

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 12 日現在

機関番号：13201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420918

研究課題名(和文) 制御回路を用いなくても最大出力電力が得られる風力発電装置の開発

研究課題名(英文) Development of wind power generator system obtained maximum power output without using controlled circuit

研究代表者

作井 正昭 (Sakui, Masaaki)

富山大学・大学院理工学研究部(工学)・名誉教授

研究者番号：70019222

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、三相倍電圧整流回路を用いて、直流出力電圧が異なる整流動作モードを自動的に切り替えることにより、すなわち低回転数域(低風速域)では昇圧形の整流動作モードで、高回転数域(高風速域)では三相ブリッジ整流モードで動作させることにより、汎用の発電機を使用しても、広い回転数領域で効率よく風車最大出力が得られる新しい制御回路レス方式風力発電装置を開発した。そして、シミュレーションと実験により、本発電装置は、制御回路を用いなくても、風車の最大出力特性である3乗曲線特性に追従する発電機出力特性が得られることを実証できた。

研究成果の概要(英文)：This research proposes a new wind power generator system using a three-phase voltage-doubling rectifier which consists of only passive elements. Automatically, the three-phase voltage-doubling rectification circuit operates in double voltage mode in low wind velocity, and operates in bridge mode in high wind velocity. Therefore, the proposed generator system can obtain the maximum power output of wind turbines in a large velocity region without using the control circuit. The effectiveness of the proposed generator system was shown by simulations and experiments.

研究分野：パワーエレクトロニクス

キーワード：パワーエレクトロニクス 再生可能エネルギー発電 制御回路レス 風車最大出力

1. 研究開始当初の背景

近年、再生可能エネルギーの導入機運が高まっており、小規模の風力発電装置においては永久磁石形三相同期発電機 (PMSG) がよく用いられる。しかし、この発電装置で風車最大出力を得るには PWM 変換器や昇圧チョッパを必要としており、小容量の風車の場合、導入コストや運用コストの点で問題があった。この問題を解決するために、図 1 に示されるような制御回路レス化を図った 2 巻線方式発電装置が先に開発されている。しかし、この方式は、図中の特殊 PMSG で示されるように巻数の異なる 2 つの巻線 N1, N2 を内蔵する特殊な発電機を用いる必要があり、汎用の永久磁石形三相同期発電機を用いることができないという大きな問題があった。

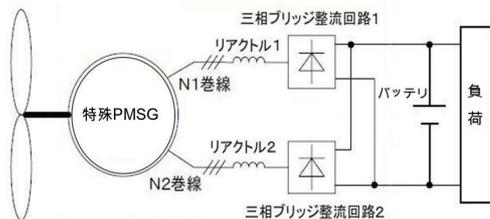


図 1 従来の制御回路レス風力発電装置

2. 研究の目的

(1) 汎用の永久磁石形三相同期発電機の使用が可能となる新しい制御回路レス風力発電装置を開発し、その妥当性を実験により検証する。

(2) 本制御回路レス方式と一般的な最大出力点追従制御 (MPPT) 方式の各特性の比較の検討を行い、その有効性を明らかにする。

3. 研究の方法

図 1 で示される従来の制御回路レス方式風力発電装置では、2 つの異なる出力電圧を得るのに、発電機側で巻数の異なる 2 つの巻線を利用している。本方法は、発電機本体で 2 つの異なる出力電圧を得るのではなく、図 2 のように新規に開発した三相倍電圧整流回路本体の整流動作モードによって 2 つの異なる出力電圧を得ようとするものであり、汎用の永久磁石形三相同期発電機の使用が可能となる。また、その三相倍電圧整流回路の回路構成を図 3 に示す。

提案装置では、永久磁石形三相同期発電機

(PMSG) からの出力電圧は、2 つの異なる整流動作モードを有する三相倍電圧整流回路によって昇圧・整流され、バッテリーを介して負荷に供給される。そして、三相倍電圧整流回路には、整流動作モードの切替のためにリアクトル 1 (L1) が、発電機入力特性が風車最大出力特性に近づくためにリアクトル 2 (L2) が挿入されている。以下に、三相倍電圧整流回路の 2 つの異なる整流動作モードについて説明する。

