

風力発電用のパワーコンディショナおよびコンバータにおける回路・制御技術

The Circuit and Control Technology in the Power Conditioner and Converter for Wind Turbine Systems

梅沢 一喜 UMEZAWA Kazuyoshi

上原 深志 UEHARA Fukashi

山田 歳也 YAMADA Toshiya

風力発電は、風速の変動による発電変動があるため系統電圧に影響を与える。風力発電を大量に導入するために、系統における電源品質が要求されている。発電変動を補償するものとして、電力安定化用パワーコンディショナ（PCS）がある。これに AT-NPC 3 レベル変換回路を使用して IGBT 素子のスイッチング損失を大幅に低減するとともに、高調波成分の半減により業界最高効率 98.1% を達成した。また、落雷などの系統電圧低下時においても解列しないで運転継続を行う FRT（Fault Ride Through）機能を組み込み、系統連系が可能な電源品質を実現した。

Because the generating power of wind turbines fluctuates according to changes in wind speed, this affects system voltage. To enable large-scale implementation of wind turbines, power system supply quality is demanded. Power conditioning subsystems are available for stabilizing power as a means to compensate for fluctuations in power supply. Using an AT-NPC 3-level conversion circuit, we have greatly reduced switching loss in IGBT devices and also, by halving harmonic components, we have reached 98.1% efficiency, the highest in the industry. Moreover, we have achieved power supply quality sufficient for grid connection by incorporating a fault ride through function so that the system continues to operate without disconnecting even if there is a drop in system voltage due to lightning strike or other causes.

1 まえがき

2012年7月から始まった「再生可能エネルギーの固定価格買取制度」によって、再生可能エネルギーの導入が加速されようとしている。これまで風力発電は、陸上風力が主体であったが、発電効率を向上するための大容量化や、設置場所の選定に制約が少なく、かつ風況が安定していることから洋上風力発電の開発が加速している。今後の風力発電の大量導入に際して、電力品質向上は必須となってきている。そこで、風力発電の発電変動を緩和し、電力品質に貢献するパワーコンディショナ（PCS）および風力発電用のコンバータにおける回路技術と制御技術について述べる。

このシステムは、同期発電機に接続した AC/DC コンバータで風力発電機の出力を直流に変換し、さらに DC/AC コンバータで交流に変換して系統に連系し、電力を供給する方式である。風力発電では電力は風速の3乗に比例するので、わずかな風速変動が大きな電力変動となる。今後、風力発電の導入量が増加した場合には、電力系統の電圧変動や周波数変動を誘発し、電力品質の低下を招く懸念が指摘されている。これを補償するものとして、電力安定化用 PCS がある。電力貯蔵部には、鉛蓄電池やリチウムイオン電池などを用途に応じて選定する。DC/AC コンバータで電力貯蔵部の充電・放電を制御して、風力発電による電力変動を安定化させている。

2 電力安定化用 PCS

2.1 蓄電池併設型風力発電システムの構成

蓄電池併設型風力発電システムの基本構成を図1に示す。

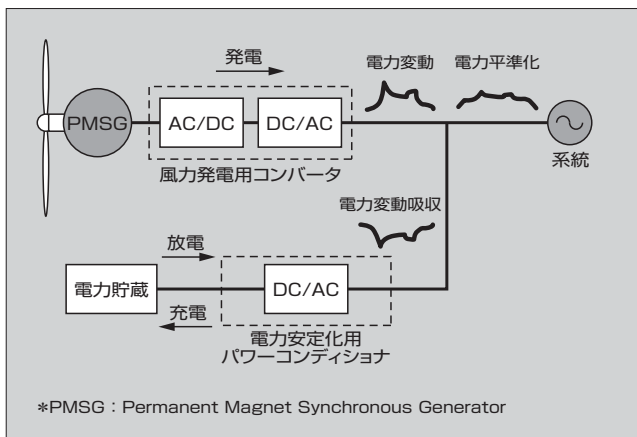


図1 蓄電池併設型風力発電システムの基本構成

2.2 電力安定化用 PCS 「PVI750-3/500」

電力安定化用 PCS 「PVI750-3/500」の外観を図2に示す。



図2 「PVI750-3/500」

(1) システム構成

PVI750-3/500は、2台の250kWインバータから構成される(図3)。蓄電池モジュールの交換・メンテナンスを個別にできるようにするため、二つの直流入力ブレーカの二次側を一つの直流リンクに接続している。起動時は、各インバータが系統と同期した電圧を出力した状態でコンタクトをオンして系統に連系するため、系統への突流を発生することなく起動を完了できる。

