

# 3,300 V IGBT モジュールを適用したマルチレベル方式風力発電システム

## 3,300 V IGBT Module for Multi-level Wind Power Generation Systems

五十嵐 征輝 Seiki Igarashi

西村 孝司 Takashi Nishimura

柴 建云 Jianyun Chai

風力発電システムは、種々の制約から洋上設置が主流となり、大容量化が進められている。富士電機では、中国の清華大学と共同でマルチレベル方式風力発電システムの研究を実施している。この方式は、発電機の2次巻線を多巻線として、コンバータモジュールを直列に接続して高電圧の出力電圧を得ることができる。3,300 V IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) モジュールを実規模機に適用した結果、低損失化・高放熱設計・高信頼性と長寿命化を実現できることが確認できた。このモジュールをマルチレベル方式風力発電システムに適用することで、大容量化が実現できる。

Due to various limitations that apply to terrestrial sites, there is a trend toward locating wind power generation systems mainly at sea, spurring the development of higher capacity systems. Fuji Electric is studying a multi-level wind power generation system in a joint research project with China's Tsinghua University. Under this method, the secondary winding of the generator has the multi-windings design and converter modules are connected in series to obtain high-voltage output. Application of 3,300 V IGBT (insulated gate bipolar transistor) modules in a full-scale system showed that it was possible to realize low loss, high heat dissipation, high reliability, and long system life. Application of this module to multi-level wind power generation systems can enable higher capacity output.

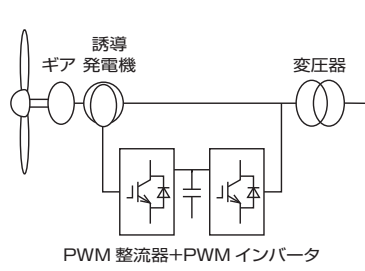
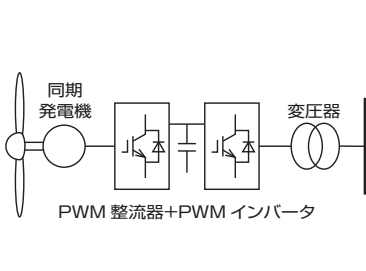
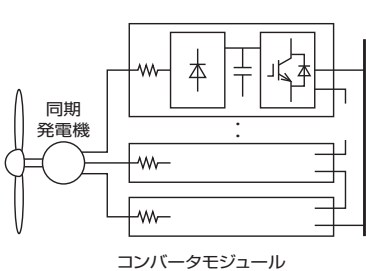
### 1 まえがき

地球温暖化対策でのCO<sub>2</sub>削減や、東日本大震災における福島第一原子力発電所の事故による原子力発電の見直しに対する社会的情勢から、風力発電や太陽光発電など再生可能エネルギーへの期待が強まっている。

風力発電システムは、設置場所の制約から洋上風力発電システムが主流となり、大容量化が進められている<sup>(1)</sup>。洋上風力発電システムの場合、発電場所と需要場所が離れていることなどから、高電圧システムとすることで送電

損失の低減を図る必要がある。現在、風力発電システムは、AC690 V の発電機電圧を電力変換器で電力システムに連系するための周波数に変換し、それを AC3.3 kV、AC6 kV などの高電圧に変圧器で昇圧するシステムが一般的である。富士電機では、中国清華大学と共同で、昇圧変圧器を使用することなく変換器でダイレクトにシステムに連系するシステムの研究を行っている<sup>(2)</sup>。本稿では、3,300 V IGBT モジュールを適用したマルチレベル方式風力発電システムを紹介する。

表1 風力発電システム

導入時期	1997年～	2010年(本格導入)～	2013年～
回路方式	ダブルフェッド	ダイレクトドライブ	ダイレクトドライブ+マルチレベル
回路構成	 <p>誘導ギア発電機 変圧器 PWM整流器+PWMインバータ</p>	 <p>同期発電機 PWM整流器+PWMインバータ 変圧器</p>	 <p>同期発電機 コンバータモジュール</p>
効率	89%	90%	93%
装置コスト	100%	98～100%	90～95%
電力品質	低	高	高
ギアボックス	要	不要	不要
昇圧変圧器	要	要	不要
発電機	誘導機	同期機	多巻線同期機
変換器容量	15～30%	100%	100%
適用デバイス	1,700 V/450～1,000 A	1,700 V/1,000～3,600 A	3,300 V/150～400 A

