

可変速システムの電力分野への適用拡大

Toshiba's Experience with Adjustable-Speed Systems for Power Systems

向井 一馬
K. Mukai

西川 義清
Y. Nishikawa

金井 文雄
T. Kanai

特集 II

深夜や休日など軽負荷時の周波数調整に有効な可変速揚水発電システムが次々と実機に適用され、その有効性が実証されている。当社は、世界初の可変速揚水発電システムを東京電力(株)矢木沢発電所に完成させ、続いて東京電力(株)塩原発電所に完成させた。一方、電源開発(株)奥清津第二発電所には GTO (Gate Turn Off thyristor) 変換器を適用し、完成させた。さらに、世界初の系統周波数調整専用フライホイール発電システムも開発し、沖縄電力(株)に納入した。これらは、当社的高速大容量発電電動機製作技術、高速演算デジタル制御技術および高電圧大容量パワーエレクトロニクス技術の結集により実現したものである。

今後ますます可変速システムの適用拡大が期待される。

Adjustable-speed pumped storage systems, which are effective for automatic frequency control (AFC) operation during times of off-peak power demand such as late-night hours and holidays, have been installed and are in commercial operation. The advantages of the adjustable-speed system have been corroborated.

Following the completion of the No.2 Unit of the Yagisawa Power Station owned by The Tokyo Electric Power Co., Inc., which is the world's first adjustable-speed pumped storage facility, Toshiba has completed two other adjustable-speed pumped storage systems. We have also expanded this technology to the flywheel generating system, which has been successfully commissioned as the first such unit developed in the world for stabilizing electrical network frequency.

It is expected that the application of these systems will increase from now on.

1 まえがき

可変速揚水発電システムの導入により深夜や休日などの軽負荷時に揚水発電所での周波数制御 (AFC: Automatic Frequency Control) が可能となり、系統の経済的な運用が行え、周波数調整容量も増加できる。このため、当社は約 10 年前に電力会社と共同で可変速システムの開発を開始し、今までに多くの実用化に成功している。

ここでは、当社の可変速技術、実プラントでの検証結果および同システムの応用技術であるフライホイール発電システムについて紹介する。

2 最近の技術動向

世界初の可変速揚水発電システムである東京電力(株)矢木沢発電所 (2 号機 85 MVA) には二次励磁装置にサイクロコンバータを適用した。続いて製作した東京電力(株)塩原発電所 (3 号機 360 MVA) にもサイクロコンバータを適用し、同システムの信頼性を確立した。可変速システムのさらなる高機能化を目的に GTO 変換器を適用したシステムも開発し、電源開発(株)奥清津第二発電所 (2 号機 345 MVA) に適用して有効性を確認した。

当社は、これら揚水発電所 3 プラントで可変速システム

を実用化し、高速大容量揚水発電所向けの可変速技術を確立した。これらのプラントの周波数制御によって、系統の経済的運用が可能となった。この技術は、高速大容量発電電動機的设计・製作技術、信頼度の高い高速演算デジタル制御技術および高電圧大容量パワーエレクトロニクス技術の結集により支えられている。

この特長の多い可変速技術を応用して電力品質の向上に寄与することを目的に、従来からあるフライホイール発電技術に可変速システム技術を融合させた系統周波数調整専用のフライホイール発電システムを世界で最初に開発した。これは、系統の周波数変動に応じて回転体のエネルギーを瞬時に電力に変換して放出またはその逆を行うもので、負荷変動が大きな系統に有効である。当社は沖縄電力(株)に同システムを納入し、有効性を検証した。

