太陽光発電・燃料電池ハイブリッドシステムの特 性 (負荷形状率による影響)

非会員 関 口 直 俊 (東京理科大)

非会員 藤 木 靖 之 (東京理科大)

正 員 谷 辰 夫 (東京理科大)

Characteristics of Photovoltaic/Fuel Cell power Hybrid System (Effect on Electrical Load Form Factors)

Naotoshi Sekiguchi, Non-member, Yasuyuki Fujiki, Non-member, Tatsuo Tani, Member (Science University of Tokyo)

The photovoltaic power system has a great future as clean energy instead of fossil fuel which has many environmental problems such as exhausted gas or air pollution. Sunlight, a source of energy for the system, is greatly influenced by the weather conditions, seasons and times of a day, therefore it can not supply constant electric power.

The photovoltaic/fuel cell power hybrid system is assumed, it combines PV array, hydrogen generator, storage tank and fuel cells by using hydrogen. This system can supply constant electric power to the electric load in a solitary island separated from a commercial electric network.

The possibility of this system is examined by the computer simulation. Input data includes the global irradiance on inclined plane and temperature of HASP data of Tokyo, ten kinds of electrical load forms with 400 MWh electric power a year and conversion efficiencies of each subsystem.

As a result of simulation, it was revealed that the area of PV array with 8170 m² and the volume of hydrogen tank from 22×10³ to 30×10³ kl are necessary.

キーワード：太陽光発電・燃料電池ハイブリッドシステム，負荷形状率，水素貯蔵タンク容量，水素発生機

1. はじめに

近い将来，太陽光発電システムは，太陽エネルギーをエネルギー源としたクリーンな発電方式として実用化が期待されている。しかし，太陽エネルギーが気象条件，季節，時刻などにより変動するため，このシステムの出力は必ずしも負荷に整合せず何らかの貯蔵機能を必要とする。

著者らは，太陽光発電システムと水素を燃料とする燃料電池を組み合わせ，負荷の需要に整合させ電力を安定的に供給する太陽光発電・燃料電池ハイブリッドシステムを提案し，その可能性について検討した⁽¹⁾。このシステムは昼間に太陽光発電システムで発生した電力を直接負荷に供給する。また，余剰電力を利用して水素を発生させて貯蔵し，太陽光発電システムで十分な電力供給が困難なときには，その水素を用いて燃料電池を介して電力が供給できる。周知のように燃料電池システムもクリーンな小形分散

形電源として有望視されている電源であり，最近，燃料電池の燃料である水素を太陽エネルギーを使って製造しようとする広大な計画，研究が進められている⁽²⁾⁽³⁾。

本論文は，10種類の集合住宅を関東地方に設置したと想定し，太陽光発電・燃料電池ハイブリッドシステムによって，負荷に電力を供給した際のシステムの年間水素貯蔵量が最小となる太陽電池アレイ面積，負荷パターンの変化による年間水素貯蔵量の変化，システムの稼働状況を，シミュレーションにより明らかにしている。ここで用いた負荷は，10種類の個人住宅用負荷パターン（年間負荷電力量 4,000 kWh）をベースにし，同一負荷パターンが 100 軒（400 MWh/年，平均電力 45.7 kW）集まったものとした。また，本システムと類似なシステムとして蓄電池を有する太陽光発電システムがあるが，両システムの年間のエネルギーバランスについても，シミュレーションにより考察し，この面からの本システムの有効性をも論述している。

図 1 システム構成図
Fig.1. System configuration.

2. システム条件

〈2・1〉 システム構成 本論文で検討したシステムの構成図を図1に示す。システムは、太陽電池アレイ、インバータ、水素モジュールから構成されている。水素モジュールとは、DC-DCコンバータ、水素発生機、水素貯蔵タンク、燃料電池をまとめたものである。

このシステムでは、昼間太陽電池アレイで発生した電力は、負荷に供給されると同時に余剰電力を使用して、水素発生機で水素を発生させ貯蔵する。夕方から夜間にかけてあらかじめ貯蔵してある水素を燃料電池に送り、燃料電池を介して負荷に電力を安定的に供給するシステムである。このシステムは系統から電力供給を受ける必要がないため、独立電源として利用できる。また、燃料電池は発電と同時に熱エネルギーを発生するため、熱エネルギーを有効利用することにより、システム効率の向上が期待できる。

