

# 火力発電所向け 交流界磁ブラシレス励磁システム

片岡道雄\*  
宮武亮治\*  
平松孝士\*

AC Magnetic Field Brushless Excitation System for Thermal Power Plants

Michio Kataoka, Ryoji Miyatake, Takashi Hiramatsu

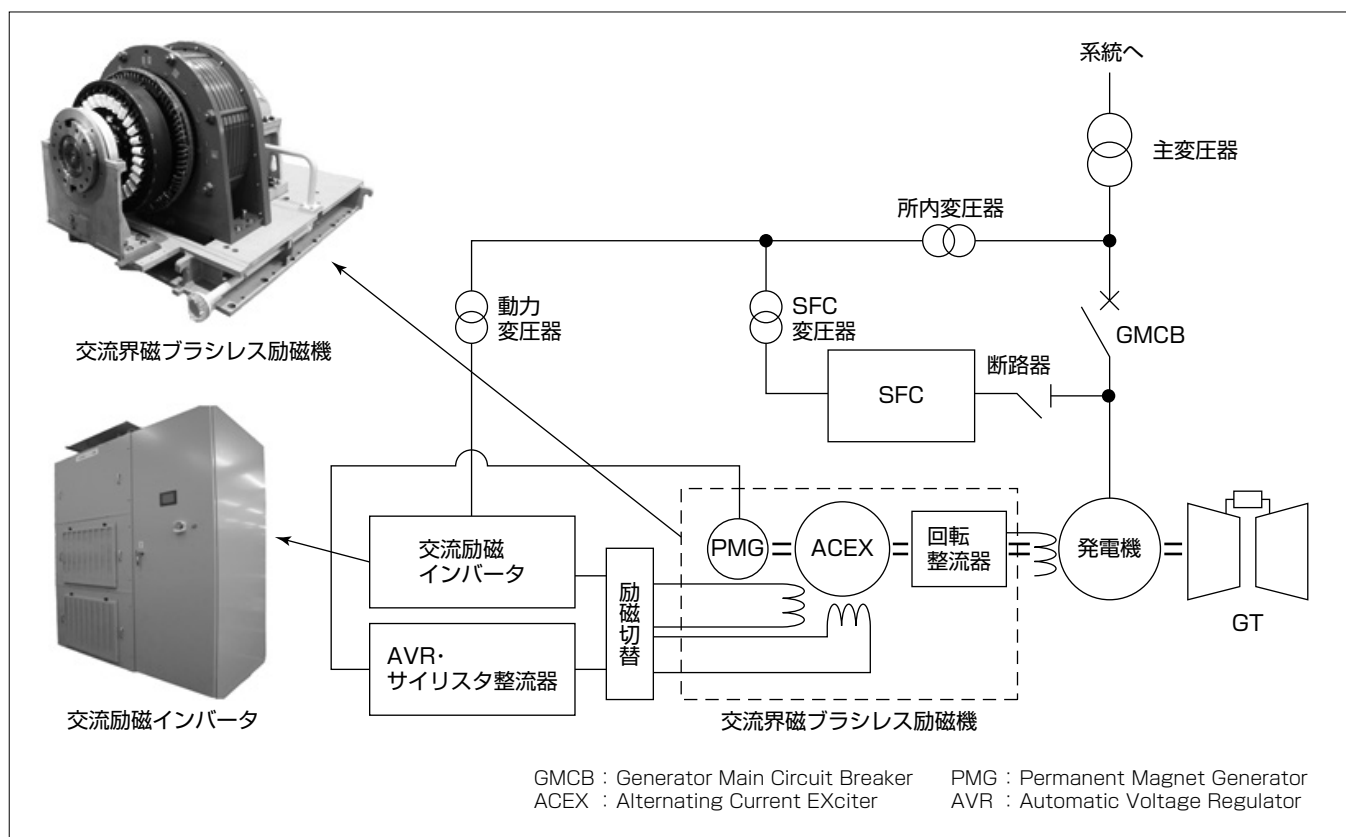
## 要 旨

世界的な電力需要の増加，地球環境に対する負荷低減などの社会的ニーズによって，今後も熱効率がよく，CO<sub>2</sub>排出量が少ないガスタービン(GT)を使用したガスタービンコンバインドサイクル発電の需要が多く見込まれている。

GTは圧縮機・燃焼器・タービンで構成され，着火まではGT単独で起動できないため起動装置が必要である。三菱電機では発電機とSFC(Static Frequency Converter：静止形周波数変換器)を組み合わせ，発電機を同期モータとしてGT軸を回転・昇速させるSFC起動方式を標準的に採用している。

SFC起動では，起動開始3 r/minから発電機界磁巻線に所要の直流電流を供給する必要がある。従来型ブラシレス励磁方式では，このような低速回転数では所要の直流電流が供給できないため，当社SFC起動の励磁は全てサイリスタ励磁方式となっており，保守性に優れたブラシレス励磁方式を適用できない状況であった。

今回，SFC起動に対応した交流界磁ブラシレス励磁システムを開発した。それに伴って，試作機を製作して検証試験を実施した。



## 交流界磁ブラシレス励磁システムとガスタービン用SFC起動方式回路

交流界磁ブラシレス励磁システムはGTの回転軸に接続された発電機の界磁巻線を励磁するものである。GT起動時は，従来の直流界磁ではなく，交流励磁インバータがブラシレス励磁機の交流界磁を行うことで，回転停止時でも発電機が同期モータとして動作する界磁を確立する。これによって，保守性に優れたブラシレス励磁方式によるSFC起動が可能となる。なお，定格回転数到達後は，直流界磁に切り替える。

## 1. ま え が き

近年、電力需要の増加、地球環境に対する負荷低減などの社会的ニーズによって、GTを使用したガスタービンコンバインドサイクル発電の需要が多く見込まれている。

GTは着火までは単独で起動できず、起動装置が必要になる。このため、当社では発電機とSFCを組み合わせ、発電機を同期モータとして、GT軸を回転・昇速させるSFC起動方式を標準的に採用している。

SFC起動では、起動開始3r/minから発電機界磁巻線に所要の直流電流を供給する必要がある、ブラシレス励磁方式を適用できない状況があった。

今回、SFC起動に対応した交流界磁ブラシレス励磁システムを開発した。それに伴って、試作機を製作して検証試験を実施した。

本稿では、開発システムの構成、特長、検証試験結果について述べる。

## 2. 現状のシステムと開発の狙い

### 2.1 タービン発電機励磁方式

現在、発電機では次の2つの励磁方式が主に採用されている(表1)。

#### 2.1.1 ブラシレス励磁方式

図1にブラシレス励磁方式の機器構成を示す。発電機回転子と同一軸上に、交流励磁機(ACEX)の電機子巻線、回転整流器、永久磁石発電機(PMG)が設置され、ACEXの電機子巻線は回転整流器を介し発電機界磁巻線に接続されている。ACEXの電機子巻線で発生した交流出力は、

表1. 励磁方式比較

| 項目            | ブラシレス励磁方式                 | サイリスタ励磁方式                     |
|---------------|---------------------------|-------------------------------|
| ブラシ保守         | 不要                        | ○ 点検、交換が必要 △                  |
| 装置スペース        | 小                         | ○ 大(励磁変圧器・バスダクト・サイリスタ励磁装置要) △ |
| 励磁系<br>電圧応答時間 | 標準形：0.5～2秒<br>超速応形：0.1秒以下 | △ 約0.05秒 ○                    |

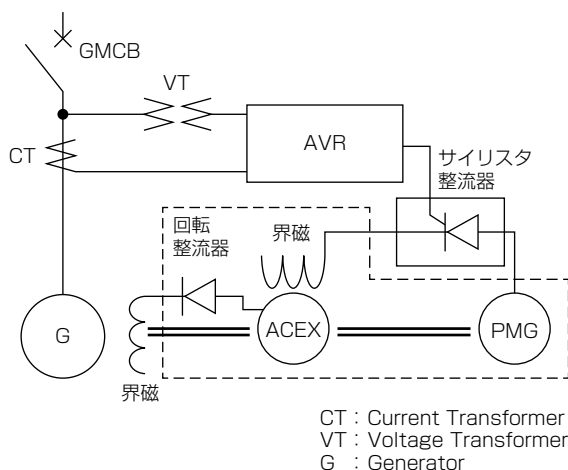


図1. ブラシレス励磁方式の機器構成

回転整流器で三相全波整流された直流電流となり、発電機界磁巻線に供給される。発電機界磁に必要な直流電流は、回転部で発生するため、ブラシ及びスリップリングは不要である。

発電機の界磁エネルギーは、GTによって発電機、ACEX、PMGが回転することで供給される。このため、ブラシレス励磁方式のサイリスタ整流器の容量は、ACEXの界磁損に対応した励磁容量となり、2.1.2項で述べるサイリスタ励磁方式の装置容量よりも小さくなる。なお、ブラシレス励磁方式では、ACEXを介し、発電機界磁巻線に電圧を印加するため、ACEXの応答時間の影響を受け、サイリスタ励磁に比べ応答時間は遅くなる。しかし、超速応励磁では励磁系電圧応答時間を0.1秒以下とすることができる。

#### 2.1.2 サイリスタ励磁方式

図2にサイリスタ励磁方式の機器構成を示す。サイリスタ励磁方式は、励磁変圧器(Exciter Transformer : ExTr)を介し系統から受電し、サイリスタ励磁装置で交流を直流へ変換し、発電機回転子軸上の銅製スリップリングにカーボンブラシを機械的に接触させ、発電機界磁巻線を直流励磁する。このため、サイリスタ励磁方式は起動時に系統電源からエネルギー供給を受けることで、回転速度によらず任意の励磁電流を発電機界磁巻線に通電可能である。一方、サイリスタ励磁装置と励磁変圧器・バスダクトは、発電機界磁損を供給する容量が必要であり、装置スペースが大きい。また、スリップリングとブラシが必要であることから、ブラシ交換やカーボンダスト清掃などの定期的な保守が必要である。

### 2.2 ガスタービン起動方式

現在100MVAを超えるガスタービンの起動方式として、主に次の2つの方式が用いられる。

#### 2.2.1 モータ起動方式

モータ起動方式は図3の構成になっており、GTの回転軸を、固定速の誘導モータとトルクコンバータを用いて速度調整し、GTを起動する方式である。励磁はブラシレス励磁とサイリスタ励磁の両方に対応可能だが、通常はブラシレス励磁が用いられる。

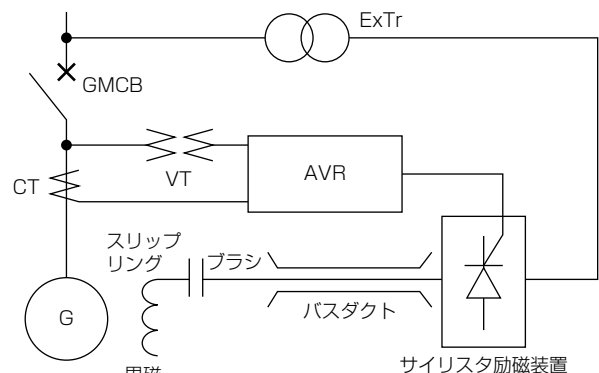


図2. サイリスタ励磁方式の機器構成

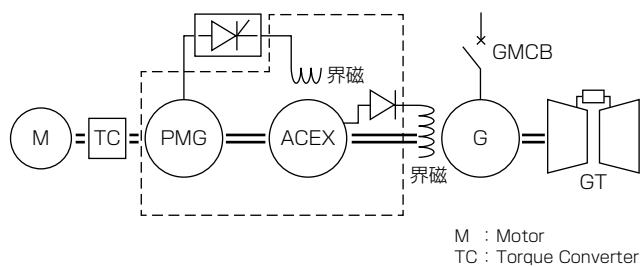


図3. モータ起動方式

## 2.2.2 SFC起動方式

SFC起動方式は図4の構成になっており、SFCで発電機を同期モータとして運転し、GT軸を回転／昇速させる方法である。GT起動時にSFCと発電機電機子巻線を接続し、SFCから発電機電機子巻線に交流の電流を通電し、回転に必要なエネルギーを供給する。発電機を同期モータとして運転する際、発電機界磁電流はAVRとサイリスタ励磁装置で制御する。

SFC起動時の発電機界磁電圧( $V_f$ )と端子電圧( $V_{gen}$ )の動きを図5に、SFC制御と励磁制御のモードを表2に示す。定格回転数0～20%の励磁制御では発電機界磁電圧一定制御になるため、発電機端子電圧は回転数に比例する。また、定格回転数20～70%の励磁制御では発電機端子電圧一定制御になるため、励磁電圧は回転数増加とともに低下する。

先に述べたように、SFC起動で発電機を同期モータ運転するためには、起動開始3r/minから発電機界磁巻線に無負荷定格電圧相当の直流電流を通電する必要がある。従来型ブラシレス励磁方式では、このような低速回転数では所要の直流電流が供給できないため、当社SFC起動の励磁は全てサイリスタ励磁方式となっている。