3 可変速揚水発電システムの概要

図 1 に可変速揚水発電システムの構成を示す。

発電電動機の回転子は、三相巻線型で二次励磁装置に接続される。二次励磁装置は数 Hz の低周波数を出力する変換器と励磁用変圧器および制御装置で構成される。

発電電動機の回転子に三相交流電流を流すと回転子上に回転磁界が発生する。この回転磁界の回転速度を n_2 とし、

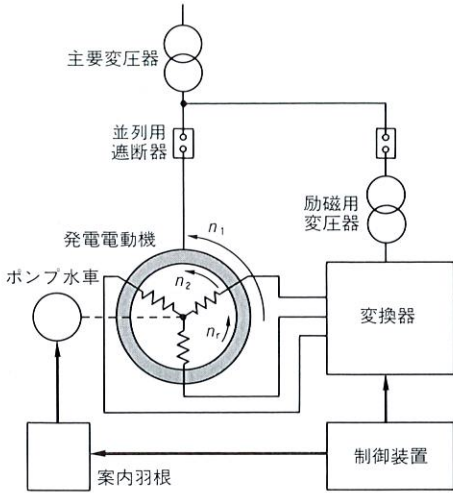


図1. 可変速揚水発電システムの構成 三相巻線型回転子をもつ発電電動機と周波数変換器で構成される。

Configuration of adjustable-speed pumped storage system

回転子の機械的回転速度を n_r とすると、発電電動機の固定子側から見た磁界の回転速度 n_1 は次の関係式で表せる。

$$n_1 = n_2 + n_r \quad (1)$$

すなわち、固定子磁界の回転速度を n_1 にすると、固定子磁界の回転速度 n_1 と回転子の回転速度 n_r との差 n_2 に相当する低い周波数(すべり周波数)で回転子巻線を交流励磁すれば、発電電動機をつねに系統に同期させながら、回転子を任意の回転速度に制御して運転させることが可能となる。

このため、回転子に直結されたポンプ水車を任意の回転速度で運転できる。ポンプ入力は、およそ回転速度の3乗に比例して変化するので揚水運転時の入力を大幅に調整することができる。

4 制御システム

図2に可変速揚水発電システムの制御系構成を示す。

制御系は、シーケンス制御、調整制御、交流励磁電流制御の三つに大別される。調整制御と交流励磁電流制御は有効電力のブロックと無効電力のブロックに分かれ、それぞれ階層構造となっている。

シーケンス制御では、起動から停止までのシーケンス、プラント制御状態の監視、制御所とのインタフェース、保護シーケンスを担当する。

調整制御では、有効電力成分に関してはシステム有効電力を制御所からの指令に追従するように、また、ポンプ水車にとってつねに高効率となるようにガイドベーン開度指令値 (GV^*) およびすべり指令値 (ω^*) を演算する(すべり: 回転速度と系統周波数との差)。すべり制御は、主機のすべりを一定にするよう変換器のトルク成分電流指令値 (I_{2q}^*) を操作する。また、無効電力成分に関してはシステム無効電力を制御所からの指令に追従するよう電圧指令値 (V_1^*) を操作する。電圧制御では、端子電圧 (V_1) を一定にするよう変換器の励磁成分電流指令値 (I_{2d}^*) を操作する。

交流励磁電流制御では、変換器の出力電流を有効電力だ

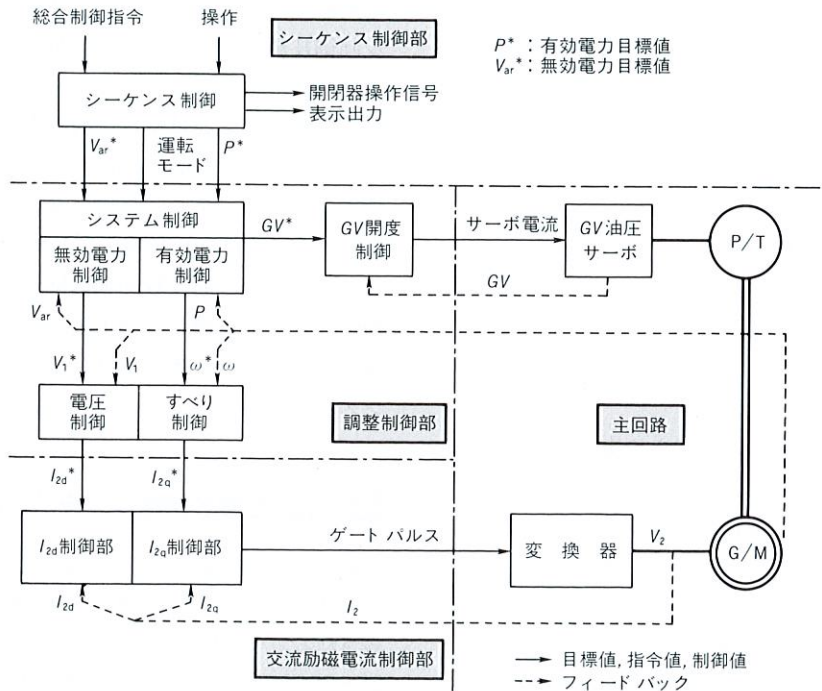


図2. 制御システムの構成 制御系はシーケンス制御、調整制御および交流励磁電流制御に大別される。

Control scheme

けが関与するトルク成分電流 (I_{2q}) と無効電力だけが関与する励磁成分電流 (I_{2d}) に分解し、それぞれ指令値 I_{2q}^* 、 I_{2d}^* に追従するよう変換器のゲートパルスを通じて変換器出力電圧 (V_2) を操作する。

