

風力発電装置の整合性研究

A matching study on the wind turbine generator

塩田 剛^{*1} 井坂 勉^{*1} 丸山一樹^{*1} 三嶋礼二郎^{*1} 関 和市^{*2}
 Takashi SHIOTA Tsutomu ISAKA Kazuki MARUYAMA Reijiro MIKAMO Kazuichi SEKI

Abstract

A generator which has high matching with wind turbines has been developed recently. This new wind turbine generator (hereinafter referred to as CC-less) consists of a permanent magnet generator, a reactor and a rectifier. CC-less was directly coupled with the straight wing non-articulated vertical axis wind turbine (SW-VAWT) and matching between CC-less and the wind turbine was examined through field tests. From the test results and review, it has been confirmed that CC-less has high matching with the wind turbine under fluctuating wind speed. According to this paper, CC-less can be matched with propeller-type wind turbines, from the electrical test result the system combined CC-less with interconnection inverter has high matching with the power curve of wind turbine, CC-less is low initial cost, and annual net energy production of CC-less is larger than that of other generator.

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

Key Words : Wind turbine generator, Permanent magnet generator, Control circuit less, Rectifier, Matching

1. はじめに

近年，天然資源枯渇によるエネルギー源の確保，および地球温暖化阻止の観点から風力発電は急速な拡大を見ている。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（発電機＋直流出力装置を指すこととする）においては，以下のような個々のまた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 初期コストおよび故障・復旧に係るコストが高い。
- ③ 年間正味発電量が少ない。

これらの問題点を念頭に置き，風車との整合性が高い発電装置の研究を行い，制御回路とPWM変換器が不要な新型風力発電装置を開発した。以下，この新型風力発電装置をCCレス(Control Circuit Less—制御回路レスを意味する)と称する。直線翼垂直軸型風車(SW-VAWT, straight wing non-articulated vertical axis wind turbine)の出力性能に合わせたCCレスを試作し，SW-VAWTと組み合わせてフィールド実験を行った。その結果より，CCレスは，特に前記問題点①に対して風車との整合性が高い発電装置であることがわかった⁽¹⁾。

本論文では，CCレスの水平軸型風車への適用可能性，CCレスを連系インバータと接続したときの電気特性，CCレスの初期コストならびに年間正味発電量に対する整合性について検討を行った。

2. CCレス方式発電装置⁽¹⁾

2.1 CCレス方式の原理 風車の周速比 λ ，風車が最大出力を発生する風車回転数 $N_{(opt)}$ ，各風速における風車出力 W ，各風速における風車最大出力 $W_{(max)}$ は，各々(1)～(4)式で与えられる。

$$\lambda = \frac{2\pi \times N \times R}{V} \quad (1)$$

$$N_{(opt)} = \frac{\lambda_{cp\max} \times V}{2\pi \times R} = K_1 \times V \quad (2)$$

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

$$W_{(max)} = K_2 \times N^3 \quad (4)$$

ここで， R ：風車半径[m]， N ：風車回転数[rps]， $N_{(opt)}$ ：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， λ ：周速比， $\lambda_{cp\max}$ ：出力係数 C_p が最大となる周速比 λ ， ρ ：空気密度[kg/m³]， W ：風車出力[W]， $W_{(max)}$ ：各風速 V における風車最大出力， A ：風車

^{*1} 東洋電機製造(株)研究センター
〒236-0004 神奈川県横浜市金沢区福浦3-8
e-mail:siota@toyodenki.co.jp

^{*2} 東海大学総合科学技術研究所教授
(原稿受付：2010年1月25日)

受風面積[m²], K_1, K_2 : 比例定数である。

一般に, (4)式に基づいて風車最大出力を得るためには, インバータによる風車可変速運転およびトルク制御が行われる。インバータを用いずに風車最大出力を得るためには, (4)式より, 発電機入力 P_{in} が風車回転数 n に対して3乗特性を有する風車最大出力 P_{max} 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 P_{out} が取り出せれば良い。そこで(1) 風車特性を把握した上で, (2) 発電機の固定子巻線の巻数が異なると誘起電圧値が異なることと, (3) 発電機入力は整流回路のリアクタンス値によって異なる飽和曲線となることを利用して, 入力特性が理想的な3乗特性になるようにCCレスを開発した。(1)

