

沖縄やんばる海水揚水発電所の可変速揚水発電システム運転開始

On-Line Operation of Adjustable-Speed System for Okinawa Yanbaru Seawater Pumped Storage Power Plant

太田 仁志
OHTA Hitoshi

影山 隆久
KAGEYAMA Takahisa

西川 正
NISHIKAWA Tadashi

通商産業省資源エネルギー庁により、世界初の海水揚水発電所として、沖縄県本島北部で建設が進められてきた沖縄やんばる海水揚水発電所は、1999年3月から5年間の実証試験運転を開始した。当社は、この発電所に世界最多実績となる5台目の可変速システムを納入した。この可変速システムは、当社の可変速発電電動機製作技術、高速演算ディジタル制御技術及び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。これまでの現地試験結果から、可変速システムの有効性が改めて確認された。この可変速システムは、今後揚水発電所だけでなく、中小水力発電所や電力応用分野へも拡大適用が期待される。

The Okinawa Yanbaru Seawater Pumped Storage Power Plant has been completed in the northern part of the main island of Okinawa Prefecture by the Agency of Natural Resources and Energy of the Ministry of International Trade and Industry (MITI). This facility, the first seawater hydroelectric power plant in the world, has been in operation since March 1999.

Toshiba supplied the adjustable-speed system to the project as the fifth set of its kind, making our company the world's most experienced manufacturer. The applications of this adjustable-speed system will expand in the future, to encompass not only pumped storage power plants but also small and medium-size hydroelectric power plants and power system facilities.

1 まえがき

この発電所は、通商産業省資源エネルギー庁から電源開発(株)が委託を受けて、建設並びに実証試験を行うものである。海水による発電設備への腐食の影響、海生生物の水路系への付着状況、海水による周辺環境への影響などの調査を行うことを目的に、今後5年間実証試験運転が行われる予定である。

当社が電源開発(株)奥清津第二発電所に納入した300MW級可変速揚水発電システムに続いて、この発電所に当社は2台目となるGTO(Gate Turn-Off Thyristor)変換器を適用した可変速揚水発電システムを製作し、現地試験で期待どおりの良好な結果が得られた。ここでは、当社が納入した可変速揚水発電システムの概要、構成機器及び試験結果について述べる。

2 発電所の概要

この発電所は、上部調整池と海面との有効落差136mを利用して、最大使用水量26m³/s、最大出力30MWで発電するものである。上部調整池は海岸から約600m、標高約150mの台地に位置し、最大出力で6時間の発電運転が可能な貯水量を持つ、特徴のある八角形の掘込み式とし、海を下部調整池とする純揚水式発電所である。発電所システム要項を表1に示す。

表1. 沖縄やんばる海水揚水発電所システム要項
Specifications of power plant

項目	仕様
発電電動機	容量 31.5 MVA／31.8 MW (発電機／電動機)
	定格電圧 11.0 kV
	回転速度 450 min ⁻¹ ±6%
	プラント力率 0.9／0.95 (発電機／電動機)
GTOインバータ	容量 3.96 MVA
	出力電圧 915 V
	出力電流 2,500 A
	素子構成 (1S-1P-6A)×3並列
	出力周波数 0.25 Hz～3.6 Hz
GTOコンバータ	容量 2.8 MW
	入力電圧 860 V
	入力電流 1,880 A
	素子構成 (1S-1P-6A)×2並列
	入力周波数 60 Hz

この発電所に可変速揚水発電システムを適用することで、次の利点が得られる。

- (1) 発電・揚水運転時の周波数調整運転が可能となり、系統周波数の安定化に寄与できる。
- (2) 揚水並列・解列時の入力電力を最小限にできるため、電力系統への電力動搖が低減できる。また、調相運転中の損失が低減できる。
- (3) 発電運転時の効率が向上するだけでなく、更に、部分負荷運転領域が拡大される。
- (4) 発電電動機の回転エネルギーを瞬時に電力に変換し

