

モンゴルにおける携帯型発電システム

実証研究のデータ解析・システム評価

学生員 アマルバヤル・アジヤバト（東京農工大学）

会 員 黒川 浩助（東京農工大学）

Performance Analysis of Portable Photovoltaic Power Generation Systems Based on Measured Data in Mongolia

Amarbayar Adiyabat *, Kosuke Kurokawa *

* Tokyo University of Agriculture and Technology

Naka-cho 2-24-16, Koganei, Tokyo 184-8588 Japan

Fax: +81-423-85-6729 E-Mail: amar@cc.tuat.ac.jp

ABSTRACT

The New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO) of Japan has performed demonstrative research on movable type photovoltaic (PV) power generation systems from 1992 to 1996 in Mongolia. The main purpose of this project was to improve compactness, portability, and reliability of portable PV systems, by using the portable PV system for nomadic life of people living in the nomadic society.

This paper describes the performance analysis of PV systems based on measured operational data. The authors have also performed experiments using a sample system as reference and to clarify DC current circuit resistance, inverter efficiency curve and total system losses. Since humidity is very low in Mongolia, the electrolyte of the batteries decreased very much due to evaporation. Also taking into account the effects of gassing, a result of charge controller's oscillation due to overcharge protection function lowers the batteries lifetime obviously.

Keywords: Portable PV system – 1: Performance – 2:

1. はじめに

モンゴル国全人口の約33%になる80,8500人が農牧林業に従事者で、その大半が家畜と共に牧草を求めて移動を繰り返す生活を営む遊牧民である^[6]。彼らに商用電源からの電力確保は困難であり、独立分散型の電力供給システムが必要となる。モンゴル国政府は太陽光発電システムが社会構成に適していることを認識し、

遊牧民の住居（ゲル）を電化する「10万戸ソーラーゲル計画」を打ち出している^[5]。システムを導入する上でモンゴルの気候や生活スタイルに適する詳細設計及び評価に関する研究開発が求められている。

新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）はモンゴル国において平成4年度から平成8年度まで携帯用太陽光発電システムについて実証研究を行った。この実証研究の目的はモンゴルの非定住の社会システムをフィールドにして、バッテリー・インバータ等の周辺機器を含む携帯型太陽光発電システムの小型軽量化、可搬性・信頼性の向上を図ることであった。

本論文では、著者らがNEDOプロジェクトの測定データを用いて、システムの電気的性能を詳細に解析し、内部損失を損失要因毎に分離した結果を報告する。

2. システム構成

システムは Fig.1 に示すように太陽電池ユニット、コントロールユニット、蓄電池ユニットから構成している。定格102Wのモジュール2枚を並列に接続されたアレイの出力はチャージコントローラ（CC）を介して蓄電池に蓄えられ、インバータでAC（220V・50Hz）に変換され負荷に供給する。

自動車用鉛蓄電池はPV用途に薦められてないが、当時モンゴルで入手が簡単かつ経済的であったため12V-70Ah（初年度のシステムでは100Ah）の自動車用バッテリー2個が直列接続で使用された。蓄電池の

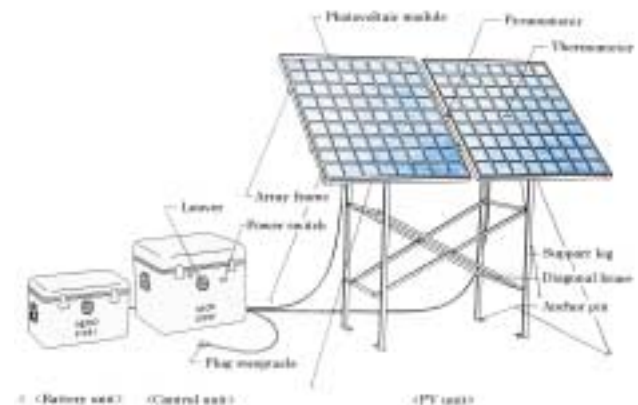


Fig.1: Overall appearance of the system

連続不日照日数を3日、放電深度を70%とし、負荷に照明機器、ラジオ、テレビを想定して、一日で280Whまで消費できるように設計されている。Table 1は1次システムを改善されて来た2次、3次システムに比較した仕様表である。

