

# 落差変動の大きい中・小水力発電所用可変速誘導発電システム

## Controlled-Speed Induction Generator System for Small and Medium Hydroelectric Power Plants

牧野正迪 Masamichi Makino

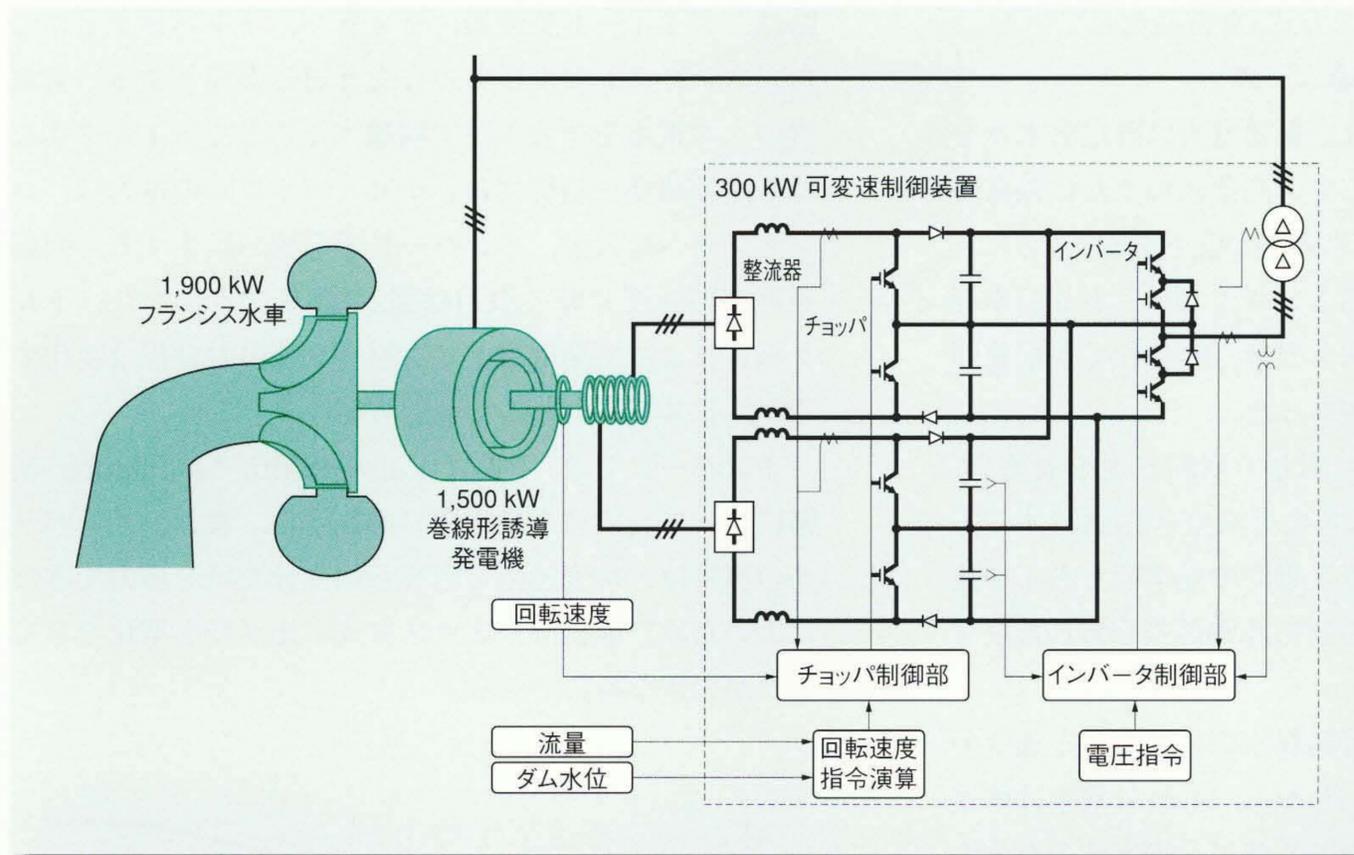
小野朋貴 Tomoki Ono

山口隆史 Takashi Yamaguchi

小森健介 Kensuke Komori

根本 守 Mamoru Nemoto

根本治郎 Haruo Nemoto



中部電力株式会社小里川発電所納め可変速誘導発電システムの概略構成

可変速制御装置により、流量やダム水位情報を取り込み、水車効率を最適にする速度で誘導発電機を運転する。

従来、ダム式発電所など落差変動が激しい地点にフランシス水車などの固定翼水車を用いると、条件によってはキャビテーションや振動が発生するほかに効率も低下するため、このような地点には可動翼水車を使用されてきた。しかし、(1)可動翼水車は構造が複雑で補機が多い、(2)発電機に関しても、励磁装置などの周辺機器を必要とする同期発電機はシステムが複雑であるなどの理由で、中・小水力発電に適しているとは言えなかった。

中部電力株式会社と日立製作所は共同で、パワーエレクトロニクスを駆使した誘導電動機の世界で初めて中・小水力発電に適用し、落差が変動しても固定翼水車が高效率で運転できる可変速誘導発電システムを開発した。実用化にあたっては、幾つかの課題について対策方法を検証し、中部電力株式会社小里川発電所1,800 kW発電設備に初号機を納入した。

### 1 はじめに

近年の地球温暖化問題に代表されるように、地球的規模の環境問題については、国際的に具体的な対応を迫られる時代に入っている。このため、クリーンな循環型エネルギーである水力発電は、その重要性が再認識されるべきであると考えられる。

資源エネルギー庁の調査によると、わが国の未開発の包蔵水力は地点数で約2,740か所、1地点の平均出力は約4,600 kWである。一方現在の、山間地に多数散在中・小水力発電所は、そのスケールメリットが小さいことが課題となっていた。このため、水力資源を最大限に

活用するには、発生電力量の最大化だけでなく、システムの簡素化・コンパクト化が求められている。

これらのニーズにこたえて、中部電力株式会社と日立製作所は共同で、可変速誘導発電システムを開発した。

ここでは、可変速誘導発電システムの概要と実用化に向けた課題と対策、および導入例として中部電力株式会社小里川発電所1,800 kW発電設備について述べる。

### 2 水車特性と可変速のニーズ

#### 2.1 電動機分野の可変速技術

可変速技術は、主に誘導電動機分野で、パワーエレクトロニクスの進歩とともに多様な発展を続けている。

例えば、ポンプやファンのような流体機器は回転速度の累乗に比例した負荷特性を持つので、効率を大幅に向上でき、省エネルギー効果大きい。

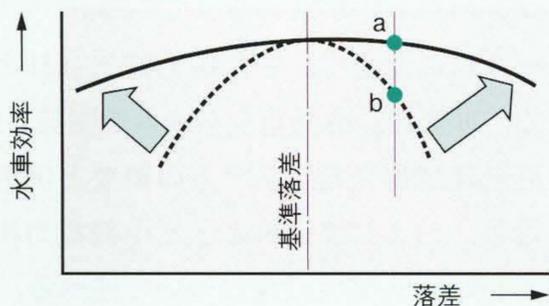
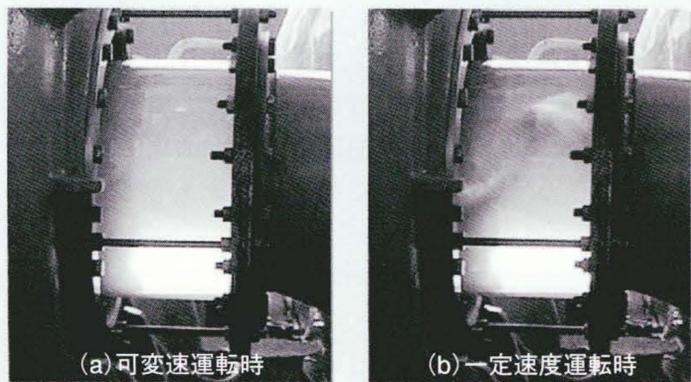
各種の電動機速度制御方式のうち、日立製作所は、チョッパを用いることによって変換器の容量を小型化できる、「コンパクトセルビウス方式」を製品化している。

### 2.2 水力分野における可変速ニーズ

ダム式などの落差変動が大きな発電所に固定翼水車を適用すると、基準落差に対して、高落差側または低落差側では流速の変化によって水車効率が低下する。さらに、水車を低効率領域で運転すると、キャビテーションや振動が発生し、運転に支障を来すため、やむなく運転範囲(落差範囲)を限定する必要があった。

その対策としては、落差に応じて回転速度を調整(可変速)する方式と、水車翼の角度を調整(可動翼)する方式がある。可変速による落差変動時の効率向上および運転可能な落差の拡大と、ならびに基準落差を外れた場合の水流の状態を図1に示す。

従来、中・小水力では、可動翼水車による一定速度の発電システムが主流である。しかし、可動翼水車は構造が複雑で高価となり、保守面でも費用が増大するなどの課題があった。



注：——(可変速)、----(一定速度)

図1 可変速による水車効率向上と水流の状態

可変速運転時は、水流が良好であり、水車効率の低下も防ぐことができる(a)。一定速度運転時は、落差変動に応じて水流が乱れ、水車効率も低下する(b)。

### 3 システム構成と動作原理

可変速誘導発電システムでは、固定翼水車を巻線形誘導機の回転子に直結し、滑りが負の領域で誘導発電機として運転する(25ページの図参照)。発電機二次側の主回路は、ダイオード整流器、チョッパ、インバータといった、コンパクトセルビウス方式と同じ構成とする。発電機の二次電流をチョッパで調整することで、トルクすなわち回転速度を制御する。チョッパオフ時の電力は、コンデンサへ流入後、インバータで系統へ回生する。回転速度(落差)変化時の出力は図2に示すようになり、トルク制御によって発電機とインバータの出力分担は変化するが、システム出力は一定である。

インバータでは、PWM(Pulse Width Modulation)制御によって高調波を最小限に抑制する。また、インバータの容量は、可変速幅で定まる回生分だけを出力できればよいため、静止セルビウス方式に比べて小型化できることが大きな特長である。

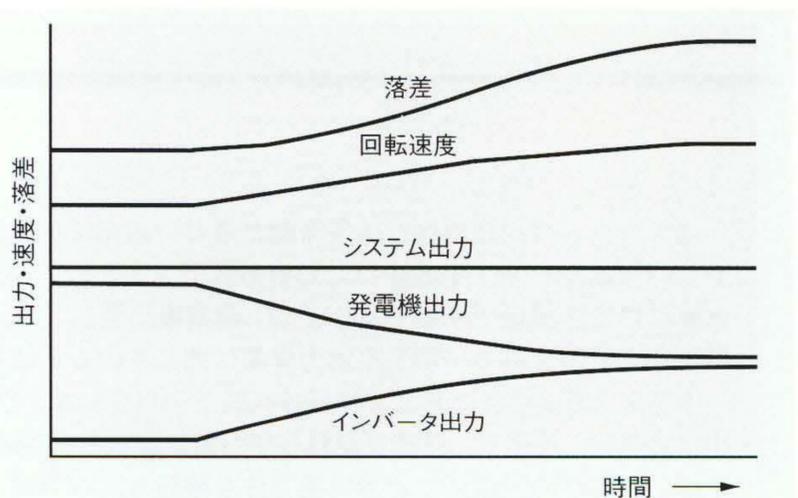


図2 可変速時の出力分担のタイムチャート

落差変動があると、発電機とインバータの出力分担は変化するが、システム出力は一定である。

表1 システム構成比較

可変速誘導発電では、従来の一定速度発電に比べ、機器構成を簡素化することができる。

機器	一定速度発電	可変速誘導発電
水車	可動翼水車	固定翼水車
発電機	突極形同期機	巻線形誘導機
调速機	必要	簡素化可能
励磁装置	必要 (励磁機, AVRなど)	不要
同期投入装置	必要	不要
可変速制御装置	不要	必要

注：略語説明 AVR(Automatic Voltage Regulator)

可動翼水車による一定速度の発電システムと、可変速誘導発電システムの構成比較を表1に示す。

従来の同期機とは異なり、誘導発電機を用いる可変速誘導発電システムでは、励磁装置、調速機能、および同期投入装置が不要となるほか、制御・保護面も簡素化できる。このように、可変速誘導発電システムでは、簡素な設備構成で、固定翼水車の効率の向上と運転範囲の拡大が期待できる。

## 4 実用化に向けた課題と対策

### 4.1 モデル試験による検証

電動機分野で実績のあるコンパクトセルビウス装置を発電分野に適用する場合、(1) 系統投入時に誘導発電機へ流入する突入電流を抑制したり、(2) 可変速によって発電機一次側から発生する高調波電流を低減するといった実用上の課題が生じる。これらの課題について、模型水車と組み合わせた30 kWのモデルで対策・方法を検証した。

### 4.2 突入電流の抑制方法

誘導発電機を系統へ投入する際に流れる突入電流は、定格電流の5~10倍程度と大きく、系統電圧を低下させる原因となる。このため、従来は限流リアクトルを挿入するなど、新たな抑制装置を必要としていた。

今回開発した可変速誘導発電システムでは、系統投入時にチョッパを制御することで、誘導機の二次巻線のインピーダンスを見かけ上大きくなるようにし、突入電流を抑制することができる。突入電流を実測した例を図3に示す。この抑制方法は、限流リアクトルなどの新たな抑制装置を不要とし、簡単でかつ効果的である。

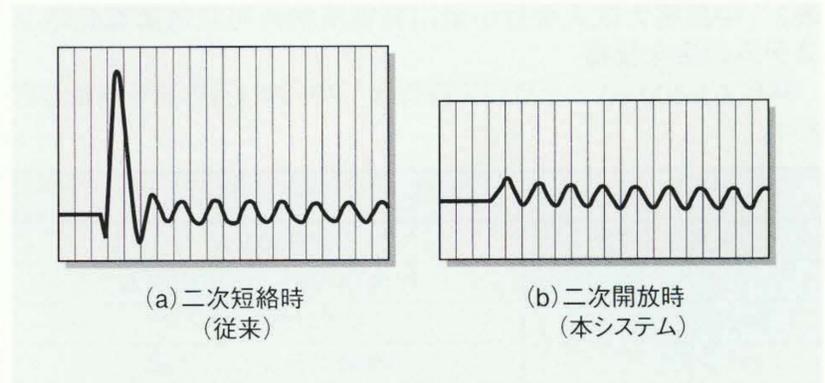


図3 突入電流波形の実測例

二次短絡時(かご形)には定格電流の5~10倍程度あった突入電流を、チョッパを制御することによって2倍程度まで抑制した。

### 4.3 発電機一次側の高調波低減方法

発電機の一次側には、ダイオード整流器の重なり現象の影響で、 $(1+6ms)$ 倍(mは整数、sは滑り)の高調波が発生する。この高調波は、系統電圧をひずませる原因となる。

高調波電流を低減するためには、高調波フィルタでの補償、ダイオード整流器の代わりに正弦波コンバータを

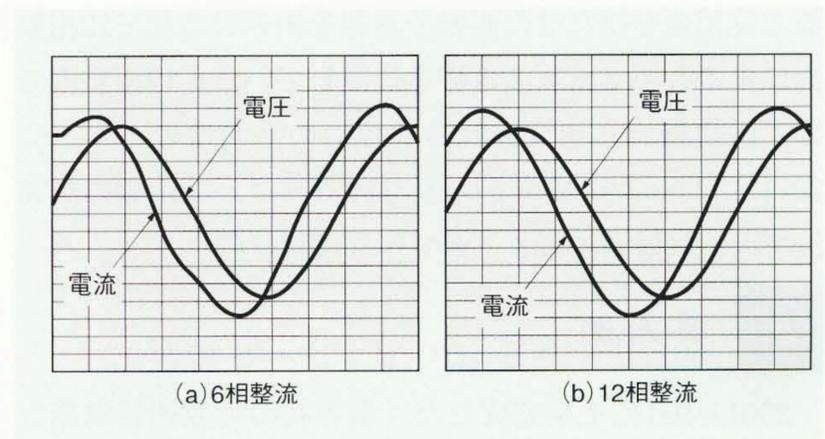


図4 一次側波形の実測例(滑り30%時)