## 2.3 開発の狙い

表3は先に述べたGT起動方式と励磁方式の組合せ比較である。モータ起動はサイリスタ励磁とブラシレス励磁のどちらの方式も可能であるが、Aのサイリスタ励磁は保守性・スペースでメリットがなく納入実績が少ない。また、Bのブラシレス励磁はブラシ保守が不要で励磁変圧器・バスダクトの装置スペースが不要となるメリットがあり、納入実績がある。

次にSFC起動方式では、先に述べたようにCのサイリスタ励磁が現在の標準であり、起動用モータ及びトルクコンバータがなく、軸長が短く建屋を小さくでき、1台のSFCで複数台のGTを起動できる等のメリットを持つ。

今回の開発は、発電機のブラシレス励磁システムとして交流励磁インバータと交流界磁に対応したブラシレス励磁機を使用し、SFC起動を可能とするブラシレス励磁方式を実現した。これによってブラシレス励磁とSFC起動方式の両方のメリットを得ることを狙いとした。

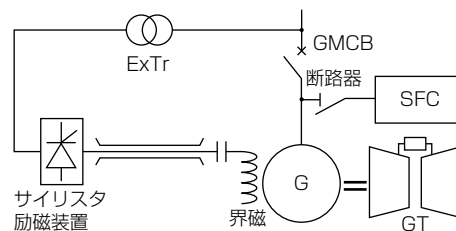


図4. SFC起動方式

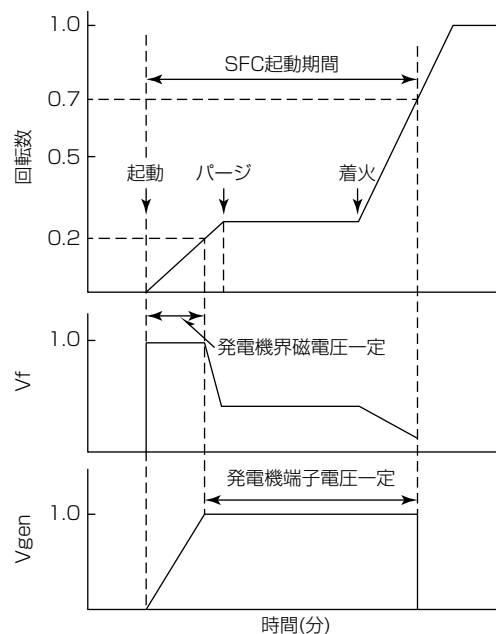


図5. SFC起動時の発電機界磁電圧と端子電圧の動き

表2. SFC起動時の制御

| 回転数      | SFC制御 | 励磁制御      | 発電機端子電圧 |
|----------|-------|-----------|---------|
| 定格0～20%  | トルク一定 | 発電機界磁電圧一定 | 回転数に比例  |
| 定格20～70% | 出力一定  | 発電機端子電圧一定 | 一定      |

表3. 起動－励磁方式の組合せ比較

| 組合せ | 起動方式 | 励磁方式  | 保守性 |              | スペース |    | 備考         |
|-----|------|-------|-----|--------------|------|----|------------|
|     |      |       | ブラシ | モータ          | 軸長   | 装置 |            |
| A   | モータ  | サイリスタ | △   | △            | △    | △  | DC界磁納入実績少  |
| B   | モータ  | ブラシレス | ○   | △            | △    | ○  | DC界磁納入実績あり |
| C   | SFC  | サイリスタ | △   | ○<br>(モータなし) | ○    | △  | DC界磁現標準    |
| D   | SFC  | ブラシレス | ○   | ○<br>(モータなし) | ○    | ○  | AC・DC界磁開発  |

## 3. 交流界磁ブラシレス励磁システム

### 3.1 システム構成

この開発では500kW級交流界磁ブラシレス励磁機と交流励磁インバータを試作し、工場では組合せ試験を実施した。

#### 3.1.1 構成

交流界磁ブラシレス励磁によるSFC起動の回路を図6に示す。交流界磁ブラシレス励磁システムは、①dq軸二相界磁巻線を施したブラシレス励磁機、②SFC起動時に

ACEX界磁巻線を交流励磁する交流励磁インバータ、③定格負荷時にACEX界磁巻線を直流励磁するAVR・サイリスタ整流器、④界磁巻線と励磁装置の接続を変更する励磁切替回路で構成される。

### 3.1.2 動作

GTのSFC起動で、SFC、AVR・サイリスタ整流器、交流励磁インバータは上位のプラント制御装置の指令に基づき発電機を同期モータとして運転する。

SFC起動時の励磁制御は交流励磁インバータで交流励磁制御を行い、定格回転数到達後は励磁切替回路で界磁巻線と励磁装置の接続を変更し、従来の直流出力のAVR・サイリスタ整流器で直流励磁制御を行う。

