太陽電池から所望の駆動力を得るための誘導機による系統連系

正員 泉 照 之 (山 口 大)

正員 田 村 敬 造 (山 口 大)

非会員 薄 井 洋 基 (山 口 大)

正員 猪 上 憲 治 (広島工大)

Utility Interactive System by Induction Machines for Supplying the Desired Mechanical Power from Solar Batteries

Teruyuki Izumi, Member, Keizou Tamura, Member, Hiromoto Usui, Non-member (Yamaguchi University), Kenji Inoue, Member (Hiroshima Institute of Technology)

Solar energy is very attractive as a future power source because of an clean and inexhaustible supply. However electric power of solar batteries is variable according to weather conditions. Therefore it is stabilized by storage batteries or supplied to the utility line through an inverter for utility interconnection. These systems, however, have some problems of cost and maintenance.

This paper proposes a new utility interactive system which is composed of an induction machine A related to a solar battery through a general purpose inverter and another induction machine B interconnected with the utility line. The frequency of the inverter to drive the machine A is given so that the solar power can be utilized maximumly. This system can stably supply a mechanical load with the desired power by parallel operation of two induction machines even in rainy weather, and moreover regenerate extra power of the solar battery to the utility line in fine weather. This proposed system is economic and useful as a small decentralized power supply because a power filter for rejecting high frequency noises and a detector for a power failure are not necessary.

キーワード：太陽電池，系統連系，誘導機の並列運転，汎用インバータ

1. ま え が き

太陽光のエネルギーはクリーンで無尽蔵であるから将来の電力源として注目されている。しかし、太陽電池から得られる電力は、気象条件に依存して不安定であるので、それ単独で負荷へ安定供給できない^{(1)~(3)}。そのため、蓄電池を用いて安定化がなされているが^{(4)~(6)}、コストや保守に問題がある⁽⁷⁾。また、太陽電池と電力系統とを連系させるインバータの研究もある⁽⁸⁾⁽⁹⁾。しかし、系統連系用インバータは、それ自身が発生する高調波成分によって電力の品質を低下させたり、電磁誘導障害をひきおこすので、電力用ノイズフィルタを付加する必要がある。また、配電線の作業などでインバータが上位系統から切り離されたとき、安全のために逆充電を防止する対策を講じなければならないなど問題点が多い⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。これらに対して、汎用インバータを用いて太陽光電力で誘導電動機を駆動するポンピングシステムの提案がある⁽¹⁾。このシステムをヒートボ

ンプ⁽¹²⁾⁽¹³⁾に適用して太陽光エネルギーを熱エネルギーに変換して蓄熱し、空調などに利用する方法が考えられる。その場合、変動する太陽光電力に対してヒートポンプは一定負荷となるので、電力の平衡が取れず、誘導電動機1台では常時運転できない。

著者らは、汎用インバータを介して変動電力源に接続された誘導電動機Aと、電力系統に直接接続されたもう1台の誘導機Bが並列運転する構成で、変動電力源から一定駆動力を供給するシステムを先に提案した⁽¹⁴⁾。このシステムは、変動電力源の出力に応じて誘導機Bが電動機あるいは発電機となり、一定駆動力を供給しながら余剰な電力を系統に無駄なく送ることができる。この方式は、インバータが電力系統と直接接続されていないので、上記の電力品質の低下や逆充電の問題は生じない利点がある。先の報告は、太陽電池の代わりに直流定電圧源を用いての原理の確認に留まっていた。また、インバータの周波数の制御に回転数を測定する必要があり、システムが高価格にな

るだけでなく、応答が遅い欠点があった。

本論文は、変動電力源として太陽電池を用い、先の提案を発展させた新しい小規模分散型電源システムを確立することを目的とする。まず、負荷の駆動動力が既知である場合、太陽電池から最大電力を取り出すためのインバータの指令周波数が、太陽電池の出力と電圧の情報から決定できることを示している。これによって回転計が不要になり、かつ応答速度が高まり日射量の急変にも追従できるようになる。また、太陽電池は定電圧特性でないけれども系統との連系によって安定に並列運転ができることを示している。この分散型電源システムは、所望の駆動動力を得ながら、強い日射時には太陽光の余剰電力を系統に供給できる特徴をもっている。

2. システムの構成

建物の屋上には多くの誘導電動機が冷暖房や換気用などに運転されている。一方、そこには太陽エネルギーが降り注いでいるので、太陽光の電力で誘導電動機を駆動できれば、効率的である。このことに着目した分散型電源システムを図1に示す。これは2台の誘導機による並列運転で構成される。太陽電池の直流電力は、汎用インバータによって三相交流電力に変換され、誘導電動機 I. M. A を回転させる。この電動機は機械的負荷を担っているが、一般に負荷の電力 P_M は太陽光の発生電力 P_S と一致しない。そこで、もう1台の誘導機 I. M. B がこれらに機械的に結合されて、かつスイッチ SW を介して系統に連系されている。この B 機が、日射量によって不規則に変動する太陽光の電力 P_S と所望の機械出力 P_M の差異を吸収する役目を果している。主に曇りや夜間時における $P_S < P_M$ の場合、誘導機 B は電動機として機能し、系統からの電力補完により所望の駆動動力を得る。反対に強い日射や軽負荷時における $P_S > P_M$ の場合、誘導機 B は発電機として働き、所望の駆動動力を発生しながら余剰電力を系統に供給する。これらの切り替えはインバータの周波数 f_A によって自動的に実現できる。さらに、 P_S が太陽電池の発生し得る最大電力 P_S^* に等しくなるように f_A を決めれば、太陽光のエネルギーが最大限に利用できる。そこで、次章でインバータの周波数の決め方について述べる。

図1 誘導機を用いる系統連系システム

Fig.1. A new utility interactive system by using induction machines.

3. インバータの周波数

三相誘導機の一相当りの入力電圧を V 、周波数を f 、一次巻線抵抗を r_1 、等価二次巻線抵抗を r_2 、極対数を p 、回転子の1秒当たりの回転数を n 、すべりを s 、軸出力を P とする。誘導機 A, B に対してこれらの記号を識別するためにそれぞれ添字 A, B をつけることにする。そして、これらを用いて太陽光の電力 P_S を有効に利用しながら所望の機械出力 P_M を得るためのインバータの周波数 f_A を求める。

〈3・1〉 回転数情報の利用 誘導機 A が周波数 f_A のインバータで駆動されると、すべり $s_A = (f_A - p n_A) / f_A$ が生じる。 s_A が小さいとき A 機の出力は

$$P_A = 3(V_A^2 / r_{2A}) \cdot s_A (1 - s_A) \quad (1)$$

で表わされる。一方、誘導機の損失は、無負荷損と負荷損とからなる。前者は、機械損を無視すると、鉄損と励磁電流による一次巻線抵抗損の和であり、 L_{0A} とする。後者は、負荷電流による二次巻線抵抗損 $\{s_A / (1 - s_A)\} P_A$ と一次巻線抵抗損 $\{r_{1A} / r_{2A}\} \{s_A / (1 - s_A)\} P_A$ の和である。したがって、A 機の入力電力 W_A は次式で表わされる。

$$W_A = (r_{2A} + r_{1A} s_A) / \{r_{2A} (1 - s_A)\} \cdot P_A + L_{0A} \quad (2)$$

太陽光の電力 P_S は、インバータの損失を L_I とすると、つぎのように A 機の入力電力と平衡する。

$$P_S = W_A + L_I \quad (3)$$

L_{0A} は、誘導機の入力電圧と周波数の関数であるが、本方法におけるそれらの変動範囲は小さいので、簡単のために一定とみなす。また L_I も、負荷によって少し変わるがそれ自身小さいので、定数とする。この仮定のもとで、(1) ~ (3) 式より s_A を求めると、

$$s_A = \{(\sqrt{1 + 4 r_{1A} (P_S - L_{0A} - L_I) / 3 V_A^2} - 1) (r_{2A} / 2 r_{1A})\} \quad (4)$$

が得られる。しかし、実際の操作量は f_A であるから、(4) 式から f_A を求めると、次式のようにになる。

$$f_A = \frac{p n_A}{1 + \{1 - \sqrt{1 + 4 r_{1A} (P_S - L_{0A} - L_I) / 3 V_A^2}\} (r_{2A} / 2 r_{1A})} \quad (5)$$

回転数 n_A を測定して、この式より得られる f_A でインバータを制御すれば、システムは P_S に応じた平衡状態になる⁽¹⁴⁾。しかし、回転数情報をフィードバックする方法は、その測定値のばらつきを抑えるために多くの時間を要するので、システムの応答が遅くなる欠点がある。また、回転計の使用がコストを上げたり、信頼性を低下させるなどの問題点がある。したがって、本論文では回転数の情報を利用しない方法を考える。

〈3・2〉 機械負荷情報の利用 機械的負荷の所要動力 P_M は、誘導機 A, B の出力の和に等しい。したがって、 P_B が(1)式と同様に表わされるので、

$$3(V_A^2 / r_{2A}) \cdot s_A (1 - s_A) + 3(V_B^2 / r_{2B}) \cdot s_B (1 - s_B) = P_M \quad (6)$$

となる。A 機と B 機は機械的に結合されていて、その速

度比を g とすると、

$$n_B = g n_A \dots\dots\dots (7)$$

である。これを(6)式の s_B の中に代入して、整理すると、

$$\frac{V_A^2}{r_{2A}} s_A + \frac{V_B^2}{r_{2B}} \left\{ g \frac{p_B f_A}{p_A f_B} - \left(g \frac{p_B f_A}{p_A f_B} \right)^2 (1 - s_A) \right\} = \frac{P_M}{3(1 - s_A)} \dots\dots\dots (8)$$

が導かれる。これから f_A を求めると次式が得られる。

$$f_A = f_B \frac{1 + \sqrt{1 - 4 r_{2B} / V_B^2 \{ P_M / 3 - V_A^2 s_A (1 - s_A) / r_{2A} \}}}{2 g (p_B / p_A) (1 - s_A)} \dots\dots\dots (9)$$

また、誘導機 A の負荷損を無視して、(4)、(9)式に省略算を適用すると、付録に示すように周波数の簡易な計算式

$$f_A' = \frac{f_B}{g(p_B/p_A)} \left\{ 1 - \frac{(P_M + L_{0A} + L_I - P_S) r_{2B}}{3 V_B^2} + \frac{(P_S - L_{0A} - L_I) r_{2A}}{3 V_A^2} \right\} \dots\dots\dots (10)$$

が得られる。図2は $P_M = 475 \text{ W}$ における太陽電池の出力 P_S に対するインバータの周波数を示している。実線は(9)式によって、また破線は(10)式によってそれぞれ計算された結果である。 P_S が小さい領域では両者はほとんど一致しているので、誘導機の負荷損を無視した簡易式(10)でも十分に実用的であると考えられる。そこで、以下の実験ではインバータの周波数として簡易式を用いることにする。

以上、 L_{0A} , L_I , r_{2A} , r_{2B} , p_A , p_B , f_B , V_B , g が既知量であるから、 P_S と V_A を測定すれば、インバータの周波数は(10)式から求められる。その場合、わずかな回転数の変動に対して P_M が一定であるとみなし得て、その値が既知であることを前提としている。そのような負荷として空調用ヒートポンプなどが考えられる。太陽電池の最大出力を P_S^* とすると、 $P_S \leq P_S^*$ となる P_S によるインバータの指令周波数によって、太陽電池の実出力は指定電力 P_S に等しくなる。したがって、日射量によって変動する P_S^* の測定値を(10)式の P_S に代入して最適周波数を決めれば、太陽電池は常に最大電力 P_S^* をインバータに供給できる。

図2 太陽光電力に対するインバータの指令周波数

Fig. 2. Frequencies of an inverter driving a induction motor A by solar power P_S .

4. 基礎実験

<4・1> 実験装置 実験で使用した誘導機 A, B は、共に定格 2 kW , 200 V , $p_A = p_B = 2$ である。これらは半径比 $1 : 0.9$ のベルト車で結合されていて、 $g = 10/9$ である。B 機は $f_B = 60 \text{ Hz}$, $V_B = 200/\sqrt{3} \text{ V}$ の電力系統にスイッチを介して接続され、A 機は電圧型汎用 PWM インバータ(富士電機製の FVR-G 5)で駆動されている。汎用インバータの速度制御範囲は広いが、商用電源に接続されている誘導機との並列運転においては、運転周波数の変動はわずかで、本インバータの出力電圧 V_A は直流側電圧に依存している。この章の実験では、直流電源としてインバータの内部整流器を用い、その電圧は 300 V 一定とした。一方、機械的な負荷としては直流発電機が用いられている。

<4・2> システムの定常特性 最初に各機器の定常運転時における損失を調べた。定格回転数近傍で、誘導機の無負荷損は $L_{0A} = 120 \text{ W}$, $L_{0B} = 170 \text{ W}$, インバータの損失

図3 A 機が定電圧源で駆動されるとき各部の電力

Fig. 3. Powers when the machine A is driven by a constant voltage source.

図4 発電時の B 機の電圧・電流波形

Fig. 4. Waveforms of the voltage and current of the machine B at $f_A = 57 \text{ Hz}$.

は $L_I=30$ W であった。直流発電機の負荷は、その機械的入力 P_M が約 470 W になるように調整されている。これらの条件のもとでマニュアル操作で f_A を変化させて、そのときの誘導機 A、B への入力電力 W_A 、 W_B をそれぞれ測定した。そして、(2)式より P_A 、同様な式より P_B を求めると、それぞれ図 3 の●、▲印のようになった。 P_A が大きい場合、高い f_A でパワーが平衡する。このとき誘導機 A の出力は、機械的負荷と発電機状態である誘導機 B にパワーを供給している。○印は P_A+P_B を表わし、破線の P_M にほぼ一致している。この結果から(6)式が満たされていることがわかる。図 4 は $f_A=57$ Hz における誘導機 B の相電圧、相電流の波形を示す。電流の位相が電圧より約 120 度遅れ、B 機が発電状態であることを表わしている。

〈4・3〉 システムの過渡特性 日射量が急激に変化した場合を想定して、太陽電池の出力 P_S^* に対するステップ応答を調べる。 P_S^* の指令が 200 W から 1000 W に変化したときの実験結果を図 5 に示す。 P_S^* が 200 W のとき、 $f_A=54.0$ Hz となり、A 機と B 機はそれぞれモータの状態 で機械負荷 $P_M \approx 470$ W を担っていた。 $P_S^*=1000$ W の指令変更によって、 f_A が(10)式より 55.5 Hz と決められる。このインバータ周波数 f_A の増加によって、図 5 の波形からわかるように誘導電動機 A への入力は増加し、逆に誘導電動機 B への入力は減少する。特にこの場合、 W_B は負になっていることから、誘導機 B が発電機となり、約 220 W の余剰電力を系統に再生している。つまり、太陽電池の出力増加に伴って、A 機が太陽電池の出力を最大限利用するように、A 機と B 機の負荷分担が変化したことを示す。この負荷分担の変更は僅かな回転数の変化によってなされる。ところで、 W_A 、 W_B が定常状態に達するのに約 1 秒ほど要している。この遅れの要因として、システムの慣性モーメントとデジタル電力計における電力計算時間の影響が考えられる。前者は負荷分担の変更に伴う回転

図 5 誘導機 A の入力変化に対する応答
Fig. 5. Responses due to change of input power to the induction motor A.

数の変化が小さいので十分小さいと思われる。いずれにしても、先に報告した回転数情報を利用したフィードバック制御⁽¹⁴⁾に比べると、応答時間は大幅に短縮された。

5. 太陽電池を用いた実験

実験に使用した太陽電池群は、公称開放電圧 25 V、短絡電流 2 A、出力 40 W のパネル 20 枚から構成され、屋上に設置されている。これらは 10 枚が直列に接続され、2 組並列になっている。4 章で使ったインバータは、この太陽電池で動作できるように直流電源部が改造されている。このため、インバータは直流電圧約 240 V 付近で動作する。したがって、これで駆動される A 機の鉄損が小さくなり、無負荷損は $L_{0A} \approx 80$ W であった。

〈5・1〉 太陽電池の最大出力の推定 太陽電池は日射量に応じて決まる最適動作点において最大出力を取り出せる。最適動作点を探索する種々の方法があるが、ここでは最大出力 P_S^* を知るだけで十分である。そこで、主電源とする太陽電池と同規格の小容量のモニタ用セルの短絡電流から P_S^* を推定する⁽⁴⁾。太陽電池は短絡状態付近では定電流特性を示すので、モニタに接続した小抵抗の端子電圧 V_m は短絡電流に比例する。 V_m と主電源の太陽電池の最大電力の関係は、気温約 25 度におけるいろいろな日射量のもとで調べると、次のような実験式で表わされた。

$$P_S^* = 113 \cdot V_m \quad (11)$$

以後、この式を用いて V_m の測定値から P_S^* を推定する。なお、この推定法は、動作温度に依存するので、本来なら温度検出を必要とするが、本論文では省略する。

〈5・2〉 負荷分担 太陽電池が約 700 W の最大出力を安定して発生しているときのシステムの定常特性を調べた。〈4・1〉と同様にマニュアル操作でインバータの周波数 f_A を変化させて、誘導機 A と B の負荷分担を求めた。図 6 に f_A に対する各電力 P_A 、 P_B 、 P_A+P_B 、 P_M のそれぞれ●、▲、○、---の

図 6 A 機が太陽電池で駆動されるとき各部の電力

Fig. 6. Powers when the machine A is driven by the solar batteries.

▲, ○, 破線で示す。これから, 図3と同様に $P_A + P_B \doteq P_M$ であることがわかる。A機の出力 P_A は, f_A の増加とともに増すことは図3と同じであるが, 約600 Wを最高にして低下している。このことから, 太陽電池を電源にする場合, その最大電力を引き出すための最適な f_A が存在することがわかる。また, この f_A より大きな周波数がインバータに指令されると, 太陽電池の動作点が最適点より離れ定電流領域に入っていることを示す。この状態でもB機からのパワーの供給があり, A機は安定に運転できる。もし, A機単独で機械的負荷を担っている場合, $P_A < P_M$ になるとA機の回転は停止する。これに対して, 本システムは, A機のパワーの不足分をB機が補うため, 太陽電池の動作点が定電流領域に入ってもA機は停止しない。

〈5・3〉 自動運転 コントローラであるパソコンは, モニター用電池の V_m とインバータの出力電圧 V_A を取り込む。そして, (11)式より P_S^* と V_A を(10)式に代入して得られた f_A をインバータに指令する。自動運転はこの動作を0.17秒ごとに繰り返す。日射量が急に変化する場合, 最初のサイクルでは, 測定値 P_S^* は最大出力値になっているが, V_A は最大出力値に対応した値であるとは限らない。しかし, f_A は太陽電池の動作点を最大出力点に近づけるように変化させるので, 何サイクルか後には, 動作点

が最大出力点に移動し, また V_A も最大出力点に対応した値となり, 新しい P_S^* に応じた平衡状態に達する。その根拠は, インバータの出力電圧, すなわち V_A が太陽電池の動作点電圧に追従して変わることにある。

〈5・4〉 変動特性 最初に, 太陽電池の最大出力 P_S^* が変化したときの様子を調べる。図7は, (11)式の P_S^* が約480 Wから100 Wに減少した場合, B機の入力 W_B と機械的負荷 P_M の時間的経過を示す。 W_B は三相電力計の値を, P_M は直流発電機の負荷電流の測定値から得られた出力にその損失を加算した値を表示している。このとき, W_B は約380 W増加して, P_M を240 W一定に保っていることがわかる。この W_B の増加は, W_A すなわち太陽電池の実出力 $P_S = W_A + L_I$ における380 Wの減少を意味している。図7における W_B と P_S^* の二つの波形から, P_S^* が変化しても太陽電池の実出力はそれによく追従していることがわかる。

つぎに, ほぼ一定な日射条件 $P_S^* = 700$ Wにおいて, 機械的負荷を変化させる実験をした。図8の中間の波形 P_M のように470 Wであった負荷を約4秒間220 Wに減少させた。同図の下部の波形 W_B は, モータとして働いていたB機が, P_M の減少の期間だけ発電機となり, 200 Wを系統に再生していることを示す。これは, 太陽電池の実出力

図7 太陽光電力 P_S^* の変化に対する応答
Fig. 7. Responses due to change of solar power P_S^* .

図9 システムの停電に対する応答
Fig. 9. Responses due to an interruption of electric supply.

図8 機械負荷 P_M の変化に対する応答
Fig. 8. Responses due to change of mechanical load P_M .

図10 システム停電時の発電電圧波形
Fig. 10. Waveforms of the generated voltage and power after an interruption of electric supply.