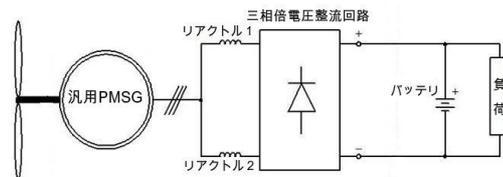


図 2 提案する制御回路レス風力発電装置

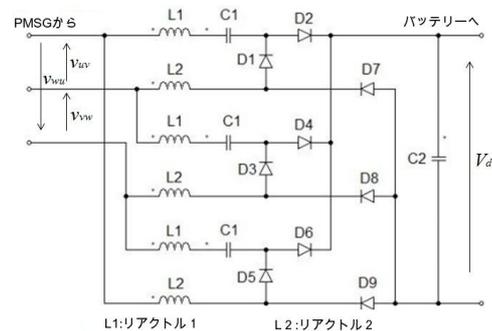


図 3 図 2 の三相倍電圧整流回路

図 3 においてリアクトル 1 のインダクタンス L1 が零の場合、線間電圧 v_{uv} が負のときはダイオード D1 がオン、また、 v_{uv} が正のときはダイオード D2 と D7 がオンとなり三相ブリッジの 2 倍の直流出力が得られる。一方、L1 が無限大の場合は、 v_{uv} が負のとき D1 はオン状態のままであるが、D2 と D9 がオン、また、 v_{uv} が正のときは D5, D6, D7 がオンとなり三相ブリッジと同じ直流出力電圧になる。以上より、図 3 の整流回路のインダクタンス L1 により直流出力電圧の異なる 2 種類の動作モードが存在することが明らかであり、ここでは前者を倍電圧モード、後者をブリッジモードと呼ぶ。

次に、本発電装置の特性イメージを、図 4 に基づいて説明する。発電機の回転速度が 0 から上昇し、三相倍電圧整流回路が倍電圧モードで動作し始め、発電機出力電圧がバッテリー電圧以上に昇圧、整流されると、回転速度 N1 付近から出力が開始される。そして、

回転速度の増加に伴い、リアクトル 1 を用いない場合には「倍電圧（リアクトル無）」に示すような発電機入力特性となるが、発電機入力が風車最大出力よりも大きくなり、リアクトル 1 を交流側に挿入することにより、出力電力が抑えられ、同時に発電機入力も抑制され、「倍電圧（リアクトル有）」に示すような発電機入力特性となる。その後、発電機回転速度が更に上昇し、電流が大きくなるとリアクトル 1 における電圧降下が大きくなり、倍電圧モードによる出力電圧 V_d が、三相ブリッジの出力電圧とほぼ同じになると回転速度 $N2$ 付近において、ブリッジモードで動作し始める。このブリッジモードにおいても同様にして、発電機入力が風車最大出力よりも大きくなり、リアクトル 2 を交流側に挿入することによって、「ブリッジ（リアクトル有）」に示すような発電機入力特性が得られる。このように発電機の入力電圧の変動に対して、リアクトルを用いて倍電圧モードとブリッジモードの 2 つの動作モードを自動的に切り替えることで、発電機入力特性を風車最大出力を持つ 3 乗特性へ近づけることが可能となる。また、リアクトル 1 に飽和リアクトルを用いることで、「本方法（飽和リアクトル）」に示すように、さらに風車の 3 乗出力特性に近くなり、特性が改善される。