通常の6相整流(ブリッジ回路1組)では電流ひずみ率が約9%であるのに対し、12相整流では約1%にまで低減した。

表2 高調波低減方法の比較

12相整流は、システムの複雑化を最小に抑える、現実的で有効な手段である。

項目	高調波フィルタ (パッシブフィルタ, アクティブフィルタ)	正弦波コンバータ	12相整流
構成			
抑制対策原理	系統側で高調波吸収	二次電流を正弦波制御	二次高調波を相殺
特徴	補償限界あり	制御が複雑, 高価	新たな制御装置が不要

表3 中部電力株式会社小里川発電所納め可変速誘導発電システムの主な仕様

総出力1,800 kWの小里川発電所は、2003年4月の運転開始を目指す。

項目	仕様
発電所出力	1,800 kW
水系	庄内川水系、小里川ダム
運転開始予定時期	2003年4月
水車型式	横軸フランシス水車
水車出力	1,900 kW
有効落差	56~102 m
流量	0.9~3 m <sup>3</sup> /s
発電機型式	巻線形三相誘導発電機
発電機出力	1,500 kW
定格電圧	6,600 V
極数	12
周波数	60 Hz
回転速度	630~720 r/min
整流方式	12相整流
チョッパ回路構成	直列多重2レベル
インバータ回路構成	3レベル
インバータ出力	300 kW

用いる方式などがあげられる(表2参照)。

今回の可変速誘導発電システムでは、ダイオード整流器と位相差を持たせた回転子巻線を組み合わせて12相整流にする方法で高調波電流を低減している。12相整流では、誘導機内に形成される起磁力の高調波のうち、5, 7, 15, 17…次の成分が相殺されるので、一次側の高調波を大幅に低減することができる(図4参照)。

## 5 導入例

2001年9月に工場完成した、世界初の可変速誘導発電システムである中部電力株式会社小里川発電所納め発電設備の主な仕様を表3に示す。

## 6 おわりに

ここでは、可変速誘導発電システムの概要、実用化に向けた課題と対策、および導入例について述べた。

可変速誘導発電システムの導入により、落差変動の大きい地点にシンプルな固定翼水車が適用でき、クリーンエネルギーである水力を利用する発電の活性化に貢献できるものと確信している。

今後も、発生電力量の最大化とトータルシステムの簡素化を推進し、水力発電分野でも社会に貢献していく考えである。

## 参考文献

- 1) 西, 外: 揚水発電所を高度化する, 電気学会誌, 113, 2 (1993)
- 2) 内田, 外: 誘導発電機を用いた新可変速発電システムの実用化, 平成11年電気学会全国大会, No.1817(1999.3)
- 3) 櫻井, 外: 巻線形誘導電動機用高効率可変速ドライブシステム(コンパクトセルビウス装置), 日立評論, 82, 4, 279~286(2000.4)

## 執筆者紹介



### 牧野正徳

1966年中部電力株式会社入社, 本店工務部 発電機グループ(水力) 所属  
現在, 水力発電の技術開発に従事  
電気学会会員  
E-mail: Makino.Masamichi@chuden.co.jp



### 小森健介

1984年日立製作所入社, 電力・電機グループ 火力・水力 事業部 水力技術部 所属  
現在, 水力発電の企画取りまとめに従事  
E-mail: kensuke\_komori@pis.hitachi.co.jp



### 小野朋貴

1981年株式会社日立エンジニアリングサービス入社, 電力本部 電力システム部 所属  
現在, 水力用発電機の開発・設計に従事  
E-mail: ono\_tomoki@mail.hesco.hitachi.co.jp



### 根本 守

1993年株式会社日立エンジニアリングサービス入社, 電力本部 電力システム部 所属  
現在, 水力用発電機の開発・設計に従事  
電気学会会員  
E-mail: nemoto\_mamoru@mail.hesco.hitachi.co.jp



### 山口隆史

1993年株式会社日立エンジニアリングサービス入社, 機電本部 制御エンジニアリングセンター 所属  
現在, ドライブシステムの開発・設計に従事  
E-mail: yamaguchi\_takashi@mail.hesco.hitachi.co.jp



### 根本治郎

1992年日立製作所入社, システムソリューショングループ 情報制御システム事業部 電機制御システム設計部 所属  
現在, 電動応用システムの開発・設計に従事  
E-mail: haruo\_nemoto@pis.hitachi.co.jp