て、電力系統動揺時の系統安定度向上に寄与できる。

3 システム構成機器

この発電所に当社が納入した可变速揚水発電システムの概要と特長を以下に述べる。主回路単線結線図を図1に示す。

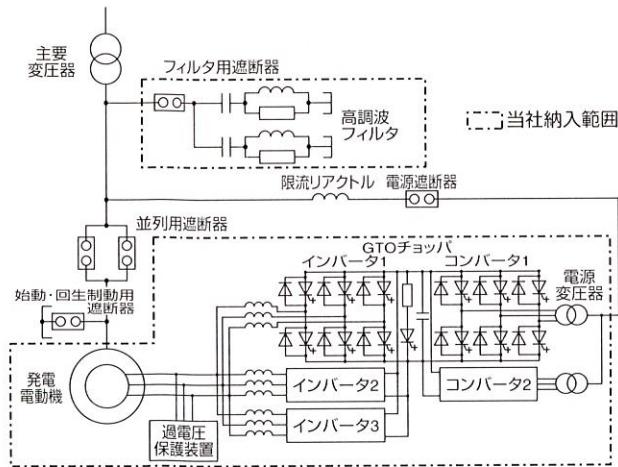


図1. 主回路単線結線図 可变速システムは、可变速発電電動機、GTOインバータ、GTOコンバータ、GTOチョッパ、過電圧保護装置などから構成される。

Schematic diagram of adjustable-speed pumped storage system

3.1 発電電動機

可变速発電電動機は、回転子上にすべりに見合った回転磁界を作るために、従来の直流励磁の定速発電電動機の回転子とは構造が異なり、三相分布巻線を施した円筒構造となる。可变速発電電動機回転子を図2に示す。

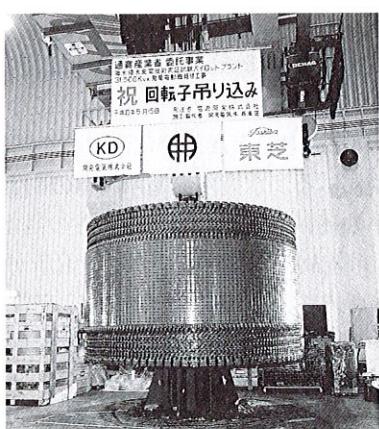


図2. 可变速発電電動機回転子 回転子は円筒形構造であり、巻線端部はUボルト支持構造を採用している。

Adjustable-speed generator-motor rotor

回転子巻線端部は、主機の運転中に作用する大きな遠心力を支持するために、当社独自のUボルト支持方式を採用了。この方式は、機能上、組立・保守上で数多くのメリットを持ち、現地での組立スペースの最小化、組立工期の最短化を図った。

発電電動機の通風冷却は電動ファンを省略して、回転子のエアーダクトを利用したラジアル通風方式を採用了。

また、回転子上部に上部ガイド軸受を、回転子下部にスラスト軸受と下部ガイド軸受を設ける立軸準傘形構造とした。スラスト軸受には、当社標準のスプリング支持方式を採用了し、軸受の小型・低損失化を図るとともに、過酷な運転条件下でも高性能を発揮している。

3.2 二次励磁装置

GTO変換器を図3に示す。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、直流を低周波の交流電力に変換するGTOインバータ、直流の過電圧を抑制するGTOチョッパから構成される。更に、系統故障の際に、二次回路に発生する過電圧から発電電動機及びGTO変換器を保護するために、GTOインバータの出力側にサイリスタ素子で構成される過電圧保護装置(OVP: Over Voltage Protection)が接続される。

GTOインバータ・コンバータはPWM(Pulse Width Modulation)制御方式による三相ブリッジ方式とした。GTO素子定格は6kV-4kAであり、GTOインバータのスイッチング周波数は、スイッチング損失の低減を図るために300Hzにした。

揚水始動並びに発電・揚水調相始動の際には、始動・回生制動用遮断器で発電電動機一次側を短絡して、GTO変換器による自己始動方式とした。このことにより、専用の始動装置を省略することができた。

GTO変換器用電源変圧器は、地下発電所に設置されるため、もっともコンパクトな構成となる送油水冷式とした。また、変圧器の鉄心に磁束検出用のホール素子を設けている。

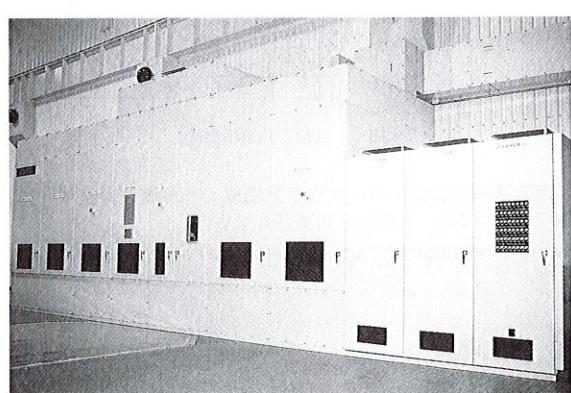


図3. GTO変換器 GTOインバータ、GTOコンバータ、GTOチョッパ、過電圧保護装置から構成される。

GTO inverter and converter

4 可变速制御システム

4.1 可变速制御装置の構成

制御装置の外観を図4に、制御装置のハードウェア構成を図5に示す。システム有効電力、システム無効電力、電圧制御、すべり制御、インバータ制御、コンバータ制御を行う二重化構成の可变速調整制御盤、操作スイッチやメータを備えた監視制御盤、系統故障時の二次励磁装置の挙動を記録する高速な波形記録装置を備えた波形記録計盤から主に構成される。