インバータのパワーユニットは、AT-NPC (Advanced T-type Neutral-Point-Clamped) 3レベルIGBTモジュール、ヒューズおよびLCLフィルタで構成している(図4)。3レベル回路は1980年代に既に提案されていたが、IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) 素子の耐圧を上げることができないため普及していなかった。しかし、素子の直列が不要なインバータにおいては、出力電流の素子通過数を低減できるので導通損失を低減できるというメリットがある。

富士電機は、逆耐圧が必要となる直流中間と交流出力を接続するスイッチに、RB-IGBT (Reverse-Blocking IGBT)を適用したAT-NPC 3レベルIGBTモジュールを実用化した。これにより、従来の2レベルインバータと同じモジュール数で3レベルインバータを構成し、回路を複雑化することなく、高効率なインバータを実現した。

(2) 仕様

表1に、PVI750-3/500の仕様を示す。直流電圧範囲は、低圧での工事が可能なDC750Vに対応し、PCSが出力する交流電圧は200Vとなっている。また、効率カーブ

表1 「PVI750-3/500」の仕様

項目	仕様
容量	500kVA
直流電圧範囲	310~750V
最大入力電流	1,600A
交流電圧	200V (-10~+10%)
周波数	50/60Hz
力率	0.99
高調波ひずみ率	5%以下
最高効率*	98.10%
欧州効率*	97.80%
内部電源容量最大値	900W
待機損失	130W

*IEC-61683効率裕度表示、内部電源含まず

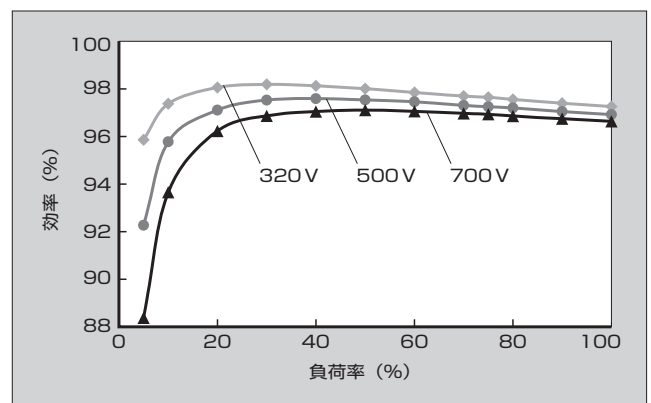


図5 効率カーブ

を図5に示す。AT-NPC 3レベルIGBTモジュールを適用した変換回路により、パワーユニットのスイッチング損失を大幅に低減した。さらに、インバータが出力するPWM (Pulse Width Modulation) 波形に含まれる高調波成分を従来品に比べて半減させたことによって、フィルタ損失が低減し、業界最高効率98.1% (IEC-61683 効率裕度、内部電源含まず) を達成した。

(3) 特性 (FRT性能とインバータ制御方式)

PVI750-3/500には、新エネルギー用電源に必須の機能となりつつあるFRT (Fault Ride Through) 機能を標準で搭載した。FRT機能は、系統での三相短絡や二相短絡の事故においても、インバータは規定範囲内 (各国において要求される瞬低の時間と電圧低下範囲) で三相電流を出力し、系統の電源変動を抑制させるように動作して運転を継続するものである。このFRT機能は、欧州および米国では義務化され、日本においても2013年度以降に導入する機器に義務化されている。また、FRT機能として要求される残存電圧と継続時間は、国ごとで異なっている。そこで、残存電圧0%でも運転継続を可能とするため、制御電源は、外部供給または系統からの自己供給を選択できるようにした。1秒以内の瞬断は内部のコンデンサでバックアップし、1秒を超えるFRTの継続時間の場合はオプション対応とすることで、コストと要求仕様の両立を実現した。