Table 1: System Specifications

		1992's System	1993's System	1994's System	
PV Unit	Array Rated Power	204W (51W x 4)		204W (102W x 2)	
	Structure	Panels	Angle Variable		Two-split table
		Array angle	30°, 45°, 60°		45°
		Legs	Built-in type		
	Frame material	Array frames, support legs: Aluminum			Braces: Stainless steel
	Assembled dimensions (mm)	L1832xD800xH2070	L1786xD700xH1700	L1786xD700xH1701	
	Weight	Panels	26.6 kg	13.5 kg x 2	13.1 kg x 3
Legs		11.3 kg	6.5 kg	5.7 kg	
Total weight		40.9 kg	33.5 kg	31.9 kg	
Control Unit	Input Voltage	DC 24V			
	Output Voltage	AC 220V 50Hz			
	Output Capacity	300VA			
	Dimensions (mm)	L476xD426xH555	L470xD420xH465		
	Weight	43.0 kg	41.7 kg	35.6 kg	
	Functions	Overcharge/overdischarge prevention, Overcurrent/Overvoltage protection, and timer			
Battery Unit	Storage battery	Type	Lead-Acid battery for car		
		Voltage	24V (12V x 2 in series)		
		Capacity	100Ah	70Ah	
	Dimensions (mm)	L476xD426xH555	L415xD315xH320		
	Weight	65 kg	40.1kg		
Total weight	148.9 kg	115.3 kg	107.6 kg		

携帯発電システム設置地域はゲルの多い平野部及び山岳部に位置するウブルハンガイ県ハルホリン，アルハンガイ県ウンデルウランを中心とする地域に選定された。Fig. 2に示す各地域に平成4，5，6年度にかけて合計200台のシステムが設置された。

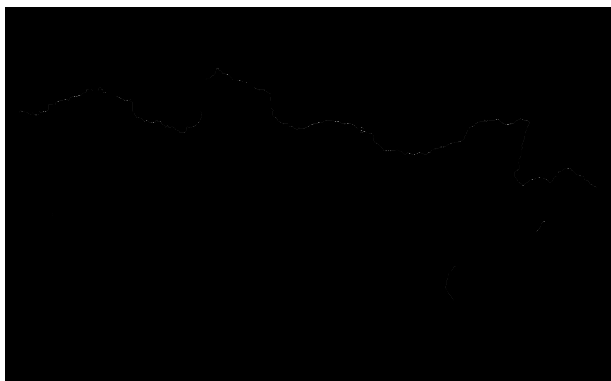


Fig.2: Installation areas of Portable PV systems

コントロールユニットにはシステムの運転状態を記録するための自動データ計測装置が装備されている。測定項目は：アレイ面日射強度，セル温度，アレイ電流，バッテリー電圧，バッテリー温度(初年度システム)，コントロールユニット温度(2,3次システム)，インバータ出力電力，直流出力電流(3次システムのみ)，振動(一部)であった(Fig.3)計

測は初年度システムでは10分毎に，2次，3次システムでは20分毎に行われそれぞれ約3，6ヶ月分のデータが保存される。データ収集については，多数のシステムが広範囲に設置されたこと，交通手段の不備等によって困難を極めた報告されている[1]。

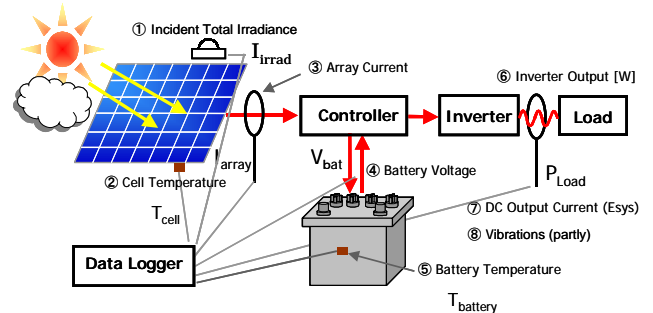


Fig.3: Measurement Items and Points

3. 解析方法

計測データから解析的に求める方法とモデル式を用いた時系列シミュレーション方法を組み合わせて，PVシステムの運転時に発生する損失を次の6つの項目に分離する：インバータ損失，直流回路及びCC損失，バッテリーの充放電損失，満充電状態によるアレイ損失，Pmax mismatch損失，温度上昇が原因で出力低下による損失(Fig.4)；システムの利得に含まれる低温によるアレイ出力向上の割合も算出した。アレイ出力電力量から負荷消費・インバータ・直流回路及びCC損失を差し引いた値を蓄電池の充放電等の損失と定義した。

