小特集 水力発電設備の最新技術

U.D.C. [621. 221. 4:621. 224. 7-58]. 001. 57

可変速揚水発電システム実用化技術の開発

Development of an Adjustable Speed Operation System to Be Applied to Pumping and Generating Units

可変速揚水発電システムは, 揚水運転時にも電力調整が可能となることや発 電時の部分負荷効率が向上するといった特長を持っている。更には, 高速制御 性を利用して系統の安定化をねらった用途への期待もあり, 各方面で注目され ている。

本システムの開発に当たっては、ディジタル解析とモデル機による実証、大 容量化対応としての各種モデルによる信頼性確認などを行ってきた。現在は22 MVA実証機が建設され、実系統に接続した実証試験が行われている。

その結果,システムの動きを正確に解析できること,高信頼性確保などが確認されて,大容量機としての設計手法を確立することができた。現在,実証機は順調に稼動しており,その実績も踏まえて実用機建設へ向け飛躍する段階となった。

原口英二* Eiji Haraguchi 斉藤啓自** Keiji Saitô

1 緒 言

今後,電力系統の中に占める原子力発電の比率が増大する に伴い,夜間の周波数(電力)調整能力の不足が予想される。 この対策の一つとして,関西電力株式会社と日立製作所は共 同して,夜間に稼動する揚水機の揚水電力を調整して,系統 周波数制御を行うことのできる可変速揚水発電システムの開 発を進めてきた。可変速揚水発電システムの概要については, 前にも述べた(本誌第68巻・第8号¹¹)。今回は,開発状況と各 種確認試験結果及び成出実証機の試験結果を中心に述べる。 システムの開発については,ディジタルシミュレーション 解析と実機と同一構成の小形モデル機によるシミュレータを 使用したシステムの実証とそのディジタル解析の検証を併せ て行ってきた。一方,大容量化対応としても,各種部分モデ ルによる性能確認及び信頼性確認試験を行い,開発を進めて きた。

現在,これらの開発を踏まえ,関西電力株式会社成出発電 所に22 MVAの可変速発電機(以下,成出実証機と言う。)を設 置し,実系統に接続しての実証試験を実施中である。成出実 証機では,実機レベルでの運転特性や性能確認試験,及び系 統動揺時の挙動確認試験も行ったので,それらについても報 告する。

2 可変速システムの概要

2.1 特 長

表 | 可変速システムの特長 定常的に回転速度を変化させ、運転 状態の最適化ができるとともに、過渡的に慣性エネルギーを利用できる ことから種々の特長がある。

項	目	内容	備考	
	揚水運転時	•負荷調整(AFC)が可能		
定常運転時 の特長	発電運転時	 ・運転領域の拡大 (落差変動・軽負荷) ・部分負荷時の効率向上 ・水圧脈動の低減 	運転状態の最 適化	
	揚水始動	• 負荷急変量の低減		
その他運転 時の特長	也運転 調相運転 ・損失の低減			
	系統並入	・位相合せが容易・低速で並入可能	電気側(発電 機)の特性に よる特長	
過 渡 (短時間	状 態 の特性)	・瞬動予備としての利用 ・系統の過渡安定度向上 ・脱調現象のないシステム	同 上 (慣性エネル) ギーの有効 利用	

注:略語説明 AFC(Automatic Frequency Control)

理したものを表1に示す。これらの特長は,原動機側(水車若 しくはポンプ水車)の特性によるものと,電気側の制御システ ムによるものがあり,各々の特性を生かした総合システムが

可変速システムは、回転速度を変化させることができるこ 可能である。 とから、種々の特長を持っている。主な特長については前の 2.2 原理・構成¹⁾ 報告¹にも述べているが、比較的短い時間内の運転も含めて整 可変速化の基本

可変速化の基本構成は,円筒構造回転子に三相分布巻線と

15

* 関西電力株式会社 ** 日立製作所日立工場

794 日立評論 VOL. 70 No. 8 (1988-8)

した界磁コイルを配し、その界磁コイルを可変周波の三相交 流で励磁するようにしたものである。すなわちその原理は, 回転速度が変化した場合, 界磁コイルの励磁周波数を変化さ せることにより,固定子側周波数を一定に保つことができる ようにしたものである。したがって、回転速度が変化しても、 固定子側を周波数一定である系統に接続して発電(又は揚水) 運転ができる。回転子側の周波数は比較的低周波でよいため、 可変周波数変換器としてサイリスタを使用したサイクロコン バータが使用される。

回転子が発生する回転磁界は, 定常状態では常に一定の大 きさであることが必要である。このことを実現するための最 も一般的方法が、前述の三相分布巻線に三相交流を流す方法 である。相数を多くすればより理想的であるが、三相で実用 上支障なく達成できる。低周波の可変三相交流を作り出す変 換装置として、種々の方式のものがある。サイクロコンバー タはその中で動作原理が単純で、かつ大容量のものを実系統 に直接接続して運転されている直流送電用変換装置と類似し ている。したがって、揚水発電システム用として使用する場 合には、サイリスタ式サイクロコンバータが最適な変換装置 と言える。

一方,制御システムの面からみると,電力の制御は従来は 原動機側の制御だけであったのに対して、電気側の制御も必 要となる。このことは逆に、原動機側の動力と関係なく電力 制御が可能であることを意味する。

本システムの制御構成を図1に示す。電気側の電力を直接 制御し、回転速度はポンプ水車が最適回転速度となるよう案 内羽根でその出力と回転速度を制御する。電気側の電力制御 は比較的高速で行うことができるのに対して、ポンプ水車側 の出力制御は遅い。したがって、過渡的には両者にアンバラ ンスが生ずることになるが、そのエネルギー差は回転体の慣 性エネルギーの出し入れ(すなわち、回転速度の変化)によっ てまかなわれる。この様子を表2に示す。同図は系統内の負 荷が急増し、系統全体の発電電力を急増させなければならな い場合を示している。発電運転時と揚水運転時との動きの違 いは、最終到達回転速度の違いのほか、回転速度と水車(又は ポンプ)動力との関係に関する特性の違いに起因する。すなわ ち、水車運転時は、回転速度とあまり関係なく水車出力を調 整できるという特性であるのに対して、ポンプ運転時は、全 揚程と回転速度によりポンプ入力が一義的に決まるという特 性のためである。このように、 電気側の電力を直接制御する ことによって,回転エネルギーを利用しながら高速電力制御 を行うことができる。



揚水運転時は,動力源が電気側であることや案内羽根の開 閉によって必要動力があまり変化しないことによって、制御 構成も当然変わる。詳細については割愛するが、基本的に電 気側の電力を直接制御することは発電運転時と同様である。

3 開発の経緯

本可変速システムの開発に当たっては、その原理確認から 始め、ポンプ水車と組み合わせたシステムで理論検証を行っ た。一方、詳細なディジタル解析による揚水機としてのシス テム開発と、大容量化を目指したハード開発を進めてきた。 現在,成出実証機を実系統に接続して、本システムの信頼性 確認の検証を行っている。

上記のように、実機適用への開発は、システム開発と大容 量化対応の開発とに大別される。以下、各々についてその詳 細を述べる。

3.1 システム開発

可変速揚水発電用としてのシステム開発は、大別して2種 類に分けられる。すなわち,

(1) 通常運転の制御法の確立,特に原動機側と電気側との協 調がとれた制御法の確立,及び揚水発電所としての諸機能を 持った回路構成と制御法の確立。

16

注:略語説明 AVR (Automatic Voltage Regulator) APR (Automatic Power Regulator) ASR (Automatic Speed Regulator) CB (Circuit Breaker)

可変速システムの制御構成 電気側にも直接電力制御がか × 1 けられ、指令値に従い高速に制御される。

(2) システム内及び系統異常,若しくはじょう乱時に対して、 システムの現象解析とそのときの制御・保護方法の確立。 これらの開発は、物理的現象解析はもちろんのこと、シミ ユレーションによる解析が不可欠となる。もちろん、シミュ レーション解析の妥当性を検証することも必要であることは 言うまでもない。

表2 出力変化時の可変速システムの動き 系統内全発電最増加時,可変速システムの出力を *AP* 変化させる場合の 動きを単純化して示す。

項目	発電運転時	揚水運転時
最終目標回転速度	増 加	低下
発電量 or 電力吸収量	ΔP	ΔP
水車出力 or ポンプ入力		$\Box P$
回転速度 〔∞(回転エネルギー)½〕		
回転エネルギーからの 放出パワー	 放出 吸収 放出量<吸収量 →回転速度増加 	放出量>吸収量(=0) →回転速度低下

シミュレーション解析に当たっては、その目的によって種 種の計算コードを開発した。それらの主なものを挙げると、 (a) サイクロコンバータ各アームごとのON、OFFも考慮し た、励磁回路も含む主回路現象の瞬時値ベースの解析〔主 として上記(2)の一部に対応するもので、比較的短時間の解 析〕

(b) 水路系, ポンプ水車特性及び運転制御系を含めた全体の動特性解析〔主として上記(1)に対応するもので, 比較的長時間の解析〕

(c) 電力系統の動きを主体に,可変速システムの動き及び 可変速機の制御・保護が系統へ及ぼす影響の解析〔上記(2) の一部に対応するもので比較的長期間の解析〕

これら各シミュレーション解析を行うとともに、実機と同 一構成の可変速システムと模擬送電線を持つアナログシミュ レータを使用し、シミュレーション解析の検証を行った。特 に揚水機の運転は、ポンプ水車の特性及び始動時の負荷急変 など発電専用機の運転と比べて種々の過渡現象を持っている。 これら過渡現象の検証も含めて、ポンプ水車、案内羽根駆動 系、水路系も実機相当に合わせた総合アナログシミュレータ を使用し、揚水運転も含めた通常運転の確認及びディジタル 解析の検証を行った。総合アナログシミュレータの構成と主 要仕様を図2及び表3に示す²⁾。上池と下池の水位差は、運転 中に一定にすることも、また所望の値に変化させることもで きる機構としている。

ディジタルシミュレーションとシミュレータの実測データの代表例を図3,4に示す²⁾。図3は揚水AFC(AFC:Automatic Frequency Control)試験を示し、ランプ状の電力変化 指令が間欠的にきた場合の動きである。有効電力の変化とと もに回転速度が変化していき、案内羽根開度も最適値に変化 していく様子が分かる。図4は揚水始動時の特性であり、系 統への並列から接水及び案内羽根を開いて揚水運転に入るま



図2 総合アナログシミュレータの構成系統図 水路, ポンプ水 車周りも含め, 実機と同一構成としたモデル機である。

17

796 日立評論 VOL. 70 No. 8 (1988-8)

表3 総合アナログシミュレータ主要機器仕様 ポンプ水車と発 電機の定格仕様を示す。

		ポン	- プ水車仕様		発電	電電動機仕様
水	出	カ	20 kW	容	量	20 kVA • 20 kW
車	落	差	10.8~13.1 m	電	圧	220 V
ポン	入	カ	23 kW	回	転速度	540~660 min ⁻¹ {rpm}
プ	揚	程	11.3~13.5 m	極	数	10極
口	転速	度	540~660 min ⁻¹ {rpm}	周	波 数	50 Hz



