

コイル接続変換によるカスタムメイド 小型風力発電機の提案

Proposal of a custom-made small wind generator varying a coil connection

高橋 俊行 *¹ 竹田 哲紘 *² 安田 陽 *³ 大本 親吾 *⁴
Toshiyuki Takahashi Akihiro Takeda Yoh Yasuda Shingo Ohmoto

Abstract

Small wind turbines have been paid attention as distributed power generations in recent Japan. However, there raised a problem that the turbines do not always produce enough energy in weak-wind sites like urban residential areas. This seems to be because a mismatch between the wind generator's power rating and wind condition at its installing sited. This paper therefore proposes a new design method of a small wind generator without any active controllers where a connection of armature coils is simply changed with common generator structure and the other components. A theoretical analysis is also verified.

As a result, it is clarified that a three-phase 2-series-3-parallel Y-connection generator can produce the largest power to a 12V secondary battery at the site with 6.0 m/s average wind. Also, a three-phase 6-series Y-connection is clear to be the best for 2.0 m/s average wind area. In this manner, the proposed method is expected to help for design strategy of small wind generator suitable for various wind conditions.

キーワード：小型風車，都市型風力発電，コアレス同期発電機，電機子コイル，蓄電池

Key words：small wind turbine, urban wind power generation, coreless synchronous generator, armature coils, secondary battery

変数リスト

v	磁界中を通過する導体の速度, [m/s]
B	磁束密度, [T]
l	磁界を通過する導体の長さ, [m]
e	誘起起電力, [V]
r	コイル中心部の回転半径, [m]
h	磁石の高さ, [m]
n	回転速度, [min^{-1}]
E	導体 1 本あたりの速度起電力の実効値, [V]
s	電機子コイルの直列数
p	電機子コイルの並列数
N	コイル巻き数
Z_c	コイル 1 スロット分の内部抵抗値, [Ω]
Z	負荷抵抗値, [Ω]
E_{ac}	線間電圧実効値, [V]
E_{dc}	出力電圧平均値, [V]
I_{dc}	出力電流平均値, [A]
P_{dc}	出力電力平均値, [W]

n_w	風車の回転数, [min^{-1}]
V	風速, [m/s]
λ	周速比
R	風車の回転半径, [m]
η_{EP}	蓄電池の電力利用率, [%]
P_V	風速 V における発電機出力, [W]
P_{Vmax}	風速 V で発電機がとりうる最大出力電力, [W]

1. はじめに

風力発電の普及に伴い，日本においては国土の関係上，都市部での小型風車を用いた独立分散型電源としての風力発電が注目されている。しかし，都市部であるため，特有の弱風・乱流といった風況が存在し，また小型風力発電ということから，大型風力発電ほどの十分な風況調査が資金的な点などで行なわれ難いことがある。そのため，都市部の風況に風力発電システムの性能が一致せず，十分な電力が得られないという問題が発生している⁽¹⁾。例えばつくば市では小型風車を導入したが，回らないということから行政訴訟にまで発展した問題は記憶に新しい⁽²⁾。このようなミスマッチの理由として次の要因が挙げられる。

- ・ 現在生産されている多くの小型風車は風速 11.0 ~ 14.0 m/s で定格出力となるように設計されている。例えば，ゼファー(株)のエアドルフィン Mark-Zero では定格風速

*1 (株) マザーズ (〒577-0046 大阪府東大阪市西堤本通西1-7-12)
e-mail: t-takahashi@msja.co.jp

*2 関西大学大学院工学研究科大学院生

*3 関西大学システム理工学部准教授 yasuda@kansai-u.ac.jp
(原稿受付: 2007年8月31日)

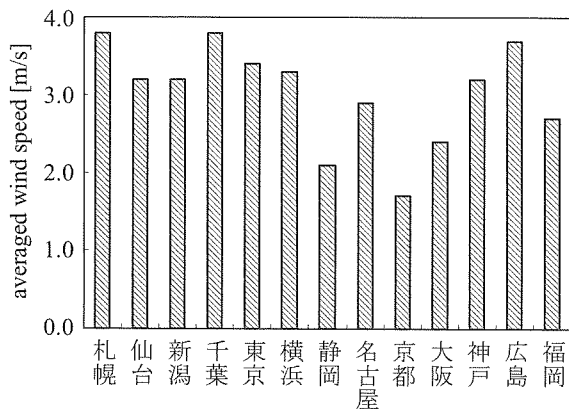


Fig.1 Averaged wind speed of years in 2006.