5 発電電動機

可変速揚水発電システムに用いる発電電動機は、回転子上にすべり速度に見合った回転磁界を作るため交流で励磁されるので、従来の直流励磁の定速発電電動機(突極型)とは構造が異なる。すなわち、回転子は三相分布巻線を施した円筒構造であり、巻線型誘導電動機と類似の構造となる。

巻線型誘導電動機の実績は従来 30 MW 級までであり、大容量の可変速発電電動機の実用化においては材料や構造など、新たに開発すべき課題が残されていた。例えば、回転子巻線絶縁、回転子鉄心構造、スリップリング構造、通風冷却などであるが、最大のポイントは回転子鉄心からオーバハングする回転子巻線端部の支持構造である。この点について以下に説明する。

回転子巻線端部は、主機の運転により強大な遠心力が発生するので適切な方法で支持する必要がある。この構造として、誘導電動機では鋼線や絶縁テープを巻線端部外周に巻回するバインド線方式または金属性の円筒を巻線端部全体にかぶせるエンドリング方式が採用されてきた。しかし、いずれの方式も大容量発電電動機に採用するには、機能上不利な点や製作・組立上困難な点があった。当社はこれらの短所を解決した独自の方式を開発し、実用化に成功した。それが、図 3 に示す U ボルト支持方式である。巻線端部の

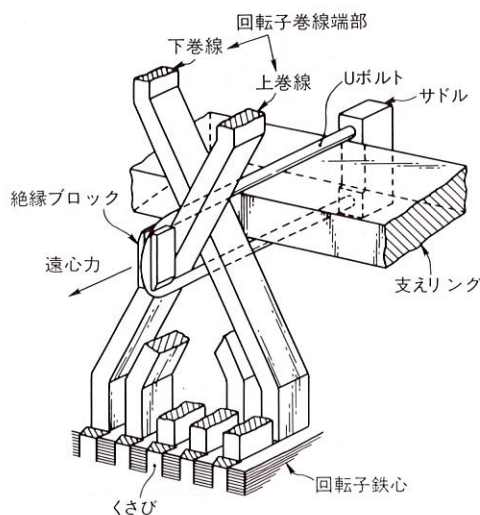


図 3. U ボルト支持構造 (模式図) 回転子巻線端部と内周側の支えリングとの間を非磁鋼性の U ボルトで接続している。機能上など多くのメリットがある。

Model of U-bolt supporting structure

内周側に強度の高いドーナツ状の“支えリング”を数段配置し、巻線端部と支えリング間を非磁鋼性“U ボルト”で接続する構造である。

この方式は、機能上、組立・保守上で数多くのメリットをもっている。特に、現地での組立スペースが小さい、組立工期が短い、回転子巻線は固定子巻線と同様に部分的な補修が可能である、などが他の方式に比べて有利な点である。また、他の支持方式では巻線端部の外側が支持物で覆われているので冷却に特別な配慮が必要であるが、U ボルト支持方式では通風が容易で冷却上の問題がない。

この方式を採用するにあたり、構成部品の強度を検証するための部分モデル試験を行い、ついで回転子モデルによる回転試験により解析値と実測値の整合性を確認した。これらの試験により十分に信頼性が高いことを検証したうえで実機に適用した。

6 二次励磁装置

二次励磁装置は商用周波数の交流電力を数 Hz の交流電力に変換する静止型周波数変換装置である。現在、可変速揚水発電システムに適用している変換装置には、半導体素子としてサイリスタを使用したサイクロコンバータと、自己消弧型素子である GTO を使用した GTO 変換器がある。

