

太陽光を利用する2誘導機システムによる ポンプ等非定出力負荷の連続運転

Continuous Drive of Non-constant Power Load such as Pump
by Two Induction Machine System Utilizing Solar Energy

小枝 一彦^{*1}

Kazuhiko KOEDA

泉 照之^{*2}

Teruyuki IZUMI

Abstract

In order to make use of solar energy instead of oil and coal, the authors have proposed a new pumping system which is composed of two coupled induction machines with a photovoltaic array. One induction machine is driven by electric power of the photovoltaic array through a general-purpose inverter and the other induction machine is interconnected to the utility line. This system can generate a desired mechanical power and supply the surplus electric power of the photovoltaic array to the utility line.

In this paper the proposed two induction machine system is taken into consideration to drive the pump load for circulating water. As the power of this load is non-constant with respect to rotational speed, the inverter frequency is newly formulated in order to get the desired mechanical power while utilizing the maximum power of the photovoltaic array. And the variation of the rotational speed is estimated as a function of the fluctuating solar power. It is shown from experiments that the two induction machine system can continuously drive the volute pump even in a variable flow of water and fluctuating insolation.

Key Words : Solar energy, Induction machine, Non-constant power load, Pump, Maximum power

1. まえがき

化石燃料の大量使用は、その枯渇だけでなく、地球温暖化の問題を引き起こしている。また、原子力発電も廃棄物処理まで考えると、地球環境に悪影響を与えるものと予想される。それらに対して、太陽光など自然エネルギーは、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、太陽電池単独で電力を負荷へ安定供給できない。そのため、蓄電池⁽¹⁾や誘導発電機⁽²⁾を用いて安定化がなされているが、コストや保守に問題がある。したがって、系統連系用インバータを用いて太陽電池と電力系統を連系させる方式が主流になっている⁽³⁾。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、電磁波を発生するので、最近話題になっている電磁環境問題を引き起こす可能性がある⁽⁴⁾⁽⁵⁾。そのために、種々の対策が施されているが、その対策が系統連系用インバータの低価格化を阻んでいる。

一方、電気エネルギーの60~70%はモータを通じて

機械エネルギーに変換されている。その中で、ポンプやエスカレータ負荷のようにほぼ一定の回転数で連続運転される比率も高い。これらの負荷を太陽電池の電力で直接に駆動できれば、エネルギー問題の一解決策となり得る。その場合、変動する太陽電池の電力に対してポンプの負荷動力は所望の量を必要とするので、電力の平衡が取れず、電動機1台では常時運転できない^{(6)~(11)}。その対策として、双方向電力フロー機能をもつ変換装置を通じて系統電源と太陽電池を電氣的に結合して、電動機を駆動する方法がある⁽¹²⁾⁽¹³⁾。しかし、この双方向性電力変換装置は系統連系インバータの役割を兼ねているので、上述の問題点ははらんでいる。著者らは、変動する太陽電池の電力を最大限に利用して、かつ安定な機械駆動力を得るために、2台の誘導機を並列運転する新しいシステムを提案した⁽¹⁴⁾。これは、汎用インバータを介して太陽電池に接続した誘導電動機と、電力系統に直接接続したもう一台の誘導機を並列運転する構成である。この方式は、システムが安価に実現できるだけでなく、インバータが電力系統と直接接続されていないので、電磁環境を悪化させない利点がある。これまでに、定出力負荷に対して、太

*1 会員、中国電力株式会社

*2 会員、島根大学 総合理工学部、教授、工学博士
(原稿受付：平成11年6月2日)

The Chugoku Electric Power Co., Inc.

Dept. of Sci. and Engng., Shimane Univ., Prof., Dr.

陽電池から最大電力を得るためのインバータの周波数を求め、非定電圧源である太陽電池でも日射強度に応じたその最大電力を獲得しながら負荷を安定に連続運転できることを示した⁽¹⁶⁾。また、2固定子誘導機を使用することによって、システムが簡潔に実現できることを実証してきた⁽¹⁵⁾。しかし、これまでの解析や実験は、定出力負荷に対する基本的な考察に留まっていた、回転数に対して出力が変わるポンプのような実負荷について検討されていない。

