

未来を開発する
三菱電機

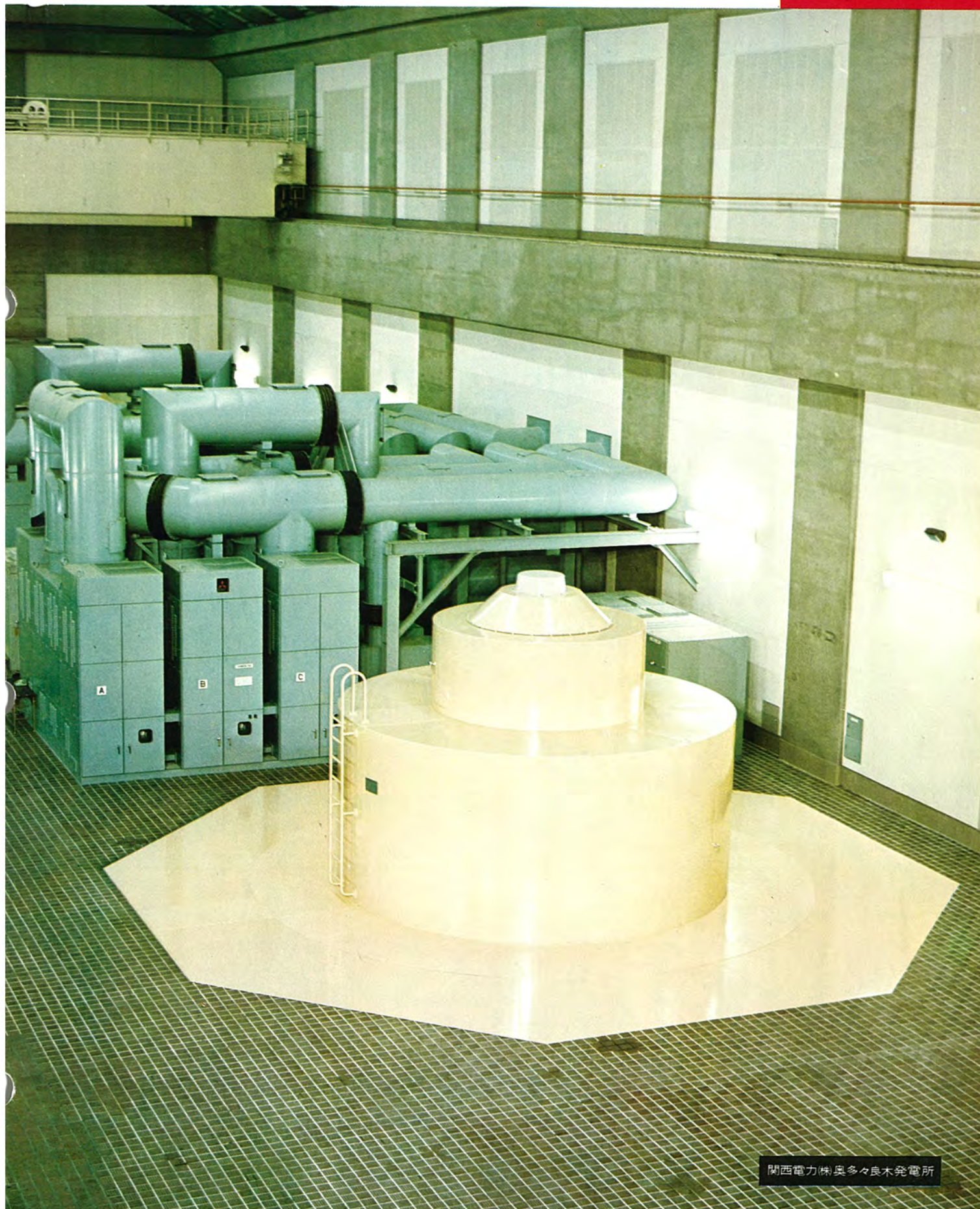
昭和37年9月15日第三種郵便物認可 三菱電機技報 49巻9号(通巻532号)昭和50年9月25日発行(毎月1回25日発行)

MITSUBISHI DENKI GIHO 三菱電機技報

Vol.49 No.9

水力発電特集

9
1975



関西電力(株)奥多々良木発電所

三菱電機技報

Vol. 49 No. 9 SEPTEMBER 1975

水力発電特集

目次

特集論文

最近の水車及びポンプ水車	弘中和夫・曾野勝司	593
最近の水車発電機及び発電電動機	森 与志彦・山本 明・宇住見一雄・三谷一晃	598
最近の水力発電所制御装置	山本潤二・林 重雄・横田 浩・合田啓治	604
揚水発電始動装置及び発電機回路用大電流空気シャ断器	林 重雄・山本潤二・信崎泰秀・本部康英・藤原八郎	610
関西電力(株)奥多々良木発電所納めポンプ水車, 発電電動機及び制御装置	曾野勝司・上山 正・森 与志彦・横田 浩・監崎 章	616
北海道電力(株)新冠発電所納めポンプ水車, 発電電動機及び制御装置	福増健二・十倉孝之・三谷一晃・高木彰麻呂	622

普通論文

ホログラフィによる立体像記録	高田真蔵・宮沢生行・水本洋一・西 和郎・茶之木けい子	631
液晶ディスプレイ	高田真蔵・新居宏王・上田文夫	635
77 kV ガス絶縁変圧器	白井 満・奥谷勝弘・森 章文・徳永博典	638
シーケンサ《MELSEC》—710 の適用	石 雅彦・加賀宏明・酒井亜男	643

FEATURING HYDROELECTRIC POWER PLANTS

CONTENTS

FEATURED PAPERS

Recent Hydraulic Turbines and Pump-Turbines	by Kazuo Hironaka & Masaji Sono	593
Recent Hydraulic Generators and Generator-Motors	by Yoshihiko Mori et al.	598
Recent Control Equipment for Hydroelectric Power Plants	by Junji Yamamoto et al.	604
Starting Equipment for Pumped-Storage Power Plants, and Large-Current Air Circuit Breakers for Generator Circuits	by Shigeo Hayashi et al.	610
Pump-Turbines, Generator-Motors and Control Equipment for the Okutataragi Power Plant	by Masaji Sono et al.	616
Pump-Turbines, Generator-Motors and Control Equipment for the Niikappu Power Plant	by Kenji Fukumasu et al.	622

GENERAL PAPERS

Three-Dimensional Image Recording and Reconstruction by Holography	by Shinzo Takada et al.	631
Computer-Controlled Liquid Crystal Display	by Shinzo Takada et al.	635
A 77kV SF ₆ Gas-Insulated Transformer	by Mitsuru Shirai et al.	638
Applications of the MELSEC 710 Sequencer	by Masahiko Ishi et al.	643

表紙

関西電力(株)奥多々良木発電所

奥多々良木発電所は総出力 1,212 MW の世界屈指の大容量純揚水発電所である。ポンプ水車は、立軸フランシス形、有効落差 400 m で分割ランナを採用している。発電電動機は、出力 320 MVA (発電機) / 314 MW (電動機)、回転数 300 rpm の記録的な大容量高速機であり、揚水始動は直結誘導電動機によって行われる。

写真は 3 号誘導電動機を示し、八角形の上板の下に発電電動機が収められ、その奥のキュービクルは相切換え用大電流シャ断器、さらにその奥に 4 号機がある。

COVER

Kansai Electric Power's Okutataragi Power Plant

With a total generating capacity of 1,212MW, the Okutataragi power plant ranks among the world's largest pumped-storage hydraulic power stations. The pump-turbine unit is the vertical Francis type, operated under an effective head of 400m, and has bifurcated runners. The generator-motor is a record-making high-speed large-capacity unit, rated at 320MVA (generator), 314MVA (motor) and 300rpm. For pumping operation, the unit is started by direct-coupled induction motors. The photo shows the No. 3 induction motor, the main generator-motor unit being concealed under the octagonal plate. The cubicles behind it contain large-current circuit breakers for phase change.

アブストラクト

UDC 621.221+224:627.84

最近の水車及びポンプ水車

弘中和夫・曾野勝司

三菱電機技報 Vol.49・No.9・P593～597

最近の水力原動機である水車・ポンプ水車は、経済性の追求より大容量化・高落差化がめざましい。なかんずく揚水発電所に採用されるポンプ水車にこの傾向が顕著であり、国内でも1,000MWを越す揚水発電所の建設が盛んである。本文では水車及びポンプ水車における最近の傾向を述べ、これに対処すべき研究開発・設計・製作における新しい技術及び最近の傾向を概説した。

UDC 621.221.4:621.313.1-3:621.316

北海道電力㈱新冠発電所納めポンプ水車、発電電動機及び制御装置

福増健二・十倉孝之・三谷一晃・高木彰麻呂

三菱電機技報 Vol.49・No.9・P622～627

新冠揚水発電所は昭和44年以来、約1年半にわたり北海道電力㈱と各種共同研究を行い、昭和45年8月着工以来、4ヵ年の歳月をかけて昭和49年8月に1号機を、同11月に2号機を完成した。

この発電所は道内で最初であり、かつ最大級のものであり、デリア形ポンプ水車の採用、低減電圧制動巻線始動方式の採用、遠方制御（被制御所）の採用などの特長をそなえている。ここに新冠揚水発電所の概要を説明する。

UDC 621.313.322-82:621.221

最近の水車発電機及び発電電動機

森 与志彦・山本 明・宇佐見一雄・三谷一晃

三菱電機技報 Vol.49・No.9・P598～603

最近、海外では大形水力の開発が盛んに行われ、また国内ではピーク電力供給源としての大容量揚水発電所の建設が進められている。これに伴い水車発電機は一方では大容量超大形化、他方では大容量高速化のすう勢にある。本文では最近の発電機の進歩を紹介するとともに、今後解決すべき問題点として、通風冷却、振動抑制、スラスト軸受、固定子鉄心のゆるみと波打ちなどについて概説し、更に水冷却発電機の開発状況及び高速高荷重スラスト軸受の新技术を紹介する。

UDC 535.4

ホログラフィによる立体像記録

高田真蔵・宮沢生行・水本洋一・西 和郎・茶之木けい子

三菱電機技報 Vol.49・No.9・P631～634

24"×32"のホログラムによる立体像の記録、再生をおこなった。ホログラムはアルゴンイオンレーザを用いてシートフィルムに記録し、超高压水銀灯で再生した。立体像は幅50cm、高さ30cm、ホログラムの手前45cm、後側10cmの範囲に再生される。とび出す立体像を再生するために2段階のプロセスでホログラムを記録した。

このホログラムを用いた立体像ディスプレイを沖縄国際海洋博の三菱海洋未来館に出展している。

UDC 621.311.21:621.316

最近の水力発電所制御装置

山本潤二・林 重雄・横田 浩・合田啓治

三菱電機技報 Vol.49・No.9・P604～609

水力発電所の制御装置は、高信頼化、保守の容易化、制御特性の向上、経済性などの要求に答え改良が加えられているが、最新の特徴ある装置の中から、サイリスタ励磁装置とその付属装置として系統安定化装置、電気ブレーキ、PIDガバナ、シーケンサをもちいた運転制御装置について述べている。

UDC 681.327:548.144

液晶ディスプレイ

高田真蔵・新居宏壬・上田文夫

三菱電機技報 Vol.49・No.9・P635～637

液晶カラーディスプレイ装置は、投写形の大画面表示が行えるもので、沖縄国際海洋博覧会 三菱海洋未来館に出展するために開発されたものである。この装置は、当社で開発された電界効果形液晶素子を利用しており、コンピュータ制御により、魚群の遊泳するパターンの動きや色を音楽のアクセントや人の声などに同期して、実時間で変化させて幻想的映像を表示するようにしたものである。

UDC 621.221.4:621.313.1-3:621.316.57:621.3.022

揚水発電始動装置及び発電機回路用大電流空気しゃ断器

林 重雄・山本潤二・信崎泰秀・本部康英・藤原八郎

三菱電機技報 Vol.49・No.9・P610～615

発電電動機の容量、回転数などの条件により、技術的、経済的に最も適した始動方式が採用される。各始動方式について概要、実施例を述べ、今後大容量、高速機に適用されるサイリスタ始動装置についても示した。

超々高圧系統に接続される大容量揚水発電所の主回路構成を簡素化し、経済的な構成とするため、18kV、12kAのC形空気しゃ断器を製作した。このしゃ断器は多数回の負荷開閉能力を有するものである。

UDC 621.314.22:621.315.618.9:621.3.027.78

77 kV ガス絶縁変圧器

白井 満・奥谷勝弘・森 章文・徳永博典

三菱電機技報 Vol.49・No.9・P638～642

市街地の屋内受電所を不燃化するため、SF₆ガス絶縁変圧器を試作した。この試作器は、77kV、3,000kVAの三相器で、ほぼ実器使用を考慮した変圧器であり、各種特性試験、絶縁試験、温度上昇試験及び短絡試験を通じて好成績を収め、SF₆ガス絶縁変圧器が、66kV及び77kV受電の電気設備を不燃化する一つの有効な手段であることを実証した。当社は、ガス絶縁開閉機器に幾多の実績を持っているが、ガス絶縁変圧器の製作にも既に2,3の実績を有し、今回の試作器は、従来技術をも更に発展させたものである。本文ではその内容を紹介する。

UDC 621.221.4:621.313.1-3:621.316.7

関西電力㈱奥多々良木発電所納めポンプ水車、発電電動機及び制御装置

曾野勝司・上山 正・森 与志彦・横田 浩・監崎 章

三菱電機技報 Vol.49・No.9・P616～621

奥多々良木発電所は、世界屈指の高落差大容量機である。このため製作に当たっては事前の研究開発を十分に行い徹底した品質管理下で信頼性ある機器の納入を行った。特に輸送制限による2分割ランナの採用、発電電動機の強制風冷、高速高荷重スラスト軸受の採用、直結誘導電動機始動方式の採用等数々の記録的特徴を有する。この発電所は50年3月に4号機の官庁検査を終え運転を開始したので、この機会にその概要及び現地試験結果のおもなものについて紹介する。

UDC 621.316.71:681.326

シーケンサ《MELSEC》-710の適用

石 雅彦・加賀宏明・酒井亜男

三菱電機技報 Vol.49・No.9・P643～646

当社では、プログラマブルなシーケンス制御専用装置として、《MELSEC》-310及び710のシリーズを有しており、各種プラントへの納入実績も増加しつつある。

ここでは《MELSEC》-710について、その特長あるシーケンス プログラム例を紹介し、《MELSEC》-710によってシーケンスの標準化、高度なシーケンス回路、プログラム数の削減が可能なること、及び保守に必要な十分なチェック機能を有していることなどを述べて、各種プラントへの適用紹介とした。

Abstracts

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 49, No. 9, pp. 622~27 (1975) UDC 621.221.4 : 621.313.1-3 : 621.316
Pump-Turbines, Generator-Motors and Control Equipment for the Niikappu Power Plant
 by Kenji Fukumasu, Takayuki Tokura, Kazuakira Mitani & Akimaro Takagi

Research and development on Hokkaido Electric Power's Niikappu pumped-storage power plant was carried out in cooperation with the owners over a period of approximately 18 months starting in 1969. The No. 1 and 2 units went on line in Aug. and Nov. 1974 after some 4 years of planning and construction.

Although it is the first pumped-storage power plant in Hokkaido, Niikappu is of the first rank in size, and has a number of features, including use of a Deriaz pump-turbine, adoption of a low range voltage-control-winding starting system, and control from a remote location. The paper presents a general description of the Niikappu plant.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 49, No. 9, pp. 593~97 (1975) UDC 621.221.224 : 627.84

Recent Hydraulic Turbines and Pump-Turbines

by Kazuo Hironaka & Masaji Sono

Recently, to achieve greater economy, the main demands placed upon hydraulic turbines and pump-turbines have been for higher capacity and head. These trends are particularly notable in the pump-turbines built for pumped-storage stations, and such stations of over 1000MW are commonly being constructed in Japan. The paper discusses recent trends involving hydraulic turbines and pump-turbines, and the new technology involved in the approaches—R&D, design and production—that are used.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 49, No. 9, pp. 631~34 (1975) UDC 535.4

Three-Dimensional Image Recording and Reconstruction by Holograph

by Shinzo Takada, Takayuki Miyazawa, Yoichi Mizumoto, Kazuro Nishi & Keiko Chanoki

Three-dimensional images have been recorded on a 24"×32" holographic sheet film using an Argon-ion laser, and reconstructed using an extrahigh-voltage mercury vapor lamp. The reconstructed image measured 50cm in width and 30cm in height, and extended 45cm in front of and 10cm behind the screen. To provide an image that protruded from the screen, a 2-step recording process was employed.

This 3D holographic display will be exhibited in the Mitsubishi Pavilion at the Ocean Expo, Okinawa, Japan.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 49, No. 9, pp. 593~603 (1975) UDC 621.313.3 22~81 : 621.221

Recent Hydraulic Generators and Generator-Motors

by Yoshihiko Mori, Akira Yamamoto, Kazuo Usami & Kazuakira Mitani

Construction of large hydroelectric power stations is becoming common worldwide, and in Japan, construction of pumped-storage power plants is being pursued as a means of supplying peak-load power. As a result, there is a trend for increasing capacity, either by increasing size or by increasing the running rpm.

The paper discusses recent progress in generators, and some of the problems to be resolved, including air cooling, vibration control, thrust-bearing design, and loosening and buckling of the stator core. Also covered are the state of development of water-cooled generators, and of new technology for high-speed, high-load thrust bearings.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 49, No. 9, pp. 635~37 (1975) UDC 681.327 : 548.144

Computer-Controlled Liquid Crystal Display

by Shinzo Takada, Hirotsugu Arai & Fumio Ueda

This liquid crystal display system, which is capable of projecting an image onto a giant screen, was developed for exhibition in the Mitsubishi Pavilion at the Ocean Expo, Okinawa, Japan. It utilizes field effect liquid crystal elements developed by Mitsubishi Electric, and by means of computer control, synchronizes the colors and motion patterns of swimming fish with the rhythms of music or the human voice on a real-time basis, producing a fantasy-like image.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 49, No. 9, pp. 604~9 (1975) UDC 621.311.21 : 621.316

Recent Control Equipment for Hydroelectric Power Plants

by Junji Yamamoto, Shigeo Hayashi, Hiroshi Yokota & Keiji Goda

In response to requirements for hydroelectric power plant control equipment having higher reliability, easier maintenance, improved control performance and greater economy, many improvements have been effected. The paper deals specifically with such recent and noteworthy developments as thyristor exciters and the network stabilizing equipment accessory to them, electric brakes, PID governors, and operating control equipment incorporating sequencers.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 49, No. 9, pp. 638~42 (1975) UDC 621.314.22 : 621.315.618.9 : 621.3.027.78

A 77kV SF₆ Gas-Insulated Transformer

by Mitsuru Shirai, Matsuhiro Okutani, Akifumi Mori & Hironori Tokunaga

SF₆ insulation offers a proven method of fireproofing indoor substation equipment for urban areas, and Mitsubishi Electric has built numerous GIS switchgear installations, as well as several gas-insulated transformers. In an effort to contribute to the refinement of the technology in this field, and its application to higher voltages, a prototype 77kV 3000kVA 3-phase transformer has been built. It was designed to virtual commercial-use specifications, and has achieved excellent results in tests of insulation, temperature-rise, short-circuit, and various other performance factors, proving that the SF₆ gas-insulated transformer is indeed one of the most effective means of fireproofing 66~77kV power-receiving facilities.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 49, No. 9, pp. 610~15 (1975) UDC 621.221.4 : 621.313.1-3 : 621.316.57 : 621.3.022

Starting Equipment for Pumped-Storage Power Plants, and Large-Current Air Circuit Breakers for Generator Circuits

by Shigeo Hayashi, Junji Yamamoto, Yasuhide Shinozaki, Yasuhide Hombu & Hachiro Fujiwara

Selecting a generator-motor starting system for the optimum compromise of technology and economy depends primarily on the generator capacity and speed. A new Type C 18kV 12kA air circuit breaker capable of frequent interruption of load current has been developed to reduce the complexity and cost of construction of the main circuitry connecting large-capacity pumped-storage power stations to UHV networks. The paper briefly discusses a variety of starting systems, describes typical installations, and deals with the thyristor starting system, which will be used from now on for large-capacity, high-speed machines.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 49, No. 9, pp. 643~46 (1975) UDC 621.316.71 : 681.326

Applications of the MELSEC 710 Sequencer

by Masahiko Ishi, Hiroaki Kaga & Tsuguo Sakai

Mitsubishi Electric's series of MELSEC 310 and 710 programmable equipment for sequence control are being used in a growing number of various types of plants.

The paper introduces typical sequence programs that are characteristic of the MELSEC 710. It also describes how the MELSEC 710 enables standardization of sequences, complex sequence circuits, and reduction in the number of programs, and provides a checking function ample to meet maintenance requirements, showing how application can be effected in plants of various kinds.

Mitsubishi Denki Giho Vol. 49, No. 9 : pp. 616~21 (1975) UDC 621.22.4 : 621.313.1-3 : 621.316.7

Pump-Turbines, Generator-Motors and Control Equipment for the Okutataragi Power Plant

by Masaji Sono, Tadashi Ueyama, Yoshihiko Mori, Hiroshi Yokota & Akira Kenzaki

Kansai Electric Power's Okutataragi pumped-storage power plant has some of the world's largest-capacity and highest-head equipment. To achieve this, much research and development work was performed, making it possible to deliver equipment of high reliability based on a thoroughgoing system of quality control. The machinery has a number of record-setting features, including use of bifurcated runners to overcome transport limitations, application of forced-air cooling and a high-speed, high-load thrust bearing in the generator-motor, and adoption of directly coupled induction-motor starting. With the No. 3 and No. 4 units having completed government inspection in March 1975, it now seems appropriate to describe some of the major items of equipment, and the results of on-site tests.

最近の水車及びポンプ水車

弘中和夫*・曾野勝司*

1. ま え が き

昭和48年後半の石油危機以来、あらためて将来のエネルギー資源問題が大きくなりあげられ、その中で太陽エネルギーの形態が変わったものではあるが、クリーンにしてかつ永久に枯渇することのない水力エネルギーの再開発が改めて推進される気運にある。水力エネルギーの利用は単に蓄積されたエネルギーを利用した発電のみにとどまらず、原子力発電所建設に伴う余剰電力の利用など電力系統全体の経済運用上の要求により、揚水発電所建設によるエネルギーの再利用などの役割も果たす。近年揚水発電所の大半は純揚水発電所として計画されており、比較的小容量の貯水池建設により1,000 MWをこす大容量の発電所の建設が可能となることから、建設地点の選定にも従来のごとく自然条件による制約を受けることが少ない。このため国内においても大容量揚水発電所として経済的に開発可能な地点も数多く調査され、クリーンエネルギー源としての揚水発電所が、今後ますます増大すると考えられる。

一方、普通水車はその形式においてはほぼ完成され、効率としても回転機械の中でも最も高く、大容量機では95%にも達するようになった。したがって、機械の性能の改善よりも経済性の追求が大きい要素を占め、大容量化・高速化とともに製作面での改良・開発がさかんに行われている。

本稿ではこれら水力開発の原動機である水車及びポンプ水車について、最近の動向及び当社の現況などについて述べることにする。

2. 水車及びポンプ水車の最近の動向

2.1 大容量化

建設すべき発電所の容量が決まっている場合、製造・輸送などの特殊事情がない限り、台数を少なくして単機容量を増すほうが一般的には経済性に富むのが普通である。機器の大容量化には設計・製作上の技術問題も多いが、水力学的研究開発に加え、原材料の信頼性の向上、電子計算機の利用による設計技術の向上、溶接技術の進歩による重板全構造の採用など設計・製作面での技術進歩、更には油圧機器などの周辺技術の進歩もあいまって、水車及びポンプ水車の大容量化の傾向が国内外を問わず顕著である。

図1、2. に各年代における水車及びポンプ水車の大容量機の変遷を示す。図にみられるごとく、普通水車はソ連が、ポンプ水車はアメリカが大容量化の先鞭(鞭)をつけてきたが、ポンプ水車においては、1970年以降の国内ポンプ水車が世界的にも超一流にランクされている。

当社においてもこれら大容量化に対処すべく、絶えることなき開発を行い、その成果は数々の大容量機の受注となって表れている。

ポンプ水車においては国内最大容量機である東京電力(株)新高瀬川発電所向け336 MWポンプ水車が現在鋭意製作中であり、運転中のものとしては、やはり国内最大容量機である関西電力(株)奥多々

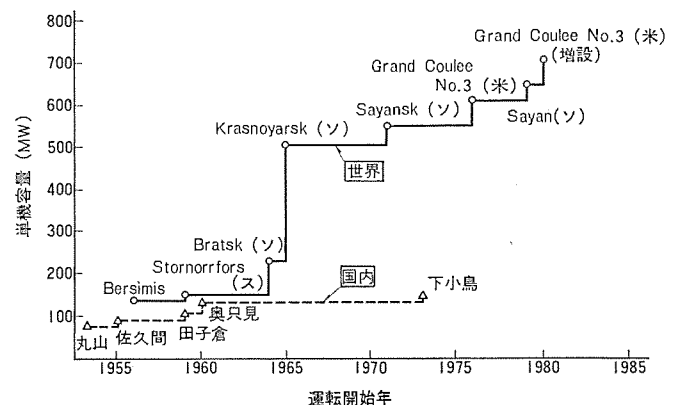


図1. 水車専用機単機容量記録品の変遷

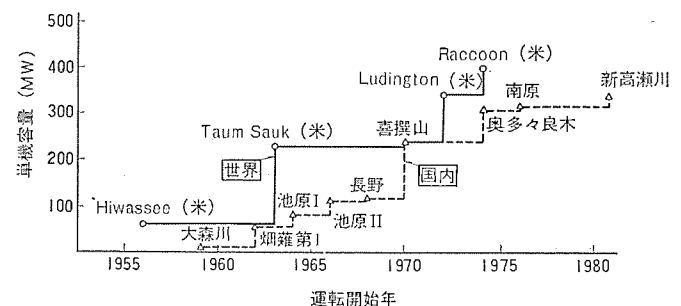


図2. ポンプ水車単機容量記録品の変遷

良木発電所向け310 MWポンプ水車(フランス形)、北海道電力(株)新冠発電所向け103 MWポンプ水車(デリア形)がそれぞれ昭和50年、49年に営業運転に入り、好調な運転をつづけている。

一方、普通水車としては、国内最大機の関西電力(株)下小島発電所向け146 MWフランス水車が運転に入っているほか、輸出水車として昭和42年メキシコMal Passo発電所向け218 MW水車4台の運転を機に200 MW級水車の製作に入り、昭和48年には当時ソ連を除き最大容量機であるカナダPortage Mountain発電所向け266 MW水車5台が運転に入り、大容量水車への幕を開いた。また落差が低い容量的には上記に及ばないが、大形水車として、ブラジルSalto Osorio発電所向け180 MW水車4台が現在掘付中であり、更にカナダSeven Mile発電所向け198 MWフランス水車3台が製作に入っている。

水車及びポンプ水車の大容量化に当たっての大きい問題の一つとして、輸送又は製作上の制約よりくるランナ(ランナー)の分割がある。上記Seven Mile水車は容量198 MWであるが、落差58 m、回転速度94.7 rpmという低落差超大形水車であり、そのためランナ最大径も7.4 mにも達するものであり、普通水車としては当社初の分割ランナを採用している。一方ポンプ水車では普通水車に比べランナ径も大きくなり、分割の要求が増えてくるが、ランナ周速も高落差化に伴い大となるため、ランナの分割は技術的にも難しいものになり、その可否が単機容量決定の最大の要因となる。この意味で奥多々良木

表 1. 大容量ポンプ水車・水車の製作例

	ポンプ水車			水車	
納入先	関西電力	東京電力	北海道電力	Canada	Canada
発電所名	奥多々良木	新高瀬川	新 冠	Portage Mountain	Seven Mile
形 式	フランシス形	フランシス形	デリア形	立軸フランシス	立軸フランシス
台 数	2	2	2	5	3
有効落差 (m)	406~337.7	241.7~202.7	117~66.5	170.7~106.7	65.5~50
水車出力 (kW)	310,000	336,000	103,000	266,000	197,800
回転速度 (rpm)	300	214	231	150	94.7
全揚程 (m)	423.9~366.8	264.4~229.6	122~73		
ポンプ入力 (kW)	314,000	320,000	102,000		
回転速度 (rpm)	300	214	231		
ランナ最大径 (mm)	5,680	6,390	4,150	5,360	7,400
2分割	2分割	2分割	6枚羽根	一体	2分割
材質	13Cr-3.8Niステンレス鋼	13Cr-ステンレス鋼	13Cr-3.8Niステンレス鋼	普通鋼板	板金溶接製
ケーシング口径 (mm)	2,770	3,600	3,680	4,900	7,315
材質	60k 高張力鋼	60k 高張力鋼	60k 高張力鋼	普通鋼板	普通鋼板
主 軸 径 (mm)	1,150	1,250	1,350	1,270	1,370
材質	鍛 鋼	鍛 鋼	鍛鋼溶接製	鍛 鋼	鍛 鋼
入口弁形式	ロータリ弁	ロータリ弁	バイブレーション弁	—	—
口径 (mm)	2,500	3,400	3,680	—	—
運 開 年	昭和 50 年	昭和 56 年	昭和 49 年	昭和 43 年	昭和 55 年

電所向けランナは、落差 406 m、ランナ周速約 90 m/s（定格回転時）にもかかわらず、世界的にも画期的な 2 分割ランナが採用されたが、事前の詳細な強度解析、分割ボルトの配置、材料、締付方法及び主機始動・停止による低サイクルの疲労、など考えられる範囲の検討を重ねた結果の運転成功は今後の大容量化の大きな指針となると考えられる。

表 1. に当社が製作した大容量水車・ポンプ水車の代表例を示す。

2.2 高落差化

同一容量の水車を設計する場合、高落差・小流量のもののほど貯水池容量、導水路及び水力機械の寸法が小さくすむ。また水車の特性から、落差が高い程回転速度を高くとることができ、発電機の寸法ひいては発電所建屋も小形になり経済性を高めることができるので、近年高落差への指向が強まり、特にポンプ水車においてはその傾向が顕著で、年々その記録を更新していかうとしている。

ポンプ水車の高落差化の問題点としては、単段ポンプ水車としての揚水の可能性、高水圧下での各部品の強度剛性、高周速ランナの設計などのほか、ポンプ水車が發生する高周波の水圧脈動に対する疲労強度、高圧高周速下の軸封水機構、機器の振動など従来の設計の延長では計り知れない要素も多く含まれている。このため実機設計に先立って、ポンプ水車の定常運転だけでなく、始動・停止などの過渡運転下における運転状況を予知し、これらか(苛)酷な運転に対処する必要がある。当社でも性能・強度・振動・材料など各分野にわたり高落差大容量ポンプ水車に対する研究を実施してきたが、これらの総合確認試験を行うための実揚程実落差試験装置を昭和47年にこう(恒)久設備として設置した。図 3. にこの試験装置のスケルトン

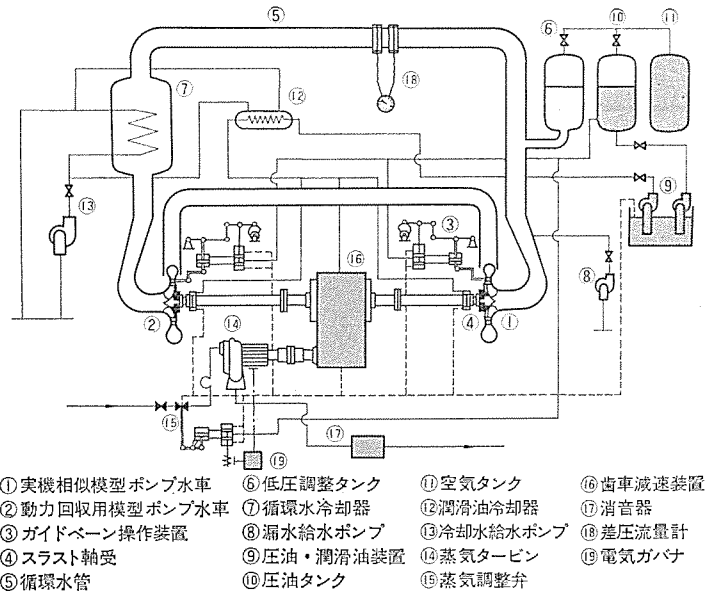


図 3. 実揚程・実落差試験装置

表 2. 高落差フランシス水車の実例

納入先	発電所名	落差 (m)	水車出力 (kW)	回転速度 (rpm)	納入年
U S A	Kamino	320	83,500	360	昭 42
関 西 電 力	木 曾	231	126,000	257	" 43
台 湾	下達見	295	106,000	360	" 43
U S A	Snettisham	312	24,500	514	" 46
ブラジル	Passo Fundo	253	112,500	300	" 47
関 西 電 力	下小島	251	146,000	277	" 48
"	伊奈川	438	42,000	600	製作中

を、図 4. に奥多々良木発電所向けポンプ水車の試験結果の一例を示す。この実揚程試験装置はランナ寸法 600 mm の大形模型を使用し、揚程 700 m までの試験を行えるものであり、試験機は流体力学的に相似であるばかりでなく、構造的にも実機と相似としうるので、単に揚水の可否を調査するだけでなく、応力・振動特性・流体弾性・振動特性も実機と同一にすることができ⁽¹⁾、更に短時間で疲労強度を確認しうるなど数々の特徴を有している。奥多々良木発電所向けポンプ水車の製作に当たっては、この装置により 2 分割ランナを用いた実機相似模倣により水車及びポンプのあらゆる運転状況下の試験を行い、運転特性・応力振動特性をは(把)握したが、今後ますます高落差大容量化するポンプ水車の事前検討にこの装置が威力を発揮しよう。

一方、水車においても高落差の傾向があり、特に構造の簡単なフランシス水車にこの傾向がめざましく、従来のペルトン水車の領域へと範囲を拡大している。表 2. に当社が最近製作を行った高落差フランシス水車の実例をあげる。

2.3 水路工作物と機器の協調

水力発電所の建設にあたっての経済性追求は単に機器のみでなく土木工作物としての水路系の経済性をも求め、導水路・鉄管・放水路の口径の縮小やサージタンクの省略及び分岐・合流管を用いての条数減少などの施策がとられている。これらの低減策は機械側には特に起動・停止などの過渡状態においてよりか(苛)酷な条件を与え、水圧脈動を含めた諸特性・水車負荷シャ断時の水柱分離及び回転体時定数 (GD^2) との関連による制御方式の確立など検討すべき課題が多い。特に揚水発電所ではポンプ水車の複雑な特性がからむので、水車並入・負荷シャ断・ポンプ始動停止・ポンプトリップまた分岐合流管

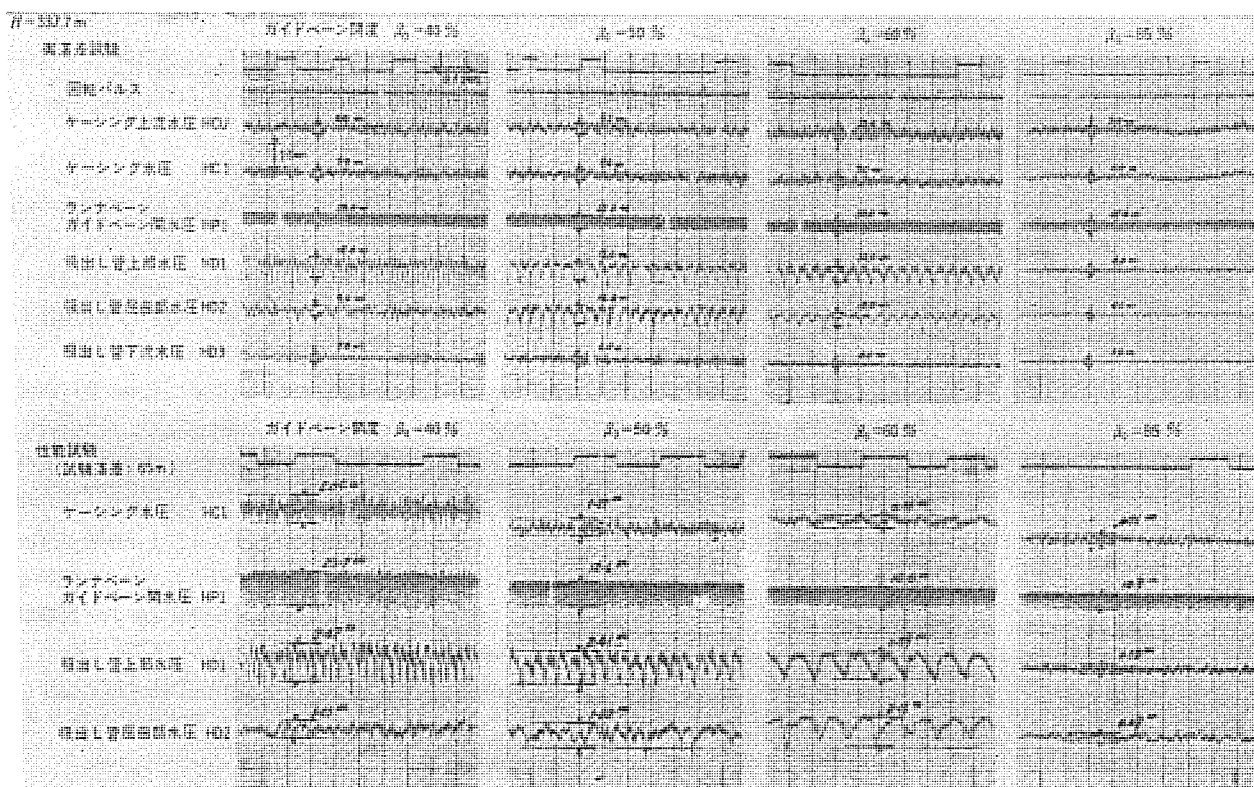


図 4. 実揚程・実落差試験結果の一例及び性能試験との比較

を有する場合には他号機に与える影響などポンプ水車の完全特性を考慮した事前解析を綿密に行い、土木側と機械側の密接な協調をはかっておく必要がある。

当社ではこれらの解析のため下記の3方法による過渡現象の解析手段を備え、要求に応じて使いわけ又は組合せにより検討が行えるようになっている。各解析方法の詳細は既に報告されているので、⁽²⁾⁽³⁾以下に概要をのべる。

(1) デジタル 計算機による解析

サージタンク・多分岐合流管を含めた全水路系に対し過渡現象計算を行うもので、各変動値を高精度で求めることができ、ガイドベーン閉鎖方法などの制御方式を確立する。

(2) ハイブリッド 計算機による解析

揚水発電所を形成する全水路系にポンプ水車特性及び調速機特性を加味したトータルシステムを解析するもので、いながらにして揚水発電所の始動・停止などの運転特性をシミュレートすることができ、土木計画段階で機器特性とあいまった合理化案を短時間で検討できる。

(3) 過渡現象模型試験による解析

計算機に導入し得ない水圧脈動特性などを模型により確認し得るもので、実機ポンプ水車の過渡状態をあらかじめ想定することができ、最適の制御方式を確認することができる。

これらの解析は既に当社納入の水車及びポンプ水車にて実施に移されており、実機運転結果との対比によりこの解析が十分な精度で実機運転を予測しうる事が確認されている。

3. 水車及びポンプ水車の構造・材質の動向

前述のように水車及びポンプ水車の大容量化・高落差化はめざましく、それに付随して機器の寸法・重量も増大している。これに対処するため設計製作面でも従来のものの踏襲にとどまっているわけにはいかず、各分野における技術開発を積極的に採用しつつ最近の水

車・ポンプ水車は新しい形態へと変ぼうしつつある。以下に主な事例を述べる。

3.1 ランナ

水車及びポンプ水車の大容量化は各部寸法の大形化を招き、輸送上の問題がクローズアップし、機器を分割する手法がとられる。なかんずくランナは他部品に比べ構造的にも複雑であること、高周速の回転体であることから、分割を行う場合、分割位置・接続方法・接続ボルトの材質・ボルト締付方法など慎重に検討を要する。特にポンプ水車においてはランナ内部の流れは複雑であり、始動停止時に大きい水圧脈動をうけるほか、始動及び停止による低サイクルの疲労強度も十分に検討しておく必要がある。前述のごとく奥多々良木発電所向けフランス形ポンプ水車ランナは、従来の分割落差実績のほぼ倍に当たる400m級の落差を有する世界初の高落差分割ランナであるため、有限要素法による強度解析・実機と同一周速下での模型応力試験・水中での変動応力測定試験など製作に先立って模型による入念な検討が加えられた⁽⁴⁾。現状ではポンプ水車ランナの分割落差限界は500mまでと考えられるが、その後の高落差ポンプ水車の応力試験の結果よりみて、更に高落差まで分割可能となる日も近いと考えられる。

ポンプ水車ランナは高落差になるに従いランナ周速も増大し、強度的にも厳しい条件下にさらされる。またランナ形状が偏平形に近くなるため、製作時点での鋳造欠陥補修や運転中に生ずるキャビテーションの補修などを容易にするため、低温溶接性の良好な材質が望まれる。当社でもランナ鋳造メーカーとの協調による開発研究により、上記要求を満たすため特にニッケルを加算した3.8%ニッケル、13%クロミウムのステンレス鋳鋼をランナに採用し、好結果を得ている。この材料は溶接性に優れた特性を有するほか、材質的には強度じん(靱)性面でも従来の13%クロミウムステンレス鋼に比べ優れた特性を有するため、新冠PS向け103MWデリア形ポンプ水車ランナベーン、奥多々良木PS向け310MWフランス形ポンプ水車ランナに採用され、更に輸出向け

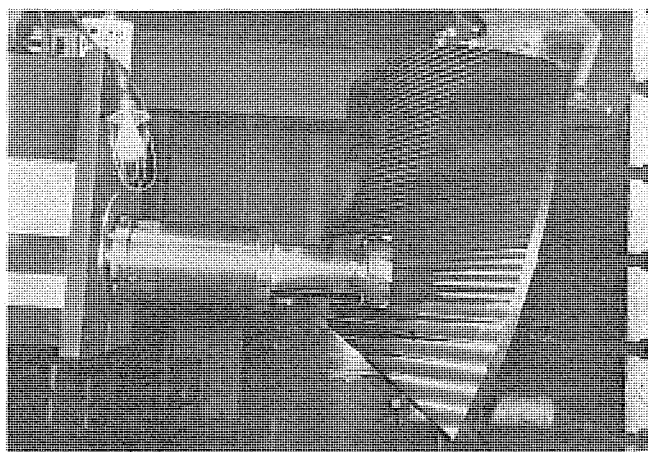


図 5. 103 MW ポンプ水車ランナベーン NC 加工 (新冠発電所向け)

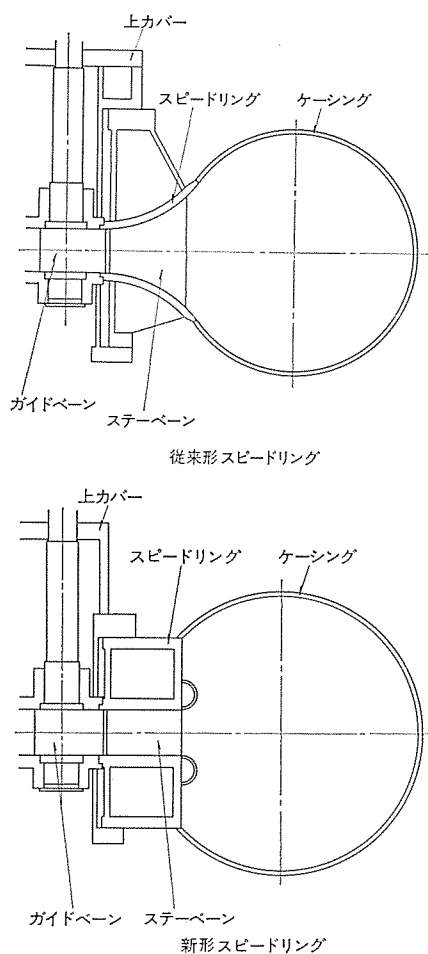


図 6. スピードリング形状比較図

普通水車ランナにも採用されている。

ランナの大形化に伴い、従来の鋳造品にとって代わる構造として溶接構造のランナが出現している。従来の溶接ランナはクラウン・シュラウドリング・ランナベーンを別個に鋳造し、それらを溶接により組立てる方法が採用され、当社でも多くの実績を有していたが、材料の安定性・溶接技術の面から全部品を鋼板にて成形した上、溶接に組立てる全板金ランナが開発され、性能的にも従来のランナに比べてそんなことが確認されたので、Phillipine, Pantabangan PS 向け実機ランナとして採用されており、Seven Mile PS 向け 2 分割ランナにもこの方法を採用すべく計画中である。

ランナベーンの加工においても電子計算機によるベーン設計・数値制

御機による高精度加工がとり入れられ、経済性ととも品質の向上をはかっている。新冠 PS 向け デリア 形 ポンプ水車ランナは設計製作を通じて一貫した電子計算機の利用の下に自動製作がなされた。図 5. に同 PS 向け ランナベーンの加工を示す。

3. 2 ケーシング及びスピードリング

ケーシングに高張力鋼の採用がみられてから久しいが、近年の高落差大容量化に伴い、板厚の減少及び重量・溶接量の減少による経済性のため 60 kg/mm² 級高張力鋼を採用したケーシングは常識化している。当社でも新冠・奥多々良木・新高瀬川 PS 向け ポンプ水車はもとより、普通水車にも同材質ケーシングが広く採用されている。一方ケーシングに接続するスピードリングも従来以上の高荷重に対する強度剛性が要求され、従来形に比べて強度的にも信頼性が高く、かつ剛性に富む新形スピードリングが採用されはじめた。図 6. に従来形及び新形スピードリングの構造比較を示す。新形スピードリングは従来形に比し強度剛性面で優れているだけでなく、図に示すように上下胴板が平板構造のため製作面でも経済性が高く、ステアーベーンとのあわせも簡単のため、エレクトロスラグ溶接などの新技術の適用も簡単であり、模型試験による性能も従来形に比べそん色のないことなどから、当社でもこれら特色を生かしたスピードリングが国内、輸出を問わず既に製作を進めている。

3. 3 重板金構造部品の採用

機器の大形化に伴い水車・ポンプ水車の部品は寸法的にも重量的にも飛躍的に増大している。一方それに並行し、製品製作技術としての溶接技術の進歩・非破壊試験の精度向上などが工場内の品質管理体制の拡充とあいまって、従来採用されていた鋳鍛鋼部品が大幅に板金溶接構造として変ぼうしている。当社でもエレクトロスラグ溶接・サブマージドアーク溶接など溶接の信頼性・自動化・検査技術の確立により前記のランナのほか、ガイドベーン・主軸・ロータリ形入口弁・サーボモータなど既にほとんどの部品の板金化を成しとげ、現在では工作法・検査法などの Procedure も完成し、経済性・納期面での優位さを数々の実績にて証明している。

