った。
- 2) ランナサーボモータはランナボス内に内蔵した。
- 3) 主軸は溶接構造一本軸である。
- 4) スラスト軸受は上カバーで支持している。
- 5) ガイドベーンサーボモータは4個のサーボモータで構成し、上カバー上に設置されている。
- 6) ガイドベーン軸受、ガイドベーン開閉機構の各軸受は、無潤滑軸受である。
- 7) 水車主軸受は油浸形セグメント軸受である。

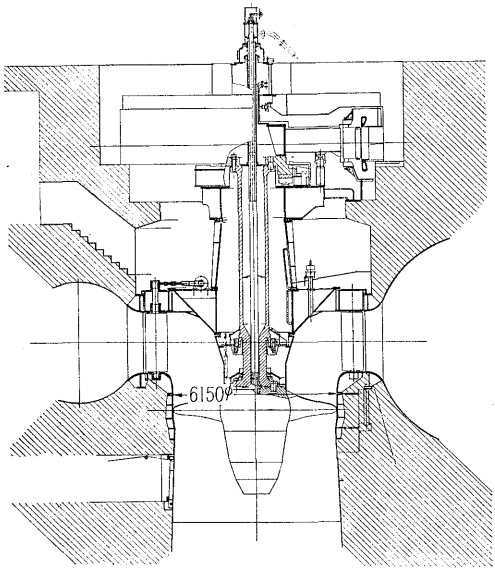
3. 水車性能

ランナには、第二鹿瀬発電所用として開発したランナ



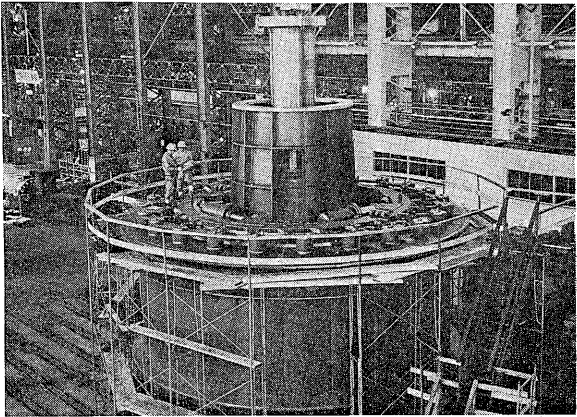
第2図 現地吊込中のランナ

Fig. 2. Site installation of runner



第3図 水車・発電機断面図

Fig. 3. Section of water turbine and generator



第4図 水車本体工場仮組立

Fig. 4. Shop assembly of water turbine

を採用した。落差が第二鹿瀬発電所よりわずかに高くなっているため、回転速度を第二鹿瀬発電所と同じ107rpmと一段高い115.4rpmの2案について、掘削深さを含めた経済性の検討を行い、115.4rpm案の採用を決定した。

4. 水車構造

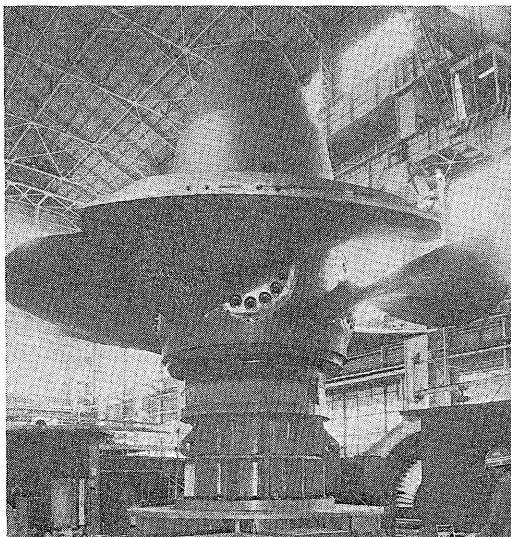
水車・発電機の組立断面図を第3図に示す。

直径6.15mの5枚羽根ランナはランナサーボモータをランナボス内に内蔵している。

ランナペーンは不銹鋼、ランナペーン軸は鍛鋼の分離構造で、両者はランナボスの外側からボルトで結合する。このボルト結合方式は、(1)ランナペーン全体重量の約20%を占めるこの軸部を鍛造品にすることにより健全な材質のものをしかも安価に製造できる。(2)軸およびランナペーン共にそれぞれの機械加工が容易になる。(3)工場組立したランナはペーンを取りはずすだけで、内部機構は組立したまま輸送できる。などの利点がある。したがってこの方式は今後多くの大形カプラン水車に採用されよう。