2.2 CCレスの主回路構成 CCレスは, 多種類の巻線の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, 外部リアクトルおよび整流器の受動素子のみで構成される。Fig.1にCCレスを構成する永久磁石型発電機が2種類の巻線の内蔵する場合の主回路構成例を, Fig.2にはFig.1に示すCCレスが負荷としての一定直流電圧電源に出力した時の入出力特性イメージを示す。Fig.2では風車とCCレス発電機は直結されているとした。

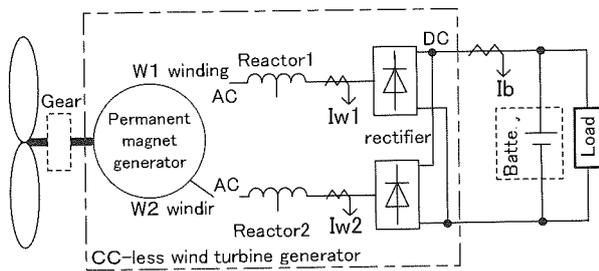


Fig.1 Main circuit configuration of CC-less

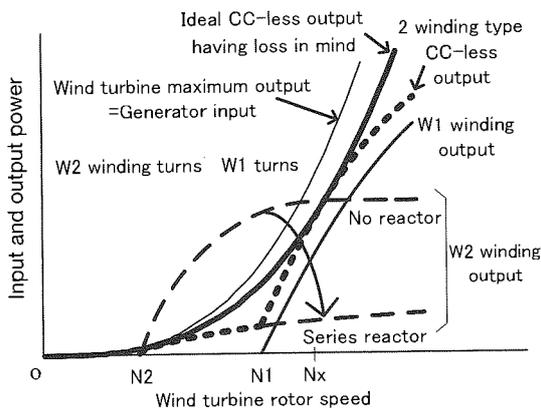


Fig.2 Characteristic image of CC-less

2.3 CCレスの入出力特性 Fig.3に他用途電動機の巻線のみを改造した2kW CCレスの入出力特性試験結果を示す。Fig.3では, CCレス発電機は損失のないギア(ギア比=2.95)で風車と接続されるとして, 各風速における風車特性と重ねて示す。横軸に風車回転数, 縦軸に入力(発

電機入力), 出力(CCレス直流出力)および風車最大出力である3乗特性を示す。Fig.3のCCレス入力 P_{in} は, 風車回転数 n に対して, 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。

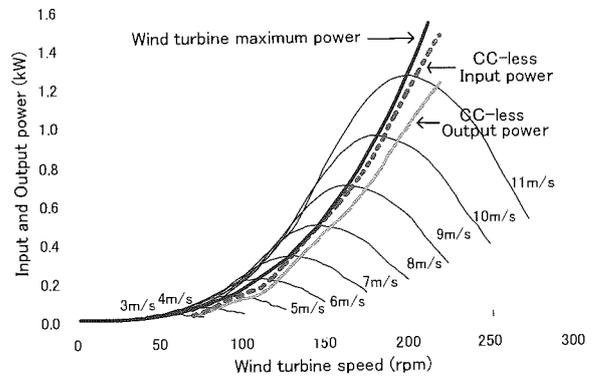


Fig.3 Input and output power characteristic of CC-less

Fig.4に風車最大出力特性とCCレス発電機入力特性を用いた運転特性イメージを示す。定常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。例えば, CCレスを風車と接続した場合, ある風速 V_{AB} ではB点で風車が運転される。理想的な3乗特性との出力差は, Fig.4の風車最大出力 P_A とCCレス入力 P_B の差となる。

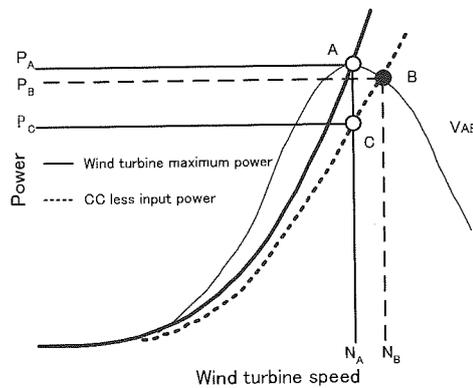


Fig.4 Characteristic image of wind turbine output and CC-less input

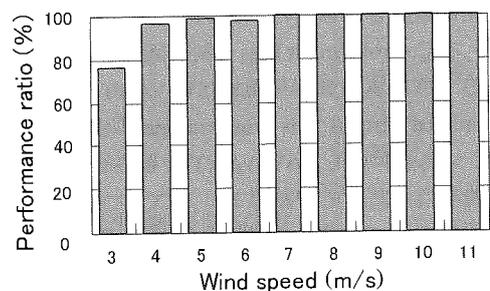


Fig.5 Performance ratio of CC-less input to wind turbine maximum output

この時、風車回転数は N_A から N_B に増加することになり、同一風車回転数では大きな出力差 ($P_A - P_C$) となるが、風車と組み合わせた場合には小さな出力差となる。

Fig.3 の各風速における風車最大出力に対する CC レス入力 (Fig.4 における P_A に対する P_B の比) を Fig.5 に示す。この結果から、その差は非常に小さく、実質的な出力の得られない低風速を除いて、CC レスの入力特性が理想的な 3 乗特性に一致しているといえる。

3. 水平軸型風車への適用

指向性を有する水平軸型風車の風車最大出力取得方法を検討した。Fig.6 に、水平軸型風車の回転面と風の気流との傾きの角度、すなわち風の傾き角度 θ を示す。

Fig.7 に、水平軸型風車における風車の出力係数 C_{PY} と周速比 λ_Y の関係を風の傾き角度 θ をパラメータにして示す⁽²⁾。ここでは、風車回転面を、流れに垂直な面に投影した面積を通過する流れの運動エネルギーを入力として考えている。

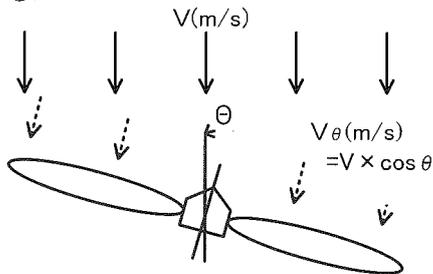


Fig.6 Wind speed in horizontal axis wind turbine

ここで、Fig.7 における風車の出力係数 C_{PY} および周速比 λ_Y は次式で表される。

$$C_{PY} = \frac{W}{\frac{1}{2} \rho \times A \times \cos \theta \times V^3} \quad (5)$$

$$\lambda_Y = \frac{2\pi \times R \times N}{V} \quad (6)$$

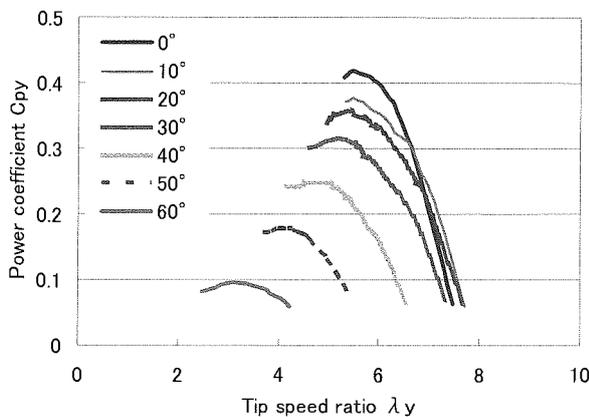


Fig.7 Tip speed ratio in wind speed of propeller⁽²⁾

次に、風車回転面を通過する流れの運動エネルギーを入力として考える。(5)式の風車の出力係数 C_{PY} を $\cos^2 \theta$ で除した値を C_p とすると、このときの風車の出力係数 C_p は(7)式で表される。

$$C_p = \frac{W}{\frac{1}{2} \rho \times A \times (V \times \cos \theta)^3} \quad (7)$$

風車回転面に垂直な風速 V_θ は次式で表される。

$$V_\theta = V \times \cos \theta \quad (8)$$

したがって、風車回転面に垂直な風速 V_θ を基準にすると、周速比 λ は次式で表すことができる。

$$\lambda = \frac{2\pi \times R \times N}{V \times \cos \theta} = \frac{2\pi \times R \times N}{V_\theta} \quad (9)$$

風車によって得られるエネルギーは、風車回転面に垂直な風速 V_θ によって与えられるとして、Fig.7 の関係を風車の出力係数 C_p と周速比 λ で表すと Fig.8 のようになる。すなわち、Fig.7 において $C_p = C_{PY} / \cos^2 \theta$ 、 $\lambda = \lambda_Y / \cos \theta$ として計算すると Fig.8 が得られる。

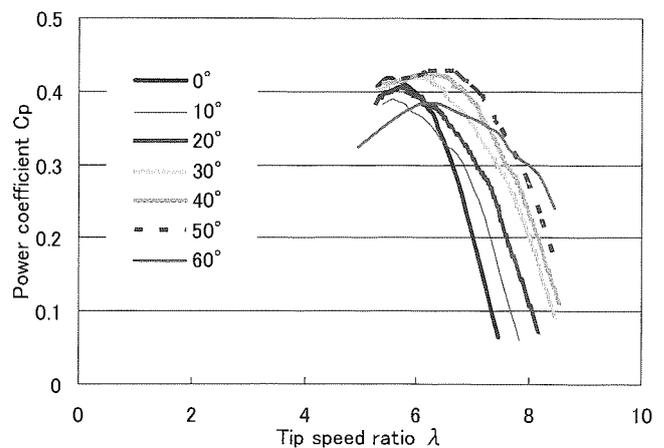


Fig.8 Tip speed ratio in wind speed perpendicular to the plane of propeller rotation

Fig.8 において風の傾き角度 θ が大きい時に、出力性能が風の傾き角度 $\theta=0$ における値よりもずれているのは、Fig.7 のデータにおいて、風の傾き角度 θ による風車まわりの流れ場の違いや垂直速度成分が小さくなることによるレイノルズ数の効果が原因と考えられる。

Fig.8 は、水平軸型風車において風の傾き角度 θ があっても、風車回転面に垂直な風速 $V_\theta = V \times \cos \theta$ を考えれば、常に風の傾き角度 $\theta=0$ の時とほぼ同一の出力係数 C_p と周速比 λ に基づいて、各風速から最大出力を得ることができることを表している。同一主旨の報告として、ヨー角度の変化による出力の変化はヨー角度の余弦の 3 乗になるという

報告がある⁽³⁾。

CCレスは、一定の出力係数 C_p と周速比 λ の関係に基づいて、風車最大出力が得られるように設計されている。したがって、CCレスは垂直軸型風車および風向変動の影響を受ける水平軸型風車において、変動風速下においても、風車最大出力を得ることができる。

4. CCレスの負荷

4.1 CCレスの負荷構成 CCレスは、直流電流を出力する装置すなわち一種の変可直流電流源であり、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。この別の装置として、Fig.1のような独立負荷(蓄電池+負荷)、またはFig.9およびFig.10のような系統連系負荷(一定直流電圧制御が可能な連系インバータを用いた系統出力負荷)が挙げられる。