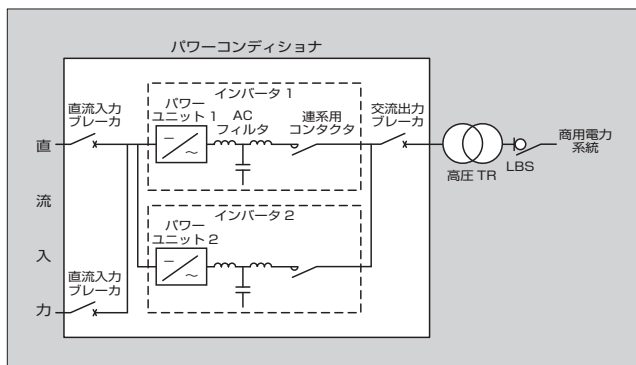


図3 「PVI750-3/500」のシステム構成

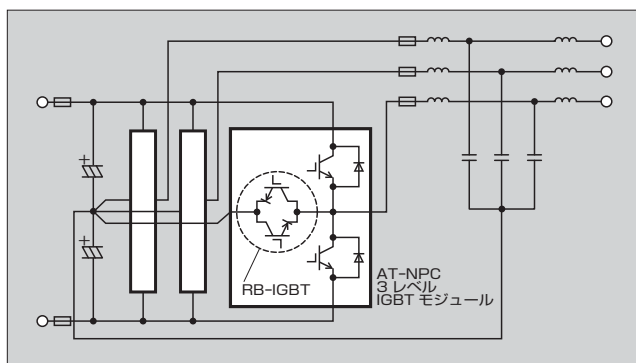


図4 パワーユニットおよびフィルタ回路

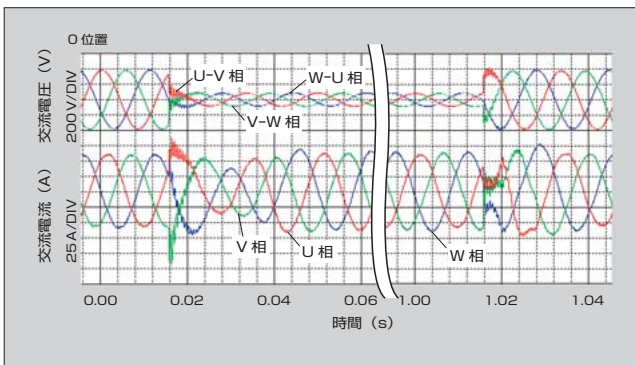


図6 FRT機能の動作検証波形

FRT機能の動作検証を制御検証機(10kW)で行った。残存電圧0%では常時ゲートロック状態とし、0A制御を行うことによって運転を継続させる。残存電圧20%時は、図6に示すように、瞬低発生から6ms後には断続的なゲートロックが発生しなくなり、約2サイクル後には定格電流を出力できていることを確認した。このように、瞬低発生時にPCSは運転を継続できることを確認した。

3 風力発電用コンバータ

図7に、風力発電機が多巻きの場合の構成を示す。1,500kVAのコンバータ盤が2台、並列に接続されている。

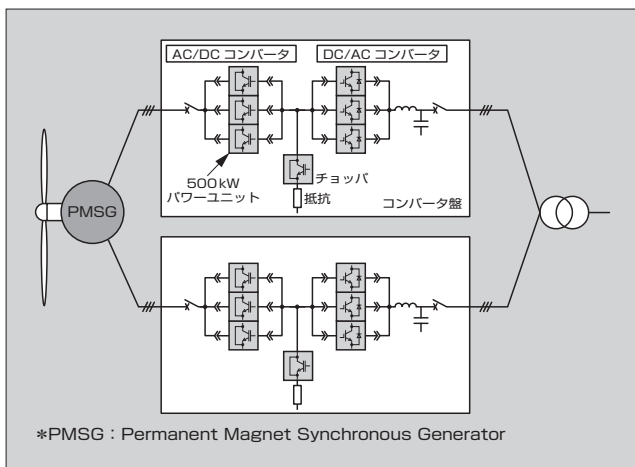


図7 風力発電装置(同期発電機)

