

風力発電を利用した独立電源システムの一提案

猪上 憲治*・野中 勝允**・山下 英生***

(平成15年9月12日受理)

A Proposal of an Independent Source System Utilizing Wind Turbine Generator

Kenji INOUE, Masanobu NONAKA and Hideo YAMASHITA

(Received Sep. 12, 2003)

Abstract

Recently, the introduction of wind turbine generator is made active in the world, in order to tackle the warming of the earth and the exhaustion of fossil fuels.

In this paper, a new independent source system by consisting of wind turbine generator, diesel engine generator, electric water heater, and alternating power control device is proposed. The characteristics of this system are as follows:

The brushless three-phase synchronous induction generator with two stators developed by authors is used as a wind turbine generator of this system, and then it is possible to make increase the generated energy. Moreover, the surplus power can be supplied to an electric water heater and the hot water can be utilized to hot-water supply system and air conditioning system.

In this paper, the composition and operation of the proposed independent source system are described, and the experimental results by a proto-type system are shown. The possibility whether this system operates well or not is examined.

Key Words: independent source system, wind turbine generator, brushless three-phase synchronous induction generator, diesel engine generator, electric water heater

1. ま え が き

近年、発電の分野において、地球の温暖化や化石燃料の枯渇問題に対処する一方策として、風力発電の導入が世界的に活発化している。

風力発電には、商用電力系統に連系して運転する方法¹⁾と、ディーゼル発電機や蓄電池に連系、すなわち独立電源システムとして運転する方法²⁾とがある。現在の風力発電は、その殆どが商用電力系統に連系して運転されている。しかし、将来的に、電力事情に恵まれない開発途上国や離島などに風力発電を導入する場合は、独立電源システムと

しての運転が予想される。

本論文では、この観点に立ち、風力発電機、ディーゼル発電機、温水蓄熱装置および交流電力制御装置から構成された一つの独立電源システムを提案している。本システムの従来方式²⁾との相違点は、風力発電機として筆者らが先に開発した発電量増大用の“無励磁機方式のブラシレス2固定子三相誘導同期発電機”³⁾を用い、更に風力発電の余剰電力を温水蓄熱装置で吸収して系の安定性、すなわち定電圧・定周波数を保ち、かつ温水を給湯や冷暖房に利用することにある。

本文は、まず風力発電を利用した新しい独立電源システ

* 広島工業大学工学部電気・デジタルシステム工学科

** 広島工業大学大学院工学研究科電子工学専攻

*** 広島大学大学院工学研究科情報工学専攻

ムの構成について述べる。次に、独立電源システムの運転について述べる。更に、独立電源システムの模擬実験装置における実験結果を示し、本システムの成立の可能性について検討する。

2. 独立電源システムの構成

風力エネルギーは不規則性のエネルギーであるため、常時所望の電力が得られるとは限らない。したがって、風力発電を独立電源として使用する場合には、所望電力の不足分を供給するバックアップ電源や電力の変動分を吸収する装置を併設する必要がある。文献2では、バックアップ電源としてディーゼル発電機が、また電力の変動分を吸収する装置として交直電力変換器と鉛蓄電池との組み合わせ装置が、それぞれ使用されている。しかし、この方式は、蓄電池の保守の問題や交直電力変換器が発生する高調波の問題が存在する。

本論文では、この点に鑑み、蓄電池や交直電力変換器を用いない方式の独立電源システムを提案する。図1は、新しい方式の独立電源システムの構成図である。ここでは、風力発電の発電機に、筆者らが先に開発した文献3の誘導同期発電機、すなわち誘導発電機の動作と同期発電機の動作とを兼ね備えた“無励磁機方式のブラシレス2固定子三相誘導同期発電機”を用いる。そして、風速の変化に応じて同期発電機運転と誘導発電機運転を切り換え、発電量の

増大を図る。

次に、従来の交直電力変換器と鉛蓄電池との組み合わせ装置の代わりに、交流電力制御装置（トライアック）と温水蓄熱装置との組み合わせ装置を用いる。そして、風力発電の余剰電力によって沸かされた温水は、給湯や冷暖房などの熱源として利用する。更に、ディーゼル発電の発電機には、筆者らが先に開発した、構造が簡単でダンパ作用の大きな“無励磁機方式のブラシレス三相同期発電機”⁴⁾を用いる。

3. 独立電源システムの運転

3.1 無励磁機方式のブラシレス2固定子三相誘導同期発電機

本節では、風力発電における発電量の増大が可能、すなわち風速の変化に応じて同期発電機動作と誘導発電機動作の切り換えができる“無励磁機方式のブラシレス2固定子三相誘導同期発電機（以下、風力発電機と呼称）”について述べる。

