

21世紀の系統設備として機能する水力発電技術

Hydroelectric Power Generation Technologies for 21st Century Power System Facilities

高梨 智義
TAKANASHI Tomoyoshi

工藤 健司
KUDOU Kenji

野呂 康宏
NORO Yasuhiro

水力発電は古い歴史を持っているが、単なるエネルギー変換としてだけでなく、その技術は電力系統の運用にかかわる面にも生かすことができる。新たな世紀を迎えるとしている現在、その技術の適用が再考されようとしている。

特に、1990年初めに実用化した可变速揚水発電技術は、その後も高速・大容量化をたどる従来の揚水発電技術を基盤にして、高度化するパワーエレクトロニクスと制御技術とを融合させた形で進展している。これらの実績や研究・開発などから培われた水力発電技術を応用すれば、その設備やシステムは系統設備としての有力候補にすることが可能となる。

Hydroelectric power generation has accumulated a long history of use, and its technologies can also be applied in the operation of electric power systems for purposes other than simply energy conversion. As we stand at the threshold of the new century, applications for these technologies are being reconsidered.

The technology of adjustable-speed pumped storage realized at the beginning of the 1990s has continued to develop, in parallel with the combination of the high technology of power electronics and its control on the base of the existing technologies of high-speed and large-capacity pumped storage units and their control systems. Facilities and systems applying the technologies accumulated through this long experience plus research and development are considered to be strong candidates as future power system facilities.

1 まえがき

系統の需要変動に対して常に品質の高い電力を供給することが求められる現代にあって、水力発電技術の進歩とともに、その技術は電力系統でも活用されている。揚水時の系統周波数調整機能も持ち合わせた可变速揚水発電は最近の顕著な例であるが、この技術を応用すると系統周波数変動抑制、調相、周波数変換などにも適用が可能である。

ここに、水力発電技術を応用した系統設備として位置づ

けられる設備やシステムの将来性について、実績を織込みながら述べる。

2 実績と現状技術

90年代に当社が納入した系統設備としての機能を持ち合わせた設備の実績を表1に示す。表中の黒丸は、各設備が系統設備として持つ機能(目的)を表す。

これらの回転形系統設備の主要部は、いずれも交流機に

表1. 水力発電技術を応用した系統設備としての実績例

Application of hydroelectric power generation technologies in power systems

設備名	機能(目的)					備考(当社による最近の実績例)
	系統周波数調整(AFC)	系統周波数変動抑制	調相(進み／遅れ)	周波数変換	系統安定化	
可变速揚水発電設備	●	●	●/●	—	●	東京電力(株) 矢木沢2号機(85 MVA, 90年) 東京電力(株) 塩原3号機(360 MVA, 95年) 電源開発(株) 奥清津第二2号機(345 MVA, 96年) 通商産業省資源エネルギー庁 沖縄やんばる海水揚水(31.5 MVA, 99年)
周波数変換設備	—	—	●/●	●	—	JR東海(株) 綱島3号機(60 MVA, 94年)
フライホイール周波数変動抑制装置(ROTES)	—	●	●/●	—	●	沖縄電力(株) 中城湾(26.5 MVA, 96年)
同期調相設備	—	—	●/●	—	—	東京電力(株) 新所沢1, 2号機(200 MVA, 91年) 東京電力(株) 新飯能(200 MVA, 99年)

AFC : Automatic Frequency Control(系統周波数調整)