本論文は、2誘導機システムを実際の非定出力負荷に適用して、その実用性を調べることを目的とする。まず、太陽電池の電力を有効に利用して非定出力負荷を駆動するために、太陽電池を電源とするインバータの指令周波数を求める。つぎに、そのインバータと系統電源との並列運転で駆動される負荷の回転数を計算する。そして、日射強度の変化や負荷の非定出力特性が回転数に及ぼす影響を調べる。最後に、渦巻ポンプで配管系の水を循環させる実験を行ない、日射強度が変化しても所定の流量を連続的に流し続けることができることを実証する。

2. 連続運転のためのシステム構成

太陽電池の電力は日射強度に応じて大幅に変動するので、太陽光のエネルギーだけでポンプを連続的に運転することは不可能である。そこで、図1に示すような2台の誘導機 I.M. A, I.M. B を機械的に直結して、ポンプを駆動する構成を考える。I.M. A は汎用インバータを介して太陽電池に、そして I.M. B は直接に系統の三相電源に接続され、両者は電氣的に並列運転となる。このシステムは、ポンプの負荷量 P_M に対して太陽電池の電力 P_S が小さい場合でも、系統電源からの電力補完によってポンプを駆動し続けることができる。また、反対に P_M に対して P_S が大きい場合、I.M. B が誘導発電機となり、余剰電力が系統電源へ回生される。この切り替えは、汎用インバータの周波数 f_A によって自動的になされる。

太陽電池は、定電圧源ではないので、日射強度に応じて最大電力を出力する最適動作点がある。太陽電池から無駄なく電力を獲得するためには、常に動作点が最適となるようにインバータの周波数を決める必要がある。

3. 負荷特性に応じたインバータの周波数

3.1 負荷の速度出力特性

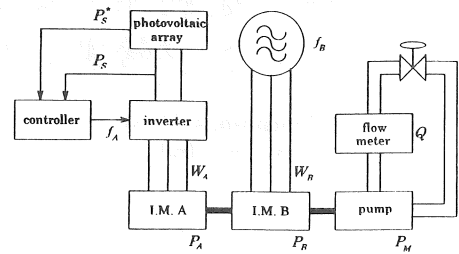


図1 2誘導機システムによるポンプの駆動

Fig.1 Pump driven by two induction machines.

送風機や渦巻ポンプは、回転数の2乗に比例したトルクを必要とする。したがって、それらの出力 P_M は、1秒当たりの回転数 n の3乗に比例する。ところが実際の機械は粘性摩擦やクーロン摩擦をとまないので、ここでは、機械的負荷の速度-出力特性として次式を考える。

$$P_M(n) = P_0 + P_1 n + P_2 n^2 + P_3 n^3 \quad (1)$$

ここで、 $P_i (i=0, 1, 2, 3)$ は負荷によって決まる定数である。多くの実負荷では $dP_M(n)/dn$ が正であるから、2誘導機システムにおける安定性は定出力負荷に比べて高くなる⁽¹⁶⁾。文献⁽¹⁴⁾では、簡単のために定出力の発電機を負荷としていたので、 $P_1 = P_2 = P_3 = 0$ となる特別の場合を解析したことに相当する。本章では実際に即して(1)式の非定出力負荷を図1のシステムで駆動するときのインバータの指令周波数を理論的に検討する。

3.2 インバータの周波数

三相誘導機の一相当たりの入力電圧を 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 、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 を付けることにする。そして、これらを用いて太陽電池の電力 P_S を有効に利用しながら所望の機械出力 $P_M(n)$ を得るためのインバータの周波数 f_A を求める。誘導機 A が周波数 f_A のインバータで駆動されるとき、すべり s_A は回転数の1秒当たりの回転数を n とすると、

$$s_A = (f_A - p_A n) / f_A \quad (2)$$

で定義される。 s_A が小さいときの A 機の出力は、

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

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。

$$W_A = \frac{r_{2A} + r_{1A}s_A}{r_{2A}(1-s_A)} P_A + L_{0A} \quad (4)$$

太陽電池の電力 P_S は、インバータの損失を L_I とすると、次のようにA機の入力電力と平衡する。

$$P_S = W_A + L_I \quad (5)$$

L_{0A} は、誘導機の入力電圧や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、(3)～(5)式から s_A を求めると、

$$s_A = \frac{r_{2A}}{2r_{1A}} \left\{ \sqrt{1 + \frac{4r_{1A}}{3V_A^2} (P_S - L_{0A} - L_I)} - 1 \right\} \quad (6)$$

が導かれる。一方、機械的負荷の所要動力 $P_M(n)$ は、誘導機A、Bの出力の和に等しい。したがって、 P_B が(3)式と同様に表わされるので、

$$\frac{3V_A^2}{r_{2A}} s_A (1-s_A) + \frac{3V_B^2}{r_{2B}} s_B (1-s_B) = P_M(n) \quad (7)$$