3.1.1 鉄心構造と巻線構造

図2(a), (b)は、4極発電機を例にしたときの風力発電機の鉄心構造と巻線構造である。鉄心構造は、通常の1固定子構造の円筒形三相同期機における固定子および回転子鉄心を、それぞれ回転軸に垂直な方向で二等分に分割した構造をなす。すなわち、本機は一つの回転軸に二つの回転子

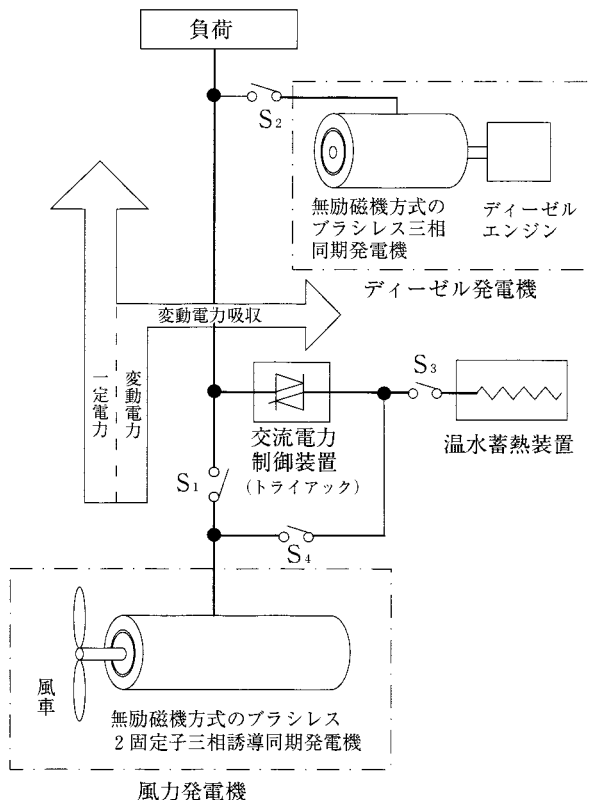


図1 風力発電を利用した新しい独立電源システム

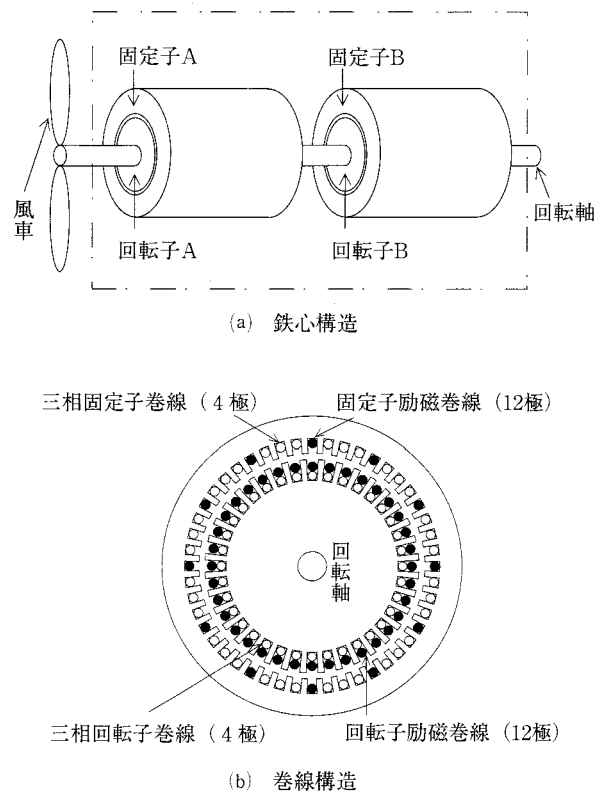


図2 風力発電機の構造

鉄心 A と B, およびこれらと対峙する二つの固定子鉄心 A と B がそれぞれ設けられている。ただし, A と B は同じ構造をもつ。

本機の巻線構造は, 二つの固定子鉄心 A と B のそれぞれに 4 極の三相固定子巻線および 12 極の固定子励磁巻線がそれぞれ巻装されている。固定子励磁巻線は三相固定子巻線と異なる鉄心スロット内に, 回転子励磁巻線は三相回転子巻線と同一の鉄心スロット内にそれぞれ巻装されている。更に, 回転軸には回転整流器が取り付けられている。

なお, 本機は三相固定子巻線と固定子励磁巻線との極数比, および三相回転子巻線と回転子励磁巻線との極数比が共に 1 対 3 の奇数であるため, 三相巻線と励磁巻線間の相互誘導作用が無い。また, これらの磁極間の磁気力に基づく振動性応力に起因する機械振動, 騒音も生じない^{5),6)}。