P_s が定常的には P_s^* の値に保たれていることを意味する。

最後に、B 機の発電中に系統が停電した場合を想定して図 1 の SW を開放したときのシステムの応答を調べる。上記と同様な $P_s^*=700\text{ W}$ において、 $P_M=220\text{ W}$ 、 $W_B=-200\text{ W}$ で運転中、図 1 の SW を約 5 秒間開放すると、各電力は図 9 のようになった。SW の開放時、 W_B が 0 になるだけで、 P_M は一定であり、本システムは所望の駆動力を負荷に供給できている。この場合太陽電池の動作点が最適値より離れて、 $P_s=330\text{ W}$ となり、約 370 W が無駄になる。SW を開放した直後における B 機の相電圧波形 V_B は図 10 のように 0 になる。このことは、本システムが太陽光電力による系統への発電を自動的に停止したことを示す。実際の系統には、図 1 における SW と I.M. B の間に電氣的負荷が接続されている。その負荷がある特定の静電容量値をもつ場合、誘導発電機は単独運転する可能性もある。しかし、その単独運転を安定的に継続させることは極めて困難であり、逆に単独運転を防止することは容易である。したがって、本システムは逆充電対策を必要としないと考えられる。

6. 系統連系用インバータとの比較検討

太陽光発電用インバータを用いて系統連系させる方法が開発されつつある。このインバータには、高周波成分が系統側に伝わらないようにノイズフィルタが内蔵されたり、インバータの故障時に直流電流が系統側に流出しないように変圧器が設置されなければならない。そのため、このインバータはモータ駆動用と異なり非常に高価になる。さらに、系統側が停電になったとき、これを検出してインバータの動作を停止させる逆充電防止機能も必要であるなど問題点が多い。

それに対して本システムは、系統側が停電になった場合、図 10 からわかるように発電が自動的に止まるので、上記の逆充電対策を考える必要がない。また、系統に接続された B 機の発電時の電流波形は、図 4 からわかるように高次の高調波成分を含んでいないので、ノイズフィルタも不要である。さらにインバータが故障しても系統側に悪い影響を及ぼさないなどの利点がある。一般に誘導電動機は始動トルクが小さいので、始動用インバータが用いられている。その場合、本システムは、安価な誘導機 A とコントローラだけを追加すればよいので、系統連系用インバータに比べて極めて簡単になる。

最後に、電力変換効率の面から本システムを検討する。実験で使用した誘導機の容量は、太陽電池の出力や機械負荷に対して大き過ぎた。そのため相対的に無負荷損 L_{0A} 、 L_{0B} が大きかったので、本実験での効率は高いとはいえない。誘導機 B の損失は、駆動力を発生する限りどの方法でも不可避であるので問題ない。しかし、A 機の損失はシステムの電力効率を低下させる。日射量が極端に小さい場合、この低下は顕著であるので、インバータの動作を停止させる必要がある。

7. あとがき

太陽光の電力を使用して所望の駆動力を誘導電動機で発生させる小規模分散型電源システムを提案した。これは、太陽光で駆動される誘導電動機 A と系統に直接接続された誘導機 B の並列運転によって実現されている。太陽電池を用いて本システムを検証して、以下の結論を得た。

- (1) 太陽電池が発生している電力を有効に利用するために誘導機 A を駆動するインバータの周波数を求めた。
- (2) 太陽電池の接続が直流電源部の簡単な改造で実現されるので、安価な汎用インバータが利用できる。
- (3) 日射が弱いときでも B 機の援助によって所望の駆動力を安定に得ることができた。
- (4) 日射が強いときや要求駆動パワーが小さいとき、太陽光の電力が B 機を通じて系統に回生できた。
- (5) 系統が停電したら B 機の発生電圧は自動的に 0 となり、また、インバータの故障が系統に影響をおよぼさないなど分散電源として望ましい特性を有している。

(平成 6 年 5 月 23 日受付、同 7 年 1 月 5 日再受付)

