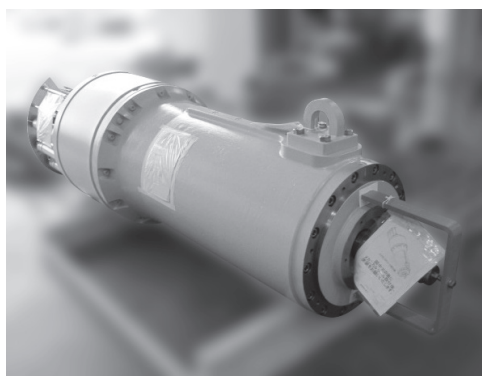


小水力発電用永久磁石発電機の開発

工藤久善 Hisayoshi Kudo
野崎 啓 Kei Nozaki
天田悠子 Yuko Amada
古市 匠 Takumi Furuichi

キーワード 水力発電, 可変速, PMG

概要



可変速水中PMG

再生可能エネルギーの需要が年々増えている。水力発電もその一つである。水力発電設備の中でも小水力発電設備は、ダムや大規模な水源を確保しなくても発電できるため、近年需要が増えている分野である。

小水力発電設備として、電力変換器盤と組み合わせた永久磁石発電機（PMG）を可変速運転することで、従来の固定速の発電機と比較し高効率で、かつ運転範囲が広く年間発電量の増加も見込める。

カーボンニュートラルや脱炭素が求められている中、可変速PMGのように再生可能エネルギーを高効率で活用できる発電機は、今後も活用すべき技術の一つと考える。

1 まえがき

小水力発電システムは、風力・太陽光などの自然エネルギーを利用した他のシステムと比較して、耐用年数が長く、安定した電力を供給することができることから、ダム・河川・農業用水など様々な場所に設置されている。従来、小水力発電システムには、構造が堅ろうな誘導発電機が多く用いられていたが、自立運転、及び高効率化が望めないという欠点があった。

これら欠点を克服できる発電機として、永久磁石同期発電機（PMG）がある。PMGはコスト的には高価なため、小水力のように発電電力の少ない発電機には採用されていなかったが、自立運転を優先するためには最適な発電機である。また、電力変換器盤と組み合わせることで可変速運転ができ、変落差・変流量にも対応し水力のエネルギーを最大限活

用できる発電機である。そこで、小水力発電機用のPMGを開発した。本稿では、小水力発電用に開発した可変速水中PMGを紹介する。

2 可変速水中PMGの概要

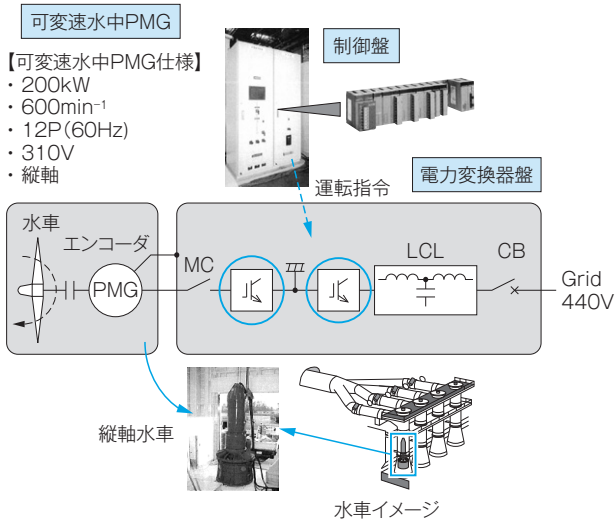
小水力発電の機場は、構造が単純堅ろうでメンテナンスしやすい誘導発電機が採用されることが多い。しかしながら誘導発電機は力率が悪く、二次銅損も発生するため効率が悪い。これに対してPMGは二次銅損が発生しないことから発電機単体で比較した場合、原理的に効率の高い発電機となる。

また、誘導発電機は、系統の周波数に対し進み力率で運転することで発電する仕組みのため、停電時には発電機として自立運転できない。可変速水中PMGは電力変換器盤で一定電圧・一定周波数で運転できることから、制御用の電源があれば自立運転

水車	発電機	運転方式	システム構成	適用製品
フランス・クロスフロー・ポンプ逆転	同期発電機 (SG)	一定速		【従来製品】
	誘導発電機 (IG)			【従来製品】
	PMG	可変速		【可変速システム】 ・制御盤 ・電力変換器盤 ・PMG
水中タービン・ポンプ逆転				【可変速システム】 ・制御盤 ・電力変換器盤 ・水中PMG

