

# 誘導発電機用コンバータの開発

Development of a Converter for Induction Generator

吉野 真※  
Makoto Yoshino  
加藤 雅大※  
Masahiro Kato

## 1. はじめに

近年、地球温暖化対策として再生可能エネルギーを利用した発電事業が重要視されている。これらの発電事業は、2012年に固定価格買取制度(FIT)が施行されたことにより、急速に需要が伸びた。その中でもバイオマス発電事業は、発電電力が気象条件に左右されず、発電電力の買取価格が高いといった利点があり、今なお注目されている。

当社は2016年から、バイオマス発電用の系統連系装置として、コンバータとパワーコンディショナを組み合わせた製品を販売している。しかし従来機種のコンバータは、同期発電機用の発電システム向けであり、誘導発電機を用いた発電システムには使用できなかった。

そのため、今回、新たにバイオマス発電事業向けに誘導発電機用コンバータ(以降、本装置)を開発した。本装置は、当社の従来機種である同期発電機用コンバータとは異なる回路構成、制御方式を採用しており、誘導発電機に適した性能、機能を具備している。当社のパワーコンディショナと組み合わせることで、電力系統への連系を容易に実現できる。

## 2. 発電システムの概要

### 2.1 発電システムの構成

再生可能エネルギーを利用した発電システムにおいて、風力、水力、バイオマス発電などでは発電機が用いられる。その発電機を用いた発電システムの回路構成を図1に示す。最も簡単な構成としては、図1(a)のように交流発電機を電力系統へ直接連系する方式が考えられる。この方式は6.6 kVの高圧連系設備において広く用いられている。

一方、比較的小規模な売電事業者の発電システムは低圧連系が選択される。低圧連系では200 Vといった低い電圧を扱い、高圧連系に対してインシヤルコストが低く、また各種手続やメンテナンスの簡易さの面で多くの利点がある。

しかしわが国は、低圧連系をする場合、交流発電機からの出力を電力系統へ直接連系することを禁止している。これは、一般的に交流発電機の応答が遅いため、系統故障時などの高速な停止や遮断が求められる場合の対応が難しいためである。

そこで同図(b)のように、インバータ(逆変換装置)と交流発電機を組み合わせて系統連系する方式が採用されている。以下に、インバータおよび、同期式と誘導式の2種類に大別される交流発電機の特徴を示す。

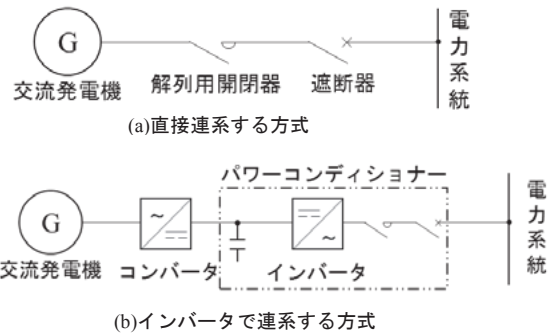


図1 発電機を用いた発電システムの構成

#### (1) インバータ

インバータは半導体バルブデバイスを使用することで、高速に停止や遮断が可能である。また、インバータの機能に系統連系に必要な解列用開閉器や、保護リレーなどの種々の機能を加えたものを、パワーコンディショナと呼ぶ。このシステムでは、交流発電機で発電した交流電力を、一旦、コンバータにより直流電力に変換し、パワーコンディショナで再び交流電力に戻し、連系している電力系統へ逆潮流させる。このような回路構成はBTB(Back to Back: 背中合わせ)方式と呼ばれ、風力発電設備や、電力系統における周波数変換所などでも用いられている。

#### (2) 同期発電機

同期発電機の一般的な機器構成を図2に示す。同期発電機は、外部から出力電圧の制御が可能である。そのため、系統連系時に力率調整ができることや、系統と連系せずに自立運転ができるといった特長がある。一方で、このように電圧を制御するためには、回転子の界磁巻線に、外部から直流電流を制御して供給する必要がある。そのため、界磁用に直流電源装置とAVR(自動電圧調整装置)が必要となる。加えてスリップリングとブラシを使用しているタイプの発電機では定期的な部品交換が必要である。また、部品点数が多いためシステムが複雑になる。