ランナサーボモータはピストンを固定し、シリンダが動く方式でシリンダの一部にランナペーン開閉用のリンクを連結している。ランナボス内に充満させた潤滑油は、一般にランナサーボモータの動きにしたがって容積変化ひいては圧力変化を喚起しボス内に水が侵入するというような不都合を生じる。本ランナでは同じ直径のピストンロッドおよびバランスピストンを、おのおのシリンダの両端に貫通させるだけの簡単な構造で容積変化すなわち圧力変動のない安定した圧力を保てるような方式を採用している。なお、圧油とボス油は同じ種類の油を使用している。

ランナのバランステストには大形ランナに対処して、



第5図 ランナの動的バランス試験
Fig.5. Dynamic balance test of runner

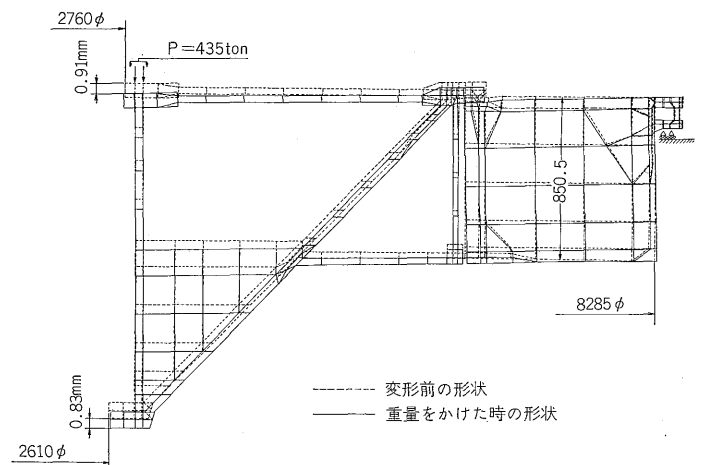
当社で開発した立形ダイナミックバランス装置を用いた。この装置は上下二つの軸支えの油膜圧力を測定して不釣合量を求めるもので、測定可能重量は150tonである。本装置ではすでに10台以上のランナのバランステストを行って好結果を得ている。第5図はバランステスト中の組立ランナを示す。

スピードリングは鋼板溶接製で、4分割フランジ結合である。スピードリングの下部はアンカーボルトで基礎に強固に固定されており、上カバーにかかる上向きの水圧荷重をステーペーンを介して基礎に伝えると同時に発電機の全重量をも支持している。

スパイラルケーシングは板厚9~16mmの鋼板溶接製で入口径8,300mmの超大形ケーシングである。この鋼板は漏水防止を目的とした形枠代わりのもので、水圧力はコンクリートで負担するよう設計されている。

上カバーは内・外に分かれ、外側は4分割で最大外径は固定子内径より大きいので組立したまま固定子内を通して上方に抜き出すことはできない。このため、上方に抜き出さないでオーバーホールができるよう、パーレルから特殊吊金具で吊り下げる考慮がなされている。

水車・発電機の回転部重量およびランナ水圧推力は上カバー上のスラスト支えにて支持し、これらの荷重は上カバー・ステーペーンを介して下部基礎に伝えられる。この方式では、スラスト支えはスラストメタル荷重点の真下を全周にわたって支持しているため、スラストパッドの面圧の不均一を少なくし得る利点がある。本発電所のような大形カプラン水車では軸受部・カーボンパッキング部あるいはガイドペーン上、下間隙部における上、下方向の変形を許容値内におさめることが設計上のポイントとなる。しかるに、スラストメタルを上カバーから支持することによりランナおよび上カバーにかかる水圧力がほぼバランスするために変形を最少におさめることができる。



第6図 上カバー変位図
Fig.6. Deformation chart of head cover

変形に関しては上記のほかにガイドベーン翼の変形による漏水量の問題がある。これら変形の予測は低落差大形水車では応力の計算あるいはそれ以上に重要なことである。当社では過去の大形カプラン水車のデータに加えて、有限要素法を用い効果的な構造の選択と高精度の応力・変形の計算を行い信頼性を高めた設計を行っている。一例として上カバーの計算結果を第6図に示す。当社における有限要素法の活用例は参考文献(2)を参照されたい。