が 12.5 m/s⁽³⁾, 神鋼電機(株)のそよ風くんでは定格風速が 12.0 m/s⁽⁴⁾, ニッコー(株)の NWG-200 では定格風速 8.0 m/s⁽⁵⁾となっている。

- ・ 一般に都市部では図 1 のように年平均風速が 2.0 ~ 4.0 m/s と非常に弱風であり⁽⁶⁾, 上記のような定格で設計された風車では十分に性能が発揮できない。
- ・ 小型風車の場合, 一般に DC12V 蓄電池を併設することが多いが, 従来の発電機では低速回転領域で蓄電池の充電に十分な 12V という電圧を出力させることは非常に困難である。
- ・ 従来では出力が 12V に満たない低出力時にはコンバータ回路等で昇圧する方法が一般的ではあるが, 定格よりだいぶ低い低速回転領域でのコンバータ効率著しく低下し, 大きな損失となることが予想される。

このような問題点を解決するためには, 低風速でも十分な高い出力電圧を発生し, 無制御でも効果的に蓄電池を充電できるような発電機設計法の確立が重要になってくる。この中でも特に, 風車を設置するサイトの風況の十分な調査と, それに即した発電機の設計・選定など風力発電システムとのマッチングが必要である。風車ブレードと発電機性能のマッチング, あるいは蓄電システムとの整合性に関する研究については, これまでも様々な解決手法が提案されているが^{(7),(8)}, 設置サイトの風況と発電機設計の整合性までを考慮に入れたシステム設計の提案は非常に少ない。

例として, 図 2 は大阪府吹田市にある関西大学千里山キャンパス内の 4 階建て(地上高 14.2 m)および 10 階建て(同 32.9 m)のビル屋上で 2006 年に観測した風況観測結果である。この観測例から分かるように, 都市平野部の一般的な居住地においては 10 分間平均値で 8.0 m/s を超える風が吹くことは殆どない。そのため, このような地域に定格風速 12.0 m/s 前後の風車を設置しても, 定格出力に比較した十分な電力が得られず, 完全にオーバースペックであることは容易に予想できる。

従来, 風車ブレードと発電機性能のマッチングに関しては, コンバータ等の制御システムを用いてアクティブに制御する方式が多く用いられている。一般にパワーエレクト

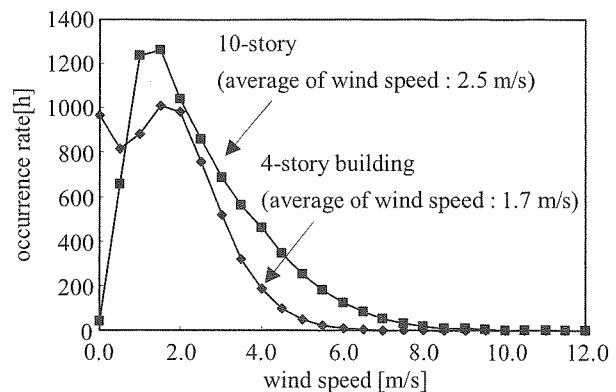


Fig.2 An observation example of wind occurrence rate.

ロニクス機器の効率は定格時で 90 %前後と高い効率で設計されているが, 基本的には定格での使用を想定しているため, 風力発電のように変動が激しくかつ必ずしも常時定格付近での運転が望めない使用形態において, コンバータ部での電力損失がどれほどであるかはこれまで詳しく議論されていない。特に定格風速を 12.0 m/s 前後で設計した風車の場合, 図 1 や図 2 のような風況の都市部に導入すると, 定格風速の違いによる出力低下に加えて, コンバータ部での損失も非常に大きくなり, 結果的に効率も設備利用率も大きく低下することが懸念される。

このような視点から, 現在, コンバータ等の制御システムを用いない風力発電機の開発がいくつかの機関で行なわれている。例として, 電機子コイルの接続をリレー等で直並列に切り替えて極数変換することで負荷のミスマッチを解消する研究や⁽⁹⁾, 発電機に複数の電機子コイルを用い, 設計時の組み合わせで風車最大出力に沿った出力を得る研究などがある⁽¹⁰⁾。

本研究では, このようなコンバータレスの風力発電機の設計方針の立場に立ち, コンバータによる制御に頼らずに設置サイトの風況に適合した発電機の設計方法を理論的に検証する。基本的な設計思想として, まず, 発電機製造時における電機子コイル接続法の最適な選定のみによって, 設置サイト風況にマッチングさせるカスタムメイド方式を提案する。このような方式にすることで, 以下のような利点を持つことが予想される。

- ・ 個々の設置サイトの風況に即した発電機設計のため, オーバースペックによる風況ミスマッチがない。
- ・ コンバータレス方式により運転時の損失低減が見込める。
- ・ 製造時に変更する点は電機子コイル接続のみのカスタムメイドであるため, 同一筐体で他の構成部品を共通化することができ, 大量生産時には量産効果によるコストダウンが期待できる。

本論文では, 上記の設計方式の具体化のため, 特に筆者らが開発したラジアル型コアレス発電機⁽¹¹⁾(図 3 参照)に対して理論的検証を行なう。なお, ここで示す理論は従来の

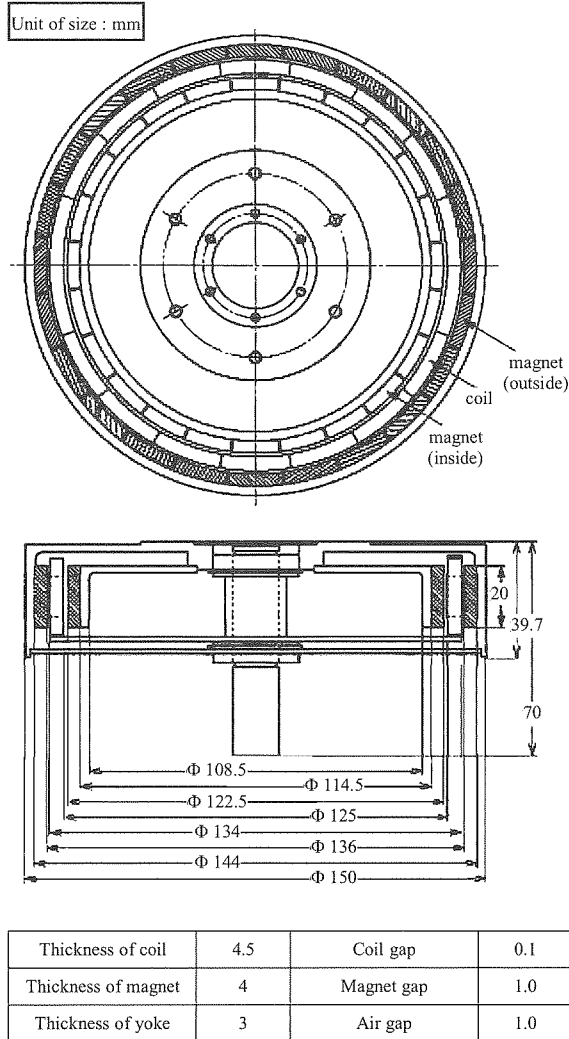


Fig.3 Structural drawing of radial coreless synchronous generator.

アキシャル型コアレス発電機^{(12)~(14)}に対しても十分適用可能であり、また、一般的に普及している鉄心型同期発電機にも拡張が可能な理論である。

2. コアレス発電機の理論計算

2.1 コアレス同期発電機

一般に、磁界中を導体が通過する際に発生する誘起起電力 e は、

$$e = \int v B dl \quad \dots\dots\dots (1)$$

で表される。アキシャル型コアレス同期発電機の場合、発電機の中心部分からの距離によって磁束変化の速度が変化するが、ラジアル型コアレス同期発電機の場合では、中心からの距離にかかわらず、磁束変化の速度が一定である⁽⁸⁾。そのため、起電力波形を正弦波と仮定したとき、それぞれの導体1本当りの回転速度 n における速度起電力の実効値 E_{ra} 、 E_{ax} は、以下の式で表すことができる。

$$E_{ra} = \frac{1}{\sqrt{2}} \int_0^h 2\pi r \left(\frac{n}{60} \right) B dl = \sqrt{2} \pi \left(\frac{n}{60} \right) B h \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$E_{ax} = \frac{1}{\sqrt{2}} \int_{r_1}^{r_2} 2\pi r \left(\frac{n}{60} \right) B dr = \frac{1}{\sqrt{2}} \pi (r_2^2 - r_1^2) \left(\frac{n}{60} \right) B \quad \dots\dots (3)$$

以上の式(2)、(3)に表されるように、起電力はラジアル型の場合は発電機の径と高さにそれぞれ比例し、アキシャル型の場合は径の2乗に比例する。本研究においては、筆者らが開発した径と高さが独立したラジアル型コアレス同期発電機の理論式を用いるが、従来型であるアキシャル型への応用も容易に可能である。

2.2 三相ラジアル型コアレス発電機(Y結線)

磁石数とコイルスロット数の比が4:3である三相出力のラジアル型発電機を使用し、内部結線をY結線とするとき、内部抵抗 $Z_{c,Y}$ は、直列数 s 、並列数 p によって、

$$Z_{c,Y} = 2Z_c \frac{s}{p} \quad \dots\dots\dots (4)$$

で変化する。したがって、式(2)より三相巻線の線間電圧の実効値 $E_{ac,Y}$ を求めると、

$$E_{ac,Y} = 2\sqrt{3} s N E_{ra} = \sqrt{6} s N \pi B h \left(\frac{n}{30} \right) \quad \dots\dots\dots (5)$$

となる。また、ダイオードブリッジに接続し、整流後純抵抗負荷を接続した場合の出力電圧 $E_{dc,Y}$ 、出力電流 $I_{dc,Y}$ 、出力電力 $P_{dc,Y}$ は、

$$E_{dc,Y} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} E_{ac,Y} \frac{Z}{Z_{c,Y} + Z} = \frac{\sqrt{3} s p Z N B h r n}{5(2sZ_c + pZ)} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$I_{dc,Y} = \frac{E_{dc,Y}}{Z} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$P_{dc,Y} = \frac{E_{dc,Y}^2}{Z} = -\frac{2sZ_c}{p} I_{dc,Y}^2 + \frac{\sqrt{3} s N B h r n}{5} I_{dc,Y} \quad \dots\dots\dots (8)$$

で求めることができる。なお、本解析では簡単のため、ダイオードブリッジでの損失はないものとする。

2.3 三相ラジアル型コアレス発電機(Δ結線)

Y結線の場合と同様にΔ結線時の内部抵抗 $Z_{c,\Delta}$ は、

$$Z_{c,\Delta} = 2Z_c \frac{s}{3p} \quad \dots\dots\dots (9)$$

となるため、三相巻線の線間電圧の実効値 $E_{ac,\Delta}$ は、

$$E_{ac,\Delta} = 2s N E_{ra} = \sqrt{2} s N \pi B h \left(\frac{n}{30} \right) \quad \dots\dots\dots (10)$$

となる。ここで、Y結線と同様の接続をしたと仮定すると、出力電圧 $E_{dc,\Delta}$ 、出力電流 $I_{dc,\Delta}$ 、出力電力 $P_{dc,\Delta}$ は、

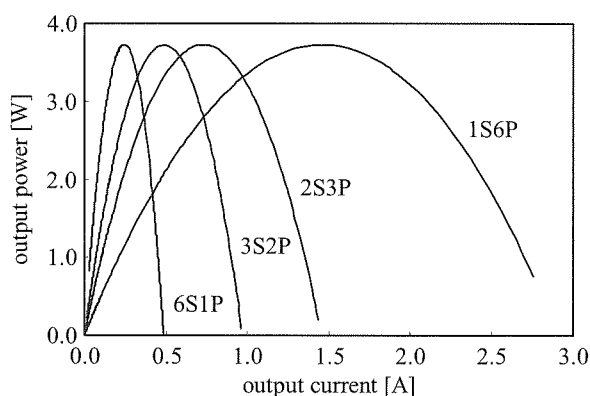
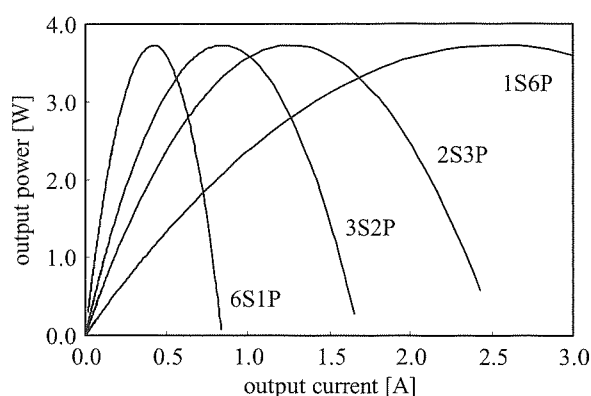
$$E_{dc,\Delta} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} E_{ac,\Delta} \frac{Z}{Z_{c,\Delta} + Z} = \frac{3s p Z N B h r n}{5(2sZ_c + 3pZ)} \quad \dots\dots (11)$$

$$I_{dc,\Delta} = \frac{E_{dc,\Delta}}{Z} \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$P_{dc,\Delta} = \frac{E_{dc,\Delta}^2}{Z} = -\frac{2sZ_c}{3p} I_{dc,\Delta}^2 + \frac{s N B h r n}{5} I_{dc,\Delta} \quad \dots\dots\dots (13)$$

Table.1 Conditions of small wind power generation system.

Radial coreless generator	Coil's radius of rotation r	0.065 m	
	Height of magnets h	0.020 m	
	Number of magnets	three-phase	24×2
		single-phase	18×2
	Magnetic flux density B	0.35 T	
	Number of coil slots	18	
	Turns number of each coil N	324	
Savonius windmill	Resistance of each coil Z_c	5.25 Ω	
	Tip Speed Ratio λ	1.0	
	Radius of rotation R	0.25	
Battery	Nominal voltage	DC 12 V	

Fig.4 Three-phase Y-connection ($n = 100 \text{ min}^{-1}$)Fig.5 Three-phase Δ -connection ($n = 100 \text{ min}^{-1}$)

で求められることになる。

2.4 単相ラジアル型コアレス発電機

磁石数：コイルスロット数が 1 : 1 である単相出力のラジアル型発電機を使用する場合、式(2)による単相電圧実効値 $E_{ac,s}$ と内部抵抗 $Z_{c,s}$ は、以下のように表される。

$$E_{ac,s} = 2sN E_{ra} = \sqrt{2} s N \pi r B h \left(\frac{n}{30} \right) \quad \dots\dots\dots (14)$$

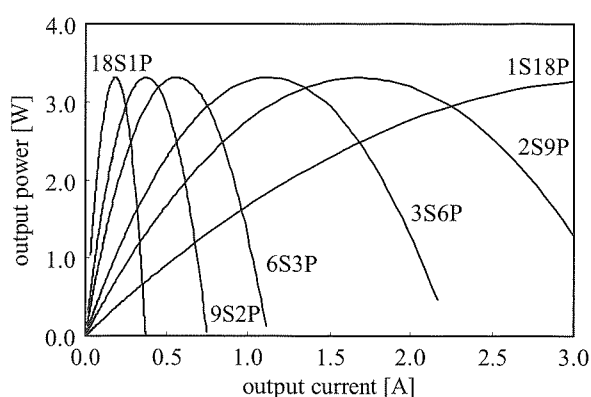
$$Z_{c,s} = Z_c \frac{s}{p} \quad \dots\dots\dots (15)$$

また、出力電圧 $E_{dc,s}$ 、出力電流 $I_{dc,s}$ 、出力電力 $P_{dc,s}$ は、それぞれ以下の式で求められる。

$$E_{dc,s} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} E_{ac,s} \frac{Z}{Z_{c,s} + Z} = \frac{2spZNBhrn}{15(sZ_c + pZ)} \quad \dots\dots\dots (16)$$

$$I_{dc,s} = \frac{E_{dc,s}}{Z} \quad \dots\dots\dots (17)$$

$$P_{dc,s} = \frac{E_{dc,s}^2}{Z} = -\frac{sZ_c}{p} I_{dc,s}^2 + \frac{2sNBhrn}{15} I_{dc,s} \quad \dots\dots\dots (18)$$

