A Study on the Matching between the Straight Wing Non-articulated Vertical Axis Wind Turbine and the New Wind Turbine Generator

Takasi Siota Member (TOYODENKI SEIZO K.K., siota@toyodenki.co.jp)

Tsutomu Isaka Member (TOYODENKI SEIZO K.K., isakat@toyodenki.co.jp)

Takashi Sano Non-member (TOYODENKI SEIZO K.K., sanot@toyodenki.co.jp)

Kazuichi Seki Member (Tokai University, kalmond@fusha.org)

Keywords: wind turbine generator, permanent magnet generator, control circuit less, rectifier, matching

Recent years, wind turbine generator system rapidly spreads as natural energy to play a role of prevention of global warming.

In the wind turbine generator system, there are substantial problems such as the maximum power of the wind turbine cannot be obtained under the fluctuating wind speed, high in cost and low in annual net electricity production.

The new wind turbine generator optimized for the wind turbine output is presented in order to solve such problems. This generator is using neither the control circuit nor the PWM converter. Hereinafter, we call this new type of the generator “CC-less”.

Figure 1 shows main circuit configuration of CC-less. CC-less is comprised of permanent magnet generator with 2 windings which produce different induced voltage effective value, reactor, and rectifier and outputs DC output to load DC voltage power.

To gain maximum output power from wind, so that generator input power characteristic to rotational speed of wind turbine may follow cubic curve of maximum wind turbine output power, it is only necessary to consider electrical loss and produce generator output power.

Figure 2 shows the characteristic image of CC-less. DC output power of W2 winding with more turns starts output from low rotational speed N_2 and by the increase of generator rotational speed becomes output described “No reactor” of Fig. 2. However, when CC-less generator is driven by wind turbine at this condition, the generator torque is larger than wind turbine torque and the wind turbine becomes stall condition. Wind turbine rotational speed stops at near rotational speed N_2 of Fig. 2 and is not increased.

When by inserting reactor in W2 winding in series the current is controlled, output power becomes the output described “Series reactor” of Fig. 2 and W2 winding can play a role of output of low wind speed range of wind turbine cube curve output power characteristic.

In addition, DC output power of W1 winding with less turns starts output from middle rotational speed N_1 and by the increase of rotational speed the large output power can be produced. W1 winding

can play a role of output of high wind speed range.

The winding number of generator and the inductance value of reactor 1 and 2 shown in Fig. 1 are designed by the use of electromagnetic field analysis software. Consequently, CC-less output which is the total of DC output of W1 winding and W2 winding can be roughly cubic output characteristic along maximum wind turbine output power.

CC-less confirmation device was produced experimentally. The result of the matching test between this CC-less and straight wing non-articulated vertical axis wind turbine under fluctuating wind speed is shown in Fig. 3. The experiment result was confirmed that the output power of the CC-less is well matched with fluctuating wind turbine output brought by ever-changing wind energy, from low to high wind speed, and the maximum wind turbine output power can be obtained without using PWM converter control.

Fig. 1. Main circuit configuration of CC-less

Fig. 2. Characteristic image of CC-less

Fig. 3. Result of matching test between straight wing non-articulated vertical axis wind turbine and CC-less

直線翼垂直軸型風車と新型風力用発電装置の 整合性に関する研究

正員 塩田 剛* 正員 井坂 勉*
非会員 佐野 孝* 正員 関 和市**

A Study on the Matching between the Straight Wing Non-articulated Vertical Axis Wind Turbine and the New Wind Turbine Generator

Takasi Siota*, Member, Tsutomu Isaka*, Member, Takashi Sano*, Non-member, Kazuichi Seki**, Member

In the current wind turbine generation system, there are substantial problems such as the maximum power of the wind turbine cannot be obtained under the fluctuating wind speed, high in cost and low in annual net electricity production (due to mismatch between a generator and a wind turbine). A new wind turbine generator optimized for the wind turbine output is presented in order to solve such problems. This wind turbine generator consists of a permanent magnet generator, a reactor and a rectifier, and uses neither a control circuit which requires standby electricity nor a PWM converter having a switching element. By selecting most appropriate combination of the permanent magnet generator having multiple windings and the reactor connected in series with each winding, the maximum output of the wind turbine can be obtained without using a control circuit. The new wind turbine generator was directly coupled with the straight wing non-articulated vertical axis wind turbine (SW-VAWT), and matching of the generator with the wind turbine was examined through field tests. From the test result and review, it has been confirmed that the new wind turbine generator is highly matched with the wind turbine under the fluctuating wind speed.

