

可変速揚水発電・水力発電システムを支える パワーエレクトロニクス技術

Power Electronics Technologies for Adjustable-Speed Pumped-Storage
and Conventional Hydropower Systems

楠 清志 藤田 崇 山口 慎司

■ KUSUNOKI Kiyoshi ■ FUJITA Takashi ■ YAMAGUCHI Shinji

東芝は、1990年に世界で初めて^(注1)可変速揚水発電システムを実用化した。パワーエレクトロニクス技術の進歩に伴い、高電圧かつ大容量のサイクロコンバータの製作が可能になって実現したシステムである。その後、可変速揚水発電用として中性点クランプ (NPC) 方式や分圧リアクトル方式などの電圧形変換装置を、また、水力発電用としてkW級に続きMW級可変速装置を開発してきた。

可変速の揚水時入力調整機能と高速応答機能は再生可能エネルギーの出力変動対策に、また、高効率運転と運転範囲拡大は水力資源の有効利用に寄与する。基盤となるパワーエレクトロニクス技術の進歩とともに、揚水発電・水力発電システムの可変速化がいつそう推進されると期待される。

Toshiba put the world's first adjustable-speed pumped-storage hydropower system into practical use in 1990 applying a high-voltage, large-capacity cycloconverter realized through the progress of power electronics technologies. Since then, we have developed several types of self-commutated inverters for adjustable-speed pumped-storage hydropower systems, including the neutral point clamped (NPC) type and joint reactor type. We have also completed the development of a kW-class adjustable-speed system for conventional hydropower systems and are now developing a MW-class system.

The input power control function in pumping mode and quick response function of these systems contribute to the suppression of frequency and voltage fluctuations caused by renewable energy generation systems, as well as to the effective utilization of hydropower resources by improving efficiency and achieving wide-range operation. We have been promoting the development of adjustable-speed pumped-storage and conventional hydropower systems with higher performance in conjunction with the progress of power electronics technologies.

1 まえがき

東芝が、1990年に世界初の可変速揚水発電システム（以下、可変速揚水機と呼ぶ）を東京電力（株）矢木沢発電所2号機で実用化して以降⁽¹⁾、現在まで国内に10台以上の可変速揚水機が設置された。パワーエレクトロニクスの技術進歩に伴い、変換装置の高電圧化及び大容量化と、高速制御が可能になり実現したシステムである。

一方、水力発電システム（以下、発電専用機と呼ぶ）は、百数十年の歴史で、ほとんど可変速化がなされていない。これは、発電専用機では揚水発電に比べ経済的なメリットが出にくいことに起因している。しかし今後は、変換装置の高性能化や小型化に伴い、可変速化技術が発電専用機にも適用されていくと考えられる。

揚水発電・水力発電システムでは、サイリスタ始動装置や、同期発電機の直流励磁装置、補機電源などにもパワーエレクトロニクスが使われているが、ここでは、特に可変速揚水機及び可変速発電専用機へのパワーエレクトロニクスの適用例、及びそれらの特長について述べる。

(注1) 1990年12月時点、当社調べ。

2 可変速化技術と適用実績及び計画

当社の可変速化技術の揚水発電システム及び発電専用機への適用実績と今後の計画を表1に示す。

主な可変速方式には、発電電動機又は発電機の二次側（回転子）に変換装置を接続する二次励磁方式と、固定子側に変換装置を接続する固定子電圧周波数制御方式がある。前者は、変換装置の容量がほぼ可変速幅に比例するので、可変速幅が狭く、発電電動機の容量が大きいシステムに適している。一方後者は、可変速幅に関係なく、変換装置の容量が発電機の容量以上になるので、可変速幅が広く、発電機の容量が小さいシステムに適している。

3 可変速揚水機へのパワーエレクトロニクス技術の適用

定速揚水発電システム（以下、定速揚水機と呼ぶ）では、発電電動機の回転速度が一定なので揚水運転時に入力電力を調整することができない。そこで、夜間や休日など電力需要の少ない時間帯に入力電力を調整し電力系統の周波数を調整するために、可変速揚水機が導入された。

表 1. 東芝可変速化技術の揚水発電機及び発電専用機への適用実績と計画

Actual and planned deliveries of Toshiba adjustable-speed pumped-storage and conventional hydropower systems