Fig.6 Single-phase ($n = 100 \text{ min}^{-1}$)

接続させると仮定する。このとき、風車の回転数は、

$$n_w = \frac{60\lambda V}{2\pi R} \quad \dots\dots\dots (19)$$

と表せる。つまり、風車をギアレスで直接発電機に接続すると、式(19)で求められる風車回転数が発電機の回転数となる。

本報告における理論条件を文献(11)の試作機を想定して、図3を参考に表1のように仮定する。ただし、コイルの外径が 0.134 m、コイルの内径が 0.125 m であるため、両者の平均を取ってコイル中心部の回転半径を 0.065 m とした。以上の式より求められる発電機特性は、図4～6

3. 風況と発電機のマッチング

3.1 理論条件

本報告では、都市部での設置を考慮し、高い静粛性を有し風向急変に依存しないサボニウス型風車を発電機に直

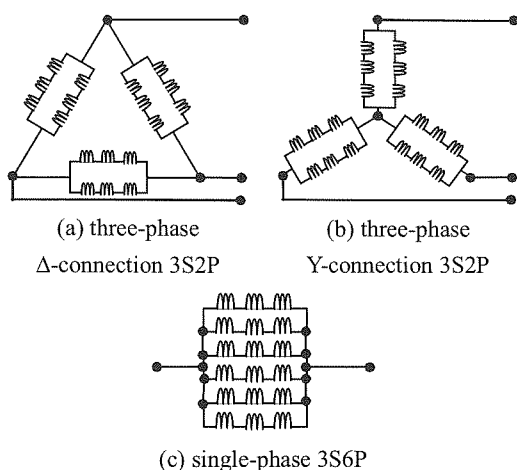


Fig.7 An example of generator's connection pattern.

に示すように電機子コイルの接続方法によって、同一筐体であっても最適負荷抵抗を複数持ち、最大出力電力を一定としながら、比較的高い電圧型から電流型まで負荷特性が変化するさまざまな発電機を設計可能なことが確認できる。特に、Y 結線にすると電圧型、Δ結線にすると電流型となり、その中でも直列数を増やせばより電圧型に、並列数を増やせばより電流型になることが分かる。また、単相にすれば Y 結線とΔ結線を合わせた特性を持つことも分かる。

本章では、コイルスロット数を 18 で固定し、同一筐体を用いたラジアル型コアレス発電機として、三相 Y 結線の 4 パターン、三相Δ結線の 4 パターン、単相の 6 パターンの合計 14 パターンの電機子コイル接続法を算出し、比較した。代表的な 3 例を図 7 に示す。なお、発電機出力はダイオードブリッジで整流された後、コンバータ等の制御回路を接続せず、直接、公称電圧 12V の鉛蓄電池に接続されているものとした。

3.2 風況と発電システムのマッチング

式(8), (13), (18)から算出した結果、14 パターンの電機子コイル接続法のうち、風速 6.0 m/s において蓄電電力が最大となるのは、三相 Y 結線 2 直列 3 並列発電機であることが確認された。そこで、三相 Y 結線 2 直列 3 並列発電機と DC12V 蓄電池の負荷特性(直線)に関する整合性を図 8 に示す。このとき、直線と各曲線の交点は各風速における蓄電電力を表わしている。すなわち、交点の存在しない風速 3.0 m/s 以下の領域では蓄電池電圧の 12V まで達せず、低風速域に投入した場合はまったく発電しないことが分かる。しかし、風速 5.0~6.0 m/s においては蓄電に十分な発電が可能であり、都市部でも比較的平均風速が高い場所に設置する場合には、この電機子コイル接続法が適していると言える。逆に、風速 2.0 m/s において蓄電電力が最大となる三相 Y 結線 6 直列 1 並列の場合は、図 9 に示されるように、高風速領域では発電機負荷特性と蓄電池充電特性のマッチングが取れておらず、最適な出力を得ることができていないものの、風速 2.0~3.0 m/s の時には十分に

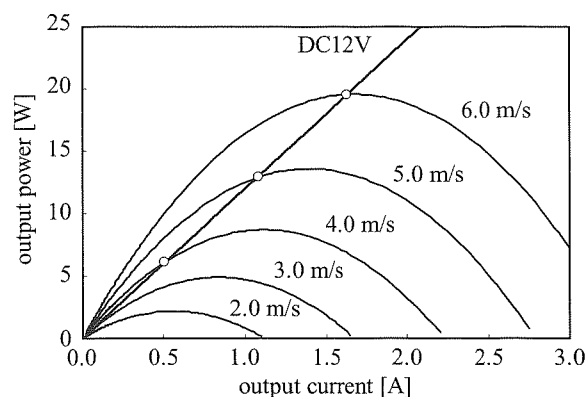


Fig.8 Load characteristic of 2Series-3parallel (Y-connection)