〈2・2〉 環境データ 太陽電池アレイの入力データとして使用する傾斜面全天日射強度と外気温度は年平均気象データ (HASP) 東京を用いた。本論文での傾斜面全天日射強度 $\Phi(i)$ (kW/m^2) の計算は次式によった⁽⁴⁾。

$$\Phi(i) = \Phi_d(i) \cos \delta \cos t + \Phi_g(i) (1 + \cos L) / 2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $\Phi_d(i)$: 法線面直達日射強度 (kW/m^2),
 $\Phi_g(i)$: 水平面天空日射強度 (kW/m^2), δ : 太陽赤緯 ($^\circ$), t : 時角 ($^\circ$), L : 太陽電池アレイ設置角度 ($^\circ$)

(1)式で求めたデータを1時間ごとに時系列的に整理し、年間(8,760個)の傾斜面全天日射強度データとした。また、このデータに対応して外気温度も用いた。

〈2・3〉 太陽電池アレイ 本論文で使用した太陽電池は多結晶シリコン太陽電池であり、このシミュレーションの太陽電池アレイの出力は次のように求めた。すなわち、本学校舎屋上にて測定中の多結晶シリコン太陽電池モジュール(地上約40m、傾斜角 35.5° 、南向きに設置)の傾斜面全天日射強度に対する効率、セル温度のデータの関係性を求め、この関係と先のHASPデータを用いて太陽電池アレイの出力を算出している。ここで用いた測定データは、1992年3月～1993年2月の1年間のデータである。これらのデータを春期(3月～5月)、夏期(6月～8月)、秋期(9月～11月)、冬期(12月～2月)に分け近似式を求めた。

図2(a)は傾斜面全天日射強度に対する多結晶シリコン

(a) 傾斜面全天日射強度に対する太陽電池モジュール変換効率 η の関係
(a) Relationship between global irradiance on inclined plane and η .

(b) 傾斜面全天日射強度に対する太陽電池モジュール温度と外気温度の差 ΔT の関係
(b) Relationship between global irradiance on inclined plane and ΔT .

図 2
Fig.2.

太陽電池モジュール変換効率の関係の一例である。図の横軸は傾斜面全天日射強度 (W/m^2) であり、縦軸はモジュール温度を 25°C に換算したときの変換効率 (%) である。図の特性は秋期 (9月～11月) のものである。同図より、傾斜面全天日射強度に対する太陽電池モジュールの変換効率 η を一次式で近似し、単位面積当たりの太陽電池モジュールの出力を P (kW/m^2) とする。いま、1月1日午前0時から i 時間後の傾斜面全天日射強度を $\Phi(i)$ とすると、これらの値には次式の関係が成立する。

$$\left. \begin{aligned} \eta(i) &= a\Phi(i) + b \\ P(i) &= \Phi(i)\eta(i) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 a, b : 定数

一方、(b)図は、傾斜面全天日射強度に対する太陽電池

表 1 a, b, c, d の値
Table 1. Values of a, b, c, d .

期間	$\Phi(i)[W/m^2]$	a	b	c	d
春期 (3~5月)	7.5~37.1	0.37	-2.77	0.020	-0.415
	37.1~1000	-0.001	10.93		
夏期 (6~8月)	6.5~36.9	0.37	-2.43	0.023	-0.468
	36.9~1000	-0.001	11.45		
秋期 (9~11月)	6.6~35.0	0.41	-2.67	0.024	-0.588
	35.0~1000	-0.001	11.57		
冬期 (12~2月)	6.6~35.8	0.37	-2.48	0.025	-1.146
	35.8~1000	-0.001	10.96		

モジュール温度と外気温度の差 ΔT の関係である。図の横軸は傾斜面全天日射強度であり、図の縦軸は ΔT である。図の特性は(a)図と同様、秋期(9月~11月)のものであり、 i 時間後の $\Phi(i)$ と $\Delta T(i)$ の間の関係は次式となる。

$$\Delta T(i) = c\Phi(i) + d \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 c, d : 定数