3. 4 入口弁の構造

水車・ポンプ水車の入口弁としては従来より高落差用としてロータリ弁が、中落差用としてバタフライ弁が採用されていた。両者とも材質的には前述のごとく、板金構造の採用が定着しつつあることは言をまたぬが、構造的にも近年バタフライ弁の一種として、2 枚の円板を縦又は斜のリブにより一体にくみだたパイプレン弁が出現している。図 7. にパイプレン弁の写真を示す。図にみられるごとく、パイプレン弁は開口時に弁体の内部を流水が通過しうる構造となっており、このためバタフライ弁に比べ損失水頭が少なく、また閉鎖時シールが連続シールとしうることから漏水量も少ない優れた特徴もっている。構造的にはラメン構造として強度剛性面にも富み、バタフライバルブより高落差にも適用可能であり、高落差用として従来より用いられたロータリ弁より面間距離を極端に小さくすることができるため、発電所建屋の軽減もはかれるなど、バタフライ弁とロータリ弁の優位性をすべて備えている。これら特徴を生かし、当社の長年の研究開発の成果⁽⁶⁾が既に新冠 PS 向け ポンプ水車入口弁としても成功裏に運転に入ったほか、国内外に数多くの実績を有している。今後水力発電所だけでなく各種用途の弁として従来の弁にとってかわる形式となることが期待される。表 3. に当社が製作したパイプレン弁の主要実績を示す。

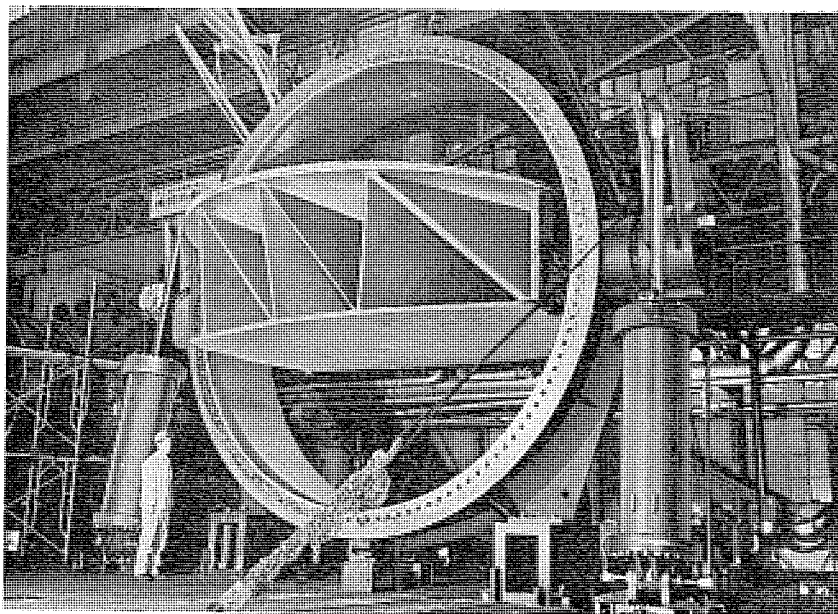


図 7. 5,450 mm パイプレン 弁 (Sirikit 発電所向け)

表 3. パイプレン 弁の実績 (口径 2,000 mm 以上)

納入先	発電所名	落差 (m)	口径 (mm)	納入年
西バキスタン	Tarbela	141	5,450	昭 50
タイ	Sirikit	90	5,450	" 47
北海道電力	新冠	117	3,680	" 49
徳島県	日野谷	60	2,800	" 45
北海道庁	岩尾内	55	2,800	" 45
スリランカ	Ukuwella	108	2,750	" 50
関西電力	大桑	86.6	2,200	" 46
"	神野	78.7	2,000	" 47

表 4. 多目的放水弁製作歴

納入先	発電所名	落差 (m)	水車出力 (kW)	放水弁口径 (mm)	放水弁形式
西バキスタン	Mangla	130.8	147,800	2,600	ホローコーン
U S A	Camino	320	83,500	1,143	立形制圧式
U S A	New Don Pedro	137	63,400	1,220	ホローコーン
スリランカ	Ukuwella	89.4	23,400	1,330	ホローコーン

3. 5 制御方式の動向

2. 3 節でも述べたごとく、水力発電所の水路系の経済性追求により、これと協調した制御方式の確立が肝要である。水力機械の調速機として従来は速度式調速機が採用されていたが、電力の質的向上を計り系統の安定に寄与すべく、従来の調速機に微積分要素を加味した PID 調速機が開発された。詳細は後編の論文にゆずるが、当社では既に輸出水車調速機として Kootenay Canal PS 向け 146 MW 水車及び Pantabangan PS 向け 50 MW 水車に PID 調速機を採用しており、近き将来国内水車・ポンプ水車にも採用されることが考えられる。

水資源の総合開発の観点から、水車は単に発電だけでなく、かんがい用、水道用など下流地域への放流と発電の協調も要求される傾向にある、この目的のためには、輸出水車にて既に実績を有しているように国内においても水車本体に放流弁を付属し、必要に応じて下流への流量供給を行うと同時に、水車用ガイドベーンとの連動によ

り各種制御をなしうる水車及び放水弁の連結制御が水資源有効利用と水力発電所の経済性の両点より出現すると考えられる。以下に当社が製作した実例としてのこの制御の機能を述べる。

(1) 単独放流

水車停止時に放水弁のみにより必要量の水を供給する。

(2) Synchronous Bypass

水車運転時に系統の要求により、水車出力すなわち流量の増減の指令をうけた場合、ガイドベーンに連動し、自動的に放水弁が動作し、常に下流側への供給を一定に保つ。

(3) 制圧機機能

水車の非常停止時のガイドベーン急閉鎖時のみ、急閉鎖による鉄管の水圧上昇を軽減するため、通常の制圧機的作用を行い、通常運転時は放水弁は閉鎖したままとする。なお危急閉鎖時、放水弁不動作の異常事態が生じた場合は、ガイドベーン閉鎖時間を自動的に

切換えて緩閉鎖ができるようになっており、鉄管水圧の異常上昇を防止するしくみとなっている。

上記方式は既に輸出向け水車に多く採用されているが、3機能の制御は切換スイッチで簡単に任意の選択ができるよう構成されており、水資源の有効利用とともに、発電所水路系の経済的設置をはかることができるなどこの方式採用のメリットは大きい。放水弁の形式としては落差により、各種弁が適用可能であるが、効率及び制御の容易さからホローコーン弁を採用した例が多い。表 4. にこの制御方式を採用した発電所の例を示す。

4. む す び

水車及びポンプ水車について最近の動向をとりまとめた。紙数の関係で述べる事ができなかったが、大容量機器として運転特性の安定を主眼としたランナ開発⁽²⁾・ランナ内の流れ解析・有限要素法を用いた各部強度計算・電算機による自動設計・機械インピーダンスを用いた振動解析⁽⁶⁾・補機の高油圧化など新しい技術が水力機器の設計製作にとり入れられている。今後ともクリーンエネルギーとしての水力の開発の一端をにない、信頼される機器の納入にまい進すべく日夜研さんに努めたいと決意を新たにしている。現状をふりかえってみるに本稿で述べた技術進歩、改新には過去長年にわたる電力会社をはじめとした顧客各位から寄せられたご指導・ごべんたつがいかに大きかったかが痛感される。ここに当社関係者一同改めて深い謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- (1) 福増ほか：三菱重工技報 10, No. 1
- (2) 安藤ほか：三菱重工技報 9, No. 5
- (3) 渡辺：三菱重工技報 2, No. 2
- (4) 渡辺ほか：三菱重工技報 10, No. 1
- (5) 福増ほか：三菱重工技報 10, No. 6
- (6) 生田ほか：三菱重工技報 9, No. 5

最近の水車発電機及び発電電動機

森 与志彦*・山 本 明*・宇佐見一雄*・三 谷 一 晃*

1. ま え が き

石油危機に端を発して、大規模な水力開発が海外では盛んである。そのなかで大容量(単機 200~600 MW)、低速(100 rpm 前後)の超大型機がとくに注目をひく。国内では未開発の水力資源も乏しく、中小容量の水力開発をいかに経済的に進めるかが大きな課題であるが、ピーク電力供給源としての揚水発電所は、国内でも多数建設されている。揚水発電所の経済性を高めるため大容量高揚程(落差)化が進められ、発電機もそれに伴って大容量・高速化の一途をたどっている。本稿では、最近の発電機の進歩及び解決すべき問題点を概観し、更に水冷却発電機の開発の現状及び高速高荷重 スラスト軸受の新技術を紹介する。

2. 高速大容量機の問題点

図 1. は、国内及び国外で製作若しくは製作中の大容量発電専用機及び発電電動機の実績を示す。図 1. からでも明らかなように、発電専用機では低速大容量機、発電電動機では高速大容量機が多いのが特色である。この両者に共通して言えることは、問題の内容に若干の違いはあるが、いずれも発電機の製作限界にちょう戦しつつあるという事実である。空気冷却式の発電機の製作限界を決定する要素の主なものは、通風冷却及び回転子の強度である。これは言いかえると、出力係数(最大約 8.0 程度)及び回転子の最大周速(積層リムで約 160 m/s 程度)とから下式のように、限界曲線を $kVA \times rpm$ の形で表現することができる⁽¹⁾。

$$kVA = k_0 d^2 l n \approx 8.0 d^2 l n \quad (1)$$

$$\gamma_0 = l / \tau_p = 120 fl / \pi d n \leq 4.5 \quad (2)$$

$$V_m = \pi d n_m / 60 \approx 160 \quad (m/s) \quad (3)$$

$$n_m \approx 1.55 n \text{ (発電電動機の場合)} \quad (4)$$

ただし d = 固定子内径(=回転子外径) (m)

l = 固定子鉄心長 (m)

n, n_m = 定格及び最大回転速度 (rpm)

f = 周波数 (Hz)

式(1)~(4)から 60 Hz 機を例にとれば、

$$kVA \cdot n \approx 12000 \times 10^4 \quad (5)$$

この式(5)の表現は、非常に簡便であって容易に発電機の製作限界の目安をつけることができる。図 1. に示した限界曲線は、これを図示したもので、現状をよく表していることが分かる。銅塊リムの場合は、最大周速を 170 m/s として限界曲線を求めた。

この限界曲線はあくまでも一般論であって、実際の計画に際しては、特に大容量機になるほど発電機の径方向及び軸方向の通風冷却の均一化を図るよう考慮しなければならない。リムダクトを利用した通風、回転子極間バリアの設置及びファンの風圧・風量の最適設計などが重要な課題である。図 2. は 320 MVA, 300 rpm 機の 1/5 縮尺モデルによる通風試験結果の一例を示す。この通風試験で、実機(奥

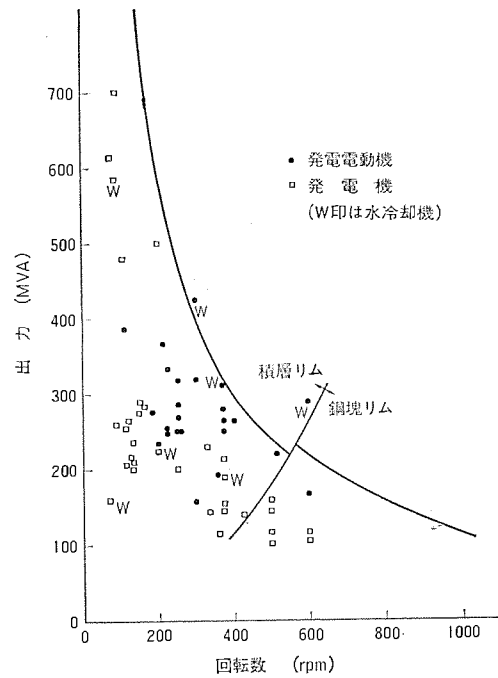


図 1. 発電機及び発電電動機の製作限界

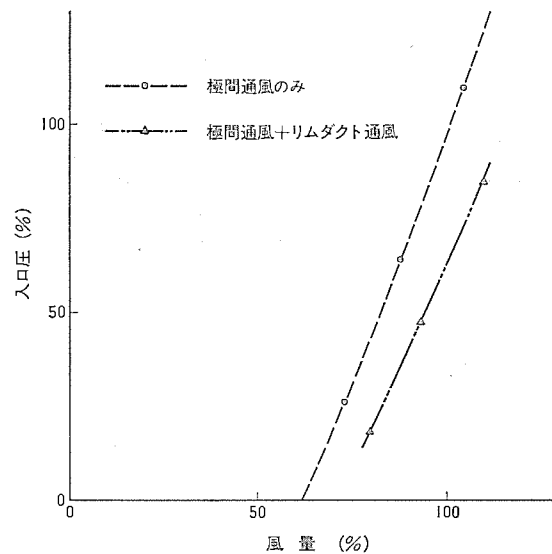


図 2. 総風量—風圧特性

多々良木 P/S 向け)の最適通風方式及び外部ファンの風圧・風量を選定した。

回転子周速の増大は、強度問題だけでなく振動・騒音及び摩擦損の増大をもたらす。発電電動機では、最大回転速度と定格速度が比較的に近接しているため、常規運転時の平均応力も高く、回転子各部の応力の均一化が重要である。軸トルクの伝達も、高速機になるほどスパイダース径が小さく軸方向に長いので注意を要する。しかし最大の問題は、300 MVA 級、400 rpm 以上の高速大容量機の振動抑制であろう。このクラスになると軸系剛性よりむしろ案内軸受、

表 1. 三菱大容量 水車発電機 及び発電電動機

納入先	発電所名	台数	容量 (kVA)	電圧 (kV)	回転数 (rpm)	周波数 (Hz)	形式	製作年	備考
東京電力	新高瀬川	2	367,000/320,000 kW	18	214	50	準かさ形	1978	発電電動機
関西電力	奥多々良木	2	320,000/314,000 kW	18	300	60	準かさ形	1974	発電電動機
※ブラジル	サンシモン	6	283,000	16.5	95	60	準かさ形	1976	分担製作
オーストラリア	チュマット-3	3	278,000/263,200	15.4	188	50	準かさ形	1969	
オーストラリア	チュマット-3	3	278,000/263,200	15.4	188	50	準かさ形	1970	発電電動機
※ベネズエラ	グ	3	264,500/230,000	18	120	60	準かさ形	1972	分担製作
カナダ	ジョーダンリバー	1	200,000/167,000	13.8	257	60	準かさ形	1971	
※ブラジル	サルトオソリオ	4	194,500/170,000	13.8	120	60	かさ形	1973	
※カナダ	サイトワン	4	184,000	13.8	67	60	かさ形	1977	
※ブラジル	イリヤソルテラ	2	170,000	14.4	86	60	かさ形	1972	共同設計
タイ	シリキット	3	158,500/132,000	13.8	125	50	かさ形	1972	
※関西電力	下小鳥	1	146,000	16.5	277	60	準かさ形	1972	
※アルゼンチン	フタレウフ	4	130,000/118,000	13.8	231	50	準かさ形	1973	
関西電力	木曾	1	125,000	16.5	257	60	準かさ形	1967	
台湾	下達見	4	115,000/100,000	13.8	360	60	立形	1967	
東京電力	安曇	2	111,000	15.4	200	50	準かさ形	1968	
電源開発	田子倉	4	105,000	13.2	167	50	かさ形	1958	
北海道電力	新冠	2	105,000/102,000 kW	13.2	231	50	準かさ形	1973	発電電動機
中部電力	高根第一	2	100,000/100,000 kW	13.2	277	60	準かさ形	1968	発電電動機

※：全台とも工場試験を省略して出荷した発電機を示す

及びその支持部の剛性が相対的に弱くなり、危険速度が使用範囲の速度に近接してくる。更に水車側から来る衝撃力も加算される。これに対処するためには高剛性案内軸受、及び建屋基礎と一体となった支持ブラケット等により 250～300 t/mm 程度の剛性を確保する必要がある。しかしながら、ある程度の軸振れ及び振動の増加はやむを得ないと思われる。

スラスト軸受の小形化は、ばく大な軸受発生損失の低減だけでなく、主軸寸法及びその重量低減をもたらす。輸送の可否が大容量機実現の重要なかぎであることは言うまでもないが、固定子及びブラケット類は分割構造とすることができるだけに、最大重量物となる主軸の重量低減は非常に効果的である。当社は後述のごとく、直接水冷スラスト軸受の技術を既に開発しており、この新技術で対処する所存である。

固定子コイルの耐熱性の向上は著しい。既報⁽²⁾のように、導体最高温度 200°C のヒートサイクル試験を実施し、F 種絶縁として十分使用に耐えることを確認している。近い将来大形機への F 種温度規格（最高コイル温度 140°C）の適用が実現するものと思われるが、同時に固定子鉄心の使用温度も上がるため、慎重な検討が必要である。すなわち鉄心のゆりみ及び波打ちの防止が重要である。波打ちの防止対策としては接着接心、鉄心に熱膨脹に見合った予圧を与える方法、鉄心の熱膨脹をできるだけ拘束しない構造上の工夫あるいは分割固定子の現地一体鉄心積みなどがある。

表 1. に当社で製作若しくは製作中の大容量発電機を示す。新高瀬川 367 MVA 機は、国内の最大容量記録品である。超大形機であるため、分割構造が数多く採用され、発電所でも回転子の分割つりが行われる。下小鳥 146 MVA 機は、工場回転試験省略の代表例である。国外向けの大容量機は、ほとんどが工場回転試験はない。工場回転試験省略は、品質保証体制の確立とあいまって経済性、納期短縮及び省エネルギーなどの観点から今後増加するものと思われる。共同設計及び分担製作は、超大形工事の負荷分担や各製作者の得意と

する技術の交換が可能などの利点があり、国外向けのものでは、今後も引き続き増加するものと思われる。

3. 水冷却発電機

上述したような高速大容量化に対処する画期的な方法は、水冷却発電機の採用である。当社では、既に昭和 37 年から水冷却発電機の開発を進め固定子コイル構造及び絶縁ホース等の部品開発、コイルの温度分布や通水抵抗などの基礎実験や長期機能試験並びに純水系統の確認試験等を実施してきた。この結果、固定子コイルの水冷却に関する技術的問題は解決され、現在 1,000 MW 級のタービン発電機を製作中である。

次いで昭和 45 年から回転子コイルの水冷却方式の開発を進め、純水導入装置や回転子用絶縁ホースなどの部品開発、素線のろう付や軸内水管のニール溶接などの各種工作技術の確立を図ってきた。これらの技術を集約して、昭和 49 年 3 月に 30,000 kVA 水冷却水車発

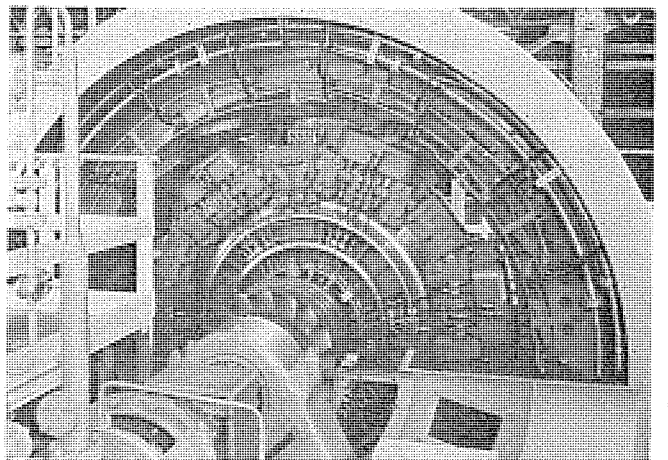


図 3. 試作機の外観

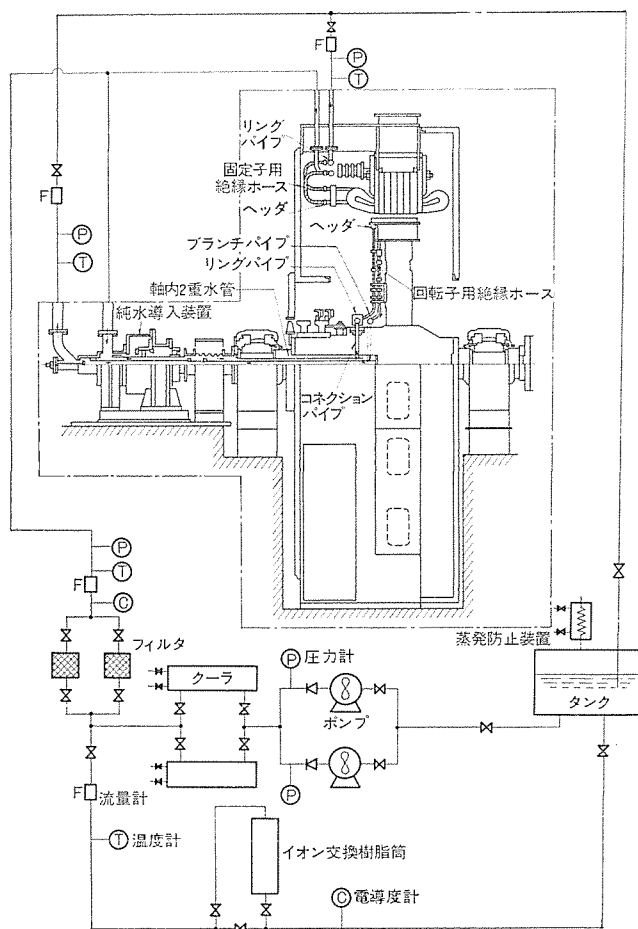


図 4. 試作機の構成と純水系統

電機を試作し公開した。図 3. は、その試作機の回転子及び固定子の外観写真、図 4. はその構成図である。以下試作機の構造及び試験結果について述べる。

3. 1 試作機の構造

試作機の仕様を表 2. に示す。回転子は、近い将来実現を期待される 400 MVA, 514 rpm の実機を想定した構造となっている。すなわち冷却水系統は、1 極あたり 2 並列回路として冷却効果を高め、大電流密度をとれるようにするとともに、熱応力も低くなるように

表 2. 試作機の概略仕様

出力 (kVA)	20,000
電圧 (kV)	18
回転数 定格/最大 (rpm)	810/1,290
外径 (mm)	2,800
周速 (m/s)	118/189
素線構成	2 列 × 6 段 - 24φ (15φ)
励磁電流 (A)	4,050
電流密度 (A/mm ²)	10.2
冷却水量 (l/min)	126
最大水圧 (kg/cm ²)	165
固定子内径 (mm)	3,700
鉄心長 (mm)	370
素線構成	5 ターン - 3 中空 / 6 中空
電流密度 (A/mm ²)	9.2
冷却水量 (l/min)	33
メカニカルシール (mmφ)	165

している。回転子は最大周速 189 m/s の遠心力に耐えるように考慮されている。その冷却水は図 4. において、純水導入装置より回転部に入り、主軸の中に設けられたステンレス製軸内 2 重水管の外管を経て、半径方向に出ているコネクションパイプを通り、主軸まわりのリングパイプで各極に分配されたあとブランチパイプ、絶縁ホース、ヘッドを通り回転子コイルに入る。温水は同様の回路を逆に通って、2 重管の内管を経て純水導入装置の排水口から排出される。

試作機の純水系統図は図 4. に示すとおりである。冷却水純度の確保は、バイパス回路に設けたイオン交換樹脂で行う。また、酸素濃度の調節は、この系統を大気開放形とし、特に純水中の溶存酸素量の調節は行っていない。純水の接する部分は、コイル素線及び絶縁ホースを除いて、すべて耐腐食性能に優れたステンレス製とした。ステンレス部分の相互接続は、TIG 溶接かテフロンパッキンを用いたフランジ結合方式としている。絶縁ホースとコイルヘッド及びステンレス管との接続は、すべてフleaナット方式である。

表 3. 開発試験及び試作機特性試験項目

(a) 開発試験項目

番号	試験項目
1	R コイルろう付試験 (1) 素線ろう付 (2) ヘッドろう付
2	曲げ加工試験
3	軸内水管シール溶接試験
4	回転子用絶縁ホース (1) 機械的特性 (2) 電気特性 (3) 腐食特性
5	メカニカルシール性能試験

(b) 試作機特性試験項目

番号	試験項目
1	圧力損失-流量特性 (1) 静止時 (2) 回転時 (コリオリの力) (3) 回転、通電時 (熱サイフォン効果)
2	鉄損、銅損ヒートラン (温度上昇値、温度分布、熱時定数) (1) 水冷運転時 (2) 空冷運転時
3	機械強度 (1) 定格速度時、機械応力、熱応力及び変位 (2) 無拘束速度時耐遠心強度
4	純水導入装置 (1) シール性能 (2) 摩耗カーボン粉の捕捉
5	振動、軸振 (1) 定格速度時 (2) 定格速度、水量急変時
6	絶縁抵抗 (1) 充水前後 (2) 排水後 (3) 乾燥後

番号	試験項目
7	絶縁耐力 (1) 通水時 (2) 排水時
8	漏れ (1) 回転子単体 (2) 固定子単体
9	充水、フラッシング
10	排水、乾燥 (1) 空気法 (2) N ₂ 法
11	耐水圧 (1) ロータコイル配管 (2) ステータ全体
12	冷却水純度 (1) 純度低下速度 (2) 純度回復速度
13	冷却水急停止 (1) 1 次冷却水シャ断 (2) 2 次冷却水シャ断
14	負荷変動

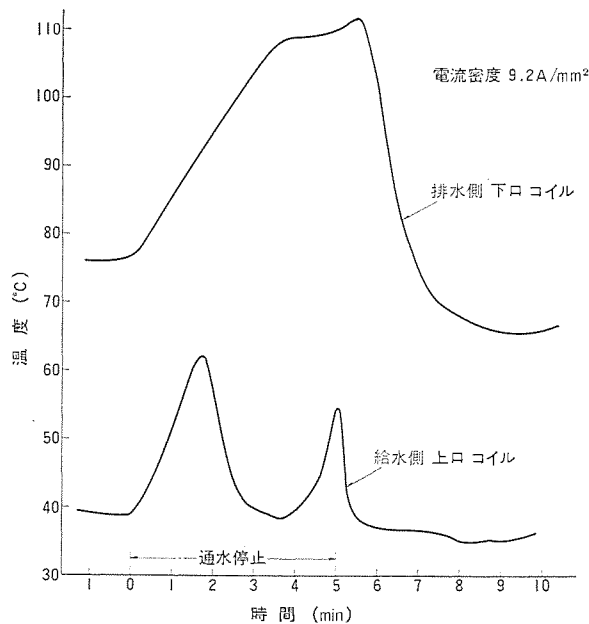


図 5. 1 次冷却水しゃ断の場合の固定子コイルの温度変化

3.2 試作機の試験結果

この試作機を製作するにあたって行った開発試験及びこの試作機について行った特性試験の項目を表 3. に示す。固定子コイルの冷却水通水特性及び温度分布のデータは、既に報告されたもの⁽³⁾と類似であるので省略し、以下特記事項について報告する。

(1) 回転子用絶縁ホースの電気的及び機械的強度

回転子用絶縁ホースは、内径 12.7 mm のテフロン製で絶縁部の長さは 100 mm、商用周波沿面内絡電圧は 40 kV rms 以上である(純度 0.5 ~ 1 $\mu\text{S}/\text{cm}$ の純水通水状態において)。また単純引張り強度は温度 90°C においても 500 kg、伸び 70% と柔軟性に富んでおり、内圧破壊強度も 400 kg/cm² 以上と優れた強度を有している。0 ~ 200 kg/cm² の内圧繰り返し試験を 1 万回以上実施したが、漏水などの問題は全くなく、400 MW 級実機で想定される使用条件に十分な余裕をもっていることを確認した。

(2) 純水導入装置用メカニカルシール

純水導入装置は、主として超鋼(回転側)と特殊カーボン(固定側)の組合せのメカニカルシールからなる。そのシール性能を保持するため、回転部を複数個の玉軸受で保持し、メカニカルシールの回転部と固定部の相対変位をできるだけ小さくするように考慮されている。この装置は試作機に先行して製作され、シール水圧、回転数、振れの影響などに関する試験を行った。その結果シール性能及び寿命などについて、実機適用に対する有用な知見を得ることができた。

(3) 1 次冷却水しゃ断試験

水冷却方式の採用に当たっては、1 次冷却水(純水)しゃ断すなわち純水循環ポンプ停止によりどのような現象が生ずるかを知らしておく必要がある。図 5. は、1 次冷却水断の場合の固定子コイルの温度変化を示す。この場合の温度上昇は、その部分の純水を含めた等価熱容量と発生損失とから概略推定することができ、実機においてのポンプ停止許容時間を定めることができる。またポンプを始動して再通水を行うと水圧、流量などにサージング現象が現れる。これらから警報接点の設定などに必要な諸データを得ることができた。

(4) 純水純度劣化回復試験

イオン交換樹脂筒へのバイパス回路を閉じておき、純水純度が低下してきた時バイパス回路を生かして、どう純度が回復するかを調べた。

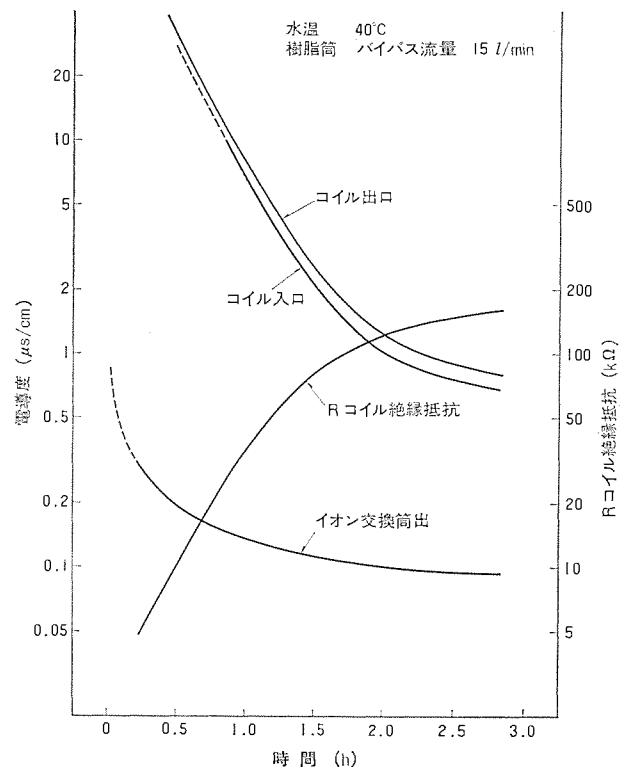


図 6. 純度回復試験結果の一例

試験結果の一例を図 6. に示す。これらの結果は、イオン発生量とイオン交換筒のイオン処理能力とから推定した状況とほぼ一致することを確認した。

3.3 14,000 kVA 実機製作

当社では、中部電力(株)より 14,000 kVA 水冷却(専用)水車発電機を受注し、現在鋭意製作中である。万全を期するため、純水導入装置及び純水装置は本体に先行して製作し、長期間の無人運転を実施した。先に述べたとおり 400 MVA 級の実機を想定した試作試験と、14,000 kVA 実機の製作・据付及び運転経験の蓄積により、発電機の画期的な高速大容量化に十分対処し得る体制を築きつつある。

4. スラスト軸受

スラスト軸受の技術は、高速大容量発電電動機における大きな問題である。当社はこれまでスラスト軸受の理論的研究⁽⁴⁾を進めるとともに、200 MW 級以上の大容量機を想定し昭和 41 年、3,000 トンスラスト軸受試験装置を製作、研究試験を実施した。これを第 1 次研究試験と称して結果の一部を発表⁽⁵⁾し、その成果を高根第一 P/S 及びテュマット-3 P/S 向け発電機に適用し、好成績をおさめた。しかるに当時の傾向は大容量化が主で、軸受外周速度は若干ふえる程度であったが、その後国内の揚水発電計画が急速に高落差化するにつれ、スラスト軸受の負荷条件も高速高荷重化し飛躍的に(苛)酷なものとなった。スラスト軸受の技術的難度を示す指標として、軸受平均圧力: p_m (kg/cm²)、軸受外周速度: v_0 (m/s)、 $p_m \times v_0$ 、 v_0/p_m などを用いる。図 7. に当社が製作、製作中及び計画の軸受の指標を示す。高速大容量化に伴う問題としては、軸受パッドの巨大化のうえに高速化による摩擦損の激増、油膜温度上昇、軸受パッド表裏の温度差(以下温度こう勾配と称す)の増大、油そう(槽)内の油流並びに気泡発生・混入の問題などがある。このような高速高荷重スラスト軸受の作動特性を、油膜の温度上昇のみ採りあげて第 1 次研究試験結果から外そう(挿)推定しても、従来の設計法では軸受としての成立が極

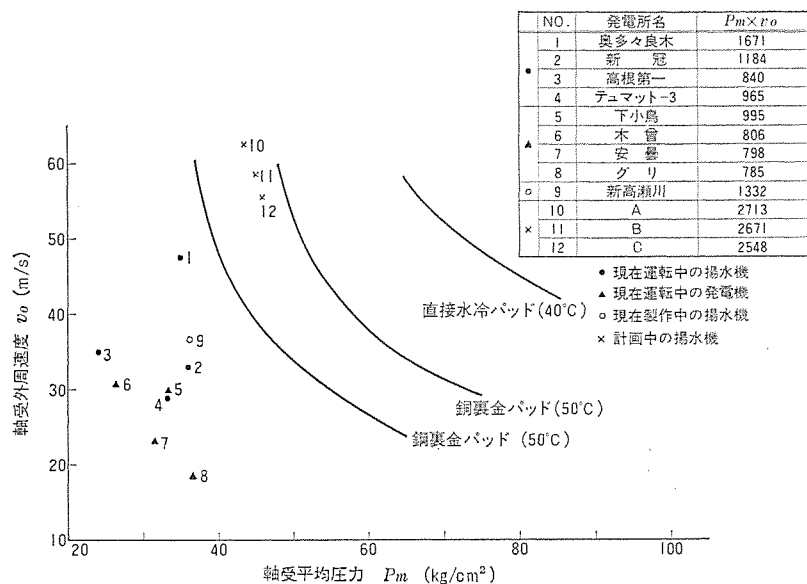


図 7. 軸受表面 最高温度 等温上昇線図 及び当社製軸受の $P_m \times V_o$ 値

- } 工場試験時の軸受表面最高温度上昇値
(オイルリフトの連続運転なしの場合)
- △ } 工場試験時の軸受表面最高温度上昇値
(オイルリフトの連続運転ありの場合)
- } 現地試験時の軸受表面最高温度上昇値(発電運転時)
- } 同 上 (揚水運転時)

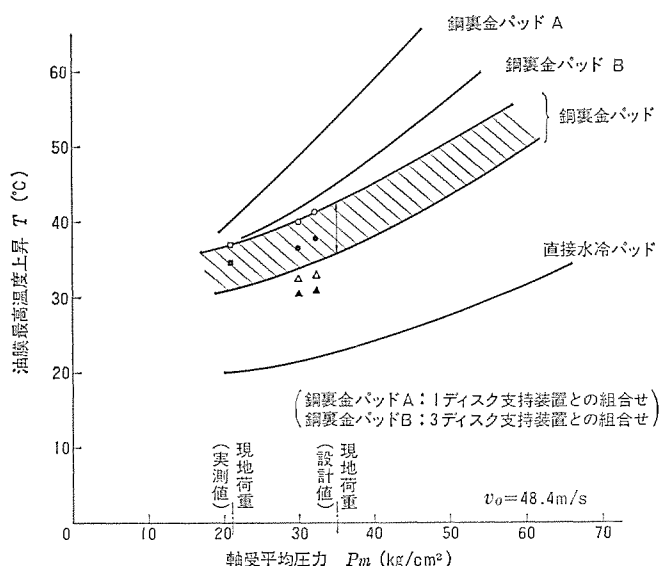


図 8. 油膜最高温度上昇値

めて困難という結論に達した。前述の報告⁽⁵⁾で、軸受パッドの弾性変形を今後の課題として採りあげたが、両方向に回転する発電電動機のティルティングパッドスラスト軸受では、油膜圧力の合成重心を回転方向の中央に来るよう設計しなければならない。このようなセンタビポット方式の軸受性能を決定する最大の因子は、軸受パッドの表面形状で、これは油膜圧力分布、温度こう配分布及び支持装置からの反力分布で決まる。当社では、か酷化した負荷条件に対し信頼性あるスラスト軸受を製作するため、言い換えれば軸受パッドの表面形状をより理想的なものに近づけるため、理論面で軸受パッドの弾性変形解析に有限要素法を導入し、温度こう配は握のための伝熱の検討も加えた。実験面では種々の軸受パッド、支持方式による高速高荷重スラスト軸受の研究試験を実施した(第2次研究試験)。この第2次研究試験では、更に直接水冷式スラスト軸受の開発と負荷限界の確認試

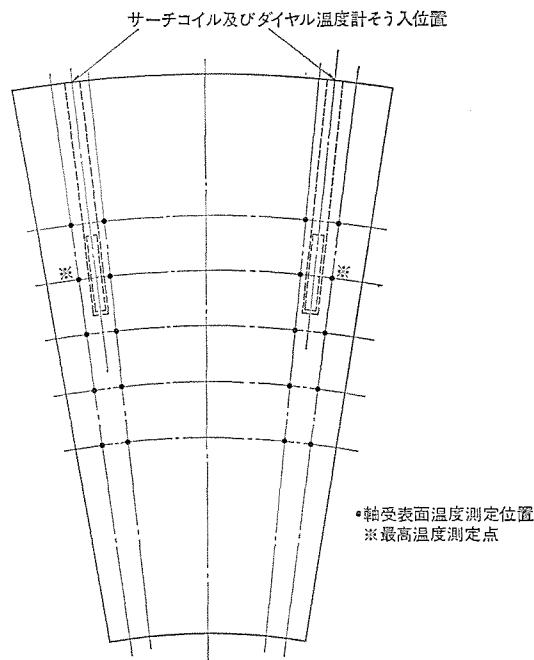


図 9. 奥多々良木軸受温度測定位置

験も行った。また相前後して、プラスチックモデルや実機を利用して、スラストランのポンプ作用による油冷却器に対する自己循環方式の試験や、油そう内油流の観察なども行った。

この第2次研究試験の成果を、実機に適用した例を次に示す。

(1) 新冠 105 MVA 発電電動機

スラスト荷重 1,040 トン、 $p_m=36.0 \text{ kg/cm}^2$ 、 $v_o=32.9 \text{ m/s}$ (図 7. 参照)、軸受パッド回転方向平均長/同半径方向長 $=0.965 \approx 1$ であるので 1-ディスク支持方式とした⁽⁶⁾。設計予想軸受温度は 60°C (冷却水温 20°C) に対し、実機は 54°C (冷却水温 13°C) である。

(2) 奥多々良木 320 MVA 発電電動機

スラスト荷重 1,538 トン、 $p_m=35.1 \text{ kg/cm}^2$ 、 $v_o=47.6 \text{ m/s}$ である。この値は図 7. から明らかなように、従来のものに比べかなりか酷化していることが分かる。これに対処するため、第2次研究試験で開発した比較的薄い銅裏金と比較的厚い銅台金より成る銅板パッド(特許出願中)を採用し、これと 3-ディスク支持装置を組合せた。

4. 1 銅板パッドスラスト軸受

図 8. に奥多々良木機の v_o に非常に近い値で p_m を変化させて行った第2次研究試験の軸受油膜最高温度上昇値(T)を示す。銅裏金パッドは 1 ディスク及び 3 ディスク支持装置との組合せである。銅板パッドは試験パッドの理論的検討の結果 1 ディスク支持装置でも良好な弾性変形が得られることがわかったので、1 ディスク支持装置と組合せた。図 8. より銅板パッドが $T \sim p_m$ 特性、とりわけ dT/dp_m において優れていることが分かる。また直接水冷式は、上記二者よりはるかに優れることも分かる。上記結果から、奥多々良木機的设计値は図中に矢印で示した範囲とした。なお図 8. は、油そう内油温を 40°C 一定で試験したものである。奥多々良木機の工場試験では、上記設計の確認のため軸受パッドを部分的にダミーにし、実際に近い p_m で行った。この工場試験では、2 枚の軸受パッドに図 9. に示すとおり表面油膜温度計測用のサーモカップルを入れ、2 種の p_m で油温を 40°C にして実施した。その結果を図 8. の中に記した。これにより設計スラスト荷重に対する実機的设计 T が再現されたと言える。つぎに実機の現地試験結果について述べる。水スラストの実測は発

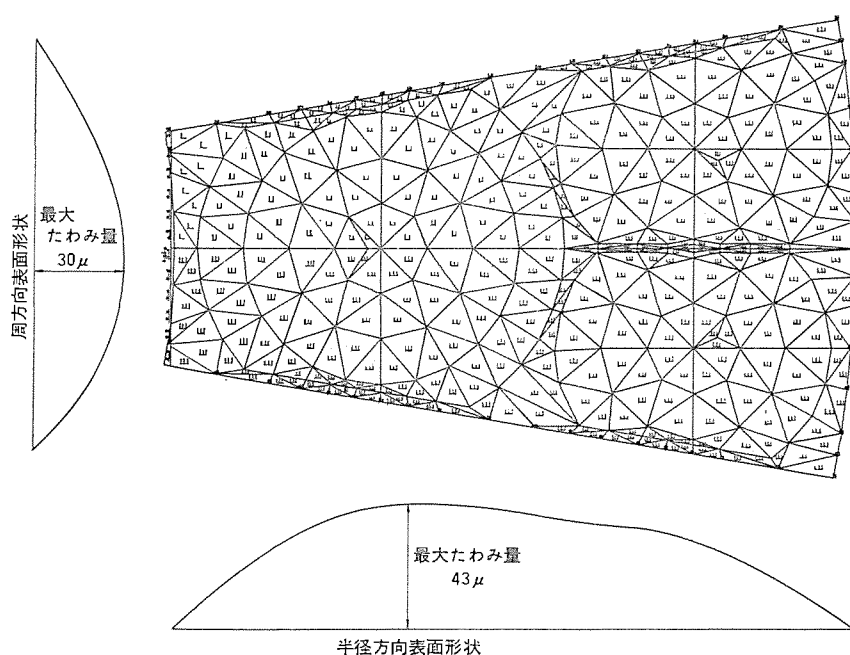


図 10. 奥多々良木 パッド要素分割図及びパッド表面形状

電、揚水負荷でそれぞれ 50, 80 トンと設計値よりかなり小さい。これらに対する p_m はそれぞれ 21.0, 21.6 kg/cm² となる。発電運転で冷却水温 6°C で最高軸受温度は 56.5°C, 揚水運転でも冷却水温 6°C で 54°C とほぼ同様の性能を示した。これを冷却水温 25°C, 油温 40°C として換算し, かつ軸受温度計と軸受表面最高値との差が研究試験より 5~6°C であること, 工場試験でオイルリフトの有無の差が 6°C あること (図 8. 参照) などすべて考慮すると, 現地実測は図 8. の中に示した範囲になりこれも研究試験の結果を再現し得ていることが分かる。特に銅板パッドの特長は dT/dp_m の低い点にあり, 今後水スラストが経年変化などで設計値にまで増すことがあっても, それによる温度変化は 5°C 程度であり, 銅板パッドが高速高荷重スラスト軸受にいかに適しているかが分かる。

なお軸受の温度低下を目的としたオイルリフトの常時運転は好ましいものでなく, 奥多々良木機では従来どおり始動停止時のみ使用という設計になっている。

図 10. に奥多々良木機の軸受パッドと周方向, 径方向の表面形状を示す。また油の冷却はセルフポンプ方式を採用した。図 11. にその試験結果を示す。セルフポンプには使用回転数とラン径により適・不適があり, ラン径外周速度が高いとポンプ穴中の流速が過大になり, キャビテーションが生じる。当社では, この問題に対しポンプ穴中に絞りを設けること (特許出願中) で, 奥多々良木機の過速度以上でもまだ吐出量が増し得るようにした。

4.2 直接水冷スラスト軸受

現在図 7. に示したような負荷条件になるものが計画されている。直接水冷スラスト軸受は, 油膜温度上昇を低くすることによる信頼性

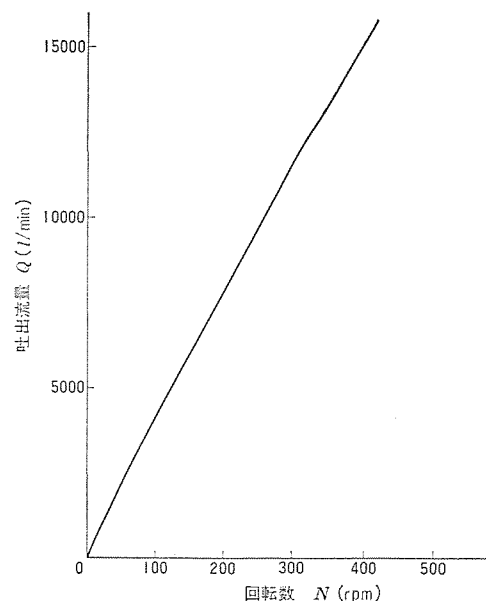


図 11. 奥多々良木 自己循環ポンプ Q-N 曲線

向上, 軸受及び軸受まわりの小形化による工作精度の向上, 輸送据付の容易化, 軸受損失の低減など多くの利点をもつのでその採用を考えねばならない。図 7. に示すように, 直接水冷式では他の二者より温度上昇を 10°C 低く採ってもまだはるかに 酷な負荷条件に適用できる。ただ問題として軸受パッド冷却水断が考えられるが, 図 7. に示す計画機の負荷条件は銅板パッドの 50°C の曲線の近傍にあり, 構造上直接水冷式は断水時銅板パッド式と同等になるので十分軸受として成立する。今後は, このような設計条件の直接水冷式スラスト軸受の適用が続くものと思われる。

5. む す び

空気冷却式発電機の製作限界は, 日進月歩で拡大されつつある。特に国内では, 発電電動機の高速度大容量化が急速に進められており, 300 MVA 級 400 rpm 以上の記録品が計画されつつある。我々は, 国内及び国外を通して大容量機の製作実績を着実に伸ばし, 技術力の向上に努めてきた。今後とも電力会社など関係各位のご指導を得て, 経済性の追求と技術力の向上に努力を傾けたいと願っている。

参 考 文 献

- (1) 三浦ほか：三菱電機技報, 40, No. 11, 1680 (昭 41)
- (2) 柴山ほか：三菱電機技報, 48, No. 3, 291 (昭 49)
- (3) 原ほか：三菱電機技報, 43, No. 4, 563 (昭 44)
- (4) 山本：三菱電機技報, 41, No. 2, 380 (昭 42)
- (5) 田附ほか：三菱電機技報, 43, No. 9, 1223 (昭 44)

最近の水力発電所制御装置

山本潤二*・林 重雄**・横田 浩*・合田啓治*

1. ま え が き

水力発電所の自動化の歴史は古く、ガバ、AVR、運転制御装置など、初期の機械式から電気式へ、更に半導体を応用した半永久的電子式へと制御装置の発展にはめざましいものがある。本稿では各種制御装置のうち、特に最新の特徴ある装置をとりあげて紹介する。

2. サイリスタ励磁装置

水力発電所用同期発電機の励磁装置として、数年前にサイリスタ励磁装置が採用されて以来、従来の回転励磁機に代わって今日ではほとんどこの方式が用いられるようになった。当社も既に約50セットのサイリスタ励磁装置を納入しており、この装置の概要については既に本誌⁽¹⁾⁽²⁾で紹介されている。特にこの装置の特徴である高速応性、メンテナンスフリー、及び経済性については十分に認識されている。また最近たびたび採用が要求される系統安定化装置(Power System Stabilizer, 以下PSSと呼ぶ)は、今日のように大容量揚水機の出現、あるいは長距離送電線の建設に伴った系統インピーダンスの増加による動態安定度の減少、あるいはサイリスタ励磁装置の高速応性によってかえって失なわれた系統ダンピング等を十分補償するよう検討されている。当社も既に十数台のPSSを納入し、系統安定化のために極めて効果的であることが実証された。

サイリスタ励磁装置の種類として混合ブリッジ方式と均一ブリッジ方式があることは周知のことであるが、当社では多岐にわたる水車発電機特性、系統条件、付加機能装置等の要求を満足し得る標準化系列を完成している。