キーワード：風力発電装置，永久磁石型発電機，制御回路レス，整流器，整合性

Keywords: wind turbine generator, permanent magnet generator, control circuit less, rectifier, matching

1. はじめに

天然資源の枯渇，地球温暖化阻止の観点から風力発電は急速な拡がりを見せている。しかしながら，現在の風力発電システムに接続される従来の発電装置においては，以下のような個々の又は複合した問題点がある。

- ① 変動風速下において，常に風車最大出力を取得できるとは限らない。
- ② 初期コストおよび運用コストが高い。
- ③ 年間正味発電量が少ない。特に，制御回路が必要な場合には，いつ吹くか分からない風に対しても待機電力が必要になり，さらに年間正味発電量が減少する。本論文では，これらの問題点を解決または緩和した発電

装置は，「風車との整合性が高い」と定義する。

従来の発電装置には，インバータ方式と整流方式がある。インバータ方式では，変動する風速から常に風車最大出力を得るために，インバータを用いて可変速運転を行っている。しかし，インバータ制御回路の制御電源に必要な待機電力とPWM変換器のスイッチング損失により，低風速時には風車から取得できる最大電力よりも，消費する電力が多いために正味発電量がマイナスになるという問題がある。この問題は，待機電力が発電容量に対して大きな割合を占める，小型風力発電システムにおいて特に顕著である。

永久磁石型発電機の出力を整流して直流出力する整流方式においては，例えば10 m/s程度の高風速時に定格出力が取れるように設計されている。したがって，風速出現頻度が高い風速5 m/s以下では，風車は空回り状態であり，その風速での風車最大回転数になっても，発電機出力電圧が負荷としての直流電源電圧より低いために出力が取り出せないという問題がある^①。

これらの問題点を念頭に置き，特に前記①の問題点に着目して，新方式発電装置の研究・開発を行った。以下，この新方式発電装置をCCレス（制御回路レス—Control Circuit

* 東洋電機製造（株）研究センター
〒236-0004 横浜市金沢区福浦 3-8
Technical Research Center, Toyodenki Seizo K.K.
3-8, Fukuura, Kanazawa-ku, Yokohama 236-0004

** 東海大学総合科学技術研究所
〒259-1292 平塚市北金目 1117
Tokai University
1117, Kitakaname, Hiratsuka 259-1292

Less 等) と称する。

CC レスは、待機電力が必要な制御回路およびスイッチング素子で構成される PWM 変換器を用いることなく、風車出力に最適化された永久磁石型同期発電機、リアクトルおよび整流器の組合せ装置である。

この CC レスを直線翼垂直軸型風車に適用して実験を行い、前記①の問題点に対して、風車との整合性が高い発電装置であることが、実験結果より確認された。

本論文では、CC レスの概要、実験結果、出力特性向上策、および適用方法について報告する。

2. 風車最大出力取得方法

〈2・1〉 原 理 Fig. 1 に受風面積 5 m^2 の直線翼垂直軸型風車 (SW-VAWT, straight wing non-articulated vertical axis wind turbine) を、Fig. 2 にその風車性能を示す。

風車は形状が定まると、出力係数 C_p と周速比 β の関係が一義的に定まる。

周速比 β は (1) 式で与えられる。従って、各風速において、風車が最大出力を発生する回転数 $N(\text{opt})$ は、(2) 式で与えられ、各風速に比例する。

また各風速における風車出力は、(3) 式で与えられる。したがって、(3) 式に (2) 式を代入し、 C_p に最大出力係数を用いると、(4) 式のように各風速における風車最大出力 $W(\text{max})$ は風車回転数 N の 3 乗に比例する。

$$\beta = \frac{2\pi \times N \times R}{V} \dots\dots\dots (1)$$

$$N(\text{opt}) = \frac{\beta_{\text{max}} \times V}{2\pi \times R} = K_1 \times V \dots\dots\dots (2)$$

Fig. 1. SW-VAWT system.

Fig. 2. Power performance of SW-VAWT.

$$W = \frac{1}{2} \times \rho \times C_p \times A \times V^3 \dots\dots\dots (3)$$

$$W(\text{max}) = K_2 \times N^3 \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 R : 風車半径 [m], N : 風車回転数 [rps], $N(\text{opt})$: 各風速 V における風車最大出力時の回転数 N , V : 風速 [m/s], C_p : 出力係数, β : 周速比, β_{max} : 出力係数 C_p が最大となる周速比 β , ρ : 空気密度 [kg/m^3], W : 風車出力 [W], $W(\text{max})$: 各風速 V における風車最大出力, A : 風車受風面積 [m^2], K_1 , K_2 : 比例定数である。