各期間ごとの a, b, c, d の値をまとめて表 1 に示す⁽⁵⁾。

太陽電池アレイの年間の出力量 P_T はアレイ面積を $S(m^2)$ とすると(1)~(3)式より次式で求めることができる。

$$P_T = S \sum_{i=1}^{8760} P(i) \{1 - 0.005(t + \Delta T(i) - 25)\} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 t : 外気温度 ($^{\circ}C$)、0.005: 多結晶シリコン太陽電池モジュールの温度係数⁽⁶⁾

〈2・4〉 DC-DC コンバータとインバータ DC-DC コンバータは太陽電池アレイの発生電力を制御する機能を有し、特に太陽電池アレイの出力電圧を水素発生機の所定の入力電圧に調整する働きがある。変換効率は負荷の状態に無関係で 96.0% 一定とした⁽⁷⁾⁽⁸⁾。また、インバータは太陽電池アレイや燃料電池からの直流電力を交流電力に変換するもので、変換効率は負荷の状態に無関係で 96.0% 一定とした⁽⁷⁾。

〈2・5〉 水素発生機 水素発生機として固体高分子電解質水電解方式を想定した。この方式は電極触媒とイオン交換膜とを一体化した膜-電極接合体を用い、イオン交換膜は電解質と隔膜の両役割を果たしている。その特徴は、電解触媒が固体電解質に接合されているため、電解液が不要で水を供給するのみでよい。電極間距離が膜厚のみで、発生ガスも電極触媒の背面から発生するため、高い電流密度が取り出せる。純度の高い水素を得ることができる。装置の高圧化、コンパクト化は可能であるなどがある。現在、この水素発生機は小型機(20~30 Nm³/h)に限られているが、将来技術開発が進み大型化の要請があれば、十分対応が可能とした。

水の電気分解においては、陰極、陽極でそれぞれ反応が起こり、1 mol の水素を発生するのに要するエネルギーは電子数 $2e^-$ であるため、電気量 2 F を要する。従って、

表 2 構成要素の変換効率
Table 2. Conversion efficiency of subsystems.

構成要素	効率[%]
太陽電池アレイ (多結晶シリコン太陽電池)	11.0 (AM=1.5, 1kW/m ² , セル温度25℃)
DC-DCコンバータ	96.0
水素発生機 (固体高分子電解質水電解方式)	90.0
水素貯蔵タンク	96.0
燃料電池	40.0 (電力) 40.0 (熱)
インバータ	96.0

ファラデーの法則から水素の理論分解電圧以上の電圧が掛かっているとき、このエネルギーは、69.7 Wh となる。

本論文では、固体高分子電解質膜を用いた水素発生機の変換効率を 90% とした⁽⁸⁾。

〈2・6〉 水素貯蔵タンク 水素発生機で発生した水素を貯蔵するタンクである。ここで貯蔵されている水素は、標準状態(0 $^{\circ}C$, 1 atm)で、燃料電池の燃料として供給される。ここでは、水素貯蔵タンクへの水素充填に必要なエネルギーなどを考慮して、水素貯蔵効率を 96.0% と仮定した。

〈2・7〉 燃料電池 燃料電池は水素と酸素の化学反応により電気エネルギーを得る直接発電変換のシステムである。燃料電池として実用化が最も早いと考えられているリン酸塩型燃料電池を想定した。この燃料電池の発電効率は 40.0%, 180 $^{\circ}C$ 程度の排熱エネルギーの排熱回収効率は 40.0% であるとした。

以上述べたシステムを構成する各要素機器の変換効率を表 2 に示す。

3. 負荷条件

負荷として、モデル化された 10 種類の個人住宅用負荷パターンを用いた⁽⁹⁾。住宅用負荷の 1 軒当たりの年間負荷電力量の平均値は 4,000 kWh である。各負荷電力量を規格化して、ここでは、この値の住宅 100 軒(年間負荷電力量 400 MWh, 平均電力 45.7 kW) 分を想定した。また、負荷パターンは、春期(3月~5月)、夏期(6月~8月)、秋期(9月~11月)、冬期(12月~2月)の 4 種類とし、各期間ではいずれも同一パターンとした。図 3(a) に日負荷パターン(四季別平均値)を示す。

10 種類の負荷パターンの負荷形状率は 10~31% であり、(b)図に負荷形状率の一例を示す。ここで、負荷形状率とは、年間の負荷電力量に対する平均負荷レベル以上の負荷電力量の割合である⁽¹⁰⁾。すなわち、図より負荷形状率は $(acd \text{ に囲まれた面積}) / (0ab \text{ に囲まれた面積})$ で表されている。ここで用いた 10 種類の負荷パターンを表 3 に示す。10 種類の負荷形状率は、10~16% が 7 種類、

(a) 日負荷パターン (四季別平均値)
(a) Daily electrical load pattern (average values of each season).