となる。A機とB機は機械的に直結されているので、B機の回転数も n である。したがって、(2)式と同様な s_B を求め、(1)式と共に(7)式に代入して整理すれば、

$$\begin{aligned} & \frac{V_A^2}{r_{2A}} s_A + \frac{V_B^2}{r_{2B}} \left\{ \frac{P_B f_A}{P_A f_B} - \left(\frac{P_B f_A}{P_A f_B} \right)^2 (1-s_A) \right\} \\ &= \frac{P_0}{3(1-s_A)} + \frac{P_1 f_A}{3 \cdot P_A} + \frac{P_2 (1-s_A) \left(\frac{f_A}{P_A} \right)^2}{3} \\ & \quad + \frac{P_3 (1-s_A)^2 \left(\frac{f_A}{P_A} \right)^3}{3} \end{aligned} \quad (8)$$

が導かれる。これは f_A に関する3次代数方程式であるから、その解を簡単な式で表現できない。しかし、 s_A 、 r_{2A}/V_A^2 、 r_{2B}/V_B^2 などが1に比べて非常に小さいので、(8)式の解は、付録に示すようにTaylor展開して高次項を無視すれば次式で表わされる。

$$\begin{aligned} f_A = f_B \frac{P_A}{P_B} \left[1 \right. \\ \left. - \frac{r_{2B}}{3V_B^2} \left\{ P_0 + \frac{f_B}{P_B} P_1 + \left(\frac{f_B}{P_B} \right)^2 P_2 + \left(\frac{f_B}{P_B} \right)^3 P_3 \right\} \right. \\ \left. + \left(\frac{r_{2B}}{3V_B^2} + \frac{r_{2A}}{3V_A^2} \right) (P_S - L_{0A} - L_I) \right] \end{aligned} \quad (9)$$

この式は、インバータの周波数 f_A が、太陽電池の電力 P_S の1次関数となり、(1)式の係数 $P_i (i=0, 1, 2, 3)$ に応じて平行移動することを意味する。図2は、 $P_0=50$ 、 $P_1=0$ 、 $P_2=0$ の条件で $P_3=0$ と $P_3=0.0024$ の2種類の負荷において、 P_S に対するインバータの周波数を

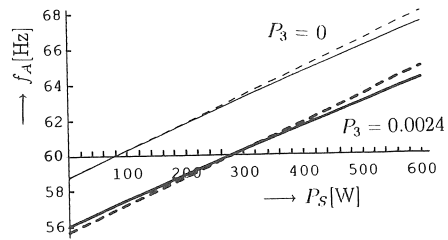


図2 非定出力負荷におけるインバータの指令周波数
 実線：(8)式の解、破線：(9)式

Fig.2 Frequency of an inverter driving induction motor for non-constant power load.

solid line:solution of Eq. (8), broken line:Eq. (9)

示す。実線は(8)式の解を、破線は(9)式の値をそれぞれ示したものである。両者はかなり良く一致しているため、(9)式がインバータの周波数を決める基本式となり得る。なお、計算では、実験で使用する誘導機を想定して、 $V_A=160/\sqrt{3}$ [V]、 $r_{2A}=4$ [Ω]、 $L_{0A}=60$ [W]、 $V_B=200/\sqrt{3}$ [V]、 $r_{2B}=4$ [Ω]、 $f_B=60$ [Hz]、 $L_I=20$ [W]の値を用いた。

以上、2誘導機システムで(1)式の負荷を駆動する場合、太陽電池の電力 P_S を有効に利用するためのインバータの周波数 f_A の式を示すことができた。これによって、負荷の特性や太陽電池の電力が f_A に及ぼす影響がわかる。

3.3 回転数

インバータの周波数が太陽電池の電力 P_S に応じて変わるので、システムの回転数も変化する。その回転数は、誘導機Aの回転数と同一であるから、(2)式に省略化された(6)式と(9)式を代入して、次のように求められる。

$$\begin{aligned} n = \frac{f_B}{P_B} \left[1 \right. \\ \left. - \frac{r_{2B}}{3V_B^2} \left\{ P_0 + \frac{f_B}{P_B} P_1 + \left(\frac{f_B}{P_B} \right)^2 P_2 + \left(\frac{f_B}{P_B} \right)^3 P_3 \right\} \right. \\ \left. + \frac{r_{2B}}{3V_B^2} (P_S - L_{0A} - L_I) \right] \end{aligned} \quad (10)$$