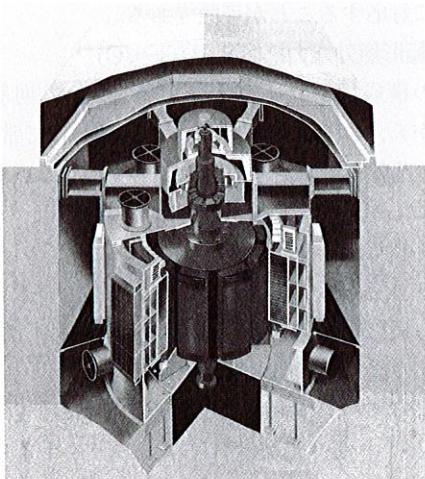


図1. 200 MVA 同期調相機の構造 同期調相機の構造は、水車のない水車発電機の構造と同一である。

Structure of synchronous condenser

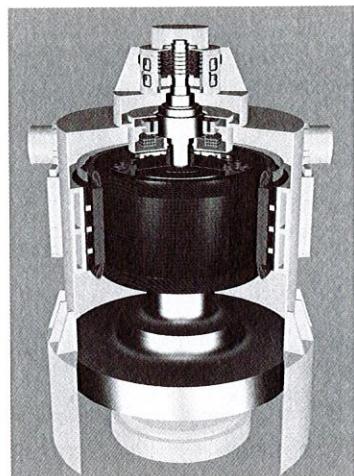


図2. 26.5 MVA ROTESの構造 回転子は巻線形誘導電動機と同じ円筒形であり、その下には回転エネルギーを貯えるフライホイールが直結されている。

Structure of ROTES

より実現しているが、大別すると次の二つになる。

- A. 突極形同期機(突極機)
- B. 交流励磁形可変速機(円筒機)

実績レベルでは、Aに属する設備は周波数変換設備と同期調相設備、また、Bに属する設備は可变速揚水発電設備とフライホイール周波数変動抑制装置である。

ここでは、原動機(水車、又はポンプ水車)を持たないAとBに属する回転形設備の例を紹介する。

Aの代表例である、東京電力(株)新所沢変電所の200 MVA- 600 min^{-1} 同期調相機の構造を図1に示す⁽¹⁾。明らかに、その構造は水車発電機とまったく同じである。現在の技術レベルでは同一回転速度においては空気冷却方式で約500 MVAまで製作が可能であり、その技術は、高速・大容量揚水発電システムで培った技術が基本になっている。

同期調相機は静止形無効電力補償装置(SVC: Static Var Compensator)や電力用コンデンサなどと同様、系統電圧の安定性を維持するための装置であるが、次の特長を持つため新世紀に至っても稼動し続けると考えられる。

- (1) 界磁電流制御による無効電力の連続的な調整が可能
- (2) 発電機と同様、界磁電流による内部誘起電圧を持ち、系統電圧低下時でも一定の無効電力の供給が可能
- (3) 短時間の過負荷運転が可能

Bの代表例である沖縄電力(株)中城湾変電所に建設された26.5 MVA- $510 \sim 690 \text{ min}^{-1}$ フライホイール発電機(ROTES: ROTary Energy Storage system)の構造を図2に示す。その構造は実績のある巻線形誘導電動機と同じであるが、二次交流励磁方式を伴うシステム技術は実用機として90年、世界で初めて可变速揚水発電運転を開始した東京電力矢木沢発電所の可变速揚水発電システムに基づいている⁽²⁾。

ROTESは系統容量に比べ、大きくかつ急峻(きゅうしゅん)な負荷変動による周波数変動を抑制する目的で、96年、世界で初めて沖縄で実用化されたシステムである⁽³⁾。

図3に示されるように、ROTESを適用した場合の周波数変動抑制機能が系統試験で確認された。

ROTESは、系統の電気エネルギーが過剰なときにそのエネルギーを回転エネルギーに変換して蓄え、反対に系統の電気エネルギーが不足したときに回転エネルギーを電気エネルギーに換えて出力するシステムである。応答速度は10 s程度の火力発電所に対し、100 msオーダと高速なので系統の急峻な負荷変動による周波数変動抑制に大きな効果を發揮する。

3 21世紀に向けた適用

21世紀の電力系統において一定の電圧・周波数の電力を安定して供給する電力系統の品質と信頼性はますます要求されるであろう。その中で可变速技術を応用した回転形系統設備は、出力応答の迅速性及び電力系統の安定度向上への貢献という特長を生かしその適用の拡大が期待される。