3.1.2 回路構成

図 3 は, 風力発電機の電気回路である。なお, 同図において巻線の電圧, 電流は一相についてののみ矢印表示し, その他の相の電圧, 電流表示は省略している。また, 巻線記

号 W の添え字 A は固定子および回転子鉄心 A にそれぞれ巻装された巻線を意味し, 添え字 B は固定子および回転子鉄心 B にそれぞれ巻装された巻線を意味する。

本機は, 三相固定子巻線 W_{SA} と W_{SB} が三相出力端子 (U, V, W) に対して並列に接続され, W_{SB} の両側端子にそれぞれ三相極性切り換えスイッチ S_1 が接続されている。固定子励磁巻線 W_{SAA} と W_{SBB} は直列に接続され, それがスイッチ S_0 を介して直流電源 (AVR 装置) に接続されている。一方, 回転子側は三相回転子巻線 W_{RA} と W_{RB} が直列に接続され, その接続中間端子 (a, b, c) に, 回転整流器 (単相全波整流回路) D を介して, 直列接続の回転子励磁巻線 W_{RAA} と W_{RBB} が接続されている。

3.1.3 動作原理

まず, 同期発電機動作について説明する。いま図 3 の三相極性切り換えスイッチ S_1 の接点 t_2 を開き, 接点 t_1 を閉じた状態で, スイッチ S_0 を閉じると, 固定子励磁巻線 W_{SAA} と W_{SBB} に励磁電流 I_{SE} がそれぞれ流れ, 2 個の固定子鉄心のそれぞれに 12 極の静止磁界が生じる。このとき

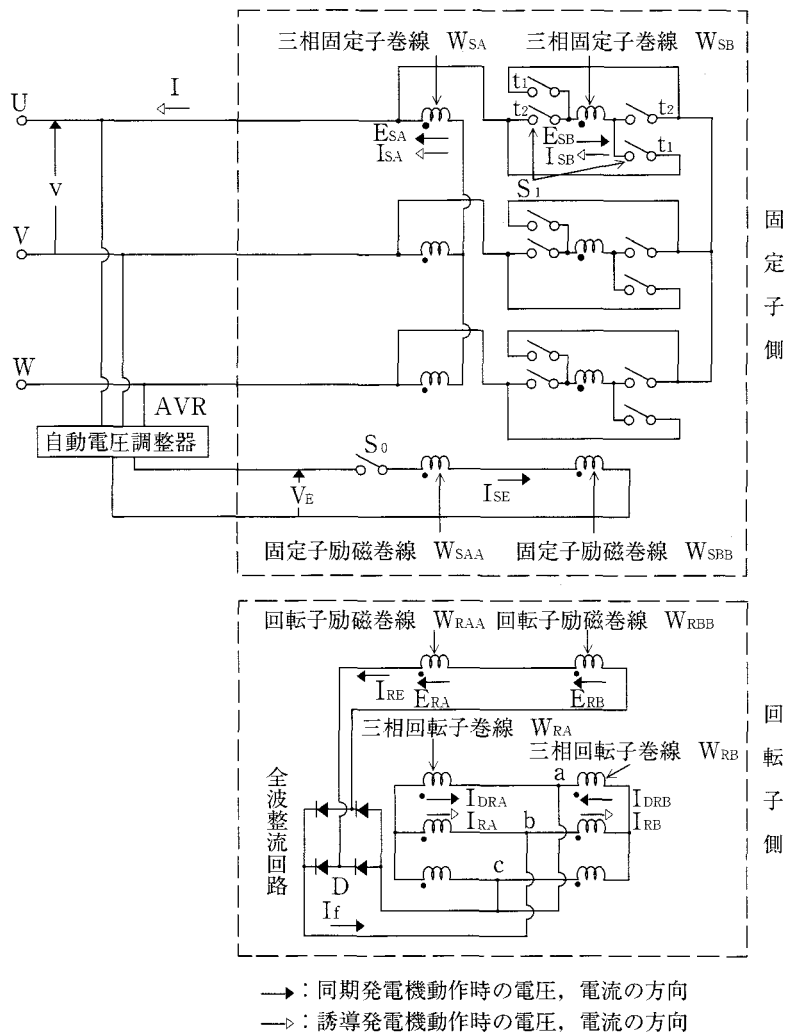


図 3 風力発電機の電気回路

回転軸が風車によって回転していると、12極に巻装された回転子励磁巻線 W_{RAA} と W_{RBB} にそれぞれ起電力 E_{RA} と E_{RB} が誘導する。これらの誘導起電力は回転整流器 D によって整流され、4極に巻装された三相回転子巻線 W_{RA} と W_{RB} に互いが逆極性（黒の矢印）の直流電流 I_{DRA} と I_{DRB} ($= -I_{DRA}$) が流れる。その結果、 W_{RA} と W_{RB} はそれぞれ4極の界磁磁束を作り、4極に巻装された W_{SA} と W_{SB} に互いが逆極性（黒の矢印）の起電力 E_{SA} と E_{SB} ($= -E_{SA}$) が誘導し、それらはスイッチ S_1 の接点 t_1 を通じて出力端子 (U, V, W) に発電電圧 V をもたらす。