用途	適用先	発電電動機/発電機出力	変換装置容量	可変速/変換器方式	素子	初号機運転開始	
揚水発電機	東京電力(株) 矢木沢発電所 2号機	85 MVA	25.8 MVA	二次励磁/サイクロコンバータ	サイリスタ	1990年	
	東京電力(株) 塩原発電所 3号機	360 MVA	51.1 MVA			1995年	
	電源開発(株) 奥清津第二発電所 2号機	345 MVA	31.5 MVA	二次励磁/電圧形変換装置	GTO	1996年	
	電源開発(株) 沖縄やんばる海水揚水発電所	31.5 MVA	3.96 MVA			1999年	
	東京電力(株) 葛野川発電所 3, 4号機	475 MVA	33.8 MVA			IGBT	2014年 予定
	北海道電力(株) 京極発電所 1, 2号機	230 MVA	23.42 MVA				2014年 予定
発電専用機	kW級 可変速水力発電	~ 3 kW	~ 3 kW	固定子電圧周波数制御/電圧形変換装置	IGBT	開発完了	
	MW級 可変速水力発電	~ 2 MW	~ 2 MW			2015年 予定	

GTO: Gate Turn-Offサイリスタ IGBT: 絶縁ゲートバイポーラトランジスタ

3.1 可変速化の原理

可変速揚水機では、交流励磁装置の容量を小さくするため、二次励磁方式を採用した。

図1に示すように、定速揚水機で用いる同期発電電動機は、系統周波数(例: $N_1=50$ Hz)と回転子磁束の周波数(例: $N_m=50$ Hz)が同じになり、回転子の回転速度は系統周波数で決まる一定速度になる。可変速揚水機では、同期発電電動機に代わり二重給電発電電動機を、直流励磁装置に代わり交流励磁装置を用いる。系統周波数(例: $N_1=50$ Hz)、回転子磁束の周波数(例: $N_m=48$ Hz)、交流励磁装置の出力周波数(例: $N_2=2$ Hz)の関係は、式(1)で表される。

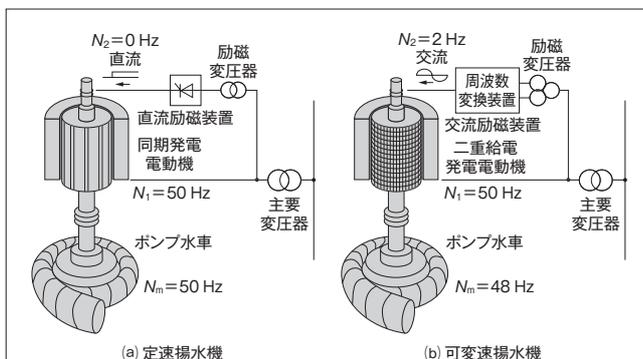


図 1. 定速揚水機と可変速揚水機の比較 — 可変速揚水機では、同期発電電動機と直流励磁装置の代わりに、二重給電発電電動機と交流励磁装置を用いる。

Comparison of constant-speed and adjustable-speed pumped-storage hydropower systems

$$N_1 = N_m + N_2 \quad (1)$$

N_2 を変えると N_m が変わるので、回転子を可変速度で運転できる⁽²⁾。

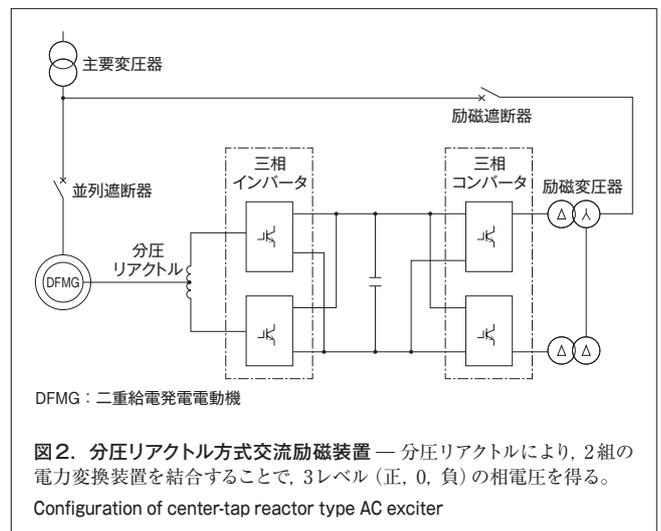
3.2 交流励磁装置の変遷

交流励磁装置には、矢木沢発電所2号機や塩原発電所3号機で採用したサイクロコンバータと、奥清津第二発電所2号機以降に採用した電圧形変換装置がある。

3.2.1 サイクロコンバータ サイリスタを用いて、商用周波数交流(例: 50 Hz)を低周波数交流(例: 2 Hz)に直接変換する装置で、高電圧で大容量の電圧形変換装置が開発される以前に考案された方式である。

