

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 6 日現在

機関番号：55501

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560289

 研究課題名（和文）12パルス整流回路を用いた低コストで信頼性が高い風力用  
IPMSG システムに関する研究

 研究課題名（英文）Cost-effective High-reliable IPMSG System for Wind Power  
Generation Using 12-pulse Rectifier

研究代表者

西田 克美（NISHIDA KATSUMI）

宇部工業高等専門学校・電気工学科・教授

研究者番号：40413835

研究成果の概要（和文）：再生可能発電の柱の一つである風力発電の更なる導入を図るには、初期導入費用を小さくし、また故障の少ない発電装置を使用する必要がある。そこで本研究では、発電機として埋込磁石同期発電機（IPMSG）、発生電力の電力会社への売電に必要な装置（PCS）を多相整流回路＋系統連系インバータという構成を提案している。風のエネルギーから可能な限り電力を引き出す（MPPT 制御）ことと、LCL フィルタの制御に成功している。

研究成果の概要（英文）：Compared with conventional wind turbines, many improvements are required in view of performance and reliability to lead to higher economic efficiency and to promote the introduction of wind power generation. The main advantage of the developed control system is simple, high reliable and cost-effective. As the proposed system requires only one PWM inverter to attain the Maximum Power Point Tracking control of the wind turbine by controlling the active grid current, the system cost can be reduced and high reliability can be achieved.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2011 年度	600,000	180,000	780,000
2012 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	2,600,000	780,000	3380,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気・電子工学

 キーワード：12パルス整流回路・系統連系インバータ・風力発電・LCL フィルタ・  
埋込磁石同期発電機・MPPT 制御

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 我が国は風況が良くないので、風力発電の導入には装置の低価格かつ高い信頼性と、高い発電効率が要求されている。

(2) かご形誘導発電機の固定速運転は、ピッチ制御のみで出力が制御できるので高い信頼性を有する。しかし発電効率はさほど期待できない。そこで発電効率の高い可変速タイ

プで、なおかつ低価格で信頼性にも優れた PCS が要求されていた。

## 2. 研究の目的

(1) PCS は IPMSG の交流電力を直流に変換した後、ふたたび商用周波数の交流電力に変換する。前段の整流部を高価な PWM コンバータではなく安価で故障知らずの 12 パルス整流回路に置き換える。MPPT 制御を後段の

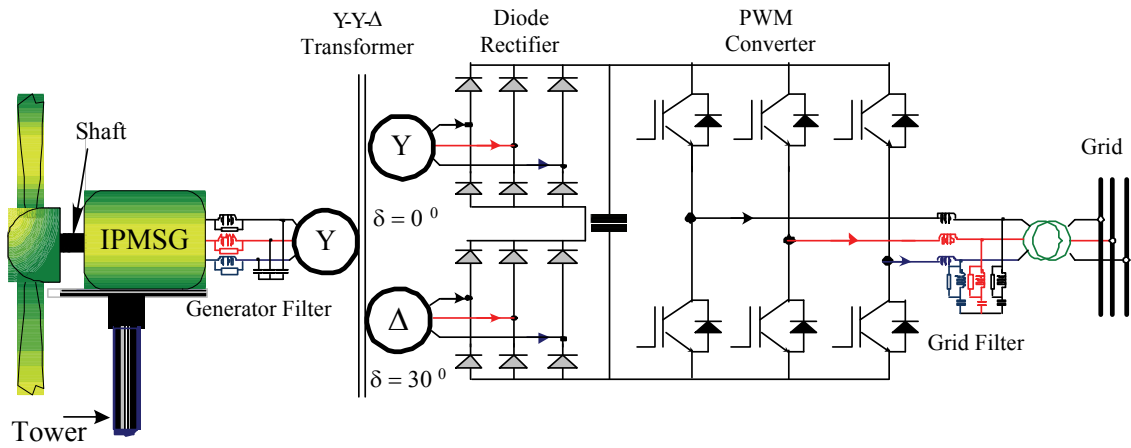


図 1. 12 パルス整流回路を使用した風力用 PCS

インバータのみで実施する方法を開発する。  
 (2) IPMSG の高効率運転を実施するには力率調整が必要になる。これを発電機出力端に取り付ける LC フィルタで行う。その LC フィルタの設計を行う。