6.1 サイクロコンバータ方式

サイクロコンバータとは、ある周波数の交流電力を直流を介さずに直接他の周波数の交流に変換する回路方式である。サイリスタの点弧位相を時々刻々と変化させて出力電圧が正弦波状になるようにしたもので、2 台のサイリスタ変換器の出力を逆並列に接続し両方向の電流を流せるようにしている。

図 4 は、サイクロコンバータを使用した塩原発電所の可変速揚水発電システムの構成を示す。サイリスタ変換器を 2 台逆並列に接続して 1 組とし、入力電源の位相が 30° ずれた 2 組を直列に接続し、入力電源への高調波、出力電流リップルを低減している。サイクロコンバータは、非循環電流型で正負の電流の切換え時に 2 台のサイリスタ変換器ともいったん停止する方式を採用している。サイクロコンバータの出力には電力系統の短絡・地絡故障の際に回転子側に発生する過電圧を抑制し、発電電動機およびサイクロコンバータを保護する過電圧保護装置が接続される。

サイクロコンバータは、GTO 変換器に比較して小型、低損失であるが、電力系統の短絡・地絡故障により入力電圧が低下したとき、サイクロコンバータの運転継続がしにくい点がある。

6.2 GTO 変換器方式

GTO 変換器は、商用周波数交流電源を直流に変換する GTO コンバータと直流を低周波の交流電力に変換する GTO

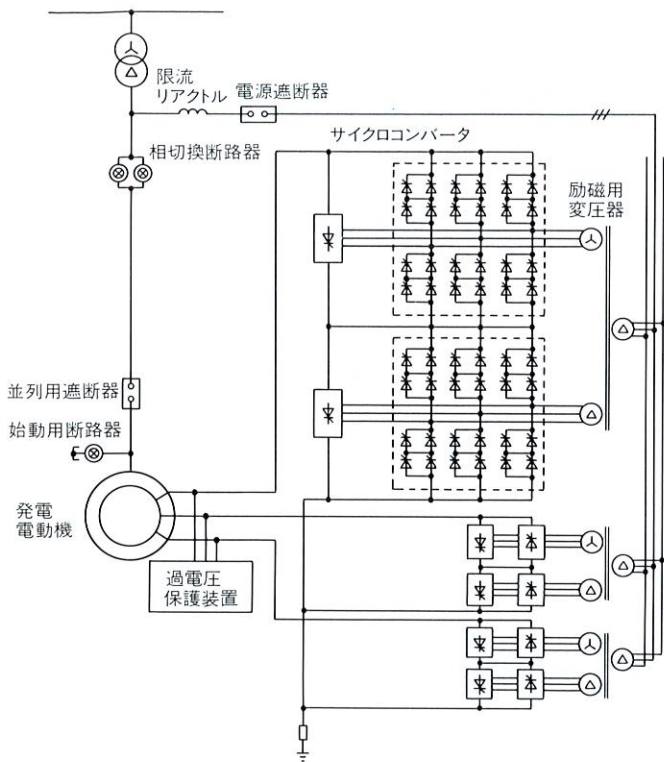


図4. サイクロコンバータ方式可変速揚水発電システム サイクロコンバータはサイリスタ変換器を逆並列にしたものが3組で3相を構成する。

Adjustable-speed pumped storage system with cycloconverter

インバータおよび直流の過電圧を抑制する GTO チョップカから構成される。

図5は、GTO 変換器を使用した奥清津第二発電所のシステム構成を示す。GTO インバータは、3 レベルインバータを採用して高調波を低減し、これを6台並列に接続して大電流・高電圧のインバータを実現した。GTO コンバータは変圧器により多重化し、見かけ上のスイッチング周波数を二倍にして高調波を低減している。GTO インバータ、コンバータともに 500 Hz の PWM (パルス幅変調) 制御を採用している。GTO コンバータは出力する電圧、位相を制御し入力無効電力がゼロになるようにしている。したがって、GTO コンバータは発電電動機に必要な有効電力だけを供給すればよく、GTO インバータより少ない容量で済む。

GTO 方式では GTO コンバータの入力率が1であるため、サイクロコンバータ方式に比べて発電電動機が供給する無効電力は不要であり発電電動機容量を低減でき、励磁用変圧器も小型になる。また、電力系統の軽微な短絡・地絡故障では GTO チョップカだけで過電圧を抑制するためにサイクロコンバータに比べて系統故障回復後の系統安定化への貢献度が高い。従来、GTO 変換器はサイクロコンバータに比べて外形・損失の面で不利であったが、大容量 GTO の採用、制御方式の改良により小型化、低損失化を実現する目途がたった。