第 1 図 システム構成の比較

可変速水中PMGのシステム構成と他のシステム構成を示す。



第 2 図 システム詳細

可変速水中PMGのシステム構成の概略を示す。

できる。また、一般的に水力発電所には、安全に停止するため直流電源装置が設置され、電力変換器盤

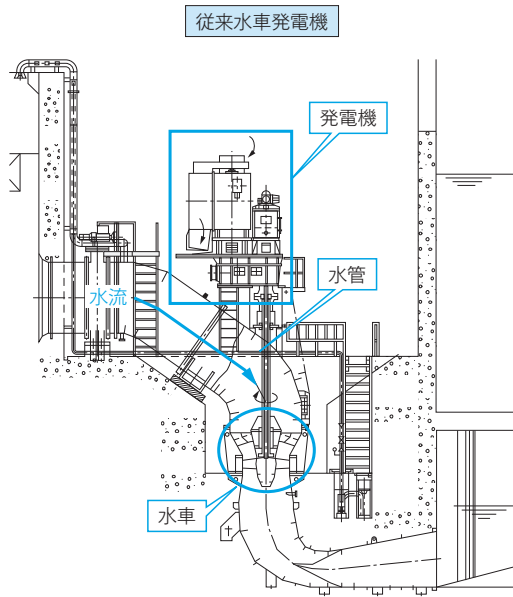
を制御する電源が確保されている。前述のシステムであれば自立運転ができるため、停電時や海外の無電化地域でも電源を供給できる。第 1 図にシステム構成の比較を、第 2 図にシステムの詳細を示す。

開発したPMGは水中タービンと組み合わせ、水管内に水車と発電機を設置するため水中PMGとし、発電機の水密性を高める構造としている。また、水中に設置することから別途冷却構造を必要とすることなく、発電機の構造を簡素化している。第 3 図に設置比較を示す。

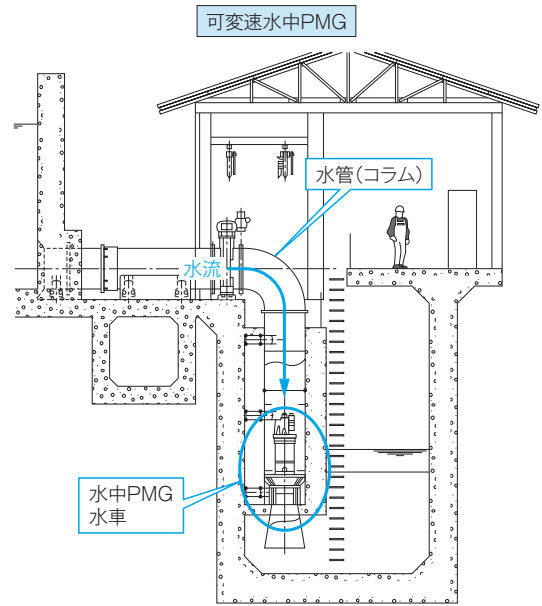
3 可変速水中PMGの仕様と構造

3.1 仕様

第 1 表に開発した可変速水中PMGの仕様を示す。



- (1) 水管外に発電機設置
- (2) 冷却機構が必要



- (1) 水管(コラム)の中にPMG+水車を設置(水中)
- (2) 冷却機構が不要
- (3) 水中設置のための配慮
 - ・ 水密機構
 - ・ 発電機内の湿気対策
 - ・ 流線形状

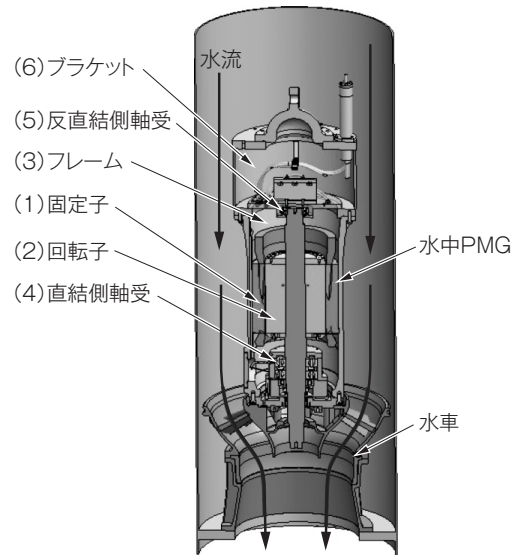
第3図 設置比較

従来水車発電機と可変速水中PMGの設置例を示す。

第1表 開発仕様

PMG発電機の開発仕様を示す。

項目	仕様
形式	縦軸全閉外被水冷
適用規格	JEC-2130 (IEC60034-1)
周囲温度	0~30℃
出力	215kVA
電圧	310V
電流	400A
周波数	60Hz
回転速度	600min ⁻¹
極数	12
力率	93%
耐熱クラス	155(F)
効率	94.5%