② マルチレベル方式風力発電システム

表1に、風力発電システムの技術動向を示す。現在導入されている風力発電システムの70%が、ダブルフェッド方式である。ダブルフェッド方式では、誘導発電機の界磁巻線をPWM整流器-PWMインバータの変換回路で制御する。誘導発電機の電圧はAC690Vと低いので、昇圧変圧器を介して高電圧の系統に連系する。ただ、この方式は誘導発電機周波数をある一定の範囲にするため、ギアボックスが必要である。ギアは、メカニカルなストレスが大きく故障しやすいなどの問題があり、ギアボックスが不要な同期発電機を使用したダイレクトドライブ方式の研究が盛んである。ダイレクトドライブ方式は、同期発電機の実出力電圧をPWM整流器で一定の直流電圧に変換し、PWMインバータで系統に連系するシステムである。また、この同期発電機もAC690Vで構成されるため、高電圧の系統には昇圧変圧器を介して連系する。さらに、昇圧変圧器を用いず、ダイレクトに系統に連系する方式が、装置の小型化、

高効率化のため研究されている。

図1に、清華大学と共同研究をしている風力用マルチレベル方式の回路構成を示す。発電機の2次巻線を多巻線として、コンバータモジュールを直列に接続して高電圧の出力電圧を得る。AC3.3kVの系統にはAC970Vのコンバータモジュールを2直列接続で、AC6kVの系統にはAC1,180Vのコンバータモジュールを3直列接続で、AC10kVの系統にはAC1,180Vのコンバータモジュールを5直列接続で構成できる。

図2に、整流回路部の回路構成を示す。コンバータ回路は、昇圧チョップパ回路方式のPFC (Power Factor Correction) 回路と、単相インバータから構成する。PFC回路は、位相を90°シフトした2次巻線を並列に構成する。