でのオシログラムである。接水時や揚水開始時にポンプ側の 負荷が急変するが、安定に運転できることが確認された。計 算結果は案内羽根を締め切った状態から開いていき、揚水運 転に入る過程のシミュレーションである。揚水運転開始時点 で、直ちに指令値である26 kWの入力となる一方、回転速度は 慣性エネルギーを補充しながら、比較的ゆっくり上昇してい くことが分かる。もちろん、計算結果と実測とはよく一致し ており、シミュレーションの妥当性の検証と、揚水AFCを含 めた揚水運転の実証ができた。

3.2 大容量機の開発^{3),4)}

30万kVA級の実用機では、新構造回転子を持つ大容量発電 機や、数万キロボルトアンペア級のサイクロコンバータなど の大容量化の技術が必要である。サイクロコンバータについ ては、直流送電用変換器(数十万キロワット級の実績あり)と 同様の技術であり、大容量サイクロコンバータとしての特別 なブレークスルーはない。一方、発電機では、類似構造をし ている巻線形誘導機の実績は、連続定格のもので1~2万kW であるため、大容量機としては新たな開発が必要となる。以 上のことから、ここでは発電機について述べることにする。

可変速用の発電機が従来と大きく異なる部分は回転子であ り,固定子部分は従来機とほぼ同一である。図5に両者の違いを構造断面図によって示す³⁾。界磁コア及びコイルは,従来 機が凸極構造集中巻線であるのに対して,可変速機は円筒構 造分布巻線となっている。その他,可変速機は原理的に界磁 コイルに高い誘起電圧が発生するため,界磁コイルとそれに 給電する集電装置が高電圧大電流となる。以上,構造の違い と開発課題について表4にまとめて示す。その中で集電装置 と回転子コイルについて,以下に簡単に説明する。



図3 揚水AFC特性 電力指令の変化させたときの実電力ほか各部 の動きを実測した例を示す。シミュレーションでも同じ結果が得られている。

18

(1) 高圧大電流集電装置

可変速機用の集電装置は,基本的には従来と同様コレクタ リングにブラシをしゅう動させて通電を行う。しかし,可変 速機としての集電装置は従来にない高電圧大電流となるため, 実物大のモデルによってその運転状態の確認を行った³⁾。すな わち,上記モデルを長時間通電及び回転させ,温度上昇,ブ





No.	名 称	
\bigcirc	界磁コア(凸極→円筒)	
2	界磁コイル (集中巻→分布巻)	
3	集電装置	
0		

ロータリム

表4 主な構造上の相違と開発課題 従来機と大幅に異なる部分 と、それに対応する主な開発課題を示す。

項目	従来機構造	可変速機構造	開発課題
回転子 コア	• 突極	●円筒	• 全体通風方式
回転子 コイル	• 低電圧直流 • 集中巻線	• 高電圧三相交流 • 分布卷線	 高電圧・高面圧絶縁 システム コイルエンド支持構造 コイルエンド通風方式
集電装 置	 低電圧・小電 流(小形) 	 高電圧・大電流 (大形) 	・大電流の安定集電・保守・省力化構造

ラシ摩耗量,摩耗粉の飛散状況などの確認を行った。

(2) 回転子コイル

回転子コイルは、高電圧となるほか遠心力によって大きな 力が加わる。更に、コイルエンド部(コアから軸方向に出てい る部分)の遠心力を支える目的で、外周側にバインド線が配置 されるため、コイルエンド部の冷却方法も考慮する必要があ る。以上のことから、高強度・高電圧に耐え得る新絶縁シス テムの開発と、コイルエンド部の通風方式の確立を主に進め ートサイクル試験を行った。試験途中では誘電正接特性などの非破壊試験による測定を、完了後では残存破壊電圧を測定した。誘電正接試験の結果を図6に示すが、tanδ値の増加も ほとんどないことが分かる。また、残存破壊電圧についても 劣化はほとんど見られず、回転子コイル絶縁システムの信頼 性が確認された³⁾。

コイルエンド部の通風冷却に関しても,各種モデルを使用 してその効果を確認した⁴⁾。前述のように径方向通風は期待で きないため,コイル間に冷却風を通す軸方向通風としており, その構造を図7に示す。