直流負荷としての直流電源電圧値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。

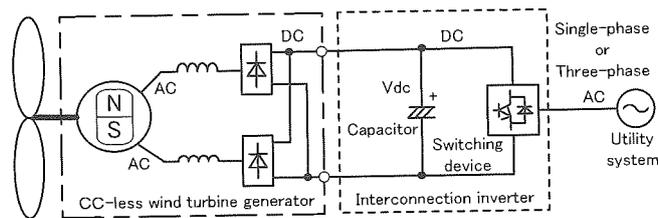


Fig.9 CC-less and interconnection inverter

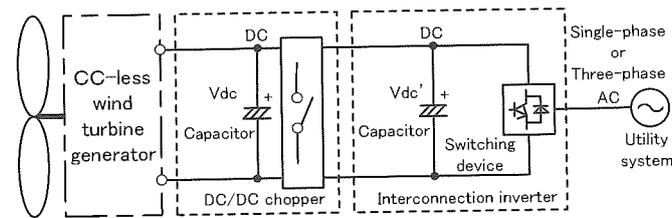


Fig.10 CC-less ,chopper and interconnection inverter

連系インバータは、系統電圧を歪ませないために正弦波状の電流を流すことが望ましい。したがって、連系インバータの直流電圧値は、系統交流電圧のピーク値よりも高いことが必要である。CCレスに必要な負荷としての直流電源電圧値 V_{dc} と連系インバータに必要な直流電源電圧値 V_{dc}' が異なる場合は、Fig.10に図示するように負荷としての直流電源電圧値 V_{dc} をDC/DCチョッパーで連系インバータに必要な直流電圧値 V_{dc}' まで昇圧または降圧するか、CCレス発電機設計時に連系インバータに必要な直流電圧値 V_{dc}' を考慮した発電機誘起電圧値の設計を行えば良い。

4.2 連系インバータと接続したCCレスの電気出力特性

CCレスの直流出力側に直流電圧一定制御機能を有する連系インバータを接続して電気出力特性を測定した。Fig.11に電気特性試験回路図を示す。ここでは、CCレスの負荷としての直流電源電圧値と連系インバータに必要な直流電圧値 V_{dc}' を合わせるために、DC/DCチョッパーではなく、発電機のW1およびW2巻線出力に昇圧トランス($Tr1, Tr2$)を接続する方法を用いた。本試験で用いたCCレスは2.3節で説明したCCレスである。

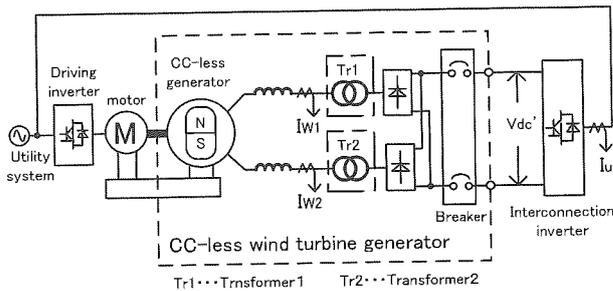


Fig.11 Electrical experiment circuit of CC-less and interconnection inverter

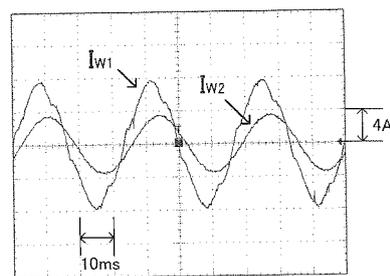


Fig.12 Current wave form at CC-less generator

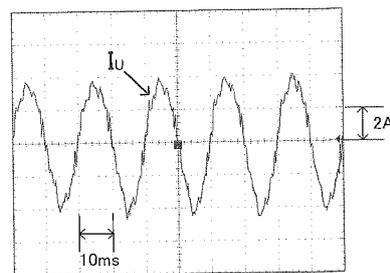


Fig.13 Utility grid current wave form at interconnection inverter

Fig.12およびFig.13は、CCレス発電機回転数600rpm(電気周波数30Hz)、負荷としての直流電源電圧(Fig.11の V_{dc}')120Vにおける電流波形である。Fig.12はCCレス発電機の実出力電流 I_{w1}, I_{w2} (Fig.11参照, at 30Hz) を、Fig.13は連系インバータの系統出力電流 I_u (Fig.11参照, at 50Hz) をそれぞれ示す。 I_{w1} は I_{w2} の2倍程度多く流れている状態の波形であり、特性イメージ図であるFig.2において回転数が N_x 付近における各波形に相当する。

Fig.14はCCレスと連系インバータを接続して、発電機回転数を可変させたときの入出力特性である。CCレス発電機入力からCCレスと連系インバータの損失を除いた出力が連系インバータ出力である。Fig.14ではFig.3に比べると理想的な3乗特性との乖離が大きいですが、これは試験に用いた昇圧トランスのドロップ等の影響によるものと考えられる。発電機回転数が600rpm位までは、CCレス発電機入力は3乗特性になっていることが分かる。