(b) 負荷形状率
(b) Electrical load form factor.

図 3
Fig. 3.

表 3 負荷パターンの概要
Table 3. Summary of electrical load pattern.

負荷パターン数 : 10	
年間負荷電力量 : 400MWh (4000kWh/年・軒×100軒) 平均電力 : 45.7kW	
負荷形状率[%]	パターン数
10~16	7
25~31	3

25~31%が3種類である。

4. 計算手順

シミュレーションの流れ図を図4に示す。システムの入力データは、環境データ、日負荷パターン、太陽電池アレイ容量、インバータ効率などであり、次の三つのモードを判別しながら8,760時間について1時間ごとに繰り返し計算して太陽電池アレイ面積、水素貯蔵量、年間のエネルギーバランスなどを求めている。

(1) 直接供給モード 太陽電池アレイで発生した電力はインバータを介して負荷に供給される。また、その際の余剰電力は水素モジュールへ送られ、水素として変換され貯蔵される。このモードでは、水素モジュールからの電

図 4 流れ図
Fig. 4. Flow chart.

図 5 太陽電池アレイ面積と $(H_s - H_c)$ の関係
Fig. 5. Relationship between PV array area and $(H_s - H_c)$.

力供給はない。

(2) 間接供給モード 貯蔵した水素を、燃料電池で電力変換して負荷に電力を供給する。このモードでは、水素モジュールへの電力供給はない。

(3) 併用供給モード 明け方、夕方など太陽電池アレイで発生した電力が十分でないとき、(1)、(2)両モードを併用して負荷に電力を供給する。このモードでは、水素モジュールへの電力供給はない。

5. 結果と考察

図5は、負荷形状率31%の負荷パターンに対する太陽電池アレイ面積と、水素発生機によって製造された年間水素量 H_s と燃料電池に供給された年間水素量 H_c との差の関係である。横軸は太陽電池アレイ面積 (m^2) であり、

図 6 負荷形状率に対する太陽電池アレイ面積 S の関係

Fig. 6. Relationship between electrical load form factor and S .

図 7 負荷形状率に対する水素貯蔵タンク容量の関係

Fig. 7. Relationship between electrical load form factor and volume of stored hydrogen tank.

縦軸は水素発生機によって製造された年間水素量 H_s と燃料電池に供給された年間水素量 H_c との差 (kl) である。いま、年間の負荷電力を太陽電池アレイから直接供給する電力と燃料電池から供給する電力でまかなうことにする。このとき、年間で製造した水素量をすべて燃料電池で電力に変換するシステム容量、すなわち $H_s - H_c = 0$ となるシステム容量を最適容量のシステムと定義する。図より、最適なシステムの太陽電池アレイの面積は $8,170 \text{ m}^2$ となった。

また、負荷パターンの負荷形状率に対する太陽電池アレイ面積、水素貯蔵タンク容量の関係を求め、図 6、図 7 に示す。図 6 の太陽電池アレイ面積は、負荷形状率の変化に影響されず、ほぼ一定 (約 $8,170 \text{ m}^2$) となった。一方、図 7 の水素貯蔵タンク容量は負荷形状率の変化に影響を受ける。例えば、負荷形状率が 10% から 30% に変化すると水素貯蔵タンクの容量は $22,900 \text{ kl}$ から $29,700 \text{ kl}$ と 1.3 倍程度増加する。なお、図 7 の負荷形状率が約 16% で、水素貯蔵タンク容量が大きな値となっているが、これは冬期夜間の負荷が他の季節の負荷に比べて著しく大きいことによる。

図 8 に本システムの 1 日の稼働状況を示す。図 8 (a) は快晴日 (9 月 13 日) の稼働状況で、6 時から 16 時にかけて (1) のモードで稼働し、0 時から 5 時、19 時以降は

(a) 快晴日 (9 月 13 日)

(b) 曇天日 (9 月 8 日)

(c) 雨天日 (9 月 10 日)

図 8 1 日の稼働状況

Fig. 8. Characteristics of operation in a day.