次に、誘導発電機動作について説明する。いま風が強まって発電機の回転数が同期速度に保てなくなり、回転数が同期速度以上になると、スイッチ S_0 を開くと同時にスイッチ S_1 の接点 t_1 を開き、接点 t_2 を閉じる。この操作によって、三相固定子巻線 W_{SA} と W_{SB} のそれぞれにディーゼル発電機から励磁電流が流入し、2個の固定子鉄心のそれぞれに回転磁界が生じる。その結果、三相回転子巻線 W_{RA} と W_{RB} に同一極性（白の矢印）の誘導電流 I_{RA} と I_{RB} ($= I_{RA}$) が流れる。なお、このとき、 W_{RA} と W_{RB} の直列接続の中間端子 (a, b, c) の電位はそれぞれ等しいため、誘導電流が回転整流器 D を介して還流することはない。それ故、 W_{SA} には I_{RA} に対応する電流 I_{SA} が、また W_{SB} には I_{RB} に対応する電流 I_{SB} ($= I_{SA}$) がそれぞれ同一極性（白の矢印）の方向に流れ、それらの合成電流 I ($= I_{SA} + I_{SB}$) が出力される。なお、以上の電圧、電流は、交流の場合は実効値を、直流の場合は平均値を表わす。

3.2 独立電源システムの発電モード

本節では、本論文で提案する“風力発電を利用した独立電源システム”における、風速の変化に対する六つの発電モードを示す。

3.2.1 風力発電機が同期発電機動作の場合

図4は、負荷の消費電力を一定とし、風力発電機を同期

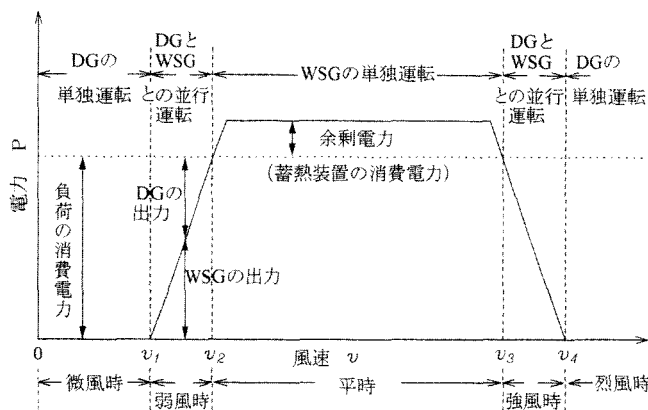


図4 発電モード（同期発電機動作）

発電機として動作させるときの発電モードを示す。同図において、WSGは風力発電機を同期発電機として動作させているときを意味し、DGはディーゼル発電機を、 v は風速をそれぞれ表わす。

(I) $0 \leq v \leq v_1$ (微風時) 風が微風で風力発電の運転が不可能なときは、図1のスイッチ S_1, S_3, S_4 を開き、スイッチ S_2 を閉じて、ディーゼル発電機の単独運転を行なう。

(II) $v_1 \leq v \leq v_2$ (弱風時) 風が弱風で風力発電の運転は可能であるが、負荷の所望電力に対して発電量が不足するときは、スイッチ S_1 を閉じてディーゼル発電機との並行運転を行なう。

(III) $v_2 \leq v \leq v_3$ (平時) 風速が増し、風力発電機単独の発電量で所望電力（負荷の消費電力+温水蓄熱装置の消費電力）を賄うことができる平時には、スイッチ S_3 を閉じると共にスイッチ S_2 を開いて、風力発電機の単独運転を行なう。

なお、このとき、風速の変化に伴う風力発電機の出力変動や負荷の変動に起因する系の不安定性は、温水蓄熱装置で消費される電力を交流電力制御装置で調整することによって抑制し、系の安定性を保つ。

(IV) $v_3 \leq v \leq v_4$ (強風時) 風が強風となり、風力発電機の単独運転が危険な状態にあるときは、風車の羽根のピッチ角を変えて風力発電機の出力を減少させ、スイッチ S_3 を開くと共にスイッチ S_2 を閉じて、ディーゼル発電機との並行運転を行なう。

(V) $v \geq v_4$ (烈風時) 台風などの烈風時には、風車の破損を防ぐため、スイッチ S_1 を開いて風力発電機の運転を停止し、ディーゼル発電機の単独運転を行なう。