(3) インバータのスイッチング周波数は低損失化の観点から低周波数に設定されている。逆潮流電流に含まれるスイッチングリップル成分を取り除くために LCL フィルタが設置されるが、その最短時間制御を有限時間整定制御を導入して達成する。

### 3. 研究の方法

(1) 1.5kW の IPMSG を設置し、これを風車のトルク特性が模擬できる高性能インバータ制御 IPMSM で駆動する実験装置を構築する。  
 (2) 発電機速度を DC リンク電圧を用いてセンサレスで推測する。

(3) MPPT制御は速度の3乗に比例して逆潮流有効分電流成分を変えることで実施するが、その応答速度を実験で確認する。

(4) LCLフィルタの制御は状態帰還を基礎として行うので、すべての状態変数の検出を必要とする。これを状態観測器を導入してグリッド注入電流の検出のみで行う。

### 4. 研究成果

図1に示す12パルス整流回路を用いた風力用 IPMSGシステムを実際に構築して実験を行い、以下の成果を得た。

#### (1) 12パルス整流回路の負荷特性

埋め込み磁石動機発電機の回転速度と誘導起電力の間には、正比例の関係があるので、逆に発電機端子に接続される12パルス整流回路の直流出力電圧  $V_{dc}$  から回転速度を知ることができる。

$Lq$  と12パルス整流回路変圧器の漏れリアクタンスがもたらす転流重なり現象、さらにそれら巻線の抵抗分のために、12パルス整流回路の直流出力電流  $I_{dc}$  が増大するにつれて

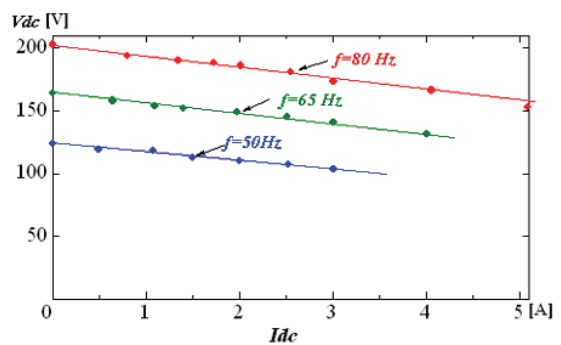


図 2. 12 パルス整流回路の負荷特性

$V_{dc}$  は図2に示すように直線的に減少していく。この実験結果に基づいてy切片を求める式(1)と理論式(2)を連立して回転速度( $f$ )を推測する。

$$V_{dc0} = V_{dc} + k \cdot V_s \cdot i_{sd} / V_{dc} \quad (1)$$

$$V_{dc0} = |\dot{V}_{2M} + \dot{V}_{2M} e^{j\delta}| = V_{2M} \cdot 2 \cdot \cos 15^\circ \quad (2)$$

$$= 2\pi f \phi_a \times \frac{1}{n} \times \sqrt{3} \times 2 \times \cos 15^\circ = 2.47 \times f$$

#### (2) MPPT制御

この推測された回転速度の3乗に比例して系統連系インバータの逆潮流電流を制御する最大電力点追従制御 (MPPT) を図3に示す通り

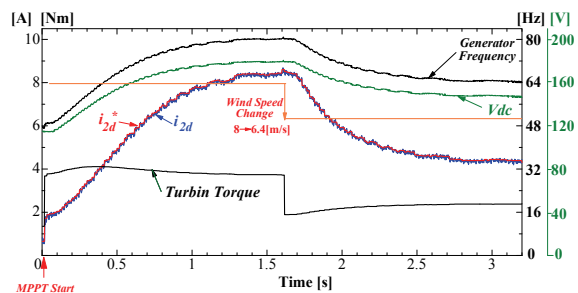


図 3. 風速がステップ状に変化するときの提案 PCS の  $V_{dc}$ 、系統注入電流有効分指令  $i_{2d}^*$ 、注入電流  $i_{2d}$  の過渡応答

達成した。風速が8m/sのときの発電機周波数と系統注入電力と出力は、それぞれ80Hz、430Wである。また風速が6.4m/sのときには、それぞれ64Hz、220Wである。