この式の右辺[]内第2項は、機械的負荷の影響を示すので、定電圧源で駆動される誘導機固有の回転数変動分である。これに対して、第3項は太陽電池の電力 P_S による回転数の変動分を表わす。したがって、この方式は日射強度によって回転数が若干変わるが、

誘導電動機の定速度特性の範ちゅう内での現象であるので、その変動量は小さい。なお、日射強度による速度変動を小さくさせるためには、小さい r_{2B} の誘導機を用いればよい。

4. 最適周波数の探索

4.1 太陽電池の特性と最適周波数の概算

太陽電池は定電圧源でないで、その出力電圧 V_S は電流 I_S の複雑な関数である。この章では太陽電池の直流特性として次式を用いる⁽⁹⁾。

$$V_S = V_0 \log_e \left((I_{PH} - I_S + I_0) / I_0 \right) - R_S I_S \quad (11)$$

ここで、 I_{PH} は日射強度に比例し、ほぼ短絡電流に等しい。また、 V_0 は開放電圧に関係し、 I_0 は逆方向飽和電流値、 R_S は直列抵抗値を示す。図3の○印は、実験に用いた太陽電池アレイの短絡電流が約2.5[A]の日射強度のもとで測定した直流特性の実験結果である。この図の実線は、(11)式において $V_0=32.5$ [V]、 $I_0=0.00045$ [A]、 $R_S=0.9$ [Ω]としたときの直流特性の計算値である。この曲線は、 I_S が小さい領域で誤差を持つが、最大出力が得られる最適動作点近傍では良く一致している。したがって、(11)式はインバータの周波数を概算する一つのモデル式となり得る。

太陽電池の電力 P_S に対応した動作電圧 V_S からインバータの交流電圧 V_A が決まる。これらの P_S と V_A を(9)式に代入することによって、太陽電池から P_S を得るためのインバータの周波数が計算できる。 $I_{PH}=3.6$ [A]に相当する日射強度のもとで、 $P_M(n)=50+0.0024n^3$ [W]の負荷を運転する場合、太陽電池の電力とインバータの周波数の関係を求めると、図4の実線で示すような曲線になった。この曲線から P_S を最大にする最適周波数が存在することがわかる。この図の破線は、誘導機⁽¹⁵⁾の巻線抵抗値が $r_{2A}=0.431$ 、 $r_{2B}=0.426$ [Ω]の場合の計算結果である。このように r_{2A} 、

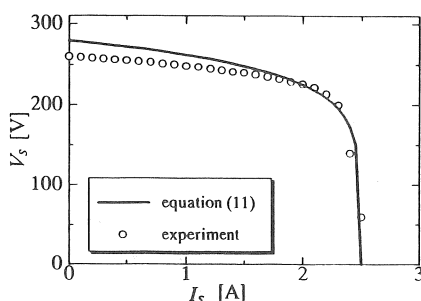


図3 太陽電池の直流特性

Fig.3 I-V Characteristic of the PV-Array.

r_{2B} が小さい場合、一般的に最大値に至る途中の $|dP_S/df_A|$ が大きく、そして最適周波数 f_A^* が $f_B=60$ [Hz]に近くなる。いずれにしてもこれらの最適周波数は、ある日射強度における最大電力 P_S^* とそれに相当する V_A^* を(9)式にそれぞれ代入すれば計算で求められる。最大電力 P_S^* は、電源とする太陽電池と同規格のモニターセルの短絡電流からかなりの精度で測定できる。もし、 P_S^* に対応する V_A^* も正確に知ることができれば(9)式は P_S^* の急激な変化にも追従できるので、応答性の良い制御が実現できる⁽¹⁴⁾。ところが、 P_S^* と V_A^* の関係を知ることは、(11)式の関数が日射強度やセル温度⁽¹⁷⁾に依存するだけでなく経年変化も受けるので、実際には容易ではない。また、誘導機の巻線抵抗値や P_i ($i=0, 1, 2, 3$)の値も正確に知る必要があるので、(9)式だけからインバータの最適指令周波数を厳密に決めることは難しい。