したがって変動風速状態においても、(4)式に基づいて、直流電圧一定制御機能を有する連系インバータと組み合わせて風車から最大出力を得ることができる。

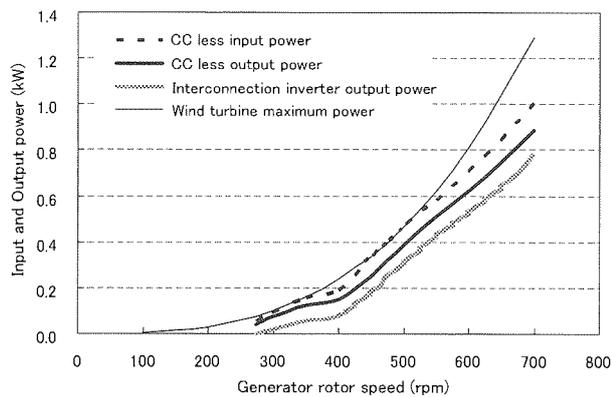


Fig.14 Input and output power characteristic of CC-less and interconnection inverter

5. コストの比較

問題点②の一部である初期コストについて、東洋電機製造(株)の資料を参考にして、1.25kW 発電装置について検討した。CCレス発電機自体は2種類の巻線を内蔵するために、他の方式の発電機と比べて2割程度重く、しかも高価となる⁽¹⁾。ここでは負荷としての直流電源に出力する発電装置(整流方式は発電機+整流器、CCレスはFig.1に一点鎖線で囲む部分、インバータ方式は発電機+インバータ)までで各方式の初期コスト比較を行った。比較結果より、CCレスの初期コストを100%とすると、整流方式60%、インバータ方式210%となった。CCレスは整流方式よりは高いがインバータ方式よりは安価となるので、初期コストの面で整合性が高いことが分かった。

また、全体の部品点数が少ないCCレスは、問題点②の一部である故障・復旧に係るコストの面でも整合性が高いと推論する。

6. 各方式の年間正味発電量の比較

小型風車においては、CCレス方式、インバータ方式、整流方式の設置が考えられる。検討対象を市街地風車としたので、安定した高風速地域で用いられる誘導発電機の系統直結方式は検討対象から外した。各方式の実際に得られ

る年間正味発電量の試算・比較を以下の条件にて行なった。

- (1) 各発電装置の性能比較はFig.15の風車出力特性に基づいて行い、風車との直結方式で比較する。
- (2) インバータ方式の発電機入力は、Fig.15の風車最大出力特性と同一、整流方式の発電機入力はFig.15の点線と同一、CCレス方式の発電機入力は、試作したFig.3の点線で示す“CC-less input power”の特性とする。
- (3) バッテリー等の一定直流電圧値を有する直流電源への充電量で比較する。
- (4) 市街地を対象として平均風速=4m/sとし、風の出現率はレイリー分布を仮定する。
- (5) 1.25kW風車(定格風速11m/s)を比較対象とする。通常、小さい容量のインバータほど、その制御回路電源の消費電力割合が多くなるので、1.25kW風車ということをあえて明記する。
- (6) 発電開始および終了は、風速3m/sおよび風速11m/sとし、風速変動は考慮せずに平均風速で考える。インバータ方式では、正確に風速3m/sから発電開始というのは実際には困難なので、風速1m/sからのアシスト駆動(強制的に回す)を行う方式とする。
- (7) 試算に用いた各装置の効率は、東洋電機製造(株)の永久磁石型発電機およびインバータの効率を参考にした。各方式の定格における効率および損失を以下に示す。
 - a), CCレス方式：発電機効率=89%、直流出力部(リアクトル+ダイオード)損失=5%。
 - b), インバータ方式：発電機効率=89%、インバータ(PWM変換器+制御回路)効率=91%
 - c), 整流方式：発電機効率=89%、ダイオード損失=3%。
- (8) 全ての方式において、風車、バッテリー等の制御のための年間消費電力量を一律1%×24Hr×365日とする。
- (9) 平均風速4m/sとした時、レイリー分布における風速11m/sまでの出現率合計は99%である。そこで風速11m/sまでに、風車から得られる年間最大エネルギーを100%とする。