以下の回転数に関する説明では、特に断らない限り、風車と発電機は損失のないギアで接続されているとし、風車回転数のみで説明する。

Fig. 3 に風速をパラメータにした受風面積 5 m^2 の SW-VAWT の出力特性と整流方式出力特性例を示す。定常風速では、各風速での風車出力と発電機入力との交点が風車の運転点となる。図中の各風速の最大出力点を繋いだ実線で示す 3 乗曲線が、風車の有する最大出力である。

このことから、ギア等の機械損を無視すれば風車出力 = 発電機入力となるので、風から常に最大出力を得るためには、風車回転数に対する発電機入力特性が風車最大出力の 3 乗曲線に追従すれば良い。

〈2・2〉 従来の発電装置 従来の小型風力発電装置には、インバータ方式と整流方式がある。インバータ方式においては、発電機のトルク制御による可変速運転によって風車最大出力取得を実現している^③が、インバータ制御回路の制御電源に必要な待機電力と PWM 変換器のスイッチング損失により、低風速時には風車から取得できる最大電力よりも、消費する電力が多いために年間正味発電量が少なくなるという問題がある。

一般的に、風力発電システムにとっては、発電装置が負荷にとって利用しやすい直流電源へ出力するという形態が良い。このような場合に、永久磁石型発電機出力に整流器を接続した整流方式においては、Fig. 3 の点線に示すように、風速出現頻度が高い風速 5 m/s 以下では、風車回転数

Fig. 3. Maximum output of SW-VAWT and power characteristic of commutation method.

がその風速での最大回転数となっても、発電機出力電圧が負荷としての直流電源電圧よりも低いために出力が取り出せないという問題がある。

3. CC レス方式発電装置

〈3・1〉 CC レス方式の原理 風車最大出力を得るためには、(4) 式より、発電機入力（風車回転数に対して 3 乗特性を有する風車最大出力曲線）に追従するように、電気損失を考慮したうえで、発電機出力が取り出せれば良い。そこで CC レスは、制御電源を必要としない受動素子のみで Fig. 3 の実線と点線が重なるように開発した。

〈3・2〉 CC レス方式の主回路構成 CC レスとは、「Control Circuit less」または「Converter Circuit less」を意味し、多種類の巻線を内蔵して異なる誘起電圧実効値を発生する永久磁石型発電機、タップ付きリアクトルおよび整流器の受動素子のみで構成される。このように CPU やスイッチング素子等の制御電源を必要とする能動素子を使用していないのが、CC レスの大きな特徴である⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

Fig. 4 に CC レスの永久磁石型発電機が 2 種類の巻線を内蔵する場合の主回路構成例を、Fig. 5 には Fig. 4 に示す CC レスが負荷としての一定直流電源電圧に出力した時の入出力特性イメージを示す。

〈3・3〉 CC レス方式の負荷 CC レスは、直流電流を

Fig. 4. Main circuit configuration of CC-less.

Fig. 5. Characteristic image of CC-less.

出力する装置すなわち一種の可変直流電流源であり、その直流出力を CC レスとは別の装置によって構成される、負荷としての直流電源に出力する。

この負荷としての直流電源は、独立負荷（蓄電池等）でも系統連系負荷（一定直流電圧制御が可能な連系インバータ等）でも CC レスと接続ができる。負荷としての直流電源電圧がほぼ一定であれば、風が強くなり回転数が増加すると、CC レス特性に基づいて、直流出力が回転数に対して、ほぼ 3 乗特性で増加する。

しかしながら、負荷としての直流電源電圧値が大きくなると、電流が流れ難くなり、CC レス出力が減少する。逆に直流電源電圧値が小さくなると CC レス出力が増加し、増加し過ぎると風車が失速状態となる。

〈3・4〉 多巻線とリアクトルの組合せ効果 永久磁石型発電機においては、誘起電圧実効値の大小は、永久磁石による磁束の大きさが定まれば、固定子巻線の巻数と発電機回転数の大小により決まる。したがって、Fig. 5 において、巻数の多い W2 巻線の直流出力は、低い回転数 N2 から出力を開始し、発電機回転数の上昇により、Fig. 5 の青色点線で示す“W2 winding output”の“No reactor”のような出力になる。しかし、この状態で風車により CC レスの発電機を駆動しようとする、発電機トルクが風車トルクよりも大きくなるので、風車は失速状態となる。すなわち、風車の回転数は Fig. 5 の回転数 N2 付近に留まり、上昇しない。