4.2 最大出力の探索制御

図4で示す曲線は極値付近で2次関数で近似できる。したがって、その極値を求めるために放物線近似法による直線探索アルゴリズムを基本的使用する。これは、現在の周波数 f_A と Δf_A 、 $2\Delta f_A$ 増加させた時のそれぞれの電力 P_S を測定して、 P_S が最大となる f_A^* を推定するものである。しかし、この方法は極値付近以外では誤差が大きくなるので、極値に近い周波数を初期値として知る必要がある。そのために、インバータの指令周波数の初期値として(9)式を用いる。この式の計算は、およその負荷特性とモニターセルの短絡電流値から推定された P_S^* から実行できる。この場合、使用する太陽電池の正確な電圧電流特性は容易に作成できないので、(11)式を用いて V_A^* を概算する必要がある。以上のことから、直線探索アルゴリズムの初期値として(9)式を用いることによって、太陽電池が発生している最大電力を効率的に探索できる。

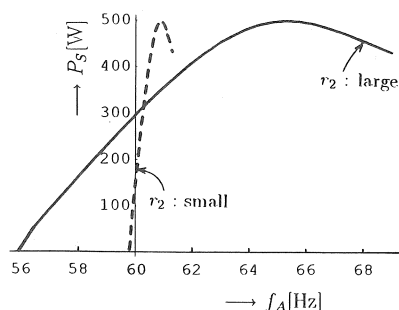


図4 最適なインバータの指令周波数と巻線抵抗の影響

Fig.4 Optimal frequency and its effect of winding resistances.

5. 実験装置

実験で使用した太陽電池モジュールは、単結晶シリコンで、公称開放電圧が約 25 [V]、公称短絡電流が約 2 [A]、公称最大電力が約 40 [W]である。太陽電池アレイは、この太陽電池モジュールを 10 枚直列に接続し、2つの並列回路で構成して、傾斜角度約 10 度で建物の屋上に設置されている。図 1 の中の汎用インバータは、コンバータ部を切り離し、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。その周波数は、コントローラのアナログ電圧によって指令される。コントローラは AD、DA 変換器付のパソコンで構成されている。

2 台の三相誘導電動機は、それぞれ定格電圧 200 [V]、出力 400 [W]、周波数 60 [Hz]、2 極の市販品が用いられた。それらの巻線抵抗は、約 $r_{1A}=6$ 、 $r_{2A}=4$ 、 $r_{1B}=6$ 、 $r_{2B}=4$ [Ω]であった。回転軸が直結されたこれらが、一端に取り付けられた渦巻ポンプを駆動する。図 1 に示すように、ポンプの吐き出し口に内径 25.4 [mm] の電磁流量計が取り付けられ、水量を測定する。流量計の先に内径 25.4 [mm]、全長 10 [m] のフレキシブルホースが接続されている。ホースの途中にバルブがあり、その開閉で流量を粗く調整できるようになっている。このポンプ系で水を循環させる実験の様子を図 5 の写真で示す。

6. 実験結果

6.1 ポンプの速度出力特性

渦巻ポンプの速度出力特性を調べるために、誘導機 A だけでポンプを駆動した。6.1 の実験に限り、A 機

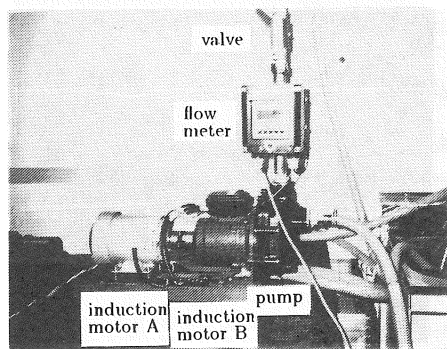


図 5 ポンプを駆動する 2 誘導機システムの実験装置

Fig.5 Experimental setup of pump system driven by two induction motors.

に接続された汎用インバータは、定電圧直流電源で電力供給を受ける通常の状態にされている。ポンプやホースに水が満たされた状態で、ポンプの回転数 n と誘導機 A の入力電力 W_A を調べると、図 6 のようになった。●印は、バルブを半開した場合を示し、モータ入力 P_0 が回転数のほぼ 3 乗に比例していることがわかる。この実験データから (1) 式の係数として $P_0=50$ 、 $P_1=0$ 、 $P_2=0$ 、 $P_3=0.0024$ と推定した。一方、△印はバルブを全開して流量が 0 [m^3/hour] の時の結果である。この場合、ポンプ入力 P_0 が回転数とともにほぼ 2 乗に比例して増加しているので、粘性摩擦負荷とみなされる。

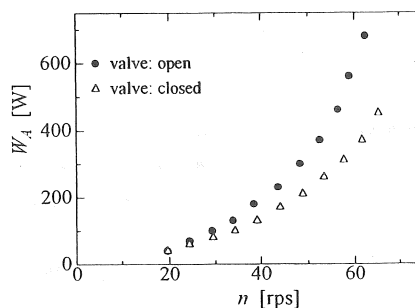


図 6 ポンプ負荷の速度出力特性

Fig.6 Speed-power characteristic of pump.