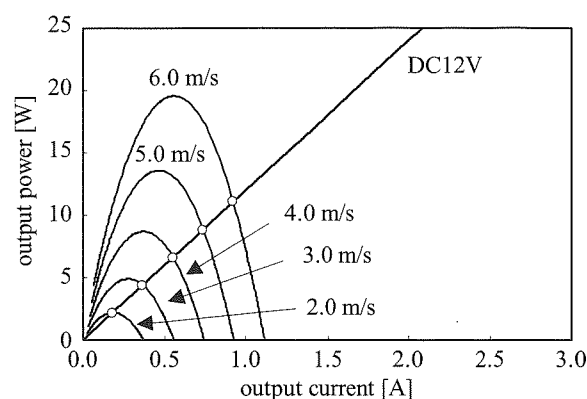


Fig.9 Load characteristic of 6Series-1parallel (Y-connection)

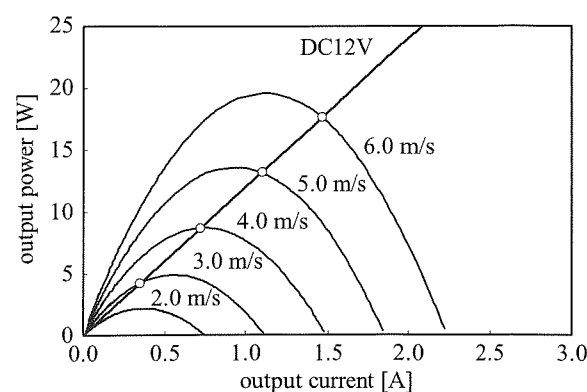


Fig.10 Load characteristic of 3Series-2parallel (Y-connection)

高い電圧を出力できることが分かる。住宅地のようなほとんど風が吹かないような場所でも、使用できる可能性が十分にあると考えられる。また、その間の風速 4.0 m/s において蓄電電力が最大となる三相 Y 結線 3 直列 2 並列では、図 10 のように風速 3.0~6.0 m/s で十分発電が可能であり、年間を通して風速の変化がある低風速地域でも適応が可能であると分かる。

3.3 蓄電池の電力利用率

発電機と蓄電池の負荷整合性より、蓄電池が出力電力を

Table.2 Charged power against each wind speed.

connection of armature coils			charged power against each wind speed [W]			wind speeds where the maximum output power is obtained [m/s]
			2.0 m/s	4.0 m/s	6.0 m/s	
three-phase	Y-connection	1S6P	0	0	0	12.5
		2S3P	0	6.18	19.6	6.0
		3S2P	0	8.69	17.6	4.0
		6S1P	2.17	6.63	11.1	2.0
	Δ-connection	1S6P	0	0	0	21.5
		2S3P	0	0	7.79	10.5
		3S2P	0	3.46	18.9	7.0
		6S1P	0.865	8.59	16.3	3.5
single-phase	1S18P		0	0	0	32.0
	2S9P		0	0	0	16.0
	3S6P		0	0	6.92	10.5
	6S3P		0	6.88	17.2	5.5
	2S9P		0.769	7.63	14.5	3.5
	18S1P		1.91	5.34	8.77	2.0

どの程度充電しているかを検討する。本研究では、各風速において発電機が取り得る最大出力電力と実際に蓄電池に供給される出力電力から、蓄電池の電力利用率を以下のように定義する。

$$\eta_{EP} = \frac{P_V}{P_{Vmax}} \quad \dots\dots\dots (20)$$

ここで、 P_V は図8～10の動作点(発電機特性曲線と蓄電池曲線の交点)に相当し、 P_{Vmax} は図8～10の各特性曲線の頂点の値に相当する。

例として、三相Y結線時の P_V と P_{Vmax} を表すと、式(8)、(19)より、

$$\frac{P_{V,Y}}{12} \left(\frac{s Z_c}{7p} P_{V,Y} + \frac{12\pi R - \sqrt{3} s N B h r \lambda V}{\pi R} \right) = 0 \quad \dots\dots\dots (21)$$

$$P_{Vmax,Y} = \frac{3sp}{2Z_c} \left(\frac{NrBh\lambda V}{\pi R} \right)^2 \quad \dots\dots\dots (22)$$

となるため(ただし、 $P_{V,Y}$ は0以上である)、そこから三相Y結線2直列3並列発電機(2S3P)、三相Y結線3直列2並列発電機(3S2P)、三相Y結線6直列1並列発電機(6S1P)の各風速における電力利用率を算出すると、それぞれ図11のようになる。図11より、三相Y結線2直列3並列発電機(2S3P)では、風速4.0 m/sにおいて71.1%、風速5.0 m/sで94.7%、風速6.0 m/sで99.9%と変化していることが確認でき、発電システムとマッチングする風速6.0 m/s近傍において、高い電力利用率を得られることが分かる。しかし、3.0 m/s以下の風速では、電力利用率が0%であるため、全く充電しないことが分かる。また、三相Y結線3直列2並列発電機(3S2P)においては、風速2.0 m/s以下では充電せず、風速3.0 m/sでは86.5%、風速4.0 m/sにおいて99.9%、風速5.0 m/sで96.8%、風速6.0 m/sで90.0%

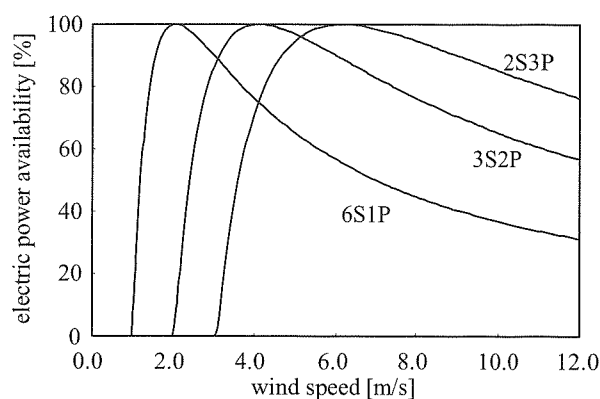


Fig.11 Output power availability of each wind speeds.