2.1 回路方式

図1に概略ブロック図を示す。励磁用変圧器は発電機端に接続される。サイリスタブリッジのAC側はセリアレスタ及びサージアブソーバがそう(挿)入され、発電機側からのサージ侵入に対してサイリスタを保護する。またDC側にはバリスタ及びサージアブソーバがそう入され、線間短絡時など界磁回路への異常電流を吸収する。制御電源は初期励磁用及び故障表示回路を除いてすべて励磁用変圧器より供給される。付属装置としては低励磁制限装置(MEL)、過励磁制限装置(OEL)、横流補償器(CCC)、線路電圧降下補償器(LDC)、界磁追従装置、自動無効電力調整装置(AQR)、自動力率調整装置(APFR)、ジョイントバル調整装置などが容易に付加できる。界磁シャ断器は特に揚水機では操作ひん度が大きくなり寿命を短くするので、事故停止以外には動作させず、急速減磁はサイリスタをマイナスフォーシングさせることにより行うようシーケンスを考慮している。

2.2 構造

キュービクル配列は図2に示すようにAVR盤、サイリスタ盤、サージアブソーバ盤、界磁シャ断器盤より構成されている。サイリスタ盤は電流容量により面数が増減し、盤上部に冷却ファンが常用、予備の2個が取付けられている。サイリスタは図3に示すようにトレイ構造となっ

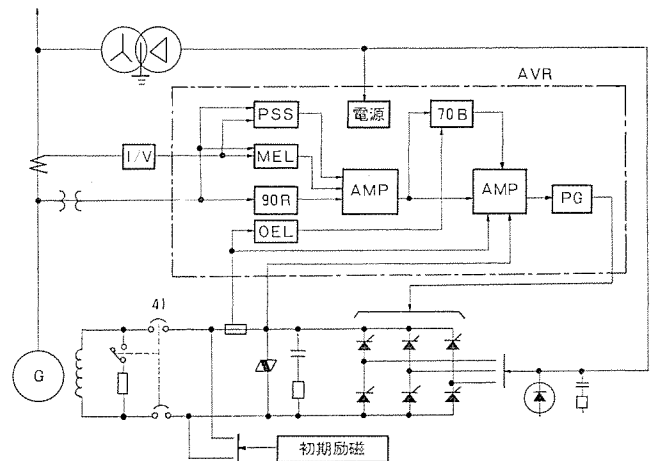


図1. サイリスタ励磁装置ブロック図

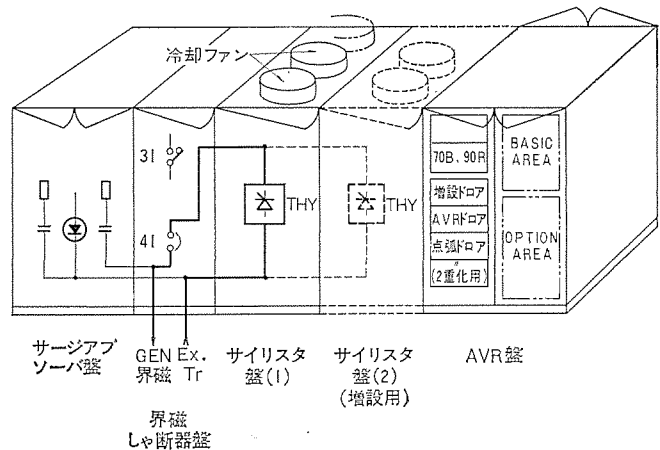


図2. サイリスタ励磁装置キュービクル

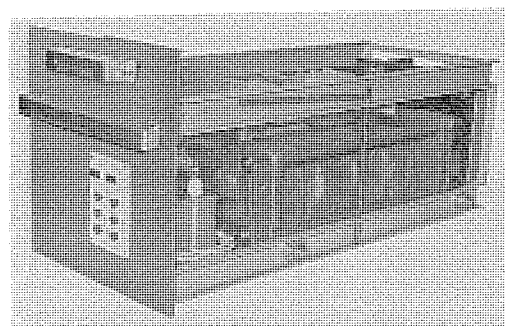


図3. サイリスタトレイ

ており、メンテナンスが容易である。トレイの中にはサイリスタ素子2個とともにゲートパルス変圧器及び過電圧保護用C-R回路を収納し、前面にはチェック端子を設けて各種測定が容易にできる。サイリスタ素子は現在逆耐圧4,000Vのものまで製作されており、励磁用としてはほとんどすべて直列枚数1個でブリッジが構成されている。

2.3 特性

励磁装置の特性は一般に負荷しゃ断試験及び無負荷過渡応答試験により確かめられる。図4. に関西電力(株)奥多々良木発電所納入の励磁系の無負荷過渡応答試験のオシログラムを示す。均一ブリッジ方式ではマイナスフォーシング電圧を発生することができるので負荷しゃ断時の発電機端子電圧上昇(ΔV)は水車の速度上昇の影響をほとんど受けず、ほぼアマチュアリアクションによる瞬時立上がり電圧までしか上昇しない。

2.4 電力系統安定化装置(PSS)

近年発電機容量の増大に伴う短絡比の減少、送電系統の長距離化により電力系統の安定度が低下する傾向にある。その対策の一つとして速応度の高い励磁制御装置が用いられている。速応度の高い励磁装置は、同期化トルクを強めるが制動トルクは逆に減少させ電力動揺の減衰を弱める結果となる。この負制動効果を補償し、総合的に安定度を増大させるためにPSSが用いられる。PSSは励磁装置に補助信号として発電機の軸速度、周波数、電力などを加えることにより制動トルクを強める効果を有している。

図5. は北海道電力(株)新冠発電所に納入したPSSの効果を示す現地試験オシログラムである。1号、2号ユニットとも50MW、0MVARで発電運転し、3回線にて送電している状態から、1回線をしゃ断した時のパワースイング状況を、PSS除外及び使用の場合についてそれぞれ試験したものである。これからもPSS効果が十分うかがえる。

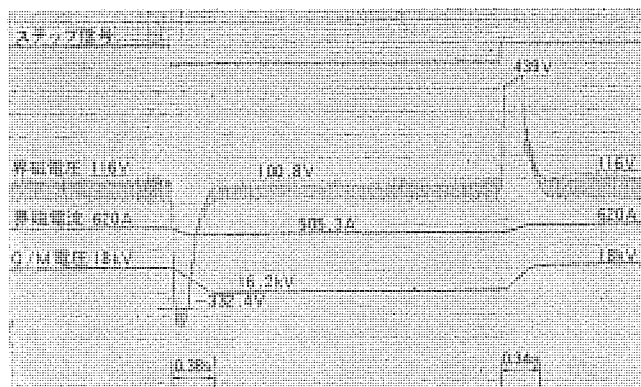


図4. 関西電力(株)奥多々良木発電所 励磁系過渡応答試験オシログラム

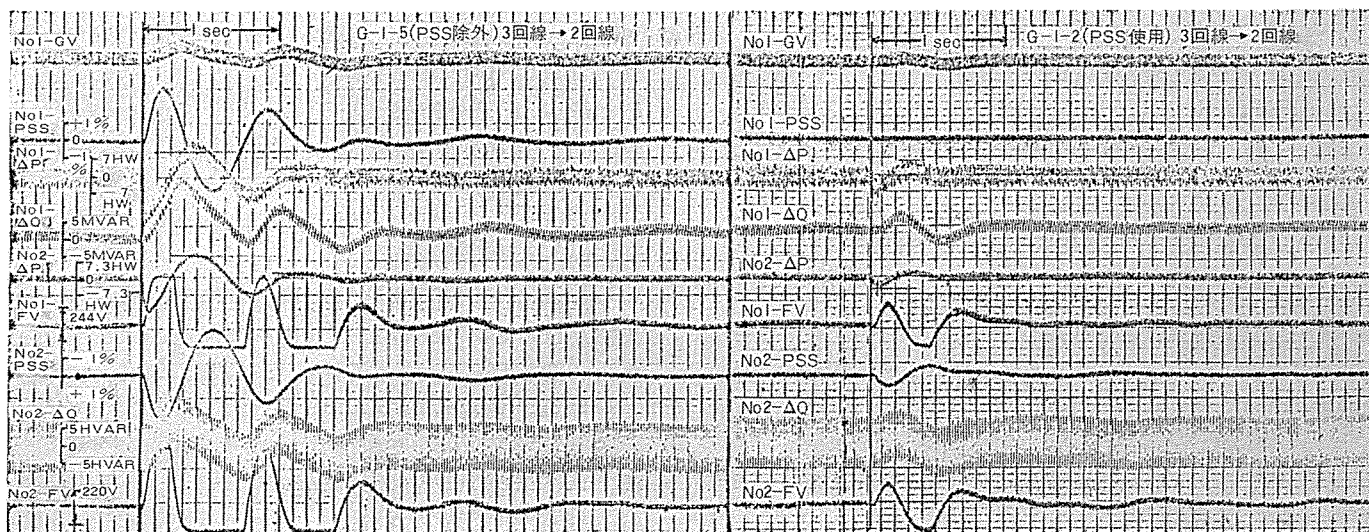


図5. 系統安定化に対する応答比較

3. 電気ブレーキ

周知のとおり電気ブレーキは発電機回路を短絡し、定格電流程度の短絡電流を流して I^2R ロスにより発電機に制動をかける方式である。最近のように大容量高揚程揚水発電所となると、発電電動機も高速大容量となり、回転部のもつ回転エネルギーも大きく、したがって機械的ブレーキでは熱的制約もあって停止時間が長くなるばかりでなくブレーキシューの摩耗も大となるため保守も大変である。そこで通常的主機停止は電気ブレーキにより行い、機械的ブレーキは緊急の場合だけに使用するという考え方がクローズアップしてきた。もちろん、発電機自体の電気的事故、電気ブレーキ用交流電源の喪失時にも発電機が停止できるように従来の機械的ブレーキを備えておく必要はある。当社はいち早く昭和43年、オーストラリア テュムットー3発電所向け6×278MVA揚水発電電動機に電気ブレーキ装置を製作、納入し好調に運転を継続しており、引続き東京電力(株)新高瀬川発電所向け2×367MVA用として製作中である。

3.1 理論

一般に回転体のもつエネルギー平衡式は次式となる。

$$\frac{1}{2}I\omega^2 = \frac{1}{2}I\omega_0^2 - \int P dt \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで I : 慣性モーメント

ω : 角速度

ω_0 : 初期角速度

P : 各種損失(機械損、鉄損、銅損)

式(1)の両辺を t で微分すると

$$I\omega \frac{d\omega}{dt} = -P \quad \dots\dots\dots (2)$$

式(2) $GD^2(\text{kg-m}^2)$, $n(\text{P.U.})$ を使って変換すると

$$\frac{GD^2}{4} \left(\frac{\pi}{30} \right)^2 n_0^2 n \frac{dn}{dt} = -P \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで n_0 : 定格回転数(rpm)

一方、短絡電流は

$$i = \frac{SE}{\sqrt{r_a^2 + (sx_d)^2}} \div \frac{E}{x_d} \quad \dots\dots\dots (4)$$

式(4)の電流が定格電流程度となるような界磁電流を与え鉄損、銅損を発生させる。減速特性は式(3)を解くことにより得られる。

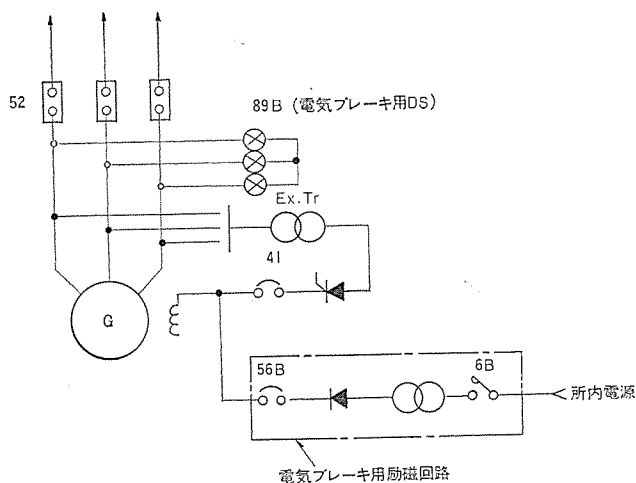


図6. 電気ブレーキ回路図

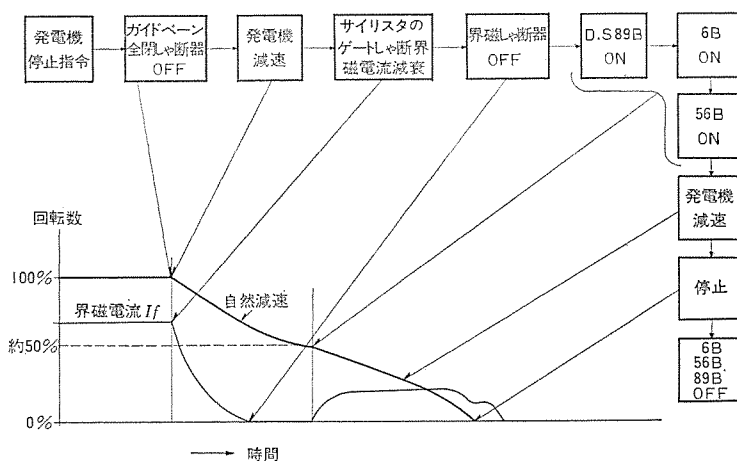


図7. 発電機減速カーブ概要図

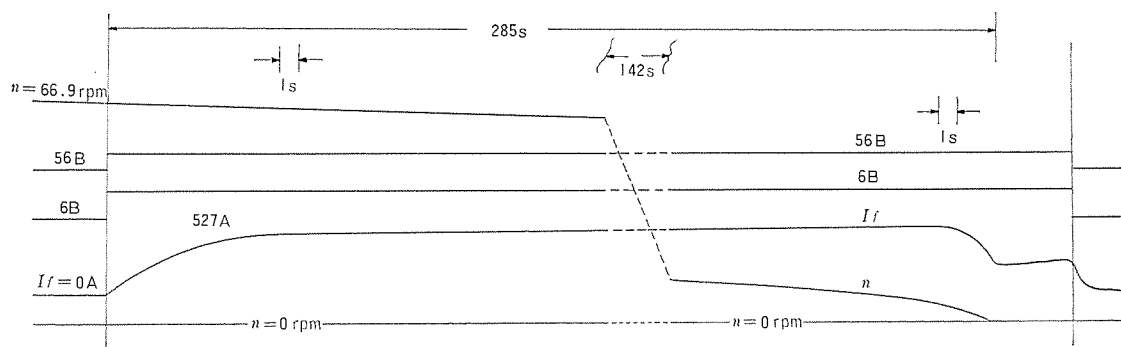


図8. 電気ブレーキの実測オシログラム

3.2 回路及び制御方式

図6. に電気ブレーキの回路図、図7. にシーケンスの概要を示す。

3.3 実測試験

図8. に電気ブレーキの実測を示す。これを同一機に取付けた従来と同程度の機械的ブレーキにより停止してみると、33 rpmから停止まで約290秒かかる。これからも分かるように機械的ブレーキよりも電気ブレーキのほうがはるかに制動効果が大であることが分かる。特に低速回転時における効果は大きい。最後に要約すれば電気ブレーキの特長は機械的ブレーキと比較して次の利点がある。

(1) 保守が容易である。

ブレーキシューの摩耗粉の飛散がない。したがって清掃点検の必要がない。ブレーキシューの取替えが不必要である。

(2) 制動トルクが大である。

制動トルクが大であるため減速も早い。機械的ブレーキの場合はブレーキリング表面の過熱で制限される。電気ブレーキではコイル及び低抗体に均一に発熱が起るので局部過熱の心配がない。したがってブレーキトルクも大きくとれる。

4. PID ガバナ

当社では電気式ガバナとしてTEA-4形B級ガバナとTEA-3形A級ガバナを多数納入し、多くの実績を有している。このTEA-3形は微分要素 (Delivative) と積分要素 (Integral) を追加すれば容易にPIDガバナに改良することができる。TEA-3形の速応性・安定性・保守・調整の容易さをベースに更にPIDガバナとしての性能アップを計った。特に最近、輸出向け電気ガバナとしてPIDガバナの要求が増えてきた。

TEA-3形ガバナをカナダブリティッシュ・コロンビア電力GMS発電所

4×232 MWへ1962年納入したが大きな系統事故があり、系統に大きな動揺を生じ、単独系統を維持できずトリップした。このTEA-3形をPIDガバナに改良し、現在は順調に運転されており、これが三菱PIDガバナの第1号機となった。続いて50年3月カナダブリティッシュ・コロンビア電力。クーテネイカナル発電所4×127.5 MW向けにPIDガバナを開発し⁽⁵⁾、順調に工場試験を終了して出荷し現在据付中で、50年秋には運転開始の予定である。更にフィリピンパンタバン発電所2×51.5 MW向けPIDガバナを受注し、現在製作中である。これらのPIDガバナの開発・製作に当たっては多くの実績を有するTEA-3形をベースに、デジタルシミュレーションプログラムやハイブリッドコンピュータによるシミュレーションを行うとともに、モデル水車発電機とPIDガバナの実機との工場組合せテストなどを行い、性能・信頼性を確認している。その後もPIDガバナの開発・研究・標準化を進めているが、以下三菱PIDガバナの概要を説明する。

4.1 PIDガバナの必要性

PIDガバナの必要性を大別すると次のようになる。

(1) 単独系統時の速応性、安定性

(2) 系統に占める割合の大きい大容量水力及び揚水発電所の要求負荷に対する速応追従性

(1)は水力又は揚水発電所が部分負荷を持ったまま単独系統になった場合、その単独系統の周波数を維持するための速応性、安定性である。従来のP形又はPI形ガバナ（ダッシュポット形又は弾性復元形PIとも呼ばれ、従来の一般的なものはすべてこの形式である）では単独系統が維持できなかったが、PID形ガバナの導入により順調に運転している例として、先に記したカナダGMS発電所の例がある。

(2)の実例としては、U. S. A. グランド・クーリ発電所のごとく単機容量が600 MWという大容量機になると、電力系統への影響も大き

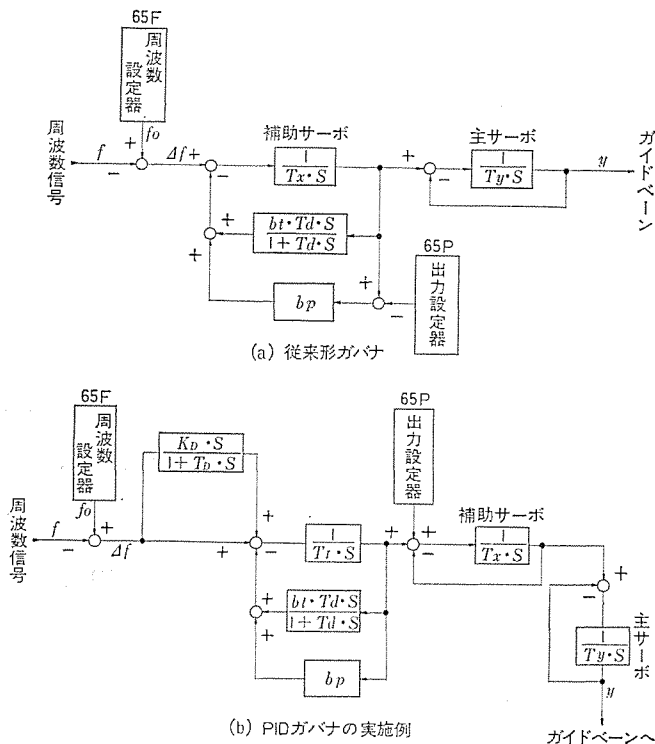


図 9. ガバナのブロック図

くなり PID ガバナを適用している⁽⁴⁾。火力、原子力では負荷の急激な変動は、機器に与える熱応力などの面より制限される。系統要求に速応させるために、大容量水力機のカバナに要求負荷に対する速応追従性が要求されてくる。国内においては、特に今後の大容量揚水機にこれらの要求が出てくるものと思われる。

4.2 回路方式

回路方式をブロック図により説明する。図 9. (a) は従来形ガバナのブロック図、(b) は PID ガバナの一実施例を示すブロック図である。図中の記号は次のとおりである。

- T_x : 補助サーボ積分時間
- b_p : 速度垂下率
- b_t : 弾性復元利得
- T_d : 弾性復元時定数
- T_y : 主サーボ積分時間
- K_D : 微分利得
- T_D : 近似微分時定数
- T_I : 積分時定数
- S : プラス演算子
- y : 主サーボストローク

従来形ガバナに比べ、この PID ガバナの主な特徴は次のとおりである。

- (1) 微分要素を付加し速応性を高めた。
- (2) 出力設定器 (65 P) の信号を補助サーボモータの直前に入れて要求負荷に対する速応追従性を計った。
- (3) 負荷調整部分と周波数調整部分を分離独立させて直列接続させ保守・調整の便を計った。
- (4) 積分器過出力状態において、積分器に逆信号が入っても積分器出力が補助サーボの値以下になるまで補助サーボは応答しない。これを防ぐため補助サーボと積分器の飽和値を一致させる補正回路を付加した。
- (5) 周波数検出装置は十分な直線性をもつようにし、負荷しゃ断

時や無拘束速度時のごとき過速度時にも D 効果に悪影響を与えないようリニアな特性を持たせた。

(6) 従来の PI ガバナでは弾性復元回路にリミッタを入れ、負荷しゃ断時の腰折特性を防止していたが、従来のものはリミッタを入れると弾性復元の効果を打消し弱めることになり、弾性復元の利得、時定数を大きくすると応答が遅れるためこのリミッタの調整に悩まされたが、 D 要素を入れることによりこのリミッタが不要である。

(7) ガバナの制御部分はすべて電氣的に構成した。

(8) 従来形ガバナのすべての機能、例えばダンピングの切換え (単独系統では速応性より安定性能を重視して弾性復元量を大きくする) 等を持たせた。

(9) 従来形の A 級性能を $-10 \sim +50^\circ\text{C}$ にて完全に保証し、かつ上記 PID 機能を持つ。

積分要素を入れるのは定常偏差をなくすためで、周波数偏差の積分修正はもとより装置の温度変化や機械部分の非線形特性等によるドリフトの修正も行う。

図 7. の PID ガバナ伝達関数は次のとおりになる。

$$G(S) = \underbrace{\frac{1}{b_t} \left[1 + \frac{K_D}{T_d} \right]}_P + \underbrace{\frac{1}{S b_t T_d}}_I + \underbrace{S \cdot \frac{K_D}{b_t}}_D$$

これに対し従来形の図 6. は次のごとく示される。

$$G(S) = \underbrace{\frac{1}{b_t}}_P + \underbrace{\frac{1}{b_t T_d S}}_I$$

4.3 特性

従来のダッシュポット形や弾性復元形 PI ガバナでは、要求負荷に対する追従時間は一般に下式で与えられる。

$$T_L \approx \frac{b_t \cdot T_d}{b_p}$$

- ここで T_L : 追従時間
- b_p : 永久速度調定率
- b_t : 弾性復元利得
- T_d : 弾性復元時定数

仮に $b_p = 3\%$, $b_t = 9\%$, $T_d = 50\%$ とすると $T_L = 150$ 秒となり、 b_t , T_d が大であれば安定であるが追従性が悪いことが分かる。65 P の設置位置と D 要素の追加により、 T_L を 30 秒前後まで短縮することが可能である。次に速応性、安定性であるが、 D 要素を追加することにより応答が早くなる。PID のおのおのの利得は水路条件、系統特性により設定されることは従来と同一である。図 6., 図 7. で示されるガバナを管路-水車-発電機系を含む制御対象系に入れ、一巡する制御系を構成し、これをハイブリッド計算機に入れ、シミュレーションした。図 10. (a)(b)(c) にこのシミュレーション結果を示す。(a) は PID ガバナのシミュレーション結果である。(b)(c) は従来形ガバナのシミュレーション結果である。各場合とも負荷を 10% ステップ状に、0 から 10% へと急変させた場合の応答結果である。 ω は系の周波数変化であり、 Y_y は主サーボモータの動きである。発電機-水車系が定常状態においてもいくらかのロスをもっているから、主サーボの開度は負荷が零でもある値をもっている。(a) と (b) とは周波数が同じ値、変化した場合についてのシミュレーション結果を示している。従来形ではダンピングが弱く、安定になるのに時間がかかることがわかる。(a) と (c) とは同じような形状の周波数応答をするシミュレーション結果である。従来形ではダンピングが強すぎるため (a) の

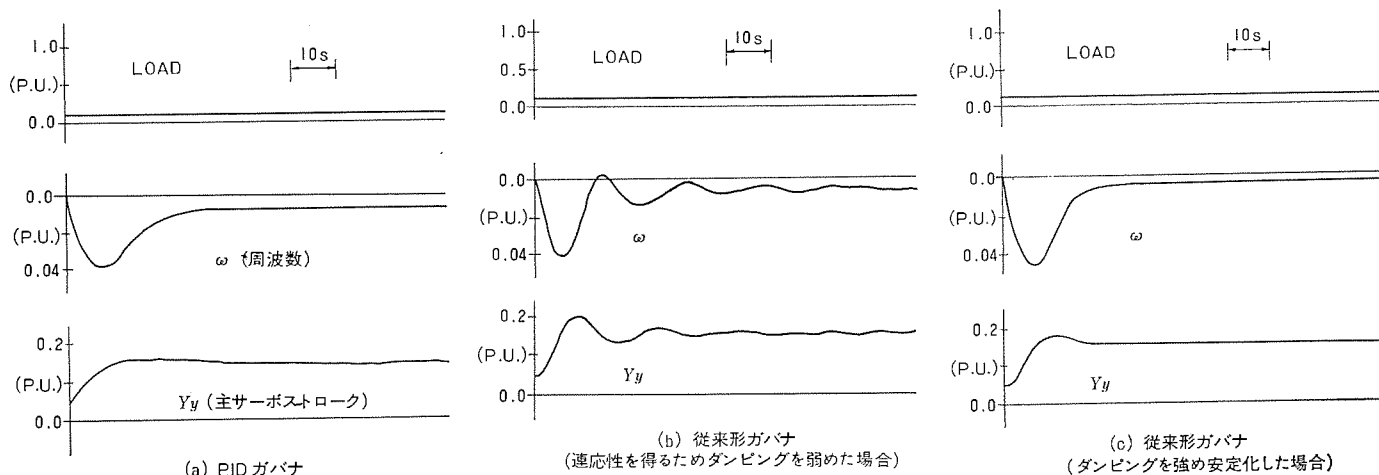


図 10. 従来形ガバナとPIDガバナのステップ応答

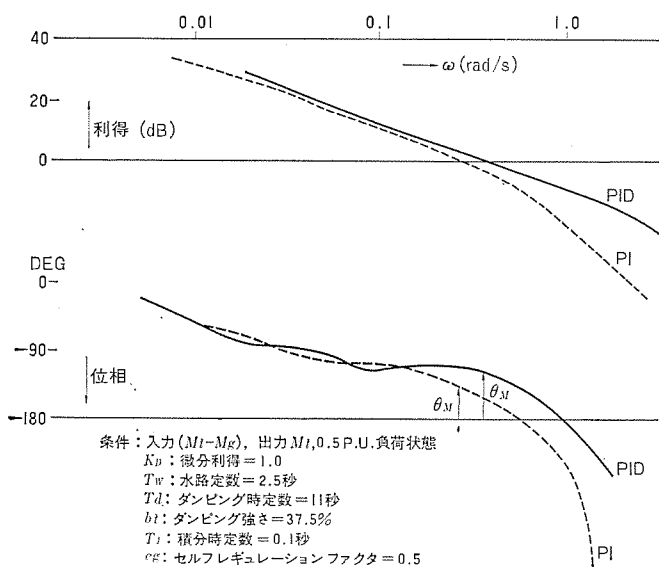


図 11. PIガバナとPIDガバナのボード線図

場合、負荷変動と主サーボの動作開始との間にほとんどむだ時間はないが、(c)ではむだ時間が生じている。このため周波数の瞬時低下量 $\Delta\omega$ が (a) の場合 0.04 P.U. であるのに対し、(c) の場合 0.05 P.U. と大きくなっている。以上のように PID ガバナは速応性、安定性の両面において従来形ガバナより優れている。このような特性上の相違を生じた理由は何かということ全系についてボード線図を描いて調べたものが図 11. である。

速応性をもたせるには高周波側で十分な利得を持たせ、クロスオーバー周波数を大きくし、安定性の改善のためには高周波側で位相を十分進め位相余裕をとることが必要であることがわかる。一部の領域で利得を上げる処置として、微分要素の付加は有効なことである。0.1 $< \omega < 20.0$ rad/s の領域において、利得を改善するように微分要素を入れるとよいとの結論を得た。

5. シーケンサ

水力発電所の運転制御装置は揚水発電所に代表されるように、シーケンス制御回路の規模の大形化、複雑化の傾向にある。一方、半導体集積回路技術とコンピュータを中心とするデジタル技術の発展は近年めざましく、この基礎技術の発展の成果としてシーケンス制御装置が出現し、普及した。水力発電所へのシーケンス制御装置の適用はこのような時代の要求と技術進歩の交点をベースとして生まれたもので

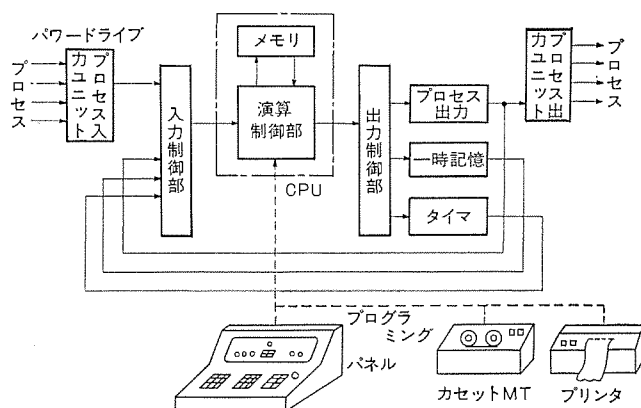


図 12. 《MELSEC-310》基本構成図

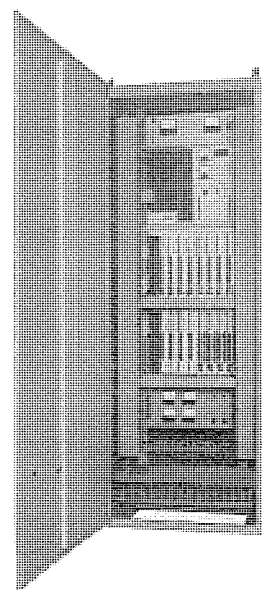


図 13. 《MELSEC》-310 制御盤

ある。ここでは、その要求によく合致した三菱シーケンサ MELSEC-310 について紹介する。

5.1 シーケンサ《MELSEC》-310^(a)

図 12. は MELSEC-310 の基本構成を示すブロック図である。図に示すごとく、演算制御部、メモリ部を中心として、プロセス入力部、入力制御部、出力制御部、プロセス出力部、一時記憶ユニット、タイマユニットなどがシーケンス制御信号の処理を行う。これらに加えてプログラミングパネル、カセット MT、プリンタが付属機器として組合わされて、

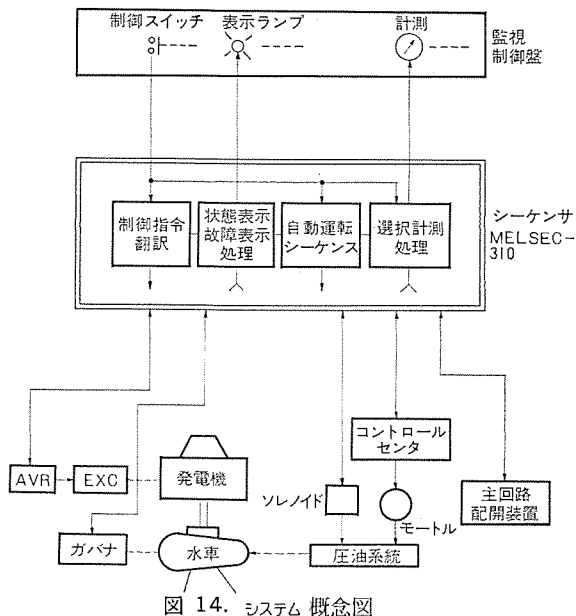


図 14. システム概念図

一つのシーケンス制御装置を構成している。図 13. は MELSEC-310 の制御盤の写真である。

MELSEC-310 はシーケンス制御専用機として、次のような特徴を持っている。

- (1) 使いやすい (プログラミングが簡単)
- (2) 機能の改造、追加が容易 (RAM, ROM の切換え可能)
- (3) 保守が容易
- (4) 高信頼性 (IC, 非破壊読出しメモリの採用)
- (5) カセット MT, プリンタの利用可能 (オプション)

MELSEC-310 のプログラミングは、だれでもすぐ理解できるように、従来のリレーシーケンスと密着した命令及び簡単なシンボルでシーケンス制御回路のプログラミングが行えるように工夫されており、次のような特徴がある。

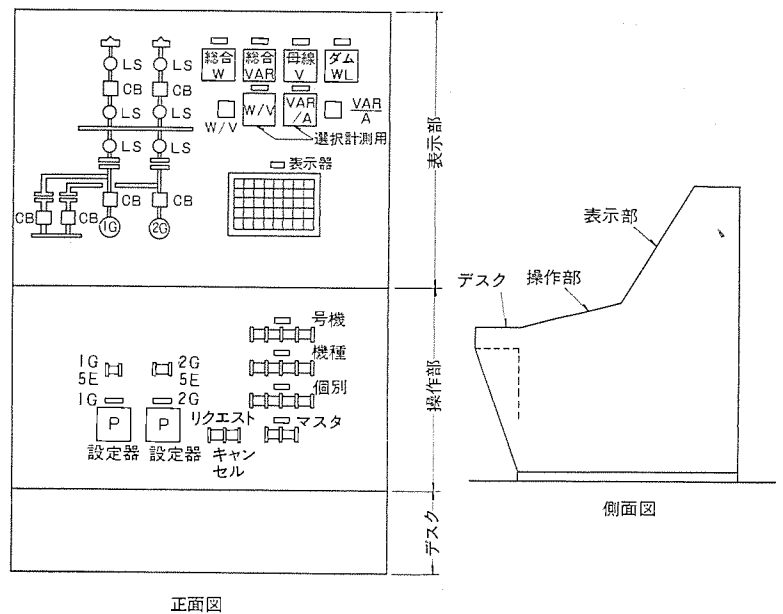
- (1) リレーや論理シンボルなどで表現できる。
- (2) プログラミング上のルールがほとんどない。
- (3) 機能命令によりシーケンス機能がプログラムできる。
- (4) コーディング作業が不要である。
- (5) 機械のフローと制御シーケンスが一体で表現できる。

5.2 水力発電所への適用

MELSEC-310 を水力発電所に適用した場合のシステム概念図を図 14. に示す。図に示すシステムではシーケンサは運転制御シーケンスを実行するだけでなく、水力発電プラントと監視制御盤のインタフェース装置として次のような機能をもたせ、その利用率を上げることを計っている。

- (1) 自動運転：水車発電機の運転・停止シーケンス制御、自動復旧。
- (2) 制御指令の翻訳：「号機」、「機種」、「個別」に分類した選択スイッチの組合せを翻訳する。
- (3) 状態表示、故障表示処理：集約表示処理、遠方監視制御装置への信号分配など。
- (4) 選択計測処理：制御指令に対応した計測の選択。

この結果、監視制御盤は選択計測、集合表示、選択制御など集中監



正面図

図 15. 監視制御盤

視制御形に簡素化することが可能である。図 15. はシーケンサを適用した場合の監視制御盤の外観図を示す。

6. む す び

以上、水力発電制御装置の最近の動向の概略を述べたが、要約すると、

- (1) 高信頼性……無人化推進のため機器の信頼性が要求される。
サイリスタ励磁装置など半導体による静止化
- (2) 保守の容易化
シーケンサ、サイリスタ励磁装置など半導体による静止化、電気ブレーキの適用
- (3) 制御特性の向上……発電所の大容量化にともない運転性能の安定性、速応性が要求される。

系統安定化装置 (PSS), PID ガバ

- (4) 経済性
- (5) 柔軟性

を志向して、制御装置の開発、改良をおこなってきた。今後は更に発電所の大容量化、制御の高度化・集中化等に対処し、電力会社関係各位のご指導を得て、経済性の追求と品質の安定した装置の開発に努力していきたい。

参 考 文 献

- (1) 伊藤ほか：三菱電機技報，40，No. 2 (昭 41)
- (2) 今井ほか：三菱電機技報，45，No. 11 (昭 46)
- (3) 梅名ほか：昭和 44 年電気学会東京支部大会，No. 411
- (4) F. R. Schleif, C. G. Bates : Governing characteristics for 820,000 horsepower units for Grand Coulee Third Power-plant IEEE Transactions Paper No. 70 TP 527-PWR.
- (5) 筑田ほか：昭和 50 年電気学会全国大会，No. 1250
- (6) 久保田ほか：三菱電機技報，47，No. 11 (昭 48)

揚水発電始動装置及び発電機回路用大電流空気しゃ断器

林 重雄*・山本潤二**・信崎泰秀***・本部康英***・藤原八郎***

1. ま え が き

揚水発電所の始動方式としてよく知られているものに、

- (1) 制動巻線始動 (ダンパ始動) 方式
- (2) 同期始動方式
- (3) 始動電動機直結始動 (IM 始動) 方式
- (4) サイリスタ始動方式

がある。このほか、低周波始動方式、タンデムポンプ水車方式、あるいは同期始動方式と IM 始動方式を並用した混合方式などがある。いずれの方式が採用されるかは、もちろん技術的に可能でかつ十分信頼性のある方式のうち、最も経済的な方式が選ばれるのは当然であるが、それには単に始動装置のみの比較ではなく、それに付随する周辺機器、すなわち電源変圧器、しゃ断器、断路器、避雷器等の価格及びそれらを設置するに要するスペースの土木建築費用、あるいは発電所の運用も考慮に入れて、プラントとしての総合的見地から始動方式が決められる。

次に当社が納入あるいは試験を行った揚水発電所用始動方式を示す。

納入先	発電所名	定格	始動方式	納入年
中部電力(株)	高根第一発電所	100 MVA	制動巻線	昭 45
東京電力(株)	安曇発電所	110 MVA	同期(発電専用)	昭 45
オーストラリア	テムマット-3	278 MVA	水車	昭 46
	実機工場試験	13.5 MVA	サイリスタ	昭 48
北海道電力(株)	新冠発電所	105 MVA	制動巻線	昭 49
関西電力(株)	奥多々良木発電所	320 MVA	直結 IM	昭 50
	10 MW サイリスタ 始動装置			
		65 MW	サイリスタ	昭 50
東京電力(株)	高瀬川発電所	367 MVA	同期	製作中

一方、主回路構成においては、系統電圧の超高圧化により、発電機回路にしゃ断器を設けて超高圧送電線から直接低降する所内変圧器及び高圧しゃ断器などの省略により、簡潔な主回路構成を行うため、大電流の発電機回路用しゃ断器が要望されるようになった。この要求に対処し当社は 18 kV 12kA の空気しゃ断器及びキュービクルを開発している。

2. 制動巻線始動

制動巻線始動は最も経済的な始動方式であり、系統容量及び発電電動機の設計、特に制動巻線の熱的強度が許されるかぎりこの方式が採用される。一般的には 100 MVA では約 300 rpm 以下、150 MVA では約 200 rpm 以下の場合に適用し得る。

始動時の系統動揺を減じるため、一般に主変圧器低圧側に中間タップを設けた半電圧始動、あるいは最適始動電圧にするために 3 次巻線を設けた減電圧始動が行われる。電動機の加速特性は図 1. に示すように、かご形誘導電動機と同様の特性をもっている。ただ速

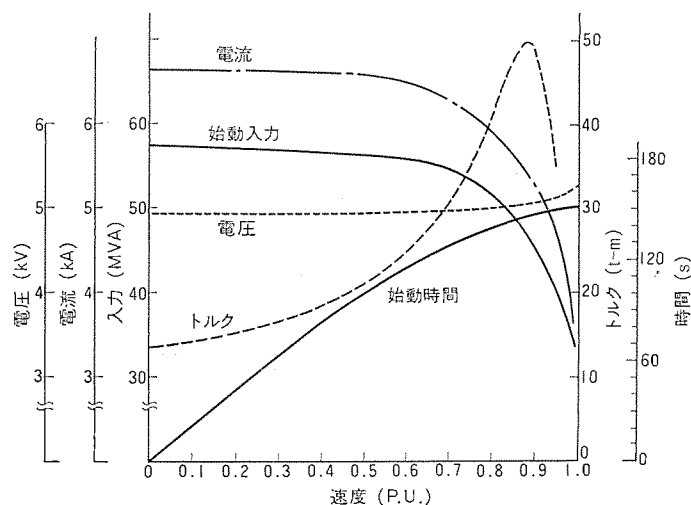


図 1. 電動機加速特性

度上昇して定格速度近くなると、とつ(凸)極効果により反作用電動機と同様、直流励磁をしなくても同期化してしまう。こののち励磁を与えると、 $\frac{1}{2}$ の確率で逆極性の励磁を与えるおそれがあるので、スリップが約 1~2% で励磁を与え同期入れを行う。このように減電圧で系統と同期化し、その後始動しゃ断器(6)を開路、全電圧しゃ断器(52)を開路して電動機の始動が完了する。次にドラフト水面押

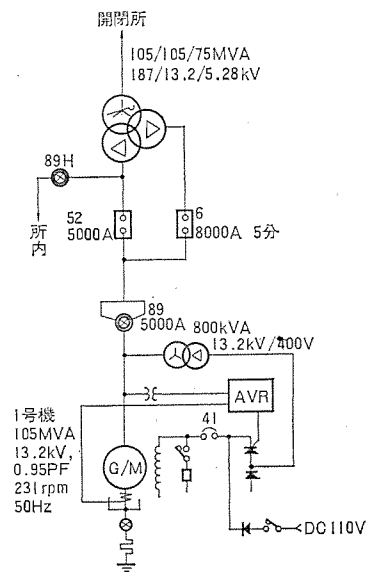


図 2. 北海道電力(株)新冠発電所主回路単線接続図

下空気を抜き、ガイドベーンを開いて揚水を開始する。

当社では昭和 45 年に中部電力(株)高根第一発電所に 100 MVA の発電電動機を 2 台⁽¹⁾、及び昭和 48 年に北海道電力(株)新冠発電所に 105 MVA の発電電動機を 2 台、いずれも制動巻線始動方式にて納入した。設計時点に揚水始動時の系統潮流解析を十分に行い、最適始動電圧を選択した結果、納入後の各地点における電圧変動の実測値が設計値と非常によく一致し、現在好調な運転を行っている。図 2. に新冠発電所主回路単線接続図の概略を示す。界磁放電抵抗器は、制動巻線トルクを大にするには抵抗値を大きくしなければならない。一方、事故しゃ断時の界磁回路耐圧値より抵抗値は制限され、一般に 1~2 Ω 程度が選ばれる。

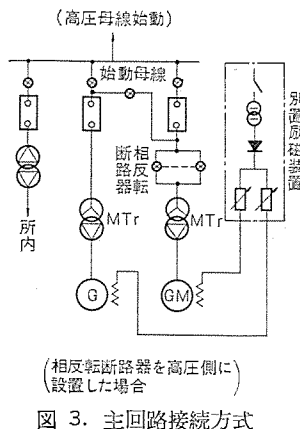


図 3. 主回路接続方式

3. 同期始動方式

3.1 特徴

この始動方式は他の方式にくらべて次の特徴がある。

- (1) 始動時、系統に与えるじょう乱がない。
- (2) 同時に複数台の始動が可能である。
- (3) 始動用として利用できる発電機がある時のみ採用可能。
- (4) 始動用母線や開閉機器の主回路構成が複雑になる。

3.2 主回路接続方式

始動用母線を主変圧器の高圧側に設けるか、低圧側に設けるかによって(1)高圧母線始動、(2)低圧母線始動の二つの主回路接続方式がある。高圧母線始動の主回路例を図 3. に示す。

複数台の主機を有する揚水発電所においては、通常、直結電動機始動方式又はサイリスタ始動方式などと同期始動方式の組合せ始動方式が採用される。

3.3 制御方式

同期始動方式は特定の始動用の発電機と始動しようとする電動機とを電氣的に接続しておき、かつ両機には適当な励磁をあらかじめ与えておいて、発電機を水車始動すると、発電機の発生する同期化トルクによって電動機も同期始動し加速され、定格速度となったところで系統に並列する方式である。

この制御シーケンスは始動用発電機と発電電動機を同時に協調をとりながら制御する必要がある。

3.4 運転実績

当社では昭和 44 年、同期始動方式を採用した揚水発電機器を東京電力(株)安曇発電所(111 MVA)に納入し、現在まで良好な運転をつづけている⁽²⁾。図 4. は安曇発電所における、2 台同時始動時のオシロ例を示す。

なお、現在製作中の東京電力(株)新高瀬川発電所(367 MVA)向け揚水発電機器においても同期始動方式が採用されている。

4. 直結誘導電動機始動方式

4.1 特徴

この方式は大容量機にまで適用可能な始動方式であり、現在国内における主流として使用されている。関西電力(株)奥多々良木発電所にもこの方式が採用された。自流量がある程度確保できる場合は同期始動と組合せて使用される例も多い。始動用電動機の容量は、一般的には発電電動機容量の 5～8%程度である。特徴をまとめると次のとおりである。

- (1) 大容量機に適した始動方式である。

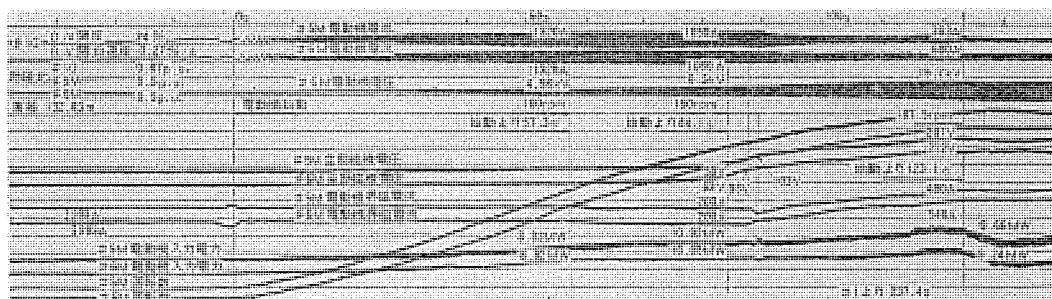


図 4. 1G-2M 始動 オシログラム

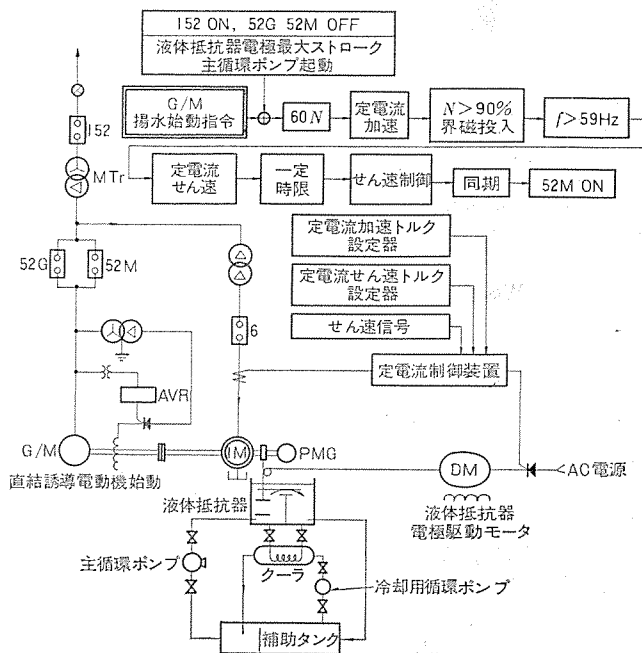


図 5. 直結誘導電動機始動ブロック図

- (2) 始動時系統に与える動揺は、制動巻線始動方式に比べて小さい。
- (3) 始動用電動機、始動用変圧器、液体抵抗器などの付属設備が多く、建屋スペースが比較的大きくなる。
- (4) 始動用電動機の空転時の損失により総合効率は若干低下する。
- (5) 高速大容量機の場合軸振動について検討する必要がある。
- (6) 始動変圧器を所内負荷と共用する場合には始動時の電圧降下について検討する必要がある。