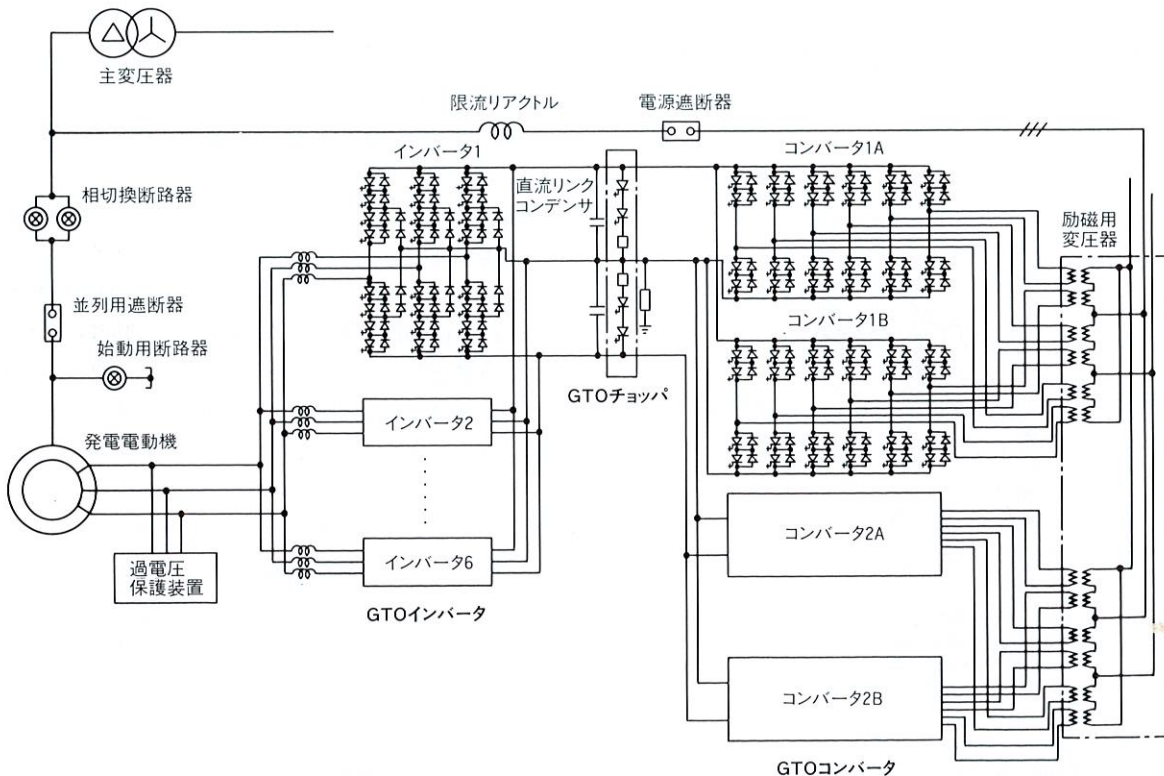


図5. GTO 変換器方式可変速揚水発電システム GTO 変換器は GTO コンバータ、GTO インバータ、GTO チョップカで構成される。

Adjustable-speed pumped storage system with GTO inverter-converter

7 総合動特性シミュレーション解析

可変速揚水発電システムの運転特性は定速機と異なる。特に、同一水路に定速機と可変速機が設置されているプラントでは、隣接機の運転状態の変化によって可変速機の運転点が運転限界を超える過負荷またはポンプ逆流運転領域などにならないことの確認が必要である。また、水路系やポンプ水車特性による制御への影響についても確認が必要である。

当社は、これらの運転特性を検討・確認するために水路系、ポンプ水車特性および可変速制御系を含めた総合動特性シミュレーション解析プログラムを構築した。

解析は、自号機の各運転状態のほか、隣接機揚水開始、隣接機入力遮断、隣接機負荷遮断などに対して行い、実機の試験を行う前にポンプ水車の運転特性、制御特性を把握することができ、安全に実機試験を行うことができる。シミュレーション解析結果と実機の試験結果とはほぼ一致しており、新規プラントを設計する際にシステムの運転特性や安定性を確認する解析ツールとして活用している。