本方式が従来方式と比べてもっとも異なる点は、変換器前段の整流回路にPWMコンバータではなく、12パルス整流回路を使用している点である。その際DCリンク電圧 $V_{dc}$ は一定ではなく回転速度に比例して変動するが、電力変換効率(=発電機効率×整流器効率×インバータ効率)は、図4に示すように70%以上であり、従来方式と比べて遜色はないことがわかった。

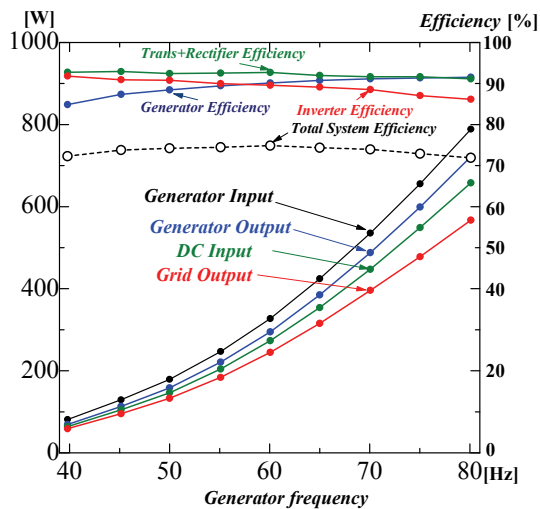
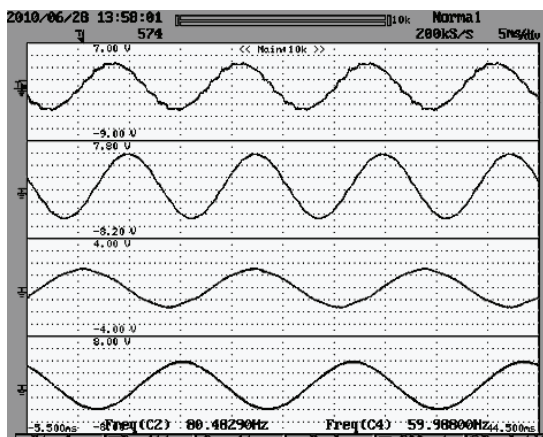


図4. 試作実験装置の効率

(3) 発電機出力端に取り付けるLCフィルタの機能

最初の機能は12パルス整流器から発電機に進入してくる第11次と第13次の高調波電圧や電流を図5に示すように抑制する事である。



Ch-1: IPMSG terminal voltage  $v_{gAB}$  -100 V/div THD=5.0%  
 Ch-2: IPMSG stator current  $i_{gA}$  - 2 A/div. THD =1.8%  
 Ch-3: Grid voltage  $v_{1W}$  - 50 V/div.  
 Ch-4 Grid-side inverter current  $i_{1j}$  - 5 A/div.

図5 発電機の運転波形( $f=80.3\text{Hz}$ )とグリッド注入電流波形

2番目の機能は、図6に示すような発電機効率の向上である。

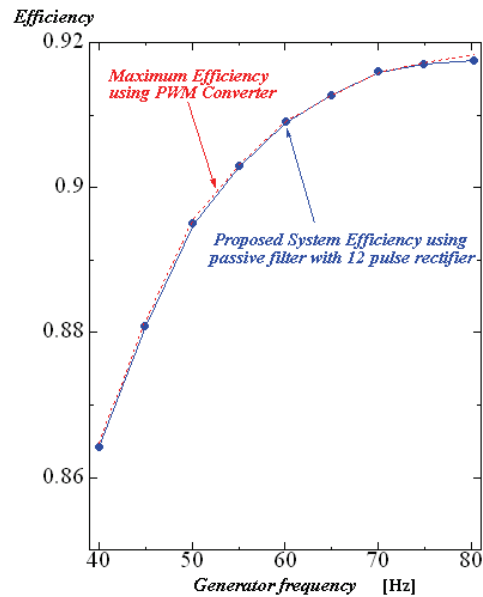


図6 LCフィルタ設置による発電機効率の向上効果 ( $L=8\text{mH}$ ,  $C=1\mu\text{F}$  in Delta Connection)