第4図 可変速水中PMGの構造

可変速水中PMG主要部の概要を示す。

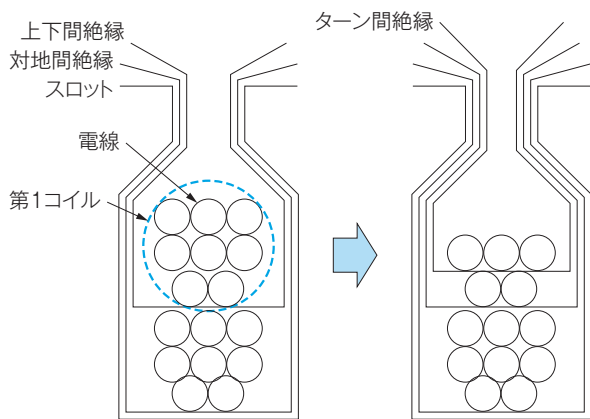
3.2 主要部

第4図に可変速水中PMGの構造を示す。大きく分類して、以下の部位から成る。

- (1) 固定子 接続される電力変換器のスイッチングサージ対策を行った巻線・高グレード電磁鋼鉄を積層した鉄心で構成する。
- (2) 回転子 永久磁石、高グレード電磁鋼鉄を積

層した鉄心で構成する。

- (3) フレーム 接合面・溶接部を水密構造とする。
- (4) 直結側軸受 スラスト荷重を受けるアンギュラ玉軸受と、流木などによるラジアル方向の突発的な荷重を受けるための円筒ころ軸受を持つ。



第5図 サージ電圧対策

電力変換器盤からのサージ電圧に対応するため、第1コイルのターン間に絶縁紙を挿入した様子を示す。

(5) 反直結側軸受 軸受の電食を防止する軸絶縁を目的として、転動体がセラミックス製の深溝玉軸受を持つ。

(6) ブラケット 接合面・溶接部を水密構造とし、反直結側軸受の保持とともに、端子台・ケーブルを取める。

3.3 特徴的な構造

3.3.1 可変速：サージ電圧対策

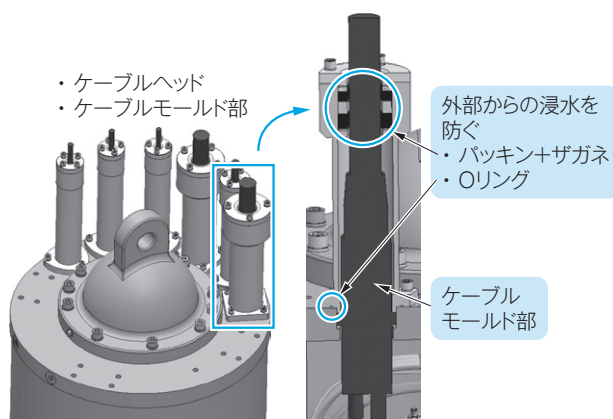
本機はインバータ制御による可変速運転を行う。そのため、電力変換器盤から発生するスイッチングサージ電圧が絶縁システムに悪影響を及ぼすリスクがある。接続される電力変換器のスイッチングサージは、電力変換器盤と接続される第1コイルに最大の電圧がかかり、中性点側に向けて減衰する傾向がある。そのため、絶縁破壊対策として、耐サージ電線の採用と、サージ電圧が最大になる第1コイルのターン間絶縁強化を行っている。第5図にサージ電圧対策を示す。

3.3.2 水密構造

本機は水中での使用を目的としている。各部品間の接合部・溶接部・ケーブル引き出し部は水密構造としている。ケーブル内の隙間を通して湿気侵入を防ぐため、特殊処理を施している。第6図にケーブルヘッド部の水密構造を示す。