エンコーダより、発電機の出力電圧の位相を検出して、各2次巻線の出力電流指令を作成し、昇圧チョップパ回路入力電流がおのこの電流指令になるように制御する。

図3に、単相インバータの制御ブロック図を示す。有効電力Pと無効電力Qを独立に制御できるように、系統への出力電力をdq変換して制御する。

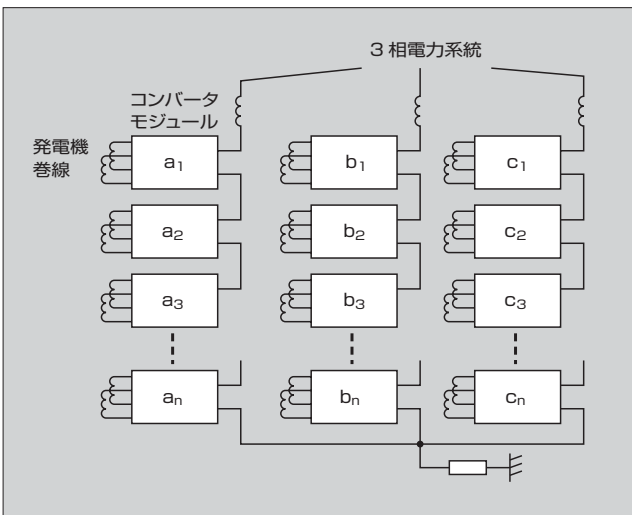


図1 風力用マルチレベル方式の回路構成

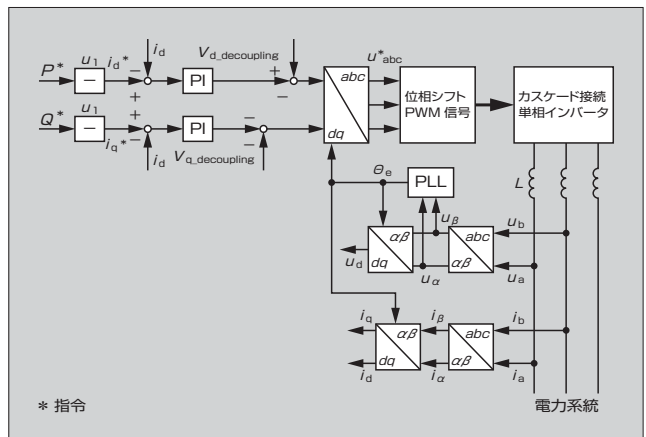


図3 単相インバータの制御ブロック図

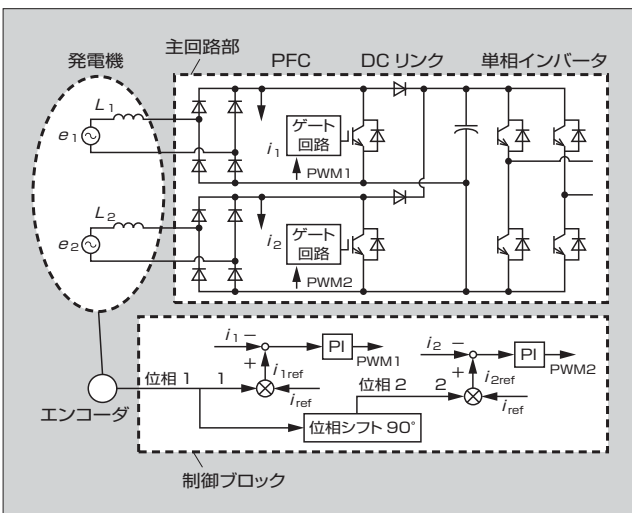


図2 整流回路部

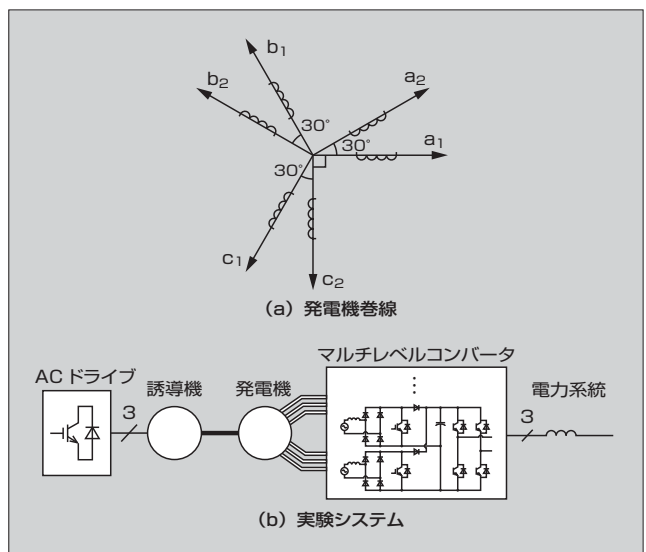


図4 実験システム

3 実験回路と実験結果

図4に、機能検証用の3kW ミニモデルの実験システムを示す。発電機巻線は、6線の絶縁した巻線で構成した。(a1, c2), (b1, a2), (c1, b2)が、90°位相シフトされている。