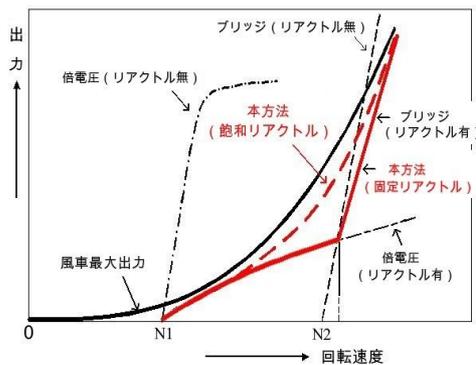


図 4 提案装置の出力特性イメージ

4. 研究成果

(1) 図 2 の提案装置のシミュレーションおよび実験に用いた PMSG（三相同期発電機）および三相倍電圧整流回路の各パラメータを表 1 に示す。また、図 5 に提案装置のシミュレーションおよび実験結果を示す。参考として理論上回転速度の 3 乗に比例する風車の最大出力特性を示す。シミュ

レーションには PSIM を使用した。

図 5 から、提案装置の発電機入力特性は、シミュレーションおよび実験結果とも風車最大出力を持つ 3 乗特性に極めて近似した結果が得られることが分かる。また、三相倍電圧整流回路（リアクトル 1, 2 を含む）の変換効率は 90% 前後で、発電機を含めた全体変換効率（総合効率）はほぼ 75% であり、従来の制御回路（昇圧チョッパ）方式に比べて遜色のないことが分かった。

表 1 PMSG 及び整流回路のパラメータ

パラメータ	値	パラメータ	値
定格電圧	110V	ピーク 起電力定数	59.1V/krpm
定格電流	10.5A	インダクタンス L1	155mH(0.1A)
定格速度	1800rpm		- 20mH (5A)
極数	8	インダクタンス L2	0.25mH
巻線抵抗	0.27Ω	コンデンサ C1~C4	3300μF
d軸インダクタンス	4.23mH	バッテリー 電圧	84V
q軸インダクタンス	4.33mH		

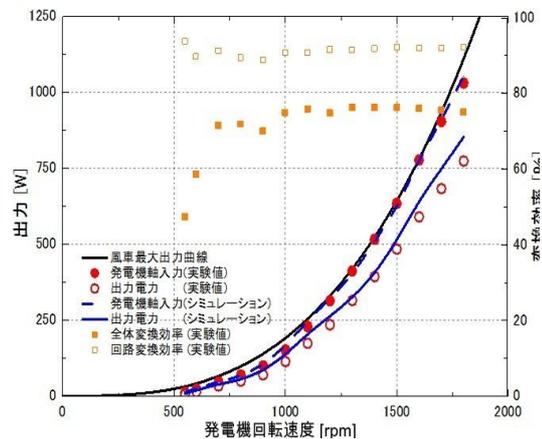


図 5 提案装置の出力・効率特性

以上、三相倍電圧整流回路の直流出力電圧が異なる 2 種類の動作モードを用いた制御回路レス方式の風力発電装置を提案し、シミュレーションおよび実験によって、制御回路レスで風車最大出力の 3 乗特性に概ね沿った発電機入力特性が得られることを立証した。

(2) 図 3 の三相倍電圧整流回路のブリッジモード動作時は、3 個のダイオードが導通するため、2 個のダイオードが導通する一般の三相ブリッジ整流回路に比べ、導通損が大きくなるという欠点があった。そこで、図 6 に示すような高効率形三相倍電圧整流回路を新たに提案する。この整流回路は、図 3 の整流回路に D10~D12 の 3 個のダイオードを追加し合計 12 個にしたものであり、ブリッジモード動作時は D1 と

D2 に流れる電流が D10 に、D3 と D4 に流れる電流が D11 に、D5 と D6 に流れる電流が D12 に替わる。その結果、高効率三相倍電圧整流回路のブリッジモード動作時の導通するダイオードが 2 個になり、導通損が 1/3 ほど小さくなるので、効率の改善が図れる。

図 7 に、図 6 の整流回路（12 ダイオード）を用いた発電装置の実験結果を、図 3 の整流回路（9 ダイオード）を用いた発電装置の実験結果と比較して示す。なお、発電機や回路の各パラメータは表 1 のとおりである。