てきた。 新しい回転子コイルの主絶縁システムの開発については, 固定子コイルに使われている従来の高圧コイル用絶縁システ ムをベースに,大きな遠心力に耐え得る絶縁システムを開発 した。この新絶縁システムの信頼性を確認するため,実物大 の回転子コイルを製作し,遠心力相当の力を加えた状態でヒ



19

図 6 界磁コイル誘電正接特性試験 ヒートサイクル試験の結果, Δ2, δoとも大きくならず,ほとんど劣化しないことが分かった。

798 日立評論 VOL. 70 No. 8 (1988-8)

コイルの温度上昇は,発熱量と通風冷却効果とにより,通 風冷却効果は絶縁システムと通風量とにより決まる。これら の確認を下記のようなモデル試験を実施して行った。すなわ ち,

(a) 実物大コイルエンド通風モデル(静止モデル)

(b) 縮尺¹/₂のエンドダクトファンモデル(回転モデル)

(c) モデルコイル通電及び通風冷却試験(静止モデル)
 (a)及び(b)のモデル試験により,通風経路の損失と、エンドダクトファンのQ-H特性が確認でき、通風量の確認ができる。
 (c)により、発熱量と通風量に対する温度上昇の評価が可能となる。これら各種モデル試験により、新構造コイルの設計法が確立された。

以上述べてきたように、種々の部分モデル、実物大モデル などを使用して設計思想を確認するとともに、過酷試験によ る信頼性確認試験を実施して回転子の開発を行ってきた。最 終的には回転子全体として、各種モデル試験と同一結果が得 られるかの確認が必要である。このために、30万kW級実機と 同一径で、コア部長さだけ縮めた実物大総合回転子モデルを



図8 総合モデルの回転子 外径は実機相当で,回転子コア部だけ を縮めた回転子モデルを示す。

製作し,実際に通電回転試験を行った。この総合モデルの回転子部分を図8に示す。回転試験の結果,通風量,各部温度上昇,応力などが設計値どおりであることが確認された。



4 成出実証プラント

前章までに述べてきたように,可変速システムの実用化開発 を進めてきたが,実用機に適用する前段階として,実系統に接 続しての実証試験が必要である。庄川水系成出発電所(2台, 17.5 MW)で,その1号機を可変速発電システムに改造して, 実証機とした。以下,その概要と試験結果について述べる。

4.1 成出実証機の概要

成出実証機の主要仕様を表5に示す。水車は既設機を使用 している。発電機は回転子,固定子ともに新たに製作し,か つサイクロコンバータなどのシステム機器及び制御装置一式 を新設した。これらの機器は30万kW級実用機としての技術を 用いて製作されており,その製作性,信頼性を実機レベルで 確認している。完成した可変速機システム(工場組合せ試験時)



項目	仕	様
· /	出 カ	17.5 MW
システム	力 率	95%(遅れ)
水車	出力	18.5 MW
	回転速度	190~210 min ⁻¹ {rpm}
	有効落差(最高)	53.6 m
	使用水量	38.7 m ³ /s
発 電 機	容量	22 MVA
	電 圧	l l kV
	周波数	60 Hz
	極数	36
时选注册	容量	3.83 MVA
께幽表直	方 式	72アームサイクロコンバータ





図7 回転子コイルエンド構造 コイルエンドの冷却風の通風経過 を示す。

P-P矢視図

 $\mathbf{20}$

を図9に示す。

4.2 性能試験結果

完成した各機器は,各々単独の性能確認の後ブスダクトを 除く,全部品を組み合わせた総合性能確認試験を行った⁵⁾。総 合試験は,電源設備ほかの都合上,有効電力は定格の約±10 %(-は揚水運転方向),無効電力は定格の約±160%(-は弱 め界磁方向)までの範囲で行われた。

現地での最終性能確認試験として通常特性確認を実施した ほか,制御性能の詳細特性の確認⁶⁾,及び系統に人為的にじょ う乱を与えて,可変速機の動き及び系統の影響を確認する試 験も行った⁷⁾。試験結果は3.1節で述べたシミュレーションと 同様な動きを示している。代表的な測定結果と計算結果の比 較を図10,11に示す。出力指令を0%から100%まで所定の時 間で立ち上げたときの結果を図10に示す。シミュレーション



でも同一結果が得られているように、実電力は指令値に従っ て変化しており、電力制御が十分に行われていることが分か る。約10%の出力変化指令をステップに変化させたときの動 きを図11に示す。長時間の動きをみると、電力及び回転速度 の変化はシミュレーションとよく一致している。短い時間で みると、実電力の立上りは数十ミリ秒であり、高速に変化し ていることが分かる。

系統試験は、系統じょう乱時の可変速機の動き、可変速機 保護動作時に系統へ与える影響などを確認する目的で行った。 系統じょう乱時の試験は、送電線のループイン、ループオフ、 単相欠相-高速再閉路などを実施し、従来機と比較して動揺も 少なく正常に運転できることを確認した^{77,89}。過電圧保護機構 が動作する場合、ロータ巻線を短絡する現象が発生し、この ときには電力が発電状態から電動状態へと急変する。この場 合に、系統へ与える影響についての確認試験も実施した。い ずれも可変速機は安定に運転継続が可能であり、実運転での 信頼性の確認ができた。

5 結 言

可変速揚水システムは、ディジタル解析による詳細シミュ レーション、及び実機と同一構成のシミュレータによるその 検証という両輪で開発を進めてきた。その結果を反映して、 世界初の可変速機である成出実証プラントが建設された。成 出実証機は、性能確認試験の結果、所期の性能を十分満たし ていることが確認され、現在、長期信頼性確認のためそのま ま順調に稼動を続けている。

図 9 完成した22 MVA可変速システム 発電機とサイクロコンバ ータ及びシステム機器の写真(工場総合試験時)を示す。

実用機である30万kVA級への大容量化技術も開発は完了した。今後は今まで開発してきた技術と,成出実証機の実績を 十分に反映させて,実用機の設計に入る予定である。

終わりに, 系統関連の解析に御尽力いただいた電力中央研 究所の関係各位に対して, 心からお礼を申し上げる次第であ る。

21



図10 負荷急増試験 負荷を0%から100%まで所定の時間で上昇させたときの動きを示す。

800 日立評論 VOL.70 No.8(1988-8)



図11 ステップ変化指令に対する各部応答 出力変化は0.1秒以内で変化している。また,全体の動きもシミュレーションとよく一致している。

参考文献

 1) 杉本,外:可変速揚水発電システムの開発,日立評論,68,8, 653~658(昭61-8)

これは本システムの概説的な論文であり、本論文の前編とも言うべきものである。

- 2) 桑原,外:可変速揚水発電システムの20kWモデル試験設備による揚水運転試験,昭和63年電気学会全国大会No.923(昭63-4)
- 3) 湊,外:大容量可変速発電機の開発,昭和62年電気学会産業部 門全国大会
- 4) 中川,外:可変速揚水発電機回転子コイル端の軸方向通風冷却

- 方式の開発,電気学会回転機研究会資料(RM-87-26),(昭62-9)
- 5) 名倉,外:可変速発電システム成出実証プラントの工場内組合 せ試験,昭和63年電気学会全国大会No.924(昭63-4)
- 6) 阪東,外:可変速揚水発電システムの発電出力特性,昭和63年 電気学会全国大会No.925(昭63-4)
- 7) 中川,外:可変速発電システムの動特性シミュレーション(その2),電気学会電力技術研究会資料(PE-87-138),(昭62-7)
- 8) 斉川,外:可変速発電機の実系統試験結果について,昭和63年 電気学会全国大会No.926(昭63-4)