ここではその回転形系統設備の一例として、可变速電力融通装置と回転形無効電力補償装置(RPVC: Rotary Power and Var Compensator)について述べる⁽⁴⁾。

3.1 可变速電力融通装置

電力融通装置とは、同一周波数又は異周波数の電力系統間で電力の授受を行う装置である。従来は、表1のJR東海(株)網島の例のように、同期機どうしを機械的に接続して電力変換していたが、同期機を交流励磁形可变速機にえたシステムが可变速電力融通装置である。周波数変換装置

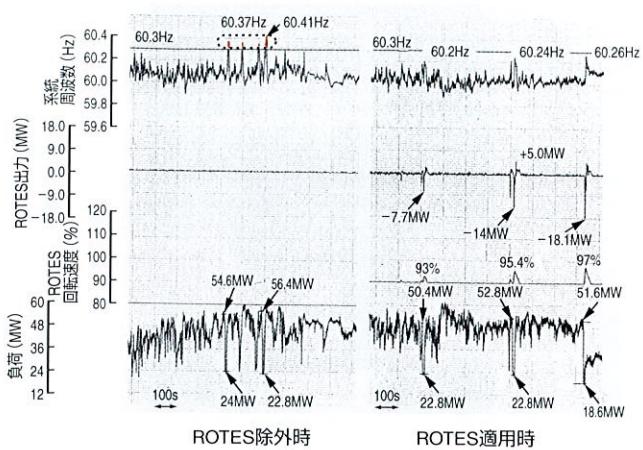


図3. ROTESの系統実証試験　急峻な負荷の変化により系統周波数が急変(図中の○部分)していたが、ROTESの適用により系統周波数の変動が抑制された。

Commercial operation test of ROTES

は一般的に静止形が適用されているが、回転形はエネルギー密度が高く、機器のコンパクト化が可能である。

同期機と交流励磁形可変速機を接続したシステム構成の一例を図4に示す。

可変速電力融通装置は、電圧維持能力に優れる回転機の特長を生かしながら、可変速機の特長である高速応答性と柔軟な電圧位相の制御性を兼ね備えている。これにより、負荷の急峻な変動に対しても迅速に出力調整できるほか、従来、機械的に調整していた系統間並列時の位相調整も電気的に瞬時に行うことが可能である。

更に、交流励磁形可変速機どうしを接続した可変速電力融通装置では可変速速度の範囲内で自由に回転速度を変えることから、一方の系統への融通電力に影響を与えることなくその回転エネルギーを利用して、もう一方の系統の

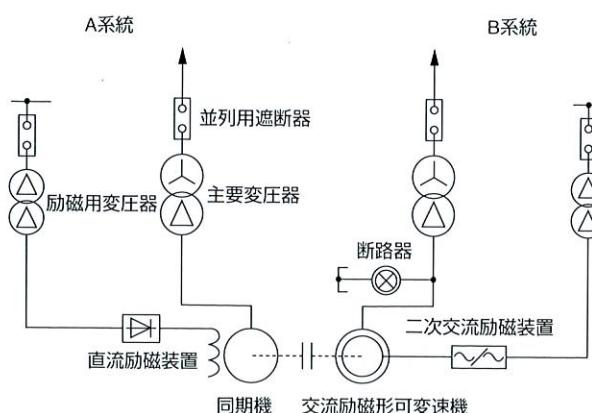


図4. 可変速電力融通装置　交流励磁形可変速機により、系統需要に応じた高速な電力調整と柔軟な電圧制御が可能となる。

Back-to-back system consisting of synchronous machine and double-fed machine

負荷変動に対応することが可能である。

3.2 回転形無効電力補償装置(RPVC)