3.2.2 風力発電機が誘導発電機動作の場合

(I) $v_1 \leq v \leq v_4$ (突風時) 風速の変化が急激、かつ大幅のため、風力発電機とディーゼル発電機との同期引き入れ（並行運転）が困難な突風時には、風力発電機を同期発電機動作から誘導発電機動作へ切り換えて運転する。す

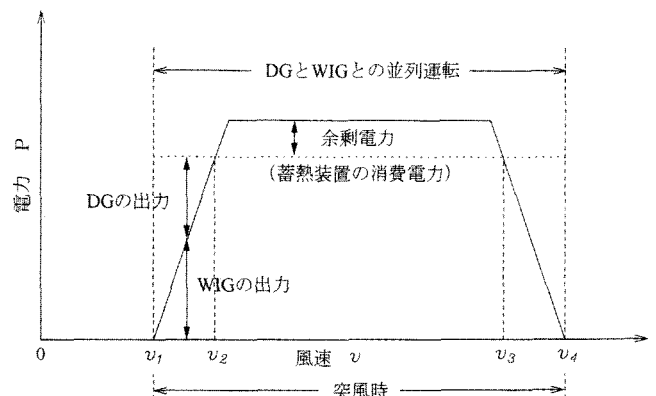


図5 発電モード（誘導発電機動作）

なわち、図5に示すように、 $v_1 \leq v \leq v_4$ の風速範囲においてディーゼル発電機との並列運転（風力発電機とディーゼル発電機との同期をとる必要のない運転方法）を行なう。同図において、WIGは風力発電機を誘導発電機として動作させているときを意味する。

なお、発電機を誘導発電機動作へ切り換えるとき、誘導発電機への突入電流¹⁾を抑制するため、交流電力制御装置を利用して誘導発電機の励磁電圧を減少させる。すなわち、図1においてスイッチ S_1 および S_3 をそれぞれ開き、スイッチ S_4 を閉じ、交流電力制御装置によって誘導発電機を減電圧始動する。始動後、スイッチ S_4 を開き、スイッチ S_1 および S_3 をそれぞれ閉じて定常運転に移る。

4. 実験結果

4.1 実験装置

図6は、本論文において実験に用いた模擬装置を示す。この度の実験は、設備の関係上、図1に示す新しい“風力発電を利用した独立電源システム”における発電モードの動作原理の成立を、模擬装置において確認する基礎実験にとどめた。

模擬実験装置は、図1における風力発電の発電機に文献3の“無励磁機方式のブラシレス2固定子三相誘導同期発電機”の試作機を用い、風車を直流電動機で代替した。ま

た、ディーゼル発電機のエンジンを三相同期電動機、その発電機を従来のブラシ付三相同期発電機、温水蓄熱装置を三相抵抗器、交流電力制御装置をスライダックでそれぞれ代替した。なお、図6の模擬実験装置において、記号のPは三相有効電力計、P・Fは三相力率計、Vは電圧計、Aは電流計、Fは周波数計である。

4.2 実験結果

本節では、風力発電機（同期発電機動作）の単独運転特性、風力発電機（同期発電機動作）とディーゼル発電機との並行運転特性、風力発電機（誘導発電機動作）とディーゼル発電機との並列運転特性のそれぞれの実験結果を示す。そして、実験の結果を基に本独立電源システムの成立の可能性について検討する。

4.2.1 風力発電機の単独運転特性

ここでは、図4に示した本独立電源システムにおける発電モードの平時（ $v_2 \leq v \leq v_3$ ）の動作原理の成立を実験的に確認する。すなわち、図6の模擬実験装置において、スイッチ S_2 を開いて系統からディーゼル発電機を遮断し、スイッチ S_4 を開き、スイッチ S_1, S_3, S_5 をそれぞれ閉じて風力発電機に総合負荷、スライダック、抵抗器を投入したときの単独運転時の実験結果を示す。そして、エネルギー吸収装置（交流電力制御装置+温水蓄熱装置）を設

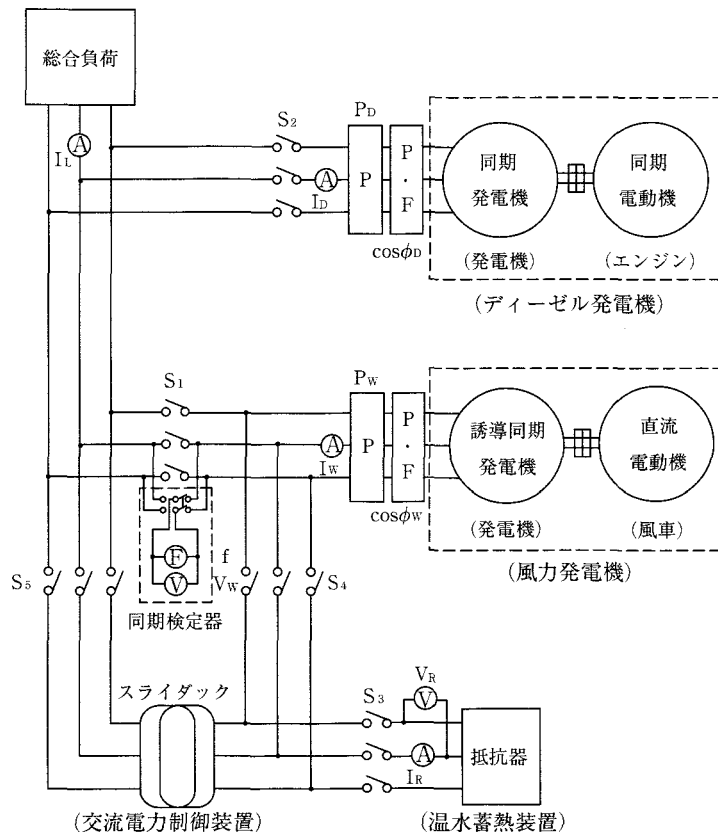


図6 模擬実験装置

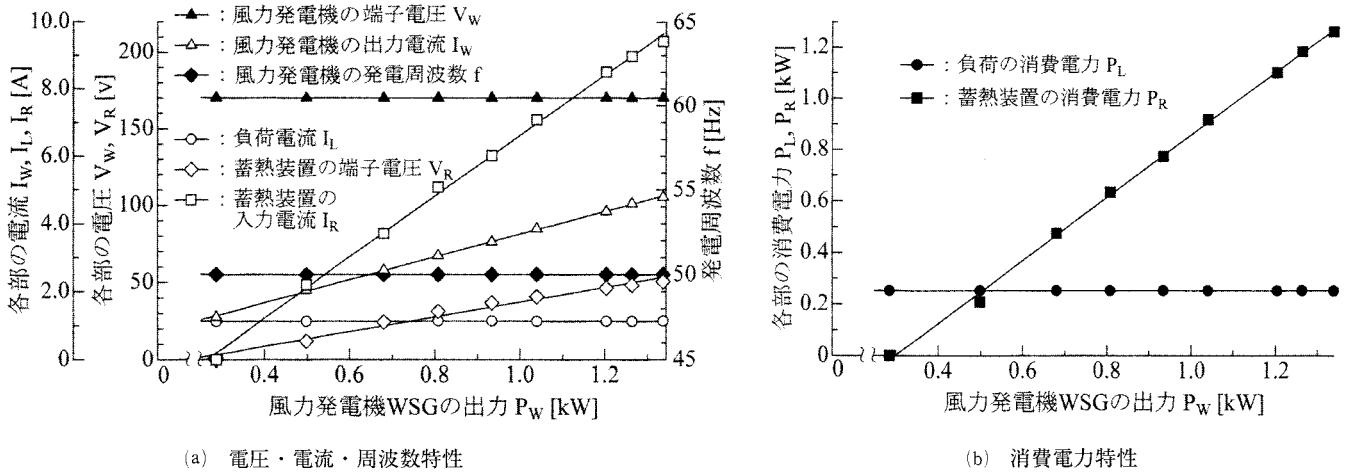


図7 風力発電機の単独運転時の特性

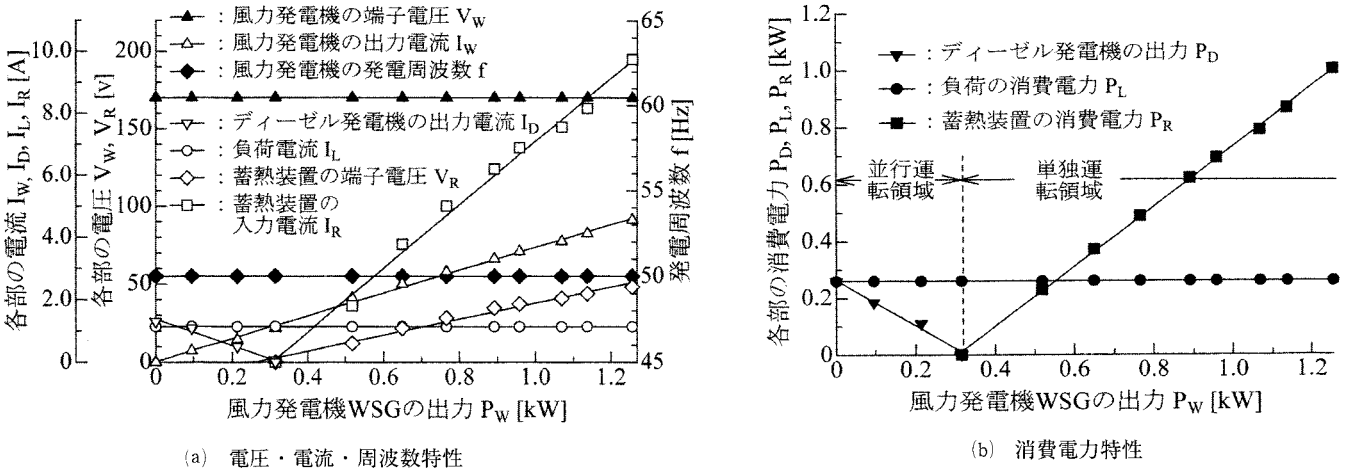


図8 風力発電機とディーゼル発電機との並行運転から単独運転までの特性

置したことによって、風力発電の余剰電力が吸収され、負荷に定電圧・定周波数の電力を常に供給できることを明らかにしている。

実験方法は、負荷を定格力率 ($\cos \phi = 0.8$) とし、風力発電機を同期発電機動作として運転し、その出力 P_w を直流電動機によって増加させ、そのときの発電周波数 f と端子電圧 V_w がそれぞれ一定値となるように、抵抗器の消費電力 $P_R (=V_R \cdot I_R)$ をスライダックで調整する。

図7は、風力発電機の単独運転時の実験結果である。同図より明らかなように、風速が増加することによって風力発電機の出力 P_w が増大すると、温水蓄熱装置の消費電力 P_R が増大して余剰電力が吸収され、負荷には常に定電圧 V_w で定周波数 f の電力 $P_L (=P_w - P_R)$ が供給されている。なお、ここではスライダックの損失も負荷と見做している。

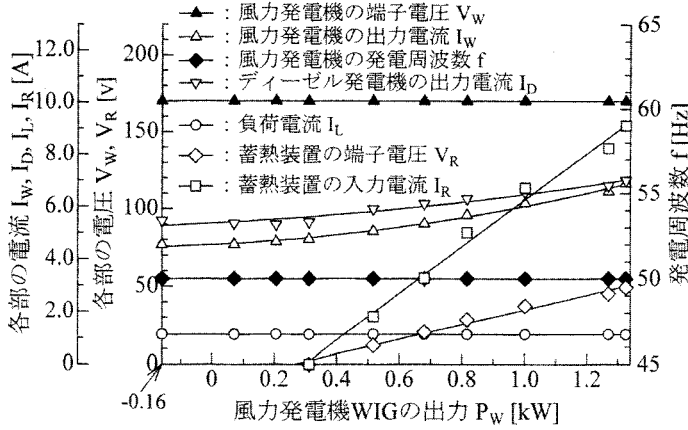
4.2.2 風力発電機とディーゼル発電機との並行運転特性

ここでは、図4の発電モードの弱風時 ($v_1 \leq v \leq v_2$)

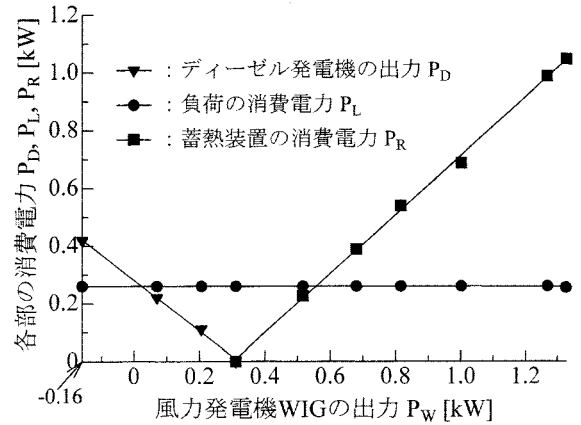
および強風時 ($v_3 \leq v \leq v_4$) における風力発電機とディーゼル発電機との並行運転の成立を実験的に確認する。

実験方法は、図6の模擬実験装置において、まずスイッチ S_1, S_3, S_4, S_5 をそれぞれ開いてスイッチ S_2 を閉じ、ディーゼル発電機の単独運転 ($0 \leq v \leq v_1$ および $v \geq v_4$) によって負荷に電力を供給する。その後、風力発電機を起動し、同期検定器によって両発電機の並行運転が可能になったことを確認した後、スイッチ S_1 を閉じて両発電機の並行運転を行なう。そして、直流電動機を操作して風力発電機の負荷分担を増加させる。