そこで、W2 巻線に直列にリアクトルを挿入することにより電流を抑制すると、Fig. 5 の青色実線（一部は赤線と重なっている）で示す“Series reactor”のような出力となり、W2 巻線に風車 3 乗出力特性の低風速域の出力を担わせることができる。

また、巻数の少ない W1 巻線の直流出力は、風車の回転数が高くなってから出力を開始する。リアクトル 1 は、回転数の上昇により、大きな出力を取るために小さなインダクタンス値を持ったリアクトルで構成でき、内部インダクタンスが大きく設計された発電機の場合には、省略することも可能である。Fig. 5 の茶色実線で示す“W1 winding output”のように、W1 巻線は主として高風速域の出力を担わせることができる。

合計した出力は、Fig. 5 の赤線実線（一部は青線実線と重なっている）で示す“CC-less output”のようになる。

〈3・5〉 CC レス方式の設計方法 CC レスの設計は、有限要素法＋境界要素法による二次元磁界解析を用いて以下のように行った。まず、Fig. 2 に示すような風車性能を明らかにして、W1 巻線の発電開始回転数を定格回転数の半分程度に、W2 巻線の発電開始回転数を定格回転数の 1/4 程度にそれぞれ決定し、それらの回転数から各巻線の巻数と永久磁石の磁束の大きさを決定する。その後、回転数に対して 3 乗特性を有する風車最大出力特性に近似した CC レス発電機入力となるように、リアクトル 1 および 2 のインダクタンス値を決定する。

ここで、発電機的设计にもよるが、電磁界解析の結果によるとリアクトル2による電圧ドロップは、定格回転数においてW2巻線無負荷誘起電圧の75%程度の電圧ドロップが必要である。しかし、これらのリアクトルによる電圧ドロップは、全て損失になるのではなく遅相無効分が主なので損失としては小さい。

4. CC レス方式確認装置

〈4・1〉 飽和リアクトルによる特性改善 受風面積 5 m^2 のSW-VAWTの性能曲線を明確にして風車の最大出力に整合するように、CC レス方式確認装置を試作した⁽⁴⁾。

このCC レスの仕様は200rpm、1.8kW 発電機入力、始動ピークトルク $1.7\text{ N}\cdot\text{m}$ 、負荷の直流電圧 24 V である。

使用した発電機は、アウターロータの別用途電動機 (3 ϕ , 30P, 36 スロット, コア外径: $\phi 435$, ネオジウム磁石) の固定子巻線を、1 スロットに2種類の巻線を納めるように改造した。

風車の運用速度範囲は1対3.5有れば十分である。従って、CC レスの発電機においては、3種類の巻線を内蔵すれば3乗出力特性の近似を実現できるが、製造工数や周辺部品の増加はコスト高に繋がる。しかし2種類の巻線だと、特にFig.5の風車回転数N1付近と高回転数領域に示すように、黒色実線で示す理想的な3乗CC レス出力特性とCC レス出力 (=W2巻線出力 + W1巻線出力) に大きな乖離が見られる。

そこで、Fig.4に示すリアクトル2を飽和リアクトル、リアクトル1は非飽和リアクトルとしてCC レス出力の改善を図った。Fig.6は飽和リアクトルの特性例、Fig.7はW2巻線に飽和リアクトルを接続したCC レスの特性イメージである。風車回転数N1付近での大きな改善が図れ、理想的な3乗CC レス出力特性に近づけることができる。この飽和リアクトルの効果は、Fig.15において、類似した別の形式で実証する。

飽和リアクトルは、非飽和リアクトルと比べてリアクトル重量が減少するという長所もある。

〈4・2〉 CC レス方式確認装置の電気特性 Fig.8にCC レスの電気特性試験回路図を示す。電気特性試験では、駆動モータを可変速して、負荷としての直流電源電圧 24 V 一定の状態、回転数毎の発電機の入力トルクとCC レスの直流出力を測定した。

Fig.9にCC レス方式確認装置の電気特性試験結果を示す。横軸に発電機回転数、縦軸に入力 (発電機入力)、出力 (CC レス直流出力) および効率を示す。

この装置は、CC レスの整合性を確認するための装置なので、効率には拘らなく設計した。しかしながら、W2巻線の電流密度を下げることににより、出現頻度の高い低風速域における効率を上昇させた。

Fig.9の入力は、発電機回転数に対して、ほぼ3乗特性となっているので、この入力特性により、能動的な制御を行うことなく、風車より最大出力を取り出せる。

Fig. 6. Characteristic of saturation reactor.

Fig. 7. Characteristic image of CC-less with saturation reactor at W2 winding.

Fig. 8. Electric experiment circuit of CC-less.

Fig. 9. Electrical characteristics of CC-less.