と変化しているため、低風速領域の広い範囲で高い電力利用率を得られることが確認できる。最後に、三相Y結線6直列1並列発電機(6S1P)では、風速1.0 m/s以下では充電できないが、風速2.0 m/sのような低風速において99.3%と高い電力利用率が得られ、以降風速3.0 m/sで90.0%、風速4.0 m/sで76.2%、風速5.0 m/sで65.2%、風速6.0 m/sで56.7%と電力利用率が低下していくことが確認できる。

さらに議論を進め、電機子コイルの各接続法に適合する風速を表2のように検討した。表2に示されるように、三相Y結線、三相Δ結線、単相ともに直列数が多く並列数が少ないほど電力利用率が最大となる風速が小さくなることが確認された。これは、直列数が多いほど比較的输出電圧が高くなり、低風速でも蓄電池の公称電圧に達するからであると考えられる。

以上のことから、設置サイトの風況(風速頻度分布)を十分調査し、発電システムと風況のマッチングを設置前に十分に検討することで、無制御時の発電性能低下を最低限に

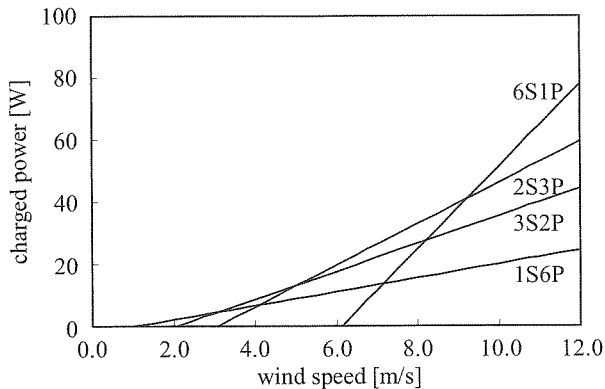


Fig.12 Charged power of three-phase (Y-connection)

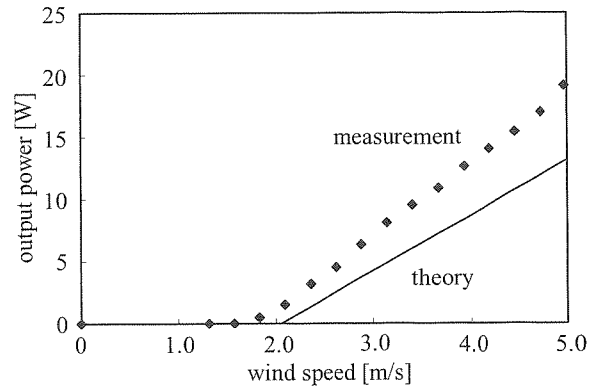


Fig.13 Comparison of measurement and theory.

抑制することが可能であると考えられる。裏を返せば、一般の風力発電機でもこのようなマッチング評価を行わない限り、定格時の発電性能と実際に発電可能な電力の差が大きくなる可能性が高いといえる。

3.4 蓄電電力比較

三相 Y 結線における電機子コイル接続法の 4 パターンに関して、式(8)を用いて、各風速における蓄電電力を算出し、その比較を図 12 に示す。この図 12 と図 2 のような設置サイトの風況観測結果を比較することにより、設置サイトと発電機の整合性を検証することができる。すなわち、図 2 のようなサイトに小型風力発電機の設置を検討する場合、平均風速が 2.0 m/s 前後と風況の悪いサイト(4 階建てビル屋上)には三相 Y 結線 6 直列(Y6S1P)型が、平均風速が 4.0 m/s 程度と都市部では比較的高いサイト(10 階建てビル屋上)には三相 Y 結線 2 直列 3 並列(Y2S3P)型の接続が最適であることが分かる。

ここまでは、第 2 章にて定義した式を元に計算を行ってきたため、理想的な状態で得られる結果である。そこで、実機との比較のために、実際に試作した三相 Y 結線 3 直列 2 並列発電機を用いて、実測値と理論計算値との比較を試みた。実験では、12V 蓄電池(GSYUASA 製 VALVE REGULATED LEAD - ACID RE5-12 12V 5.0Ah)を整流回路後に接続した際に得られる出力電力の測定を行った。測定器には YOKOGAWA 製デジタルパワーメータ WT230 を用い、発電機回転数を 10 min^{-1} 刻みで上げていった場合に得られた結果を図 13 に示す。ただし、あくまで比較のために、表 1 にあるように周速比を 1.0 で一定とし、風車の回転半径を 0.25 m と仮定して、式(19)によって発電機回転数を風速に変換した図である。図 13 より、実測値自体は理論計算値よりも大きいことが分かる。その理由として、理論計算において発電機の出力波形を正弦波としているが、実際に得られる波形はひずみ波であるため、値の相違を生んでいると考えられる。しかし、傾向としては相似しており、実機による室内実験においても同様の傾向が確認できたと考えられる。