ディスタージリングは要部をステンレス鋼板、その他の流水面は耐摩耗鋼板の溶接構造である。

24枚のガイドベーンは溶接構造で翼部は中空である。ガイドベーンサーボモータは4個のサーボモータで構成され、上カバー上に設置されている。したがって、平板のガイドリング、リンク、ガイドベーンアームはすべてサーボモータと同一レベル上に配置することが可能で、無理のない力の伝達ができる独特な構造である。また、このためガイドリングは非常に簡単な構造となっている(第4図参照)。一般にガイドベーンサーボモータの心出し、据付には細心の注意が必要であり、かつ据付場所がバーレルの切欠の中にあるため搬入、搬出にも時間と工夫を要する。しかし、サーボモータを上カバー上に設ければ工場仮組立の時位置決めしたサーボモータは、現地で上カバーに簡単に組み込むことができるし、分解・点検も容易である。さらに、サーボモータの強大な荷重をコンクリート基礎で受ける必要もなくバーレルの構造も簡単になるなどの多くの利点がある。当社では過去この利点を備えたリングサーボを数多く製作して好評を得てきたが、コスト高になる不利があるためにこれに改良を加えたもので、今回採用したものはコスト高にならないで前述の利点を生かした新しい方式のものである。

ガイドベーン軸受およびガイドベーン開閉機構の各ブッシュにはすべて無潤滑軸受が採用されている。これにより保守の手間が大幅に省略される。

カプラン水車の水車軸受は浸水事故を避けるため、グリース潤滑にする例が多いが、本発電所では油浸形セグメント軸受を用いた。軸封部からの漏水はジェットポンプ(常用)および水中モータポンプ(予備)の2台のポンプで所内排水ピットに排水し、軸受部への浸水を防止している。

主軸は全長8.45m、軸径1.1mでランナと発電機回転子を1本の軸で結んでいる。これは機器搬入床の標高から決まったクレーンリフトが十分に高いので、1本軸を採用して機械の経済化を図ったものである。主軸は下部フランジから軸受スカート部までおよび上部フランジを鍛鋼製、中間部(長さ5.5m)は熱間曲げ加工された円筒状鋼板溶接製のものの組合せ溶接構造である。

軸封水装置には当社の標準形式として採用し安定した数多い実績を持つ上下動式カーボンリングを使用し、水車軸受部を分解することなく水車軸支えのマンホールより点検、分解ができるようになっている。また分解はメンテナンスシールによりドラフト内の水を抜くことなく可能である。

5. 付属装置

調速機には当社標準のトランジスタ電気式調速機が採用されており、カプランカムは立体カムで落差変動に応じて自動的に設定できるようになっている。

圧油装置はM-M方式で油圧は34~37kg/cm²である。また圧油タンクの空気は空気圧縮機による自動給気方式である。常用圧油タンクのほかに非常用圧油タンクを有し油圧低下時にも安全に主機停止ができるようになっている。

IV. 発 電 機

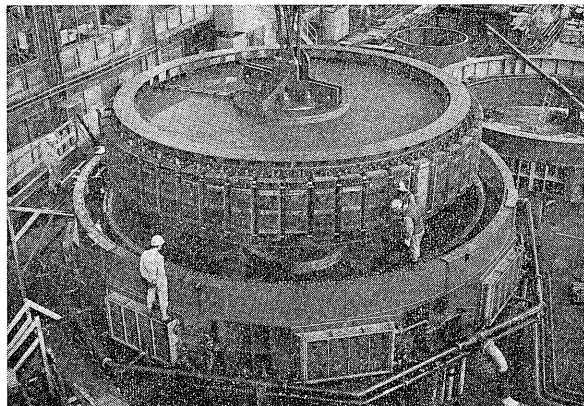
1. 発電機仕様

台 数	1 台
形 式	立軸全閉内冷形同期発電機(かさ形構造)
出 力	61,000kW
回転速度	115.4rpm
周 波 数	50Hz
極 数	52
電 圧	11,000V
電 流	3,202A
力 率	0.95(遅れ)