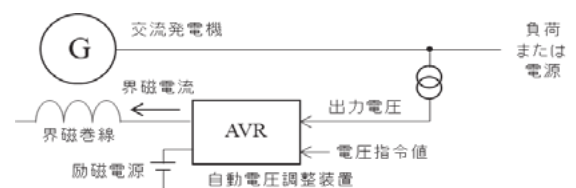


図2 同期発電機の機器構成

※ 電力事業部 電力システム部 パワエレG

### (3) 誘導発電機

誘導発電機は、同期発電機と比べて構造が簡単であり、小型、堅牢といった特長がある。また、同期発電機のような界磁用の装置が不要のため、システムを簡素化できるといった利点もある。

一方で、発電機の出力端子に接続した電源から励磁電流を供給する必要がある。そのため、電源の力率が低下することや、自立運転ができないといった問題がある。また、電源投入時には励磁突入電流が流れる。

誘導発電機の種類には、回転子の構造から、巻線形と、かご形がある。一般的には、かご形の誘導機が多く採用されている。かご形は、スリップリングやブラシが無く、構造が単純で安価なためである。

## 2.2 バイオマス発電における国内外の動向

国外は国内に比べ、バイオマス発電の普及が進んでいる。アジアやヨーロッパのバイオマス発電の例と、日本の現状と日本政府の目標を示す。

### (1) アジア

中国や東南アジアではバイオマス発電が広く行なわれており、無電化地域では貴重な安定電源として使用されている。バイオマス発電のうち、バイオガスを用いた発電のプロセス例を図3に示す。

- ① 残飯やふん尿などの有機物を、タンクに溜めて発酵させ、発生したガスをガスホルダに貯める。
- ② 貯めたガスを燃料にしてガスエンジンを回し、同期発電機を回転させる。
- ③ 同期発電機を自立運転させ、発電電力を利用する。



図3 東南アジアでのバイオガスを使った発電構成例

### (2) ヨーロッパ

バイオマス先進国のヨーロッパの発電プロセス例を図4に示す。

- ① 木質チップなどを高温加熱してガスを抽出する。
- ② ガスを燃料にしてガスエンジンを回し、誘導発電機を回転させる。
- ③ 誘導発電機を系統に直接連系して発電電力を売電する。

誘導発電機は、3相交流による回転磁界の回転速度よりも、回転子の回転速度が速くなると発電する。発電量は、ガスエンジンに供給されるガス量に応じて、エンジンの回転速度が変化することで決まる。そのため、同期発電機のようにエンジンの回転速度を調整する必要が無く、ガスを貯めるガスホルダを省略できる。

ヨーロッパでは、ガスの抽出装置、ガスエンジン、誘導発電機がパッケージングされ販売されている。これを用いて系統に連系し、容易にバイオマス発電ができるようになっており、バイオマス発電の早期普及の一翼を担っている。

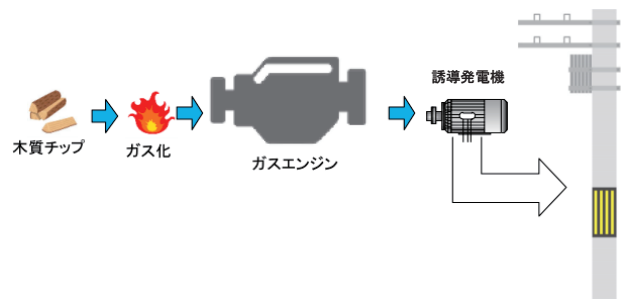


図4 ヨーロッパでのバイオガスを使った発電構成例

### (3) 日本

国外に対してわが国は、バイオマス発電の普及が進んでいない状況である。近年のわが国の電源構成について、エネルギーごとの年間発電量の比率<sup>(1)</sup>を図5に示す。この図の通り、2017年度時点のバイオマスは2%程度と、他のエネルギーに比べて低い水準にあることがわかる。