6.2 インバータの周波数に対する負荷分担

インバータの直流電源を太陽電池に切り替え、2 台の誘導機を並列運転してポンプ負荷を駆動した。また、流量が $Q=3.1$ [m^3/hour] となるようにバルブの開度を調整した。太陽電池の最大電力 P_S^* が約 500 [W] となる一定の日射強度において、インバータの周波数 f_A に対する 2 台の誘導機の入力電力 W_A 、 W_B を調べると、それぞれ図 7 の実線で結ばれた○、△印のようになった。 W_A は f_A の増加につれて最初は増すが、最大電力 P_S^* を境にして減少する。これは図 4 の実線の傾向と良く一致している。 W_B は、これと反対の経過をたどっていて、両機の負荷の分担がインバータの周波数 f_A によって調整できることがわかる。もし、 P_S^* がより大きいか、あるいは P_M が小さい場合、 W_B が負になり、B 機が発電機の状態となる。図 7 の破線で結ばれた○、△印は、 P_S^* が少し減少して約 370 [W] となる一定の日射強度における両機の負荷の分担を示す。

以上のことから、 P_S^* が 500 [W]、370 [W] となるそれぞれ一定の日射強度において W_B を最小、すなわち W_A を最大にする最適なインバータの周波数 f_A^* が存在

することがわかる。

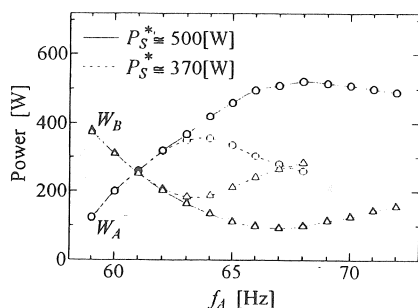


図7 2誘導機の負荷分担

Fig.7 Share of load by two induction machines.

6.3 日射強度の変化に対する追従

4章で述べた方法で図7の曲線の最大値を探索する。この図からわかるように使用した誘導機の巻線抵抗は比較的大きかったので、 $|dW_A/df_A|$ が小さい。したがって、インバータの指令周波数の微小変化を比較的大きく $\Delta f_A = 0.2$ [Hz]とした。また、この変化による負荷分担の移動時間と P_S を測定する電力計の応答時間を考慮して、サンプリング時間を2秒に選んだ。ポンプの流量を $Q = 3.1$ [m³/hour]と一定にして、日射強度が変化するときのシステムの応答を調べた。図8はこの時の P_S^* 、 P_S 、 W_B 、 Q の波形を示す。ここで、 P_S^* はモニターセルの短絡電流から推定された最大電力を、また W_B は、誘導機Bの入力電力を示す。この図は、太陽電池の電力 P_S が日射強度に応じて変動する P_S^*

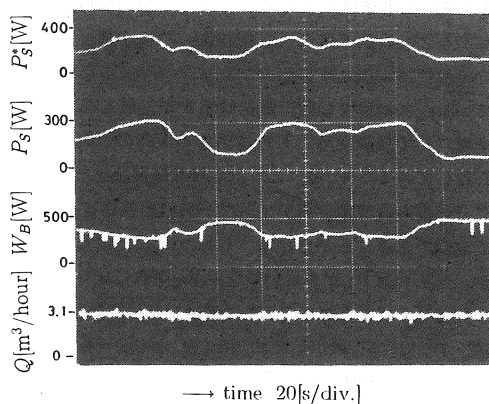


図8 変化する日射強度への追従

Fig.8 Tracking to variable insolation.