8 可変速揚水発電システムの実機適用

当社は、可変速システムを次の揚水発電所3プラントに適用した。

8.1 東京電力株矢木沢発電所

世界初の可変速揚水発電システムとして1990年12月に2号機が営業運転を開始した。実運用に際しては、これまでにモデル試験やシミュレーション解析で確認してきた可変速揚水発電システムの諸特性を有水試験で検証し、その有効性を確認した。特に揚水運転時のAFCに関し、50~85MWの範囲で入力調整運転が可能になった。図6に揚水AFC試験結果を示す。

また、発電運転においても、これまでは落差変動が大きく振動面から運転を制限していた領域でも振動値が大幅に改善され0~80MWの範囲の安定運転が可能になった。

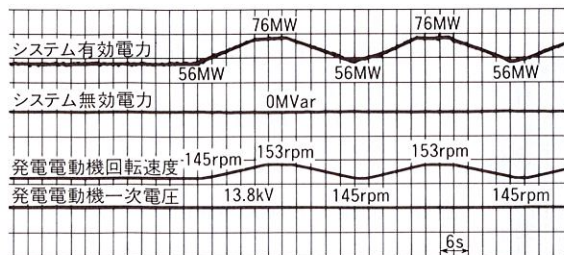


図6. 揚水AFC試験 可変速システムにより、揚水運転時に有効電力が指令値に従って制御されている。回転速度も安定に制御されている。

AFC test in pumping mode

8.2 東京電力株塩原発電所

矢木沢発電所の実績を基に、サイクロコンバータを励磁装置とした300MW級可変速揚水発電システムとして3号機が1995年6月に営業運転を開始した。

発電所の3台の発電電動機のうち、特に3号機はシステムの周波数調整に寄与するため優先的に運用されている。揚水始動は、サイクロコンバータを利用することで外部の始動装置を必要としない自己始動方式を開発し、採用した。

図7に揚水始動試験結果を示す。

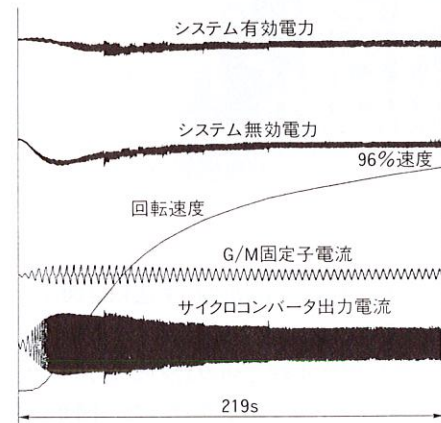


図7. 揚水始動試験 発電電動機の回転子にサイクロコンバータから可変周波数の始動電流を与え、安定して揚水始動が行えることを確認した。

Pump starting by cycloconverter

8.3 電源開発株奥清津第二発電所

GTOインバータ・コンバータを励磁装置として用いた300MW級では世界初の可変速揚水発電システムとして2号機が1996年6月に営業運転を開始した。

GTOインバータ・コンバータは自己消弧型素子であるGTOを用いているため、系統故障や系統不平衡時の運転継続能力に優れ、励磁電源側の力率1.0制御による発電電動機や励磁用変圧器容量低減にも貢献し、次世代の可変速揚水プラント用励磁装置として期待されている。

図8にGTOインバータ・コンバータ盤を示す。

9 フライホイール発電システム

可変速フライホイール発電システムは、比較的小規模な電力系統において、急峻(しゅん)な負荷変動によって生ずる周波数変動を規定値以内に抑制することを目的に開発したもので、システムの周波数変動に応じて、回転エネルギーを瞬時に電力に変換して放出、または電力を回転エネルギーとして吸収するシステムである。