4.2 回路・構成品

単線図及び構成品については別稿「関西電力(株)奥多々良木発電所納めポンプ水車、発電電動機及び制御装置」を参照されたい。概要を図 5. に示す。図 6. は関西電力(株)奥多々良木発電所納め 24,500 kW 始動電動機の工場組立中の写真であり、図 7 は同じく現地に据付けられた液体抵抗器、液体抵抗器切換断路器及び液体抵抗器制御盤を示す。

4.3 制御方式

図 5. にブロック図を示す。定電流加速を行えば定トルク加速になることは次式より明らかである。

$$\tau = \frac{J m_1 S \gamma_2' V_1^2}{9.8 \omega_0 \{ (S \gamma_1 + \gamma_2')^2 + S^2 (x_1 + x_2')^2 \}} \cdot \frac{K' V_1^2 S}{\gamma_2'}$$

$$I_1 = \frac{V_1 S}{\sqrt{(S \gamma_1 + \gamma_2')^2 + S^2 (x_1 + x_2')^2}} \cdot \frac{V_1 S}{\gamma_2'}$$

$$\therefore \tau = K' V_1 I = K I_1$$

制御方式の決定に当たってはデジタルコンピュータを使ったシミュレーショ



図 6. 関西電力(株) 奥多々良木発電所納め
24,500 kW 始動電動機の工場組立

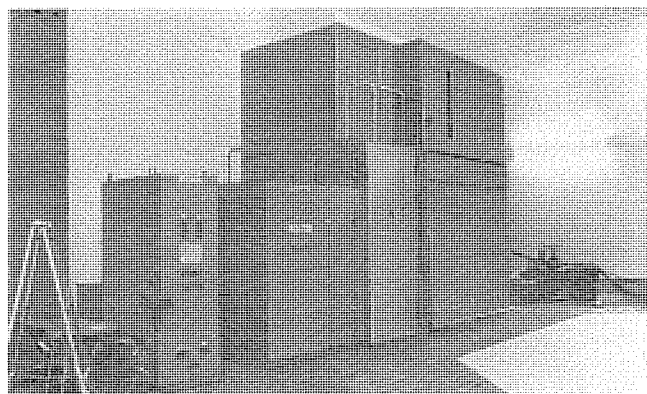


図 7. 関西電力(株) 奥多々良木発電所納め液体抵抗器、
液体抵抗器切換断路器盤及び液体抵抗器制御盤

ン等の使用による十分な検討を行った結果、図 5. の方式としたが、この特徴は 59 Hz に加速した後、主機の空転 ロストルクに等しいトルクとなるようそのトルクを電流で検出し、5 秒間待ってせん(揃)速に入るようにしたことである。その他 99 % speed になったらすぐその時の液温、濃度により電極 ストロークの引上げ量を決める方式、99 % speed になったら電極を 1 度引きもどした後、電極駆動電動機のギヤダウンを行い加速 トルクを徐々に増やして並列を行う方式、1 度 Over shoot させてから減速時並列させる方式等々種々の方式について検討を加えた上で前記方式が最適であるとの結論を得た。保護方式としては次のごときものがある。

IM 過電流 リレー、IM 差動 リレー、IM 2 次電流平衡 リレー、LR (液体抵抗器) 温度上昇、液面上昇、クーラ 故障、制御装置電源喪失 リレー。

5. サイリスタ始動装置

揚水発電所用始動装置として、サイリスタ始動装置が最近脚光を浴びてきたことは周知のとおりである。これはサイリスタ素子、及びその応用技術の発達、並びに従来の直結誘導電動機始動方式と経済的に十分競合し得る ベースになってきたことによる。使用する立場から見ても保守点検が容易であり、制御も簡単で多機に対して迅速な順次始動ができ、かつ停止時には電気ブレーキとして使用できるなど、

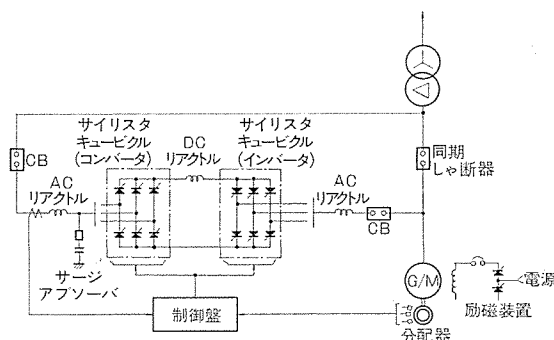


図 8. サイリスタ始動装置単線図

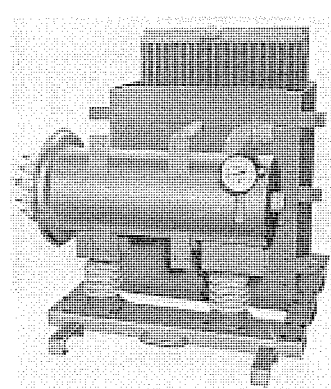


図 9. サイリスタバルブ (フロン
沸騰冷却)

数多くの特長を有している。

当社としても昭和 47 年に 13,500 kVA 水車発電機を被駆動機として、工場内での サイリスタ 始動装置の開発試験に成功した。

また昭和 50 年 2 月には高炉 ブロウ用駆動装置として、揚水発電所用と全く同方式の サイリスタ 始動装置を納入した。これは、装置容量 10,000 kW、11 kV 定格のもので、そのまま揚水機始動に適用し得るものである。

5.1 回路構成

図 8. に示すように主要機器はサイリスタ キュービクル、DC リアクトル、AC リアクトル、サージアブソーバ及びサイリスタ 制御盤より構成される。同期電動機には分配器が直結される。ここで当社の方式として特に特徴あることは、サイリスタバルブに、フロン 沸騰冷却方式を採用していることである。この方式により、装置をコンパクトにかつメンテナンスを容易にしている。外観は図 9. に示すように、一つのタンクの中にサイリスタ素子数個を直列に接続して収納し、フロンガスを封入している。フロンガスは常温では液体であるが、サイリスタ 通電による発熱で約 40°C になると沸騰し、この時約 35 kcal/kg の潜熱をうばう優れた冷却媒体である。フロン 蒸気は凝縮機に上り、風冷 (又は水冷) によって液化し、自然にサイリスタタンク内にもどってくる。したがってサイリスタバルブの冷却は単に凝縮器にファンを設けるか、あるいは水冷の場合は通水管を設けるだけでよく、外部に特別な冷却器を必要としない。

5.2 制御方式

主電動機を始動加速して電源系統に同期投入するまでの制御モードを図 10. に示す。サイリスタ 制御装置に始動指令を与えると、最初は断続始動により速度上昇する (期間 A)。この期間はインバータ側サイリスタの相間の転流は主電動機の逆起電力が小さく、負荷転流が困難であるので整流器側の位相制御により電流を断続させる (断続転流) ことで行う。約 10 % 速度上昇した時点でインバータ側の転流は断続転流より負荷転流に移行し、一定電流で定トルク加速制御が行われる (期間 B、定電流加速域)。速度上昇して約 99 % 速度に達すると、設定電流値をその時の速度に相当する値に自動設定 (期間 C、定速制御域) し、次の同期せん速制御をスムーズに行わせる準備を行う。この設定電流値をベースにし、次に電源系統側と主電動機側との周波数差により発生されるせん速信号 (15 R, L) に基づき設定電流値を微調整するいわゆるせん速制御 (期間 D) が行われ、同期投入の条件が満足された時点で主電動機は系統に同期投入される。

5.3 10,000 kW サイリスタ始動装置

高炉 ブロウ 用ではあるが、同期電動機始動用としてこのように大容量高電圧のサイリスタ 始動装置を実用として使用されたのは、我が

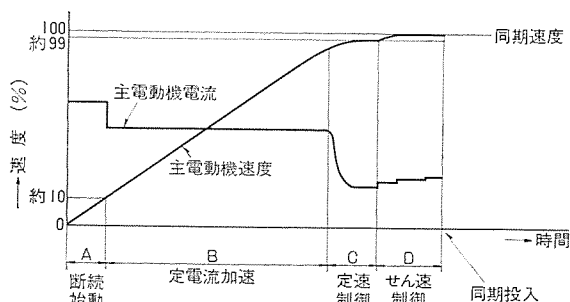


図 10. 始動時の制御モード

図 11. サイリスタキュービクル

国ではこれが最初のものである。サイリスタの構成、制御方式等、揚水機始動用と全く同形式であり、技術的には 30,000 kW、24 kV クラスの始動装置の製作も何ら問題なく可能である。

被駆動機 高炉用同期電動機、52 MW、11 kV
3,600 rpm
定格出力 10,000 kW
最大直流電圧 DC 11 kV
直流電圧調整範囲 $-100 \sim +100 \%$
始動時間 10 分
冷却方式 フロン沸騰冷却
入力電圧 AC 11 kV $\pm 10 \%$ 60 Hz 三相

図 11. はサイリスタキュービクル外観写真である。このキュービクルは 1 μ m 分のサイリスタバルブを収納しており、12 面で 1 セットの始動装置を構成する。

6. 揚水用低圧切換しゃ断器

系統電圧の超高圧化により、発電機回路にしゃ断器を設けて超高圧送電線から直接低降する所内変圧器及び高圧しゃ断器などの省略により、簡潔な主回路構成を行うため、大容量の発電機回路用しゃ断器が要望されるようになった。これらの要求に対処して 18 kV 12 kA の空気しゃ断器及びキュービクルを開発し、このたび関西電力(株)奥多々良木発電所に納入したので、その特長・構造・試験結果を述べる。

奥多々良木発電所は図 12. に示すように、320 MVA の発電電動機 4 機からなり、18 kV から 500 kV にステップアップして送電している。発電電動機回路には、発電・電動切換えを行うしゃ断器が 2 台設けられ、相切換えを行っている。所内電源は主変圧器 2 次から直接所内変圧器を設けて取り出している。切換しゃ断器の定格を表 1. に示す。このしゃ断器は従来の横吹付形消弧方式の C 形空気しゃ断器の技術と大電流化に対する構造上の利点を生かして開発したもので、揚水発電切換専用の負荷開閉用と、発電機回路に設けて短絡しゃ断を行う一般用の 2 系列がある。負荷開閉専用と一般用との構造上の相違点は消弧室だけであり、負荷開閉用の消弧室は多数回のしゃ断アークによる損耗を考慮した設計となっている。これらの消弧室は互いに互換性を有しており、消弧室を取替えることによって一般用(定格電圧 18 kV、しゃ断電流 100 kA)にも使用することが可能となる。

6.1 揚水用切換 C 形空気しゃ断器の特長

(1) 大電流通電に適した構造である。

12 kA の大電流通電を行うため、しゃ断器の 6 本の通電用接触子を

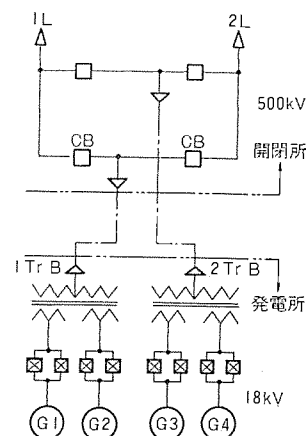
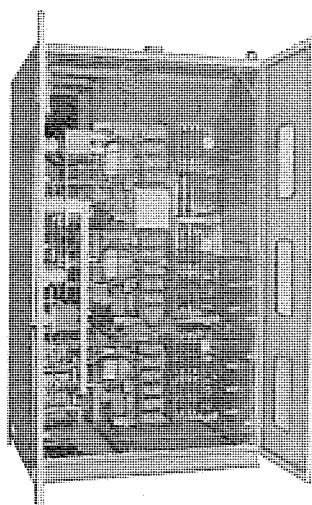


図 12. 主回路単線結線図

表 1. 定 格

形 式	20-C-63 FT 形 ABB
電 圧	24 kV
電 流	12,000 A
絶 縁 階 級	20 号 B
しゃ断電流	63 kA at 18 kV
再起電圧	0.5 kV/ μ s
開 極 時 間	0.07 秒
しゃ断時 間	5 サイクル
無 負 荷 投 入 時 間	0.2 秒
投 入 制 御 電 圧	DC 100 V
引 外 し 電 圧	DC 100 V
操 作 圧 力	15 kg/cm ² -g
標 準 動 作 責 務	0-1 分-CO-3 分-CO

アーク接触子に並列に配置し、上端子・下端子を 1 相について各 3 個設けることによって、強制冷却などを行わず、自然換気だけで 12 kA の通電を可能にした。

(2) 多ひん(頻)度負荷開閉が行える。

揚水発電所の運転上の大きな特長として、始動停止のひん(頻)度が一般の発電所と比べて非常に大きいことがあげられる。そのため、切換しゃ断器は多数回の負荷開閉能力を要求されるが、12 kA の負荷電流は一般のしゃ断器の短絡電流に相当するくらい大きいので、アーク接触子及び消弧室には過酷な条件となる。多数回の負荷開閉に耐えるように、しゃ断器消弧室のスプリッタの板厚を増強することにより、定格負荷電流しゃ断回数が客先の仕様要求である 500 回を十分満足することができた。

(3) 相分離形構造である。

信頼性を一層向上させるため、各相ごとにキュービクルに収納した相分離形構造である。

(4) 機械的投入ロック装置を設けた。

揚水用切換しゃ断器は、相反転用として使用するため、発電用と揚水用しゃ断器とが同時に投入されると相間短絡を生じる。これを防止するため、2 台同時投入の防止用として電氣的だけでなく、機械的ロック装置を具備して信頼性を更に増した。この装置はしゃ断器本体をまったく改造しないで取付けが可能な構造である。

(5) 収納キュービクルがコンパクトに設計されている。

揚水発電所は一般に立地条件に制約を受け、機器の配置を合理的に

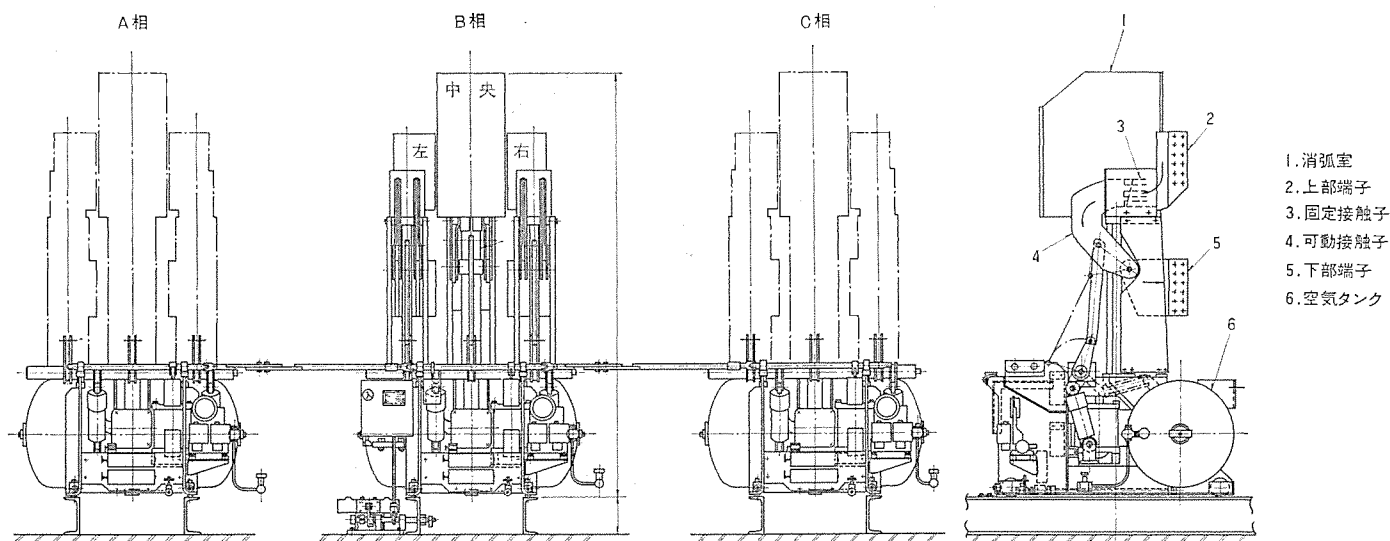


図 14. C 形空気しゃ断器 外形図

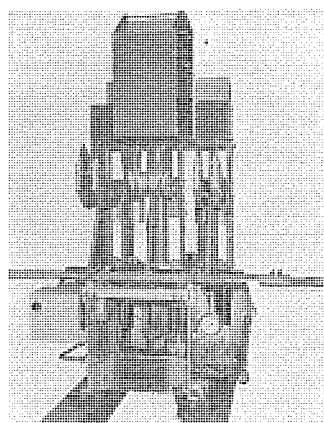


図 13. 空気しゃ断器 1 相分

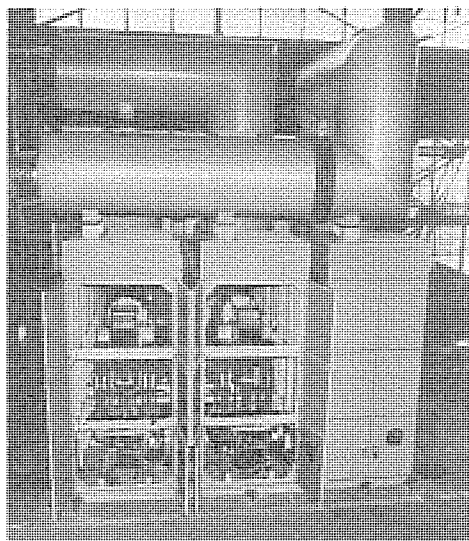


図 15. キュービクル 全景

設計しなければならないので、機器の縮小化を要求されるが、C 形空気しゃ断器の構造上の利点を生かし、発電用と揚水用のしゃ断器を背中合わせに配置し、キュービクルの上部に相反転用の相分離母線を設け、合理的な母線配置を行ったので、収納キュービクルの縮小化が図れた。

6.2 構造

図 13. に定格 24 kV 12 kA の C 形空気しゃ断器 1 相分の外観を示す。このしゃ断器は図 14. に示すように大電流なので 1 相を三つの単極に分けて電流を流し、1 相分を 1 台のキュービクルに収納した相分離形である。ただし、操作機構は B 相に 1 組設けて連結軸で機械的に連結し、同時に確実に三相動作する構造である。

電流は図 14. に矢印で示すように、上部端子(2)より入り、固定接触子(3)を経て、可動接触子組立(4)を通り、下部端子(5)へ流れる。

(1) 機械的投入ロック装置の構造

ロック装置を取付けるには、キュービクル内の若干の加工が必要となるが、しゃ断器本体には、全然加工する必要がない。

ロック方法の原理は次のとおりである。しゃ断器の投入動作は、しゃ断器操作機構のレバーが下方へ落ちることにより、操作機構の弁が開いて操作シリンダを動作することによって行われるが、ロックカム

が、このレバーを下方へ落ちないように下から支えてロックする。しゃ断器を投入する場合、ロックカムが解除状態になっていなければ投入できず、片方のしゃ断器のロック解除が行われている場合には、天びん方式でもう片方のしゃ断器はロックされる。

ロックがかかっている状態で誤信号によって投入指令が出されても、マイクロスイッチによって投入回路を開いている。このように電氣的・機械的に 2 重のロックが行われている。

(2) キュービクルの構造

図 15. に発電用と揚水用とのしゃ断器を各 1 台ずつ収納したキュービクルの全景を、また図 16. にキュービクルの平面図と側断面図を示す。キュービクルは、発電用と揚水用とのしゃ断器のそれぞれ 1 相分を含む 3 台の独立した箱からなっており、屋内

用自然換気形構造である。しゃ断器は発電用・揚水用を背中合わせに配置し、両者のしゃ断器下端子は、可とう(撓)つなぎによって T 形アルミ母線に接続され、床貫通ブッシングを経て発電電動機側の相分離母線に接続されている。しゃ断器上端子側は、キュービクル上部の相分離母線によって相反転接続されたのち、主変圧器 2 次側の相分離母線と結ばれている。

キュービクルフレームの構造は、1 相についてしゃ断器室が 2 個と中間に母線室が 1 個、しゃ断器室の上部に排気室が各 1 個から構成されており、それぞれ分割取外しできる構造であるので、輸送条件によっては、適宜に分割発送が可能となる。奥多々良木発電所の場合には、上下のがい管及び相分離母線、しゃ断器の排気室を取外した状態で発電用・揚水用しゃ断器を 1 相分完全組立のまま発送し、現地再組立作業をできるだけ少なくした。

キュービクル箱体の大部分は、12 kA という主回路電源によるうず(渦)電流損に基づく発熱を最小に抑えるためにステンレス鋼を主体とする非磁性材料によって構成されている。また、3 台の箱間を流れる横流を防止するために特に注意が払われている。そのために、しゃ断器の各相連結軸の接続部は、その表面に絶縁皮膜をかぶせ、連結軸間を電氣的にしゃ断するとともに、3 台の箱間にある連結軸の保護カバーも電氣的にしゃ断するため、絶縁ゴムパッキンをはさんで

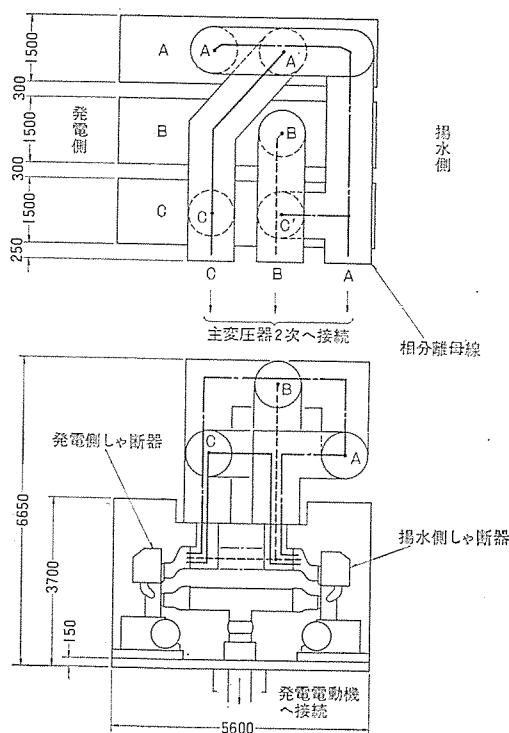


図 16. キュービクル 平面図及び側断面図

取付けの構造としてある。

6.3 試験結果

しゃ断器は、無負荷連続開閉試験・耐電圧試験・温度上昇試験・短絡試験・進み小電流しゃ断試験・遅れ小電流しゃ断試験・短時間電流試験などの従来のしゃ断器として必要な試験を行ったほか、負荷開閉専用器として連続負荷開閉試験を実施した。また、奥多々良木発電所へ納入後、現地試験として主変圧器の無負荷励磁状態における開閉試験を実施した。

(1) 無負荷連続開閉試験

機械的性能を確かめるため、キュービクルに収納した状態で 10,000 回の連続開閉試験を実施した。1,000 回目、5,000 回目及び 10,000 回後の開閉操作特性を測定し、0 回目の開閉特性と比較した。また、10,000 回後には全部品の分解点検を行い、主要部品の寸法測定を行ったが、すべて異常は認められず良好であった。

(2) 耐電圧試験

しゃ断器をキュービクルに収納した状態で、主回路及び制御回路の耐電圧試験を実施した。商用周波耐電圧試験は乾燥状態で、同相主回路端子間及び主回路と大地間に試験電圧 50kV 60Hz を 1 分間加圧した。衝撃耐電圧試験は、乾燥状態で試験電圧 125 kV (印加波形 $1 \times 40 \mu s$) を正負各 1 回印加した。

制御回路には、AC 2,000 V 60 Hz を 1 分間加圧した。すべてに異常は認められず良好であった。

(3) 温度上昇試験

キュービクル内にしゃ断器を収納した状態で、三相 12 kA を通電した。キュービクルは自冷で、最高温度上昇部はしゃ断器の接触部で 53°C であり、規格値 65°C に対して十分に余裕がある。

(4) 短絡試験

しゃ断器は相分離構造であるので、単相でしゃ断試験を実施した。

試験は一般用と負荷開閉用の 2 種類について行い、負荷開閉用については、負荷開閉前と 600 回の負荷開閉試験後の双方について実施した。前後におけるしゃ断時間などの差異はほとんど認められない。

(5) 進み小電流しゃ断試験

試験は、条件のきびしい最低操作圧力 12 kg/cm²-g (定格操作圧力の 80 %) において、しゃ断器の定格電圧 24 kV の $\frac{1.3}{\sqrt{3}}$ に相当する給与電圧 18 kV で、15 A・50 A・490 A の進み電流の単相しゃ断試験を実施したが、無発弧・無再点弧で良好であった。

(6) 遅れ小電流しゃ断試験

試験は、電流さい断による過電圧発生が大きいと考えられる最高操作圧力 16.5 kg/cm²-g において、しゃ断器の定格電圧 24 kV の $\frac{1.5}{\sqrt{3}}$ に相当する給与電圧 20.8 kV で、19 A・400 A の励磁電流を各 12 回、単相でしゃ断試験を実施した。開閉過電圧倍数は、負荷側で 1.9 以下であった。

(7) 短時間電流試験

キュービクル 収納状態で、単相で試験を行った。113 kA を 2 秒間流して接触部を点検したが異常なく良好であった。

(8) 負荷開閉試験

負荷開閉試験は、実際には三相試験を多数回実施するのが好ましいが、試験を効率的に実施するため単相試験で (アークエネルギー) \leftrightarrow (アーク時間) 特性をは (把) 握し、三相等価換算を行うことにし、最も過酷な最大アーク時間のところで単相試験を実施した。その結果、最大アーク時間で 600 回の負荷開閉が可能であることが実証された。一方、三相しゃ断の場合、無作為にしゃ断が行われるとすれば約 750 回の開閉が取替えないで可能であることが推定された。

(9) 変圧器励磁開閉試験 (現地試験)

奥多々良木発電所に機器を据付後変圧器の開閉を各 20 回実施した。この場合、変圧器 2 次側がケーブルであるため、しゃ断器は約 500 A の進み電流のしゃ断、波高値 3.3 ~ 24.5 kA の変圧器の突入電流を投入したが、再点弧そのほかの異常はなく良好だった。

7. む す び

揚水発電所に関連し、始動装置と回路切換用低圧大電流しゃ断器につき紹介した。

揚水始動方式としては種々の方式があり、個々の発電所に対し、最も適した方式が採られるが、近年 クローザアップ されてきたサイリスタ始動方式は、直結誘導電動機の適用が困難な大容量高速機に対しても適用可能であり、今後の経済性の追求と技術の確立が期待されている。

低圧大電流しゃ断器として C 形空気しゃ断器の大電流に適した構造を生かし、定格電流 12 kA の大容量のしゃ断器を開発した。これにより、大容量揚水発電所の揚水・発電の切換えを低圧側で行うことを可能にし、発電所の合理的設計に寄与できるようになった。

これらの機器の開発・製作にあたり、ご指導、ご協力いただいた電力会社関係各位に深く感謝の意を表する。

参 考 文 献

- (1) 山本ほか：三菱電機技報，44，No. 7 (昭 45)
- (2) 森 ほか：三菱電機技報，44，No. 3 (昭 45)

関西電力(株)奥多々良木発電所納めポンプ水車, 発電電動機及び制御装置

曾野勝司*・上山正*・森与志彦**・横田浩***・監崎章***

1. ま え が き

奥多々良木発電所は、兵庫県中央部の大平洋へ注ぐ市川上流に高さ 98 m、有効貯水量 2,136 万 m³ のロックフィルダムを設け上部調整池とし、日本海に注ぐ円山川支流の多々良木川中流部に高さ 64.5 m、有効貯水量 1,738 万 m³ のロックフィルダムを設け下部調整池とし、この間を延長約 3,800 m の水路と地下発電所で結び、貯留水の反復使用と有効落差 383.4 m によって最大 121.2 MW の発電を行う、大容量純揚水発電所である。三菱電機はこのポンプ水車 2 台（3 号機及び 4 号機、製作は三菱重工担当）に直結される発電電動機及び制御装置を製作納入した。

記録的大容量機のため、製作に当たっては事前の研究開発を十分に行い特別品質管理体制下で信頼性ある機器の納入につとめた。特に輸送制限による 2 分割ランナの採用、発電電動機の強制風冷、高速高荷重のスラスト軸受の採用、直結誘導電動機始動方式の採用、発電機回路用大電流同期しゃ断器の採用、地下式大容量 500 kV 主変圧器の採用、大容量サイリスタ励磁方式の採用等、数々の記録的特徴を有するが、昭和 50 年 3 月に 4 号機の官庁検査を終え運転を開始したので、この機会にその概要及び現地試験結果の主なものについて紹介する。

2. ポンプ水車

2.1 ポンプ水車の概要

ポンプ水車の主な仕様は次のとおりである。

形 式 立軸 フランシス形 ポンプ水車

設計要項

水車運転時

有効落差(m)	406	383.4	374	337.7
水車出力(RW)	310,000	310,000	297,000	247,000
回転速度(rpm)	300			

ポンプ運転時

全揚程(m)	423.9	378.2	366.8
ポンプ入力(RW)	277,000	307,000	314,000
回転速度(rpm)	300		

この発電所のポンプ水車の最も大きな特徴は、世界で初めて揚程 400 m を越すポンプ水車において分割ランナが採用されたことにある。ランナは 400 m の高圧をうけるとともに定格回転時においても約 90 m/s の高周速を有するため、その設計・製作に先立って相似模型による無拘束速度までの実周速強度試験による強度検討、分割ボルトの配置などの強度検討はもとより、分割フランジ特性試験、ボルト締付方法の検討、及び始動・停止によるランナや分割ボルトの低サイクル疲労に対する検討など、考えられる範囲の検討を重ねた。

図 1. に分割ランナを示す。上記特徴を除いても、ポンプ水車は容量的にも世界屈指の記録品であり、従来の実績を上回る高落差高速

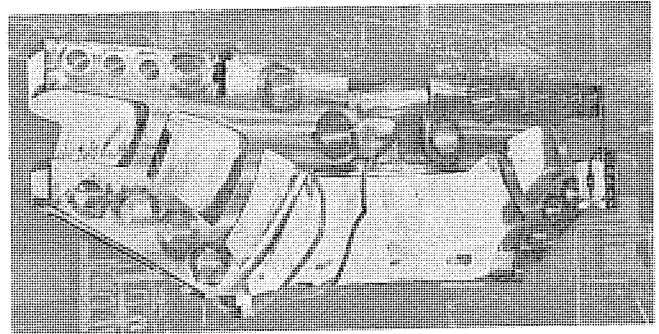


図 1. 2 分割ランナ

機である。このため設計・製作にあたっては、各種模型試験の結果を十分とり入れるとともに、慎重な技術検討、徹底した品質管理を行い信頼性ある機器の納入に努めた。その詳細は(1)~(5)既に一部報告されているので以下主な特徴を記載する。

2.2 模型試験

このポンプ水車の模型試験は単に好性能のポンプ水車の開発にとどまらず、運転特性の安定を目的とし各種試験を行った。水力特性面では、特に水車低負荷時及びポンプ高揚程時の水圧脈動の軽減、キャビテーション発生をなくする事を目指し、数種のランナ、ガイドベーン、ケーシング、吸出管の組合せによる試験を実施し、その最良組合せにおいて数回のランナ改良試験を実施し、ポンプ水車の最終形状を決定した。また強度面あるいは振動面から実機設計の信頼性向上と実機の安全性に万全を期すため、上述の 2 分割ランナ試験のほか、上カバー強度・振動試験・入口弁シール耐久動作試験・ポンプ始動時空転トルク測定試験などを実施し、最終的には構造相似模型による実揚程試験を行い疲労強度を含めた安全性を確認した。この発電所の水路系は上下にサージタンクを有し、また 1 本の水圧鉄管、放水路トンネルに 2 台のポンプ水車が設置され、その分岐合流点がポンプ水車に近く配置されるなど複雑な構成であり、そのためポンプ水車の始動・停止などの過渡現象の解析が重要である。この面から従来のデジタル計算機を用いた解析のほか、ハイブリッド計算機によるシミュレーションや模型過渡現象試験などによる検討を十分に行い制御面の確立を計った。

2.3 構造上の特徴

ポンプ水車は高速・高圧に耐えるべく十分な剛性をもたせた構造とした。図 2. にポンプ水車の組立断面図を示す。

2.3.1 ランナ

前述の各種試験の結果、2 分割ランナが採用された。ランナ本体は特殊ステンレス 鋳鋼 (13 Cr-3.8 Ni) 製とし、分割ボルトは高張力合金鋼製ボルト材を用いた。結合ボルト室の損失をなくするためのランナカバープレートは一体構造として剛性を高めるほか、バランス穴を設けカバープレート内外の圧力のバランスを計るなどの工夫をこらしている。

2.3.2 上, 下カバー

上カバーは強大な水圧力に耐えるための十分な剛性をもつ箱形構造

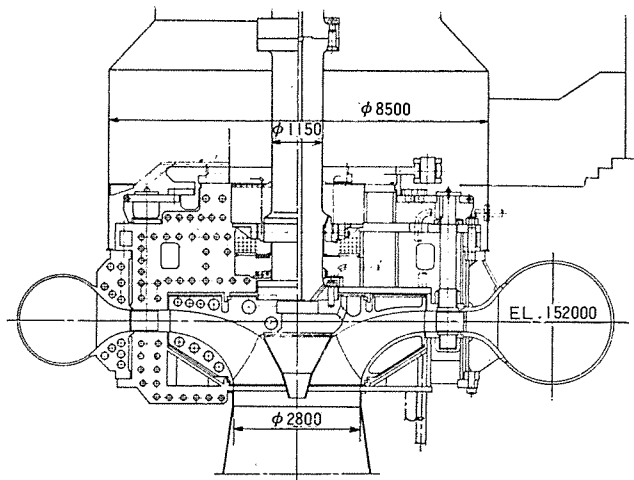


図 2. ポンプ水車組立断面図

とし、更に中央部を高くして変形を極力小さくする構造とした。下カバーは全周につながる漏水だめ室を設け、ポンプ始動空転時におけるガイドベーンよりの漏水の排水効果が十分上がるよう考慮した。

2.3.3 ガイドベーン開閉機構

ガイドベーンアームはアームボスにレバーがはまり込む構造とし、アームボスとレバーとの間を引張り式の弱点ボルトで接続した。引張り式弱点ボルトの特徴は、せん断式に比べて初期張力を与えることができるため、振動などの繰り返し疲労に対して非常に強いことがあげられる。

2.3.4 主軸封水パッキン

主軸封水パッキンは三菱重工が昭和45年に開発し、既にポンプ水車にて運転実績をもつ特殊テフロンパッキンを用いたグラッド形式を採用した。このパッキンは耐摩耗性に優れ、漏水が少なく、かつ温度も非常に安定しており現地試験においても好成績を示している。

2.3.5 入口弁

入口弁はロータリ弁で下流側常用シール、上流側に非常用シール（ロック装置付）を設けたダブルシールタイプである。入口弁弁体は剛性面から一体構造とし、輸送面からケーシング入口径より小さくし、口径2,500 mmとした。

2.3.6 補機

この発電所は地下式であるため、掘付面積の縮小、経済性の面から主機2台に対して補機を1組とするセントラル方式が採用されている。一方、機器の小形化を図るため操作油圧の高圧化が望まれ、調速機油圧は40 kg/cm²、入口弁油圧は70 kg/cm²、

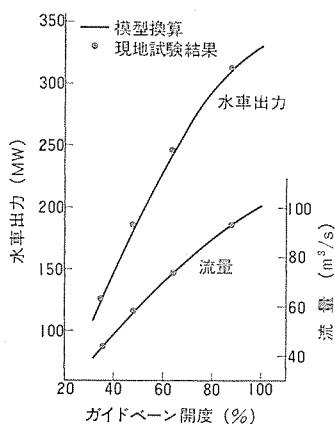


図 3. 水車運転時、開度-出力・流量特性 ($H=387.6$ m)

空気圧縮装置は72 kg/cm²が採用された。圧油装置は工場にて総合組合せ試験を施行し、信頼性の確認を行った後搬入された。

2.4 現地運転結果

奥多々良木ポンプ水車実機運転は、4号機、昭和50年2月7日、3号機は4月15日より施行され、いずれも試験を順調に完了した。以下に試験結果の概要を記す。

2.4.1 運転状況

水車運転、ポンプ運転とも、当初予想した安定運転の成果はあげ得た。表1.に水車及びポンプ運転時の運転結果の要約を示す。表には定常運転時の値を示したが、過渡状態も含め安定した運転状態が得られた。

2.4.2 水車運転特性

図3.に出力開度特性を、図4.にケーシング水圧脈動の模型と実機の比較を示す。両図から分かるとおり実機特性は模型試験結果によく合致していることが確認された。

2.4.3 水車負荷しゃ断特性

図5.に2台同時水車負荷しゃ断時特性の現地試験結果と計算値との比較を示す。実機試験結果は当初の計算結果によく合致している。また、水圧脈動についても模型試験から予測した値にほぼ合致した結果が得られた。

2.4.4 ポンプ始動特性

ポンプ始動は入口弁を全閉にし、漏水補助弁を使用して始動を行い、定格回転にて並入後ランナ室排気、入口弁開の動作を経て、ガイドベーンによる始動を行う。ランナ室排気が完全に行われ、プライミング圧力が確立する時間と入口弁全開の時間がほぼ同時時間になるよう調整した結果、揚水はランナ室排気が完了した時点にて確実に進め得るシー

表 1. 現地運転結果の要約 (4号機)

	水 車 運 転 時	ポ ン プ 運 転 時
水 圧 脈 動		
ケ ー シ ン グ (m)	8.8	7.2
吸 出 管 (m)	8.4	4.4
振 動		
上 カ バ ー V (μ)	9	12
水 車 軸 振 れ (mm)	0.07	0.11
水 車 軸 受 温 度 ($^{\circ}$ C)	51	44

注) 振動、水圧脈動は全振幅を示す

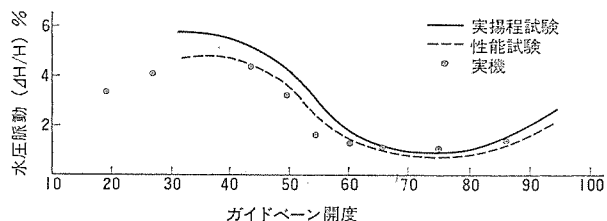


図 4. 吸出管水圧脈動特性 実機と模型比較

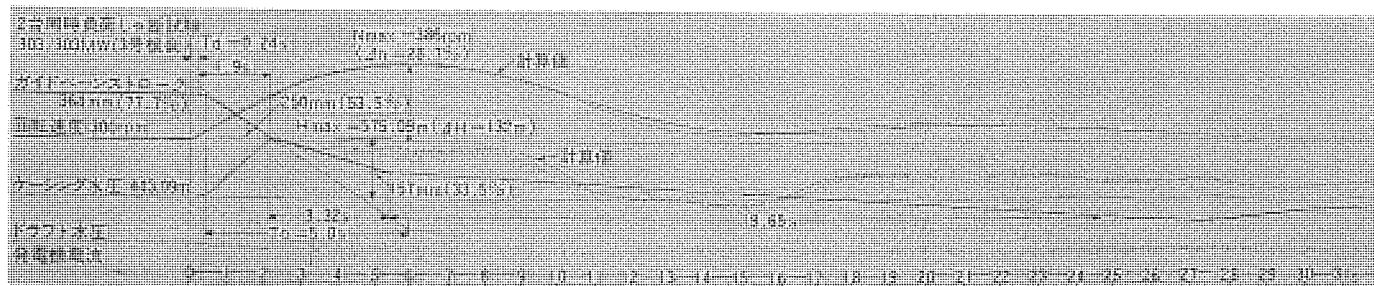


図 5. 水車負荷しゃ断 オシログラム

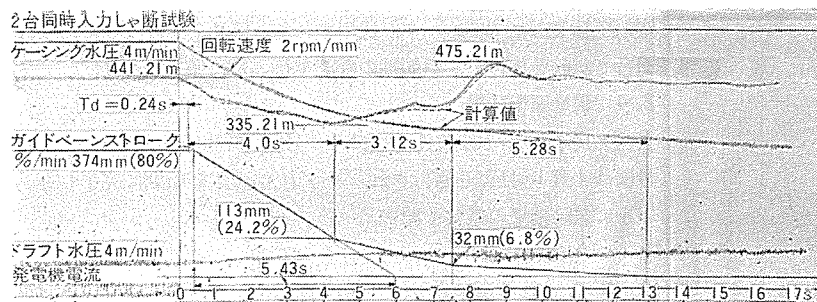


図 6. ポンプ入力シャ断 オシログラム

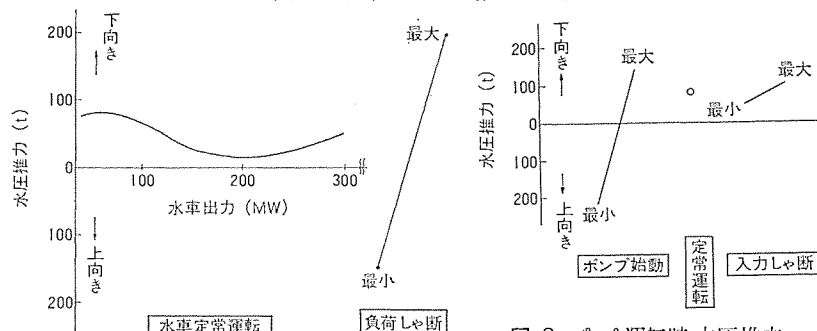


図 7. 水車運転時 水圧推力測定結果

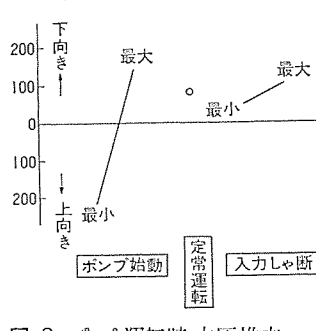


図 8. ポンプ運転時 水圧推力測定結果

ケンスとした。なお、漏水補給弁による ケーシング 圧力は吸出管内空気圧の 5～10 m 上になるように設定したため、ポンプ始動入力は当初計画の約 60% に下げる事ができ、並入までの加速時間も大幅に減少させることができた。

2. 4. 5 ポンプ入力シャ断試験

図 6. に ポンプ 入力シャ断時の オシロ を示す。入力シャ断もガイドベーンの 2 段階折を用い、シャ断後の圧力上昇の急上昇を抑制するとともに、シャ断時水圧脈動を軽減する制御方法としている。

2. 4. 6 水圧推力測定試験

水圧水力は発電電動機下 ブラケット のたわみ測定により計測を行った。水圧推力軽減の方策として、1 次背圧部と側圧部のバランスパイプを設けるほか、2 次背圧 バランスパイプ を 4 本設置し、バルブにより 2 次 バランス 管は半開とし、定常及び過渡時における水圧推力を バランス させスラスト 軸受に対する荷重の軽減を計った。図 7.、8. に水車運転時及び ポンプ 運転時の水圧推力測定結果を示す。

3. 発電電動機

3. 1 発電電動機の概要

発電電動機のおもな仕様は、次に示すとおりである。

発電電動機

形 式	立軸回転界磁準かき形 強制通風全閉内冷形
出 力	320,000 kVA (発電機) / 314,000 kW (電動機)
電 圧	18,000 V
電 流	10,264 A / 10,290 A
周波数	60 Hz
力 率	0.95 おくれ / 1.0
回転速度	300 rpm
はずみ車効果	12,400 t-m ² 以上
無効束速度	460 rpm
短絡比	0.8 以上 (発電機ベース)
励磁方式	サイリスタ 励磁方式
始動方式	直結誘導電動機始動方式

始動用誘導電動機

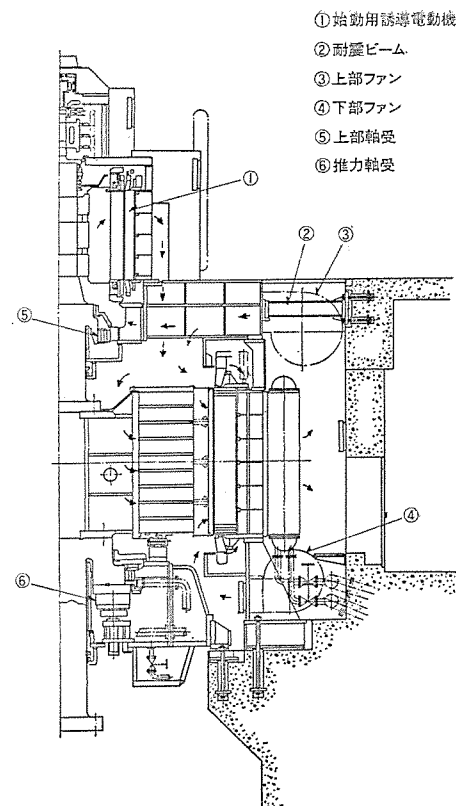


図 9. 320,000 kVA 発電電動機 断面図

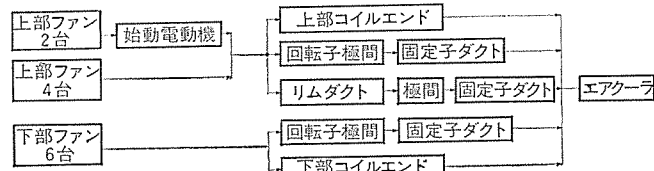


図 10. 通風回路

形 式	立軸巻線形 三相誘導電動機
出 力	24,500 kW 15 分定格
電 圧	6,600 V
同期速度	327 rpm
極 数	22 極

この発電電動機の最大の特徴は、回転子の周速が 103 m/s、鉄心長が 3 m を越える国内最大の高速大容量機であることである。このため通風冷却は、高効率の電動ターボファンを使用した強制通風冷却方式とし、振動抑制のため案内軸受及びその支持部の剛性をとくに高めるよう配慮した。またスラスト軸受も高荷重高速の記録品であるため、三菱電機が開発した銅板パッド軸受を採用し、冷却は油冷却器を油そう(槽)外部に設置した自己循環冷却方式である。なお直結の始動用誘導電動機も国内最大容量の記録品である。図 9. に発電電動機の構造断面図を示す。

3. 2 設計及び構造上の特長

3. 2. 1 強制通風冷却

上部ファン 6 台及び下部ファン 6 台による強制通風冷却方式である。設計製作に先立ち縮尺 1/5 の通風モデルを製作し通風路の設定、風量風圧特性の確認を行った。最小風量で各部の冷却を均一かつ有効に行うため、図 10. に示すように五つの並列通風回路から成る通風方式を採用した。工場試験時にファン風量の増減と固定子コイルの温度上昇値との関連も検討した。その結果を図 11. に示す。高速機になるほど発電機全体の発生損失のうち風損の占める割合が大き