これに対して、資源エネルギー庁が発表している2030年度の電源構成比率では、全体の5%近くがバイオマス発電で賄う計画となっており、いまだ隔たりがある。したがって、バイオマス発電の早期普及、および周辺技術の発展が不可欠である。

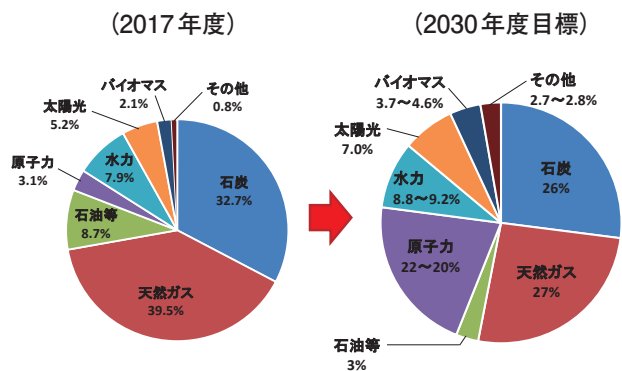


図5 わが国の電源構成

## 2.3 日本でのバイオマス発電の普及

国外で用いられている装置をわが国へ導入すれば、普及拡大が期待できる。しかし、売電事業に利用するには系統連系規程に準拠する必要がある。

アジア地域で用いられる同期発電機については、当社が2016年に開発した同期発電機用コンバータと、パワーコンディショナによる発電システムを構築することで、容易に系統連系が可能となる。

一方、ヨーロッパで普及している誘導発電機を用いる場合、50 kW未満の低圧連系は、インバータを介した系統連系とする必要がある。今回、当社が開発した本装置とパワーコンディショナを組み合わせることで、誘導発電機を用いたバイオマス発電の普及促進が期待できる。

## 3. 誘導発電機用コンバータ

### 3.1 概要

本装置の外観とシステム構成図を図6、7に示す。本装置の交流入力端子に、三相AC200 V、50 Hzまたは60 Hzの誘導発電機を接続し、直流出力端子には当社製のパワーコンディショナを接続して使用する。

発電機を回転させ、すべりを負としたとき、本装置は発電機から交流電力を受け取る。本装置は、発電機から受け取った交流電力を直流電力に変換し、パワーコンディショナへ供給する。パワーコンディショナを系統連系し、発電電力に応じた売電を行なう。

本装置の構成部品としては、半導体バルブデバイスにIGBTを用いている。また、サージ電圧や後述の軸電圧が発電機へ与えるストレスを抑制するため、ノーマルモードおよびコモンモードリアクトルを備えている。



図6 外観

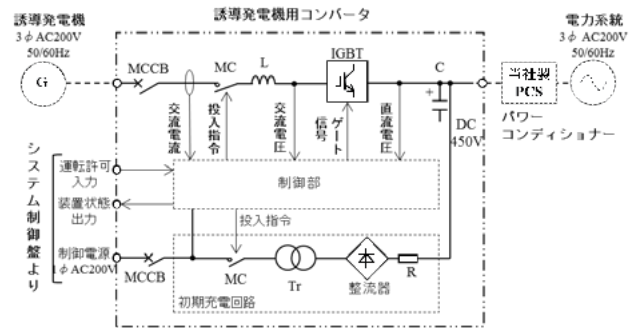


図7 システム構成図

### 3.2 課題と解決方法

これまで述べたように、誘導発電機は、同期発電機とは大きく異なる特徴を持つ。よって本装置の開発には、誘導発電機特有の課題があった。種々の課題と解決方法について次に説明する。