5. 風車の整合性実験

Fig.1に示すフィールド実験を行っているSW-VAWTにCC レス方式確認装置を直結して、風車とCC レスの風車最大出力取得面での整合性について、検討・実験を行った。

定常的な整合性を確認するために、Fig.2の風車性能と、Fig.9のCC レスの入力を重ね合わせたものをFig.10に示す。Fig.10より、CC レスの入力是一定風速状態のSW-VAWTの最大出力と、良く一致していることが確認できる。

Fig.11にSW-VAWTとCC レス方式確認装置との変動

Fig. 10. Matching between SW-VAWT and CC-less.

Fig. 11. Result of matching test.

風速下の整合性実験結果を示す。2 sec 間隔のサンプリング毎に風速および CC レス出力を計測し、各測定値を風速 0.1 m/s 毎に区分けし、その風速毎の CC レス出力の平均値を実測値とした。

Fig. 11 より、実測値は装置損失のために実線の風車最大出力より下回っている。しかし、PWM 変換器による制御を行わなくとも、CC レス出力は、低風速から高風速まで、変動する風エネルギーによる風車出力の変動に対してよく整合し、風車最大出力が得られることが確認できる。

6. 整流出力に適した永久磁石型発電機

CC レスに適した同期発電機の回転子構造の定性的な検討を行った。回転子表面に電流が流れない構造で、一種類の固定子巻線を有する同期発電機のモデルは次の電圧方程式で表される。

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + pL_d & -\omega L_q \\ \omega L_d & R + pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} 0 \\ \phi \end{bmatrix} \cdots \cdots (5)$$

ここで、

v_d, v_q : 直軸および横軸固定子電圧

i_d, i_q : 直軸および横軸固定子電流

R : 固定子抵抗

L_d, L_q : 直軸および横軸インダクタンス

ϕ : 無負荷時の固定子巻線と鎖交する磁束の大きさ

ω : 回転子電気角速度

p : d/dt

Fig. 12. Structure of rotor.

であり、上式は回転子の磁束方向を d 軸とし、それと直交した方向を q 軸とした dq 座標で表されている。

励磁巻線付き界磁を有する凸極構造、永久磁石を回転子の表面に張り付ける磁石構造 (SPM)、および永久磁石を回転子の内部に挿入した埋め込み磁石構造 (IPM) に対して、(5) 式による解析が可能である。

Fig. 12 に解析対象とした回転子の代表的な構造を示す。

発電機出力をリアクトルを介さずに、直接、整流して直流電源に出力した場合のシミュレーションを、解析ツール PSCAD/EMTDC を用いて以下の条件で行った⁽⁶⁾。

(1) $L_d < L_q$ の関係を有する IPM 構造発電機の L_d および L_q の値を基にして、回転子構造が異なる場合の L_d および L_q を仮定した。

(2) IPM 構造は $L_d < L_q$ ($\omega L_d = 40\%$, $\omega L_q = 160\%$), SPM 構造は $L_d = L_q$ ($\omega L_d = \omega L_q = 40\%$), 励磁巻線付き界磁を有する凸極構造は $L_d > L_q$ ($\omega L_d = 160\%$, $\omega L_q = 40\%$) とし、固定子巻線に鎖交する磁束の大きさ ϕ は、どの構造でも変わらないとした。ここで、百分率は相電圧に対する各リアクタンスの電圧ドロップ分を表している。

(3) 発電機の磁気飽和は考慮せず、回転数は定格値一定とし、出力先の直流電圧値を変化させた。

Fig. 13 に結果を示す。縦軸は、IPM 構造 $L_d < L_q$ の発電機の定格値を 100% とした。結果より、 $L_d < L_q$ となるような IPM 構造の発電機の整流出力は、 $L_d = L_q$ となる SPM 構造の発電機よりも大きく、 $L_d > L_q$ となる励磁巻線付き界磁を有する凸極構造発電機と比べると、さらに大幅な出力増が可能である。

解析は L_d, L_q の大小関係と出力の大小関係を検討したものであり、容量や極数等が異なっても解析結果の出力の大小関係は成立する。

Fig. 13. Commutation generating power characteristic based on difference of L_d and L_q .