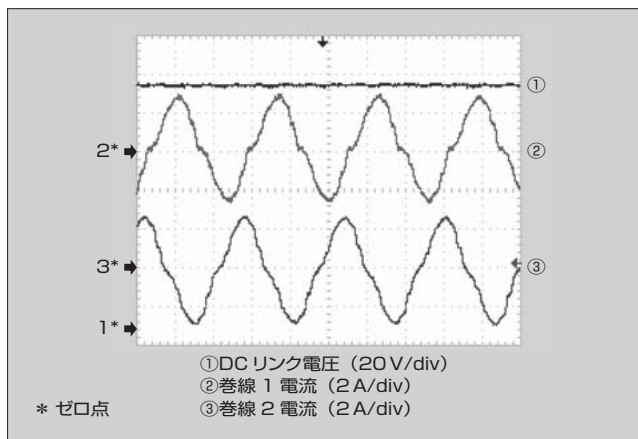


図5 整流器部実験波形

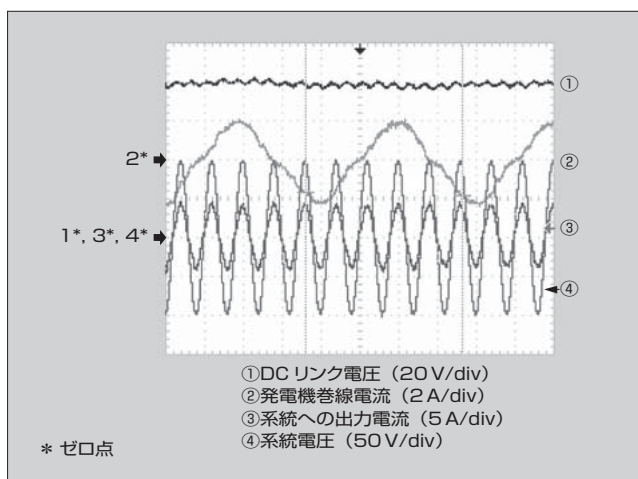


図6 単相インバータ部実験波形

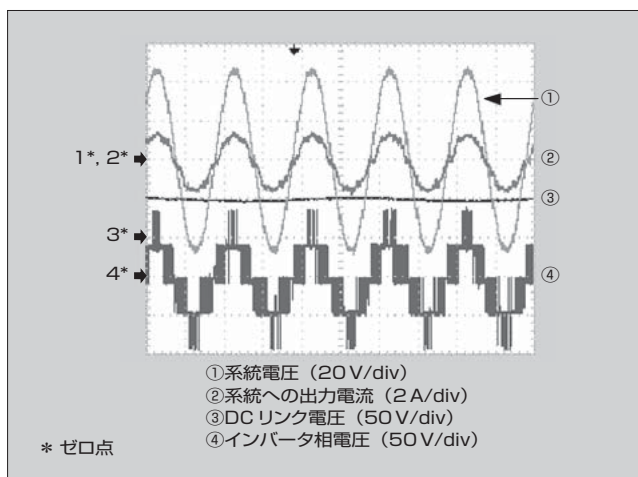


図7 三相インバータ部実験波形

コンバータモジュールは2直列接続にしている。発電機は、ACドライブ回路で速度制御した誘導機を用いて運転する。

図5に、PFC回路の入力電流とDCリンク電圧を示す。正弦波の電流が位相90°にシフトした電流を入力する。また、DCリンク電圧は一定に制御する。

図6に、単相インバータの実験波形を示す。発電機巻線電流、系統への出力電流がともに正弦波状の低ひずみの電流となっている。また、DCリンク電圧もほぼ一定の直流電圧に制御している。

図7に、三相インバータ部の実験波形を示す。インバータ部の相電圧は、カスケード接続したコンバータモジュールにより3レベルの電圧が出力し、高調波含有の少ない電圧が得られる。したがって、連系リアクトルは小さなものでも出力電流は正弦にできることが分かる。

4 実規模機と適用 IGBT モジュール

図8に、AC6kV 系統の系統に連系する3MW 風力発電システムを構成したときの主回路構成を示す。これは、図1で示した回路構成を基本としたものである。発電機2次巻線電圧をAC1,180Vとし、コンバータモジュールの出力電圧をAC1,180Vとすることで、コンバータモジュールを3直列にカスケード接続して、AC6kV 系統に連系す