RPVCの構成はフライホイール発電設備と同等である。しかしながら、RPVCは回転形系統設備として常時運用される点や、基幹系統にも接続され大容量である点で異なる。

ここでは、系統全体の安定化に対するRPVCの効果を系統動揺抑制の面から検討した例を述べる。

(1) モデル系統 11機ループ系統とし、RPVCを大容量水力機の電源端近傍に設置する。なお、潮流断面は安定度の厳しい夜間軽負荷断面とする。

(2) 機器概要 適用したRPVCの定格は、200 MVA - 500 min^{-1} 、慣性定数は $H=5.8 \text{ s}$ (フライホイールなし) である。二次励磁装置には、容量28 MVAの電圧形自励式変換器を適用する。

(3) 検討ケース概要 系統のほぼ中心にあたる基幹系送電線で1回線三相地絡^(注1)—故障除去(3.5サイクル遅

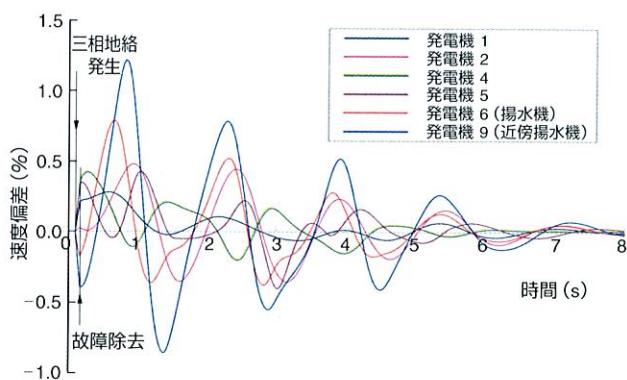


図5. RPVCを設置しない場合のシミュレーション結果　故障除去後、系統動揺は10s近く継続する。
System simulation without RPVC

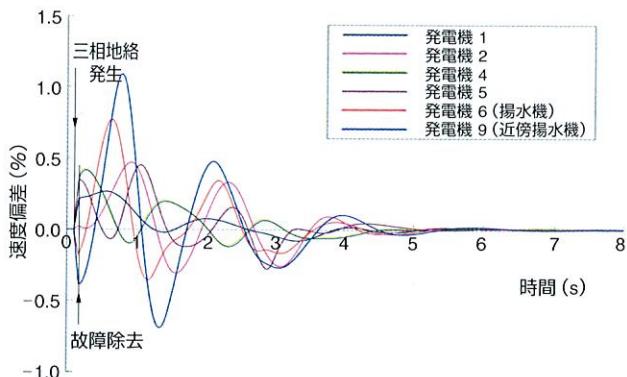


図6. RPVCを設置した場合のシミュレーション結果　RPVCによる安定化効果により、故障除去後、5s程度で系統動揺が収まる。
System simulation with RPVC

(注1) 落雷などにより送電線と鉄塔間でショートしたり、送電線が地面に接触して、電気的に電圧がゼロになること。

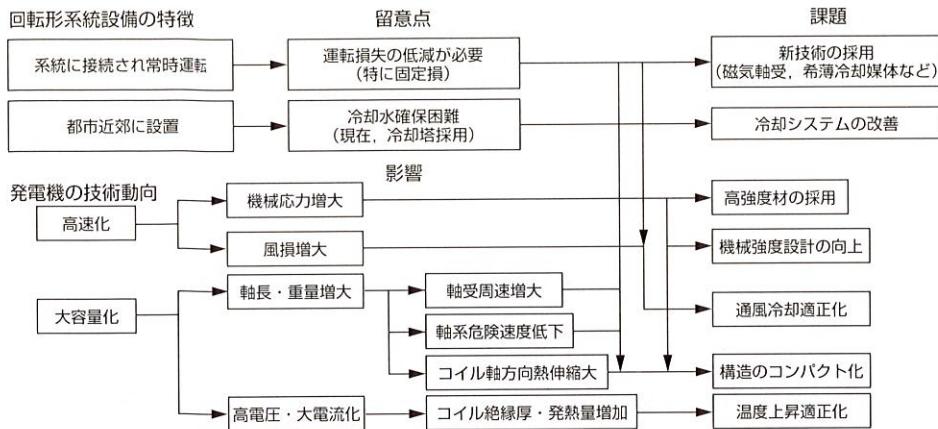


図7. 回転形系統設備の技術課題 将来、回転形系統設備は高速・大容量化が求められるが、その適用にあたっては損失の低減と冷却システムの改善は重要な課題の一つである。
Future technical requirements