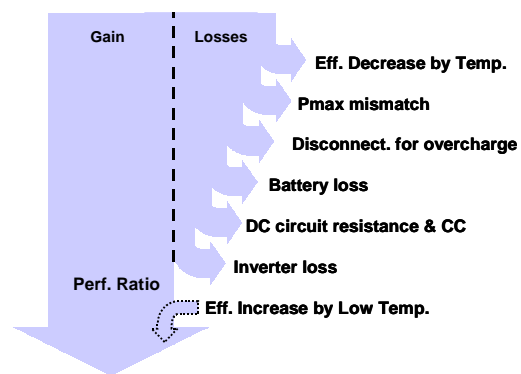


Fig.4 . Energy flow (Sankey diagram of losses)

3.1. 基本性能パラメータ

異なった設置環境に置かれるPVシステムの性能を比較・評価するためにエネルギーを定格出力での稼働時間に換算した以下の4つのパラメータが広く使われる。システムの基本性能を示す式を国際基準 IEC 61724に次のように定義している[2]。

$$Y_r = H_A / G_s \quad (1) \quad Y_A = E_{A,d} / P_{max} \quad (2)$$

$$Y_f = E_{load,d} / P_{max} \quad (3) \quad K = Y_f / Y_r \quad (4)$$

等価日太陽日照時間 (Reference yield) Y_r は基準アレイ面日射強度で日積算アレイ面日射量を供給するのに必要な時間数を, 等価アレイ運転時間 (array yield) Y_A は積算アレイ出力電力量を定格出力で運転する場合の時間数を, 等価日システム稼働時間 (final yield) Y_f は PV システムの発電力がアレイ定格出力の何時間分に相当するかを表している。システム出力係数 (performance ratio) K はアレイ定格出力に対するシステム全体の性能を表す指標である [3]。

3.2. アレイ出力のシミュレーション

温度及び Pmax ミスマッチによるアレイ出力低下を計算するためにアレイ出力のシミュレーションを行った。太陽電池モデルを太陽電池等価回路の基礎式 (5) に基づいて作成した。日射強度, 周囲温度を用いて, 標準試験条件下での各係数を求め, 温度補正し, 非線形連立方程式を解いて太陽電池の出力電流を算出するようにした。

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left\{ q \left(\frac{V + R_s I}{n k T_c} \right) \right\} - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (5)$$

ただし, I : セル出力電流, I_{ph} : 光誘起電流, I_0 : ダイオード飽和電流, q : 電子の電荷量, V : セル出力電圧, R_s : セル内部の直列抵抗, R_{sh} : 並列抵抗, n : ダイオード因子, k : ボルツマン係数, T_c : セル温度

太陽電池特性は温度により大きく影響されるので各定数の温度係数を実験的に求めた近似式 (6) から (9) を用いた [4]。

$$I_{ph} = I_{ph0} \left\{ 1 + 7.9736 \times 10^{-4} \cdot (T_c - 25) \right\} \times \left[0.94 G_A + 0.06 \{ 1 - \exp(-8 G_A) \} \right] \quad (6)$$

$$I_0 = I_{o0} \cdot \exp \{ 0.14132 \cdot (T_c - 25) \} \quad (7)$$

$$R_s = R_{s0} \left\{ 1 + 3.4158 \times 10^{-3} \cdot (T_c - 25) + 2.5324 \times 10^{-5} \cdot (T_c - 25)^2 \right\} \quad (8)$$

$$R_{sh} = \frac{R_{sh0}}{1 + 4.449 \times 10^{-2} \cdot (T_c - 25) + 8.0575 \times 10^{-4} \cdot (T_c - 25)^2} \quad (9)$$

標準試験条件の最大アレイ出力と測定された温度での最大アレイ出力との差から温度による出力低下損失を求めた。全てのシステムには最大出力追尾機能がないので蓄電池の電圧がシステム動作点になるため,