ここで、両発電機の並行運転から風力発電機の単独運転への移行は、次のようである。いま直流電動機を操作して、風力発電機が全負荷を担う状態になったとき、スイッチ S_2 を開いてディーゼル発電機を系統から遮断すると同時に、スイッチ S_3 および S_5 をそれぞれ閉じて抵抗器を系統に投入し、発電モードを両発電機の並行運転から風力発電機の単独運転へと移行させる。



(a) 電圧・電流・周波数特性



(b) 消費電力特性

図9 風力発電機とディーゼル発電機との並列運転時の特性

図8は、風力発電機とディーゼル発電機との並行運転から風力発電機の単独運転までの一連の実験結果である。図8から明らかなように、両運転特性とも良好な結果が得られている。すなわち、風力発電機の出力 P_w の増大に伴ってディーゼル発電機の出電力 P_D が減少し、さらに出力 P_w が増大すると風力発電機のみによって負荷の消費電力 P_L と温水蓄熱装置の消費電力 P_R が賄われている。そして、定電圧 V_w で定周波数 f の電力が負荷に供給されている。

4.2.3 風力発電機とディーゼル発電機との並列運転特性

ここでは、図5の発電モードの突風時 ($v_1 \leq v \leq v_4$) における風力発電機とディーゼル発電機との並列運転の成立を実験的に確認する。

実験方法は、図6の模擬実験装置において、まずスイッチ S_1, S_3, S_4, S_5 をそれぞれ開き、スイッチ S_2 を閉じてディーゼル発電機の単独運転を行なう。次に、スイッチ S_4, S_5 をそれぞれ閉じて風力発電機を誘導発電機動作として起動する。このとき、スライダックを操作して風力発電機への大きな突入電流を抑制する。そして、スイッチ S_1 を閉じ、スイッチ S_4 を開き、スイッチ S_3 を閉じて風力発電機とディーゼル発電機との並列運転を行ない、直流電動機を操作して風力発電機の出力を増大させる。

図9は、風力発電機とディーゼル発電機との並列運転における実験結果である。図9から明らかなように、並列運転特性も前項の並行運転特性と同様の良好な結果が得られている。なお、同図において風力発電機の出力に負の値が見られるが、これは風力発電機が誘導発電機として運転されているため、励磁電力（鉄損）がディーゼル発電機から供給されていることによる。

5. あとがき

本論文では、新しい“風力発電を利用した独立電源システム”を提案し、その成立の可能性を模擬装置において実験的に検討した。その結果、本独立電源システムの成立の可能性が大きく示唆された。

本独立電源システムは、主電源の風力発電機、バックアップ電源のディーゼル発電機、余剰電力処理用の温水蓄熱装置、電圧および周波数を調整する交流電力制御装置の四つの主要装置から構成されている。そして、次の特長をもつ。

- (1) 風力発電機に筆者らが先に開発した“無励磁機方式のブラシレス2固定子三相誘導同期発電機”を用い、本機を風速の変化が比較的穏やかな平時には効率、力率の面で優れている同期発電機として動作させ、突風時には安定運転の面で優れている誘導発電機として動作させれば、風力発電の発電量の増大が期待できる。
- (2) 温水蓄熱装置の消費電力を交流電力制御装置で調整することによって、従来の交直電力変換器と蓄電池との組み合わせ装置を用いなくても、電力システムの安定性（定電圧・定周波数）が確保できる。

今後は、一層実際に近い装置（ただし、小容量）を準備し、実験する予定である。

最後に、実験に協力された学部生の卒業研究班に謝意を表します。

文 献

- 1) 松宮・小倉・柴田・大名・牛山：「導入進む風力発電1-5」, 電気学会誌, Vol.120, No.8/9, 499-517 (2000)
- 2) 桑江・高原・一瀬・二見・上田・清藤・今家・後藤・

- 鈴木・前川：「風力・電池ハイブリッドシステム」, 電気学会論文誌, Vol.121-B, No.6, 715-721 (2001)
- 3) 中渡瀬・猪上・山下：「無励磁機方式のブラシレス2固定子三相誘導同期発電機」, 電気・情報関連学会中国支部第50回連合大会講演論文集, No.090406, 256-257 (1999)
- 4) 広重・松田・猪上・山下：「無励磁機方式のブラシレス三相同期発電機の開発」, 平成14年電気学会全国大会講演論文集, No.5-079, 99-100 (2002)
- 5) 猪上・山下・中前・藤川：「無励磁機方式のブラシレス自励三相同期発電機」電気学会論文誌, Vol.112-D, No.6, 569-578 (1992)
- 6) K. Inoue, H. Yamashita, E. Nakamae, T. Fujikawa :
“ A Brushless Self-Exciting Three-Phase Synchronous Generator Utilizing the 5th-Space Harmonic Component of Magneto Motive Force through Armature Currents”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.7, No.3, 517-524 (1992)