図 9 水素貯蔵タンク内の貯蔵量推移

Fig. 9. Change of storage in volume of hydrogen tank.

図 10 年間のエネルギーバランス

Fig. 10. Annual balance of energy.

(2)のモードで稼働する。また、5時から6時、16時から19時にかけて(3)のモードで稼働する。(b)、(c)図は、それぞれ曇天日(9月8日)、雨天日(9月10日)の稼働状況で、(a)図と同様に稼働していることがわかる。

図9に水素貯蔵タンク内の年間貯蔵量推移を示す。太陽電池アレイの面積は8,170 m²で、負荷パターンの負荷形状率は31%である。同図より水素貯蔵タンクは、1月1日0時で完全に空で2月中旬に2,600 k^l不足となり、3月～5月にかけて貯蔵量は増加し6月上旬に最大値26,300 k^lとなる。それ以降、12月まで減少し12月31日24時に再び空になる。負荷に電力を安定的に供給するためには、2月中旬に貯蔵量が不足する分(2,600 k^l)をあらかじめ充てんさせておく必要がある。従って、貯蔵タンクの容量は約29,000 k^lとなる。

本論文で検討した太陽光発電・燃料電池ハイブリッドシステムは完全自立形の独立システムであり、類似システムとしては、蓄電池を有する太陽光発電システムがある。このシステムでは、蓄電池群の充・放電効率、自己放電率、日射強度の変化による太陽電池アレイの出力電圧と蓄電池群の充電電圧との整合性などを考慮する必要がある、設計条件によっては必ずしも太陽エネルギーを有効に利用しているとはいえないシステムとなる⁽¹¹⁾。このような観点から、本システムと蓄電池を有する太陽光発電システムの年間のエネルギーバランスを検討した。

図10は本システムの年間のエネルギーバランスである。太陽電池アレイの年間の出力量を100%とすると、インバータを介して直接負荷に供給される量は17.9%、水素モジュールに供給される量は81.4%となる。本システムで想定した燃料電池はリン酸型燃料電池であり、反応時の170～180℃程度の反応熱を40.0%有効利用することにより、結果として68.0%のエネルギーが利用できる。一方、蓄電池群を有する太陽光発電システムについては、蓄電池群の充・放電効率を70.0%、蓄電池群の自己放電率を1日当たり充電量の0.5%、年間の太陽電池アレイの出力電圧と蓄電池群の充電電圧とのミスマッチングによる損失を5.0%、あるいは、蓄電池群のDC-DCコンバータの変換効率を96.0%として、年間のエネルギーバランスを計算した。その結果、両者ともに太陽電池アレイの年間出力量のほぼ62.4%のエネルギーを有効に利用できることがわ

かった。

ここで、燃料電池の発電後の170～180℃の熱エネルギーを損失なく有効利用できるとした。また、燃料電池の起動、停止は瞬時に行われると仮定して計算した。これらについては今後実状にあった検討が必要であるが、運用によっては太陽光発電・燃料電池ハイブリッドシステムは、蓄電池群を有する太陽光発電システムより太陽光エネルギーを有効に利用しうることがわかった。

両者の比較にあたってはエネルギー利用率のみならず、経済性、信頼性などを加味して総合的に評価する必要がある。しかし、著者らが提案しているシステムは、研究開発途上にあり、今後、特性が大きく改善されることが期待される。従って、ここではエネルギー利用率についてのみ、それも現状で考えられる妥当な数値を用いて比較したにとどめた。

6. おわりに

著者らが提案した太陽光発電・燃料電池ハイブリッドシステムによる個人住宅用負荷(個人住宅100軒相当、年間負荷電力量400 MWh、平均電力45.7 kW)への電力供給の可能性について、シミュレーションにより検討した。その結果、次のことが明らかになった。