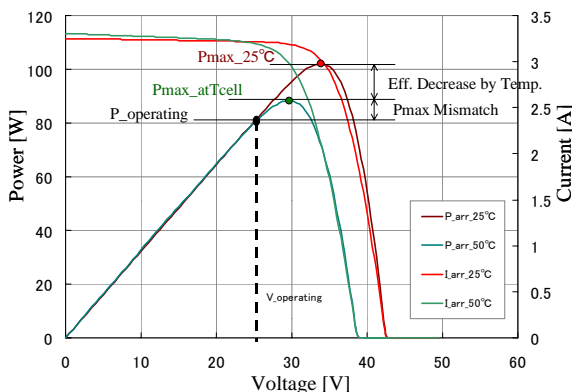


Fig.5: I-V curves of modeled array.

Fig.5 に示すように最大出力点との差を Pmax ミスマッチ損失と定義し, シミュレーションによって各損失量を算出した。また, CC の過充電防止機能によってアレイが短絡される間をアレイ損失 (array capture loss) と定義し, 算出した。

3.3. インバータ及び CC 等の損失

インバータの入力電力量が計測されてなかったため, 測定データだけでは DC-AC 変換による損失を求めることができない。そのため, 実験によって負荷定格容量 300W の負荷率に対するインバータ効率曲線を取得し, 2 次曲線式で近似した (Fig.6)。また, ケーブルの抵抗損失を含む CC の回路損失を全体の損失からインバータ損失を差し引いた値と定義した。

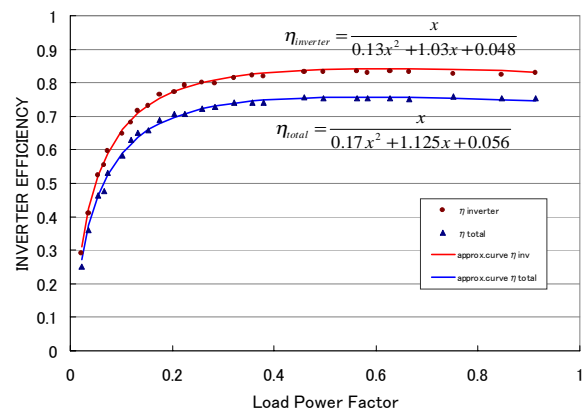


Fig.6: Inverter efficiency vs load power factor.

4. 結果及び考察

解析対象にした 37 サイトの月別日積算アレイ面日射量とアレイ出力電力量及び負荷消費電力量を Fig.7 に示す。年平均アレイ面日射量は 1 次システムでは 4.88 kWh/m²/日; 2 次 3 次システムでは 4.71 kWh/m²/日である。消費電力は減少する傾向にあるにもかかわらずアレイ出力電力量が著しく増加している。太陽電池の変換効率と日射計には劣化がみられなかった。

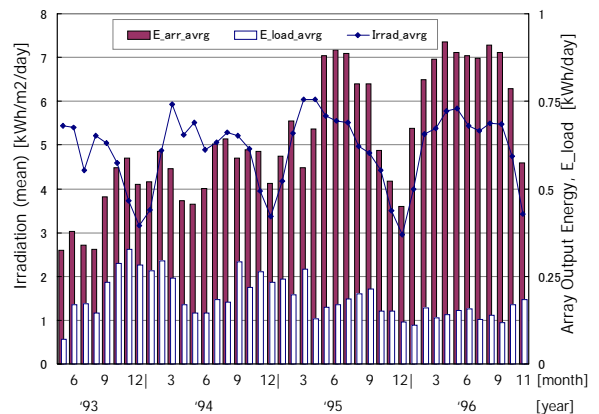


Fig.7: Initial systems monthly average values of Irradiation, Array and Inverter output energy.