7. 2kWCC レス

〈7・1〉 電磁界解析ソフトによる解析 当社汎用の永久磁石型電動機の生産設備を利用して、安価な CC レス製作を目指した。Fig. 14 に、その永久磁石型電動機の構造を示す。

この電動機は、永久磁石を回転子内部に挿入した 6 極の $L_d < L_q$ の関係を有する埋め込み磁石構造 (IPM) なので、前章で述べたように、整流出力用発電機として有効である。

この電動機を 2 巻線方式の 2kWCC レスとして改造するべく、2kW 風車性能を明らかにし、ギア比および負荷としての直流電源電圧値を適正に選ぶことにより、風車から最大出力が得られるように、〈3・5〉節と同様の電磁界解析を行った。

Fig. 15 に、2kWCC レスの特性解析結果を示す。Fig. 15(a) は、Fig. 4 に示すリアクトル 1 および 2 を非飽和リアクトルとした場合であり、横軸に発電機回転数、縦軸に風車最大出力 “Maximum power”，CC レス出力 “Output power”，W1 巻線出力 “W1 winding Output”，および W2 巻線のリアクトル有無における出力 “W2 winding Output” (“No reactor at W2” の場合はその一部) を示す。

CC レス出力は、発電機回転数 360 rpm、および 600 rpm 付近で理想 3 乗曲線との大きな乖離が見られる。また、W2 巻線にリアクトルを接続しない場合は、風車出力よりも大きな出力となっている。このように、リアクトル 2 に飽和リアクトルを用いない場合には、Fig. 5 の CC レス入出力特性イメージに対応した出力特性となる。

Fig. 14. Cross-section of IPM.

Fig. 15. Characteristic discussion of CC-less.

そこで、Fig. 6 に示すような特性を持つ飽和リアクトルの接続による改善を解析した。その結果、前記 CC レス方式確認装置と異なり、巻線 W2 よりも巻線 W1 に接続するほうが、3 乗出力特性により近似することが分かった。

Fig. 15(b) に W1 巻線に飽和リアクトルを接続した場合の解析結果を示す。W1 巻線が発電を開始する発電機回転数を 330 rpm (No saturation reactor では 360 rpm) 付近に変更し、W2 巻線には非飽和リアクトルを接続した。発電機回転数 330 rpm、および 600 rpm 付近で、Fig. 15(a) と比べて、理想 3 乗曲線との乖離を減少させた CC レス出力となっている。

Fig. 16 に CC レス発電機の各巻線出力電流解析結果を示す。図において、各巻線に単独で電流を流す場合 (“...only”) に比べて、CC レス動作時すなわち同時に流す場合 (“2 winding...”) は各巻線とも電流が減少する。

この現象は、発電機内部インダクタンスおよびリアクトルにより各巻線電流が遅れ電流となり、この遅れ電流の無

Fig. 16. Current of CC-less Generator.

(a) CC-less generator (b) direct output panel

Fig. 17. Generator and direct output panel.

Fig. 18. Input and output power characteristic of 2 kW CC-less.

効分による固定子鎖交磁束の減少が相互に影響して、各巻線の誘起電圧が減少したことが原因である。この力率の悪い電流のために、新設計する場合には CC レス発電機の固定子スロット面積を大きくして、コイル断面積を大きくして銅損を小さくしなければならず、発電機は 2 割程度重くなることが予想される。

〈7・2〉 2kWCC レスの試作 上記解析結果に基づき、2kWCC レスを試作した⁷⁾。

この CC レスの仕様は 680rpm, 2kW 発電機入力, 始動トルク 1.1 N-m, 負荷としての直流電源電圧 48 V である。発電機は, 3 ϕ , 6P, 36 スロット, コア外径: ϕ 175, ネオジウム磁石を使用した。

Fig. 17 に 2kWCC レスの発電機, 直流出力盤をそれぞれ示す。直流出力盤は, リアクトル, ブレーカおよび整流器の受動素子のみで構成される。

Fig. 8 と同様な試験回路により測定した 2kWCC レスの入出力特性を Fig. 18 に示す。横軸に発電機回転数, 縦軸に

Fig. 19. Current wave form at CC-less.

入出力, 効率および参考に風車最大出力曲線を示す。CC レス入力が風車最大出力曲線に近似した特性となることが確認できる。

Fig. 18 の実験結果の “Output power” は, Fig. 15(b) の解析結果の “Output power” とほぼ一致している。

CC レス直流出力の効率は, 発電機入力に対して, ほぼ 80% 以上であることが分かる。この 2kWCC レスでも, 〈4・2〉節で述べた方法で, 出現頻度の高い低風速域での効率を上昇させた発電装置としている。この 2kWCC レスを種々の風車に適用した場合のフィールドデータについては, まとまり次第報告する。