文 献

- (1) 黒川・山上・谷：「太陽光発電システムの各種システム構成とその分類」，電子技術総合研究所集報，50，96 (昭 61)
- (2) 黒川：「太陽光発電の最近の開発動向」，電学論 D，108，106 (昭 63-2)
- (3) 長谷川・外山・内島・西條：「太陽電池・誘導発電機ハイブリッド発電システムの電力特性」，電気学会全大，12-212 (平 6-3)
- (4) H. Matsuo & F. Kurokawa: "New Solar Cell Power Supply System Using a Boost Type Bidirectional DC-DC Converter", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, IE-31, 51 (1984-2)
- (5) 大西・高田：「太陽電池の最大出力制御方式の比較と昇降圧チョッパ回路を用いた制御特性」，電学論 D，112，250 (平 4-3)
- (6) 川崎：「蓄電池を用いた太陽光発電システムの可能発電電力」，電学論 D，112，244 (平 4-3)
- (7) 黒川・津田・野崎：「太陽光発電用蓄電池の開発動向」，電学論 B，110，91 (平 2-2)
- (8) 原田・趙・村田：「商用電源と太陽電池の磁気連係装置の最適化」，計測自動制御学会論文集，26，62 (平 2-1)
- (9) 野中・袈裟丸・山崎：「単相 PWM 電流型インバータによる太陽光発電連系システム」，電学論 B，112，439 (平 4-5)
- (10) 佐々木：「太陽光発電インバータの現状と課題」，電学誌，112，950 (平 4-12)
- (11) 橋本：「電力系統との系統連系技術」，電学誌，112，954 (平 4-12)
- (12) 尾崎・矢部：「省エネルギーに貢献するヒートポンプ」，電学論 B，111，827 (平 3-8)
- (13) A. Domijan, O. Hancock, & C. Maytrott: "A Study and Evaluation of Power Electronic Based Adjustable Speed Motor Drives for Air Conditioners and Heat Pumps with an Example Utility Case Study of the Florida Power and Light Company", *IEEE Trans. on Energy Conversion*, 7, 396 (1992-9)
- (14) 泉・薄井：「変動自然エネルギー源から所望の駆動力を得るための誘導機の並列運転」，電学論 D，114，472 (平 6-4)

付 録

〈簡易なインバータ設定周波数の導出〉

(4) 式は、Taylor 展開された後、 r_{1A} が小さいので高次項を無視して

$$S_A = \frac{r_{2A}}{3V_A^2}(P_s - L_{0A} - L_l) \dots\dots\dots (付 1)$$

と簡略化される。同様に (9) 式も r_{2B} が小さいので、

$$f_A = f_B \frac{1 - (r_{2B}/3V_B^2)(P_M - 3V_A^2 s_A(1 - s_A)/r_{2A})}{g(p_B/p_A)(1 - s_A)} \dots\dots\dots (\text{付2})$$

となる。分子の{ }内の第2項目が(1)式より P_A に、さらに P_A が(2), (3)式のA機の負荷損の無視より $P_s - L_{0A} - L_I$ となるので、(付2)式は

$$f_A = f_B \frac{1 - (r_{2B}/3V_B^2)(P_M + L_{0A} + L_I - P_s)}{g(p_B/p_A)(1 - s_A)} \dots\dots (\text{付3})$$

と表わされる。またこの式は、 $s_A \ll 1$ の関係を用いてさらに省略算を施すと、つぎのようになり、これを f'_A とする。

$$f'_A = \frac{f_B}{g(p_B/p_A)} \left\{ 1 - \frac{r_{2B}}{3V_B^2} (P_M + L_{0A} + L_I - P_s) + s_A \right\} \dots\dots\dots (\text{付4})$$

結局、(付4)式に(付1)式を代入すると(10)式が導かれる。

泉 照 之 (正員) 昭和46年広島大学工学部電子工学科卒業。同年4月通産省工業技術院九州工業技術試験所に入所。平成元年4月より山口大学工学部電気電子工学科助教授、現在にいたる。太陽光発電やロボットの省エネルギー運転の研究に従事。工学博士。

田 村 敬 造 (正員) 平成6年山口大学工学部電気工学科卒業。現在、同大学大学院工学研究科博士前期課程に在学中。太陽光発電を利用したシステムに関する研究に従事。

薄 井 洋 基 (非会員) 昭和49年京都大学大学院工学研究科博士課程化学工学専攻修了。現在、山口大学工学部応用化学工学科教授。工学博士。

猪 上 憲 治 (正員) 昭和42年3月広島工業大学工学部電気工学科卒業。同年4月同大学助手、現在、同大学助教授。主として、ブラシレス同期機、誘導機に関する研究に従事。