に良く追従していることを示す。これは、 P_S^* が増加すれば、それに応じて f_A が増し、太陽電池の最適動作点に追従するようにシステムが機能しているからである。 P_S^* が増すと W_B が減るので、系統の電力がその分節約できる。一方、流量 Q は P_S^* の変化に関係なくほぼ一定であり、ポンプの連続運転が可能であることを示している。

図8の P_S は300[W]から100[W]の間で約200[W]変化している。これに対して、回転数は59[rps]から57.7[rps]の範囲で変動した。この変動量は、(10)式に $V_B = 200/\sqrt{3}$ 、 $r_{2B} = 4$ 、 $f_B = 60$ を代入して得られた計算値とほぼ一致する。したがって、(10)式の妥当性が確認できた。なお、 P_S の変化量の割りに速度変動率が比較的大きい理由は、使用した誘導機の巻線抵抗が大きかったからである。

6.4 流量の変化に対する応答

最大電力が $P_S^* = 320$ [W]でほぼ一定となる日射強度のもとで、流量を変化させる実験をした。図9は、流量を3.1[m³/hour]から約60秒間0に、そして5.0[m³/hour]に変化させた時の P_S^* 、 P_S 、 W_B 、 Q の波形を示す。実際の流量 Q は急激に変化しているが、使用した流量計の応答時定数が5秒と大きいので Q を示す波形は遅れて変化している。流量が0から5.0[m³/hour]に急変した場合、 W_B が大きく変化する。 P_S は、その影響を過渡的に受けるが、太陽電池の動作点が最適になるように最大値探索によって新しい平衡状態になっている。この場合、太陽電池の電力 P_S は、少しの時間経過を必要とするものの Q の変化前と同じレベルになり、また P_S^* とほぼ一致する。これは太陽電池から最

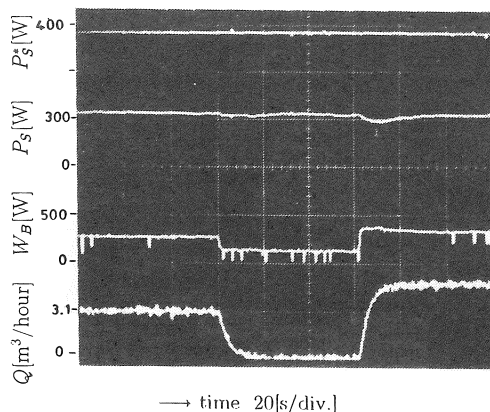


図9 流量の変化に対する応答

Fig.9 Responses to the change of flow.

大電力が得られていることを示す。

7. あとがき

太陽光エネルギーを利用した2誘導機システムで実際の負荷であるポンプを駆動して、その実用性を調べた。まず、一般の非定出力負荷に対して、太陽電池の電力を有効に利用するためのインバータの指令周波数について検討した。その結果、インバータの周波数は、負荷の速度出力特性の Taylor 展開係数を用いて簡単に表現することができた。次に、2誘導機システムで駆動される負荷の回転数を計算した。その結果、回転数変動が日射強度の変化によって若干増すものの誘導機固有の定速度特性となることがわかった。また、渦巻ポンプで配管系の水を循環させる実験を行い、日射強度が変化しても所定の流量を連続的に流し続けることができ、また流量の変化にも適応できることを実証した。本システムは、2乗トルク負荷であるポンプに適用できたので、定トルク負荷であるエスカレータやコンベアなどにも応用できる。今後、長期間の運転データによる評価を行い、本システムの普及をめざし、新エネルギーの一つの利用法として確立する予定である。