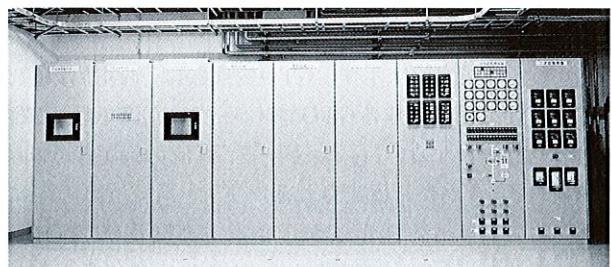


図4. 可变速制御装置 可变速調整制御盤3面、監視制御盤1面、波形記録計盤2面、二次回路保護盤1面、インターフェース盤2面、計9面から構成される。

Adjustable-speed control system

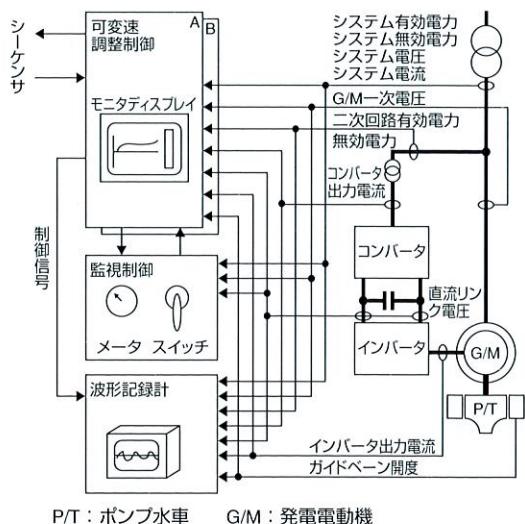


図5. 可变速制御装置のハードウェア構成 可变速調整制御は二重化構成となっており、信頼性を向上させている。

Hardware configuration of adjustable-speed control system

4.2 制御機能

可变速揚水発電システムの制御システムの構成を図6に示す。制御システムは、システム有効電力制御部、システム無効電力制御部、インバータ制御部、コンバータ制御部に大別される。

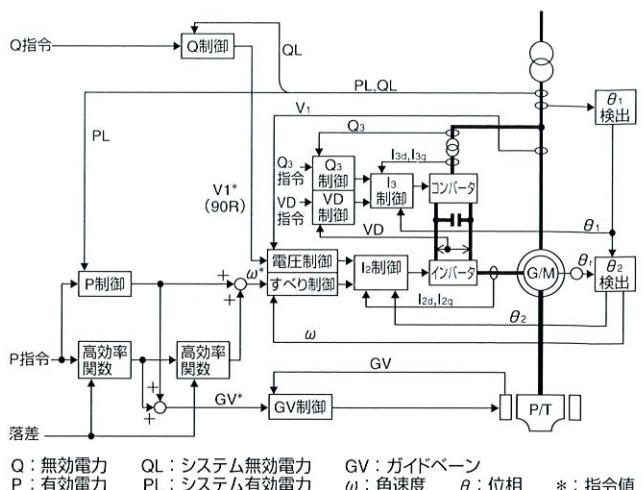


図6. 可变速制御システムの構成 有効電力分と無効電力分は独立に制御される。

Configuration of adjustable-speed control system

システム有効電力制御部は、有効電力制御、高効率関数、すべり制御、ガイドベーン開度制御、インバータ電流制御(トルク成分)から構成される。制御所からのシステム有効電力指令と落差からポンプ水車として高効率運転となるガイドベーン開度やすべりを演算し、有効電力制御により補正(発電方向はガイドベーン開度、揚水方向はすべりを補正)し、すべり指令に基づきインバータ出力電流のうち、トルク成分の電流指令値(I_{2q}^*)を操作する。また、ガイドベーン開度指令に基づきガイドベーン開度を制御する。

システム無効電力制御部は、従来の定速機と同様に、無効電力制御で端子電圧設定(90R)を操作し、電圧制御で励磁成分電流指令値(I_{2d}^*)を操作する。

インバータ制御部では、GTOインバータの出力電流を有効電力に関与するトルク成分電流(I_{2q})と無効電力に関与する励磁成分電流(I_{2d})に分解し、 I_{2q}^* , I_{2d}^* に追従するように変換器のゲートパルスを介してGTOインバータ出力電圧を制御する。

また、コンバータ制御部では、直流リンク電圧(VD)、電源変圧器一次無効電力(Q_3)を一定にするようにそれぞれコンバータの有効分電流(I_{3q})と無効分電流(I_{3d})を制御する。