表2 風力発電用コンバータの仕様

項目	仕様
容量	1,500kVA×2 (3,000kVA)
定格有効電力	1,350kW
定格無効電力	650kVar
定格電圧	690V
定格電流	1,255A
周波数	50/60Hz
力率	0.99
高調波歪率	5%以下
最高効率	97.20%

コンバータ盤は、500kVAの水冷パワーユニットとして3並列のDC/ACコンバータ、チョッパおよびエネルギー消費用抵抗で構成される。このチョッパは、系統異常時などに直流中間電圧が上昇しないようにDC/ACコンバータを制御するためのものである。水冷パワーユニットはプラグイン構造で3並列、コンバータ盤は2並列のため、保守性が向上し、故障時には健全部での運転が可能であり、稼働率を向上させている。表2に風力発電用コンバータの仕様を示す。

3.1 水冷パワーユニット

富士電機製のIGBT「6MBI450V-170-50」を使用した水冷パワーユニットは、水冷ヒートシンク、直流中間用フィルムコンデンサ、ラジエータファン、ゲートドライブ、保護監視回路などから構成されている。このパワーユニットは、プラグイン構造を採用することにより、メンテナンス性を向上させており、かつ故障したパワーユニットを間引きして運転することができる。これを実現するために、パワーユニットをプラグインした前後でインピーダンスが一定になるように、ラミネートブスバーと共通モードコアを組み合わせた。これにより、各パワーユニット間の電流の釣り合いが取れて、横流が5%以下になった。そのため、必要に応じて、どの位置のパワーユニットを外しても運転を継続することが可能になった。図8に、水冷パワーユニットとコンバータ盤の外観を示す。

制御装置とパワーユニット間は光ファイバーで接続され、制御装置からのゲート信号、パワーユニットからの故障情報を通信している。また、自己監視機能としてアーム短絡保護、素子温度異常、ユニット内温度異常、過電流保護、ゲート電圧異常、クロック異常を検出し、異常判定保護と同時に情報を制御装置に送信する。

3.2 ラジエータによる盤内気流循環冷却

風力発電に適用するコンバータ盤は、洋上などの環境に

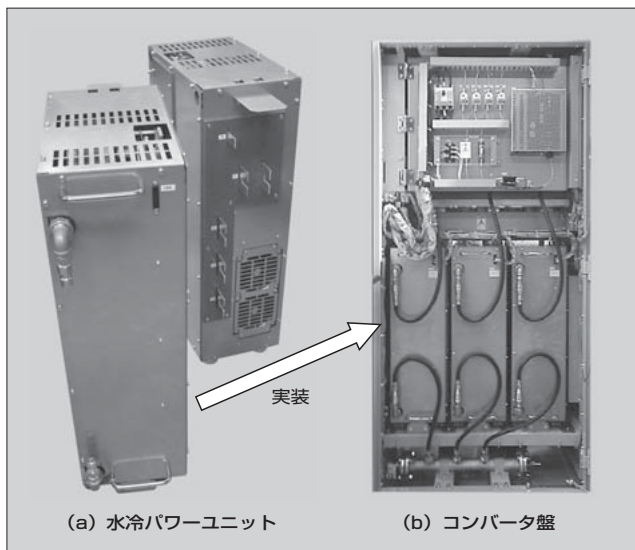


図8 水冷パワーユニット(500kVA)