最後に、本研究を助成されたサタケ技術振興財団と住友財団に感謝します。

参考文献

- (1) 黒川・津田・野崎, 太陽光発電用蓄電池の開発動向, 電気学会論文誌B, 110-2(1990), 91.
- (2) 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, 電気学会全国大会, (1994-3), 12巻212, 東京.
- (3) 牧野・井家・石田・萩原・大川, 逆流あり個人住宅用太陽光発電システム, 三洋電機技報, 26-2(1994), 9.
- (4) 佐々木, 太陽光発電用インバータの現状と課題, 電気学会誌, 112-12(1992), 950.
- (5) 滝川, 高密度系統連系に関わる問題点と技術的課題, 第14回太陽光発電シンポジウム, (1995-6).
- (6) M.M.Saled & M.G.Jaboori, Optimal Solar Array Configuration and DC Motor Field Parameters for Maximum Annual Output Mechanical Energy, *IEEE Trans*, EC-4-9(1989), 459.
- (7) S.M.Alghuwainern, Steady-state Performance of DC Motors Supplied from Photovoltaic Generators with Step-up Converter, *IEEE Trans*, EC-7-6(1992), 267.
- (8) M.M.Saled, A.A.Hanafy, M.A.El-Gabaly, Y.A.Safar, M.G.Jaboori, K.H.A.Yamin & A.M.Sharaf, Optimal Design Parameters for a PV Array Coupled to a DC Motor via a DC-DC Transformer, *IEEE Trans*, EC-6-12(1991), 593.
- (9) 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, 50-1(1986), 96
- (10) 石川・内藤, ソーラーエネルギーを利用した動力装置の基礎研究, 電気学会全国大会, (1994-3), 6巻174, 東京.
- (11) 小玉, 太陽電池エアコンシステムの開発の現状, 機械の研究, 46-5(1994), 528.
- (12) 田中・牧野・路口・武岡・桑野, 家庭用ソーラーエアコンシステム, 電気学会論文誌D, 113-2(1993), 144.
- (13) 根葉・森, 系統連系太陽光発電PWM電流形インバータ誘導機システムの改良回路構成, 電気学会論文誌D, 116-9(1996), 980.
- (14) 泉・田村・薄井・猪上, 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, 電気学会論文誌D, 115-5(1995), 612.
- (15) T.Izumi, M.Nakaoka & K.Kagawa, Twin Stator Induction Machine System for Supplying Constant Mechanical Power from a Photovoltaic Array, Proc. 7th International Power Electronics & Motion Control Conference, (1996-9), Vol.3, 166, Budapest, Hungary.
- (16) 泉・田村・中岡・小枝, 太陽光発電における誘導機系統連系システムの安定性とその最大出力制御の検討, 電気学会論文誌D, 116-12(1996), 1309.
- (17) F.Harashima, H.Inaba, S.Kondo & N.Takashima, Microprocessor-Controlled SIT Inverter for Solar Energy System, *IEEE Trans*, IE-34-2(1987), 50.

付録

<(9)式の導出>

本文の(8)式の両辺を V_B^2/r_{2B} で割り, $p_{BF}/(p_{AF}) = x$ とおくと, (8)式は次のようになる。

$$(1-s_A)^2 P_3' x^3 + (1-s_A)(P_2' + 1)x^2 + (P_1' - 1)x + \frac{1}{1-s_A} P_0' - P_A' = 0 \quad (\text{付1})$$

ここで, $P_3' = (r_{2B}/3 V_B^2)(f_B/p_B)^3 P_3$, $P_2' = (r_{2B}/3 V_B^2)(f_B/p_B)^2 P_2$, $P_1' = (r_{2B}/3 V_B^2)(f_B/p_B) P_1$, $P_0' = (r_{2B}/3 V_B^2) P_0$, $P_A' = (r_{2B}/V_B^2)(V_A^2/r_{2A}) s_A$ である。これらの高次項は, $r_{2B}/3 V_B^2$ や s_A が1より非常に小さいので, 無視できるものとする。3次方程式(付1)は, Cardanoの公式を用いれば解析的に解けるが, 簡単には表わせない。そこで, (付1)式の定数項

$$c = \frac{1}{1-s_A} P_0' - P_A' \quad (\text{付2})$$

が小さいことに注目して, 次のように2段階で近似解を導く。まず, $c=0$ とした

$$(1-s_A)^2 P_3' x^3 + (1-s_A)(P_2' + 1)x^2 + (P_1' - 1)x = 0 \quad (\text{付3})$$

を解く。この解は2次方程式の根の公式から容易に求められる。その正根の近似解 x_0 は, Taylor展開して得られた高次項を無視すると

$$x_0 = \frac{1}{1-s_A}(1 - P'_1 - P'_2 - P'_3) \quad (\text{付4})$$

となる。次に(付3)式を $x=x_0$ で線形化して、接線の式

$$y = \left\{ 3 P'_3 (1 - P'_1 - P'_2 - P'_3)^2 + 2(P'_2 + 1)(1 - P'_1 - P'_2 - P'_3) + P'_1 - 1 \right\} \cdot \left\{ x - \frac{1}{1-s_A}(1 - P'_1 - P'_2 - P'_3) \right\} \quad (\text{付5})$$

を求める。これと(付2)式から得られる $y=-c$ の連立方程式から解 x_1 が求められる。それをさらにTaylor展開して高次項を無視すると、 x_1 の近似解

$$x = 1 - P'_0 - P'_1 - P'_2 - P'_3 + P'_A + s_A \quad (\text{付6})$$

が得られる。また、本文の(6)式から $s_A = (r_{2A}/3 V_A^2) \cdot (P_S - L_{0A} - L_I)$ と簡略化されるから、結局(付6)式から本文の(9)式が導かれる。