

## 風力発電用電力変換装置の開発

Development of Electric Power Converter for Wind Power Generation

日比野 由貴夫\*

Yukio Hibino

## 要旨

風力発電はクリーンで無尽蔵なエネルギー源として、近年地球環境問題の高まりとともに太陽光発電や燃料電池発電等と同様に新エネルギー発電の一翼を担うものであり、海外では既に商用ベースで電力の一部を供給している状況にある。本稿ではプロペラ型風車を原動機とする発電装置として近年産業、民生両分野において多方面で活用されているインバータの技術を応用することにより変動する風力エネルギーを安定した電力として利用できるようにすると同時に効率良くエネルギーを取得することを狙いとして開発された電力変換装置についてその概要、制御方式及び試験データ等について報告する。

## Abstract

Like solare power generation and fuel cell generation, the wind power generation which is considered to be a clean, inexhaustible energy source serves as one of the new power generation systems to meet the current situation where the global environmental problem is drawing greater attention, and in overseas countries, it supplies some of the electric power on a commercial basis.

Inverter technology has recently found many applications in the industry and consumer fields and is used for the generator driven by the propeller type wind mill.

The inverter technology is utilized in a power converter which has been developed to use varying wind energy as a stable electric power source and to acquire energy efficiently. This paper describes the outline and control system of the power converter and shows the test data for it.

## 1 はじめに

図1は現状商用機として多用されている風力発電システムの概要である。自然風によって変動する電力と負荷が要求する電力との過不足分を商用電源が補完するものであり、系統連系システムという。(商用電源を一般に系統という。) 図2に発電の原理を示す。この方式は発電機として汎用のカゴ型誘導電動機を用い、その回転子が風車によって駆動されるとその回転数に相当する周波数と系統の周波数との差(スベリ周波数)に比例して電力が系統に逆流(回生)する特性を利用したものであり、非常にシンプルな構成であることが特長である反面、次のような問題点が有る。

- ①スベリ周波数は通常系統周波数の数%以下であるので、風車はほぼ一定回転数で運転される。そのため翼の周速と風速との比が変化し、最大効率を維持できない。(翼の性能を最大限に引

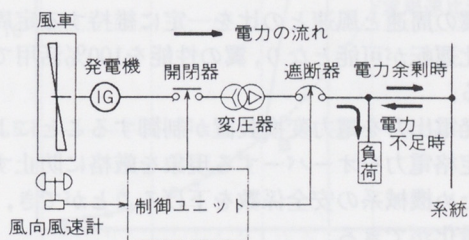


図1 一般的な風力発電システム

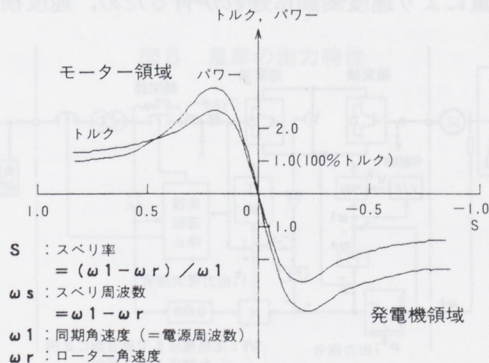


図2 誘導発電機原理図

\* 技術本部 制御技術部



- きだせない。)
- ②数%のスベリで定格電力に達するため、定格を越える風速に対し、定格電力を大幅にオーバーしてしまう。またそれによるピーク荷重の繰り返し回数が多く、主軸、増速機等の安全係数を大きくとる必要が有り、重量が増える。
  - ③風速の急変を遅らせる要素が無く、風速の変動に伴う電圧変動によるフリッカー（照明機器のちらつき）が生ずる場合が有る。
  - ④連系する系統が停電した場合、受電設備の進相コンデンサーや対地静電容量による誘導電動機の自己励磁現象によって単独で発電を継続する場合が有り保安上の問題が残る。（この現象は海外では通常問題にされない。）
- これらの諸問題を改善することを狙いとして本装置を開発した。

表 1 風力発電装置仕様諸元

風 車	種 類 出 力 回転数 調速機の種類 タワー形式 ローター外径 ブレード枚数 ローター取付高	ダウンウィンド式プロペラ型風車 21.5KW 81rpm メカニカルガバナ方式、ピッチ変換 モノポール起倒式 15 m 2 枚 14.7 m
発電機	種 類 容 量 電 圧 相 数 周波数 回転数	カゴ型誘導発電機 18.5KW 220 V 3 60Hz 1800rpm
順変換装置	種 類 入力電圧 出力電圧 定格周波数 周波数 最大入力	トランジスタPWM 自励式コンバータ AC 220V DC 310V 60Hz 22.5～112.5Hz 23KW
逆変換装置	種 類 入力電圧 出力電圧 周波数 相 数 定格出力 最大出力 力 率	トランジスタPWM 他制自励式インバータ DC 310V AC 170V 60Hz 3 16.5KW 20.4KW 0.95以上

2 システムの概要

- 図3にヤマハ風力発電システムの概要、表1に仕様を示す。一般的な方式との違いは誘導発電機と系統との間に二種類の半導体電力変換装置を設け、一方を順変換（交流／直流）装置、他方を逆変換（直流／交流）装置として機能させることにより、風車を広範囲に可変速運転可能としたことであり、これにより次のような特長を持つ。
- ①翼の周速と風速との比を一定に維持する定周速比運転が可能となり、翼の性能を100%活用できる。
  - ②発電出力を電力変換装置が制御することにより定格電力をオーバーする現象を厳格に防止するため機械系の安全係数を下げることができ、軽量化ができる。
  - ③風速の変動に対し風車のローターはその慣性質量により速度変動に遅れが有るため、速度検出

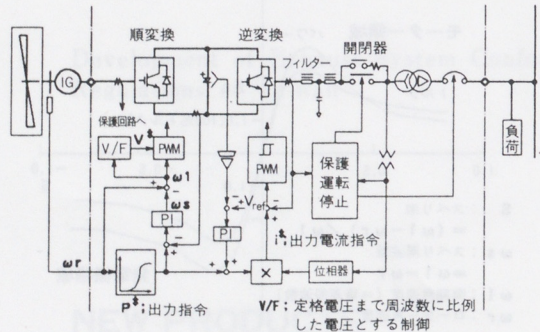


図3 ヤマハ風力発電システム

- 後発電出力を決める制御法を採用することによりフィルタリング効果が生じ繰返し荷重の低減、フリッカーの抑制効果が大きい。
- ④電力変換装置に停電検出機能を付加することにより、単独運転を確実に防止できる。

3 風車の出力特性と発電機の制御

図4は風車の性能を示すものであり、翼端周速比 $\mu$ に対する出力係数 $C_P$ で表されている。 $\beta$ は翼のピッチ角である。今一定のピッチ角で風車を運転した場合、周速比 $\mu$ を一定にして $C_P$ を最大点に維持できれば常に最大効率で運転でき、これを定周速比運転という<sup>1)</sup>。この運転を行うためには $\mu$ の定義から、風速 $V$ の変動に比例して大幅に速度 $\omega$ を調整する必要がある。これをカゴ型誘導電動機で実現するには周波数と電圧を自由に制御できる可変速インバータを用いて常時回生運転を行えばよい。図5に動作時の電圧電流分布を示した。この結果発電電力は一旦直流に変換され、系統に送電するために再度定電圧定周波数の交流に変換する。定周速比運転は種々の方式が報告されているが<sup>2)</sup>、本方式は以下の基本式が示すように周速比一定の場合、風車の出力が回転数 $\omega$ の3乗に比例することに着目し、制御信号として $\omega$ を検出する



だけで実現したものである。

$$P = (1/2) \rho \pi R^2 V^3 \cdot C_P \cdots \cdots \textcircled{1}$$

$$\mu_0 = R \omega / V = \text{Const より}$$

$$P = (1/2) \rho \pi R^2 (R^3 / \mu_0^3) \omega^3 \cdot C_P \cdots \cdots \textcircled{2}$$

ただし、Pはローター出力、Rはローター半径、 $\rho$ は空気密度である。図6は②式を用いて計算した出力特性である。運転領域全てを3乗特性通りに制御すると風車の回転数が危険領域となるため実際の特性は多少異なるが図4に示すように $C_P$ としては0.4以上を確保している。また定格回転数を超えてローターのガバナが作動するピッチ制御領域においても出力を取得するようにしておきローターの慣性エネルギーを吸収する。この特性をメモリに記憶しておき、風車の回転数を検出することにより発電可能な出力を知り、順変換装置の出力指令として直流電流信号との誤差増幅信号を発電機のスベリ周波数として操作することにより、励磁電流の周波数 $\omega_1$ 及びそれに比例した電圧指令 $V^*$ を決め、 $V^*$ に比例した正弦波PWM信号(Pulse Width Modulation)により主回路を構成するパワートランジスタを駆動することにより出力を制御する。図7に正弦波PWM信号の動作状況を示す。

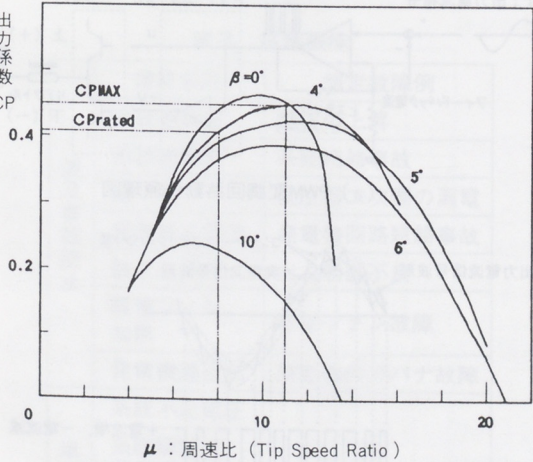


図4 風車の出力係数

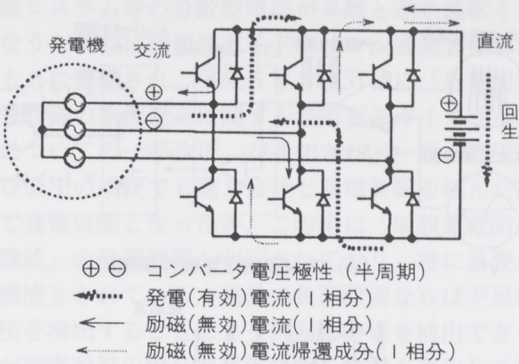


図5 順変換装置電圧、電流分布

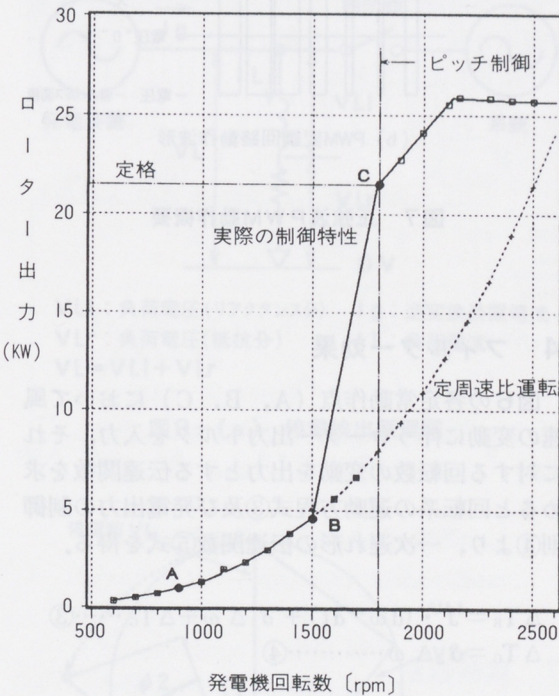


図6 風車の出力特性



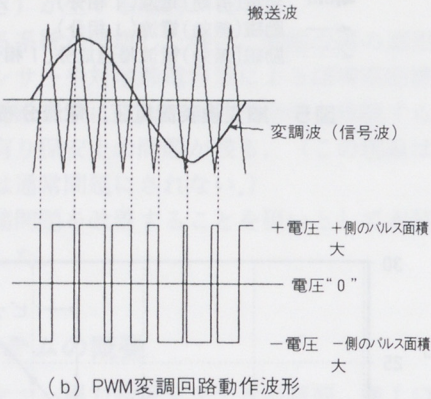
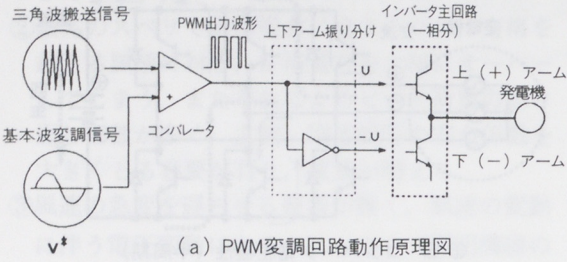