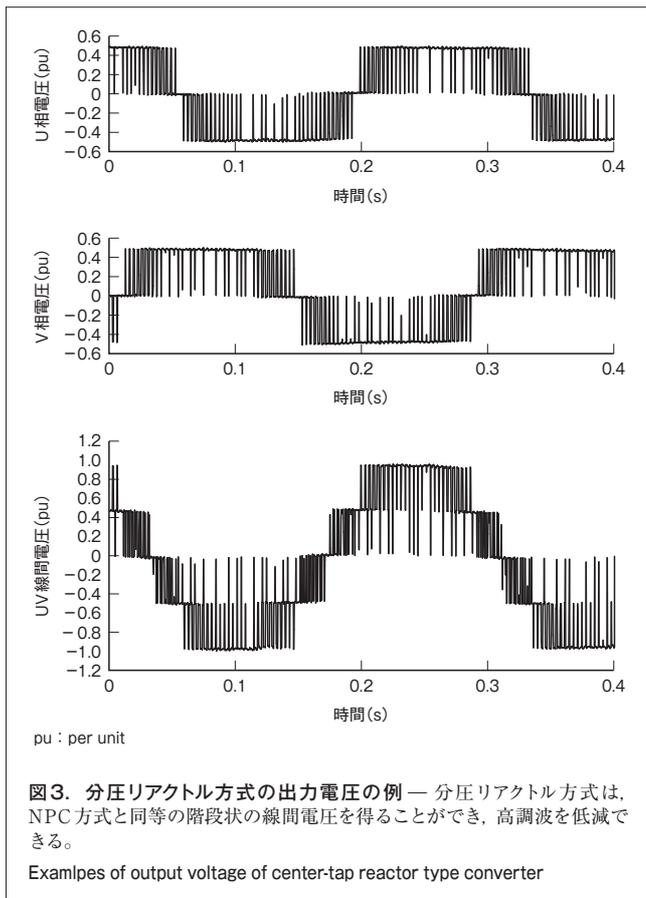
3.2.2 電圧形変換装置 IEGT (Injection Enhanced Gate Transistor)などの自励素子を用いた変換装置で、現在の当社標準方式である。商用周波数交流(例: 50 Hz)を直流に変換するコンバータと、直流を低周波数交流(例: 2 Hz)に変換するインバータで構成される。中性点クランプ(NPC)方式と当社が可変速揚水機用に考案した分圧リアクトル方式の特長について以下に述べる。

- (1) NPC方式 一般的な三相ブリッジ構成のインバータでは、直流入力電圧を V_d とすると、相電圧は正 ($+V_d/2$)、負 ($-V_d/2$) の2レベルで、線間電圧は正 ($+V_d$)、0、負 ($-V_d$) の3段階のPWM(パルス幅変調)波形になる。NPC方式では、直流の中性点電圧を取り出し、相電圧は正 ($+V_d/2$)、0、負 ($-V_d/2$) の3レベルで、線間電圧は $+V_d$ 、 $+V_d/2$ 、0、 $-V_d/2$ 、 $-V_d$ の5段階のPWM波形になるので、一般的な三相ブリッジ構成に比べ高調波が少なくなる。
- (2) 分圧リアクトル方式 図2に示すように分圧リアクトルを介して2組の三相ブリッジ構成のインバータを多重化し、3レベルの相電圧を得る。NPC方式に比べて使用する素子数を低減できる。分圧リアクトル方式のインバータ



DFMG: 二重給電発電電動機

図 2. 分圧リアクトル方式交流励磁装置 — 分圧リアクトルにより、2組の電力変換装置を結合することで、3レベル(正、0、負)の相電圧を得る。 Configuration of center-tap reactor type AC exciter