(4) 系統連系インバータ用LCLフィルタの制御

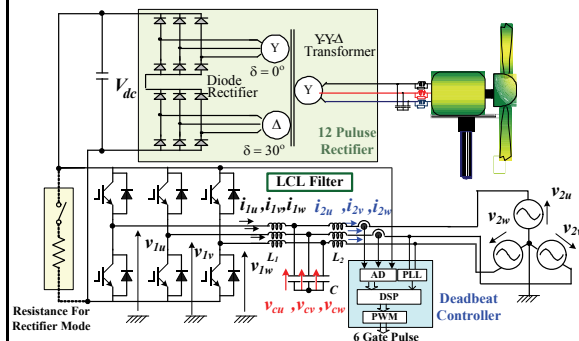


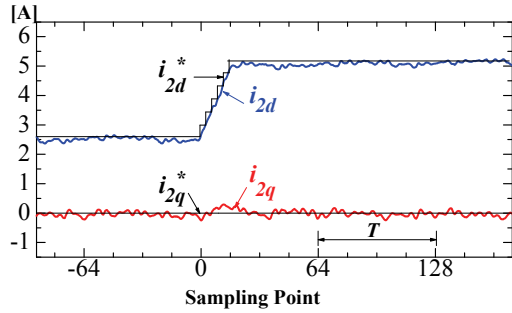
図7 LCLフィルタ

系統連系インバータと系統間に単一のLやLCフィルタではなく図7に示すLCLフィルタを設置すると、PWM周波数が低い大容量風力発電用インバータであってもグリッド注入電流に含まれるPWMリップル周波数成分を効果的に低減できる。本研究では逆潮流電流制御を有限時間整定制御で行うことで、応答性と安定性のいずれも確保している。

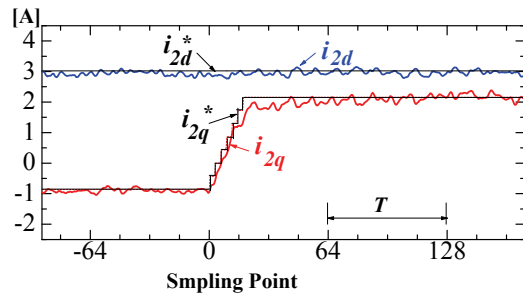
最初のLCLフィルタ回路の状態方程式の導出では、状態量を三相量のままではなく、瞬時空間ベクトルに変換することで、次数が9から3へ、見かけ上低減されている。次に離散値系の差分方程式をラプラス逆変換を用いて導出した。その差分方程式から3サンプル先に状態量を目標値に一致させる有限時間整定制御則を導いた。制御則は状態帰還式となっているのでDSPのプログラム化等の実際の適

用は容易である。さらに状態量の検出はグリッド注入電流のみとし、他の状態量、インバータ出力電流とキャパシタ電圧を推測で算出する状態推定式も導いている。

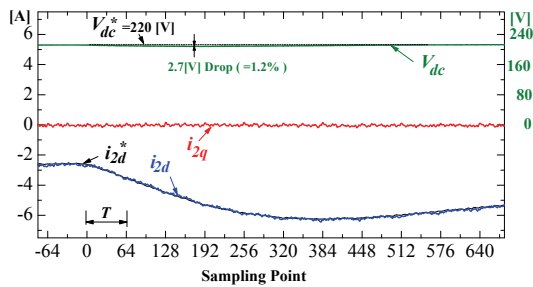
当該理論の有効性はシミュレーションと実験で確認した。シミュレーションによって、導出した有限時間整定制御則と状態推定式が正しいことが確認された。また、実験は、図8に示すように、インバータモード(=逆潮流モード)、STATCOMモード、コンバータモード(=整流器モード)の3通りの場合で行った。



(a) インバータ運転モード



(b) STATCOM運転モード



(c) 整流器運転モード

図8 LCLフィルタの制御

有効分と無効分電流がそれぞれ独立に最短の3サンプル制御周期で整定していることがわかる。

### (5) LCLフィルタの設計

設計に当たって、一番留意すべきは可制御性の確保である。サンプリング制御周波数 $f_s$ と共振周波数 $f_r$ の間の式(3)で示す関係は必須である。

$$f_r = \frac{1}{2\pi \sqrt{\frac{L_1 \cdot L_2 \cdot C}{L_1 + L_2}}} < 0.5 \cdot f_s \quad (3)$$