図7 正弦波PWM動作概要

$\delta_2$  : 出力ダンパー定数  
S : ラプラス演算子

⑦式から時定数  $\tau$  を各動作点について求め、また同じ発電機を一定回転で運転させた場合と比較した結果を表2に示す。これにより、出力変動が比較的大きいB点においても変動周期1秒の変動風速に対して、出力の変動が約1/10程度に緩和することが判る。これにより、機械部品に加わる荷重の繰返し回数の低減及び出力変動に伴う電圧変動が抑制され、フリッカーが防止できる。

表2 時定数  $\tau$  の比較

動作点	$\delta 2$	$\tau$
A 点	0.346	10.3 sec
B 点	2.919	1.23
C 点	0.149	23.4
定回転数方式	47.53	0.076

4 フィルター効果

図6の各定常動作点(A, B, C)において風速の変動に伴うローター出力トルクを入力、それに対する回転数の変動を出力とする伝達関数を求めると回転系の運動方程式③及び発電出力の制御則④より、一次遅れ形の伝達関数⑤式を得る。

$$\Delta T_R = J \cdot (d\omega / dt) + \delta_1 \Delta \omega + \Delta T_G \cdots \cdots \text{③}$$
$$\Delta T_G = \delta_2 \Delta \omega \cdots \cdots \text{④}$$

$$\Omega = \frac{1}{\tau S + 1} \cdot \frac{T_R}{\delta} \cdots \cdots \text{⑤}$$

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 \cdots \cdots \text{⑥}$$
$$\tau = J / \delta \cdots \cdots \text{⑦}$$

- $\Delta T_R$  : ローター発生トルク
- $T_R$  :  $\Delta T_R$  のラプラス変換
- J : 慣性モーメント (系全体)
- $\delta_1$  : シャフトダンパー定数
- $\Delta \omega$  : 発電機角速度
- $\Omega$  :  $\Delta \omega$  のラプラス変換
- $\Delta T_G$  : 発電機トルク

5 系統連系制御

系統連系制御は、まず直流電圧一定制御を基本に据え、順変換装置の出力指令をフィードフォ

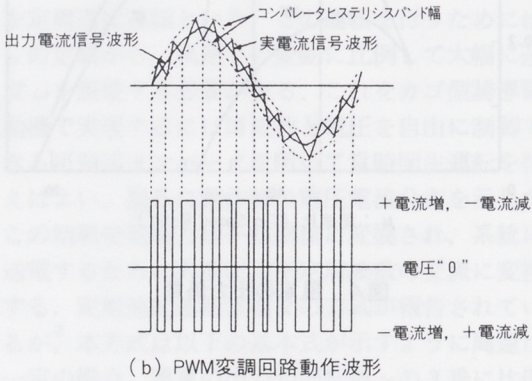
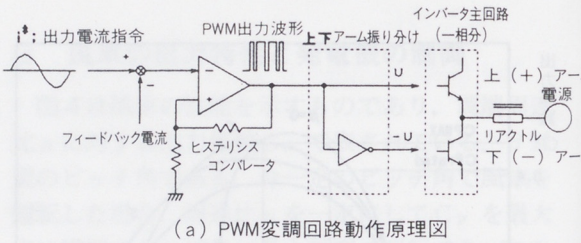


図8 系統連系制御PWM動作概要



ード信号としてこれに加え逆変換装置のピーク電流指令とする。これにより取得電力と送出電力との平衡を維持し、また風速の急変に対しても安定した制御が可能となる。一方系統との同期を行うために、線間電圧波形を検出し、これをローパスフィルターにより相電圧の位相に合わせ、これにより得られた正弦波波形をピーク電流指令に重畳させる。これを逆変換装置の各相ごとの出力電流指令として、フィードバックした瞬時電流との誤差信号をヒステリシスコンパレータに入力することにより、主回路を構成するパワートランジスタを駆動する正弦波PWM信号を得る。動作の概要を図8に示す。