### 3.1.3 システムの特長

#### (1) 励磁システムの信頼性確保

発電機の運転状態によって励磁装置を切り替え、SFC起動時は交流励磁インバータで交流励磁し、定格負荷運転時は従来のAVR・サイリスタ整流器で直流励磁するシステムとした。これによって、定格負荷運転で、多数の実績がある従来のAVR・サイリスタ整流器を適用でき、励磁システムの信頼性を確保した。

#### (2) 回転停止状態から直流出力可能なブラシレス励磁機及び励磁装置

SFC起動開始3 r/minから直流出力が可能となるようACEXの界磁構造を直流巻線から交流巻線へ変更した。また、励磁装置にIGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)インバータを採用し、交流励磁可能とした。これによって、回転停止状態からブラシレス励磁機は直流出力が可能となり、発電機界磁巻線に所要の直流電流を供給可能である。

#### (3) 発電機界磁電圧センサレス制御

SFC起動では、表2のとおり定格回転数20%以下の領域でブラシによって検出した発電機界磁電圧を一定制御するが、ブラシレス励磁の場合、図6のように発電機界磁電圧(Vf)は回転子上にあり直接検出できない。そこで、交流励磁インバータの出力電圧・電流と回転数から回転子上の発電機界磁電圧を推定し、この値をフィードバック値として制御する方式を開発した。発電機界磁電圧一定制御で、発電機界磁電圧を検出しないセンサレス制御が可能である。

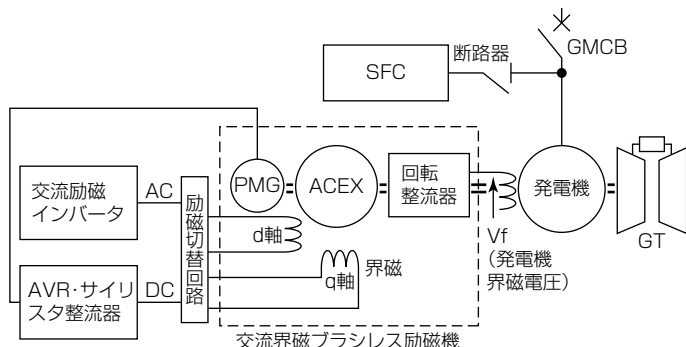


図6. 交流界磁ブラシレス励磁とSFC起動の回路

### 3.2 交流界磁ブラシレス励磁機

SFC起動に対応した交流励磁ブラシレス励磁システムを実現するため、交流界磁ブラシレス励磁機(以下“交流界磁BL”)を開発した。その特徴、基本仕様及び検証結果を次に述べる。

#### 3.2.1 特徴

交流界磁BLは、従来BLと同様に、ACEX、回転整流器、PMGで構成される。SFC起動では、SFC起動開始3 r/minから発電機界磁巻線に所要の直流電流を供給する必要があるが、図7(a)のとおり、従来BLの界磁巻線は直流突極構造であり、界磁巻線から回転磁界を発生させることが困難であった。これによって、従来BLでは、たとえ交流界磁をかけたとしてもSFC起動開始3 r/minからSFC起動に必要な発電機界磁電流を供給できない課題があった。そこで、図7(b)のように界磁鉄心を一般的な回転機の電機子と同様にスロット形状へ変更し、dq軸二相交流巻線を施した。d軸界磁巻線とq軸界磁巻線を位相差90度でそれぞれ交流励磁することによって、回転停止時でもSFC起動に必要な発電機界磁容量を供給可能とした。

図8は、検証機における回転子挿入後の写真である。励磁機台板の上に、界磁鉄心及び軸受をマウントしている。界磁鉄心は回転磁界を発生するため、一円形状の珪素(けいそ)銅板積層構造としており、回転子は界磁鉄心へ軸方向に挿入する構造である。その他の回転整流器、ACEXの電機子巻線、PMGは、当社で多数の製作実績がある従来BLと同じ構造を採用している。