Fig. 19 は, Fig. 4 の主回路構成に記す発電機巻線 W1 の電流 Iw1 と巻線 W2 の電流 Iw2, およびそれらを整流して並列接続した直流出力電流 Ib の波形を示す。発電機回転数は Fig. 18 の 450 rpm 付近であり, 電流 Iw1 と電流 Iw2 は発電機固定子の同スロットに納められた巻線の電流波形である。電流 Iw2 はリアクトル 2 のインダクタンス値が大きいために, 電流 Iw1 よりも大きな遅れとなり, より力率の悪い電流になっている。従って, 巻線 W2 の断面積は, 電流 Iw2 の有効分の大きさに比べて, 大きくしなければならない。

8. 風車と CC レスの整合状態の変更

CC レスは, CC レスと接続される負荷としての直流電源電圧値または風車と発電機のギア比を変更すると, 風車との整合状態が大きく変化する⁷⁾。

Fig. 20 は, 風車出力と CC レス入力との整合を説明するための図であり, (a) は発電機入力, (b) は発電機トルクで示したものである。Fig. 20(a) および (b) の, それぞれの “A” および “B” 点は同一動作状態を示す。例えば, 風速 10 m/s で, 整合が取れているときは A 点で運転されるので, 風速 10 m/s での風車最大出力が得られる (“Matching”)。

整合状態から直流電圧値のみを設計値 (Vdc) の 1.5 倍程度にすると, 動作点が右にシフトして B 点で運転され, 風速 10 m/s での最大出力よりも 2 割程度の出力減少となる (“Output decrease”)。逆に, 直流電圧値のみを半分程度にすると, 動作点が左にシフトするので, 風車は失速状態となり, 加速しないので出力が得られない (“Stall”)。

その他, 整合状態からギア比のみを増加すると, 動作点は失速の方向にシフトし, ギア比のみを減少すると, 出力

Fig. 20. Matching between wind turbine and CC-less.

Fig. 21. Generator input power in changing tap.

減少の方向にシフトする。

Fig. 21 に、タップ付きリアクトルのタップ変更による発電機入力の微小変更試験結果を示す。

このようにして、風車性能との微妙な整合を図ることができる。

これらの検討結果を裏返せば、負荷としての直流電源電圧値、ギア比およびリアクトルのタップ変更を適正に設計すれば、風車性能の異なる風車に対しても、同一 CC レスが適用可能であることを示している。

9. まとめ

風車と発電機の整合性に着目し、風車最大出力取得面で、風車との整合性が高い CC レス方式発電装置（以下、CC レスと称する。）の研究を行った。

研究に用いた発電機は、いずれも他用途電動機の巻線改造品であるが、リアクトルと組み合わせた解析・検討により CC レスを試作して実験を行った。さらに、CC レスの出力特性向上策および適用方法の検討に取り組み、以下のような成果が得られた。

(1) 風車特性に整合する CC レスを研究し、フィール

ド実験結果より、CC レスが風車最大出力取得の面で整合性が高いことが確認された。

(2) CC レスは、ギア比および直流電圧値を適正に選択することにより、風車出力特性が異なる種々の垂直軸型風車に適用できることが分かった。

(3) 整流方式に適した永久磁石型発電機の構造を明らかにし、2kWCC レスを試作した。発電機の始動トルクは 1.1 N-m となり、始動トルクの小さな風車との組合せにおいては、ギアで増速しなければならないことを考えると大きい値であり、多極化発電機が必要であることが分かった。

(4) CC レスで用いる発電機は、遅れ電流が流れる多巻線線を有するために 2 割程度重くなる。しかし、直線翼垂直軸型風車では、発電機は羽よりも下部に設置するために問題とはならない。

インバータが不要なので、初期コストの低減、および年間発電量の増大の面でも CC レスは整合性が高いと思われるので、今後、これらの定量的な検討を行っていく。また、水平軸型風車にも適用できると考えられるので、今後、実験により有効性を確認していく。

CC レスの問題点として、整流時の遅れ電流分による固定子巻線と鎖交する磁束の減少がある。この磁束の減少を回避し、発電機の小型化を図る方法として、進み電流分による磁束の増加が考えられる。

今後は、この進み電流分による磁束増加方法および多極化の検討等を行い、小型で始動トルクの小さい CC レス用発電機を開発していく予定である。

(平成 20 年 2 月 8 日受付, 平成 20 年 6 月 25 日再受付)