6 保護機能

本システムは系統と連系して運用するため保安面、電力の供給信頼度確保の観点から十分な保護機能を備える必要がある。表3に本システムが備えている保護機能を示す。機能を大別すると装置の故障や系統事故等に対する保護と単独運転防止対策とがあり、故障や事故検出は波及事故を防止するため、単独運転防止対策は系統の保守を行なう際に不特定の開閉器を開放することによる停電に対し、本システムが確実にそれを検出し発電を停止させるために設けたものである。近年太陽光、風力、燃料電池等の新エネルギー発電及び熱電併

給システム等の分散型電源が系統と連系運転を行なうための技術要件ガイドラインが通産省指導のもとに整備され、平成5年3月31日に「自家発電設備の系統連系に関する技術要件ガイドラインについての一部改正」が通知され、一般の高圧及び低圧の系統でも電力会社と買電契約を結んだ形で発電可能となったが、この中に「単独運転防止機能」の設置義務が明記されており、特に重要な機能とされている。通常の負荷設備ならば不足電圧を検出することにより容易に停電を検出できるが発電設備の場合は自分自身も電圧を発生しているので、特別な工夫が必要である。図9に本システムの検出原理を示す。

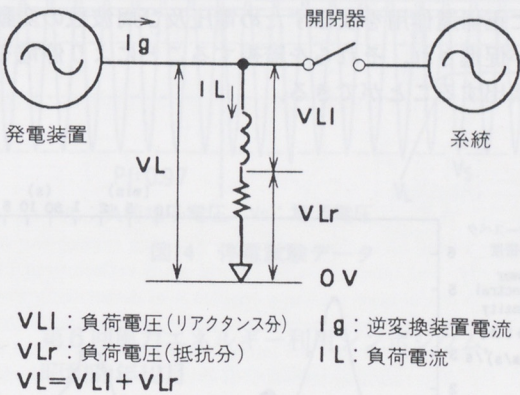


図9-(a) 停電検出原理図

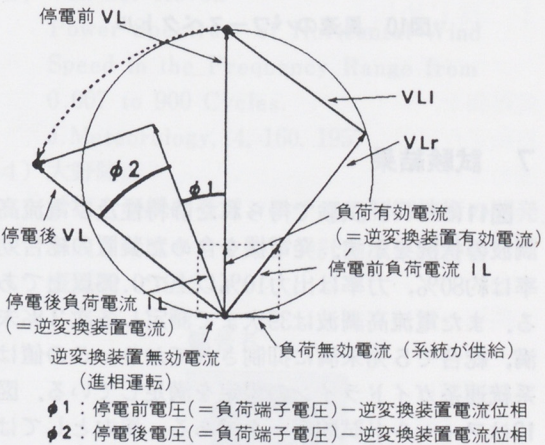


図9-(b) 停電検出原理図

表3 保護機能

	機能名称	想定故障例
波及事故防止	系統過電圧	電圧の上昇
	系統過電流	系統短絡事故
	漏電	変圧器二次側の漏電
	発電機過電流	発電機回路短絡事故
	直流過電圧	出力制御不良
	放電フィン加熱	冷却ファン故障
	発電機過回転	原動機のカバナ故障
単独運転防止	系統不足電圧	作業停電等の系統無電圧
	系統瞬時過電圧	
	周波数上昇	
	周波数低下	
	電圧電流位相異常	



図9-(a)において開閉器を開放した時点で逆変換装置が供給する有効電流と負荷が消費する有効電流とが等しく無効電流が異なる(この場合は負荷が要求する遅相電流に対し供給不足)場合、逆変換装置は電流制御を行っているので、負荷との需給バランスがとれず、負荷電圧の位相が進み側(図の左側)に急変する。逆変換装置はこの電圧位相に追従して電流を流そうとするため、その正帰還作用により周波数が上昇する。遅相電流が供給過剰の場合は逆の現象(周波数低下)となる。有効電流と無効電流とも負荷とバランスしている場合は上記の現象が生じないが風力発電の場合は図10<sup>3)</sup>に示すように周期10秒以下の変動成分が存在するため、それにより有効電流のバランスが崩れ前述の場合と同様に逆変換装置の出力電流指令に正帰還作用を及ぼすため電圧及び周波数の変動が促進され、それらを監視することにより停電を検出することができる。