4. まとめ

本研究では、低風速領域での風況ミスマッチによる効率や設備利用率の低下を防ぐため、制御システムを用いることなくコアレス発電機の製造前の電機子コイル接続変換のカスタムメイドのみによって、様々な風況に対応できる発電機設計手法を提案した。

公称電圧 12 V 蓄電池に直接接続する場合の各風速における出力を理論式によって解析した結果、風速 6.0 m/s では三相 Y 結線 2 直列 3 並列が、風速 2.0 m/s では三相 Y 結線 6 直列 1 並列が最大となり、さらに三相 Y 結線 3 直列 2 並列では風速 4.0 m/s 近傍の低風速領域内で幅広く無制御でも性能低下なく発電が可能であることが確認された。また、検討した 14 パターン内で直列数が多い方が比較的電圧が高くなり、低風速でも速やかに蓄電池公称電圧に達するという特性を持ち、無制御時の電機子コイル接続法の選定の重要性が明らかとなった。

加えて、上記の結果から蓄電池の電力利用率を表すことによって、三相 Y 結線 3 直列 2 並列発電機では電力利用率が風速 3.0 m/s から増加し、風速 6.0 m/s で 99.9 % となることが分かった。三相 Y 結線 3 直列 2 並列発電機においては風速 4.0 m/s をピークにその前後の風速でも 85 % 以上の高い電力利用率になっている。三相 Y 結線 6 直列 1 並列発電機は風速 2.0 m/s と風速の低い段階でピークに達し、より低風速領域での使用が可能であることを確認できた。これらから、より詳細な発電機の適応風速を明らかにできた。

最後に、実機による実測値と理論計算値の比較を行ない、同様の傾向が確認することができた。

したがって、大型風力発電だけでなく小型風力発電においても十分な風況観測が必要不可欠であるといえる。その上で得られた観測データを下図に、同一筐体での電機子コイルの接続変換でカスタムメイドすることによって、設置サイトの風況に応じた柔軟で量産性の高い風力発電機の設計が可能となると考えられる。

参考文献

- 1) 小川晋：「小型風力発電機の開発動向とその課題」，太陽エネルギー，**Vol.30**，No.5，pp.17-22 (2004)
- 2) YOMIURI ONLINE：「「回らない」訴訟や撤去」，
<http://www.yomiuri.co.jp/feature/kankyo/20060808ft0d.htm>
- 3) ゼファー株式会社：本格発電小型風力発電機「エアドルフィン Mark-Zero」，
http://www.zephyreco.co.jp/AIRDOLPHIN/dol_spec.htm
- 4) 神鋼電機株式会社：小形風力発電装置「そよ風くん」，
http://www.shinko-elec.co.jp/windpower/product/spec_v1.html
- 5) ニッコー株式会社：ニッコー小型風力発電システム「NWG-200」，
<http://www.e-kaze.biz/nwg-200.html>
- 6) 気象庁：「気象統計情報」，
<http://www.jma.go.jp/jma/menu/report.html>
- 7) 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」，平成 17 年太陽／風力エネルギー講演論文集 2005，pp.121-124 (2005)
- 8) 若尾真治・大山良平・中村秀人・藪本俊昭：「風力発電システムにおける併設蓄電池の容量決定に関する一考察」，平成 16 年太陽／風力エネルギー講演論文集 2004，pp.341-344 (2004)
- 9) 貝沼佳宏・雪田和人・後藤泰之・一柳勝宏：「マイクロ風力発電のための極数変換型発電機の検討」，平成 18 年電気学会電力・エネルギー部門大会講演論文集，**Vol.41**，No.403，pp.11-12 (2006)
- 10) 井坂勉・塩田剛・関和市：「CC レス方式風力用発電装置の開発」，第 28 回風力エネルギー利用シンポジウム，**Vol.28**，pp.421-424 (2006)
- 11) 高橋俊行・安田陽・大本親吾・原武久：「都市部における小型風力発電に適したラジアル型コアレス発電機の提案と試作」，電気学会論文誌 B，**Vol.27**，No.4，pp.589-595 (2007.4)
- 12) R. -J.Wang, M. J. kamper, K. Van der Westhuizen and J. F. Gieras :
“Optimal Design of a Coreless Stator Axial Flux Permanent-Magnet Generator”, IEEE Transaction on Magnetics, **Vol.41**, No.1, pp.55-64 (2005.1)
- 13) J. R. Bumby and R. Martin : “Axial-flux permanent-magnet air-cored generator for Small-scale wind turbine”, IEE Proceedings on Electric Power Applications, **Vol.152**, No.5, pp.1065-1075 (2005.9)
- 14) M.A. Mueller, A. S. McDonald and D. E. Macpherson : “Structural analysis of low-speed axial-flux permanent-magnet machines”, IEE Proceedings on Electric Power Applications, Vol.152, No.6, pp.1417-1426 (2005.11)