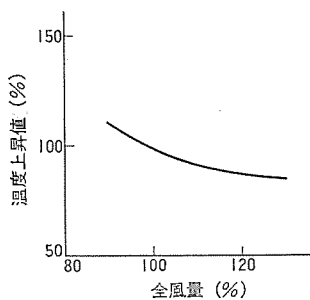


図 11. 通風量とコイル温度上昇値との関係

なる。したがって風量を大きくすることは発生損失の増大につながり好ましくない。この点からも強制通風方式は、高効率のファンを選定できるほか、風量の決定がファン台数の増減で比較的容易に行えるため、特に高速大容量機の冷却方式として有利といえる。

3. 2. 2 スラスト軸受

スラスト軸受は、最大設計荷重 1,818 トン、常時設計荷重 1,538 トン軸受平均圧力 35.1 kg/cm² 軸受外周速度 47.5 m/s の高荷重高速の記録品である。パッドは 3,000 トンスラスト軸受試験装置を用いて、さきに開発した銅板パッドをはじめ採用した。この銅板パッドは通常の鋼製台金の上にキー及びボルトで保持した厚銅板をおき、その上にバビットメタルを鍍込んだものである。銅板のすぐれた熱伝導性と銅板パッドと鋼台金との接面における接触熱抵抗を利用してパッド表面形状を支配する鋼台金の温度分布を均等化し、軸受表面の弾性変形形状を理想化することにより、軸受の負荷容量と荷重-温度特性を大幅に飛躍させた三菱電機独特のものである。銅板パッドは 3 ディスク、ばね板、ピボット、圧縮管を介して下ブラケットに取付けられている。各パッド間の荷重調整は圧縮管の伸縮で容易に行われるほか水平調整もピボットの上下で簡単にできるようになっている。更にパッドの分解点検が容易に行えるよう下ブラケット胴の側壁に設けた 2 個の窓から取外しができるように考慮した。

スラスト軸受の冷却は主軸及びスラストランナに設けたポンプホールにより油を外部冷却器に循環させる方式である。下部案内軸受周辺での発泡を抑制し、かつ良好な油循環を行わせるためしゅう(摺)動式シールを上下 2 段にわけて設置した。図 12. にスラスト軸受の構成図を示す。ポンプホールの外周速が高くなるとポンプホール内でキャビテーションを発生し、吐出量が急激に低下する。これを防止するためポンプホール内に特殊なノズルを設置した。図 13. に回転数-吐出量の工場実測を示す。図から明らかなように運転上ありうる回転数の範囲内でキャビテーションの影響は認められず、きわめて良好な特性を示している。

オイルリフトは発電電動機の始動及び停止時のみに使用するのを原則としているが、夏場の最高水温に備えて常時運転も可能なように計画した。

2. 2. 3 回転子

発電電動機の上部軸と誘導電動機軸は鍛鋼一体構造である。スパイダボスは 8 本アームの一体溶接構造でトルク伝達が均一となるよう特に考慮を払った。水路系のサージ現象中に生じ得る最大トルクにも十分耐えるようになっている。回転子コイルは外周全面に張り出し部をつけ、ファン作用による冷却効果の増大を図っている。

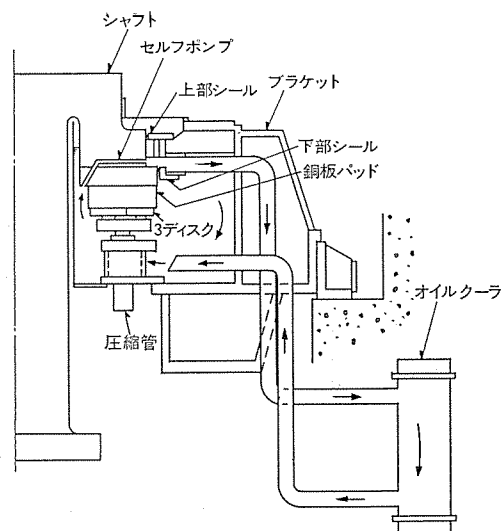


図 12. スラスト軸受構成図

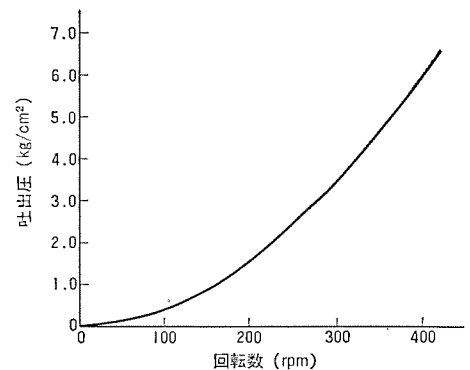


図 13. 推力軸受セルフポンプ特性

3. 2. 4 固定子

固定子は輸送上 8 分割とした。固定子コイルの絶縁は、エポキシ系の《新ダイアレジン》である。この《新ダイアレジン》絶縁方式は既報⁽¹⁾のとおり耐熱性能が格段に改善されており、F 種でも使用可能のものである。

ベースリングと固定子わくとの接続は、とくに鉄心の波打ち防止のため直径方向に滑りやすい構造としている。

3. 2. 5 その他

軸長の長い高速機で、更に誘導電動機がオーバハングした形で直結されているため、とくに上部ブラケット及び耐振ビームの剛性に注意を払った。耐振ビームは板ばねを介して建屋基礎につなぎ熱膨脹を吸収するようにした。板ばねの剛性は支点の変更で変えられるようになっている。ただし現地での振動は極めて少なく、とくに変更を要するものとならなかった。

ブレーキは使用ひん(頻)度の高いこと及び吸収すべきエネルギーの大きいことの両面で、非常に過酷な設計を要求される部品である。このためしゅう動板の分割数を思い切ってふやし、熱変形に追随しやすいようにした。またブレーキ空気圧は連続的な昇圧時限特性をもたせ、ブレーキ操作直後の熱ショックを少なくするようにしている。なおブレーキは 1 シリンダ式のジャッキ兼用装置となっている。

3. 3 試験結果

3. 3. 1 特性

表 2. に発電電動機の特性の工場試験結果を示す。

3. 3. 2 コイル及び軸受温度

表 3. にコイル及び軸受の現地における実測結果を示す。いずれも保

表 2. 工場試験結果

項 目	工場実測	保証値	備 考
短 絡 比	0.84	0.8 以上	発電機ベース
電 圧 波 形 歪み率 (%)	線 間	3.8	5 以下
	相 間	6.4	10 以下
電 圧 変 動 率 (%)	力 率 1.0	18.3	25
	力 率 0.95	23.3	30
リアクタンス (%)	x_d	119	
	x_d'	27.5	
	x_d''	20.9	
	x_q''	22.1	
	x_0	17.4	
	x_2	21.9	
時 定 数 (秒)	T_{d0}'	15.9	
	$T_{d'}'$	2.77	
	$T_{d''}$	0.022	
は ズ み 車 効 果 (t-m ²)	13414	12400	
効 率 (%)	発電機 (力率 0.95)	98.0	97.8
	発電機 (力率 1.0)	98.1	98.0
	電動機 (力率 1.0)	98.1	97.9

表 3. コイル及び軸受温度実測結果

項 目	現地試験	保証値	備 考
発電機運転 コイル温度 上昇値(°C)	固定子	62.7	工場試験値は等価ヒートラン試験による
	回転子	42.5	
電動機運転 コイル温度 上昇値(°C)	固定子	60.8	工場試験値は等価ヒートラン試験による
	回転子	32.5	
発電機運転 軸受温度 (°C)	上部軸受	54.0	スラスト軸受温度の工場試験値は設計面左となるようパッド枚数を減らして測定した値である。実測値はいずれも最高値を示す
	スラスト軸受	56.5	
	下部軸受	35	
	冷却水温	6.7	
電動機運転 軸受温度 (°C)	上部軸受	52	スラスト軸受温度の工場試験値は設計面左となるようパッド枚数を減らして測定した値である。実測値はいずれも最高値を示す
	スラスト軸受	54	
	下部軸受	35.5	
	冷却水温	7.2	

表 4. 発電電動機の振動

数値はいずれも全振幅を示す

		発 電 時	揚 水 時
軸 振 れ (mm)	上 部 軸	8/100	9/100
	下 部 軸	5/100	6/100
振 動 μ	ス リ ッ プ リ ン グ	24	20
	上 ブ ラ ケ ッ ト	14	10
	下 ブ ラ ケ ッ ト	6	2

証値を十分下回る良好な結果を得た。とくにスラスト軸受温度はポンプ水車の水圧バランスも良く非常に低い優秀な成績であった。夏場最高水温及び経年変化を考慮しても何ら心配ないもので銅板パッドスラスト軸受の効果をいかに発揮することができた。なお銅板パッド軸受の温度指示は時間おくれが少なく、また軸受表面最高温度との差も小さく、この点からも運転上の信頼性は高いといえる。

3. 3. 3 振動及び騒音

振動は定常状態及び過渡状態とも十分静かである。表 4. に現地実測結果を示す。騒音は全負荷時発電機風道内で 110 dB、風道上面床で 81 dB (数値はいずれも A 特性) である。

4. 制 御 装 置

4. 1 特 徴

この発電電動機の制御装置のおもな特徴は

- (1) 直結誘導電動機始動方式の採用
- (2) 低圧同期方式の採用
- (3) サイリスタ励磁方式の採用

であり、(1)、(2)の詳細については別稿「揚水発電始動装置及び発電機回路用大電流空気スイッチ」を参照されたい。それぞれ特筆すべきことは始動方式においてはせん(揃)速開始直前における 100%トルク制御、低圧同期方式においては国内最大容量の大電流スイッチの採用、励磁方式においては均一ブリッジ式としサイリスタ素子を引出構造のトレイに納めたこと、及び普通停止時は界磁スイッチを開放しない消磁方式の採用等である。以下にこれらの概要と試験結果を紹介する。

4. 2 直結誘導電動機始動方式

図 14. の単線図に示すように 2 台の発電電動機は 640 MVA の 3 巻線変圧器によって 500 kV 系統につながれている。始動電動機は 6.6 kV、24,500 kW、15 分定格で、発電電動機の 24 極 300 rpm に対

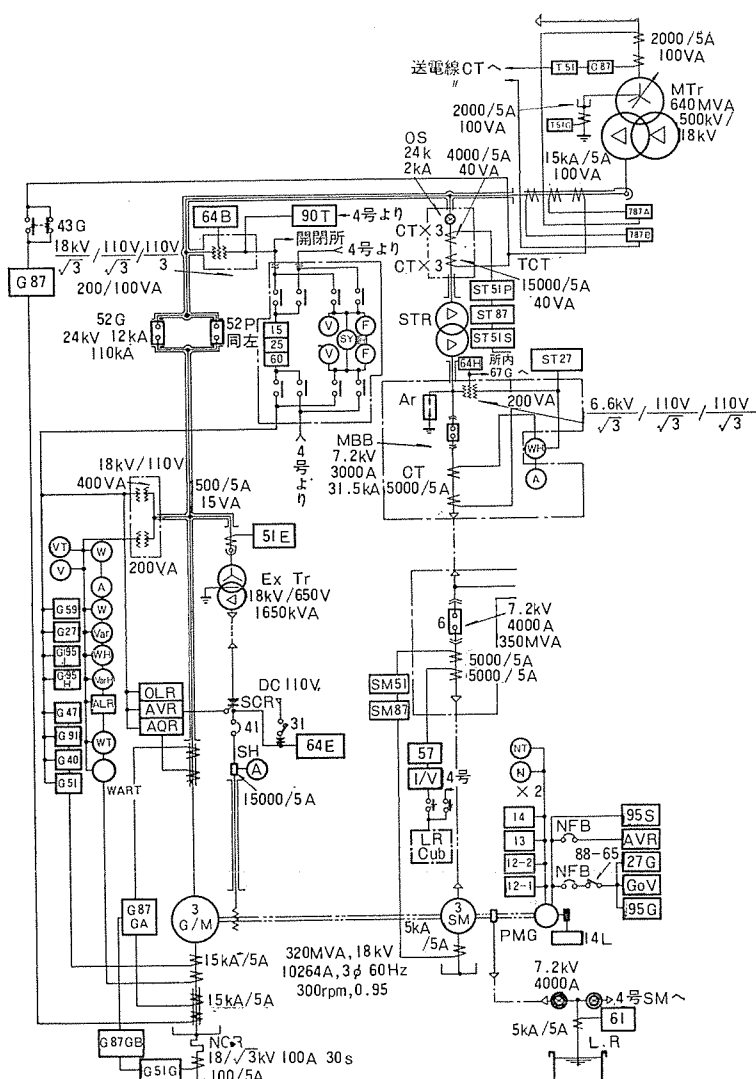


図 14. 単線接続図

し、2 極少ない 22 極 327 rpm となっており、等価容量 33 MVA の始動用兼所内変圧器を通して主変圧器の低圧側につながれている。発電電動機回路には、我が国最大の 24 kV、12,000 A の低電圧大電流空気スイッチが 52 G、52 P と 2 組設け、52 G は発電並列、52 P は揚水並列に使用し低圧側で相切換えを行っている。

誘導電動機は速度制御をする液体抵抗器は、電動機 2 台に対して 1 台を共用しているので、2 台分の始動及び予備 1 回の合計 3 回の連続始動が可能な容量に設計してある。

始動時は電解液を循環ポンプにより補助タンクから液体抵抗器本体の 6 個の電極さう (1 相当り 2 個) の下部に押し込み、オーバーフローした液は一度本体側部のサブタンクに集め補助タンクに返すことにより電極部の液温上昇を防止し、始動完了後に補助タンクの電解液を外部クーラにより冷却する方式をとっている。

始動時の速度制御は、発電電動機の周波数が 59 Hz に上昇するまでは反抗トルクの 110% のトルクを出す定電流制御をし、59 Hz になってから 5 秒間 100% トルクの定電流制御を行いせん速操作に移る方式をとっている。この 100% トルクの定電流制御によりスムーズにせん速が行われ同期並入までの時間が短縮された。100% トルクの定電流制御を開始する周波数と継続時間が同期並入までの時間に及ぼす効果等をあらかじめシミュレーションにより確かめておいたので、現地試験は非常に順調に済ませることができた。

図 15. は揚水始動の現地試験のオシログラムである。短い加速時間



図 15. 揚水同期並入試験

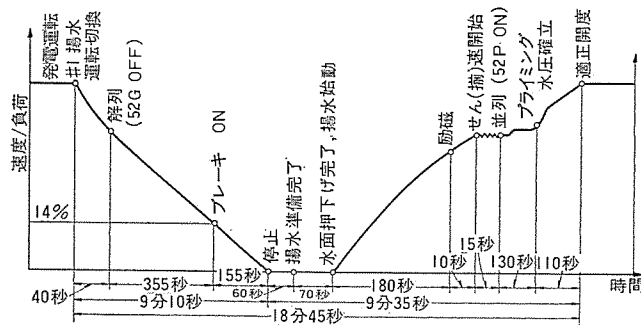


図 16. 発電→揚水切替時間

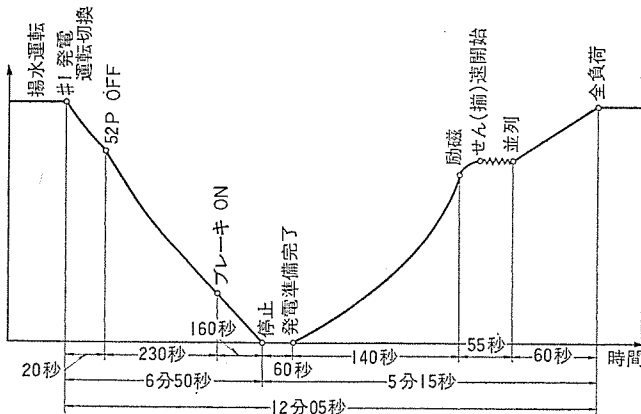


図 17. 揚水→発電切替時間

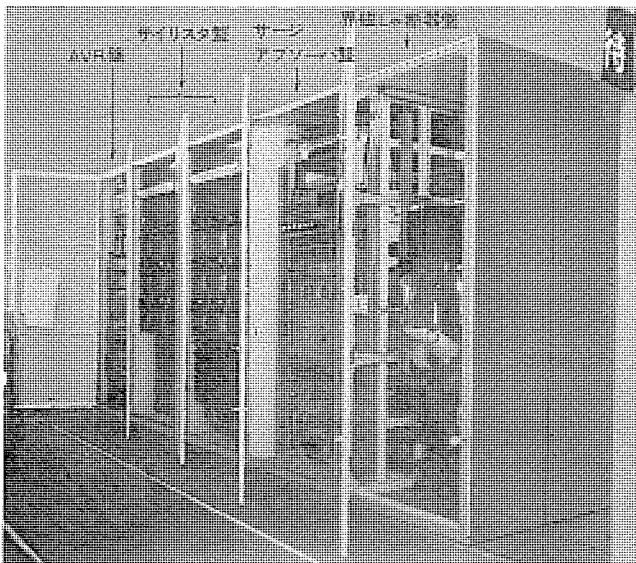


図 18. サイリスタ励磁装置

で、かつ同期速度を通過する速度上昇の第1回目の同期チャンスで必ず並列するという極めて優秀な結果が得られた。このオンは110%トルクで加速し59Hzで100%トルク制御を5秒間実施し Δf のセットが0.15Hzの自動並列装置で並入したもので#6投入から95%スピードまで3分、95%スピードから並入まで25秒となっている。

図 16., 17. に発電↔揚水切替試験結果を示す。

4.3 サイリスタ励磁装置

サイリスタ励磁装置は発電機端につながれた1,650kVA乾式変圧器を電源とする、最大電流1,720A、定格電圧433V、頂上電圧 ± 755 Vの3相全波均一ブリッジ式である。素子構成は直列枚数1、6枚並列(うち1枚余裕)を1アームとし、6アーム使用した3相全波形強制風冷式である。素子は引出構造のトレイに収められ簡単に点検できるようにになっている。

この発電所の励磁装置は計5面のキュービクルで構成されており、全体で幅4,700、奥行1,700、高さ2,300mmと非常にコンパクトである。図 18. にその外観を示す。

次にこの励磁装置の特徴になっている消磁制御⁽⁷⁾につき簡単に説明する。従来は発電電動機を停止させる際には必ず界磁しゃ断器を開いて界磁のエネルギーを放電抵抗に放電させていたが、均一ブリッジサイリスタ励磁装置の場合には界磁しゃ断器を開く必要はない。発電電動機を系統から切り離した後、AVRを除外して、サイリスタに点弧角を絞り込む一定の信号を与えてやる。そうすると、サイリスタは逆電圧を発生して、丁度界磁回路に放電抵抗がそう(挿)入されたのと同じ形になる。すなわち、サイリスタが放電抵抗の作用をするわけである。界磁の直流エネルギーはサイリスタにより交流に変換され、励磁変圧器を通して発電電動機側に帰されるインバータ運転が行われる。これによって界磁電流が減衰し、発電電動機電圧を落とすことができる。この方式は界磁しゃ断器の寿命を延ばし、起動停止ひん度の高い揚水発電所に適した方式である。もちろん発電電動機が電気的事故によって停止するときには界磁しゃ断器がトリップされるようになっている。

5. む す び

以上、ポンプ水車、発電電動機、制御装置の概要について記したが、この発電所機器の製作により、揚水発電の分野における貴重な技術を数多く積重ねることができ、今後予想される更に高落差高速大容量の機器に対しても何ら問題なく製作しうる自信を深めることができた。

終わりに、機器の設計・製作・据付・試験の全般にわたり種々有益な指導をいただいた関西電力(株)の関係各位に深く謝意を表す。

参 考 文 献

- (1) 渡辺ほか：三菱重工技報，10，No. 1 (昭48)
- (2) 安藤ほか：三菱重工技報，9，No. 1 (昭47)
- (3) 生田ほか：三菱重工技報，9，No. 5 (昭47)
- (4) 弘中ほか：三菱重工技報，12，No. 1 (昭50)
- (5) 弘中ほか：三菱重工技報，11，No. 4 (昭49)
- (6) 柴山ほか：三菱電機技報，48，No. 3, 291 (昭44)
- (7) 梅名ほか：昭和50年電気学会全国大会 No. 610

北海道電力(株)新冠発電所納めポンプ水車、 発電電動機及び制御装置

福増健二*・十倉孝之*・三谷一晃**・高木彰麻呂***

1. ま え が き

新冠発電所は北海道電力における日高電源開発の中核となる大規模ピーク用発電所で、かつ、道内における初めての揚水発電所であり、昭和45年8月着工以来、40年の歳月をかけて昭和49年8月に1号機を、同11月に2号機の営業運転開始をもって完成した。

この発電所はデリア形ポンプ水車を三菱重工、発電電動機・主変圧器などの電気機器を三菱電機がそれぞれ設計製作を担当した。

なお、発電所の基本計画の段階で北海道電力と三菱重工・三菱電機とが1年有余にわたり共同研究を行い、広範囲な落差変動、流量変化に対して安定した特性をもつランナの開発をはじめ、水路系の解析計算、揚水始動時の始動トルク、水圧推力、軸系の解析計算、揚水始動方式の解析計算等について検討を加え、その結果は実機に十分に反映された。ここにこの発電所の概要について紹介する。

2. 発 電 所 概 要

新冠発電所は混合揚水発電所であり、上流に奥新冠発電所(44MW)、下流に逆調整発電所として下新冠発電所(20MW)、岩清水発電所(5MW)がすでに開発されている。

新冠ダムは高さ102.8mのロックフィルダムで、満水位390m、総貯水量 $45 \times 10^6 \text{ m}^3$ 、利用水深40mにより、有効貯水量 $117 \times 10^6 \text{ m}^3$ を有している。

この発電所は完全地下式であり、ダムからの水は内径5.4~3.9mの2本の水圧鉄管によりそれぞれのポンプ水車に導かれ、最大使用水量 $234 \text{ m}^3/\text{s}$ 、有効落差100m、デリア形ポンプ水車2台で200MWを発電する。ポンプ水車からの水は直径6.3mの円形放水路を経て、約70m下流の直径24mの制水口形サージタンクの下部で合流し、内径7.1mの1・2号共通の放水路で下流の下新冠調整池(有効容量 $4.28 \times 10^6 \text{ m}^3$)に放流される。放水路全長は約3kmであり、サージタンクの下流216.4mの所に副水そう(槽)が設けられている。一方、発生電力は発電機より約300m離れた屋外に設置してある配電装置及び主変圧器を経て、更に約1km離れた地点に設置されている新冠開閉所で系統と連系される。

なお、この発電所の特長事項は下記のとおりである。

(1) デリア形ポンプ水車の採用

変落差特性、部分負荷特性のよいこと、及び揚水運転面で自由度が大きいなどの理由によりデリア形が採用された。

なお、103MWポンプ水車は斜流形として世界最大である。

(2) 始動方式として制動巻線始動方式を採用

経済性、系統に与える影響、機器の安全性、操作の簡便さなどを検討した結果、低減電圧制動巻線始動方式を採用した。

なお、始動時の近接系統電圧への影響を考慮し、始動回路電圧は0.4E(5.28kV)とし、主変圧器は3次巻線付とした。

(3) 無人揚水発電所として岩清水制御所より遠方制御

岩清水制御所は日高水系187kV系(発電所6、開閉所2)を集中制御するが、この発電所はそのうちの1被制御所である。また、発電、揚水時における負荷調整はAFC(自動周波数調整装置)、OTM(Ordering Telemeter)によって中給から行う事ができる。

無効電力調整は系統電圧への寄与が大きいためAQR(自動無効電力調整装置)によるVQC(電圧-無効電力制御)コントロールを行う。

表1. に新冠発電所1・2号機の定格を示す。

表 1. 新冠発電所1・2号機仕様

項 目		形 式		
ポンプ水車	水 車	立軸デリア水車		
		有効落差(m)	117	100
		水車出力(kW)	103,000	103,000
		流量(m ³ /s)	97.1	115.3
		回転数(rpm)	231	73.4
	ポンプ	揚程(m)	122	102
		ポンプ入力(kW)	102,000	102,000
		揚水量(m ³ /s)	74.2	94.3
		回転数(rpm)	231	116
		最大無拘束速度(rpm)	497	
発電電動機	電 機	速度変動率(%)	45	
		水圧値(m)	202	
		最小吸出高さ(m)	-40	
	電 機	準かさ形回転磁気全閉内冷形		
		出力(kVA)	105,000	
		電圧(kV)	13.2	
		電流(A)	4,592	
		力率(%)	95	
	電 機	周波数(Hz)	50	
		回転数(rpm)	231	
		無拘束速度(rpm)	497	
		はずみ車効果(t-m ²)	4,432	
主変圧器	電 機	励磁方式	サイリスタ励磁	
		始動方式	低減電圧(5.28kV)制動巻線起動	
			低減電圧同期引入後全電圧切換	
	電 機	特別三相送油風冷・LRT付		
		容量(kVA)	1次 105,000 kVA	
			2次 105,000 kVA	
			3次 75,000 kVA (10分間)	
	結 線	定格1次電圧(kV)	187	
		定格2次電圧(kV)	13.2	
		定格3次電圧(kV)	5.28	
		周波数(Hz)	50	
		LRTタップ	2.125 kV, 17点	

3. ポンプ水車

ポンプ水車の設計製作に当たっては、北海道電力と約1年半にわたり共同研究としてランナ開発、吸出管形状比較試験、ガイドベーン及びステーパーンの相関位置比較試験、ディスチャージリングスロート径の性能に与える影響、ランナ強度試験、実揚程試験、ランナ水圧推力測定、水圧脈動測定、ガイドベーン及びランナベーン操作トルク測定、ポンプ水車過渡現象模型試験、ランナベーン付根の応力集中係数測定、実機の1/4寸法模型による空転応力試験などの非常に膨大な模型試験を行うと同時に、既に運転中の中部電力(株)高根第一発電所納め87.3 MW デリア形ポンプ水車の製作経験を生かし、十分な検討を重ねた。

図1. にこの発電所用デリア形ポンプ水車の組立断面図を示す。

3.1 ランナ

ランナは斜流角45°、ランナベーン8枚、ランナ直径4,150 mmで実機仕様を完全に満足するランナ開発に成功した。ランナ材料は機械的性質が優れ、また耐キャビテーション性能の良い特殊ステンレス鋳鋼とした。更にランナベーンの製作にあたってはNC(数値制御)工作機械を用いて羽根翼面の加工をし、従来の手仕上げによる加工に比べ格段に加工精度の向上を計ることができた。

ランナ操作機構の潤滑のためランナボス内に満たされている油の漏油防止、及び外部からの漏水防止対策としてランナベーンカー部外周を耐油性ゴムパッキンでシールしているが、ポンプ水車は吸出管水圧が高いため、更に発電電動機の上に加工装置を設けボス内の圧油を常に4~5 kg/cm²に加圧し水の混入を防止している。また、運転中ランナの間に異物をかみ込んだ時は、ランナサーボモータの開側と閉側の油圧差の異常を検出し、警報している。

3.2 ランナサーボモータ

デリア形ポンプ水車のランナサーボモータは水車主軸と発電電動機主軸の間に設ける場合と、ランナボス内部に組み込む形式とがあるが、模型試験の結果ランナサーボモータの容量が大きくなり、ランナボス内部にサーボモータを組み込んだ場合ボスの高さが高くなり、これにより主軸受の位置も高くなり、ポンプ水車軸系の振動対策上あまり好ましくないと判断されたので前者の形式を取り、7枚羽根の回転式サーボモータとした。

3.3 ケーシング

ケーシングの入口口径は3,680 mmで60キロ高張力鋼板を使用し、現地溶接により組立てる構造とした。また、スピードリングは50キロ溶接構造用鋼板による溶接構造で、輸送面より4分割ボルト結合とし、ステーパーン枚数はガイドベーン枚数の半数の12枚とし流路水力損失が極

力少なくなるよう配慮した。

上カバー排水はケーシング巻終わりより排水できる構造とし、十分な容量の排水管を設置した。

ケーシングの設計応力は材料の降伏点の1/2とし、現地溶接されるケーシング最大板厚を21 mmとした。なお、据付けに際しては、工期の短縮を図る意味で現地水圧試験を廃止し、その代わり溶接部非破壊検査の万全を期した。

3.4 上カバー

上カバーは内外一体構造で半径方向4分割とし、スピードリングへの取付フランジは、上カバーの水圧による変形を極力小さくする意味で2重フランジとし、フランジ部の剛性増加を図った。

3.5 ガイドベーン操作機構

ガイドベーンはステンレス鋳鋼製で24枚とし、ガイドベーンに異物をかみ込んだ時の保護装置としてリンクピンの片方をせん断式弱点ピンとし、また弱点ピン折損の場合は警報することとした。

ガイドベーン操作機構のうち、水に接しない部分の軸受はオイルレスベアリングを採用し、グリス給油を廃止した。

3.6 主軸及び主軸受

主軸は鍛鋼製とし径は1,350 mmで、内部にはランナサーボモータのロータ軸が貫通し主軸内径が非常に大きいため、軸部とフランジ部とは別鍛造とし、溶接により接続した。

主軸受はセグメンタル形とし、パッド数は12枚とした。

3.7 主軸封水パッキン

主軸封水パッキンは既にポンプ水車において5年間の運転実績を有する非常に高性能な特殊テフロンパッキンを採用した。

3.8 吸出管

吸出管は、土木工事費の大幅な節減が可能な流路幅の狭い新開発の吸出管を採用し、下流側でドラフトトンネルと円形断面で接続する構造を採用した。

3.9 入口弁

ポンプ水車用入口弁としては、初めてのパイプレンパルブを採用した。水車方向及びポンプ方向流れの性能模型試験も実施し、従来のレンズ形バタフライパルブよりも一段と優れていることを確認した。

3.10 調速機及び圧油装置

調速機は電気式調速機TEA-3形を採用し、電気ガバナとしての通常の制御装置のほか、ランナベーン自動制御装置(水位差開度調整装置)、出力制限装置及び入力制限装置を具備している。なお、アクチュエータは制御油圧の高圧化に対応してコンバータに改良を加え、70 kg/cm²までの制御油圧に対しても使用可能のものを開発し採用した。

圧油装置は調速機用、入口弁用に共用とし、ユニット式であり、使用圧力は40 kg/cm²を採用した。

3.11 吸出管水面押し下げ用空気圧縮装置

ポンプ水車2台に対し空気圧縮機3台を設置するセントラル方式が採用され、圧縮機からの吐出空気は清浄器を経て1、2号おのおのの空気タンクに送入される。空気タンクの常用圧力は44 kg/cm²とし、ポンプ始動及び待機運転中に吸出管に給気し、水面を押し下げてランナを空中で回すことによりランナの反抗トルクを最小に押さえている。なお、圧縮空気はこれ以外にブレーキ用空気タンク(7.5 kg/cm²)、圧油タンク(40 kg/cm²)へも使用されている。

3.12 給排水装置

給水装置はユニット式で、主機1台につき常用機1台を設け、予備機は主機2台に対し1台を設け、いずれもドラフト取水とした。

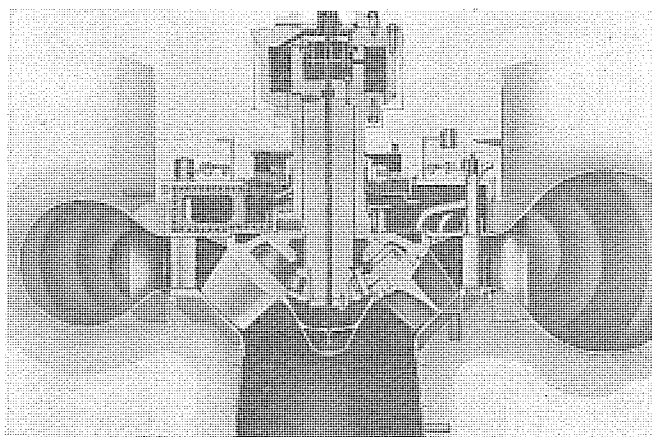


図1. ポンプ水車組立断面図

排水装置はセントラル式であり、常用水中ポンプ3台及び非常用水中ポンプ1台によって自動排水される。

4. 発電電動機

4.1 発電電動機の仕様

発電電動機は電動機始動法として制動巻線による自己始動方式を採用したが、このとき近接系統への影響を極力軽減するよう系統インピーダンス、主変圧器及び発電電動機の機器定数をすべて考慮し、系統電圧の変動及び始動時間を電子計算機を用いてシミュレートした結果、始動電圧として定格電圧の40%である5.28kVを選定した。

4.2 発電電動機の特長

図2. は発電電動機的全景写真を、また図3. は発電電動機の全体の構造を示すものである。

この発電所は全地下式であるため、掘削による土木建築費を軽減できるよう発電電動機は準かさ形とし、できる限り発電電動機全高を低くする設計とした。

4.2.1 固定子

固定子は輸送上の制限により4分割とした。また固定子コイルは、ワンターンハーフコイルで波巻構造とした。絶縁は去る昭和47年以来実機に適用されている《新ダイレジン》(エポキシ樹脂)系を含浸したB種絶縁である。この《新ダイレジン》絶縁は高温における機械的・電気的諸特性にすぐれF種としても使用可能のもので、揚水発電機のひん繁な始動停止による過酷なヒートサイクルのもとでも長年月にわたって安定した性能を発揮できる。また揚水運転時にはポンプの始動、負荷変動あるいは他号機の運転の際ダウンサージが生じ、このため入力増加が必要となる場合がある。この新冠発電所では放水路が約3kmと非常に長いので、最高揚程付近で運転している場合には、ガイドベーンを定常運転範囲の最小開度まで絞込んでも120,000kWの入力が必要となる。この《新ダイレジン》絶縁の採用により、ダウンサージによる過渡的な入力超過に対して安定した運転が可能となり、ポンプ水車の良好な運転を妨げないものとしたことができた。

4.2.2 回転子

主軸は、上部軸、スパイダボス、下部軸からなる3分割構造である。このうち下部軸はポンプ水車から受ける過渡的な振動を抑制するため特に大きな剛性を要求されるものであるが、最大輸送重量が40トンに制限されていたため、溶接構造主軸を採用して両要求を満足することができた。

回転子リムは高抗張力鋼板から打抜かれた扇形セグメントを積層し、ポンプ水車の無拘束速度に対しても十分に安全なものとした。回転子

リスとスパイダボスの結合には当社独特のスプリングキーを採用し、過速度時でもリスとスパイダボスの間の締付力を確保できるものとした。

磁極は落鋼板を積層して形成し、ダブテールによって回転子リムに固着されている。この磁極表面には強力な制動巻線が埋込まれているが、特に始動時の特性を検討した結果、特殊高抵抗銅合金を採用するとともに、始動時の多量の発熱を効果的に冷却するため、制動巻線導体と磁極鉄心の熱伝導を良くするよう留意した。

4.2.3 スラスト軸受

スラスト軸受は当社標準のキングスベリー形で、可逆回転発電電動機のためセンタ支持方式とし、12枚のパッドの荷重分担を均一にするため、各ピボットの下にはロードセルを設けたので容易に荷重分担を調整することができる。また、スラスト油そうを小さくして発電機全高を低くするため、軸受油冷却器は軸受油そう外に設置し、潤滑油は別置の電動ポンプセットで循環冷却させるものとした。更に、軸受油そうには点検窓を設け、ここから容易にパッドを交換できる構造とした。

この発電電動機は前述のように制動巻線による自己始動方式が採用されているため、特に始動初期のスラスト軸受摩擦トルクを小さくする必要があるため、十分の容量を持つオイルリフト装置を設置した。

4.2.4 その他

揚水運転時の振動抑制のため、主軸、ブラケットなどの軸受支持構造物は特に強固なものとした。更に下ブラケットについては、ポンプ水車

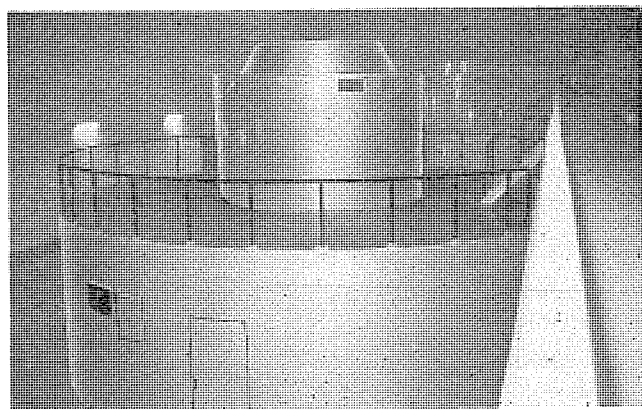


図2. 発電電動機全景

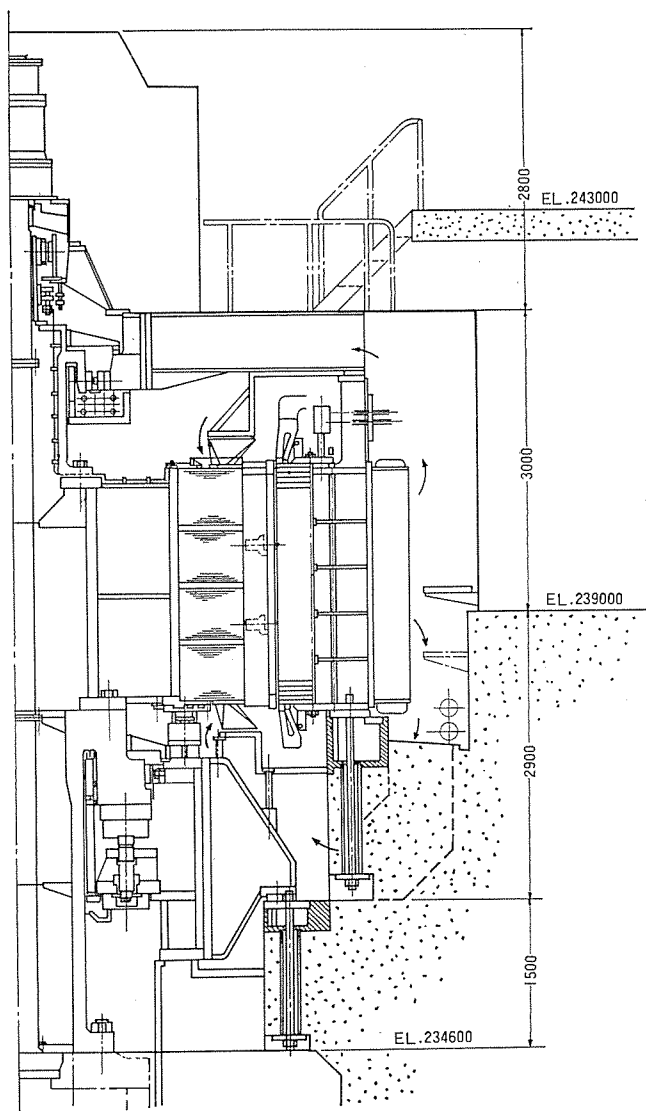


図3. 発電電動機組立断面

の過渡状態における水圧推力の変化に対しても上下方向のたわみの少なくなる構造とした。

5. 運転制御装置

5.1 回路方式

図4. は新冠発電所の単線接続図を示す。

地下の発電電動機から出た主回路ケーブル（約300 m）はそのまま地上の13.2 kV キュービクルに導かれ、相反転断路器、全電圧しゃ断器、始動しゃ断器などを通して、相分離母線を経て主変圧器に接続される。主変圧器からは187 kV 送電線2回線で約1 km 離れた新冠開閉所へ導かれる。

5.2 運転制御

運転制御方式は岩清水制御所からの遠方制御方式で、運転パターンは発電、揚水、発電待機（調相）及び揚水待機が可能であり、また保護方式は非常停止、急停止、緩停止及び軽故障となっている。なお、この発電所は発電及び揚水制御の考え方をできるだけ同一とするよう配慮したのでシーケンスが簡単になっている。

5.2.1 ポンプ水車運転制御装置

この発電所は水車運転、ポンプ運転のほか、調相運転の機能を有し、またランナベーンはガイドベーン開度に対してカムで連動するため、落差・入出力の幅広い使用範囲に十分安定した運転が可能である。図5. に水車運転及びポンプ運転の始動、停止チャートを示す。ポンプ始動に際しては、空中始動した後に入口弁を開けるシーケンスにすることにより、ドラフト排気を十分にし、プライミング水圧を確実に立たせる方式を採用した。

またこの発電所は下流にサージタンクを設けているため、1台運転時に他号機を始動したとき、あるいはAFC運転において、水路系のサージングにより有効落差が変化し、入出力が定格を超える場合があるので入力制限装置及び出力制限装置によりこれを制御する方式をとっている。

5.2.2 励磁装置

励磁装置はサイリスタ式静止励磁装置を採用した。下記は主な仕様である。

(1) 頂上電圧及び出力電流 440 V, 1,200 A

(2) 整流方式 1S×4P×6アーム（1P取付予備）、3相全波混合

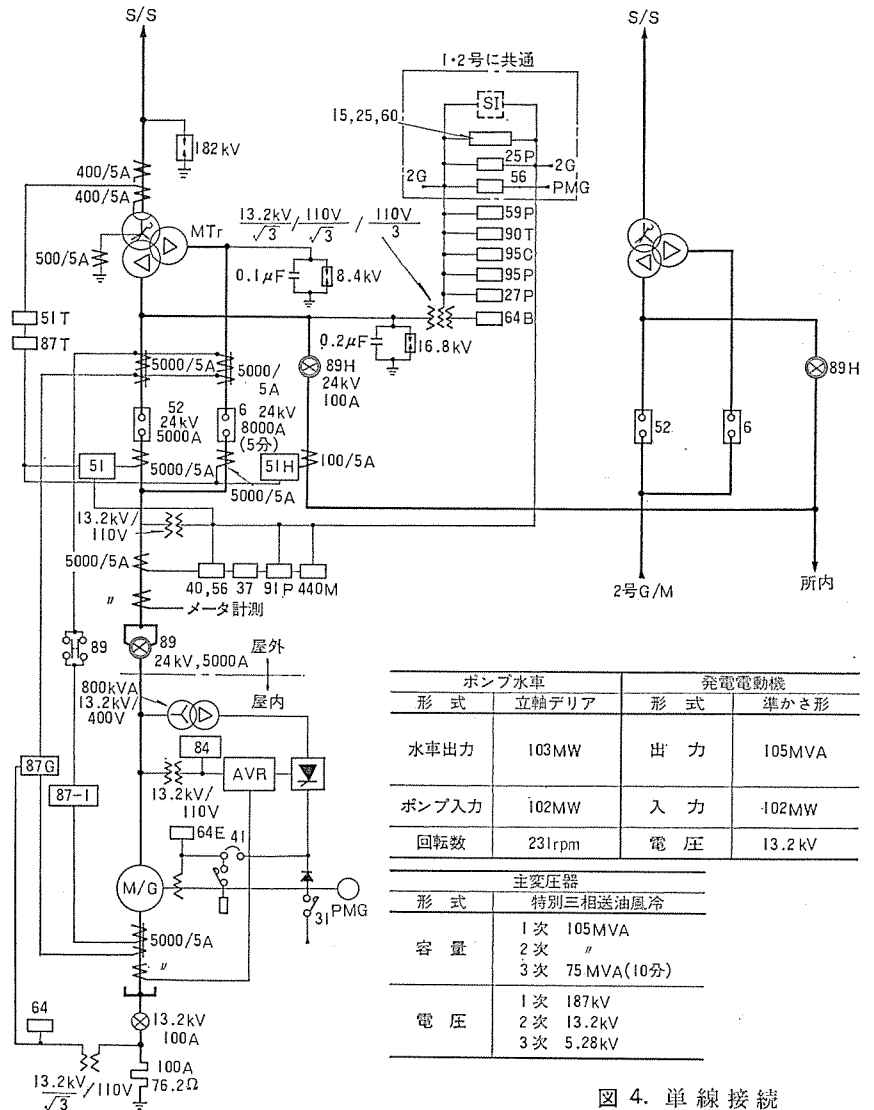


図4. 単線接続

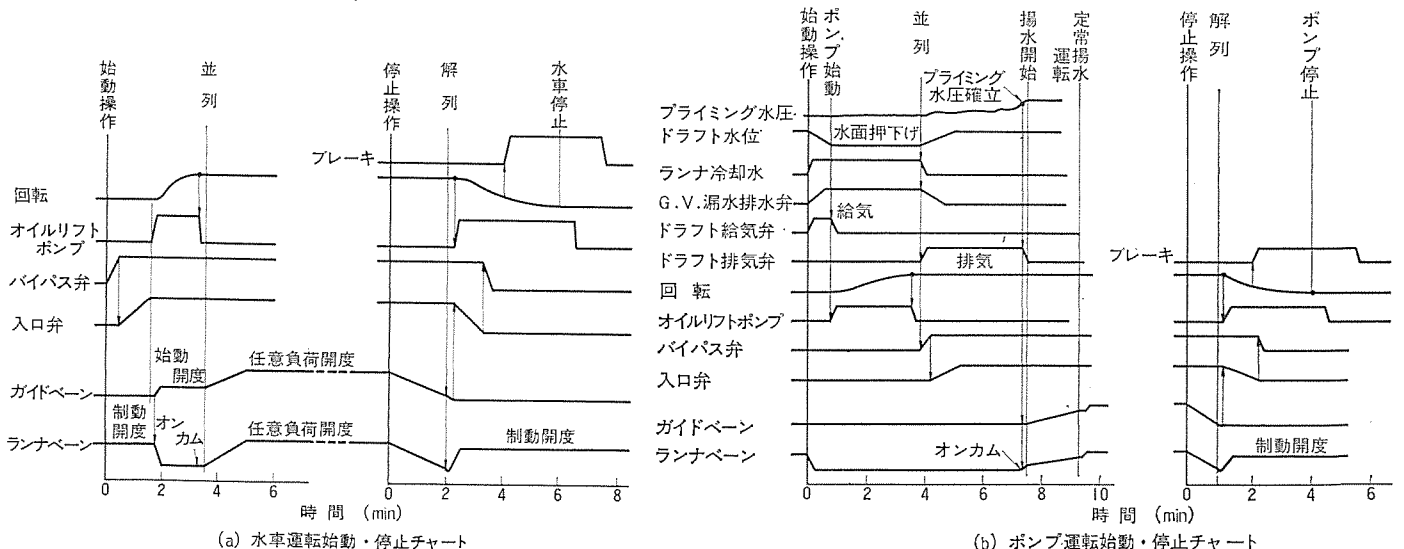


図5. 水車及びポンプ始動・停止チャート

(3) 励磁変圧器 油入自冷形, 800 kVA, 13.2 kV/400 V

(4) AVR MWTA 形

(5) 特殊付属装置

- i) AQR(自動無効電力調整装置) Q=一定であり発電及び揚水とも使用
- ii) APFR(自動力率調整装置) 強励 40°~弱励 40°(揚水用)
- iii) PSS(系統安定化装置) 発電及び揚水とも使用
- iv) MEL(最低励磁制限装置) "
- v) OEL(過励磁制限装置) "
- vi) 励磁量設定器 低減電圧同期用(揚水用)

5.2.3 13.2 kV キュービクル

図 4. にも示されるように、低圧同期システムであり、同期しゃ断器は 10-C-250 S 形(24 kV, 5,000 A) 空気しゃ断器を使用した。なお始動しゃ断器は 10-C-50 FS 形(24 kV, 8,000 A) を使用し、時間定格は始動母線とともに 5 min とした。

5.2.4 主配電盤

この発電所は遠方制御されるため、必要最小限の器具構成及び盤構成とした。特に制御リレー及び補助リレーは高信頼化が要求されたため、その選択には万全を期した。

なお運転パターンは下記の 3 個のスイッチで決定する。

- (1) #43 GP (発電-揚水切換スイッチ)
- (2) #1 (主幹スイッチ)
- (3) #1 S (待機用スイッチ)