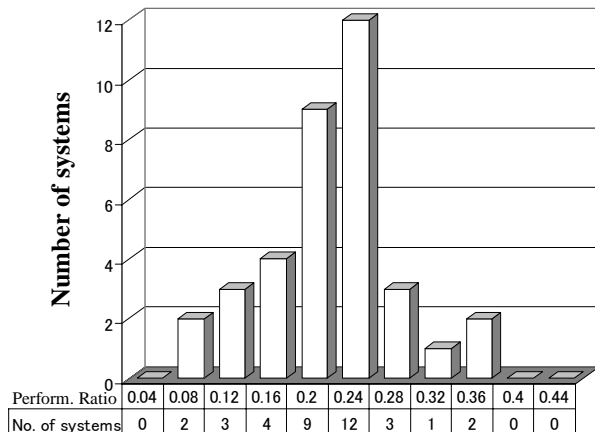


Fig.8: Distribution of annual performance ratios

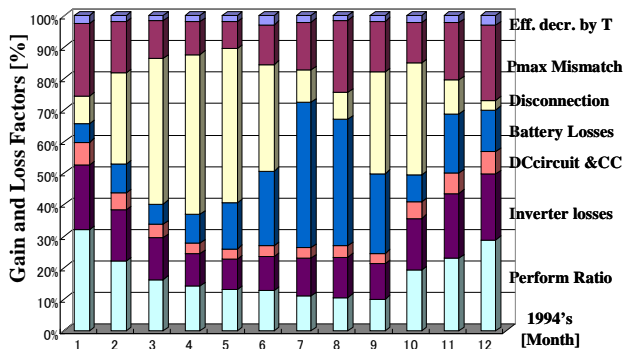


Fig.9: Monthly average performance ratio and losses for A019 systems.

解析対象にしたシステムのシステム出力係数の分布は0.24に集中している (Fig.8)。1次A019システムの平成6年度運転データのシミュレーション解析例をFig.9に示す。計測された積算日射量に相当するアレイ出力(25 換算)を100%とし、システム出力係数および各損失の割合を算出した。温度上昇による出力低下は平均値で全体2.1%と無視できるくらい小さい。インバータ及びCCの損失は負荷に比例して一定であるのに対して、蓄電池の充放電損失と過充電防止機能によるアレイ損失は季節によって大きく変動する。

解析結果から、全体的に蓄電池の充放電損失の著しい増加、早期機能低下、Pmax ミスマッチによる損失量が観測された。その主な原因は次の通りであると考察できる：

- ・モンゴルの気候は乾燥しているため蓄電池の電解液が激しく蒸発し、機能が低下した。補充液を定期的に行う必要がある。
- ・蓄電池が満充電状態にはCCの過充電防止機能が働きアレイ出力がスイッチングするチャタリング現象を起こし蓄電池の寿命に悪影響を与えた。

自動車用のバッテリーは大電流放電できるように設計されているため、内部抵抗が大きく、据置用途に充放電効率が低くなる。

外気温-20 の真冬でも蓄電池の温度10 以上で保たれており、ゲル内の温度は零度以下になることが少なく、蓄電池の寿命に大きい影響がない。

5.まとめ

独立小型PVシステムの運転データを解析し、内部損失を6項目まで分離して評価を行うモデル式及び手法をまとめた。今後は解析結果を元にモンゴルの気候と負荷パターンに適した設計法を確立させ、経済面からも検討し、実証実験を進めていく予定である。

謝辞

本研究に用いたデータは新エネルギー産業技術総合開発機構(NEDO)の委託で京セラ(株)が実施した「携帯型太陽光発電システム実証研究」プロジェクトにより計測されたものである。データ提供とご協力いただいた関係機関の各位に深く感謝の意を表す。

参考文献

- [1] 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO): 太陽光発電システム実用化技術開発(携帯型太陽光発電システム実証研究, 平成9年3月;
- [2] IEC; The International Electrotechnical Commission, "Photovoltaic system performance monitoring Guidelines for measurement, data exchange and analysis", IEC 61724, 1998
- [3] U. Jahn, D. Mayer, M. Heidenreich and etc. "International Energy Agency PVPS Task 2: Analysis of the operational performance of the IEA Database PV systems", 16th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Glasgow, United Kingdom, May 2000
- [4] 新エネルギー・産業技術総合開発機構委託業務成果報告書「システム評価技術の研究開発」平成13年, 財団法人日本品質保証機構
- [5] N. Enebish The National Photovoltaic Program "100,000 Solar House (GER) in Mongolia, 28th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, September 15-22, 2000
- [6] Mongolian Statistical Year Book 2000, National Statistical office, 2001
- [7] Amarbayar Adiyabat, Kosuke Kurokawa, "Performance Analysis of Portable PV System Based on Measured Data in Mongolia", 1st Mongolian Photovoltaic Conference, September 5-7, 2001