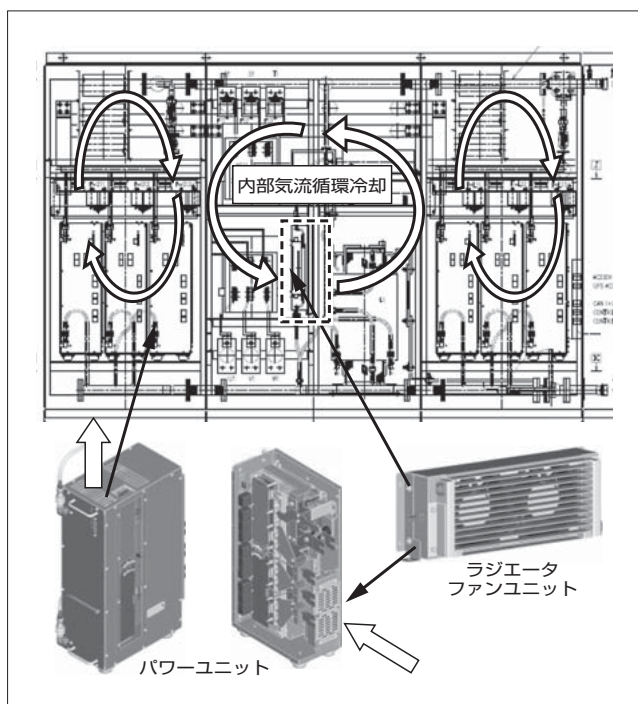


図9 ラジエータによる内部気流循環冷却

耐えるように^{〈注1〉}IP54に適合させ、盤は外気を取り込まず気密を保つ構造となっている。そのため、冷却は図9に示すように、ラジエータファンユニットをパワーユニットに実装し、かつフィルタ用リアクトルの近傍に配備して、ファンによる強制気流循環で盤内を冷却している。

3.3 システム並列

今後の風力発電容量の増加に伴い、予想される電力影響度の増大を抑えることおよび稼働率向上の要求がある。図7のように、二つのコンバータ盤が発電機に対して並列に運転することで、どちらかが故障停止しても健全なコンバータからトルク低減要請指令を送信する。これにより、風力発電機ブレードのピッチ制御で容量を低減させた運転を行うことで、健全なコンバータの許容量内での運転継続可能なシステムを実現できる。

3.4 系統電圧安定制御

風力発電の電力の変動によって系統電圧の変動が発生する。この対策のために、次の2種類の無効電力制御機能を装備して補償性能の向上を図っている。

(a) 力率一定指令による無効電力制御

あらかじめ設定された力率になるように無効電力を供給することで、系統電圧への影響を制限させる場合に適用する。特に、電力系統の電圧や力率を制御するシステムコントローラは不要である。

(b) システムコントローラからの指令による制御

システムコントローラから、各風力発電装置に指令を送信する。系統連系点の電圧を確実に制御する場合に適用する。

これにより、SVC (Static Var Compensator) などの設

備を用意しなくても系統電圧を許容範囲内に制御できる。

3.5 FRT 機能

系統連系システムにおいて、太陽光発電や風力発電などの発電容量が増加して重要度が増した場合、落雷や系統事故^{〈注2〉}によって系統電圧が低下してこれらが一齐に解列してしまうと、系統の電力が不足し停電に陥る危険性が高まる。これを回避するための機能が2.2節で述べたPCSと同様のFRT機能であり、系統擾乱(じょうらん)においても運転を継続することができる。

系統事故には三相短絡や二相短絡などさまざまな現象がある。この時、系統三相電圧の不平衡や位相跳躍が発生する。この現象に対して過負荷トリップを行うことなくコンバータを制御できることが重要である。系統のいかなる変化にも高速に追従し、安定した運転を継続するための技術には次の三つがある。

- (a) 系統電圧が低下して発電電力を系統に出力できなくなった場合、装置内のチョッパと抵抗で電力を消費する。
- (b) 系統電圧の急変に追従するために、コンバータの系統電圧検出処理でバンドパスフィルタと位相を調整した正弦波とからコンバータの基本電圧指令を作成し、波形応答性を向上させる。
- (c) 系統残電圧0%からの起動時において、波形ひずみを低減し、安定した制御を行うために、系統電圧から生成した第3高調波波形と制御装置内部にあるPWMキャリアに同期した第3高調波テーブルデータを同期制御する(図10)。