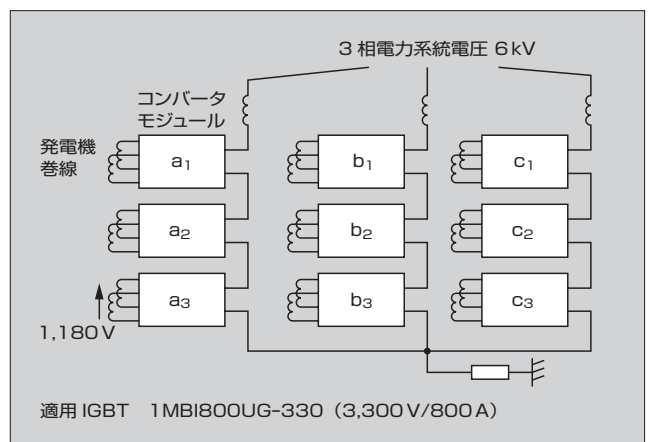


図8 系統電圧 6kV 3MW 風力発電システム

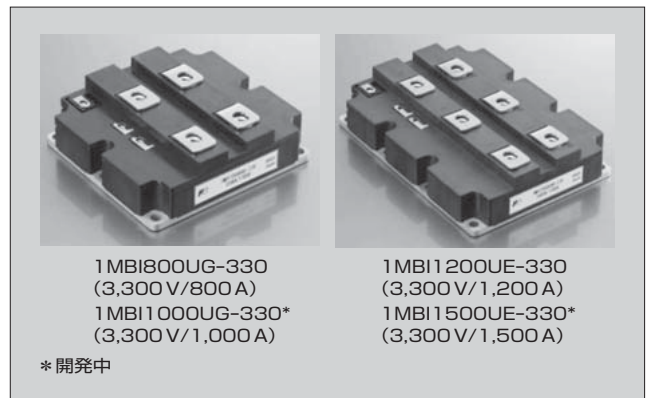


図9 3,300V IGBT モジュール

る。

また、このときにコンバータモジュールの出力電流は、実効値 320 A でピーク電流 450 A となる。この方式の場合、5 レベルの出力電圧となるため、キャリア周波数は 1 kHz でも高調波含有率が十分に小さい出力波形となる。したがって、コンバータモジュールのインバータ部の IGBT モジュールは 3,300 V/800 A IGBT で構成できる。また、PFC コンバータ部も 90° シフトした 2 次巻線を 2 並列で制御するため、インバータと同じ電流容量の 3,300 V/800 A IGBT モジュールで構成できる。

図 9 に、富士電機の 3,300 V IGBT モジュールの外観を示す。定格は、3,300 V/800 A, 1,000 A, 1,200 A, 1,500 A の 4 種類である。この 3,300 V IGBT モジュールは次の特徴がある。

- (a) IGBT チップにトレンチゲートフィールドストップ構造を適用して低損失化を達成
- (b) 熱伝導率の高い絶縁基板 AlN-DBC を適用して高放熱設計を実現
- (c) 600 を超える CTI (Comparative Tracking Index) の非トラッキング性樹脂と高い温度サイクル耐量を持つ AISiC ベースを適用して高信頼性・長寿命化を実現

したがって、風力発電システムのように、高効率、長寿命が要求される装置に適用する IGBT としては、最適な IGBT モジュールであることが分かる。また、図 8 に示すように、3 MW の発電システムが 3,300 V/800 A の IGBT モジュールで構成できるため、3,300 V/1,500 A の IGBT モジュールであれば、6 MW クラスの発電システムが容易に構成できる。

現在、風力発電システムは、洋上風力発電のように 3 MW から 5 MW と大容量化が進められているため、その動向からも、3,300 V IGBT モジュールを用いたマルチレベル方式風力発電システムが適していることが分かる。

## 5 あとがき

マルチレベル方式風力発電システムは、発電機の 2 次巻線を多巻線として、コンバータモジュールを直列に接続して高電圧の出力電圧を得る方式で、昇圧用変圧器が省略で

き、連系リアクトルが小型になるという特徴がある。また、3,300 V IGBT の適用により、さらに低損失・高信頼のシステムが構成できる。

富士電機では、マルチレベル方式風力発電システムのほかにも、これに似た新システムの開発を産学共同で進めている。また、新システムに適した半導体デバイスの開発も同時に進めている。変換回路と半導体デバイスの開発と製品化を通して、新エネルギーの普及を図り新しいエネルギーシステムの構築に貢献していく所存である。

## 参考文献

- (1) Ambo, T. et al. "Power Electronics for Large Scale Wind Power Generation," IEEJ Journal. 2009, vol.129, no.5, p.291-294.
- (2) Xibo Yuan, et al. "A modular direct-drive permanent magnet wind generator system eliminating the grid-side transformer". EPE2009.
- (3) Yamamoto, T. et al. "High-Power IGBT Modules with high reliable performance" PCIM china. 2009.



### 五十嵐 征輝

IGBT などのパワー半導体の適用技術の開発に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部松本工場技術統括部応用技術部長。電気学会上級会員。工学博士。



### 西村 孝司

パワー半導体デバイスの開発に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部松本工場技術統括部モジュール技術部チームリーダー。



### 柴 建云

Professor, Department of Electrical Engineering Tsinghua University.



\*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する  
商標または登録商標である場合があります。