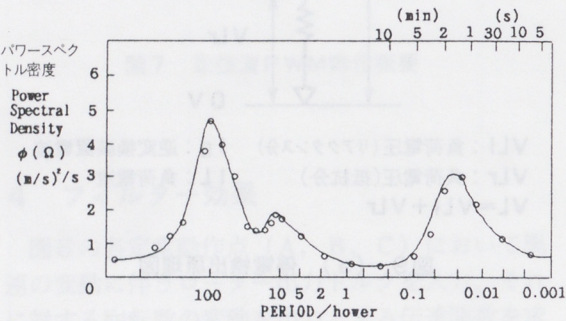


図10 風速のパワースペクトル

7 試験結果

図11にベンチ試験で得られた静特性及び電流高調波の状況を示す。発電機を含めた装置の総合効率は約80%、力率は出力10%以上で0.95以上である。また電流高調波は39次まで測定し各次3%未満、総合で5%未満に抑制されており、この値は系統連系ガイドラインの規定を満足している。図12はフィールド試験データである。風力としては滑らかな変動で発電しておりこれを図13<sup>4)</sup>の誘導機直結型の定回転数制御と比較すると、その差異は明かである。図14はベンチ試験で得られた停電時の単独運転試験データである。負荷との電力需

給バランスがとれていない場合は特に問題無く停止できるので省略し、ここでは無効電流即ち負荷力率のみを微少に不平衡状態にしたものを示す。これによると、無効電流不平衡状態の場合は周波数が上昇もしくは低下していることがわかり可能な限りバランスさせた場合でも10サイクル程度で停止していることが判る。

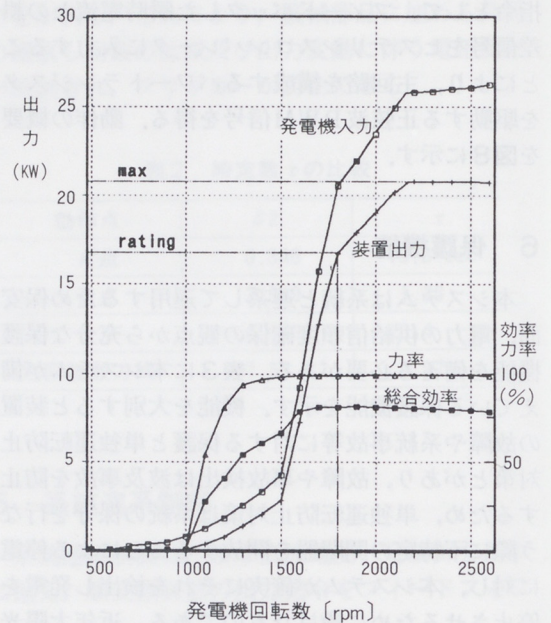
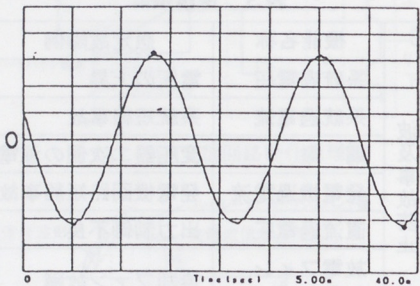