#### (1) 運転開始時の電源確保

同期発電機では、発電機の出力する交流電圧を整流することで運転開始時の直流電圧が用意できる。

誘導発電機は、交流電圧を与えなければ、電力を出力しない。本装置が運転開始時に交流電圧を出力するために、直流電圧を用意する必要がある。

そのため本装置には、制御電源を昇圧して全波整流し、その直流電力を電解コンデンサに充電する回路を搭載した。これにより充電して得た直流電圧を元に、運転を開始できる。

#### (2) 突入電流抑制

同期発電機用コンバータは、同期発電機からの電力を調整するために、交流電流の振幅や位相を制御している。電流を制御するので、突入電流は流れない。

誘導発電機は、電源投入時に励磁突入電流が流れる。この電流のピーク値は、定格電圧印加時に定格電流の数倍に達する<sup>(2)</sup>。

これを防ぐために、誘導発電機への交流電圧印加時に、電圧をゼロから徐々に昇圧するソフトスタート方式を採用した。これにより、電圧印可時の電流を定格電流以内に抑制できる。11 kWの誘導発電機で測定した波形を図8に示す。ソフトスタート方式により突入電流が抑制できていることがわかる。



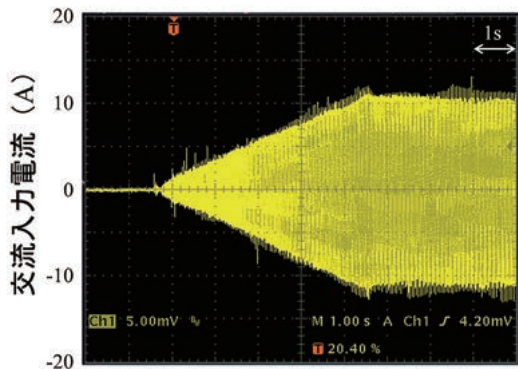


図8 突入電流抑制効果

### (3) 誘導発電機の軸電圧の抑制

本装置は、IGBTを3相フルブリッジ接続し、直流電圧を高周波PWM(Pulse Width Modulation)で変換した電圧を誘導発電機に印可する。この場合、誘導発電機の固定子巻線に共通モード電圧が印加される。PWMインバータは高周波でスイッチングするため、共通モード電圧も高周波である。誘導発電機の軸は、電気的に浮遊キャパシタンスを介して固定子巻線と結合している。そのため、大地に対し、軸に電圧(以下、軸-大地間電圧)が発生する。軸電圧に対する等価回路を図9に示す。

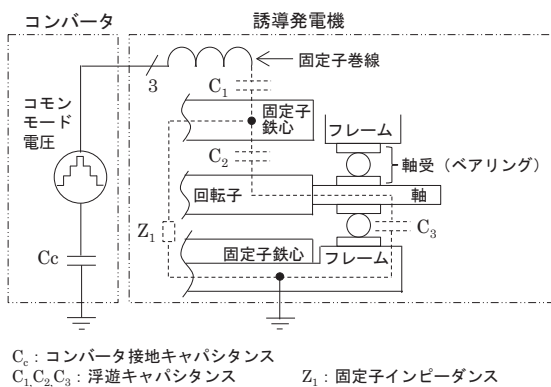


図9 軸電圧に対する等価回路

軸電圧が過大になると軸受が電食し、誘導発電機が故障に至る。軸-大地間電圧の大きさの指針としては、ピーク値で1.0V以下となっている<sup>(3)</sup>。本装置では、この数字を目標に対策を検討し、設計を行なった。

対策を検討するために、誘導発電機の浮遊キャパシタンスを測定および推定し、図9の等価回路の定数を求めた。その後、軸-大地間電圧を計算したところ、1.0Vを大幅に超える結果となった。これを低減するためには共通モードフィルタが有効である。図9から軸電圧は概略(1)式で求められる。

$$V_b \cong V_c \cdot \frac{R_1 \cdot X_3}{\sqrt{(X_1 + X_c)^2 + R_1^2} \cdot (X_2 + X_3)} \dots (1)$$

ただし、

- Vb : 軸電圧ピーク値
- Vc : コモンモード電圧ピーク値
- X1 : 固定子巻線-固定子鉄心間のリアクタンス
- X2 : 固定子鉄心-軸間のリアクタンス
- X3 : 軸-固定子間のリアクタンス
- R1 : 固定子鉄心-大地間の抵抗
- Xc : コンバータ-大地間のリアクタンス