の線間電圧波形は、NPC方式と同様に5段階のPWM波形になるので(図3)、一般的な三相ブリッジ構成に比べ高調波が少なくなる。

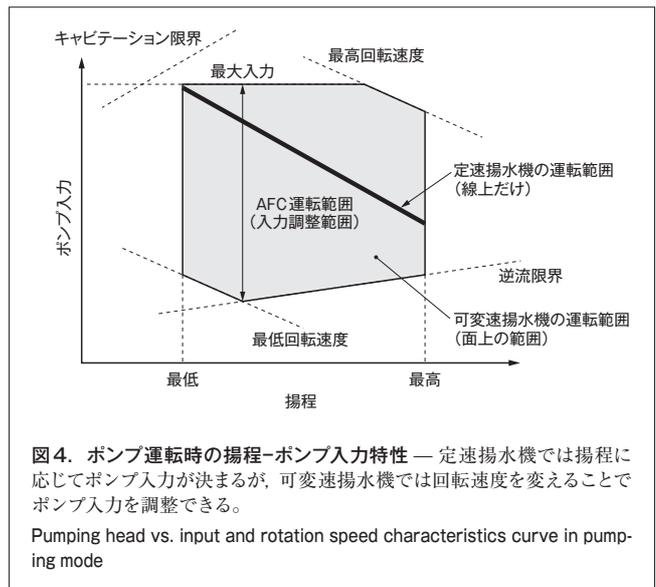
3.3 可変速揚水機の特長

3.3.1 揚水運転時の自動周波数制御(AFC)運転

定速揚水機は、回転速度が一定なのでポンプ運転時の揚程が決まると入力が決まり、ポンプ入力を調整できないため、運転点は図4の直線(太線部分)上だけになる。可変速揚水機では、回転速度を変えることでポンプ入力を調整できるので、運転範囲を網掛け部分に拡大できる。

3.3.2 高速応答性 定速揚水機は、発電時に流量を調整して有効電力を調整することしかできない。一方、可変速揚水機は、揚水時、発電時ともに、交流励磁装置を制御することで回転エネルギーを電気エネルギーに変換できるため、有効電力を高速に制御できる。高速応答性は、再生可能エネルギーの出力変動・電圧変動対策に寄与する。

3.3.3 水車効率向上と運転範囲拡大 可変速揚水機では、水車運転に適した回転速度で運転できるので、水車効率が向上する。また、運転状態が改善されるので、キャピテーションやホワールなど水車に損傷を与える現象を低減でき、運転可能な落差や出力の範囲が拡大する。



4 発電専用機へのパワーエレクトロニクス技術の適用

可変速幅が広く、発電機容量が小さい発電専用機には、固定子電圧周波数制御方式を適用している。

4.1 kW級水車

当社は、kW級水車 Σ Flow™⁽³⁾の可変速装置を2013年に開発した。一般的な水力発電所は、水車により水圧を回転エネルギーに変換し、発電している。開放水路向け超小型水力発電装置の Σ Flow™は、流れの速度エネルギーを回転エネルギーに変換し、発電するシステムである。流速が一定以上の速さになると発電を開始し、遅くなると停止する。流量と流速の変化に伴って水車出力と回転速度が変化するが、変換装置が発電機トルクを一定に制御するので、水車出力と発電機出力が均衡すると回転速度が安定する。

開放水路に水車・発電機ユニットを沈めて使用するため、水圧鉄管や流量調整弁などは不要である。発電機には永久磁石発電機を、発電機の交流出力を直流に変換するコンバータ部には産業用インバータを、直流を交流に変換するインバータ部には太陽光発電用パワーコンディショナを使用し、系統連系に必要な保護機能なども流用することで、合理化を図った。

4.2 MW級水車

当社は、kW級に続きMW級の可変速装置を開発している。落差変化と流量変化が大きく、可変速幅が広い地点に適した装置で、固定子(一次)電圧周波数制御方式である。発電機にはかご形誘導発電機を用い、変換装置には発電機容量相当の電圧形変換装置を適用する(図5)。可変速装置の主な特長は以下のとおりである。

- (1) 制御装置の簡素化 インバータは、水車の回転速度に関係なく電力システムと同期した商用周波数交流(例: 60 Hz)を出力できるため、定速度の発電専用機で必要で

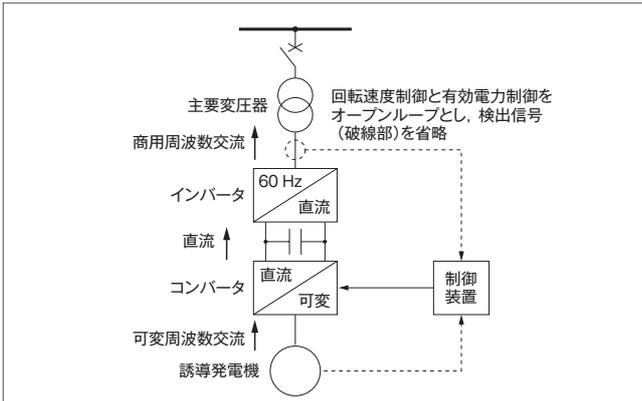


図5. MW級可変速水力発電システムの構成 — 誘導発電機と風力発電などに適用される電圧形電力変換装置から構成される。
Configuration of MW-class adjustable-speed hydropower system