43 GP を「発電」, 1 S を「解除」, #1 を「運転」とすれば発電運転される。
 43 GP を「発電」, 1 S を「待機」, #1 を「運転」とすれば発電待機(調相)運転される。
 43 GP を「揚水」, 1 S を「解除」, #1 を「運転」とすれば揚水運転される。
 43 GP を「揚水」, 1 S を「待機」, #1 を「運転」とすれば揚水待機運転される。

図 6. はその主配電盤を示す。



図 6. 主配電盤

6. 試 験

6.1 現地効率試験

現地効率試験は、超音波法により水車及びポンプ運転の双方について実施した。図 7. に水車効率試験結果を、図 8. にポンプ効率試験結果を示す。

水車効率は、図 7. に示すように模型試験結果に対し非常によく一致しており、ムーディ 1/5 乗換算によるフルアップの模型換算効率とほぼ一致した性能を得ることができた。ポンプ効率は、ムーディ 1/5 乗換算とし、その効率上昇分を、揚程と流量の上昇に等しく振り分けて得た効率曲線と実測値は、図 8. に示すように効率曲線としてはその傾向が多少ずれた結果が得られたが、平均的にはかなりよく模型と実機が一致しているといえる。

6.2 ポンプ水車運転特性

このポンプ水車ランナは、無負荷運転時の特性向上に重点を置いて設計されたため、無負荷から全負荷に至るまでの水圧変動、上カバの振動及び軸振れにはほとんど大差なく、大容量リア形ポンプ水車としては非常に静かで良好な水車運転特性が得られた。

ポンプ運転は水車運転時に比べると、上カバー振動及び軸振れとも多少大きくなっているが、水圧変動についてはポンプ入力によってほとんど変化しておらず、水車運転時と比較しても大差ない。

6.3 水車負荷しゃ断

水車負荷しゃ断試験は最低・基準・最高の各落差において順次試験を行い、2号機の完成後基準落差において2台同時負荷しゃ断を行った。図 9. に基準有効落差付近におけるオシログラムを示す。

ランナベーン、ガイドベーンの開鎖モード及び閉鎖速度は、模型過渡現象試験及び模型試験による特性曲線から電子計算機によって検討決定したもので、保証値を満足し予想どおりの結果を得た。図 9. から

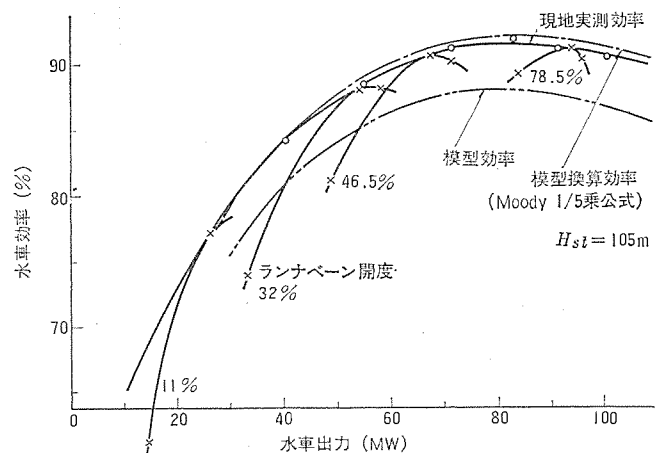


図 7. 水車運転効率試験結果(超音波法及びインデックス法)

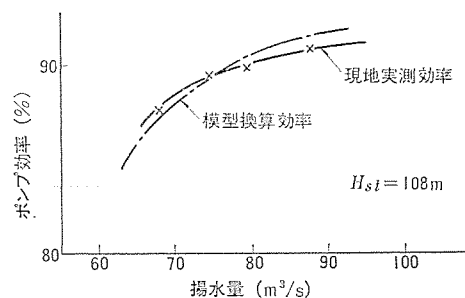


図 8. ポンプ運転効率試験結果(超音波法)

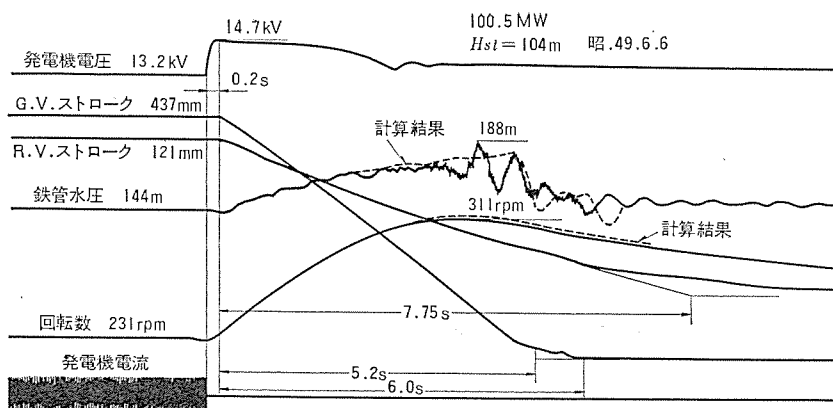


図9. 負荷しゃ断 オシログラム (4/4 負荷)

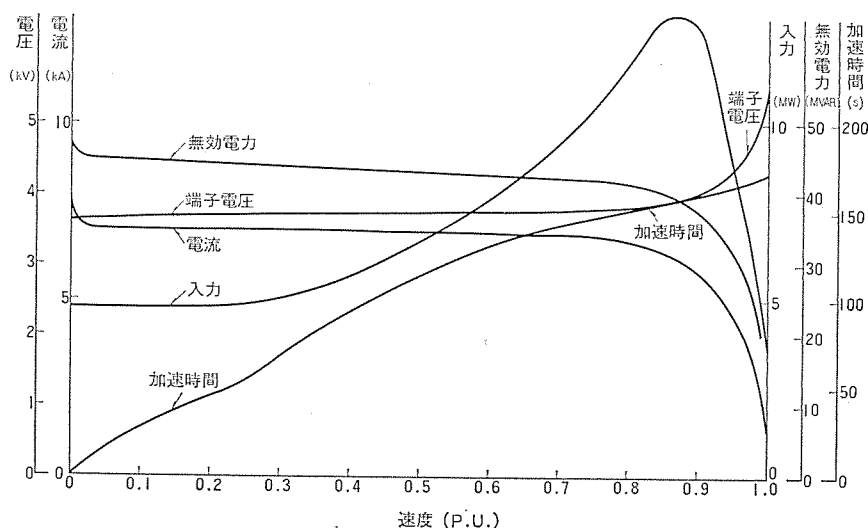


図 10. 電動機始動特性 グラフ

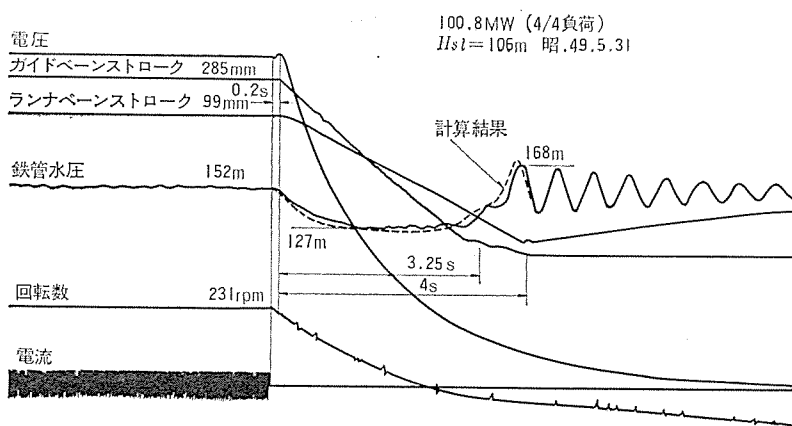


図 11. 入力しゃ断 オシログラム

表 2. 新冠発電所揚水始動時電圧変動

項 目	予 想 値	実 測 値
電動機 { 入 力 P (MW)	3.6	4.8
" Q (MVar)	46.4	47.0
端子電圧 (kV)	3.6	3.6
電 圧 { 静内 PS 66kV 側 (%)	5.2	4.1~5.2
変動率 { 新冠開閉所側 (%)	7.5	7.6

分かるようにデリア形ポンプ水車では、フランシス形ポンプ水車と比較して高周波の水圧脈動はそれほど大きくない。これは、ランナベーンが可動で急閉鎖されるためであろう。

6.4 電動機始動試験

新冠発電所は経済性と操作の簡便さから、低減電圧制動巻線始動方式を採用した。これは発電電動機回転子の制動巻線による自己始動方式であり、始動時の電圧降下によって系統に対する影響が心配されたが、結果は表 2. に示すように、予想値と大差なく良好であった。なお、図 10. に電動機の始動特性を示す。

6.5 ポンプ始動

フライング水圧確立後、ガイドベーン、ランナベーンをカムにより定められた開度関係を保ちつつ徐々にあけて揚水を開始する。ポンプの始動過程は極めて静かで水車室での体感的印象では、始動過程における低流量域での逆流が消滅して定常運転に入る点がほとんど認識できない程度であった。

6.6 ポンプ入力しゃ断

制御方式を簡単にするため、しゃ断モードは水車負荷しゃ断と全く同一にした。図 11. はポンプ入力しゃ断オシログラムの一例を示す。水車負荷しゃ断と異なり、回転速度が低下するので、極めて静かにしゃ断され、水圧変化も計算値とよく合っている。

7. む す び

以上ポンプ水車、発電電動機、運転制御装置及び現地試験の概要について記したが、このプラントの完成により三菱の揚水技術が更に前進したものと確信する。

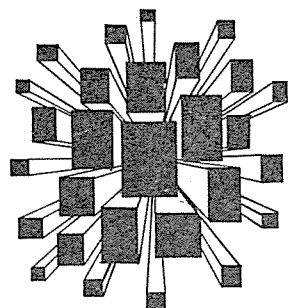
最後にこのプラントの完成にあたり、種々協力いただいた北海道電力(株)の関係各位に深く謝意を表する。

参 考 文 献

- (1) 芝山ほか：発電水力 No. 134 (昭 50 - 1)
- (2) 橋本ほか：電気評論 60, 5 号

登録番号	名 称	考 案 者	登録番号	名 称	考 案 者
1050953	内燃機関点火装置	市 川 和	1053365	機関着火用配電器の遠心進角装置	荒川利弘・山根恒夫
1050954	応荷重装置	三 橋 英 一	1053366	ブラウン 管	小 舟 英 喜・西 沢 文 俊
1050955	回転電機の スリップリング	福 吉 拓 雄・荒 田 耕 一	1053367	照明器具	保 田 智 行・井 上 員 成
1050956	膨張式救命いかだ	大久保貫一・木名瀬武男	1053368	照明器具用 セード	保 田 智 行・井 上 員 成
1050957	がい(碍)管の注成型	藤 井 範 秋	1053369	回転電機の回転子	松 野 博
1050958	エレベータ かが室の目地保持装置	宮 城 晃	1053370	電気掃除機の集じん(塵)量表示装置	南 日 国 伸
1050959	電気 ストーブ	慶 野 長 治・後 藤 完 二	1053371	照明用 カバー	保 田 智 行・井 上 員 成
1050960	電気加湿器	市 村 伸 男・宇 佐 美 忠	1053372	照明器具	松 尾 治・井 上 員 成
1050961	電気加湿器	市 村 伸 男・宇 佐 美 忠	1053373	燃焼装置	伊 藤 利 朗・野 間 口 有
1050962	エレベータ 乗場の防火扉	藤 松 高 明	1055731	直付形けい光灯器具	{小笠原善丸・山 崎 肇 保 田 智 行
1050963	は(把)手の固定装置	立 石 俊 夫	1055732	電動噴霧器	{武 井 久 夫・服 部 信 道 森 田 清 司
1050964	油圧 サーボ 弁装置	荒 井 伸 治	1055733	往復形電動圧縮機	高 田 宏
1050965	管状発熱体取付装置	慶 野 長 治・後 藤 完 二	1055734	電動噴霧器	{武 井 久 夫・服 部 信 道 岩 田 尚 之・森 田 清 司
1050966	熱交換形 ガス 暖房装置	石 田 明 夫・野 沢 栄 治	1055735	電動噴霧器	{武 井 久 夫・服 部 信 道 岩 田 尚 之・森 田 清 司
1050967	石油 ストーブ の燃焼筒	杉 内 豊・斎 藤 勝	1055736	凝縮器の取付装置	中 島 勇
1050968	温風機	石 田 明 夫・野 沢 栄 治	1055737	脚取付装置	田 中 宏
1050969	暖房器具の発熱体取付装置	鈴 木 清 治	1055738	機器 ユニット 引き出し装置	水 溜 和 哉
1050970	コードペンダント つり具	井 上 員 成	1055739	伸線装置	阿 部 勇
1050971	けい光灯 スタンド	保 田 智 行・露 木 昇	1055740	アンテナ	徳 岡 清 史
1050972	ストーブ	吉 野 昌 孝・森 崎 隆 雄	1055741	スイッチ 取付板の固定装置	川 合 輝 一
1050973	摩擦式連結装置	小 林 良 治	1055742	焼入装置の被焼入物取付機構	富 山 昭 夫・上 田 時 芳
1050974	空気調和装置	鈴木太八郎	1055743	電子機器用きょう(筐)体	{森 谷 照・藤 田 慎 一 大 矢 博
1050975	温水器用陽極棒	桜 井 信 捷・藤 田 喜 助	1055744	鉄心締付装置	白 井 満
1050976	空気調和機の集じん(塵) フィルター の係止装置	鈴木太八郎	1055745	電力量計などの端子ボックス固着装置	三 浦 晋・下 江 利 洋
1050977	最大需要電力計	相 田 利 光・桜 井 五 十 次	1055746	油入電気機器の防振装置	平 井 正 好・武 智 盛 明
1050978	締結装置	鈴木太八郎	1055747	変圧器の鉄心締付装置	藤 岡 泰 治・白 井 満
1050979	位相検出装置	仁 科 重 雄	1055748	パルス 発生装置	林 正 之・元 木 義 明
1051644	扉制御装置	竹 中 岑 生	1055749	系統分離監視装置	{林 重 雄・山 田 郁 夫 石 田 芳
1052375	制御極付半導体整流素子を使用した整流装置	佐野善之助	1055750	系統分離監視装置	石 田 芳
1052376	反射式 オープントスター	{野 畑 昭 夫・原 崎 実 丹 野 正 道	1055751	機関着火用配電器	{荒川利弘・伊 槻 禎 之 山 根 恒 夫
1052377	空気 ポンプ	坂 本 敏 之	1055752	表示装置	山 崎 英 蔵・大 川 清 人
1052378	電子調理器	池 田 宏 司・望 月 雅 之	1055753	表示装置	大 川 清 人・渡 辺 治
1052379	導体制御整流素子の短絡時負荷保護装置	{中 村 富 家・高 梨 靖 士 菊 地 弘 文	1055754	自動輝度制限回路	丹 羽 喜 一
1053355	高周波加熱装置	望 月 雅 之	1055755	内燃機関点火装置	日 野 利 之
1053356	機関着火用配電器のキャップ取付装置	毛利真佐夫	1055756	リードリレー	長 尾 良 章
1053357	機関点火装置	浅 山 嘉 明	1055757	燃焼機の送風装置	慶 野 長 治・後 藤 完 二
1053358	機関制御装置	浅 山 嘉 明	1055758	照明器具用 カバー	{保 田 智 行・露 木 昇 井 上 員 成
1053359	機関点火時期調整装置	才 田 敏 和			
1053360	内燃機関点火装置	才 田 敏 和			
1053361	内燃機関点火装置	高 橋 一 智			
1053362	機関着火用配電器の換気装置	伊 槻 禎 之・橋 本 実			
1053363	内燃機関点火装置	日 野 利 之・高 橋 一 智			
1053364	内燃機関点火装置	多 田 靖 夫			

特許と新案



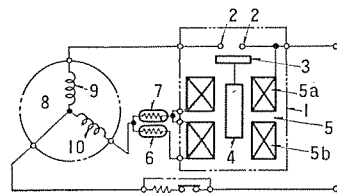
電 磁 開 閉 器 (実用新案 第 992882 号)

考 案 者 松 尾 正 孝

この考案は閉成した接点がある時間経過後強制的に開くようにした電磁開閉器に関するものである。

図を参照して、この考案になる電磁開閉器を单相誘導電動機に組合せた実施例につき説明すると、電磁開閉器(1)は二つの電磁線輪(5a)(5b)を具備するとともにその各電磁線輪に負特性サーミスタ(6)および正特性サーミスタ(7)をそれぞれ接続し、この両サーミスタはあらかじめ一体成形するか、近接して配置させている。いま、電動機(8)の主巻線(10)に通電すると、電磁開閉器(1)に吸引電流が流れる。当初両サーミスタ(6)(7)は温度が低いため、負特性サーミスタ(6)の抵抗は大きく、正特性サーミスタ(7)の抵抗は小さいから、電流は一方の電磁線輪(5a)および正特性サーミスタ(7)の流れ、プランジャ(4)を吸引して接点(2)(3)を閉じ、補助巻線(9)に通電する。そして、ある時間経過すると、正特性サーミスタ(7)は自己発

熱により温度が上昇し、同時に負特性サーミスタ(6)の温度も上昇する。電動機(8)の起動完了時に正負両サーミスタ(6)(7)が臨界温度に達するようにしておけば、負特性サーミスタ(6)の抵抗は激減し、また、正特性サーミスタ(7)の抵抗は激増する。したがって、電流は負特性サーミスタ(6)を介して二つの電磁線輪(5a)(5b)に流れる。そして、二つの電磁線輪の合成電磁線輪のコイル中心よりプランジャ(4)の中心が接点側にあるため、プランジャ(4)を引落して電磁開閉器(1)の接点(2)(3)を開き、補助巻線(9)を外して電動機(8)は運転状態に入る。



アンチバックラッシュ駆動方式 (特許 第590733号)

発 明 者 遠 藤 義 昭

この発明は負荷慣性率、負荷駆動系の機械的たわみ、そしてモータの慣性率の三者によって構成される共振系が存在する中で、アンチバックラッシュ駆動を最も効果的に行うようにしたアンチバックラッシュ駆動方式に関するものである。

この発明の要旨を図を参考にして説明すると、位置指令値 P_i に対する負荷位置 P_0 の位置誤差 E_p が増幅器(2)により増幅されて、原動機(20)の速度制御ループ(31)と原動機(21)の速度制御ループ(32)との速度入力 R_i となり、原動機(20)の速度 R_{01} と速度入力 R_i との速度差 E_{r1} 及び原動機(21)の速度 R_{02} と速度入力 R_i との速度差 E_{r2} はおのおの増幅器(5)及び(6)で増幅され、それらの信号のうち、図3の機械共振系の最低の共振(又は反共振)周波数より低い周波数成分はローパスフィルタ(9)及び(10)を通過して加算器(11)で加算され、その極性が正の場合は正極性通過回路(12)を通過して正回転方向のフリトルクを与える信号 T_p と共に加算器(14)、出力増幅器(16)、電流又は油圧検出器(18)によって構成される原動機(20)の電流制御ループへの入力となり、原動機(20)の電流に従ってその発生

トルクが正回転方向にフリトルクを与える信号と $E_{r1} + E_{r2}$ のうち最低共振(又は反共振)周波数より低い周波数成分で正回転方向に原動機(20)を駆動する信号との和によって制御され、従って原動機(20)のトルクは $E_{r1} + E_{r2}$ のうち最低共振(又は反共振)周波数以下の周波数成分で正極性の信号に対しては図2の領域Aにおける図2のaのごとき関係で制御される。

加算器(11)の出力が正の場合、加算器(15)、出力増幅器(17)、電流又は油圧検出器(19)によって構成される原動機(21)の電流制御ループへの入力のうち、共振周波数以下の成分は原動機(21)が逆回転方向にフリトルクを与える信号 $-T_p$ のみで、この信号により原動機(21)は E_{r1} , E_{r2} に無関係にフリトルクのみを発生し、従って原動機(21)のトルク $E_{r1} + E_{r2}$ のうち最低共振(又は反共振)周波数成分で正極性の信号に対しては、図2の領域Aにおけるbのごとき関係となる。同様に $E_{r1} + E_{r2}$ のうち最低共振周波数以下の周波数成分で負極性の信号に対しては原動機(20)及び(21)のトルクは図2の領域

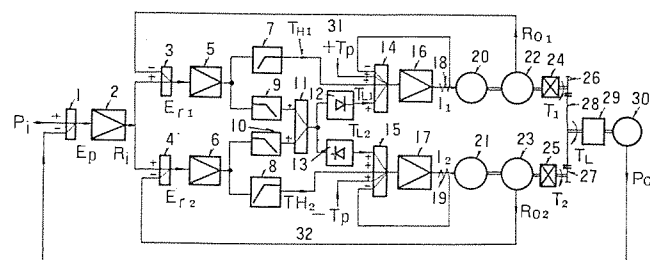


図 1

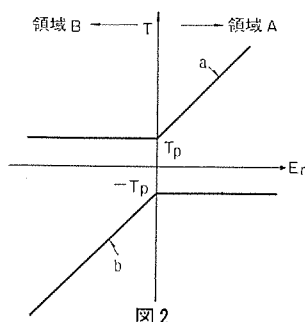


図 2

Bにおけるa及びbの関係で制御される。

以上のように、この発明によれば、負荷トルクがフリトルクを越え

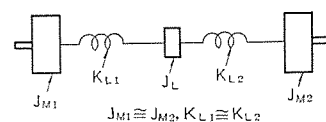


図 3

特許と新案

でもアンチバックラッシュ効果がなくなり、又フリトルクが回転中、場所や速度によって変化することがなく、機械的構成も従来のものと比較し簡単であり、小さな計器サーボから大形サーボ機構まで広く適用

することが出来、特に負荷の機械共振が問題となるようなサーボ系に適用することにより、安定で極めて高精度のサーボ機構を構成することが出来る。

直 流 チ ョ ッ パ 装 置 (特許 第674797号)

発 明 者 小 嶋 鈴 夫

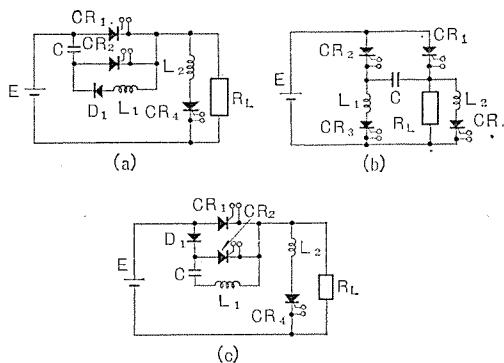
この発明は、サイリスタ式チョッパのオフ期間中にある一定期間負パルスを生じさせ、このパルスにより負荷を逆バイアスするようにした直流チョッパ装置に関するものである。

図に示す(a)(b)(c)の各回路は、いずれもこの発明の回路であるが、(b)の回路についてその動作を説明する。まず主サイリスタ CR_1 と補助サイリスタ CR_3 を同時に点弧すれば、電流は電源Eから主サイリスタ CR_1 を通して負荷 R_L へ供給される。一方転流コンデンサCには転流リアクトル L_1 との共振で、電源E-主サイリスタ CR_1 -転流コンデンサC-転流リアクトル L_1 -補助サイリスタ CR_3 -電源Eなる閉ループで共振電流が流れ、転流コンデンサCは右が正の極性となるように充電される。転流コンデンサCの充電完了後、補助サイリスタ CR_3 はオフとなるが、主サイリスタ CR_1 はそのまま導通状態を維持するので、負荷 R_L には引き続いて電流が流れる。

次にチョッパのオフの指令信号が補助サイリスタ CR_3 、 CR_4 のゲートに印加されると、転流コンデンサCの電荷は、C- CR_1 - CR_2 -C、E- CR_3 -C-リアクトル L_2 - CR_4 -E、E- CR_3 -C- R_L -Eなる三つの閉ループで放電する。上記第1の閉ループで主サイリスタはオフする。上記第2の閉ループで、転流コンデンサCとリアクトル L_2 とに流れる共振電流で、

負荷 R_L が逆バイアスされる期間が発生する。なおこの期間は軽負荷で小さくなる傾向にある。リアクトル L_2 の電流が反転する時転流コンデンサCの充電は逆転し、左側が正となって次のチョッパのオンの指令信号に備える。

このようにこの発明によれば、チョッパのオフ時のある一定期間、負荷を逆バイアスして非対称交流波形を極めて容易に得ることができ、又チョッパのオン、オフ比を大きくすることにより負荷回路におけるサイリスタの実質的な直流制御が容易となるものである。



燃 焼 装 置 (特許 第692302号)

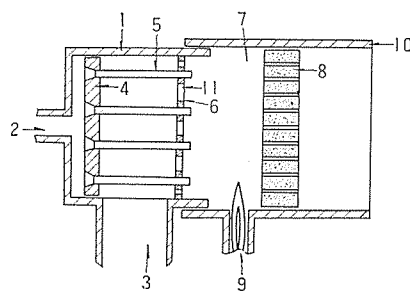
発 明 者 伊 藤 利 朗・野 間 口 有・田 畑 則 一

この発明は、燃料及び空気を分割して燃焼室に投入するようにして空気と燃料ガスの混合効果を高め、且つ燃焼室に設置された熱触媒を利用して負荷率の高い燃焼を静かに行なわせるようにした燃焼装置に関するものである。

この発明の要旨を図を参考に説明すると、燃料ガス投入口(2)より送り込まれた燃料は、分流板(4)に取り付けられた分流管(5)によって予備燃焼室(7)に送られる。一方、空気送風口(3)より送られた空気は混合板(6)にけられた空気通孔(11)を通して予備燃焼室(7)に入る。パイロットフレーム投入口(9)より予備燃焼室(7)にパイロットフレームがのびると予備燃焼室(7)内の混合気体に点火され、燃焼が本格的に開始される。点火後10数秒にして熱触媒(8)は高温に加熱され、それにけられた細孔の内表面でほとんどフレームレスの燃焼となる。従って熱触媒(8)の下流は若干の空間を設けるだけで直ちに熱交換器あるいは煙道を熱利用の形態に合わせて適当に取

り付けることが出来る。

この発明の要点は混合板(6)と分流管(5)及び混合板(6)にけられた空気通孔(11)を適切に配置し、燃焼の立上がりやゆるやかに且つ安定にして、燃焼による騒音を極めて小さくするようにした事であり、更に熱触媒(8)を設けることによって小形高能率な燃焼装置が得られる。



ホログラフィによる立体像記録

高田 真蔵*・宮沢 生行**・水本 洋一**・西 和郎**・茶之木 けい子**

1. ま え が き

ホログラフィによって立体像の記録、再生ができることは既によく知られている。ホログラフィは画像記録技術の一種であるが、光の干渉を利用して光の強度分布だけでなく位相をも記録する点が他の技術のものたない大きな特長となっており、このことが立体像再生においても特殊な眼鏡なしに、また眼の錯覚に依存することなく物体と同じ立体感で見られる像再生を可能にしている。しかし立体像再生技術としての歴史は浅く、またホログラム記録技術の特殊性からその著しい特長が生かされる道はまだ開発されておらず、実質的に実験室段階の域を出ていないのが現状である。ここで報告する立体像再生はホログラフィのみがもつ特長を生かした“見るためのホログラム再生”への試みであり、ディスプレイとしての効果を上げるためにまずなによりもホログラムの大形化をはかり、また従来ホログラムの向こう側の虚像をのぞき込むタイプが多かったのを、像がホログラムより手前にとび出すようにした。更に再生用光源として高価なレーザでなく市販のインコヒーレント光源が使えるように光学系を設計することも条件の一つとした。立体的に見えるディスプレイとしては視覚的には現物のディスプレイに及ぶものではないが、ホログラムは複製が可能で、ガラスなどで隔てられず像に触れるようにできることなどの特長があり、ショーウィンドとちがった新しい効果が期待できる。このような試みの例はすでにあり、ニューヨーク 5 番街にある宝石店 カティア の店頭でホログラムによる商品の立体像再生を行って大反響をよんだ⁽¹⁾。ホログラフィによる立体像の記録、再生方式は各種提案されている⁽²⁾が、もっとも自然に見える立体像を得るために物体から直接ホログラムを記録する方式を採用し、ホログラムの大形化によって生ずる多くの技術的問題を丹念に解決することにした。またとび出す立体像を得るために、ホログラムを2段階に分けて記録する方式⁽³⁾を使用した。この技術開発の結果、24"×32" (約600 mm×800 mm) のシートフィルムにホログラムを記録し、超高圧水銀灯で照明することによってホログラムから400 mm 以上とび出した立体像を再生することができた。なおこの開発は、いま開催中の沖縄海洋博に出展の目的で行われたものであり、三菱海洋未来館で各種立体像のディスプレイを行っている。

2. 原 理⁽³⁾

ホログラムより前面にとび出して見える立体像記録、再生の原理を簡単に説明しておく。図1.(a)で、物体照明光と参照光はレーザの光をビームスプリッターで二つに分けて適当な光学系を介して導いてきたものであり、被写体から反射してきた光(物体光)と参照光が写真フィルムの面上で形成する干渉しま(縞)を記録する。これを第1のホログラムと呼ぶ。仮にこの第1のホログラムを図1.(a)のフィルムの位置にもどして参照光と同じビームでホログラムを照明するとホログラムを通して被写体がもとあった場所に現にあるように見える。これがよく使われる虚像による立体像再生であるが、ここでは図1.(b)の

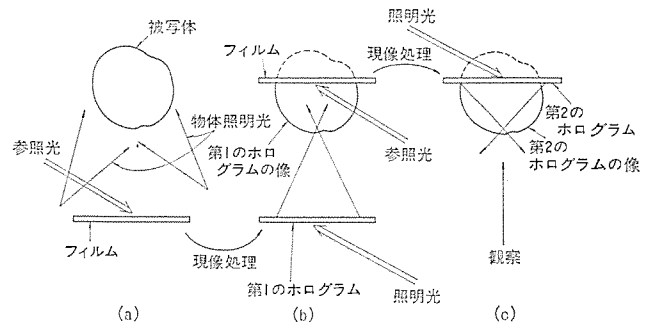


図1. 立体像記録、再生の原理

ように第1のホログラムに参照光と逆の方向から照明光をあてる。このとき照明光が図1.(a)の参照光と波面の形が同じで進行方向が逆な、つまり共役なビームになっている場合、被写体がもとあった位置に実像が結ばれる。この像もホログラムからとび出した像であり、図の上方から見ればその像を観察できるが、この像は見る人にとっては物体とはおうとつ(凹凸)が反転した奇妙な像となっている。そこで第1のホログラムと向かい合わせにフィルムを置いて第1のホログラムからの再生像と新たに設けた参照光でもう一度別のホログラムを記録する。これが第2のホログラムであり、図1.(c)のように再び図1.(b)の参照光とは逆の方向から照明光をあてる。ここで再生される像は図示した方向から見ると、図1.(b)でおうとつの反転していた像が再び反転されて、正しい立体感とおうとつをもった立体像がホログラムからとび出して見える。ホログラムより手前にある像は実像であり、反対側の像は虚像である。図から明らかなようにホログラムからの像のとび出しは第1のホログラムと第2のホログラム記録用フィルムの間隔できまり、かなりの自由度で調節することができる。上に述べたように参照光と照明光が互いに共役な場合、再生される像は被写体と同じ寸法、形状になるが、共役でないビームで再生するとき、また照明光の波長が参照光と同一でないときには再生像は被写体にたいして拡大又は縮小されて再生され、また像にひずみが生ずる。共役なビームを得るためには図1.からも理解されるようにホログラムの寸法と同等以上の寸法のレンズを必要とし、ホログラムが大形化するとそのようなレンズの入手が極めて困難になる。そこで実際にはいずれも発散する球面波を使用した⁽⁴⁾が、その影響については次章で述べる。なおここで述べた方式でなく、被写体をレンズで結像することによって直接とび出す立体像を記録する方式もあるが、レンズの明るさの制限を受けて狭い角度範囲でしか像の観察ができない欠点がある。図1.の方式はレンズの代わりにホログラムを使用することに相当する。

3. 記 録 装 置

大形ホログラムの記録装置及び記録技術は基本的には小形ホログラムのときと全く同一であるが、ホログラムの大形化にもなると小形に比較して厳しい条件設定が必要になる。その代表的なものはレーザの

表 1. アグファ・ゲバルト 10 E 56 シートフィルム の特性

寸 法	24"×32"(610 mm×813 mm)
解 像 度*	2,800 lines/mm
最 適 露 光 量	20~30 ergs/cm ²
使 用 限 界 波 長	~5,500 Å
乳 剤 の 厚 さ	5 μm (露光前)

* カタログ値

コヒーレンシー 及び ホログラム 露光中の全光学系の安定化である。これらの条件の検討を含めて大形 ホログラム 記録装置について述べる。

3. 1 感光材料

大形 ホログラム 記録に適した感光材料としては現在のところ銀塩乳剤以外にない。重要な特性は解像度、感度及び波長感度特性であり、共役でない照明光を使用する場合乳剤の厚さも検討の対象となる。高解像度乾板、フィルム の代表的な メーカーである コダック と アグファ・ゲバルト 両社の乳剤を比較した結果、アグファ・ゲバルト 10 E 56 シートフィルムを採用した。この材料の主要な特性を表 1. にまとめる。通常 ホログラム の記録にはガラス乾板が多く使用されるが、大形になった場合の取扱いの簡便さと価格の点からシートフィルムを使用した。結果的にこの選択は正しかったが ホログラム 記録では乾板より多くの困難を生じ特別の対策を必要とした。フィルム の寸法は標準品の最大寸法でありこれがここでいう大形 ホログラム の寸法である。波長感度特性及び感度は出力 1 W 級のアルゴンイオンレーザを使用することで問題を生ずることはなかったが解像度に若干の難が残っている。コダックの乳剤は感度及び乳剤の厚さに難があり、また大形フィルム の標準品が入手できないこともあって採用に至らなかった。なお現像、定着のプロセスは両メーカーの超微粒子用プロセスのいずれでも使用できるが、最適露光量その他の条件が若干異なってくる。

3. 2 レーザ

すでに述べた感光材料の波長感度特性から記録用光源としてアルゴンイオンレーザの 5,145 Å 発振光を出力約 1 W で使用した。レーザはコヒーレントな光源であるとはいえ、その発振モードによっては記録光学系における物体光と参照光の間の光路差に制限をあたえる。いまヨコモードが単一でタテモードが N 本発振している共振器長 l のレーザを考えると、光路差 L でフィルムに到達した物体光と参照光でできる干渉しまの visibility の最大値はつぎの式で表される。ただしすべてのモードは単色光で等しい出力であるとしている。

$$V = \left| \frac{\sin(N\pi L/2l)}{N \sin(\pi L/2l)} \right| \dots\dots\dots (1)$$

感光材料の線形記録を仮定すると回折効率 V^2 に比例するから回折効率を $L=0$ のときの $1/2$ にする L の値をコヒーレンス長 (L_c) と定義すると、モードの数の増加とともに L_c は小さくなる。 $N=2$ のときは $L_c=0.5l$ であり $l=2m$ とすると $L_c=1m$ となって大形ホログラムの記録にはまだ不十分である。そこでエタロンを用いたモード選択器を使用し $L_c \sim 10m$ のコヒーレンス長のもとでホログラム記録をおこなった。この条件のもとで光路差 $1m$ のときの回折効率低下の割合は約 3% となってレーザのコヒーレンシーの影響は無視することができる。

3. 3 位相差変動と対策

ホログラムの露光中に物体光と参照光の間の位相差が変動すると実効的に干渉しまの visibility が低下し、したがって回折効率が低下する。位相差変動を受けない場合に対して変動を受けたときの回折効率の相対値を η' とすると、位相差が ϕ_1 を振幅とする正弦振動をし

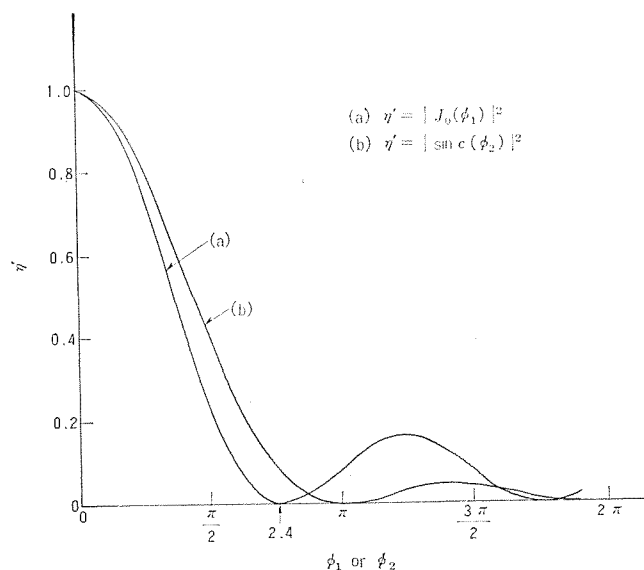


図 2. 位相差変動と回折効率相対値

ているとき、露光中に $2\phi_2$ だけ直線的にドリフトしたときについてそれぞれ次の関係が成り立つ。

$$\eta' = |J_0(\phi_1)|^2 \dots\dots\dots (2)$$

$$\eta' = |\sin \phi_2 / \phi_2|^2 \dots\dots\dots (3)$$

ただし J_0 は第 1 種 0 次の Bessel 関数である。この関係を図 2. に示す。 η' を 0.5 にする位相差変動幅はそれぞれ $\phi_1 \sim 0.35\pi$ 及び $\phi_2 \sim 0.44\pi$ であり光路長にすると波長単位で 0.18λ 及び 0.22λ となる。いずれにしても全光学系の影響を合わせて露光中に半幅で約 $\lambda/5$ 以上の光路長変動を生じてはならないことが分かる。 $\lambda=0.5 \mu m$ のときこの値は $0.1 \mu m$ となり光学系の安定化は大形ホログラムにおいては特に重要な条件である。位相差変動をひき起こす主要な要因は光学系の振動、空気の流れ及びレーザ発振光の方向変動であり、ときには温度、湿度による部品の変形が影響することもある。これらについての対策としてはまず光学系の除振がある。市販品では空気ばねの特性がもっとも優れており、約 3 Hz 以上の振動について除振効果をもつ。つぎに光学部品の固定が重要である。部品固定における基本は部品間の結合をも含めて全系の剛性を上げること及び減衰を大きくすることであり、大形の部品の固定は特に注意を要する。空気の流れ防止には光学系のしゃへいと熱源の排除をおこなう。これらのことはすべて通常の計測手段では特性の測定は不可能に近く、干渉計を用いた位相差変動の測定だけが有効であった。多くの試みの後、最終的には全光路長 6 m 以上の光学系、一辺が 1 m を超す部品を含めて ϕ_1 又は ϕ_2 を $\pi/4$ 程度まで抑えることができた。このとき η' は 0.7 以上である。

3. 4 光学系の仕様

ホログラムの記録装置における光学系のおもな仕様と関連するホログラムの特性について述べる。

参照光と照明光のホログラム面への入射角はホログラムの中心で 60° とし、いずれもホログラムから約 5 m の距離にある点光源から発する球面波を使用した。参照光と照明光の点光源はホログラムの中心に対して対称に配置する。被写体の一例では直径約 500 mm、高さ 150 mm の物体を 30° 傾けて中心をフィルムから約 600 mm の点に配置した。また第 1 と第 2 のホログラムの距離は 800 mm である。

この仕様がホログラムの特性に与える影響としては、まずフィルム面上の干渉しまの最大空間周波数は $3,000 l/mm$ を超え、フィルムの解像度の限界に近い大形ホログラムの一方の縁の近傍で回折効率が若干低下するが著しい支障は生じない。つぎにホログラムの像が観察でき

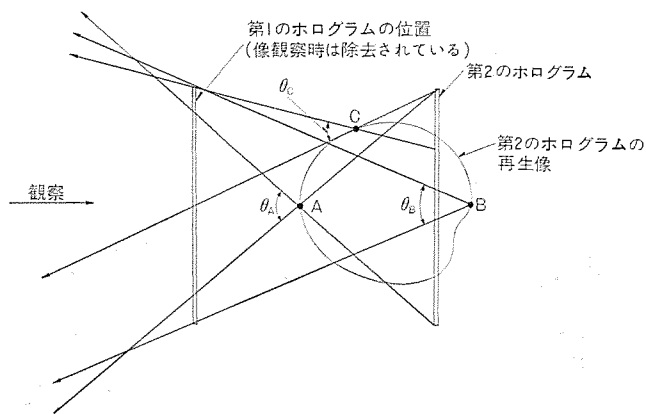
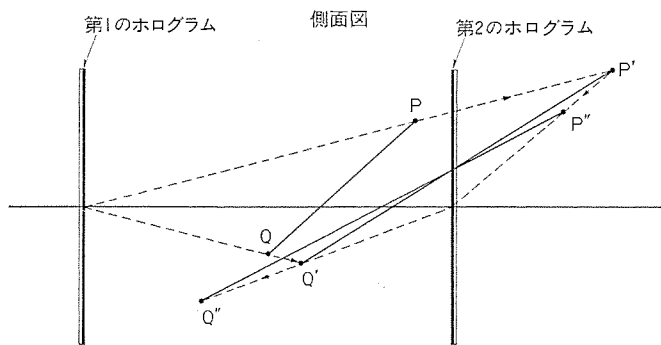


図 3. 再生角をきめる光学系の条件



P, Q: 被写体上の点
P', Q': 第1のホログラムによるP, Qの再生点
P'', Q'': 第2のホログラムによるP', Q'の再生点

図 4. 結像位置の移動

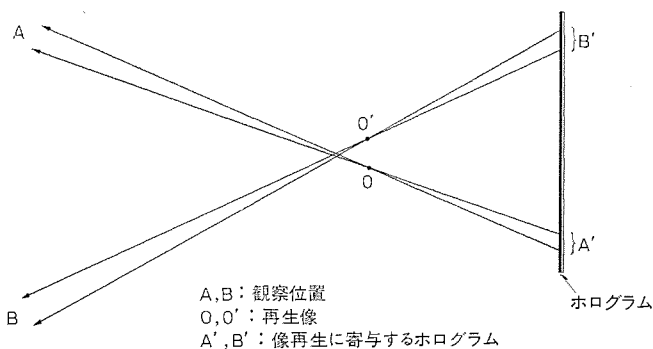


図 5. 観察位置による再生像の移動

る範囲は図 3. からわかるように、第1、第2のホログラム及び被写体の位置関係の影響をうけ、また像の各点について異なるが、先にあげた被写体の場合では像全体が観察できる角度（再生角とよぶ）は約 40° となるが、像の周辺部を犠牲にすれば実質的には約 50° の再生角が得られる。もっとも広い再生角をもつのは第1と第2のホログラムの中央にある像である。

2章で述べたように大形レンズが入手困難であるため参照光と照明光を互いに共役にする事ができず、そのために再生像に倍率とひずみが生じ、また観測点の移動によって像の位置が若干移動する現象が現れる。これらの現象の解明にはホログラフィの結像論が必要であるが、ホログラムが大形であることから近軸領域での理論は使用できず、公表された手法のうちでは光線追跡法⁽⁴⁾だけが使用できる。ここでは図によって再生像の特性の概略を述べる。図 4. は被写体上の2点について結像位置がずれていく様子を強調して示したもので、まず第1のホログラム再生においてP, QがP', Q'とホログラムから遠ざかる方向に結像される。つぎに第2のホログラムの再生によ

てP''とQ''に結像されるがP'とQ'が第2のホログラムに対して逆方向に移動している。一般にはP→P'とQ→Q'の移動が大きいため最終的には結像倍率は1以上になるが、物体上の各点について像の移動が相似にならず、したがって再生像にひずみが現れる。また被写体の一点に対応する像の結像に際してホログラムの位置に依存して異なる点に結像する。これは収差であるが、図 5. から明らかにように立体像の一点の観察に際してはホログラムの一部だけが寄与する。したがって収差は像のボケとして見え、観察点の移動と同時に像も移動するように見え、立体像が空間に固定していないように見える。以上が共役でない照明光を使用したときの再生像の振舞であるが、先に示した光学系の仕様のもとでは像のひずみと移動は小さく不自然には感じられない範囲に入っている。

4. 再生装置

4.1 再生像の解像度

有限な寸法と波長幅をもつインコヒーレント光源でホログラムを再生したときの被写体の一点に対応する像の広がりとは図 6. に示した条件のとき概略つぎのように表される。

$$\Delta x_1 \sim (d/R) \cos \alpha \cdot z \quad (4)$$

$$\Delta x_2 \sim (\Delta \lambda / \lambda) \sin \alpha \cdot z \quad (5)$$

式(4)と(5)から次のことがわかる。像をホログラムに近づけること、光源をホログラムから遠くすること、光源寸法を小さくすること、光源の波長幅を狭くすること、これらが解像度を上げることに寄与する。数値例として $d=10 \text{ mm}$, $R=5 \text{ m}$, $z=400 \text{ mm}$, $\alpha=60^\circ$, $\lambda=0.5 \mu\text{m}$, $\Delta \lambda=20 \text{ \AA}$ のとき、光源寸法と波長幅による点像の広がりとはそれぞれ 0.4 mm と 1.4 mm になる。この例は超高圧水銀灯の光を干渉フィルタを介してホログラム照明に使用したときの数値に近い。

4.2 光源の選択

4.1節の議論から高輝度及び単色性が光源に望ましい条件であることがわかるが、再生像を眼でみる装置である以上、有効なパワーの絶対値も選択の基準になる。最適な光源はあらゆる場合に同一の

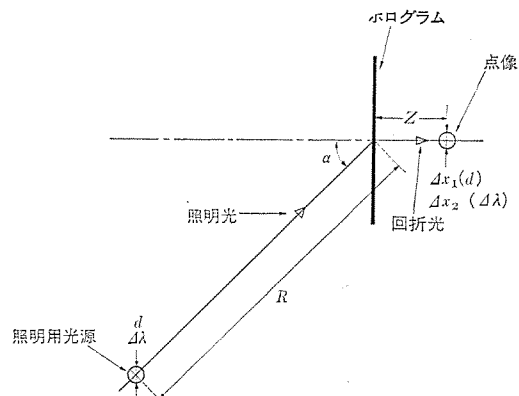


図 6. 照明用光源の寸法広がりと波長幅による点像の広がり

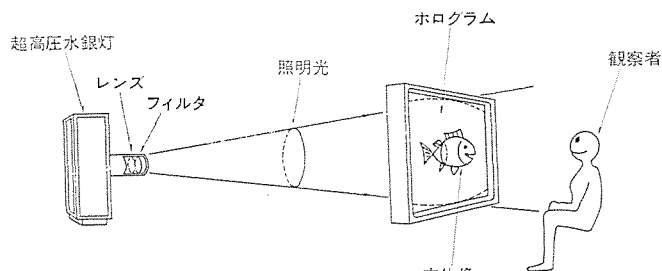


図 7. 大形ホログラム再生装置

ものになるとは限らないが、大形ホログラム再生においては市販の各種光源を比較した結果ショートアーク形の超高圧水銀灯が最適であると結論された。効率のよい再生は $5,461 \text{ \AA}$ と $5,770 \text{ \AA}$ を中心波長とする比較的狭いスペクトルについてのみ可能であり、波長選択の自由度において難がある。また大形ホログラムで 400 mm もの像のとび出しを要求するときは単色性も十分でなく干渉フィルタを必要とする。他の光源については、大電力で点灯できるクセノンショートアークランプが(効率を無視して)絶対値では水銀灯に近い特性が得られ、波長選択が自由になる。安価なハロゲンランプは放射輝度の限界と単色性の悪さ、単色性のよいナトリウムランプは輝度の低さによっていずれも水銀灯に及ばない。またこの2種の光源は電力による輝度の改善が期待できない点でクセノンランプにも及ばない。ただし比較的小形のホログラムにおいては異なった評価も可能であり、再生装置の条件によってその都度選択すべきである。