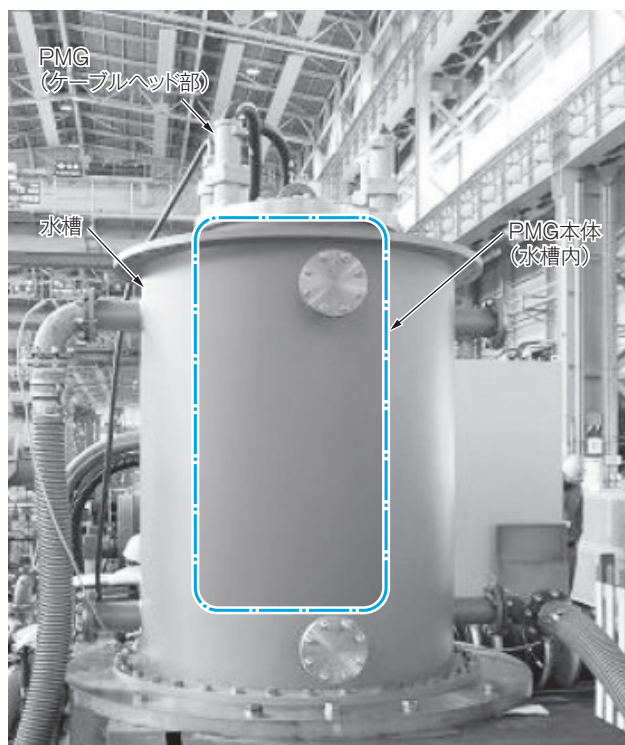
3.3.3 水中を模擬した試験

第7図に試作機試験の様子を、第2表に試験項



第6図 ケーブルヘッド部水密構造

ケーブルヘッド部の水密構造を示す。ケーブルをバッキンで押さえる水密構造とした。



第7図 試作機試験の様子

水中を模擬した試作機試験の様子を示す。

目を示す。試作機試験は、当社工場内で直流電動機を直結して回転試験を実施した。一部性能試験は、水槽を使用した水中試験を実施した。

4 可変速水中PMGの効率特性

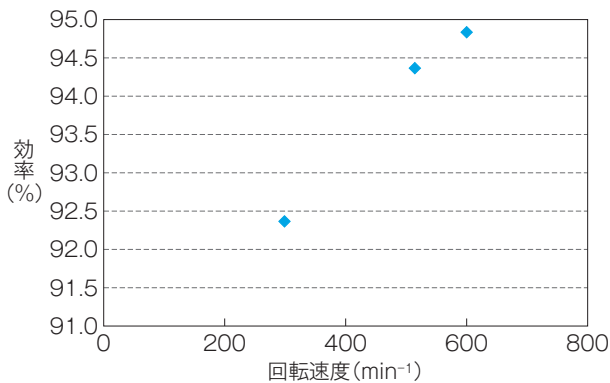
第8図にPMG単体の試験結果から得られた回転速度と効率の関係を示す。定格回転速度・定格出

第2表 試験項目

PMG単体試験、通常の負荷連結試験、水中での負荷連結試験の項目を示す。

試験項目	PMG単体	駆動機直結 (陸上)	駆動機直結 (水中)
水密試験	○		
外観・構造・寸法検査	○		
巻線抵抗測定	○		
相回転		○	○
インピーダンス測定 (Lq・Ld測定)		○	
無負荷誘起電圧測定		○	
THD・ひずみ率		○	
三相短絡特性			○
トルクリプル測定			○
漂遊損算定			○
効率算定			○
過速度試験		○	
軸電圧測定	○		
温度測定(無負荷・実負荷)			○
三相突発短絡試験 (Xd'・Td')			○
耐電圧試験	○		
フレーム固有振動数測定		○	
軸受温度測定			○
騒音測定		○	○

.....

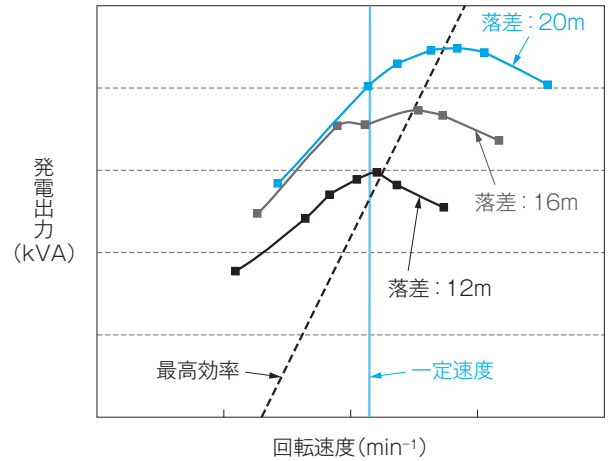


第8図 回転速度と効率の関係

回転速度によって効率が変化することを示す。

力での効率は94.8%となり、開発仕様の94.5%を達成した。

また、回転速度によって効率が変化することが分かる。第9図に異なる落差に対する効率と回転速度の関係を示す。水車発電機は、落差によって最高効率となる回転速度が異なる。開発した可変速水中PMGを用いることで、落差に適した回転速度で運転し、最高効率で運用できる。



第9図 異なる落差に対する効率と回転速度の関係

流量一定・落差を変化させた場合の効率と回転速度の関係を示す。

5 むすび

試作機による試験を終え、小水力発電に適した高効率な可変速水中PMGを実現した。小水力発電は、未開発・再利用可能な箇所は国内にもまだ多く存在しているため、今後とも性能の高い製品を提供していく所存である。

・本論文に記載されている会社名・製品名などは、それぞれの会社の商標又は登録商標である。

《執筆者紹介》



工藤 久善
Hisayoshi Kudo
回転機システムユニット
回転機的设计業務に従事



野崎 啓
Kei Nozaki
回転機システムユニット
回転機的设计業務に従事



天田 悠子
Yuko Amada
回転機システムユニット
回転機的设计業務に従事



古市 匠
Takumi Furuichi
水力事業推進本部技術部
水力発電事業の企画業務に従事