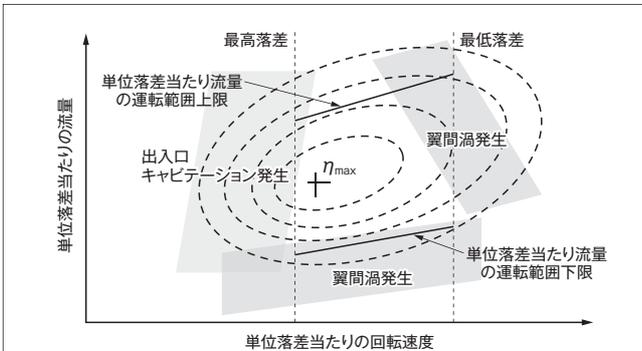


図6. 水車特性曲線の例 — 高落差時にはキャビテーション発生領域が、低落差時及び低流量時には翼間渦発生領域が存在する。
Example of water turbine characteristics curve

あった調速機制御装置，自動電圧調整装置，及び自動同期装置が不要になる。また誘導発電機ではコンバータが一次電圧の周波数制御を行うので，二次励磁方式で必要な位相制御が不要になり，制御回路や検出回路などを大幅に簡素化できる。

- (2) 運転範囲の拡大 定速度の発電専用機では，高落差大流量の運転において，キャビテーション発生領域に入り，ランナが壊食されるリスクがある。また低落差大流量及び小流量の運転において，水車の翼間渦発生領域に入り，大きな騒音を生じる。また，小流量時は，高落差ほど水車効率が低下する(図6)。可変速化によって水車を良好な運転状態にできるので，発電効率が向上し，水車の長寿命化も期待できる。

5 可変速揚水発電技術の応用

可変速揚水の技術を応用したシステムとして，可変速フライ

ホイール発電装置がある。ポンプ水車の代わりにフライホイールを発電電動機に直結したシステムで，可変速化の原理や電気回路の構成は可変速揚水機と同一である。充電時は電力を回転エネルギーに変換し，放電時は回転エネルギーを電力に変換する。

二次電池を用いた電力貯蔵装置と同様に，高速な充放電が可能であり，電力システムの周波数や電圧の安定化に寄与する。また，充放電による劣化がほとんどないので，特に，周期が短く，多頻度の充放電の用途に適している。

6 あとがき

当社は，1980年代から，揚水発電用の可変速技術を開発してきた。また，水力発電用のkW級可変速装置に続いて，MW級可変速装置を開発している。このように当社には，kW級から数百MW級の可変速化技術を開発してきた実績があり，多種多様な揚水・水力発電地点での可変速化に対応することができる。

揚水運転時の入力電力調整機能は夜間など軽負荷時の周波数調整に，高速応答機能は再生可能エネルギーの出力変動などに伴う周波数変動や電圧変動の抑制に寄与する。また，高効率運転と運転範囲の拡大は，水力資源の有効利用につながる。

今後，パワーエレクトロニクス技術の進歩を踏まえ，変換装置のいっそうの性能向上，大容量化，及び小型化を図り，揚水発電や水力発電の可変速化に貢献していく。

文献

- 中村泰造 他. 可変速揚水発電システムの実用化(東京電力・矢木沢発電所). 電気学会論文誌B. **111**, 6, 1991, p.583-586.
- 向井一馬 他. 可変速システムの電力分野への適用拡大. 東芝レビュー. **51**, 12, 1996, p.59-64.
- 中原裕輔 他. 小水力発電システムの最新技術. 東芝レビュー. **68**, 6, 2013, p.32-35.



楠 清志 KUSUNOKI Kiyoshi

電力システム社 府中電力システム工場 発電システム制御部 主幹。可変速揚水発電システム及び電力貯蔵システムのエンジニアリング業務に従事。

Fuchu Operations - Power Systems



藤田 崇 FUJITA Takashi

電力システム社 火力・水力事業部 水カプラント技術部主務。水力発電機器のエンジニアリング業務に従事。

Thermal & Hydro Power Systems & Services Div.



山口 慎司 YAMAGUCHI Shinji

電力システム社 府中電力システム工場 発電システム制御部。水力発電所の制御設計に従事。

Fuchu Operations - Power Systems