図11-(a) ベンチ試験静特性

電流波形



高調波スペクトル

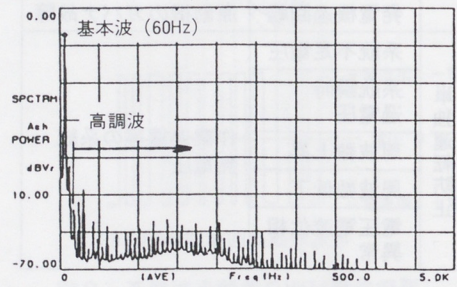


図11-(b) 電流波形, 高調波スペクトル



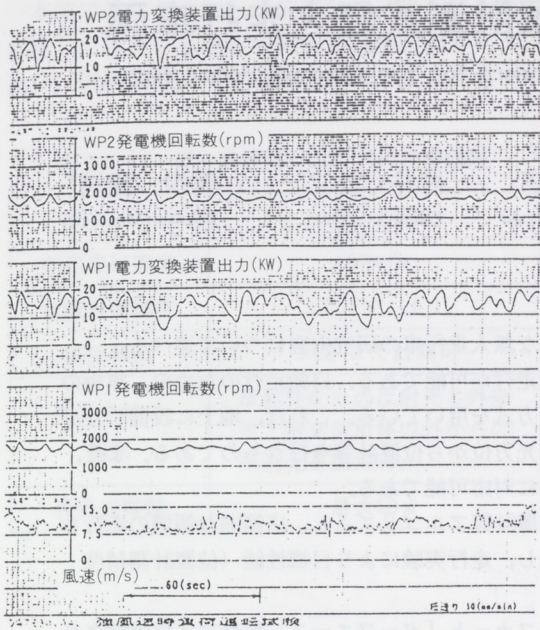


図12 フィールド試験結果

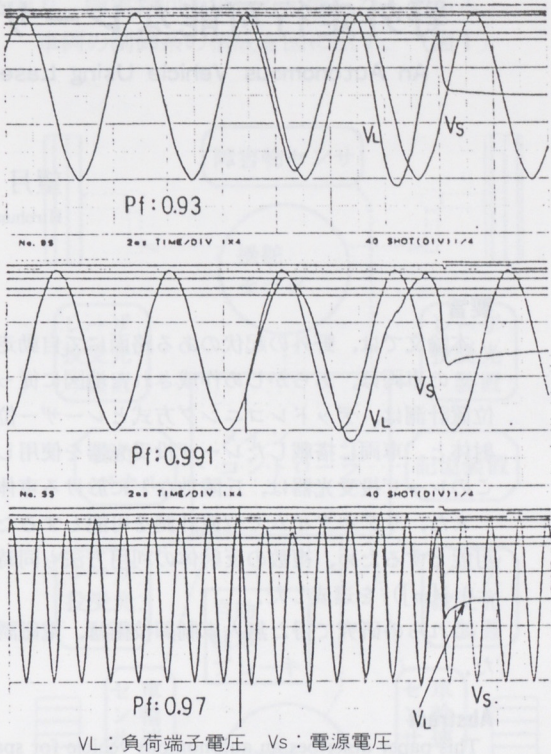


図14 停電試験データ

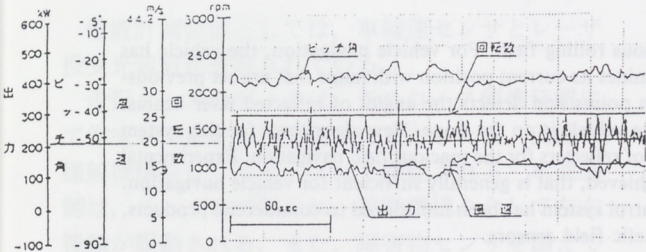


図13 誘導機直接接続方式出力例

## 8 おわりに

誘導発電機と系統との間にインバータ技術を採用した電力変換装置を挿入することにより、従来方式に無い特長を持った風力発電装置とすることができた。現在国内において10台ほど実証試験的に稼働中であり、今後これらの運転実績を踏まえて性能、品質及びコストの作り込みを行っていく予定である。インバータの技術は近年太陽光発電や燃料電池発電等の分散型直流発電機を系統に連系する新エネルギー発電分野への応用が開拓されているが今回開発された電力変換装置もそれらと同じ分野に属するものであり、今後石油代替エネルギー利用技術の一つとして普及していくものと思われる。

### 参考文献

- 1) 西本登「風車発電機の制御」

第6回風力エネルギー利用シンポジウム  
昭和59年12月

- 2) 鈴木茂行, 黒川和重  
「風速により出力制御した風力発電システムの特性に関する考察」電気学会研究会 1984
- 3) Van der Hoven  
Power Spectrum of Horizontal Wind Speed in the Frequency Range from 0.007 to 900 Cycles.  
J.Meteorology, 14, 160, 1957
- 4) 大野隆彦  
「集成型風力発電システムの制御技術の開発」平成3年度サンシャイン計画成果報告書概要集 1992

■著者



日比野 由貴夫