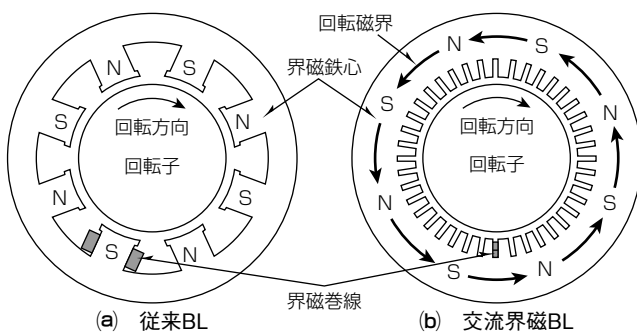


図7. ACEXの界磁構造

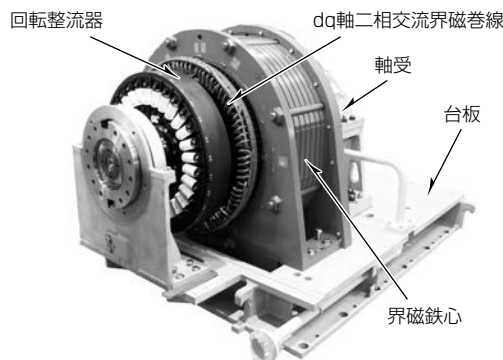


図8. 交流界磁BL検証機(回転子挿入後)

### 3.2.2 基本仕様

開発した交流界磁BLの基本仕様を表4に示す。250MVAタービン発電機と組み合わせた場合、定格負荷3,600r/min時に必要な直流出力は520kWであり、SFC起動3～2,400r/min時に必要な直流出力は60kWである。今後の発電機高出力化を考慮し、交流界磁BL及び交流励磁インバータ装置は、SFC起動時の直流出力85kWまで対応可能な設計とした。

SFC起動開始3r/minでは速度起電力が低く、ACEXの磁気飽和の影響を受けてACEX界磁電流が増加するため、ACEXの磁気装荷を下げ、交流励磁インバータの容量を抑制した。また、PMG容量を増加させたため、発電機定格負荷時の励磁系電圧応答は、応答時間0.1秒以下、電圧速度3.3pu/秒以上となり、交流界磁BLは超速応励磁の要求を満足する設計となる。

### 3.2.3 検証結果

交流界磁BLの負荷特性を図9に示す。

2.2.2項で述べたとおり、SFC起動で定格回転数20%以上の運転では、直流出力一定とならず、直流出力は回転数増加とともに低下する。検証試験は負荷特性確認のため、0～3,600r/minで直流出力85kW一定の条件で試験を実施した。界磁電流 $I_d$ 、 $I_q$ 及び界磁電圧 $V_d$ 、 $V_q$ につ

表4. 交流界磁BLの基本仕様

| 対象    | タービン発電機 | 定格250MVA 3,600r/min |
|-------|---------|---------------------|
| 構成    | 交流励磁機   | 固定子                 |
|       |         | 回転子                 |
|       | 回転整流器   | 三相全波整流器             |
|       | 副励磁機    | 永久磁石同期発電機           |
| 仕様    | 定格負荷    | 直流出力                |
|       |         | 520kW               |
|       |         | 回転数                 |
|       | SFC起動   | 3,600r/min          |
|       |         | 励磁                  |
|       |         | 直流励磁サイリスタ装置         |
| 超速応励磁 | SFC起動   | 直流出力                |
|       |         | 85kW                |
|       |         | 回転数                 |
| 超速応励磁 | SFC起動   | 3～2,400r/min        |
|       |         | 励磁                  |
| 超速応励磁 | SFC起動   | 交流励磁インバータ装置         |
|       |         |                     |
| 超速応励磁 | 電圧応答時間  | 0.1秒以下(注1)          |
|       | 電圧速度    | 3.3pu/秒以上           |