2. 発電機の特長

本機はカプラン水車駆動の水車発電機として国内有数の大形機である。このため通常のフランシス水車直結の水車発電機に比較して次のような特長がある。

- 1) 非常に低速機であるため空隙長が鉄心径に比較して小さい。一般に同期発電機の空隙長は鉄心径および短絡比に比例し極数に反比例する。本機は8mを越える鉄心径であるにもかかわらず空隙長が13mmと非常に小さい。このため固定子鉄心内径および回転子外径の真円度には細心の注意を払った設計・製作がなされている。また空隙長が小さいことは溝高調波による電圧波形歪みを大にする要因であるが、本機では磁極片を固定子鉄心の溝間隔に相当するだけ斜めに構成する構造を採用することにより良好な電圧波形を実現している。
- 2) 固定子巻線は波巻の二重星形結線とし極間接続の渡り線を必要としない非常に簡潔な構成によって、なおかつ並列回路間に空隙長の不平衡による循環電流が生じないものとなっている。
- 3) 前述のように、水車、発電機軸は1本軸を採用し、



第 7 図 工場組立中の発電機

Fig. 7. Generator under assembling at shop

第 3 図に示すように水車軸を直接発電機の回転子に取り付ける構成とし機械全高の低減を図っている。

- 4) スラスト軸受は水車上カバーにて支持するものとし、またスラスト荷重は 1,000ton を越える高荷重であるため、オイルリフト装置を設け始動、停止時の安定な油膜形成を図っている。

3. 発電機構造

1) 固定子

固定子枠は多角形の鋼板溶接構造で輸送のため 4 分割となっている。固定子枠とベースブロックとのトルク伝達は機械加工上合理的な平行キーを採用している。

固定子鉄心は損失の少ない S 級けい素鋼板を積層し、固定子枠への取付はスタッドを介してラッセンにより溶接する当社標準構造を採用している。また固定子内径が 8 m を越える大形機であるため温度上昇による鉄心の熱膨張に対しては特に留意し、特別な考慮がなされている。これらの効果はすでにカナダ向け 316MVA 機などに適用し良好な結果を得ている。

固定子巻線は優秀なエポキシレジン为主体とした F-レジン絶縁による 1 ターン コイル により構成されている。

鉄心長に比し直径の大きい固定子は吊り・輸送の際の歪みに対する考慮が重要な設計ポイントになるが、本機では固定子分割片には変形防止ビームを付けるほか、現地据付は発電機基礎上で直接組み立てることにより、一体吊りによる歪みの発生を避けている。

2) 回転子

磁極鉄心は電圧波形に含まれる溝高調波成分を減少させるため極片部をスキューさせている。このような構造の磁極ではコイルの変形防止上非磁性金属フランジを極片下にそう入しているが、本機では特殊な工夫を施した鉄心抜型を採用してこれを省略し、コイルの信頼性と経済性の向上を図っている。

回転子センタは当社標準の低風損鋼板製円板センタで

あり、輸送上 2 分割としボルト締めにより一体としたものをスラストブロック上にラジアルトルクピンと締付ボルトにより取り付けている。

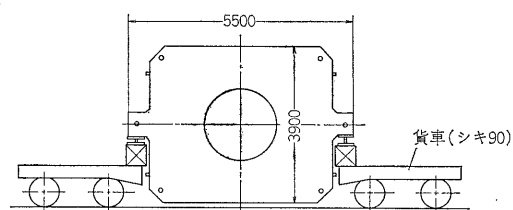
冷却用通風ファンは通風回路抵抗の電子計算機による詳細な計算およびファン特性を検討の結果、ラジアルファンを採用している。なおファンは輸送上 4 分割にして現地にて溶接の上一体リングにしている。

3) 軸 受

スラスト軸受は約 1,070ton のスラスト荷重を安全に支持する富士ミッチェル形軸受である。スラストパットには始動・停止時に圧油により油膜を容易に形成するための圧油ポートを設けたオイルリフト付きである。

当社のオイルリフトシステムは各パット内に精密に加工された絞り効果の大きいオリフィスが多段に装着され、その先に 2 段の逆止弁が接続されており、これとポンプ側に設けられた逆止弁により運転中の油膜の油の逆流を防止している。オリフィスは各スラストパットの加工および据付誤差によるパットの押し上げ油圧のばらつきによる荷重分担の不均一防止、および運転中の逆止弁不良によるリーク油量をオリフィスにより一定量以下に保持させることにより油膜圧力不足を防止させるよう考慮されている。したがって油圧回路抵抗が大きくなり高圧の給油ポンプを必要とするが油圧系統における他の部品との関連を十分検討の結果、アキシアル形プランジャポンプを採用している。また本機は油圧系統中の故障を検出して主機の運転継続・停止の判定を行うために送油母管中の圧力変動を圧力スイッチとタイマの併用により常時監視する方式を採用している。送油母管中の圧力変動は水車水圧スラストの変動による影響が大きいため予想される運転条件下における水圧スラストをあらかじめ算出の上、圧力スイッチの設定を行うとともに、系統中の各部品も十分信頼性の高い無漏油のものを採用している。