文 献

- (1) K. Seki, I. Usiyama, T. Nakagawa, S. Matamoto, and K. Sagara: "A Experimental About Matching of Wind Turbine and Generation System", The 20th Wind Energy Symposium, pp.160-163 (1998-11) (in Japanese)
関 和 市・牛山 泉・中川武彦・松本末晴・相良啓太:「小型風車と発電機の整合性に関する実験的研究」, 第 20 回風力エネルギー利用シンポジウム予稿集, pp.160-163 (1998-11)
- (2) K. Sagara, K. Nomoto, Y. Sasahara, and K. Seki: "An Application of Straight Blade Non-Articulated Vertical Axis Wind Turbine Generation Systems", The 25th Wind Energy Symposium, pp.177-180 (2003-11) (in Japanese)
相良啓太・野本耕祐・笹原雄二郎・関 和 市:「直線翼垂直軸型風力発電システムの実験的研究」, 第 25 回風力エネルギー利用シンポジウム予稿集, pp.177-180 (2003-11)
- (3) H. Chikaraishi, Y. Hayashi, and N. Sato: "A Variable Speed Control of the Induction Generator without Speed Sensor for Wind Generation", *T. IEE Japan*, Vol.110-D, No.6, pp.664-672 (1990-6) (in Japanese)
力石浩孝・林 洋一・佐藤則明:「風力発電用誘導発電機はの速度センサレス可変速制御」, 電学論 D, **110**, 6, pp.664-672 (1990-6)
- (4) T. Siota, T. Sano, and K. Seki: "Experimentally Optimizing the Matching between Straight Wing Non-Articulated Vertical Axis Wind Turbine Generation Systems and the Generator", Proc. of 2005 Annual Conference of Power & Energy Society, IEE Japan, No.259 (2005) (in Japanese)
塩田 剛・佐野 孝・関 和 市:「直線翼垂直軸風力発電システムと発電機の整合性に関する研究」, 平成 17 年電気学会 B 部門大会, No.259 (2005)
- (5) T. Siota, K. Tanaka, T. Isaka, and K. Seki: "A study of the Matching between Straight Wing Non-Articulated Vertical Axis Wind Turbine Generation Systems and the Generator", Proc. of JSES/JWEA Joint Conference, No.28 (2005) (in Japanese)
塩田 剛・田中啓太・井坂 勉・関 和 市:「直線翼垂直軸型風車と発電機の整合性に関する研究」, 2005 年太陽/風力エネルギー講演論

文集, No.28 (2005)

- (6) T. Siota, T. Isaka, and K. Seki: "A Development of the New Type Generating Unit for Wind Turbine Generator System", Proc. of 2007 Annual Conference of Power & Energy Society, IEE Japan, No.392 (2007) (in Japanese)
塩田 剛・井坂 勉・関 和市:「新型風力用発電装置の開発」,平成 19 年電気学会 B 部門大会, No.392 (2007)
- (7) T. Siota, T. Isaka, and K. Seki: "Experimentally Optimizing the Matching between Wind Turbine Generation Systems and the Generator", The 28th Wind Energy Symposium, pp.429-432 (2006-11) (in Japanese)
塩田 剛・井坂 勉・佐野 孝・関 和市:「風力発電システムと発電機の整合性に関する実験研究」,第 28 回風力エネルギー利用シンポジウム予稿集, pp.429-432 (2006-11)

塩田 剛 (正員) 1945 年 3 月 2 日生。1970 年 3 月九州大学電気工学科卒業。同年東洋電機製造 (株) 入社。技術研究所にて電気機械およびパワーエレクトロニクスの研究・開発に従事。現在は研究センターに所属して、風力発電システム用発電機の研究・開発に従事。日本風力エネルギー協会会員。

井坂 勉 (正員) 1980 年 10 月 19 日生。2003 年 3 月千葉工業大学工学部電気工学科卒業。2005 年 3 月同大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年 4 月, 東洋電機製造 (株) に入社。現在, 研究センター新技術リサーチグループに所属。主に, 風力用発電機の特性解析, 特性実証試験に従事。日本風力エネルギー協会, 日本太陽エネルギー学会会員。

佐野 孝 (非会員) 1950 年 9 月生。1974 年 3 月芝浦工業大学工学部電気工学科卒業。1976 年 3 月芝浦工業大学大学院工学研究科卒業。同年 4 月東洋電機製造 (株) 入社。技術研究所を経て相模製作所鉄道設計部にて主に車両用インバータ装置の設計に従事。現在, 研究センターセンター長。

関 和市 (正員) 1963 年東京大学宇宙航空研究所航空力学部, 1976 年東海大学産業科学研究所, 1991 年東海大学開発技術研究所, 1997 年東海大学総合科学技術研究所。超音速空気力学, 応用空気力学, 大気拡散, 人力飛行機に関する研究, エネルギー変換工学, 風車工学, 風力発電システムおよび新エネルギー利用工学に関する研究を行っている。現在, 日本風力エネルギー協会会長。教授。工学博士。