次にパッシブ素子の容量低減を図る。

図8は、 $f_r=0.38f_s$ としたときのインバータモードでのオシロ波形である。

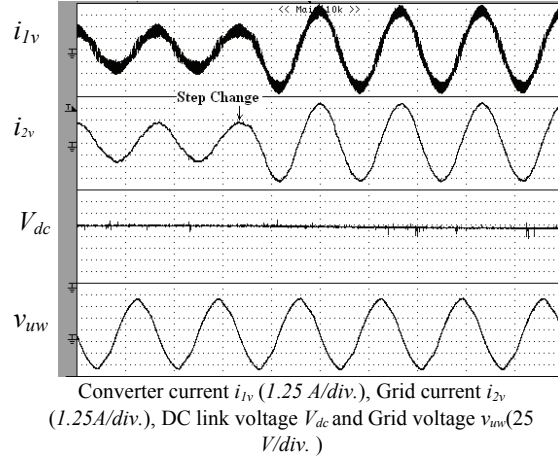


図8 インバータ運転モード オシログラフ (LCL Filter parameter :  $L_1=L_2=2\text{mH}$ ,  $C=12\mu\text{F}$ )

( $f_r=1452[\text{Hz}]$ ,  $f_s=\text{Switching frequency}=\text{Sampling frequency}=3840[\text{Hz}]$ ,  $f_r=0.38f_s$ )

### (6) まとめ

電力変換器の前段には、12パルス整流回路を使用し、さらに系統連系インバータのLCLフィルタ電流制御においてはグリッド電流のみを検出し、他の二つの状態量は同定アルゴリズムを利用した推測で済ませることにより状態帰還に基づく有限時間整定制御を実現して、低コストかつ高精度、高信頼性を有する風力用パワーコンディショナーの開発を行った。

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計1件)

①Katsumi Nishida, Tarek Ahmed, Mutsuo Nakaoka, “Cost Effective High-Efficiency Power Conditioner with Simple MPPT Control Algorithm for Wind Power Grid Integration”, IEEE Transactions on Industry Applications, 査読有り, Vol.47, No.2, 2011, pp. 893~900

〔学会発表〕(計1件)

①Katsumi Nishida, Tarek Ahmed, Mutsuo Nakaoka, “Development of Grid-connected Wind Energy System Employing Interior PM Synchronous Generator and Multi-pulse Rectifier”, IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE2010), 査読有り, 2011, Hilton Hotel, Atlanta, Georgia, USA

②Katsumi Nishida, Tarek Ahmed, Mutsuo Nakaoka, “Finite-Time Current Control of LCL Filter for Grid Connected Three-Phase Voltage-Source Inverter”, IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE2011), 査読有り, 2011, Phoenix Convention Center, Phoenix, AZ,

USA

③ Katsumi Nishida, Tarek Ahmed, Mutsuo Nakaoka,  
“Deadbeat Current Control of LCL-Filter for Grid Connected  
Three-Phase Voltage Source Inverter”, IEEE International  
Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS  
2011), 査読有り, 2011, Amara Hotel, Singapore

④ Katsumi Nishida, Tarek Ahmed, Mutsuo Nakaoka,  
“Cost-effective Deadbeat Current Control for Wind-Energy  
Inverter Application with LCL Filter”, IEEE Energy  
Conversion Congress and Exposition (ECCE2012), 査読有  
り, 2012, Raleigh Convention Center, Raleigh, North  
Carolina, USA

⑤ Katsumi Nishida, Tarek Ahmed, Mutsuo Nakaoka,  
“Deadbeat Current Control for Wind-Energy Inverter  
Application with LCL Filter”, IEEE International Conference  
on Power Electronics and Drive Systems (PEDS 2013), 査読  
有り, 2013, 北九州

⑥ Katsumi Nishida, Tarek Ahmed, Mutsuo Nakaoka,  
“A New Scheme of Full-power Converter for Variable-speed  
Wind Power Generation System”, IEEE Energy Conversion  
Congress and Exposition (ECCE2013), 査読有り, 2013,  
Denver Convention Center, Denver, Colorado, USA

[図書] (0件)

[産業財産権]

○出願状況 (0件)

○取得状況 (0件)

[その他]

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

西田 克美 (NISHIDA KATSUMI)

宇部工業高等専門学校・電気工学科・教授

研究者番号：40413835

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし