

風力発電を利用した独立電源システムの過渡特性

猪上 憲治*・松野 光洋**・山下 英生***

(平成16年8月20日受理)

Transient Characteristics of an Independent Source System Utilizing Wind Turbine Generator

Kenji INOUE, Mitsuhiro MATSUNO and Hideo YAMASHITA

(Received Aug. 20, 2004)

Abstract

The authors have been making a study of an independent source system utilizing wind turbine generator in recent years. This system is composed of four main installations, that is, a wind turbine generator, a diesel engine generator, an electric water heater (or an electric power storage flywheel), and an alternating power control device. The strong points of this system is that it is possible to increase generating electric power, because the brushless three-phase synchronous induction generator with two stators and without exciter developed by authors is used as the wind turbine generator of this system.

We have reported about the experimental results of electric power characteristics in steady state by using the simulated device of the proposed system up to now. In this experiment, the terminal voltage and the current of the proposed independent source system did not change and the quality of electric power was good when the wind turbine generator operates as a synchronous generator and also as an induction generator.

In this paper, the experimental results of electric power characteristics in transient state of the simulated device are reported. In this experiment, the change of the terminal voltage and the current are extremely small and the electric power characteristics are very good while the operation of the wind turbine generator changes from synchronous generator driving to induction generator one and also in the opposite operation.

The electric power characteristics of this simulated device in both steady and transient states are good; therefore this proposed system would be put to practical use.

Key Words: independent source system, wind turbine generator, brushless three-phase synchronous induction generator with two stators, diesel engine generator, transient characteristics

1. ま え が き

最近、地球の温暖化問題や化石燃料の枯渇問題に対処す

る一つの方策として、風力発電の研究・開発、建設が世界的に急速に進展している。

筆者らも、数年前から風力発電に関する研究を進めてお

* 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

*** 広島工業大学工学部知的情報システム工学科

り、これまでに風力発電機、ディーゼル発電機、温水蓄熱装置（または電力貯蔵用フライホイール）、交流電力制御装置の四つの主要装置から構成された図1に示す独立電源システムを提案¹⁾した。そして、その模擬実験装置における定常特性の実験結果を報告²⁾した。

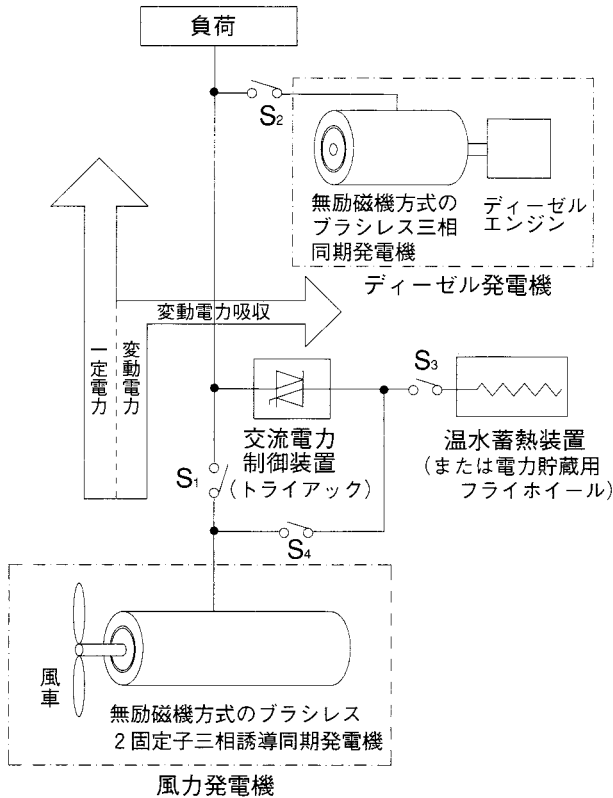


図1 風力発電を利用した独立電源システム

この独立電源システムは、次のことを特長としている。
 ①風力発電機に、筆者らが開発した“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”³⁾を用いて、発電量の増大を図る。本機は、同期発電機動作と誘導発電機動作とを併せもつ。
 ②ディーゼル発電機に、筆者らが開発した“無励磁機方式のブラシレス三相同期発電機”⁴⁾を用いて、発電機の構造の小型、堅牢化を図る。
 ③風力発電の余剰電力を温水蓄熱装置で処理し、給湯や冷暖房の熱源として有効利用する。または、余剰電力をフライホイールに貯蔵し、バックアップ用の電力として使用する。
 ④風力発電機の出力の変動分は、温水蓄熱装置で消費する電力、またはフライホイールに貯蔵する電力を交流電力制御装置で調整して、負荷への供給電力の安定、すなわち定電圧・定周波数を保つ。

本論文では、発電量増大用の風力発電機として用いている“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、本機と呼称）と、ディーゼル発電機との各種の運転移行時における過渡特性を実験的に求め、これまでに求めている定常特性²⁾と併せて、本機の有用性を確認し

ている。

本文は、まず実験装置および実験方法のそれぞれについて説明する。次に、風力発電機とディーゼル発電機との各種の運転移行時における過渡特性の実験結果を示す。すなわち、本機を同期発電機として動作させ、それとディーゼル発電機との並行運転を行うための同期検定器による同期引き入れを行い、そのときの負荷に供給される電圧、電流の波形（振幅）の観測結果を示す。また、本機を誘導発電機として動作させ、それとディーゼル発電機との並列運転を行うための並行運転から並列運転への移行時、その逆の並列運転から並行運転への移行時のそれぞれにおける負荷への供給電圧、電流の波形（振幅）の観測結果を示す。最後に、本独立電源システムの成立の可能性について検討する。

2. 実験装置および実験方法

前述したように、本独立電源システムにおける特長の一つに、風力発電機として“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”を使用したことが挙げられる。本機の構造は、一つの回転軸に二つの回転子を取り付けられており、且つそれらに対峙する二つの固定子が設けられている。そして、本機は、一つの固定子に接続された三相極性切り換えスイッチを操作することによって、三相同期発電機動作と三相誘導発電機動作とを切り換えることができる原理をなす。したがって、本機を風力の変動が緩やかな平時には効率の良い同期発電機として動作させ、風力の変動が激しい突風時には風力発電を停止するのではなく、本機を安定性に優れた誘導発電機として動作させれば、発電量の増大を図ることが可能となる。

筆者らは、既に、本機の同期発電機としての単独運転時、ディーゼル発電機と本機との並行運転（同期発電機動作）時および並列運転（誘導発電機動作）時のそれぞれにおける定常特性を求める実験を模擬装置において行っている。そして、これら運転時における定常特性の実験結果が良好であることを報告している。

本章では、これら両発電機の各種の運転移行時における過渡特性を実験的に求めるための実験装置、および実験方法のそれぞれについて説明する。

2.1 実験装置

図2は、両発電機の過渡特性を実験的に求めるために用いた模擬装置を示す。本論文の実験も前論文²⁾と同様に、風力発電の風車を直流電動機、ディーゼル発電のディーゼル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（または電力貯蔵用フライホイール）を抵抗器でそれぞれ代替している。また、

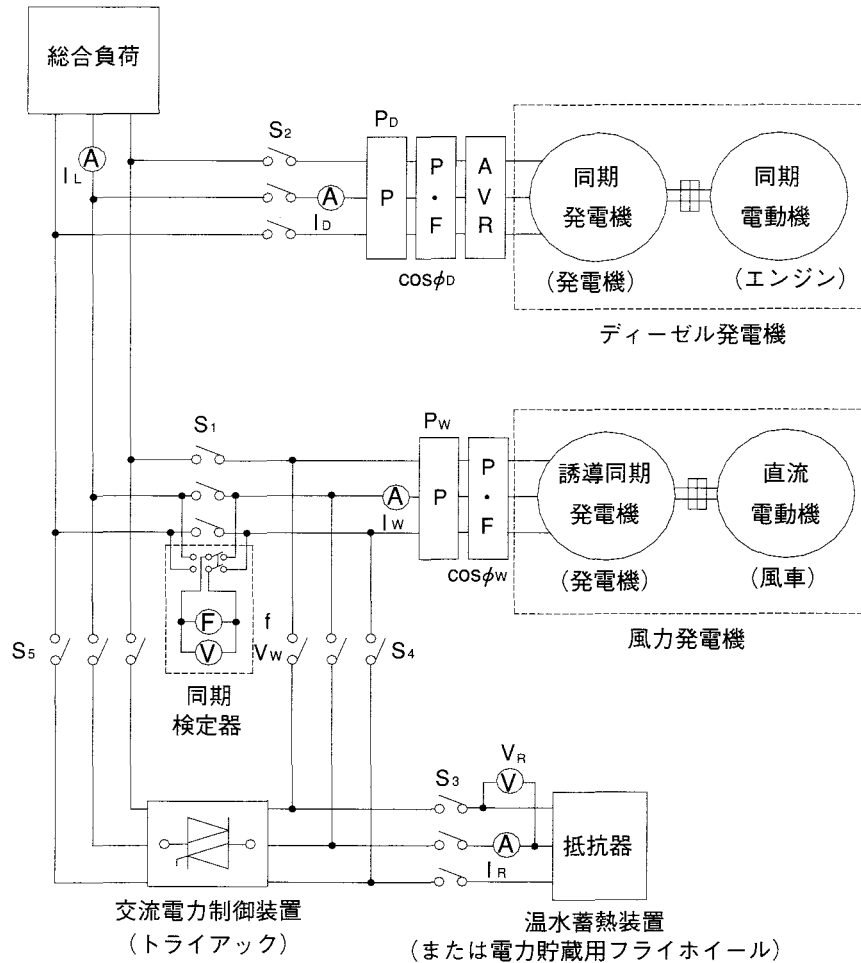


図2 新しい模擬実験装置

風力発電機とディーゼル発電機との間に同期検定器を接続している。ただし、本論文の実験では、実用化の際の装置に一層近づけて実験を行うため、交流電力制御装置として新しくトライアック（半導体スイッチング装置）を用い、且つディーゼル発電機には自動電圧調整器（AVR）を取り付けた。

2.2 実験方法

2.2.1 運転の種類

図1において、風が微風で風力発電機の運転が不可能なときは、ディーゼル発電機を単独運転する。風が弱風で、風力発電機の出力のみでは負荷電力を賄うことができないときは、ディーゼル発電機との並行運転（同期発電機動作）を行う。風が十分の平時には、風力発電機の単独運転（同期発電機動作）を行う。風力の変動が激しく、風力発電機の単独運転が不可能な突風時には、ディーゼル発電機との並列運転（誘導発電機動作）を行う。すなわち、本独立電源システムにおいては、両発電機の運転の種類が四つある。

2.2.2 各種の運転移行時のスイッチ操作

本項では、図2の模擬実験装置および図3に示す“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”の電気回路のそれぞれを基にして、両発電機を各種の運転へ移行させるときのスイッチ操作について説明する。

(i) 並行運転を行うための同期引き入れ 図2の模擬実験装置において、まずディーゼル発電機の出力端子に接続されたスイッチ S_2 を閉じ、この発電機を負荷状態で単独運転しておく。次に、図3の電気回路において、風力発電機の固定子励磁巻線に接続されたスイッチ S_0 を閉じる。それと同時に、二組の三相固定子巻線 W_{SA} と三相固定子巻線 W_{SB} において、 W_{SB} 側に接続された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 を閉じて、風力発電機を無負荷状態で同期発電機として動作させる。その後、図2の風力発電機とディーゼル発電機との間に接続された同期検定器で両発電機の周波数および位相がそれぞれ一致したことを確認し、風力発電機の出力端子に接続されたスイッチ S_1 を閉じて、両発電機の同期引き入れ、すなわち並行運転を行う。そして、この一連のスイッチ操作時における負荷への供給電圧、電流の波形（振幅）をレコーダで観測する。

(ii) 並行運転から並列運転への移行 両発電機の並

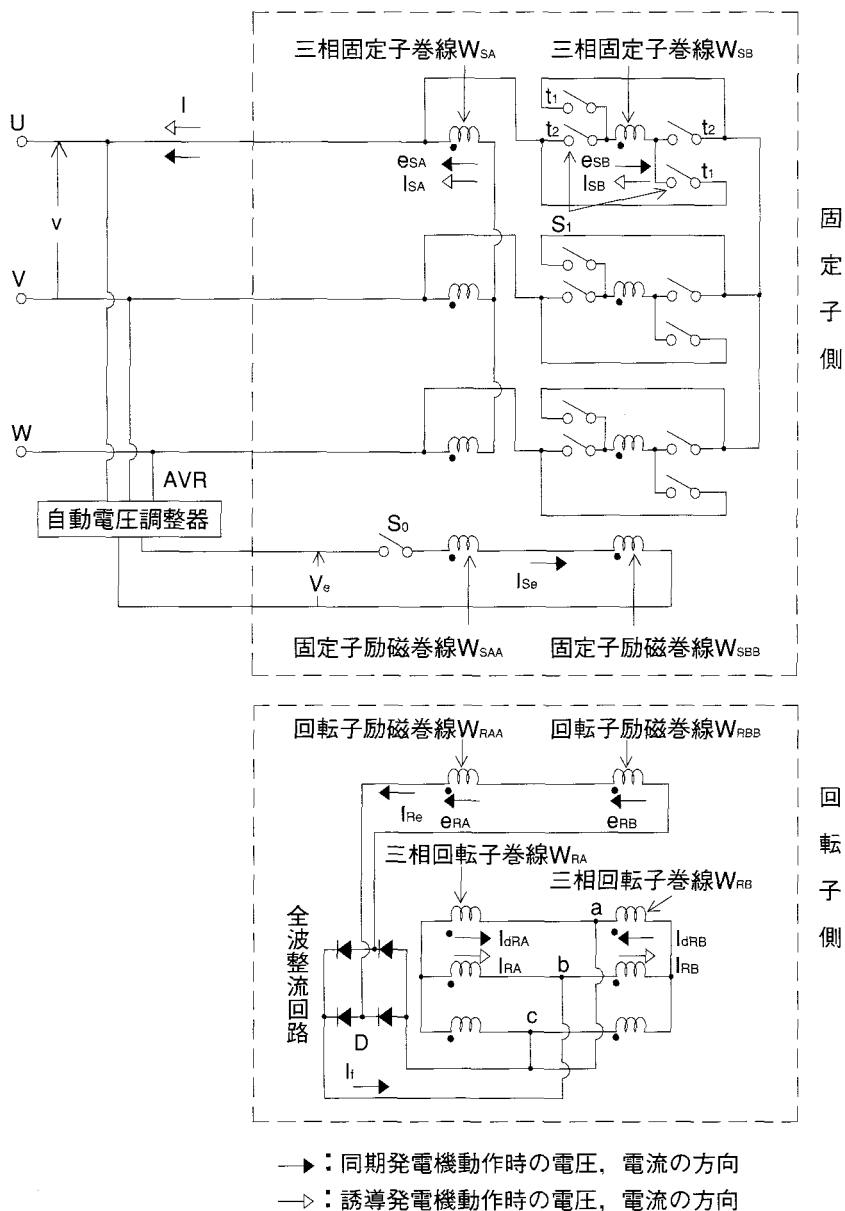


図3 風力発電機（無励磁機方式のブラシレス2固定子三相誘導同期発電機）の電気回路

行運転時に負荷を掛けておき、図3の三相極性切り換えスイッチ S_1 の接点 t_1 を開き、接点 t_2 を閉じて、風力発電機を誘導発電機として動作させる。すなわち、両発電機を並行運転から並列運転へ移行させる。そして、この一連のスイッチ操作時における負荷への供給電圧、電流の波形（振幅）をレコーダで観測する。

なお、両発電機の並行運転から並列運転への移行時に、固定子励磁巻線に接続されているスイッチ S_0 が閉じていても、固定子励磁巻線を通れる直流電流 I_{se} に基づいて、最終的に三相固定子巻線 W_{SA} に誘導する起電力 e_{SA} と三相固定子巻線 W_{SB} に誘導する起電力 e_{SB} とは、回路内で互いが相殺するため、負荷への供給電圧、電流特性には影響を及ぼさない。ただし、固定子鉄心において多少の鉄損増加を招くことになるため、実用化の際には並行運転時に

スイッチ S_0 を閉じておき、並列運転へ移行した直後にスイッチ S_0 を開く設計にする方が良い。

(iii) 並列運転から並行運転への移行 風力発電機のすべりを小さく（負荷分担を軽く）しておき、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 を閉じて、風力発電機を同期発電機として動作させる。すなわち、両発電機を並列運転から並行運転へ移行させる。そして、この一連のスイッチ操作時における負荷への供給電圧、電流の波形（振幅）をレコーダで観測する。

3. 実験結果

本章では、図2の模擬実験装置において、風力発電機（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）と、ディーゼル発電機（ブラシ付三相同期発電機）とを三

つの種類の運転にそれぞれ移行したときの過渡特性の実験結果を示す。すなわち、風力発電機とディーゼル発電機とを並行運転するための同期引き入れ時、両発電機の並行運転から並列運転への移行時、その逆の並列運転から並行運転への移行時のそれぞれにおける負荷への供給電圧、電流の波形（振幅）の観測結果を示す。

3.1 並行運転（同期引き入れ）時の過渡特性

図4 (a), (b) は、風力発電機を同期発電機として動作させ、それと単独運転のディーゼル発電機とを負荷状態（軽負荷）において同期引き入れしたときの過渡特性の実験結果を示す。すなわち、このときの負荷へ供給される電圧、電流の波形（振幅）をレコーダで観測した結果を示す。

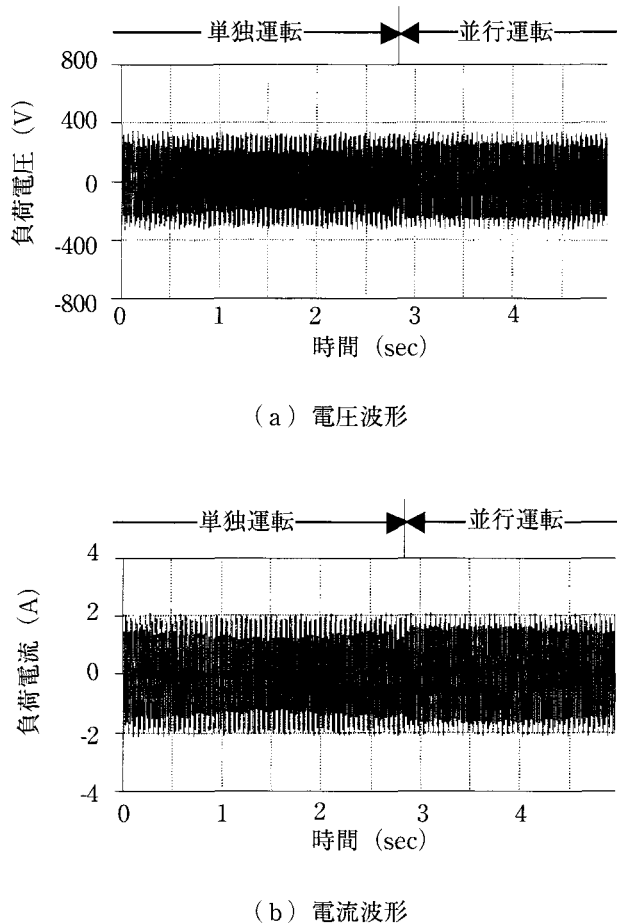


図4 並行運転するための同期引き入れ時の負荷電圧、電流の実測波形（振幅）

図4 (a), (b) の電圧波形、電流波形には、同期引き入れ時にそれぞれ脈動が殆ど見られない。このことは、両発電機の同期引き入れ、すなわち並行運転が容易に行われていることを意味している。

3.2 並行運転から並列運転へ移行時の過渡特性

図5 (a), (b) は、図3の三相極性切り換えスイッチ

を操作して、風力発電機とディーゼル発電機とを負荷状態において並行運転から並列運転へ移行したときの過渡特性の実験結果を示す。すなわち、このときの負荷へ供給される電圧、電流の波形（振幅）をレコーダで観測した結果を示す。

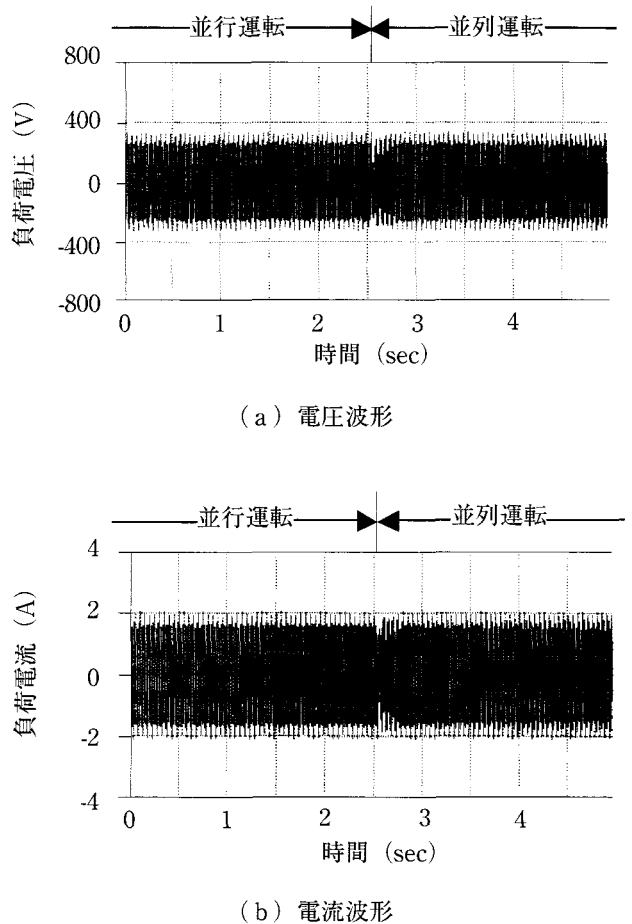


図5 並行運転から並列運転へ移行時の負荷電圧、電流の実測波形（振幅）

図5 (a), (b) の電圧波形、電流波形には、三相極性切り換えスイッチの操作時にそれぞれ多少の脈動がみられる。しかし、この程度の脈動であれば、負荷への悪影響は殆どない。

3.3 並列運転から並行運転へ移行時の過渡特性

図6 (a), (b) は、図3の三相極性切り換えスイッチを操作して、風力発電機とディーゼル発電機とを負荷状態において並列運転から並行運転へ移行したときの過渡特性の実験結果を示す。すなわち、このときの負荷へ供給される電圧、電流の波形（振幅）をレコーダで観測した結果を示す。

図6 (a), (b) の電圧波形、電流波形には、三相極性切り換えスイッチの操作時にそれぞれ脈動が殆ど見られない。このことは、両発電機の並列運転から並行運転への移

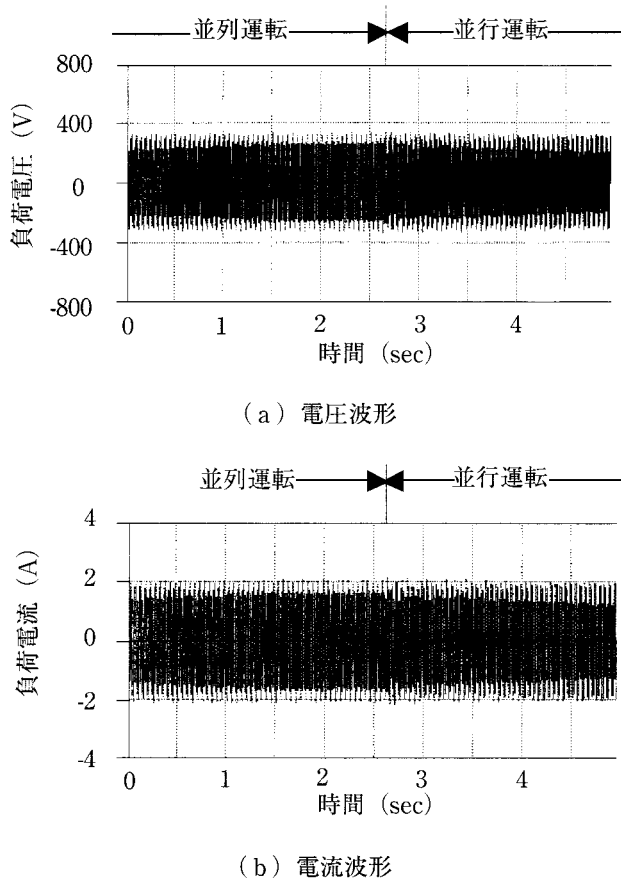


図6 並列運転から並行運転へ移行時の負荷電圧、電流の実測波形 (振幅)

行が容易に行われていることを意味している。

一般に、2台の同期発電機を並行運転するための同期引き入れの際には、2.2節の2.2.2項で述べたような図2に示す同期検定器を必要とする。しかし、筆者らが風力発電機として開発した“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”は、図6から明らかなように、同期検定器を用いなくても同期引き入れが実験的に容易に行われている。すなわち、本機は、すべりを小さく（負荷分担を軽く）しておけば、三相極性切り換えスイッチの操作のみによる同期引き入れが可能であることが実験的に把握された。これは、本機が誘導発電機動作の状態であっても、2固定子構造の作用によって、三相回転子巻線に直流電流を重畳しておくことができるため、三相極性切り換えスイッチの操作のみによる同期引き入れが可能であったものと推測する。何れにしても、この現象は本機の大きな特長の一つに成り得ることから、今後この裏付けを理論的および実験的にそれぞれ詳細に行う予定である。

4. あとがき

本論文では、筆者らがこれまでに提案した“風力発電を

利用した独立電源システム”の模擬実験装置の一部を新しくした装置において、風力発電機とディーゼル発電機との各種の運転移行時における過渡特性を実験的に求めた。

すなわち、風力発電機として用いた“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”と、ディーゼル発電機として用いた従来のブラシ付三相同期発電機とを並行運転するための同期引き入れ時、両発電機の並行運転から並列運転への移行時、その逆の並列運転から並行運転への移行時のそれぞれにおいて、負荷へ供給される電圧、電流の波形 (振幅) をレコーダで観測した。

その結果は、模擬実験装置における上述の何れの運転移行時も負荷への供給電圧、電流の波形 (振幅) の脈動は非常に小さく、過渡特性は良好であった。したがって、本論文で得られた良好な過渡特性と前論文²⁾の良好な定常特性とを併せると、本独立電源システムの成立の可能性が一層増してきた。

今後は、本独立電源システムの模擬実験装置を実用化の際の装置に一層近づけるため、図2の交流電力制御装置として用いているトライアック (半導体スイッチング装置) の自動化を図る予定である。また、今回の実験において、風力発電機として用いた“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”は、同期検定器を用いなくても三相極性切り換えスイッチの操作のみで、ディーゼル発電機との並列運転から並行運転へ移行するときの同期引き入れができる、有益な実験結果が得られた。この有益な現象についても、今後詳細に説明する予定である。

最後に、実験に協力された学部生の賀屋智行、川原久典、三浦隆浩、安平賢尚君に謝意を表します。

文 献

- 1) 中塚忠弘・猪上憲治・山下英生：「風力発電を利用した独立電源システムの一案」, 平成13年度電気・情報関連学会中国支部第52回連合大会講演論文集, No. 200401, pp. 509-510 (2001)
- 2) 猪上憲治・野中勝允・山下英生：「風力発電を利用した独立電源システムの一提案」, 広島工業大学紀要研究編, 第38巻, pp. 25-32 (2004)
- 3) 中波瀬薫・猪上憲治・山下英生：「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」, 平成11年度電気・情報関連学会中国支部第50回連合大会講演論文集, No. 090406, pp. 256-257 (1999)
- 4) 佐竹 覚・大野木幸男・猪上憲治・松田真典：「ブラシレス三相同期発電機」, 公開特許公報, 特開平11-220857 (1999)