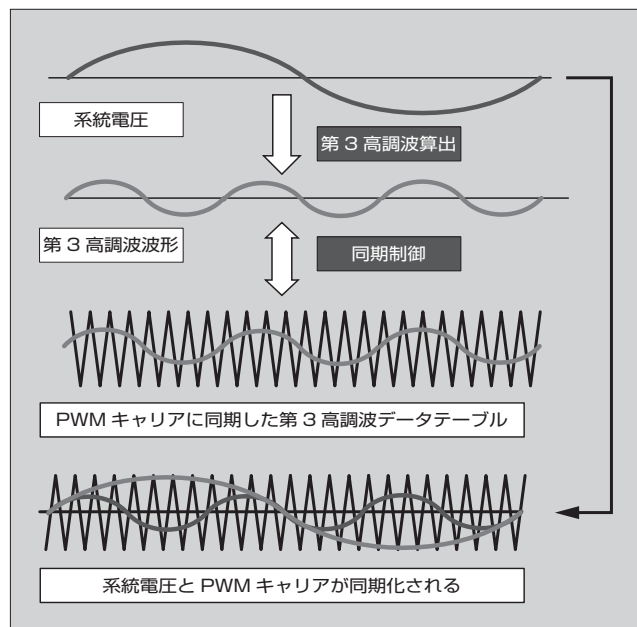


図10 系統電圧とPWMキャリアの同期

〈注1〉 IP54: IEC60529 で定めた防塵性能・防水性能に関する保護等級

〈注2〉 解列: 電力系統から発電設備などを切り離すこと

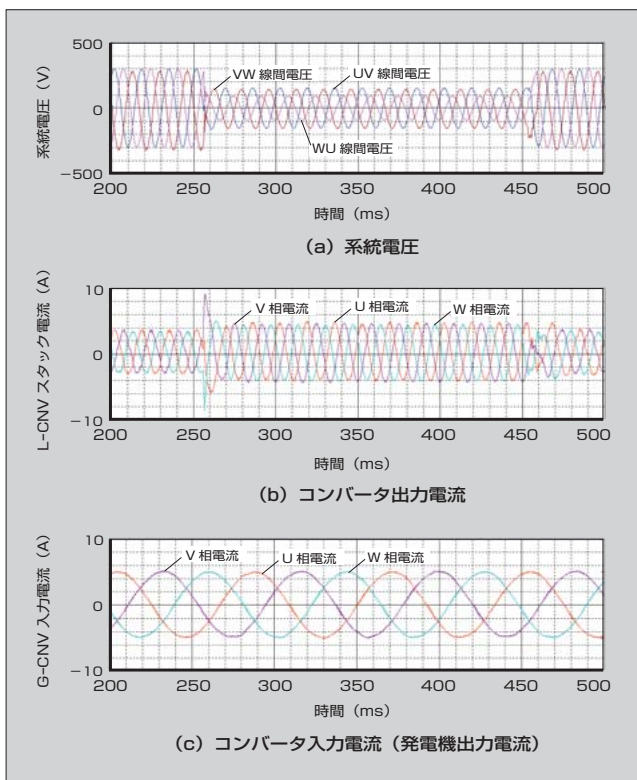


図 11 制御検証機によるFRT 動作特性

これらにより、PWM キャリアを基本波に 0.1 秒程度で同期させることが可能になった。図 11 に、制御検証用試験機 (3kW) で実施した FRT 動作特性を示す。系統異常時に出力電流、入力電流ともに安定した運転を実現した。

4 あとがき

風力発電用のパワーコンディショナおよびコンバータにおける回路・制御技術について述べた。今後、風力発電システムの大量導入に向けて、よりいっそうの技術開発を進め、耐環境性、電力高品質、高効率化、運転継続による稼働率向上、電源擾乱抑制などに向けた制御技術および電力変換回路技術を実現させていく所存である。

参考文献

- (1) Nakazawa, H. et al. “Hybrid isolation process with deep diffusion and V-groove for reverse blocking IGBTs”. ISPSD, 2011.
- (2) Yatsu, M. et al. “A Study of High Efficiency UPS Using Advanced Three-level Topology”. PCIM Europe Conference, 2010.



梅沢 一喜

無停電電源装置、PCS、風力発電用コンバータの開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部製品技術研究所パワエレ技術開発センター製品技術開発部マネージャー。電気学会会員。



上原 深志

産業用可変速装置、風力発電用コンバータの開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部製品技術研究所パワエレ技術開発センター製品技術開発部課長補佐。



山田 歳也

無停電電源装置、PCSの開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部製品技術研究所パワエレ技術開発センター製品技術開発部。





*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。