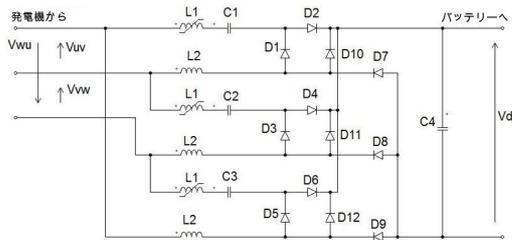


図 6 高効率三相倍電圧整流回路

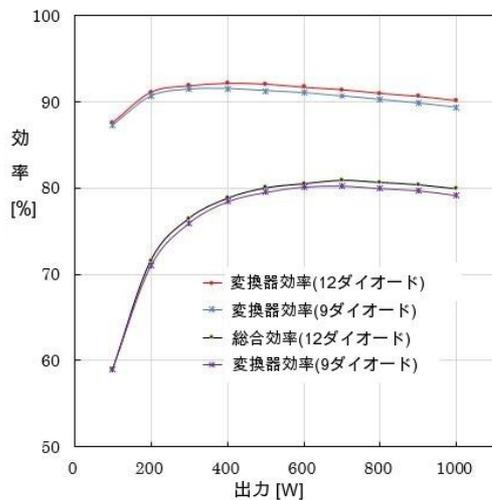


図 7 効率特性の比較

図 7 より、三相倍電圧整流回路においてダイオードを 12 個用いることで、ブリッジモードで動作する高出力域において、変換器効率及び総合効率を 0.8% ほど改善でき、高効率化を実現することができた。また、図 6 の整流回路の D7 ~ D12 の 6 個のダイオードは、三相ブリッジダイオードモジュールを使用すれば 1 個で済むため、装置の簡素化が可能となる。

(3) 本制御回路レス方式（ここでは、図 3 の三相倍電圧整流回路を使用）の比較の対象とする MPPT 制御方式風力発電装置の基本構成を図 8 に示す。なお、MPPT 制御は電流センサ、電圧センサ、昇圧チョップを用いて、山登り法によ

り最大出力点の追従制御を行う。シミュレーションに用いる永久磁石形三相同期発電機および回路のパラメータは表 1 のとおりである。また、風車モデルのパラメータは定格出力 1300W が、風速 12m/s で得られるように設定した。シミュレーションには PSIM を用いて、定常特性、過渡特性、発電量特性について比較検討を行った。

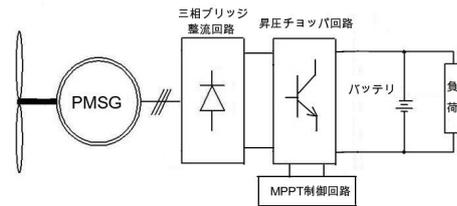


図 8 MPPT 制御方式風力発電装置

まず、風速一定のときの発電機入力（風車出力）の定常特性を図 9 に示す。図より、本制御回路レス方式も MPPT 制御方式も風車最大出力に良好に追従していることが分かる。

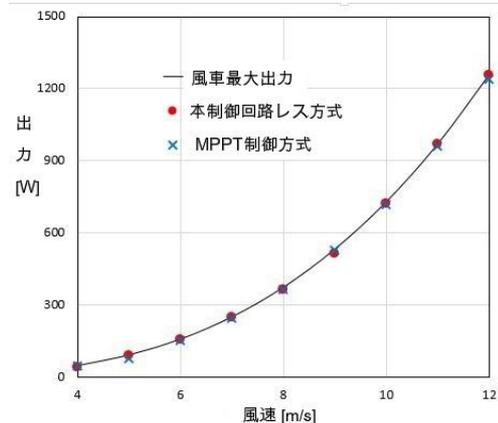


図 9 定常特性の比較

次に、風速 5m/s、12m/s、8m/s をステップ的に変化させたときの発電機入力の過渡特性を図 10 に示す。図より、立ち上がり時では本方式の方が、かなり応答が良いことが分かる。