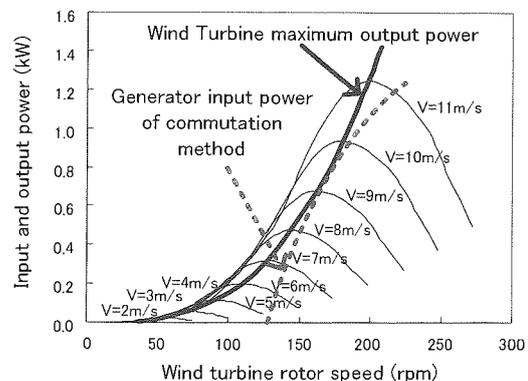


Fig.15 Maximum output of SW-VAWT and power characteristic of commutation method

風車より得られる年間最大エネルギーに対して、電気損失を考慮して試算した結果を Fig.16 に示す。Fig.16 より、CC レスでは 64%、インバータ方式では PWM 変換器の損失が大きいため 30%、従来整流方式では低風速で出力が得られないために 7%の年間正味発電量となった。この結果、CC レスは従来発電装置の問題点③を解決する方式であることが分かる。

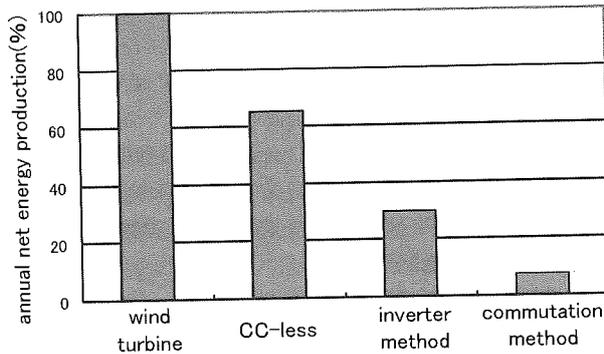


Fig.16 Comparison of annual net energy production
(mean wind speed=4m/s, wind turbine=1.25kW)

7. まとめ

風車と発電機の整合性に着目して開発した CC レス方式発電装置⁽¹⁾について、水平軸型風車への適用可能性、連系インバータとの整合性、コスト、ならびに年間正味発電量に関する検討を行った結果、以下の事柄が判明した。

- (1) 指向性を有する水平軸型風車においても、風車回転面に垂直な風速 $V_{\theta} = V \times \cos \theta$ を考えれば、常に風の傾き角度 $\theta=0$ の時とほぼ同一の出力係数 C_p と周速比 λ に基づいて、各風速から最大出力を得ることができる。したがって、一定の出力係数 C_p と周速比 λ の関係に基づいて風車最大出力を得ることができる CC レスは、水平軸型風車にも適用可能である。
- (2) CC レスと直流電圧一定制御機能を有する連系インバータを接続した場合においても、CC レス入力回転数に対して 3 乗特性となることから、連系インバータを用いた CC レスシステムも、風車から最大出力を系統に出力可能である。
- (3) CC レスは、年間正味発電量が非常に少ない整流方式よりは高価となるが、インバータ方式の半分以下の初期コストで製作できるとともに、年間正味発電量は他の方式よりも多い。したがって、風車最大出力取得面で風車との整合性が高い CC レスは、風車との整合性が総合的に高い。

参考文献

- (1) 塩田 剛, 井坂 勉, 佐野 孝, 関 和 市:「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」, 電気学会論文誌 B, 平成 20 年 11 月, pp.1350-1358
- (2) 清水幸丸著:『風力発電技術』, 第 2 編 水平軸風車の諸特性の風洞実験による解明 第 3 章 風車性能と風車翼平面形状の関係 図 3-1, パワー社, 1999 年 9 月 30 日発行
- (3) 鳥谷 隆, 沖野誠心, 渡辺公彦, 大屋裕二:「風向変化に対する風車の応答について」, 第 30 回風力エネルギー利用シンポジウム, pp.183-186, 平成 20 年 11 月