軸受油槽を支えるスラストブラケットは当初輸送制限上 2 分割構造が考えられたが、経済性および油漏れに対する信頼性の見地から輸送方法を詳細に検討の結果第 8 図に示すように短形形構造を採用することにより一体構造で輸送可能にしている。ブラケットに取り付けられた放射状の 4 本のアームは基礎に対して水平荷重のみを伝



第 8 図 スラストブラケット形状および輸送図

Fig. 8. Outline of thrust bracket and transportation plan

達するよう考慮されている。

軸受の冷却方式は当社標準方式の自己循環油冷却器別置方式で別置油冷却器はブラケットピット内に据え付けられている。

4) その他

本発電所は組立室スペースが狭いため上部ブラケットを含めたトップカバー、上部シールドは一体で分解できる構造になっている。

ブレーキは主機停止時にオイルリフトさせること、および入口弁がないのでガイドベンからの漏水により回り出すのを防ぐために一般の基準の2倍以上の容量をもたせている。

4. 励磁装置

励磁装置は当社で多数の実績を持つサイリスタ形静止励磁装置を用いている。本装置は自動電圧調整装置、サイリスタ変換装置および電源変圧器により構成されている。自動電圧調整装置は当社標準のトランジダイン自動電圧調整装置を用い、サイリスタ変換装置は大容量サイリスタおよびシリコン整流素子を組み合わせた三相混合ブリッジ回路を採用している。これらは電源変圧器を除いてすべてキュービクルにコンパクトに収納され、保守

・点検を容易にしている。なおサイリスタおよびシリコン整流素子収納キュービクルは自冷方式である。

V. む す び

以上、第二豊実発電所向けカプラン水車および発電機の概要と特長を述べた。

多くの新技術を駆使して、上述の大形水車、発電機を完成させたことは、今後予想される大容量大形水車、発電機の設計、製作に対して万全の態勢を示したものとして喜ばしい。また、これら新技術は今後の水力発電設備の経済性、信頼性追求の方向を示すものであると自負している。

終わりに、これら機器の設計、製作にあたり、終始ご指導とご協力を賜った東北電力株式会社の関係各位に深く謝意を表する次第である。

参考文献

- (1) 菅野・矢野・有蘭：東北電力・第二鹿瀬発電所向け58,500 kW カプラン水車 富士時報 46 No.2 (昭48)
- (2) 久保田・滝本・新倉：有限要素法による水車部品の応力解析 富士時報 46 No.4 (昭48)

発明の紹介

交流発電機用自動電圧調整装置

(特許 第 737833 号)

この発明は、励磁機を有する交流発電機の励磁系過渡応答特性を向上させることのできる AVR 装置に関するものである。

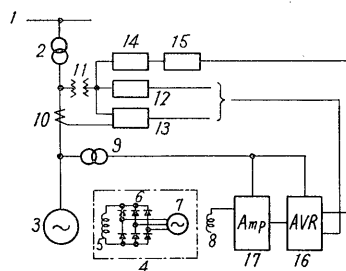
一般に交流発電機の励磁系過渡応答特性は、励磁機の時定数を間接的または直接的に補償することにより改善されるが、平常状態の励磁系の静的ゲインを高くとれない欠点があり、一方、AVR に PID 特性を持たせて改善を図ろうとすると、常時のリップルを拡大するので問題が生じる。

この発明は、励磁機時定数の補償を行うことなしに励磁系過渡応答特性を改善し、電圧低下時の回復時間を短くすることのできる装置を提供するものである。

この発明によれば、電力系統 1 に主変圧器 2 を介して接続された交流発電機 3 のための AVR 16 の入力に、通常の電圧偏差検出部 12 の出力と共に、微分回路からなる電圧変化検出部 14 と不感帯回路 15 とを有する不感帯付電圧瞬時変化量検出装置の出力を加えるよう

にして、上述の目的が達せられる。

この結果、AVR は電圧急変時にのみあたかも PID 特性を有するかのように振舞い、これに対して平常時は不感帯以下に偏差入力がおさまるため微分特性は活かされず、通常の PI 特性で動作することが可能となる。このため AVR の静的ゲインを大きくすることができ、全体としての励磁系過渡応答特性も大幅に改善される。





＊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。