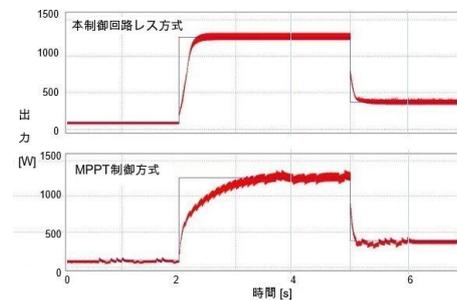


図 10 過渡特性の比較

最後に、風速変動が図 11 のような周期的な 3 パターンに対する、1 周期あたりの発電装置

の発電量の結果を図 12 を示す。なお、パターン 1 は 1 周期 20 秒の正弦波で、パターン 2 はさらに 1 周期 5 秒の正弦波を、パターン 3 はさらに 1 周期 1 秒の正弦波を加えたものである。図より、本制御回路レス方式は MPPT 制御方式に比べて、風速変動が緩やかな場合の発電量はほとんど変わらないが、風速変動が複雑な場合は、図 10 のように過渡応答が速いので多くの発電量が得られることが明らかになった。

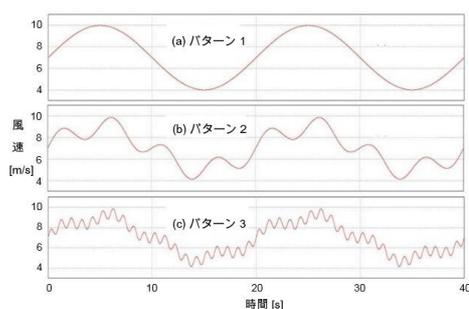


図 11 風速の変動パターン

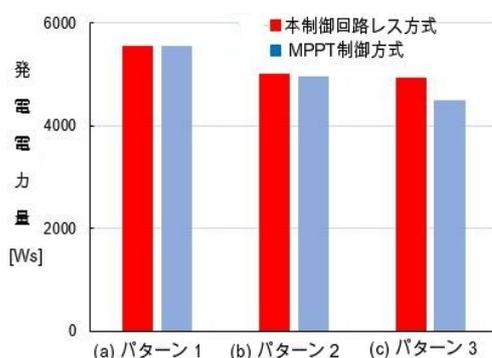


図 12 1 周期当たりの発電電力量の比較

以上、現実に近い風況での風力発電装置のシミュレーションにおいて、本制御回路レス方式と山登り法を用いた MPPT 制御方式の諸特性を比較した結果、本制御回路レス方式の有効性が明らかになった。

<引用文献>

塩田剛・井坂勉・関和市, CC レス方式風力発電装置の開発, 風力エネルギー学会誌, 32 巻 2 号, 2008, 117-122

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 1 件)

長浜貴弘・飴井賢治・大路貴久・作井正昭, 三相倍電圧整流回路を用いた制御回路レス風力発電装置の開発, 電気学会論文誌 D, 査読有, 134 巻 5 号, 2014, 575-576
DOI: 10.1541/ieejias.134.575

[学会発表](計 3 件)

長浜貴弘・飴井賢治・大路貴久・作井正昭, 制御回路レス風力発電装置の開発 - 倍電圧整流回路方式 -, 2014 年電気設備学会全国大会, 宮城県仙台市, 2014, 13-14

渡邊大貴・飴井賢治・大路貴久・作井正昭, 三相倍電圧整流回路を用いた制御回路レス風力発電装置の高効率化, 2015 年電気設備学会全国大会, 北海道札幌, 2015, 109-110

渡邊大貴・飴井賢治・大路貴久・作井正昭, 風力発電装置の三相倍電圧整流回路を用いた制御回路レス方式と MPPT 制御方式の比較, 平成 28 年電気学会全国大会, 宮城県仙台市, 2016, 4-160

6. 研究組織

(1) 研究代表者

作井 正昭 (SAKUI, Masaaki)

富山大学・大学院理工学研究部(工学)・名誉教授

研究者番号: 7 0 0 1 9 2 2 2