当社は単独系統をもつ沖縄電力(株)にこのシステムを納入

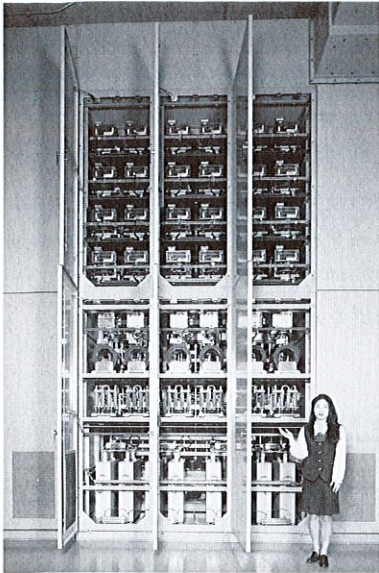


図8. GTO変換器 わが国で最大容量(31.5 MVA)の可変速揚水発電システム用GTO変換器である。
GTO converter

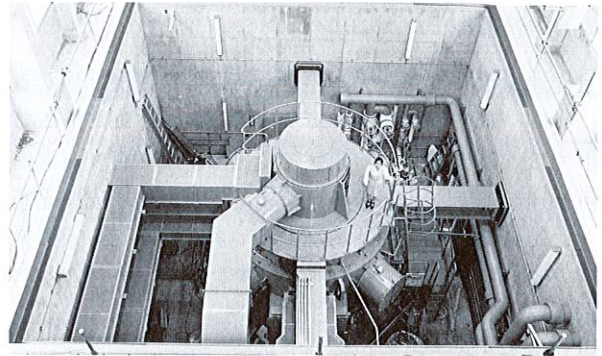


図10. フライホイール発電機 フライホイール発電機は縦軸で、回転子の下にフライホイールを直結している。
Flywheel generator

- (2) サイクロコンバータ 6.55 MVA, 0.25~9 Hz
フライホイール発電機の外観を図10に示す。

し、1996年8月に世界で最初の営業運転を開始した。実機開発にあたっては、シミュレーションによって効果を確認するとともに、模擬送電線と組み合わせた100 kW可変速モデル試験を実施し、十分な検証を行った。図9に23 MWの急変負荷を印加したときのシミュレーション結果の一例を示す。フライホイール発電システムがない場合には、最大で-0.5 Hzを超えていた周波数変動が同システムを採用することにより、目標-0.3 Hz以上に対し-0.262 Hzに抑制できることを確認した。

現地における実証試験においても、系統負荷急変に対しこのシステムがすばやく応答し、周波数変動を抑制することを確認するとともに、シミュレーションの妥当性を確認した。

フライホイール発電機およびサイクロコンバータの定格は次のとおりである。

- (1) フライホイール発電機 26.5 MVA, 510~690 rpm

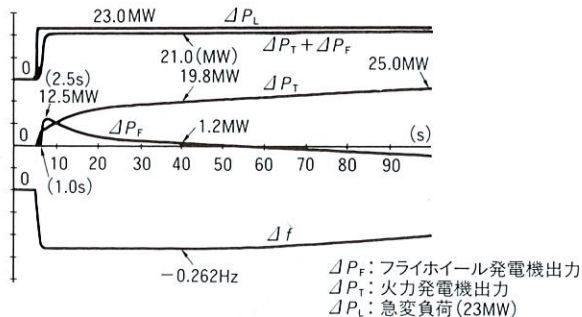


図9. 急変負荷印加時の応答波形 単独系統に急峻な負荷を印加したときに、フライホイール発電システムの効果により周波数変動が約1/3に抑制される。

Results of simulating system frequency stabilization by flywheel generator

10 あとがき

矢木沢発電所に世界初の可変速揚水発電システムを導入してから6年間良好な運転を継続している。この実績によりこのシステムの信頼性が確立された。最近の新設揚水プラントでは必ず可変速システムの導入が計画されている。

一方、可変速フライホイールシステムをさらに発展させて有効電力と無効電力を独立して瞬時に制御するシステムの実用化も検討している。今後ますます可変速システムが電力分野に拡大適用されていくものと期待される。

文献

- (1) 日置敏一郎：可変速揚水発電，OHM，4，pp.40-45 (1993)
(2) 金井丈雄，他：電力システムへの自動式インバータの適用，東芝レビュー，51，4，pp.10-12 (1996)



向井 一馬 Kazuma Mukai

電力事業部水力プラント技術部主査。
揚水発電プラントのシステムエンジニアリング業務に従事。
Power Systems Div.



西川 義清 Yoshikiyo Nishikawa

京浜事業所発電機部主査。
水車発電機の開発・構造設計に従事。
Keihin Product Operations



金井 丈雄 Takeo Kanai

府中工場パワーエレクトロニクス部主査。
電力システム用自動式変換器の開発設計に従事。電気学会会員。
Fuchu Works