4.3 大形ホログラム再生装置

大形ホログラム再生装置の概略を図7.に示す。超高圧水銀灯(1 kW)からの光を干渉フィルタを通して入射角 60° でホログラムを照明する。水銀灯の発光部寸法は $4.2 \text{ mm} \times 2.5 \text{ mm}$ であるが、光束を有効に利用するために設置されているレンズによって作られる光源の虚像が実効的な光源となり、その寸法は $10 \text{ mm} \sim 15 \text{ mm}$ となっている。干渉フィルタは緑又はだいだい(橙)の中心波長で、波長幅約 20 \AA のものを使用した。 $600 \text{ mm} \times 800 \text{ mm}$ のホログラムに入射する有効パワーは各種損失によって 1 W 以下になっている。ホログラムと光源の距離は 5 m を標準としているが、 3 m 以上でさえあれば任意にとることができる。フィルム状のホログラムはガラスなどにはさまずに裸のままわく(枠)に取付けてある。再生像はホログラムの後側を暗くするだけで明るい部屋でも十分見ることができる。これまで記録した立体像は像の大部分が前面にとび出し、一部がホログラム面と交差して虚像となるようになっている。

5. ホログラムと再生像の特性

図8.はホログラムから再生された立体像の写真である。被写体はテーブルサンゴを食べているオニヒトデを更にホウ貝が食べているところを模したものであり、全体で直径約 500 mm 、高さ 150 mm のものを前傾させて記録した。テーブルサンゴの先端はホログラムから約 450 mm 手前にとび出しており、後方約 100 mm がホログラムの向こう側になっている。ホログラム面はホウ貝のしっぽのあたりに位置しているが眼で見ても実像と虚像は滑らかに連続している。写真はホログラムに対して(a)正面、(b)上、(c)左、(d)下から撮影してあり、サンゴの手前のボケは像のボケよりむしろカメラのピントずれ(近接撮影のため)によるものである。

ホログラムの回折効率は立体像であるため測定が困難であるが、同種の他の被写体の場合でホログラムの中心部で平均 0.8% 前後であった。なお、既に述べた各種パラメータを考慮した回折効率予測値は 1.3% である。輝度は拡散物体であるオニヒトデの場合で最高 1.6 fL で

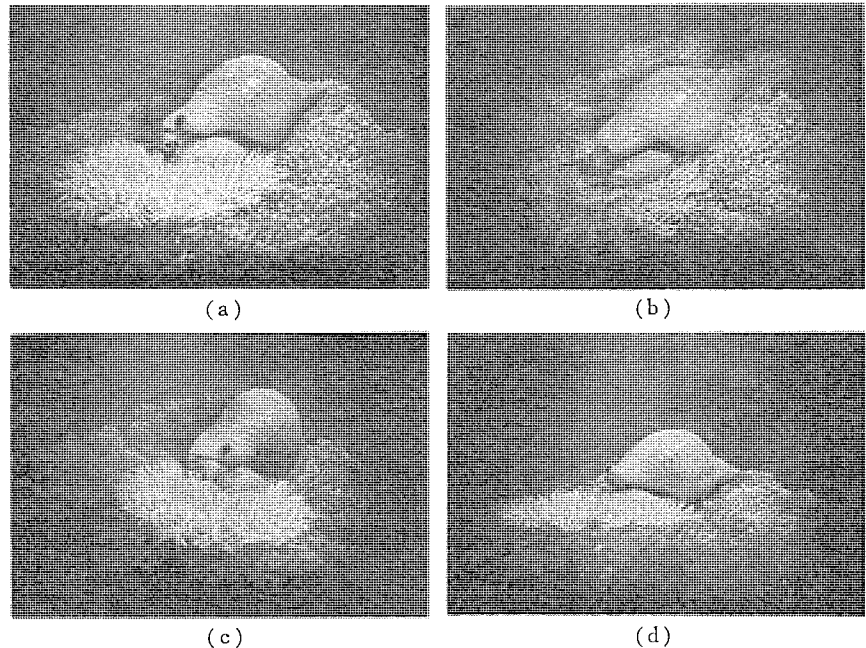


図8. 大形ホログラムの再生像

あった。立体像全体が観察できる範囲はホログラムから 1 m の距離で見たとき左右が約 40° 、上下が約 20° であり、像の半分以上が見える範囲は左右約 55° 、上下約 40° である。ホログラムから 5 m の距離にある水銀灯で照明したとき、像は被写体に対して奥行方向で 1.2 倍、左右(サンゴの最大幅の箇所)で 1.0 倍の倍率で見えるが、ホログラムからもっとも手前にとび出した像の部分についての倍率が大きくなっているのが眼で検知される程度で、立体像の大部分については倍率、ひずみともに不自然さは感じられない。ホログラムから 1 m の点で観察したとき、観察点が上下 300 mm 移動するのにともなってホログラム後方 100 mm の像が上下約 40 mm 、ホログラムの手前 200 mm の像が同じく約 30 mm 移動して見えるが観察点の左右移動の影響は極めて小さい。像の解像度はオニヒトデの針の先端まで明確に見える程度になっており、サンゴの手前側先端で若干ボケが目立つが、計算値からの予測よりクリアな像として観察される。

6. む す び

沖縄海洋博に向けて 1 m 級のホログラム記録技術を確認し、とび出す立体像の再生を行った。本文で述べた像再生の仕様は海洋博のための一例であり、像のとび出し量その他の仕様は必要な解像度、再生角、使用する光源等の条件からある程度で選択することができる。

この開発にあたって多くの助言とご協力をいただいた日本創造企画(株)及び(株)電電広告の方々に深く感謝します。またホログラム記録及び特性解析に協力いただいた関係者の方々に感謝します。

参 考 文 献

- (1) 中井: Signs and Displays, 15, No. 7, 31 (昭48)
- (2) 大越: 三次元画像工学 (昭47) 産業図書
- (3) F. B. Rotz and A. A. Friesem: Appl. Phys. Lett., 8, 146 (1966)
- (4) 永井: 光学, 2, 153 (昭48)

1. ま え が き

液晶による表示素子は、低い消費電力、低い電圧で動作する小形のパネル形ディスプレイであることから、ポータブルタイプの装置の表示素子への応用が積極的にすすめられ、既に腕時計やポータブル電子計算機などで実用化されるようになってきた。

当社でも早くから液晶の研究開発をおこなってきたが、特に昭和47年には、液晶のもつ新しい電気光学効果を応用したカラーディスプレイ技術の開発に成功し⁽¹⁾、その応用開発を進めてきた⁽²⁾⁽³⁾。

沖縄国際海洋博覧会の開催にあたり三菱海洋未来館において、海を演出する新しいディスプレイ技術として、この液晶によるカラーディスプレイ技術が応用されることとなり、ここに述べるコンピュータを利用するカラー液晶ディスプレイ装置を開発した。

この装置は液晶素子の利用により簡単なシステムで投写形の大屏幕カラーディスプレイが実現でき、更に表示パターンを外部からの入力信号によって実時間で変化させることができるという特徴を備えている。

本文では以下にこの液晶ディスプレイ装置の構成及びその特性について述べる。

2. 装置の開発のねらいとその特徴

この液晶ディスプレイ装置は、TVや映画などの既存のディスプレイ技術では得られないイメージを実現し、更に外部からの音楽や人の声によって実時間で画像を変化させるようにするし、ディスプレイに観客の参画も可能にすることを目指したものである。

この装置の主な特徴は

- (1) 投写形の大屏幕カラー表示である。
 - (2) 魚群のカラーパターンを音楽のアクセントに合わせて遊泳させることができる。また色を変化させることもできる。
 - (3) 人の声や拍手などによって、魚群を消したり動きを変えたりすることができる。
 - (4) 液晶素子を使っているため、表示パターンは自由にデザインでき、素子を交換するだけで異なったディスプレイができる。
 - (5) 液晶素子の利用により、システムが簡単である。
- などである。

3. 装置の構成とその機能

液晶ディスプレイ装置の基本的な構成を図1.に示す。液晶素子は、電界効果形で電界により透過光の色相変調ができるもので、スライドプロジェクタに装てん(填)されている。表示パターンは液晶素子の電極パターンによって形成されており、どの電極パターンに電圧をかけ表示するかは、三菱マイクロコン

ローラMELMIC 100で制御されている。MELMICからの信号によって、液晶駆動用のドライバにより、液晶素子の選択された電極に電圧が印加され、カラーパターンがスライドプロジェクタによってスクリーン上に投写される。表示パターンの変化は、外部からの音楽や人の声などの入力信号のアクセントをセンサによって抽出し、この信号によってMELMICに記憶されているシーケンスを選択することで、表示パターンを変化させるようになっている。実際のディスプレイは次のようなものにしてある。スクリーンには5千匹の魚群がバックグラウンドに流れている音楽に同調して、その数を変え、色を変え、泳ぐ速さを変えて遊泳しているパターンがディスプレイされる。マイクから人の声や拍手などの入力信号があると、突如この魚群は逃げ去り、大きなさめが現れ、さめが去ると再び音楽に同調して遊泳する魚が現れるといったディスプレイが展開される。

このようにこの装置では、外部からの入力信号によって実時間で表示パターンを種々変化できることが大きな特徴である。以下に、この装置の構成素子の機能、特性について述べる。

3.1 液晶素子

液晶素子は、外形寸法70mm×82mm、有効表示面積60mm×60mmである。液晶素子の構造は図2.に示すように、10 μ 厚のスペーサを介して、2枚の透明電極付きのガラス基板が重ね合わされたもので、その間げき(隙)に液晶が封じ込められている。表示パターンは、透明電極の形状できめられ、図3.はこの電極パターンの一例である。この電極の魚群パターンは、駆動回路と接続するため、プリント基板用コネクタを介して

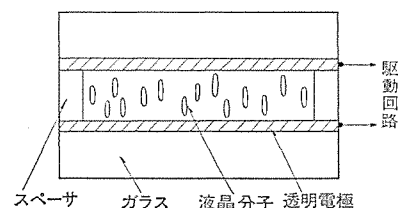


図2. 液晶素子の構造

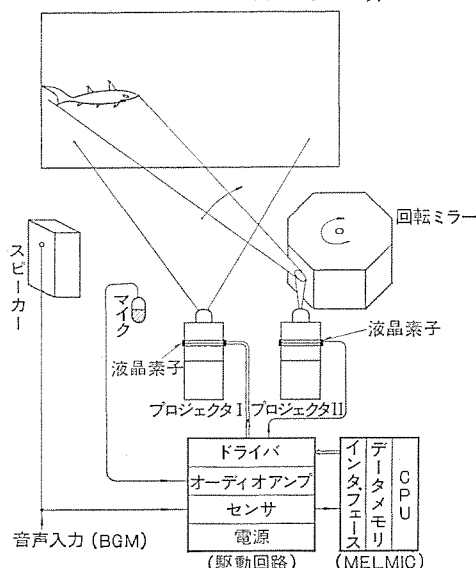


図1. 液晶ディスプレイ装置の構成

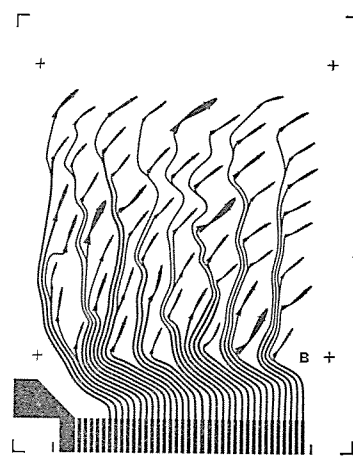


図3. 液晶素子の表電極パターン(裏電極も各表電極に対向する同じパターンが形成されている。ただしリードアウトは共通で1本である。)

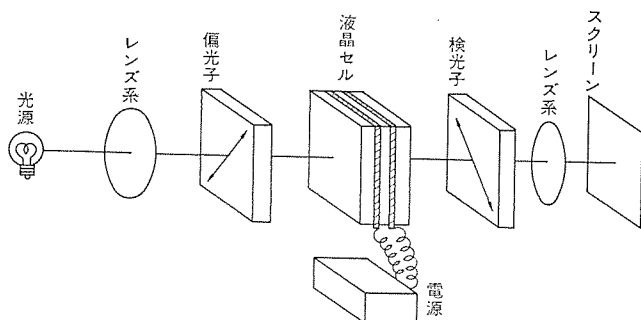


図 4. 投写 システム

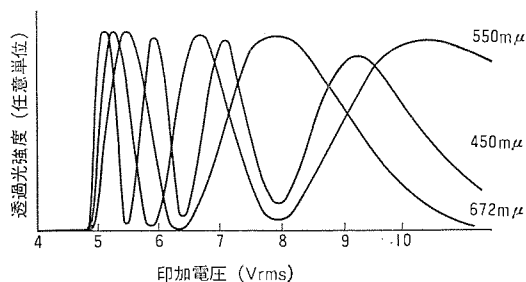


図 5. 3 色の光に対する透過光強度の電圧依存性
(印加電圧: 1 kHz 正弦波)

結線するためのリードアウトパターンも同時にこの透明電極で形成されている。

この装置に使用されている液晶素子は、電界効果による電気光学効果 (DAP と呼ばれている効果) を利用するもので⁽⁴⁾、液晶分子は壁面に対して分子長軸が垂直に配列するように処理されたものである。液晶材料は MBBA と EBBA の混合物を用いている。(液晶の合成は大日本塗料(株)に協力いただいたものである。)

液晶素子は、図 4. に示すように互いにその偏光方向が直交するように配置された 2 枚の偏光板の間に置かれスライド、プロジェクタにそう (挿) 入してその表示パターンをスクリーン上に投写するようになっている。

液晶層に電圧が印加されない状態では、液晶素子に入射した直線偏光はそのまま透過し、2 枚目の偏光板 (検光子) によってしゃ断され、スクリーン上に光は到達しない。今、ある魚の電極パターンにしきい値以上の電圧が印加されると、その部分の液晶分子は、垂直方向から傾き、分子のもつ大きな屈折率の異方性のため複屈折性が現れ、ある特定の波長域の光が検光子を透過してくるようになる。複屈折性は分子の傾き角で変わり、その傾き角は電圧で変わるので、結局、印加電圧を変化させることによって、透過する光の強度及び色相を変化させることができることになる⁽²⁾。

印加電圧と透過光強度の関係は図 5. に示す。しきい電圧は約 5 V で、電圧を上げてゆくと短波長の光から透過しはじめ、次第に長波長の光へと変化してゆく。肉眼による観察では、しきい電圧付近では、各波長の光の透過強度が極大になるピークが接近しているため白色光が最初見られ、電圧の上昇とともにオレンジ、赤、青、緑という順で色変化が見られる。

以上のように、液晶素子の魚群パターンへの電圧印加を順次切換えてゆくことにより、魚群に動きを与えることができ、また、印加電圧を変化させることでその表示色も変化させることができるようになっている。

なお液晶素子にはもう 1 種あり、電極パターンがさめの形状にしたもので、外部からの信号入力によって、魚群パターンと切換えて投写で

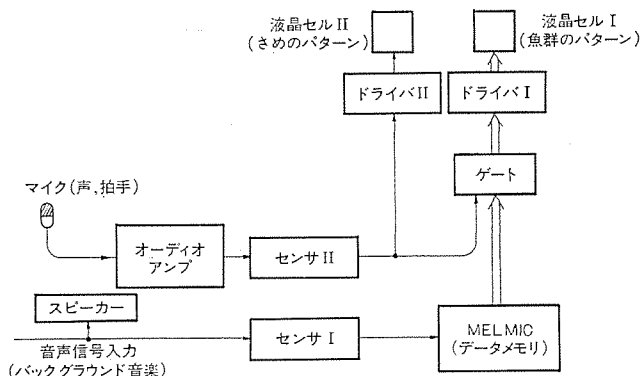


図 6. 駆動回路の構成

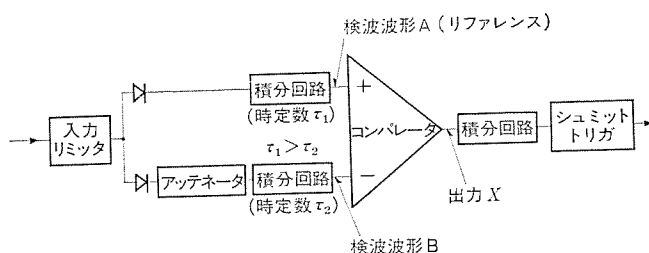


図 7. センサの構成

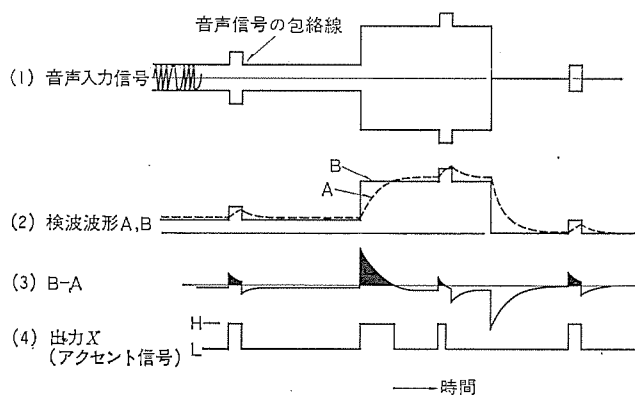


図 8. センサの機能 (アクセント信号の抽出)

きるようになっている。

3. 2 駆動回路

駆動回路部分の構成は図 6. に示す。常態ではバックグラウンドに流されている音楽の音声信号のアクセントを、センサ (I) で抽出する。(主としてリズム) 一方 MELMIC には、魚群のどの魚のパターンに電圧を印加するかを決定するデータが、シーケンシャルに記憶されている。前述のアクセント信号は、この MELMIC の表示パターンデータのシフト用のクロックとして使用され、データ信号がドライバ (I) に与えられて指定された魚の電極に電圧が印加されることになる。

この結果、音楽のアクセントに合わせて表示されるパターンが変化してゆき、魚群が音楽に合わせて遊泳するようにされている。

一方、マイクからの人の声や拍手などの入力信号は、センサ (II) でやはりアクセント信号が抽出され、このアクセント信号でゲートを一定時間閉じて、魚群パターンの表示を一定時間消す。それと同時にこのアクセント信号は、ドライバ (II) に加えられ、さめのパターンをもつ液晶素子に電圧を印加し、一定時間さめのパターンが表示されるようになっている。

3. 2. 1 センサの構成と機能

センサの構成は図 7. に、また信号波形からアクセント信号を抽出するプロセスを図 8. に示す。

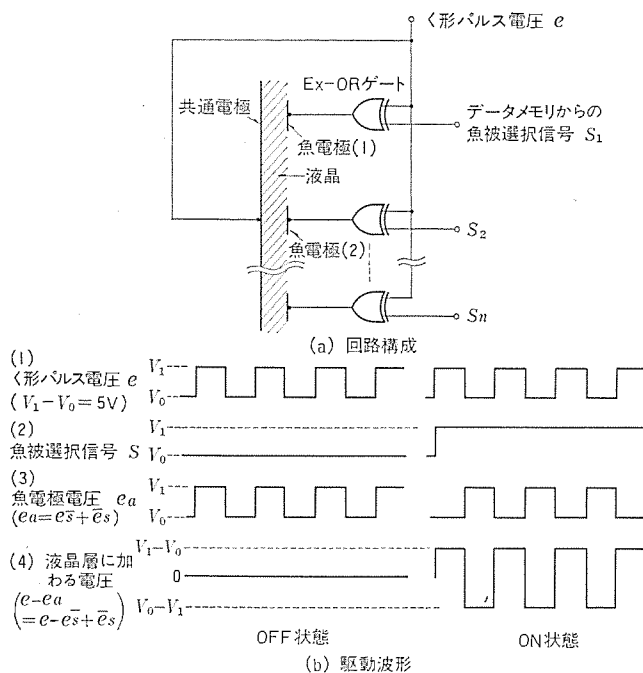


図 9. ドライバの構成とその波形

図 8.(1) に示すような音声入力信号は 2 分されて、おのおの時定数 τ_1 及び τ_2 で検波され、図 8.(2) の A, B の波形が得られる。これらの波形は、波形 A をリファレンスとしてコンパレータに加えられ、両波形の差がとられ (図 8.(3)), 入力信号のアクセントに対応したパルス出力 X (アクセント信号: 音声信号の包絡線の微分信号を整形したもの。) が得られる。このようにセンサは入力信号からアクセント信号を抽出する機能をもつものである。

3. 2. 2 MELMIC (データメモリ) の機能

表示パターンの決定、すなわち液晶素子のどの魚の電極パターンに電圧を印加するかをきめるデータ信号は、三菱マイクロコントローラ MELMIC にメモリされている。

MELMIC のデータメモリの容量が 16 ビット、256 ワードのものを使用している。内容読出しは 32 ビット並列、したがって 128 ステップのシーケンスとなるよう CPU で制御されており、結局 128 の表示画面がメモリされている。これらはアクセント信号によってシーケンシャルに読出されることになる。

3. 2. 3 ドライバの構成と機能

ドライバは図 9.(a) に示すような構成になっており、液晶駆動波形は (b) に、ON 状態、OFF 状態について示されている。

液晶素子の駆動は、直流で行うと寿命が短く、完全な交流で駆動することが望ましい。発振回路からのく(矩)形波パルス電圧 e と、データメモリからの選択信号 s は排他的論理和ゲートに入力され、液晶素子の魚のパターンの表電極には図 9.(b) の (3) のような電圧波形が印加される。一方、魚のパターンの裏電極 (共通電極) にはく形波パルス電圧 e が印加される。その結果、電極部分の液晶層には選択、非選択に応じて図 9.(b) の (4) の電圧が印加され、電圧が印加された部分のパターンが、スライドプロジェクタによって投写表示されることになる。

なおく形波パルス電圧 e は 10 V_{P-P}、周波数 10 kHz であり、液晶に印加される電圧は選択時 26 V_{P-P}、非選択時 0 V となる。

4. 試作装置の概要

3 章で述べたような液晶素子及び駆動回路により、投写形の大画面



図 10. 液晶ディスプレイ装置

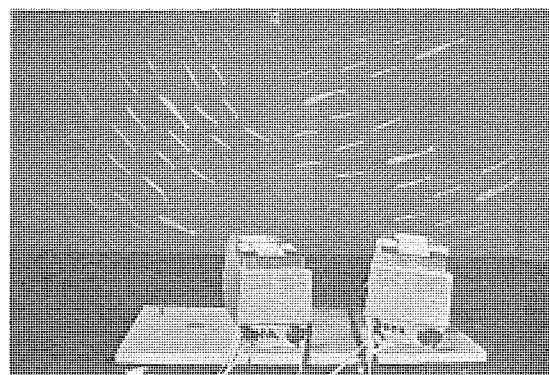


図 11. ディスプレーパターン の一例

カラーディスプレイが実現でき、バックグラウンドに流れる音楽のアクセントに合わせて、魚群がその動きや色を変えて遊泳し、人の声や拍手など音声入力があると、突然これらの魚が逃げ去り、大きなさめが現れて魚群を追って消え、再び魚のパターンが現れるといった演出が行える。

図 10. は、試作された装置の全体の写真で、右端のラックが、液晶ドライバ、センサ、アンプ、電源等であり、中央のラックが MELMIC である。また魚群とさめのパターンを表示する液晶素子は左側にあるおのおの別のスライドプロジェクタ (光源 650 W ハロゲンランプ) によって、同一スクリーン上に投写するようになっている。

図 11. は表示された映像の一例で、三菱未来館においては 4 m × 7 m の大きさのスクリーン上にディスプレイされる。

5. む す び

電界効果形液晶素子を用い、大画面のカラー表示が可能なディスプレイ装置を試作した。液晶素子の利用により低電圧で駆動できるコンパクトなディスプレイ装置が実現できた。

この装置は魚のカラーパターンを、音楽や人の声のアクセントに同調させて、その動きや色を実時間で変化させることができるという特徴をもっているものである。この装置は昭和 50 年 7 月 20 日より約半年の間、沖縄海洋博覧会 三菱海洋未来館において展示される。

終わりにこの装置の試作に当たり多くのご助力とご協力をいただいた社内諸氏に厚くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- (1) 上田, 新居: テレビジョン学会 画像表示システム委, 資料 No. 7-2 (昭 47)
- (2) 内田, 上田, 新居: 三菱電機技報, 47, No. 11, 1141 (昭 48)
- (3) 上田, 新居: テレビジョン, 27, 942 (昭 48)
- (4) M. F. Schiekell, K. Fahrnschon: Appl. Phys. Lett., 19, 391 (1971)

77kV ガス絶縁変圧器

白井 満*・奥谷勝弘*・森 章文*・徳永博典*

1. ま え が き

市街地に設置される電気機器に対する不燃化、保守点検の安全性、小形化の要求は、人々が常に口にする事柄であるにもかかわらず、その実現には、あまりにも多くの歳月と労力が費やされた。昨今の都市過密の傾向は、従来になくこの要求をクローズアップさせ、合成樹脂注型又はH種ワニス含浸を施した変圧器が製作されているが、66kV及び77kV受電設備には、従来とも油入変圧器が使用されてきている。

一方、電力開閉装置の分野では、SF₆ガスを消弧媒体及び絶縁媒体として使用する機器が多い。これらのガス絶縁開閉機器は、また、電気機器の不燃化、保守点検の安全性、小形化を満足するものでもあった。ガス絶縁変圧器の登場は、もともと、窒素密封乾式変圧器の窒素をSF₆ガス又はC₃F₈、C₂F₆等の炭化ふっ素系ガスに置き換えた形でスタートしたものであったが、これらの絶縁ガスが、耐電圧特性で優秀であったことが、ガス絶縁変圧器を、油入変圧器の製作領域にまで発展させた。

当社は、既に昭和40年初頭よりガス絶縁変圧器の開発にとり

かかり、30kV車両用変圧器⁽¹⁾及び120kV試験用変圧器をSF₆ガス絶縁によって製作し、その一部は、現在まだ運転を続行している。おりしも、PCB不燃性油の使用禁止は、新たに不燃性変圧器の登場を促し、SF₆ガスの絶縁変圧器に再びスポットライトをあてた。ここで、ガス絶縁変圧器に望む特性の主な点は、不燃性であること、無毒安全であること、それに従来の油入式変圧器と互換性のあることである。今回試作されたSF₆ガス絶縁変圧器は、不燃性・安全性はもちろんのこと、油入式変圧器との互換性を持たせ、従来の変圧器よりも保守点検項目を増すことを避けたものであり、ガス圧力容器というイメージを極力押さえ、受入れやすい構造にした。試作したガス絶縁変圧器には、各種の実証試験を行った。この試験結果と、実運転時の特性とを変圧器の内部構造とからませて報告する。

2. ガス絶縁変圧器の特長

SF₆ガス絶縁変圧器は、絶縁耐力の大きいSF₆ガスを封入した密封式の乾式変圧器と言える。このような構造であるので、SF₆ガス絶縁変圧器は、次のような特長を持っている。

(1) 安全性の高いこと

SF₆ガス自体が、物理的にも化学的にも安定なものであり、全く不燃性で非爆発性のものである。このSF₆ガスを密封された変圧器タンクの内に満たし、酸素の存在しない構造であるので変圧器内部での火災・爆発の心配がない。また、万一ガス漏れが生じても外部で火災を生じさせることはなく、漏れたSF₆ガスに触れたり、多少吸っても、なんら人間に支障を与えることなく安全である。

(2) 保守が簡便なこと

密封構造であるため、湿気やごみによって変圧器の中身が汚損されることがない。周囲のふんい気によって影響を受けないので、常時、変圧器内部を保守・点検する必要がない。また、SF₆ガスを置換したり、再封入する場合にも油入式変圧器のように、万一にも作業中に周囲を汚すおそれはなく、極めて清浄・簡便に作業ができる。

(3) 騒音が小さいこと

変圧器内部で発生した騒音は、変圧器タンクによってしゃ音されるので、変圧器周囲の騒音は小さくなる。タンク壁によるしゃ音の度合は、油入式の場合よりもSF₆ガスを封入した場合のほうが効果的である。

(4) 軽量であること

油入式変圧器と比べると、油量による重量分だけがSF₆ガスに置き換えられるので、変圧器重量は軽くなる。全装可搬式、若しくは建屋地下のように、現地組立の困難な場所への搬入などにはSF₆ガス絶縁変圧器的が効果的である。

このように、数々の特長をもったガス絶縁変圧器は、開放形乾式変圧器が抱えていた湿気、ごみの障害を解決し、しかも、油入式変圧器で得られていた高電圧大容量の利点を満たす不燃性変圧器とすることができる。

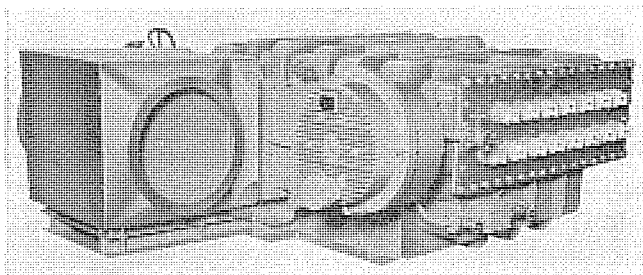


図 1. 単相 60 Hz 30 kV 2,500 kVA 車両用変圧器 (SF₆ガス絶縁)

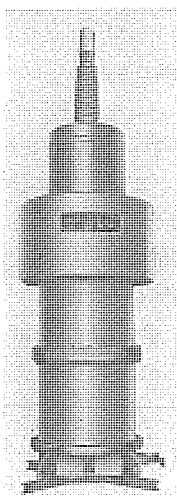


図 2. 単相 60 Hz 360 kV 試験用変圧器 (上段: 120 kV 部, SF₆ガス絶縁)

3. 77 kV ガス絶縁変圧器の構造

SF₆ ガスを封入した変圧器は、2 章のように数々の特長をもった不燃性の変圧器と言えるが、この特長を生かし、屋内受電用変圧器として更に次のようなことを盛り込んでいる。

- (1) 特高キュービクルに併設しやすい角タンク形状に製作し、特高キュービクルとは乾式コンデンサブッシングで直結する構造にした。
- (2) SF₆ ガス封入圧力は、20°C で 1.5 気圧とし、ガス温度上昇を一応 55°C とした。この封入圧力は、冷寒地（-60°C）であっても大気圧以下にならず、したがって外気の侵入が避けられる圧力を保ち、また運転時においても電気設備技術基準に定める 2.0 気圧を超えない圧力である。またガス温度上昇は、SF₆ ガスを熱分解させないこと、巻線温度とガス温度との差が大きくなりがちなことを考え、油入式と同じ 55°C に押さえた。
- (3) 冷却方式は、ガス循環風冷式と自冷式との 2 通りが考えられるが、どちらの方式でも運転できる構造が可能である。
- (4) 巻線絶縁材料及び構成は、製作の難易を比較するため、次のような別々の構成の巻線を製作した。巻線絶縁には、ポリエステルフィルムと集成マイカテープとを組合せたものと、ポリエステルフィルムだけのもの、それにクラフト紙で巻線絶縁したもの 3 種類を、また、対地及び高低圧巻線間絶縁には、ポリエステルガラスとエポキシガラスとを組合せたものと、プレスボードを用いて絶縁を施したものとの 2 種類を用いた。特に、3 相巻線のうち、1 相分は油入式変圧器で用いているのと同じ、クラフト紙による巻線絶縁とプレスボードによるスベサ・バリヤ等の対地絶縁構造のものを製作し、SF₆ ガス封入時の各種特性を検討した。
- (5) ガス漏れ監視用にガス圧力計・ガス温度計のほかに温度補償式の圧力スイッチを設け、±0.5 気圧で警報を出せるようにするとともに、異常な圧力上昇に対しては 3.0 気圧で動作する自己復帰形放圧装置を設けた。

今回、試作した SF₆ ガス絶縁変圧器の仕様は表 1. のとおりであり、その外観を図 3. に示す。

3.1 鉄心

方向性けい素鋼板を使用した三脚領縁鉄心で、締付ボルトも締付バンドも用いないチューブドコア構造である。このチューブドコアは、鉄心絶縁筒によって鉄心を均一に締付ける方法で、試作器で鉄心特性を検討したが、良好な結果を得ている。鉄心積層間の冷却ダクトは、油入式の場合より多いめに設けて鉄心内の冷却を行ったが、良好な結果が得られた。

3.2 巻線及び中身構造

巻線構造は、1 次側を高直列容量巻線にし、巻線中央に無電圧タップ切換器用のタップ巻線を配置し、2 次側は円筒巻線とした。

素線絶縁に用いられる薄葉絶縁材料としては表 2. ⁽²⁾ に示すように、フィルム状のテープ、繊維状のテープなどがあるが、このテープ材を素線に巻き付けるときの引張り強さを 9 kg/mm² 以上、引裂抵抗を 3 kg/20 mm 幅、及び巻線成形時の素線曲げに対する引張り強さを 14 kg/mm² とすると、ポリエチレンテレフタレート (PET) が有望になる。また、素線絶縁層の内部に真空引き後にも空気が残留するか否かを検討してみると、ポリエチレンテレフタレートは、例えば、ポリプロピレンと比べて酸素・窒素透過率が 1/30 程度で気体透過性が悪いが、幅の狭いテープをすき間をあけて巻くようにし、空気の残留を防止している。この空気残留によって耐電圧が低下するか否かを検討するため、

表 1. 試作 SF₆ ガス絶縁変圧器の仕様

項 目	仕 様
形 式	三相 屋内形キュービクル直結形
周 波 数	60 Hz
容 量	3,000 kVA
電 圧	1 次 R 77.0-F 73.5-F 70.0-F 66.5 kV 入 2 次 3.3 kV Δ
タ ッ プ 切 換 方 式	無電圧タップ切換器付
封 入 ガ ス 圧 力	1.5 kg/cm ² (20°C)
冷 却 方 式	ガス強制循環風冷式 (自冷式も可)
絶 縁 階 級	1 次 70 号 2 次 3 号 (JEC 168)
外 形 寸 法	3,600×3,500×H 3,850 mm
重 量	17,400 kg

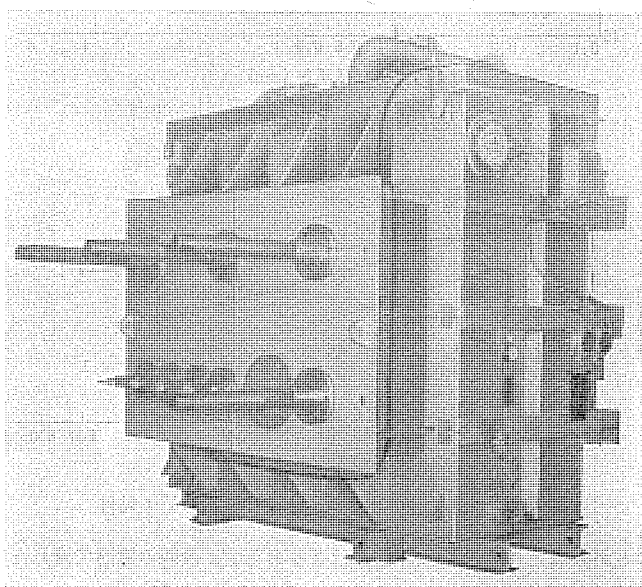


図 3. 単相 60 Hz 77/3.3 kV 3,000 kVA SF₆ ガス絶縁変圧器

素線を重ね合わせた絶縁破壊試験を実施した。図 4. にその結果を示す。ポリエチレンテレフタレート (PET) は、クラフト紙より高い耐電圧値を示し、少なくとも空気が残留して耐電圧を低下させている虞はない。また、SF₆ ガス中における長時間課電試験の結果を図 5. に示す⁽³⁾。この長時間課電試験は、6 mm 直径の IEC (b) 電極の間に、厚さ 0.2 mm で縦・横が 50 mm 角のよく乾燥された絶縁材料をはさみ、SF₆ ガスを 1 kg/cm² に封入して行ったもので、図 5. の横軸の時間は 60 Hz 換算の値が示されている。課電中の最大放電電荷量は、4 kV で 1.2×10^{-10} クーロン、6 kV で 7×10^{-10} クーロン、8 kV で 4.2×10^{-9} クーロンであった。この放電電荷量は、同様な測定を空気中で行った場合の 1/10 の大きさであり、したがって、V-t 特性も気中の場合と比べて 4~10 倍の寿命時間を示している。クラフト紙と同様の繊維状の NOMEX は、フィルム状のポリエチレンテレフタレートと比べて V-t 特性が格段に優れていることはなく、かえって劣っていることが示されている。

このように、電気絶縁の及び巻線作業における機械的特性では、フィルム状絶縁材料が素線間絶縁に用いられても、なんの支障もない

表 2. 素線絶縁材料の特性比較

	引張り強さ (kg/mm ²)	伸 び (%)	引 裂 抵 抗 (kg/mm ²) (20 幅)	誘 電 率 ϵ	熱伝導率 λ (kcal/mh $^{\circ}$ C)
ポリエチレンテレフタレート PET	22	110	22	3.0	0.14
ポリプロピレン PP	18	100	14	2.0	0.12
ポリエチレン PE	2	300	1.5	2.2	0.39
クラフト紙	10	3	—	2.0	0.11
ポリアミド紙 NOMEX	10	10	—	2.5	0.09

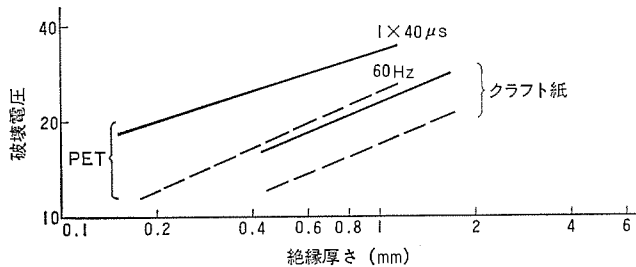


図 4. 素線間絶縁破壊電圧 (SF₆ 1kg/cm²)

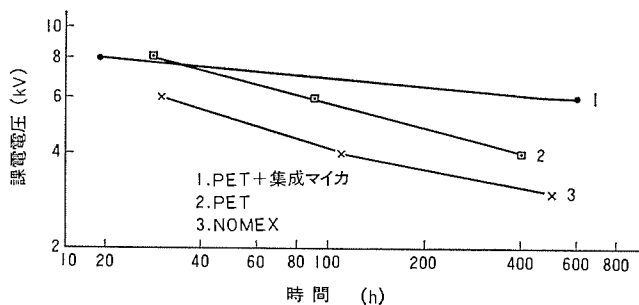


図 5. SF₆ガス中における巻線絶縁材料 V-t 特性

ことが確認され、今回試作器にはとりあえず、今回の検討で優れた特性を示したポリエチレンテレフタレートテープを用いている。

高・低圧巻線間及び対地間絶縁は、主に SF₆ ガスが受持つことになる。SF₆ ガス自体の耐電圧特性は一般に、次のような形で示される⁽⁴⁾。

$$E_m = [k] \cdot P^n \cdot [I] \cdot I(u) \quad (1)$$

E_m は SF₆ ガスが絶縁を保つ最大許容電界強度を示し、 $[k]$ はある定数、 P は圧力、 $[I]$ は電極配置によって決まる係数、 $I(u)$ は電極の表面状態と面積の大きさによって変わる値である。清浄な SF₆ では、大気圧における最大許容電界強度が 8.0 kV/mm、圧力依存性が $n=0.8$ 乗となることが報告されているが、変圧器構造物では、必ずしも理想的な電極条件が満たされることは少なく、また、絶縁物の被覆やバリが介在するため、圧力依存性はあまり望めない。また、変圧器絶縁材料の加工、組立時に生ずるごみは、完全に除去することが困難であり、清浄な SF₆ ガス中における値よりも若干小さい許容電界強度を考える必要がある。

3.3 冷 却

SF₆ ガスの物性値を表 3. に示す。比熱・熱伝導率は変圧器油と比べて著しく小さいので、油入変圧器と同等の冷却効果を行わせるためには、SF₆ ガスを送風機で強制循環させることがまず考えられる。

表 3. SF₆ ガスの物性値

温 度 ($^{\circ}$ C)	比 熱 (kcal/kg $^{\circ}$ C)	粘性係数 (kgs/m ²)	動粘性係数 (m ² /s)	熱伝導率 (kcal/mh $^{\circ}$ C)	プランドル数
0	0.143	1,450	1,377	0.0109	0.604
20	0.154	1,562	1,483	0.0117	0.612
50	0.168	1,730	1,643	0.0128	0.617
100	0.184	2,010	1,909	0.0147	0.597

$$\begin{aligned} \text{比 重 量} & 9.30 \text{ kg/m}^3 \text{ とする} \\ \text{熱伝導率} & 5.55 \times 10^{-5} T^{0.942} \text{ kcal/mh}^{\circ}\text{K} \\ \text{比 熱} & 0.218 + 2.88 \times 10^{-5} T - 6.19 \times 10^{-8} T^2 \text{ kcal/kg}^{\circ}\text{K} \\ \text{粘性係数} & 1.45 \times 10^{-6} + 5.59 \times 10^{-9} T (^{\circ}\text{C}) \text{ kg s/m}^2 \end{aligned}$$

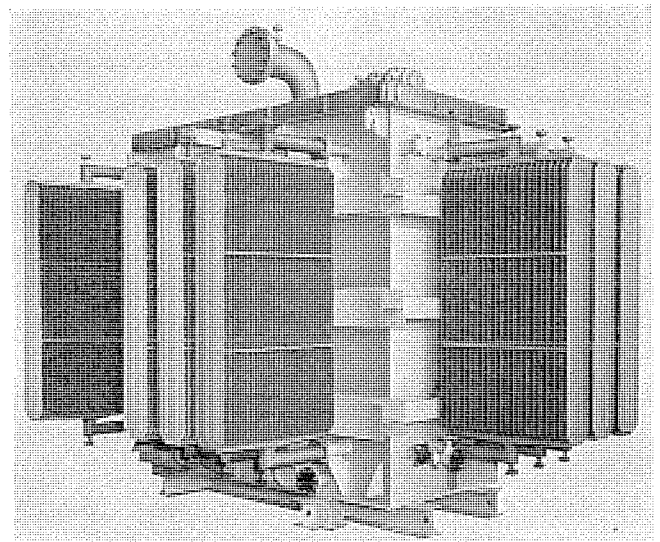


図 6. 自冷式 SF₆ ガス絶縁変圧器

乱流域で平面からの熱伝達量は式(2)で示される。⁽⁵⁾

$$Q = N_u \cdot \frac{\lambda}{l} \cdot \Delta t \cdot S \text{ kcal/h} \quad (2)$$

$$\text{ヌセルト数 } N_u \text{ は, } N_u = 0.023 \left(\frac{\nu \cdot C_p \cdot \gamma}{\lambda} \right)^{1/3} \cdot \left(\frac{u \cdot l}{\nu} \right)^{0.8}$$

ここで、 u : 流速 Δt : 温度差 γ : 比重量 C_p : 比熱
 λ : 熱伝導率 ν : 動粘性係数

これより、式(2)は

$$Q \propto \frac{\lambda^{2/3} \cdot (C_p \cdot \gamma)^{1/3} \cdot u^{0.8}}{\nu^{1.47}} \Delta t \quad (3)$$

となり、50 $^{\circ}$ CにおいてSF₆ガスは変圧器油の物性値と比較して熱伝導率は1/8、比熱は1/3、比重量は1/90、動粘性係数が1/5程度に小さいから、結局、熱伝達量を油入式と同程度とし、温度差を同一にするためには、SF₆ガスの流速を油入式の際の油流速のおよそ22倍にする必要がある。油入自冷式における巻線付近の流速を2~3 cm/s とすると、SF₆ガスを少なくとも50 cm/s の速度で循環させる必要がある。

このため強制循環ガス冷却の場合には、SF₆ガスを循環させる送風機を備え、循環ガスを巻線内に直接導くように変圧器鉄心の下部端わくにガス案内管を設け、内・外巻線及び3相巻線間の流量調整を行う。このガス循環系にはガス温度を冷やす冷却器が備えられ、空気冷却扇で冷却を行う。

また、変圧器容量が比較的小さい場合には、発生損失も少なく、SF₆ガスを特に循環させなくても巻線温度はさほど高くならないの

で、変圧器タンクに図 6. のような自然冷却の放熱器を取付けるだけで十分に運転できる自冷式ガス絶縁変圧器が可能である。

SF₆ ガス絶縁変圧器における温度上昇限度は、変圧器に用いられている絶縁材料によって制限されるが、SF₆ ガス自体も 150°C 以上に熱せられると、接触する金属や絶縁物によっては熱分解して SO₂ を生成することが知られている⁽⁶⁾。鉄心に用いられているけい素鋼板は 200°C で 96 時間加熱すると、SO₂ を生成するし、この分解ガス量は水分量に関連して変化する。銅もまた 200°C 96 時間加熱で SO₂ を生成させ、銅表面を銅色から黒色に変色させる。このほか加熱試験で SO₂ を生成させるものには、冷間圧延鋼 (SPCC)、黄銅などがあるが、アルミ・ステンレス (SUS 304)・亜鉛めっきなどは 250°C 96 時間加熱でも SO₂ を生成しない。絶縁物ではシリコンガラス積層板が SF₆ ガス中の加熱試験で曲げ強さを著しく低下させるが、エポキシガラス積層板ではさほどの低下は認められない。これらの加熱試験は 150°C 以上で行ったもので 150°C を超えなければ、SF₆ ガスの熱分解にかなりの懸念は認められない。この点からしても SF₆ ガス絶縁変圧器の運転ガス温度が、あまり高いことが望ましい。

3.4 タンク構造

SF₆ ガスは、Beattie-Bridgeman の状態式に従う⁽⁷⁾。

$$P = \frac{RT(V+B)}{V^2} - \frac{A}{V^2} \quad (\text{kg/cm}^2\text{abs}) \quad \dots\dots\dots (4)$$

そこで、変圧器タンクに SF₆ ガスを封入すると、運転中に鉄心・巻線から発生する熱によって SF₆ ガスは温度上昇し、タンク内ガス圧力が増加し、封入時の圧力以上のガス圧力で変圧器は運転されることになる。運転時のガス温度とガス圧力との関係は図 7. のとおりである。運転時の最高ガス温度は、この試作器の場合、95°C であるから、運転中の最高ガス圧力は 1.95 気圧となり、電気設備技術基準 (通産省令第 61 号) に定めるゲージ圧力 1.0 気圧以上、及び圧力容器構造規格 (労働省告示第 11 号) に定めるゲージ圧力 2.0 気圧以上という規格の適用を受けない安全なガス圧力で運転される。しかし、タンク構造は余裕をみてタンク内ガス圧力 3.0 気圧に耐えるように製作されている。図 3. のように変圧器タンクは箱形をし、キュービクルとの接続・配置に便利な形にしてある。タンクは製作後、所定のフロンリーク試験と、水圧による耐圧試験を行い、更に変圧器付属品の取付け、ガス配管をすませた完成品の段階で変圧器運転時の最高ガス圧力の 1.1 倍で 12 時間の長時間過圧力試験を実施し、付属品との接続部におけるガス漏れがないことを確認した。

3.5 付属品

(1) プッシング

1 次側には 70 号乾式コンデンサプッシングを、2 次側には 6 号乾式コンデンサプッシングを用いた。SF₆ ガスを封入した試験用タンクを用いてインパルス電圧、60 Hz 電圧による所定の耐電圧試験のほか、3 気圧によるガスリーク試験を行って良好な結果を得た。

(2) 無電圧タッパ切替器

1 次側の巻線に 70 号無電圧タッパ切替器を取付けた。このタッパ切替器は、特殊なエポキシガラス製円筒の中に静止コンタクトを配置し、中心軸に取付けた可動コンタクトのスプリング力によって接触させ、タッパ切換えを行う構造で、中心軸は変圧器タンクの側壁に取付けられた操作ハンドルによって回転される。操作ハンドル部には十分な回転シールを行ってガス漏れを防止し、更にハンドルカバーを取付け、運転中のガス漏れには万全を期している。