断) の外乱が発生した場合を想定し、RPVC の有無による安定化効果を比較した。

(4) 解析結果 図5と図6はそれぞれ、RPVCを設置しない場合と、設置した場合の系統内の代表同期発電機の回転速度偏差を比較したものである。

この比較から、RPVCの設置により系統動揺の収束が早くなり、安定化効果が得られることがわかる。RPVCを安定化対象の同期発電機の近傍に設置することにより、同期発電機と系統間の動揺による電力の授受が抑制され、系統電圧維持面の効果も得られるため、系統容量に対してわずかの比率のRPVCであっても効果が得られる。

ここで示した解析例以外でも、次の結果が得られている。

- (1) RPVCは上記電源近傍のほか、系統の中心付近や大容量負荷に近い点など、いずれに設置してもある程度の系統動揺の抑制効果が得られ、安定化効果がある。
- (2) RPVCを複数台設置した場合又は容量が大きい場合、及び有効電力制御のエネルギー源となるフライホイール効果が大きい方が系統安定化に有効である。
- (3) RPVCの制御系補助信号として、近接の同期発電機の回転速度偏差信号を加えると効果が向上する。

当社は、東京電力(株)葛野川発電所の475 MVA - 480 ~ 520 min⁻¹可変速発電電動機を製作中である。この技術は可変速電力融通設備とRPVCをはじめとする次世代の回転形系統設備の大容量化に大きく寄与する。

一方、フライホイール発電機は回転速度の高速化やフライホイールの大型化により蓄積エネルギーの大容量化が可能であり、近年話題となっている電力平準化を実現する有力なシステムとなりうる。

4 回転形系統設備の技術課題

回転形系統設備の主機は回転機であるので、大容量化や高速化の技術的課題は基本的に揚水発電技術の課題と同様である。しかしながら、回転形系統設備はその運用・設置面

の特徴から水力発電所とは異なった技術課題がある。

図7に、主な技術課題を示す。

5 あとがき

水力発電技術を適用した系統設備は、その運転・制御の容易性、フライホイール効果による系統安定化、優れた調相特性などの長所があるが、適用に際しては技術的な評価に加えて、立地条件、経済性などを十分検討する必要がある。しかし、技術的課題を克服し、かつコストを低減することにより21世紀に向けても回転形系統設備としての適用は拡大していくであろう。

文 献

- (1) 蜂谷秀行、他、東京電力(株)新所沢変電所 200MVA 同期調相機設備、東芝レビュー、46, 11, 1991, p.911-914.
- (2) 勝家正廣、他、可变速揚水発電システムの開発、東芝レビュー、42, 11, 1987, p.873-876.
- (3) Nohara, T., et al. "Successful Commercial Operation of Double-fed Adjustable Speed Flywheel Generating System". CIGRE/IEE Japan Joint Colloquium. 1997, Session 3.
- (4) 古谷千吉、他、可变速調相機による系統安定化について、電気学会電力技術研究会資料PE-92-56. 1992, p.69-78.



高梨 智義 TAKANASHI Tomoyoshi

電力システム社 電力事業部 水力プラント技術部主幹。水力プラントシステムのエンジニアリングに従事。電気学会会員。

Power Systems Div.



工藤 健司 KUDO Kenji

電力システム社 電力事業部 水力プラント技術部水力発電技術海外グループ主査。海外水力プラントのエンジニアリングに従事。

Power Systems Div.



野呂 康宏 NORO Yasuhiro

電力システム社 電力・産業システム技術開発センター 電力システム制御技術担当主査。電力系統解析及び制御システムの研究・開発に従事。電気学会会員。

Power and Industrial Systems Research and Development Center