この結果をもとに、共通モードフィルタの設計を行なった。これにより軸受の電食を抑制することができ、信頼性の高い発電システムとすることができる。

### (4) 部品配置

同期発電機用コンバータは電流を制御するため、力率1となるように電流制御する。これにより55kWの発電機に対し、55kVAの定格容量としていた。

一方、誘導発電機はコンバータが励磁電流も供給するため、有効電力だけでなく無効電力が必要となる。力率が悪化するため、本装置の交流入力側の定格容量は、同期発電機用コンバータよりも大きくする必要がある。容量を大きくすることで電流が増えるため、装置内で発生する損失が増加する。そのため、放熱能力も大きくする必要がある。

本装置では、大型化を防ぐために部品配置を十分に検討した。図10に示すように、主回路の電流経路を単純にすることで、電線の抵抗分を減らして損失を抑えている。また、通風の圧損を減少させることで冷却効果も高めている。

その結果、55kWの同期発電機用コンバータと同形状で、65kVAの装置容量を実現した。

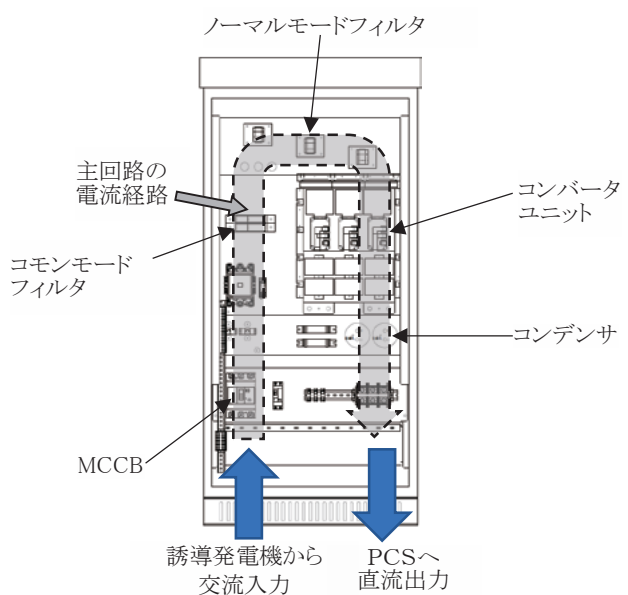


図10 概略部品配置

## 4. 仕様

本装置の仕様を表1に示す。本装置の定格容量は65 kVAである。定格力率を0.86としており、一般的な55 kW出力の誘導発電機と接続することができる。

表1 仕様一覧

項目	仕様
定格の種類	連続
定格容量	65 kVA
定格交流電圧	AC 200 V (*1)
定格交流周波数	50/60 Hz (*2)
定格力率	0.86 (*3)
交流側電気方式	三相3線式
定格直流電圧	DC 450 V
変換効率	95 % 以上(定格運転時)
制御電源	単相 AC 200 V ± 10 % 50/60 Hz
外形寸法	W800 × H1700 × D800 mm
質量	300 kg
使用周囲温度	-10 ~ 40 °C
設置場所	屋内または屋外

(\*1) 本装置が発電機に印加する電圧をこの値に制御する。

(\*2) 50 Hz、60 Hzのいずれかで使用する。

(\*3) 本装置からみて遅れ。

## 5. あとがき

今回、誘導発電機用コンバータを開発し、これまでの同期発電用コンバータに加えて、当社のバイオマス発電用系統連系機器の拡充を図った。

当社は、今後もバイオマス関連の既存製品の改良や大容量化および、発電に必要な他機器の開発を行なう。バイオマス発電用機器の開発を通じて、わが国の再生可能エネルギー分野の更なる発展に貢献していく所存である。

## 参考文献

- (1) 資源エネルギー庁総務課戦略企画室：「平成29年度(2017年度)におけるエネルギー需給実績(確報)」(平成31年4月)
- (2) 佐藤、志満、高橋、三瓶：「誘導発電機の系統並列時突入電流に関する考察」電学論D 111巻8号(平成3年)
- (3) 日本電機工業会資料：「一般用低圧三相かご形誘導電動機をインバータ駆動する場合の適用指針」JEM-TR169