(3) 冷却器

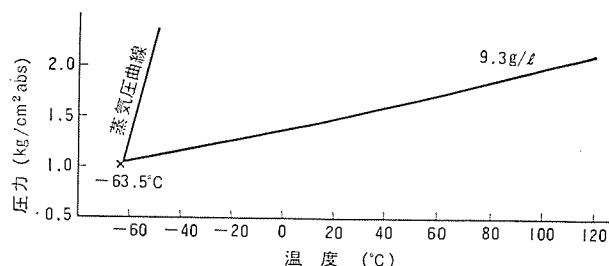


図 7. SF₆ 圧力 - 温度特性

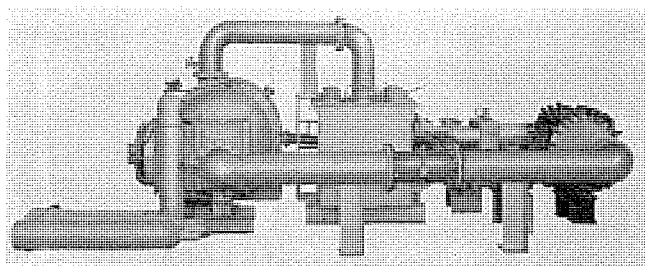


図 8. 冷却装置特性試験

アルミニウム合金製のコルゲートフィンを用いた冷却器で、冷却扇を取付け、空気で強制風冷している。冷却器は、単体で 5 気圧のガスリーク及び耐圧試験を行ったほか、空気流を用いて圧力損失試験を行なった。

(4) ガス循環送風機

ガス流速を早めて巻線を効率よく冷却するため、風圧の大きなターボブロワを用いている。インペラを駆動する電動機は軸で直結され、全体を一つの収納タンクの中に納めてある。図 8. に示すように、試作時に冷却器との組合せ特性試験を行う関係上、この収納タンクは、変圧器タンクと別途に製作され、外部に取付けられているが、変圧器タンク内部に収納することも可能である。また、電動機を特に冷却するため、SF₆ ガスの流れが電動機にも直接ふれるようにガス配管を施してある。

(5) ガス流指示器

ガス循環送風機の運転が正常かどうかを監視するため、SF₆ ガス流路の途中にガス流指示器を取付けてある。このガス流指示器には、正常時風量の 1/2 で警報を出し、1/4 で停止信号を出させるような断風リレー接点が取付けられている。

(6) ガス圧力スイッチ

変圧器タンク内のガス圧力は図 7. に示すように、運転時のガス温度によって変動する。そこで、SF₆ ガスが万一、変圧器外部に漏れた場合には、単にそのときのガス圧力を監視するだけでは十分でなく、ガス温度の上下に従って変化するはずの基準圧力との差を監視する必要がある、これは取りも直さずガス密度を監視することになる。

この試作器には、SF₆ ガス絶縁開閉機器によく用いられている温度補償圧力スイッチが取付けられており、ガス圧力の変動によって開閉する接点の片方をガス温度の上下に従って可動させることにより、ガス圧力の温度補償をする。このガス圧力スイッチの接点は、基準圧力より ±0.5 気圧の偏差で作動するように調整してあり、ガス漏れの警報とともに、変圧器内部での異常によるガス圧上昇に対しても速やかに警報を発することができる。

(7) 自動復帰形放圧装置

変圧器内部で短絡事故のような異常事故が発生したとき、SF₆ ガス中でアークが発生して SF₆ ガスを分解させる。アーク発生に伴う変圧器内部圧力の上昇は、アーク発生熱による熱膨脹よりも、むしろアー

クによって生成する分解ガスの容積が増大するためのものが主であるが、この圧力上昇は、油入式変圧器の場合と比べると著しく小さい。また、変圧器内部事故による分解ガスは、できるだけ外部に放出しないことが望ましい。しかし、大気圧より高い圧力で封入されている密封容器でもあり、安全上から3気圧で作動する放圧装置を取付けてある。この放圧装置は3気圧で破裂するカーボングラファイト製の仕切膜と、その外側に2気圧で開閉するカバー板とから構成され、万一、変圧器内部圧力が増加して仕切膜を破裂させ、カバー板を開いてガスを外部に放出しても、変圧器内部圧力が下がって2気圧以下になれば、カバー板が閉じて外気としゃへいされ、常規圧力に復帰したときに変圧器内部に外気が容易に侵入することがないような構造の自動復帰形放圧装置である。

(8) 水分吸着剤

変圧器にSF₆ガスを封入する前に1mmHg以下になるまで十分に真空引きが行われ、タンク内の空気に含まれていた水分と、絶縁物からしみでてくる水分を十分に取り除いてあるが、Oリングを透過してくる水分や、真空引き後にもなお残存する水分を取り除き、-20°Cでも露を結ぶことのないように合成ゼオライトからなる吸着剤を変圧器タンク内に収め、水分の除去を行っている。

4. 試作器の試験結果

この試作器は、JEC 168に基づいて特性試験が行われた。試験の結果は表4.に一覧する。ガス循環風冷時3,000kVAと、自冷時1,500kVAとの2回の温度上昇試験を行い、ガス温度上昇がいずれの場合も55°Cを超えないことを確認した。また、巻線温度上昇は、ポリエステルフィルムによるE種乾式の上限70°Cを超えない満足できる結果が得られた。温度上昇試験の前後に変圧器タンク内のSF₆ガスを抽出して分解ガスの有無を検出したが、ほとんど分解ガスは検出されなかった。また、部分放電試験を交流加圧試験・インパルス試験の前後に行ったが、良好な結果を示し、変圧器の運転にさしつかえがないことが確認された。各種特性試験を行った後、大電力研究所において短絡試験を各相に行ったが、どの相も短絡電流実効値の2.55倍(非対称分1.8倍)のピーク電流に十分に耐え、3回繰り返して短絡電流を投入したが、巻線にはなんらの変形も認めず、外部短絡事故に対して十分な耐力を持つことが確認された。これらの試験結果から、SF₆ガス絶縁変圧器が、受電用変圧器として信頼性の高い変圧器であると言える。

5. む す び

SF₆ガス絶縁変圧器は、不燃性・無毒安全・非爆発性といった優れた特性を持った変圧器であり、SF₆ガスの取扱いが清浄であるなど、

表4. 試験結果

試 験 項 目	試 験 結 果	
	3,000 kVA (風冷)	1,500 kVA (自冷)
無 負 荷 電 流 (%)	1.60	
全 損 失 (kW)	32.1	16.2
インピーダンス電圧 (%)	8.88	
温 度 上 昇 (°C)	ガ ス 37.5	ガ ス 51.0
	1次巻線 60.6	1次巻線 45.5
	2次巻線 48.5	2次巻線 43.1
	鉄心内部 —	鉄心内部 48.0
交 流 加 圧 試 験	1 次 160 kV 1分間	
	2 次 16 kV 1分間	
イ ン パ ル ス 試 験	1 次 400 kV 全波 460 kV 載断波	
	2 次 45 kV 全波 55 kV 載断波	
部 分 放 電 試 験	1.5E で 30×10 ⁻¹² クーロン	
誘 電 正 接 (%)	H-LE 0.56 L-HE 1.85 HL-E 1.55(18.5°C)	
絶 縁 抵 抗 測 定 (MΩ)	H-LE, L-HE, HL-E 共に 2,000 以上	
短 絡 試 験	$I_m = 1.8\sqrt{2}I_s$ 3回印加 合格	

保守点検の面で多くの利点のある変圧器であることは、本文に述べたとおりである。その上、製作工場から据付場所までほとんど完全組立による輸送を行うことができるので極めて信頼性の高い変圧器と言えるほか、現地での据付調整も極めて容易であると言える。

市街地における屋内受電用変圧器にとって不燃性ととともに保守点検の簡便さは、ぜひ必要な特性であるが、これらの要望に対してこのSF₆ガス絶縁変圧器は、これに有力な可能性を提供するものであり、SF₆ガス開閉装置の発展とあいまって、受電用変圧器として今後、ますます発展することを期待する。

参 考 文 献

- (1) 白井, 児玉: 電気学会連合大会, 昭 43-542
- (2) 三菱樹脂: テクニカルサービス 資料
- (3) 平林, 平沢, 白井, 田村: 絶縁材料研究会資料 IM-72-45
- (4) 新田, 山田, 荒畑: 三菱電機技報 44, No. 9 (昭 45)
- (5) 日本機械学会: 伝熱工学資料
- (6) 広岡, 土橋, 平林, 玉越: 三菱電機技報 44, No. 9 (昭 45)
- (7) General Chemical SF₆ カタログ

シーケンサ《MELSEC》-710の適用

石 雅彦*・加賀宏明*・酒井亜男*

1. ま え が き

当社では、プログラマブルなシーケンス制御専用装置として MELSEC-310 及び MELSEC-710 のシリーズを有している。これらの機能紹介は先に本誌 47 巻 11 号 (昭 48) で行い、MELSEC-310 の鉄鋼プラントへの適用紹介は本誌 48 巻 2 号 (昭 49) で行った。MELSEC-310 と MELSEC-710 は同一思想のもとに統一化、標準化をはかりシリーズ化しているもので、それらの機能変化に伴い CPU ブロック、プログラミングパネル、プログラミングジェネレータが異なるほかは、すべて同一のユニットを使用しており互換性がある。

MELSEC-310 と 710 は、それぞれの特長を生かし、プラントの内容に応じて選択適用されるが、ここでは MELSEC-710 について、その機能と適用範囲について MELSEC-310 と対比して述べるとともに、特長あるシーケンスプログラムの応用例を紹介し、あわせてその保守についても述べる。図 1. はシーケンサ MELSEC-710 システムの写真である。

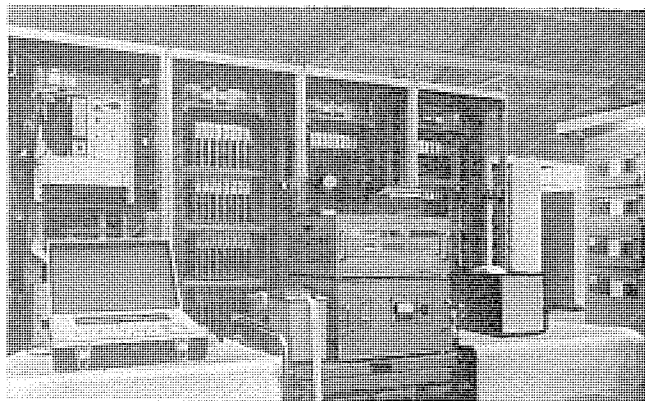


図 1. シーケンサ《MELSEC》-710 システム

2. 《MELSEC》-710 の特長

2.1 特 長

- (1) シーケンス制御専用機
- (2) 高い機能：シーケンス制御に必要な論理演算、一時記憶、タイマのほかに次の機能を有する。

微分検出処理、共通インタロック処理、サブルーチン処理、判断分岐処理、割込処理

- (3) プログラム作成及び修正が容易 (プログラミングパネル)
- (4) オンラインモニタ可能
- (5) 付属機器：プログラム自動書込装置
プログラム自動記録装置
- (6) 豊富なプロセス入出力装置
- (7) タイマのプログラム設定
- (8) プログラムメモリに非破壊読出しメモリ (ワイヤメモリ) を採用。RAM-ROM 切換自由

表 1. シーケンサ《MELSEC》-310/710 機能比較 (1 セット当たり)

項 目	《MELSEC》-310	《MELSEC》-710
ハードウェア機能	制 御 メ モ リ 2K, 4K 語 (MAX) ワイヤメモリ (非破壊形) RAM-ROM スイッチのみで切換自由	2K, 4K, 8K 語 (MAX) 同 左 同 左
	演 算 速 度 2.5μs/命令	10μs/命令
	最大入力点数/CPU 1 台 (増設単位) 512 点 (16点)	2,048 点 (16点)
	最大出力点数/CPU 1 台 (増設単位) 512 点 (8 点)	2,048 点 (8 点)
	入 力 定 格 AC 110/220V, DC 100V, その他	同 左
	出 力 定 格 AC 110/220V, DC 100V, 2A, その他	同 左
	最大タイマ点数/CPU 1 台 (増設単位) 時限 128 点 (8 点) 0.05~950 秒	1,024 点 (8 点) 0.05~950 秒
	最大一時記憶点数/CPU 1 台 (増設単位) 512 点	1,280 点 (256 点)
	特殊プロセス入出力 プリセットカウンタ シーケンスカウンタ 内部及び外部ラッチリレー アナログタイマ	同 左
	CPU 機 能 (1) 論理演算 (2) 共通インタロック処理 (3) 微分検出処理	(1) 同 左 (2) " " (3) " " (4) サブルーチン処理 (5) 判断分岐処理 (6) 割込処理
メソッド	プ ロ グ ラ ミ ン グ 論理図、リレーシーケンス、フローチャートなどから、直接プログラミングパネルのキー操作によりプログラムの書込みを行う	同 左
	オンラインシーケンスチェック	可
	デバッグホールド	不可
	自己診断プログラム	有
周辺機器	(1) カセット MT (カセット磁気テープ) (2) プリンタ ※プログラムの書込、読出、再生、複写、照合	(1) PTR (紙テープリーダー) (2) PTP (紙テープパンチ) (3) LP (ラインプリンタ) ※ 同 左
	オフラインアセンブラ	無

- (9) 一時記憶つき
- (10) 耐ノイズの回路設計
- (11) 容易なメンテナンス
- (12) 高信頼性

2.2 《MELSEC》-310 と 710 の機能比較

表 1. に MELSEC-310 と 710 の機能比較表を示す。

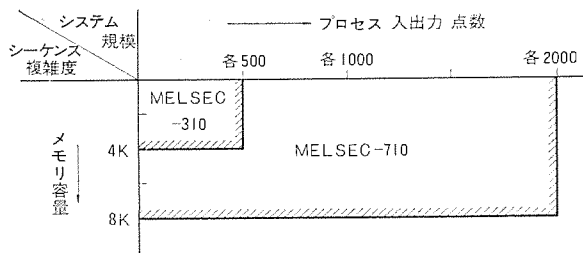


図 2. システム規模による《MELSEC》の選定 (1セット単位)

3. 《MELSEC》の選定法

MELSEC-710 は、そのシステム規模及び機能において MELSEC-310 を拡大した シークensa である。この二つの シークensa のうち、どちらを選定するかは適用プラントシステムの運用面から決定されるべきであり一義的に選定することはできないが、一般的な選定の目安としては次のことが考えられるであろう。

(1) システム規模からの選定

図 2. に示すように MELSEC-710 のシステム規模は、MELSEC-310 よりも拡大することが可能である。また、プログラムに サブルーチン 処理を採用することができれば、プログラム ステップ 数は 8,000 ステップを 実質上大きく越えることが可能となる。

(2) システムの特殊性からの選定

多岐にわたる コンペアライン や パルスステーション などの制御では、一つ一つの コンペア あるいは パルス 制御の シークensa プログラムは、それぞれについて相似形の プログラム で構成することができる。このとき、この相似形の プログラム を サブルーチン 処理することによってプログラムの多重使用が可能となり、プログラム 数の削減、プログラムの標準化などの利点が生じる。

このように繰り返し シークensa が多い場合は、サブルーチン 処理のできる MELSEC-710 を選定することが最適である。

4. 《MELSEC》-710 によるプログラム応用例

MELSEC-710 の特長ある プログラム 応用例を紹介する。

4.1 フリッカ回路 (判断分岐処理)

図 3. は、一時記憶 M67 の内容が 1 秒間隔で“0”-“1”を繰り返す、フリッカ 回路である。

タイマ T31 の時間を任意にセッットすることにより、フリッカ時間間隔を任意に変え得る。一時記憶 M64 は H/W で常に“0”にセッットされている。M67 は MELSEC スタート時は“0”にクリアされている。タイマ T31 は入力“1”で時間がセッットされ、“0”でリセッットされる。図上の矢印は プログラム ステップ の順位を示す。

この回路はタイマ 1 点だけを使用したもので、タイマの多重使用回路ともなっている。このようなフリッカ回路は故障警報回路などで多用されている。また、判断分岐処理を行うことによって、プログラムの修正、追加も簡単に行える。

4.2 タイマ多重使用回路 (判断分岐処理)

図 4. は、タイマ 1 点だけで t_1, t_2, t_3 の異なる時間設定をした順送りタイマ回路で、コンペア 総括制御などにおける順序起動、順序停止 タイム シークensa にも応用できる回路である。一時記憶 M70 の出力“1”でスタート 信号となる。M71~M73 を、タイムチャートに示す当回路の出力として利用する。なお、M71~73 のリセッット回路は図示していない。

この回路例では、T1 タイマ 1 点で順送り回路出力 M71~73 の 3

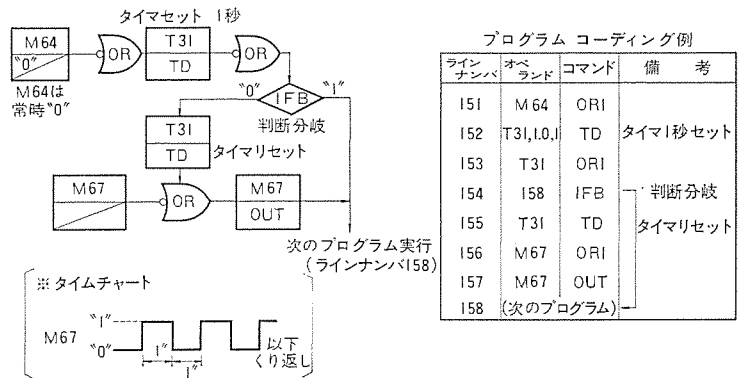


図 3. フリッカ 回路 (判断分岐処理) 特許申請中

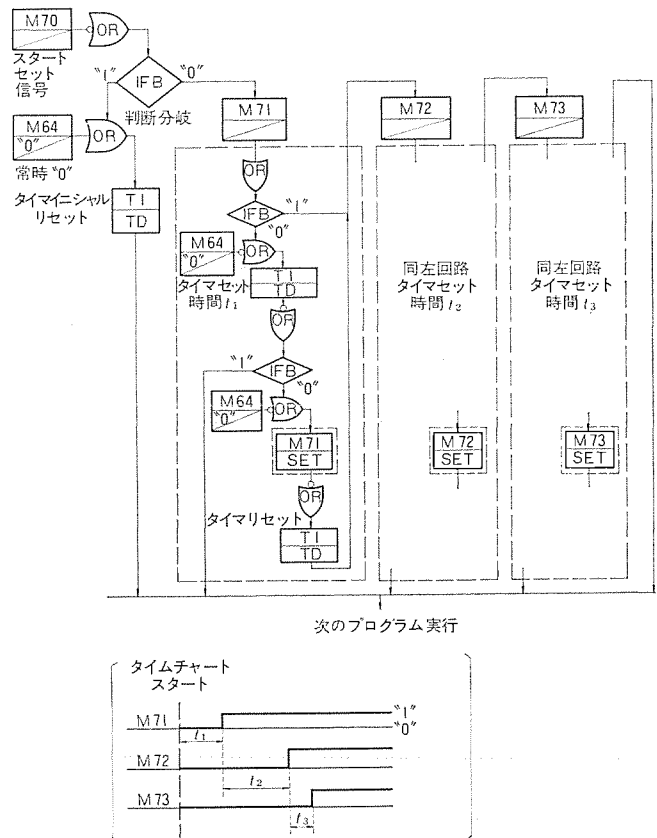


図 4. 順送り回路 (タイマ 多重使用)

点出力を示したが、時間設定 $t_1 \sim t_n$ で出力も n 個まで拡張できることは言うまでもない。

4.3 電動機用サブルーチン プログラム (サブルーチン処理)

図 5. は コンペア 総括制御などに応用される非可逆電動機用 サブルーチン プログラム 例である。M16~25 は アーギュメント ホールドレジスタ (AHR) であり、各種入力信号の AHR への転送はメイン プログラム で指定される。AHR は一時記憶 M16~63 の 48 点を振り当てることが可能である。表示灯出力 M105、電磁開閉器投入出力 M107 及び故障出力 M102 は プロセス 出力に接続されるが、この指定はメイン プログラム で行う。図 5. の回路は各種運転条件の成立で該当する電動機用電磁開閉器 (あるいはしゃ断器) の投入指令を発するとともに該電動機の運転表示灯を点灯させるが、その表示灯は機器故障時にフリッカ点灯させるとともにランプチェックも可能とした回路構成である。

この サブルーチン プログラム はメイン プログラム で指定された シークensa に従って、電動機 1 台ごとに呼び出されて論理演算処理が行われることとなる。図 6. は、そのメイン プログラム 例で電動機 1 台についてのみ図示している。

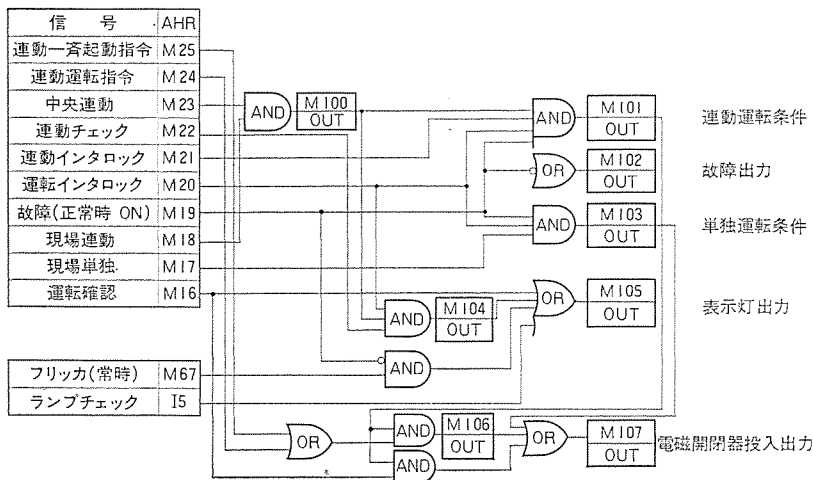


図 5. 電動機用 サブルーチン プログラム (サブルーチン 処理)

表 2. 電動機用 メイン 及び サブルーチン プログラム コーディング 例

メイン プログラム				サブルーチン プログラム			
ラインナンバ	オペランド	コマンド	備考	ラインナンバ	オペランド	コマンド	備考
1301	6001	CAL	サブルーチンコール	6001	M23	AN	サブルーチンプログラムの開始番地
1302	M81	..		6002	M18	AN	
1303	M82	..		6003	M100	OUT	
1304	M83	..		6004	M100	AN	
1305	M84	..		6005	M21	AN	
1306	I 21	..		6006	M20	AN	
1307	I 22	..		6007	M19	AN	
1308	I 23	..		6008	M101	OUT	連動運転条件成立
1309	I 24	..		6009	M19	ORI	
1310	I 25	..		6010	M102	OUT	故障出力
1311	I 26	..		6011	M19	AN	
1312	M3	JS	ジャンプサブルーチン	6012	M20	AN	
1313	(次のプログラム)			6013	M17	AN	
...	...	...	...	6014	M103	OUT	単独運転条件成立
...	...	...	...	6015	M20	AN	
...	...	...	...	6016	M100	AN	
...	...	...	...	6017	M22	AN	
...	...	...	...	6018	M104	OUT	
...	...	...	...	6019	M19	ANI	
...	...	...	...	6020	M67	AN	
...	...	...	...	6021	M16	OR	
...	...	...	...	6022	M104	OR	
...	...	...	...	6023	I 5	OR	
...	...	...	...	6024	M105	OUT	表示灯出力
...	...	...	...	6025	M25	OR	
...	...	...	...	6026	M24	OR	
...	...	...	...	6027	M101	AN	
...	...	...	...	6028	M106	OUT	
...	...	...	...	6029	M101	AN	
...	...	...	...	6030	M16	AN	
...	...	...	...	6031	M106	OR	
...	...	...	...	6032	M103	OR	電磁開閉器投入出力
...	...	...	...	6033	M107	OUT	電磁開閉器投入出力
...	...	...	...	6034	M3	RTN	メインプログラムへリターン

注) M3はサブルーチンもどき番地格納用バックアレジスタ

表 2. は図 5. 及び 図 6. に図示した サブルーチン 及び メイン プログラム の コーディング 例であり、ラインナンバ、オペランド、コマンドの順にプログラミングパネルのキーを操作することにより、このプログラムはプログラムメモリに書込まれる。もちろん表 2. は参考までに示したものであり、図 5. 及び 図 6. のプログラムシーケンスからプログラミングパネルの操作によってメモリに書込むことは簡単である。

このように サブルーチン 処理を行うことにより、多数の電動機の制御回路を、数種類の サブルーチン に最小公倍数的に整理すれば、

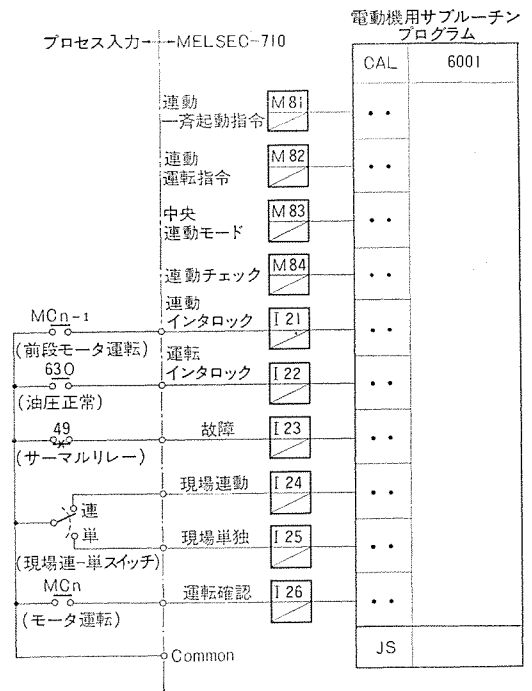


図 6. 電動機用 メイン プログラム

- (1) プログラム 数の削減 (メモリ の有効利用)
 - (2) プログラム ミスの減少
 - (3) プログラム の標準化
- などの利点がある。

4. 4 非常停止回路 (割込処理)

図 7. は機器運転中に機器の緊急停止を要求される非常停止回路である。一時記憶メモリ M 66 は非常停止用としてメインプログラム (図示せず) 中に使用されており、出力は平常時 “1”，非常停止時 “0” としてプログラム処理される。I 0, I 1 はプロセス入力, M 0, M 1 は一時記憶で割込専用を使用する。I 0 と M 0, I 1 と M 1 はハードウェア的に結合されている。

この回路は運転準備用スイッチを結合しているが、この使い方は次のとおりである。まず MELSEC スタートで M 66 の内容は “0” にクリアされる。プロセス非常停止信号が発生していないとき、運転準備 PB を操作することにより I 1, M 1 に割込が入力され、プログラム番地 0 番から割込処理プログラムが実行され、M 66 は “1” にセットされメインプログラム実行に移行する。このように、スタート時に運転準備 PB を操作しない限り M 66 の内容が “0” であり、メインプログラムで処理されるシーケンスは機器が運転できないような回路構成としている。すなわち M 66 が “1” にセットされて、はじめて運転可能なシーケンス構成をメインプログラムで採用しているわけで、一種の運転インタロック構成である。

次に、機器運転中プロセス非常停止が発生すると、その発生時点でのシーケンスプログラムの実行が中断され、I 0, M 0 に割込入力発生として、プログラム番地 0 番からこの割込処理を実行し、M 66 はリセットされて “0” となり、次いでメインプログラムの開始番地からプログラムを再び実行する。メインプログラム中に M 66 がインタロックとして使用されていれば、機器は非常停止することになる。

このように、非常停止に割込処理を行うと、全プログラム実行ステップ (1 サイクル) の時間分だけ短縮した時間内に、非常停止が実行されることが可能である。

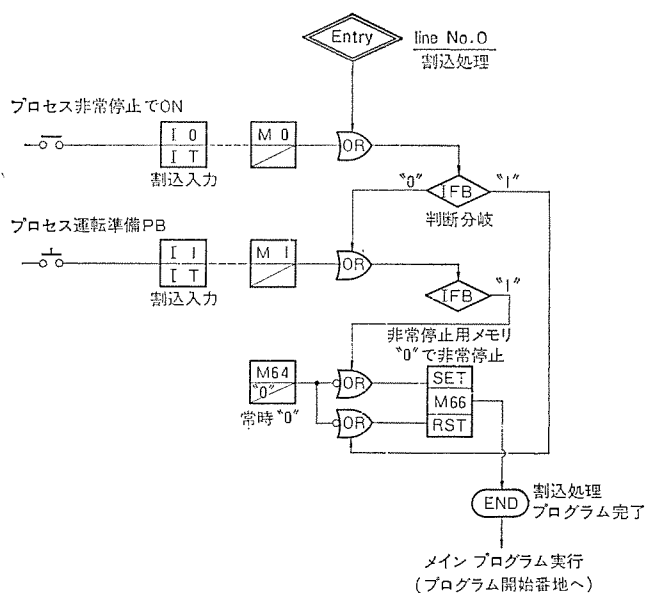


図 7. 非常停止回路 (割込処理)

5. 保 守

MELSEC は高信頼性と保守の容易性を目的として設計製作されている。保守については本誌 48 巻 2 号 (昭 49) に「鉄鋼プラントへのシーケンサ MELSEC-310 の適用」と題し、その中で故障検出、故障修理、定期点検の各項目について詳述している。MELSEC-710 についても同様であるので参照されたい。

ここでは MELSEC-710 システムの故障発見方法として、CPU メンテナンスボードとプログラミングパネル (PP) を使用した方法について述べる。図 8. はその模式図である。

MELSEC のハードウェアは機能カードを基本としたビルディングブロック方式で構成されているため、故障箇所が判定できればその機能カードあるいはブロックを交換することにより、短時間に修復可能である。

(1) オンライン モニタ (PP 操作)

オンライン中にラインナンバを指定することにより、その制御の内容を PP に表示できる連続監視モードである。内容は命令表示と、その時のシーケンス状態を表示し、シーケンスの推移をオンラインで監視できるので、MELSEC の故障は迅速に発見できる。

表示内容 { 命令 : ラインナンバで指定された命令
A : 命令実行後のアキュムレータの内容
C : 共通インタロックの内容
S : 命令で指定された入力の内容

(2) ステップ (PP 操作)

シーケンスを 1 ステップずつ実行ごとに、CPU を停止させることができるモードで、オンラインモニタの連続監視に対して、1 命令ごとのチェックが可能である。

(3) マニュアルクロック (CPU メンテナンスボード操作)

上記 (1) あるいは (2) で CPU 異常が発見された場合、CPU の

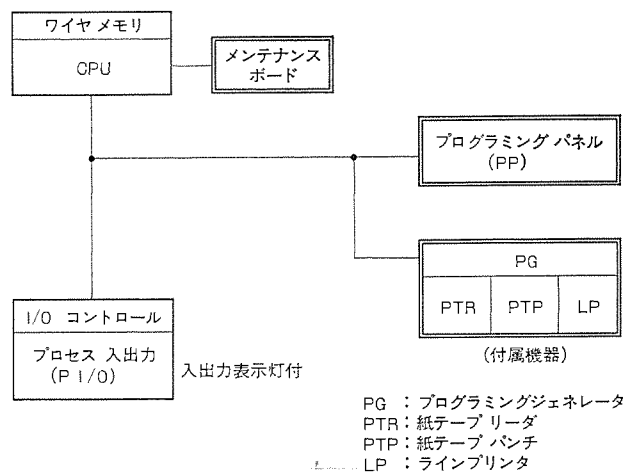


図 8. MELSEC-710 の故障チェックシステム

この部分が故障かをチェックするための、CPU の最小刻みのパルス発生モードである。

(4) デバックホールド (PP 操作)

オンライン中にラインナンバを指定することにより、運転中の CPU をそのラインナンバで停止させるモードであり、指定ラインナンバの命令は実行前停止となる。その後ステップモードに切換えて、1 ステップごとのチェックができる。

この操作により、点検したいプログラム番地に簡単にアクセス可能である。

(5) READ (PP 及び PG 操作)

プログラム内容を読み出し表示し、プログラム内容を確認できるモードである。PTR (紙テープリーダー) を用いて、記録保持している紙テーププログラムと照合することにより、メモリのどこの箇所が不良か (不一致か?) を高速に判定できる。また LP (ラインプリンタ) を接続すれば、照合結果として不一致箇所があれば、その内容を連続してプリントアウトできる。

6. む す び

以上、MELSEC-710 について、三菱シーケンサ MELSEC シリーズの中での位置づけ及び特殊機能を中心として述べたが、MELSEC-710 の有する特殊機能によってシーケンスの標準化が図られること、複雑高級なシーケンス回路が可能なこと、プログラム数の削減が可能なこと、保守に必要な十分なチェック機能を有していることなど、シーケンサ使用によるメリットを更に増加したものと確信する。

今後更に、ユーザ各位の批判を仰ぎ、より一層使いやすいシーケンサとしたい所存である。

参 考 文 献

- (1) 久保田, 山下ほか : 三菱電機技報, 47, No. 11 (昭 48)
- (2) 岩永, 片岡 : 三菱電機技報, 47, No. 11 (昭 48)
- (3) 山下, 大野 : 三菱電機技報, 48, No. 2 (昭 49)

登録番号	名 称	発 明 者	登録番号	名 称	発 明 者
735496	信号表示装置	岡本春樹・佐藤昌樹 日下俊一	739273	車両用送風電動機の速度制御装置	大津一男
735497	可変周波数多相信号発生装置	赤松昌彦・淡野光章	739274	誘導電動機の制御方式	大野栄一・熊野昌義
735498	発電機制御装置	平田毅・森下光晴	739275	抵抗溶接方法	山本利雄・奥田滝夫
735499	立形回転電機のスリップリング短絡装置	青山和明	739276	電気車制御方式	芦谷正裕
735500	ガス吹付しゃ断器	松田節之	739277	電解効果型 トランジスタ	西海 宏・松本隆夫 前山出男
735501	放射線検出用半導体装置	近藤明博	739278	圧延機	星野幸士・鈴木正己
735502	情報読み取り装置	小笠原光孝	739279	バナジン酸イットリウム・ユーロビウムけい光体の製造方法	大田重吉・山崎清司 大谷光興
735503	防が(蛾)用けい光ランプ	佐々木武敏	739280	赤色けい光体	大田重吉・山崎清司 成田二郎
735504	電話ダイヤル装置	吉川英之			
735505	静電吸引板	柴山恭一・飯坂捷義			
735506	走査装置	倉橋浩一郎・池端重樹 藤野順一	741014	位相変調形磁気記録方式における誤り検出装置	織田博靖
735507	自動車用アンテナ	奥村修	741015	磁気記録情報の誤り検出装置	織田博靖
735508	指示装置	小笠原光孝	741016	周波数変調形磁気記録方式における誤り検出装置	織田博靖
735509	電気絶縁材用エポキシ樹脂組成物	伊藤公男・寺谷 宏 福島二郎・宮尾国彦	741017	マグネトロン の電源装置	高橋広光・高瀬明生
735510	アレアンテナ方式	渡部 優・伊藤信一	741018	多相共通母線	稲村彰一
735511	ダイアゴナルホーンリフレクタアンテナ	片木孝至	741019	抵抗帰還形自製式トランジスタモータ	藤井 学
735512	機関点火時期調整装置	才田敏和	741020	半導体装置とその製造方法	中田伏祐
735513	母線再閉路方式	三上一郎	741021	同期分離回路	小島正典
735514	半導体基板の加熱装置	中島当記・鍋谷 弘 西岡 直	741022	耐熱絶縁壁	小笠原信雄・辰巳四郎
735515	故障検出装置	光岡 宏・多田一彦	741023	ポリキナゾロンの重合方法	西崎俊一郎・不月三晃 広田 潔
735516	電源回路	田井昌輝	741860	列車定位置停止装置	石田哲爾・金子弘美
735517	発光表示装置	池端重樹・藤野順一	741861	距離継電装置	古谷昭雄・鈴木健治 三宅康明
735518	電池用金属陰極	前田満雄・小沢建樹	741862	緊急割込用 RADA 装置	小林信三
735519	液体燃料燃焼方式	田畑則一・伊藤利朗 森川允弘・松永直利	741863	限時開閉器	杉浦 博
735520	液体燃料燃焼方式	森川允弘・甲斐潤二郎 松永直利・田畑則一	741864	限流装置	伊藤利朗・宮本紀男 和田勇一
735521	液体燃料燃焼方式	伊藤利朗・藤原通雄 甲斐潤二郎・野間口有	741865	限流装置	宮本紀男・和田勇一
735522	液体燃料燃焼方式	伊藤利朗・藤原通雄 甲斐潤二郎・野間口有	741866	限流装置	宮本紀男・和田勇一
735523	液体燃料燃焼方式	伊藤利朗・田畑則一 野間口有	741867	RADA 通信における呼出方式	北村春夫
735524	燃焼方式	大畑晃一・福田友広	741868	真空しゃ断器	伊吹恒二・信崎泰秀
735655	アナログデジタル変換装置	倉橋浩一郎	741869	電波反射体	森中明善・大屋忠敬
739265	電動噴霧器	服部信道・森田清司	741870	エレベータ 出発信号方式	竹内照男
739266	メータリレー装置	三好明好	741871	回転切換スイッチ装置	元木義明
739267	料金調定装置	岡上公彦	741872	周波数目盛表示装置	岡本春樹
739268	料金調定装置	岡上公彦	741873	ブラシレス同期機の界磁巻線温度計測装置	馬場俊晃
739269	料金調定装置	岡上公彦	741874	計数値読取装置	山中彪生
739270	料金調定装置	岡上公彦	741875	故障点標定装置	高田信治・田淵哲男
739271	料金調定装置	岡上公彦	741876	フラッシュパット溶接機の制御装置	山本利雄・奥田滝夫
739272	料金調定装置	岡上公彦	741877	電気回路装置	植松滋幸・中尾院治
			741878	溶接電流不平衡防止装置	佐野善之助

登録番号	名 称	発 明 者	登録番号	名 称	発 明 者
741879	限流開閉装置	渡辺 睦夫	744120	チェック機能を備えた時間分布測定装置	壺井芳昭・梅田義明 笹尾勇夫
741880	限流開閉装置	渡辺 睦夫	744121	表示線監視装置	古谷昭雄・菅井英介
741881	超電導線の接続方法	岩本雅民・佐藤 隆 山田忠利	744122	プラスチック船底付膨張式ゴムボート	森 浩晃・樋口昭義
741882	半導体装置およびその製造方法	米田良忠	744123	周波数検出装置	三宅康明
741883	電気回路装置	植松滋幸・中尾院治	744124	電気車制御方式	芦谷正裕
741884	電気回路装置	植松滋幸・中尾院治	744125	温床加温方式	安 川 武
741885	車両用暖房装置	高橋 剛	744126	温床加温方式	安 川 武
741886	電場発光装置	野島謙治・新居宏壬 栗津健三	744127	温床加温方式	安 川 武
741887	放電灯点灯装置	森本俊一	744128	温床加温方式	安 川 武
741888	減圧アーク加工法	山本利雄・島田 弥	744129	蓄熱装置	岩崎善彦
741889	点火時期調整装置	大西正義	745195	半導体素子の選択的熱処理法	中山光雄・梶原康也
741890	内燃機関点火装置における蓄電池の充電方法	三木隆雄	745196	電界緩和塗料	草川英昭
741891	内燃機関の点火時期調整装置	浅山嘉明	745197	電導塗料	草川英昭
741892	内燃機関点火装置	才田敏和	745198	RADA 受信方式	太田堯久
741893	プラズマディスプレイ装置	鳥取 浩	745199	制御格子付限流装置	宮本紀男・和田勇一
741894	電 池	松岡宏昌・前田満雄 小沢建樹	745200	限流装置	宮本紀男・和田勇一 伊藤利朗
741895	巻線形誘導電動機	新良由幸・神田昭夫	745201	電力変換装置	細野 勇
741896	巻線形誘導電動機のスリップリング短絡装置	神田昭夫	745202	コパール又は鉄ニッケル合金の表面酸化膜除去処理液	南郷重行
741897	機関点火時期調整装置	才田敏和	745203	RADA 通信方式	小林信三・中村信弘
744118	線形電子加速装置	戸田哲雄	745204	半導体装置	上 川 孝
744119	方向比較電圧位相比較組合せバイロット継電装置	三上一郎	745205	半導体装置	加藤忠雄・安岡晶彦
			745206	ランダム信号発生器	近藤輝夫
			745207	故障点標定装置	古谷昭雄・高田信治

〈次号予定〉 三菱電機技報 Vol. 49 No. 10 電力系統保護制御特集

特集論文

- これからの電力系統保護・制御装置
- 500 kV 用線路保護継電装置
- 500 kV 用母線・変圧器保護継電装置
- 最近の高抵抗系用継電装置
- 500 kV 系統制御装置
- 電力系統運用自動化システム

普通論文

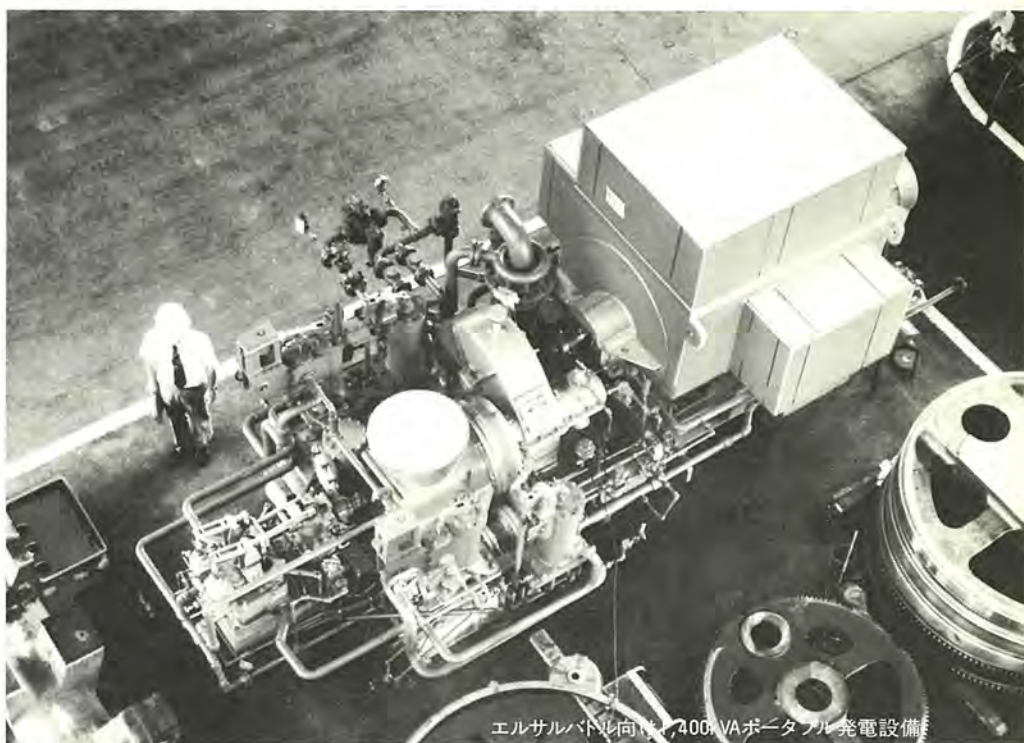
- 大容量安定送電のための超速応ブラシレス励磁方式の開発
- 大電力系統安全運用のためのセキュリティ自動監視方式の開発
- 圧延補機及びクレーン用直流電動機の新モデル
- 三菱データ集配信システム《MELCOM PENTA-NET》

三菱電機技報編集委員			三菱電機技報 49 巻 9 号		昭和 50 年 9 月 22 日 印刷 昭和 50 年 9 月 25 日 発行
委員長	松岡 治	常任委員	三 輪 進	定価 1 部 300 円 (送料別) 無断転載を禁ず	
副委員長	神崎 遼	委 員	吉山裕二	編集兼発行人	松岡 治
常任委員	武藤 正		飯田春吉	印刷者	高橋 武夫
	伊藤一夫		大田重吉	印刷所	東京都新宿区市谷加賀町 1 丁目 12 番地 大日本印刷株式会社
	宇佐見重夫		粕谷一雄	発行所	東京都千代田区丸の内 2 丁目 1 番 2 号 (〒 100) 菱電エンジニアリング株式会社内
	北川和人		久保博司		「三菱電機技報社」Tel. (03) 218 局 2494
	祖父江晴秋		熊本 永	発売元	東京都千代田区神田錦町 3 丁目 1 番地 (〒 100) 株式会社 オーム社書店
	塚本信雄		橋爪 基		Tel. (03) 291 局 0912, 振替口座 東京 20018
	久松章三		林 昇寿		
	日野雅行		(以上 50 音順)		
	本間吉夫				
9 号特集担当 守田光良					

NEWSFLASH

エルサルバドル向けポータブルタービン発電機

このたびエルサルバドルのAHUACHAPAN地熱発電所のメインタービン起動用電源及び所内停電時の非常用電源として、1,400kVAポータブル形タービン発電機を製作納入しました。この発電機は駆動用の背圧タービン及び減速ギヤと共通の台板に設置されており、工場内で完全に組立てた状態で輸送され、現地にてそのまま据え付けられるポータブル構造になっています。したがって現地では蒸気管及び外部ケーブルを接続するだけで運転可能です。発電機のポータブル化に伴い、外部リードの接続を容易にするため各部温度計測用のサーモカップル端子など一連の端子を一つの端子箱に収納しています。また励磁機はオーバーハングブラシレス構造を採用し、発電機本体の冷却も開放形として保守点検の簡素化も図っています。さらに発電機本体の両側に保護用及び計器用CTを積載してCT盤を一面省略しました。なお本発電機は地熱発電所に設置されるために状況が非常に悪く、発電機内外の腐蝕、絶縁劣化などの防止にはとくに留意した設計になっています。



エルサルバドル向け1,400kVAポータブル発電設備

発電機仕様

1,400kVA (1,120kW)
4,160V 60Hz 1,800rpm

4極 CFC形(積層コア同心巻)

屋内開放保護形

オーバーハングブラシレス

船用積付計算機に採用

マイクロプロセッサを応用した「万能簡易計算テレビ」を開発

船用電機品では、年々電子技術が応用されていますが、今回業界に先がけてマイクロプロセッサを使用して、表示装置にテレビを使用した万能簡易計算機を開発しました。この装置は従来ミニコン+CRTテレビの組合せで行われていた分野、リレー演算増幅器などを多数使っている分野、複雑な統計処理を行う分野、プラントの監視盤などに適合するもので、安価・コンパクト・重電的なタフさがセールスポイントになっています。具体例としては船用積付計算機を完成して50年6月、三菱重工業(株)に納めましたが、現在製作中のものとしては、冷凍コンテナの集中監視装置・主機エンジン自動制御装置・モニタ装置・船内電源の自動化装置用などがあります。

この装置は、船内以外にも使用できるもので、次のようなところにその経済性を発揮するものと期待されております。

- ① 複雑な精度の高い繰返し計算をしている分野。高精度の演算をプログラム通り短時間に(32ビットのフローティング演算1秒に約1,000回の速度)計算可能で、その結果はテレビに数字又はグラフで表示可能。
- ② 多数のセンサーがあり、それを中央で集中監視するもので従来の大きなグラフィックパネルなど不要。ゴルフ場・病院・鉄工所・ホテル・ビルなどの一般向け、中小企業の原価計算・工程管理など従来アナログ計装を主としている各種産業用工業計装システムなど幅広い応用ができます。