4.3 沖縄やんばる海水揚水発電所特有の制御機能

(1) 所内単独運転機能 発電所からの送電線が1回線であり、系統故障などで系統から発電所が切り離された場合、所内電源を確保するために、発電機出力をコンバータの電源として使用しながら所内単独運転ができるようにした。

(2) OVPリセット制御 系統故障の際に、OVPで発電電動機二次側を短絡したあと、送電線用遮断器開放後に、通常の運転に戻せるように発電電動機二次巻線とOVP間で還流する電流を、インバータで打ち消す

OVPリセット制御機能を採用した。

- (3) 発電調相→発電切換え制御 発電調相運転から発電運転に切り換える際、ランナの着水時の電力突変を小さくするために、いったん並列用遮断器を開放し、主機を停止させることなく昇速させ、揃圧(せんあつ)、並列後発電運転に移行できる機能を採用した。
- (4) インバータ再起動制御 系統故障により、インバータが過電流でいったん停止しても、できる限り系統故障前の電力供給を維持できるように、故障継続中であってもインバータの過電流レベル以下でインバータを再起動するシーケンス機能を採用した。
- (5) 偏磁抑制制御 各相の電流検出を使用した三相ブリッジコンバータ用の電源変圧器の偏磁抑制制御機能を採用した。

5 現地有水試験結果

現地有水試験での制御機能確認試験結果例について述べる。

5.1 OVPリセット制御

OVPリセット制御試験結果を図7に示す。インバータを生かすことで瞬時にOVP電流が0となり、インバータ制御による通常運転に移行できることを確認した。

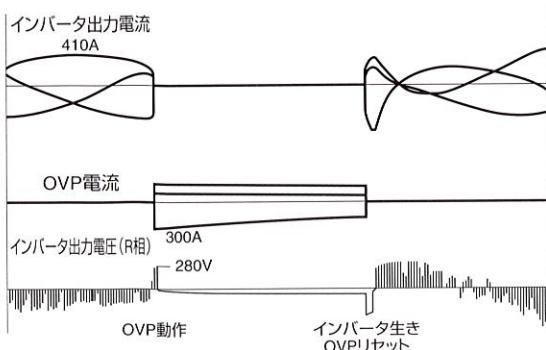


図7. OVPリセット制御試験結果 インバータを生かした直後にOVP電流が0となっている。

Results of OVP reset test

5.2 所内単独運転機能確認試験

2/4負荷(15MW)運転からの所内単独運転機能確認試験結果を図8に示す。2/4負荷運転状態から送電線用遮断器を遮断した際に、所内単独運転に移行できることを確認した。

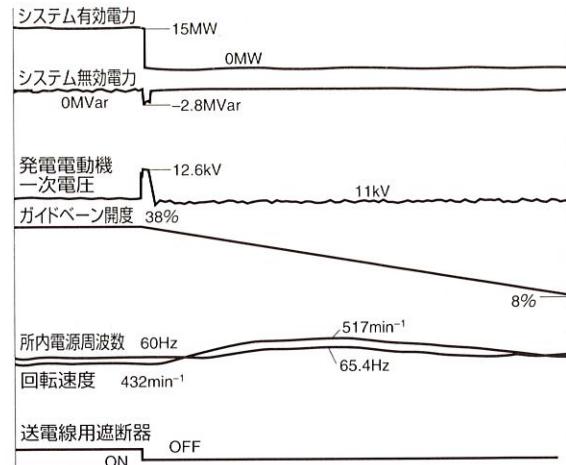


図8. 所内単独運転移行試験 送電線用遮断器をハンドオフ後、回転速度が急激に変化しても可変速システムが安定に制御されている。
Results of load rejection test

6 あとがき

これまでに当社が納入した可変速システムのバリエーションにより、培った可変速システム技術と経験を次期可変速プラントに生かして、最適な可変速システムを構築していくとともに、揚水発電所以外の電力分野にも適用拡大を図る所存である。

謝 辞

この可変速システムの納入にあたり、ご指導をいただいた電源開発(株)の関係各位に深く感謝する。



太田 仁志 OHTA Hitoshi

電力システム社 電力事業部 水力プラント技術部主務。
水力発電プラントのシステムエンジニアリング業務に従事。
電気学会会員。

Power Systems Div.



影山 隆久 KAGEYAMA Takahisa

電力システム社 府中電力システム工場 パワエレシステムエンジニアリングセンター主務。可変速揚水発電システムの設計・開発に従事。電気学会、情報処理学会会員。

Fuchu Operations—Power Systems



西川 正 NISHIKAWA Tadashi

電力システム社 府中電力システム工場 発電制御システム部主査。電力調整制御システム設計・開発に従事。電気学会会員。

Fuchu Operations—Power Systems