(1) 負荷に安定して電力を供給することができる。

(2) 年間の負荷電力量をすべて供給する本システムの太陽電池アレイ面積は、約8,170 m²で負荷形状率の違いにほとんど影響されない。

(3) 年間の水素貯蔵量は春期の3月から5月にかけて増加し、6月上旬にその量が最大となり、夏期から秋期にかけて貯蔵した水素を使用しながら電力を供給する。

(4) 年間の負荷電力量をすべて供給するには水素を貯蔵する必要がある、負荷形状率は水素貯蔵量に影響する。例えば、負荷形状率が12%のとき水素貯蔵量は 2.4×10^4 k^lであり、また、31%のとき 3.0×10^4 k^lとなった。

(5) 太陽電池アレイの出力量を基準にした電気エネルギーの利用率は42.4%となった。また、燃料電池システムの発電に伴う熱エネルギーをも併せて利用すればこの値は68.0%に上昇する。この値は蓄電池を有する太陽光発電システムの62.4%より良好で、運用によっては本システムは太陽エネルギーを有効に利用できる。

本システムは、本論文で検討した離島などの家庭用電源はもとより、比較的負荷電力量の大きいホテル、集合住宅、製造業などの産業分野への適用が期待できる。

(平成5年5月24日受付)

文 献

- (1) 原口隆文・野中 宏・相羽光大・谷 辰夫：「太陽光発電・燃料電池ハイブリッドシステムの稼働シミュレーション」，太陽エネルギー，18, No. 5, 33 (平4-11)
- (2) 例えば，M. Al-Garni: "SOLAR HYDROGEN IN SAUDI ARABIA: A LONG-TERM OUTLOOK", Proc. 1991 ISES Cong. Denver Colorado, p. 735 (1991)
- (3) 本間琢也：「WE-NET 構想 (総合プロジェクトの国際展開—エネルギー・環境問題の同時解決—)」，第12回工業技術院筑波総合シンポジウム，p. 75 (平5)
- (4) 谷 辰夫・横内博之：「系統連系形太陽光発電システムの最適設計」，電学論D，111, 475 (平3-6)
- (5) 郡 啓太・谷 辰夫：「系統連系形太陽光発電システムの最適設計」，第9回エネルギーシステム・経済コンファレンス，2-3(平5)
- (6) 小林 誠・谷 辰夫：「環境因子の変化に対する太陽電池モジュールの出力特性」，平3日本太陽エネルギー学会・風力エネルギー協会・合同研究発表会，No. 15, 85
- (7) 星野・工藤・木村・塩谷：「太陽光発電システムにおけるDC-DCコンバータおよびインバータに関する研究」，電気学会半導体電力変換研究，SPC-88-36, 53 (昭63)
- (8) P. D. Metz & M. Piraino: "PHOTOVOLTAIC-POWERED SOLID POLYMER ELECTROLYTE (SPE) ELECTROLYZER SYSTEM EVALUATION", FINAL REPORT. US DOE REP (BNL-51940), p. 55 (1985)
- (9) 新エネルギー総合開発機構 (委託先 財団法人 電力中央研究所)：昭和60年度調査報告書23「太陽光発電の価値評価に関する調査研究 (II)」，p. 66 (昭61-3)
- (10) 田辺・安田・横山：「CO₂排出制御下における電源ベストミックスの分析」，電気学会新省エネルギー研究，ESC-92-43 (平4)
- (11) 谷 辰夫：「太陽光発電システムの設計に関する一考察」，電学論D，108, 41 (昭63-2)

関 口 直 俊 (非会員) 1969年8月7日生。1993年3月東京理科大学工学部第2部電気工学科卒業。同年4月同大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程入学。現在，同課程において太陽エネルギー利用技術に関する研究に従事。日本太陽エネルギー学会学生会員。

藤 木 靖 之 (非会員) 1969年6月19日生。1993年3月東京理科大学工学部第2部電気工学科卒業。同年4月ソニー・テクトロニクス(株)入社。現在，テレビジョン・システム機器事業部所属。

谷 辰 夫 (正員) 1940年生。1966年3月名古屋工業大学大学院工学研究科修士課程修了。同年4月通産省電気試験所(現，電子技術総合研究所)入所。同エネルギー部太陽エネルギー研究室長を経て，1988年4月東京理科大学工学部教授，現在に至る。工学博士。エネルギー変換工学担当。