(注1) 電圧応答時間0.1秒は、IEEE421.1規定値である。

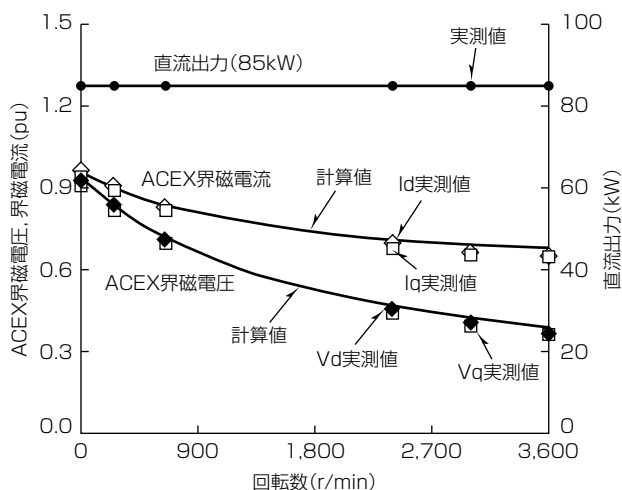


図9. 交流界磁BLの負荷特性

いて、設計値と実測値はよく一致しており、設計の妥当性を確認した。直流出力85kW一定の条件では、回転数上昇とともに、回転子軸からエネルギーが供給されるため、ACEXの界磁電流、界磁電圧は減少することを確認した。ほかの検証項目(温度、損失、励磁速度)についても、実測値はほぼ設計値どおりとなり、IEC(International Electrotechnical Commission)、JEC(電気規格調査会)などの規格を満足し、問題ないことを確認した。

### 3.3 交流励磁インバータ

SFC起動に対応した交流界磁ブラシレス励磁システムを実現するため、交流励磁インバータを開発した。

#### 3.3.1 機能

交流励磁インバータの外観を図10に示す。交流励磁インバータは、GT起動時にプラント制御装置及びSFCと協調して、発電機の励磁制御を行う。

交流励磁インバータは、コンバータ、インバータ、スコット変圧器、制御回路部で構成される。入力された三相交流電圧はコンバータで直流に変換され、インバータのIGBT素子をPWM(Pulse Width Modulation：パルス幅変調)スイッチングして三相交流電圧を発生させる。この三相交流電圧は、スコット変圧器で二相交流電圧に変換され、ACEXのdq軸二相界磁巻線を励磁する。

#### 3.3.2 基本仕様

開発した交流励磁インバータの基本仕様を表5に示す。交流界磁BLの界磁巻線が必要とする電力容量、界磁電圧/電流を基に、定格出力容量212kVA、定格電圧1,520V、定

格電流70Aとした。

#### 3.3.3 制御方法

交流励磁インバータの内部構成を図11に示す。交流励磁インバータは、SFC起動時の励磁装置として必要となる次の2つの制御を持っており、表2に示すSFC起動時の励磁制御に従い、SFC起動の過程で制御方式が切り替わる。



図10. 交流励磁インバータ

表5. 交流励磁インバータの基本仕様

|    |         |                   |
|----|---------|-------------------|
| 構成 | コンバータ   | 三相全波整流            |
|    | インバータ   | 三相2レベルインバータ       |
|    |         | 600A級 IGBT        |
| 仕様 | スコット変圧器 | 三相入力、二相(位相差90°)出力 |
|    | 出力容量    | 212kVA            |
|    | 定格出力    | 1,520V/70A        |
| 制御 | 入力電圧    | 三相400V級 50/60Hz   |
|    | SFC起動   | 発電機界磁電圧推定制御       |
|    | 界磁励磁制御  | 発電機端子電圧制御         |

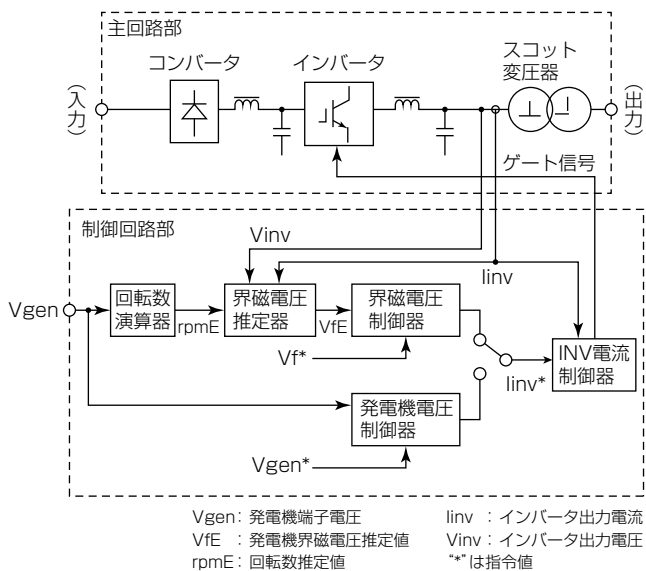


図11. 交流励磁インバータの内部構成

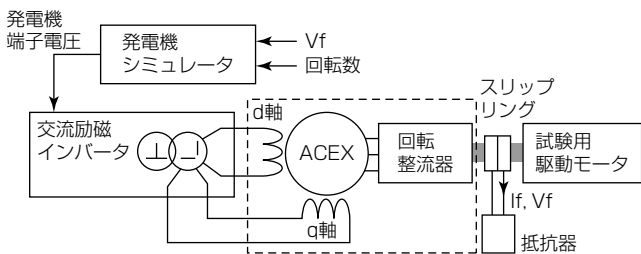


図12. 組合せ試験回路

#### (1) 発電機界磁電圧推定制御

発電機界磁電圧 ( $V_f$ ) は、先に述べた図6に示すように回転軸上にあることから、スリップリングとブラシがなければ計測することができない。このため、発電機界磁電圧推定制御では、インバータ出力電流  $I_{inv}$ 、出力電圧  $V_{inv}$ 、回転数推定値  $rpmE$  を使用し、交流界磁BLの等価回路を基にした演算式によって発電機界磁電圧を推定演算し、この値をフィードバック値とした制御を行う。

#### (2) 発電機端子電圧制御

発電機端子電圧制御では、発電機端子電圧をVTで取り込み、フィードバック制御している。回転数が定格の20～70%では、発電機端子電圧を一定に制御しており、通常のAVRと同様の制御を行う。

### 3.4 組合せ試験

#### 3.4.1 試験構成

交流界磁BLと交流励磁インバータの工場組合せ試験回路を図12に示す。交流界磁BLのdq軸界磁巻線は交流励磁インバータに接続し、直流出力は試験用のスリップリングとブラシを介して抵抗器に接続する。交流界磁BLの軸は試験用駆動モータにカップリング接続され、可変速の運転が可能になっている。なお、発電機端子電圧信号として、回転整流器出力電圧 ( $V_f$ ) と回転数を基に発電機端子電圧を演算する発電機シミュレータの信号を用いた。

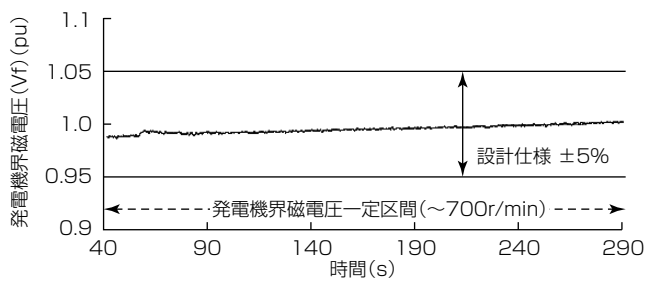


図13. 発電機界磁電圧推定制御の試験結果

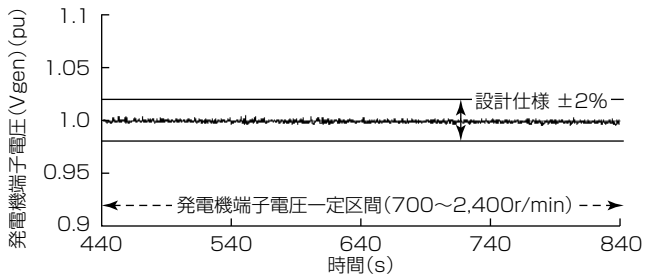


図14. 発電機端子電圧制御の試験結果

#### 3.4.2 試験結果

交流界磁BLをSFC起動時と同様の運転パターンで可変速駆動し、制御精度を確認した。

##### (1) 発電機界磁電圧推定制御

回転数上の発電機界磁電圧推定値を算出し、この値を発電機界磁電圧検出値と見なしたフィードバック制御試験を実施した。図13に示すように制御基準値1.0puに対して、実測値は±2%以内であり設計仕様±5%を満足し、制御上の問題がないことを確認した。

##### (2) 発電機端子電圧制御

図14に示すように制御基準値1.0puに対して、実測値は±1%以内であり設計仕様±2%を満足し、制御上の問題がないことを確認した。

## 4. む す び

ガスタービンのSFC起動に対応した500kW級交流界磁ブラシレス励磁システムを開発した(発電機容量250MVA相当)。従来のサイリスタ励磁によるSFC起動方式に比べ、ブラシ交換が不要で、励磁変圧器・バスダクトがなくなるなどの保守面・装置スペース面で優れたシステムとなっている。

今後、このシステムなどによって発電プラントの保守省力化、省スペース化に寄与していく。

## 参 考 文 献

- (1) 木村秀夫, ほか: 火力発電所用サイリスタ起動装置, 三菱電機技報, 67, No.5, 480～484 (1993)
- (2) 中屋 偉, ほか: 関西電力(株)赤穂発電所1号タービン発電機用超速応ブラシレス励磁装置, 三菱電機技報, 62, No.7, 610～615 (1988)