

ニッケル水素蓄電池の住宅用PVシステムへの適用に関する基礎検討

Fundamental Study on Application of Ni-MH Battery to Residential PV System

西川省吾^{*1}

Shogo NISHIKAWA

Abstract

When a lot of clustered PV systems will be installed in the future, the huge reversed power may affect the power quality of electrical system. Introduction of advanced secondary batteries such as Ni-MH battery, lithium-ion battery are one of the promising technologies to prevent the influence by reversed power from PV systems. In this study, possibility of application of Ni-MH batteries to a residential PV system was studied by simple simulation and performance test of Ni-MH and lead-acid batteries as the first step. To evaluate the performance of both batteries, three parameters were proposed. The first one is ratio of achievement of control power at a receiving point, the second is ratio of suppression of PV output energy and the last is ratio of PV energy dependency. In this paper, the results of the performance test and the simulation are presented.

キーワード：住宅用 PV システム，ニッケル水素蓄電池，鉛蓄電池，受電点電力，PV 出力抑制

Key Words: Residential PV system, Ni-MH battery, Lead-acid battery, Power at receiving point
Suppression of PV output

1. はじめに

将来的に、太陽光発電 (PV) システムなどの分散電源が電力系統に大量導入された場合に、電圧変動など系統への悪影響が懸念される。このため、蓄電池を活用し発電システムとしての質を向上すると共に、系統への悪影響を防ぐことが重要視されている。⁽¹⁾

PV システムと蓄電池の組合わせに関する研究はかなり以前より行なわれているが、ほとんどのケースが鉛蓄電池を想定している。鉛蓄電池は自動車、非常電源など多方面で普及しており、現時点では信頼性、コストの面などから他の蓄電池を上回る。しかしながら、技術はほぼ成熟しており、今後、大幅な技術的進歩は期待しにくく、鉛蓄電池が大量に PV システムと組合わせられることは困難である。

このような状況下において、自動車業界ではハイブリッドカー用の蓄電池として、高性能なニッケル水素 (Ni-MH) 蓄電池やリチウムイオン (Li-I) 蓄電池などが研究されている。特に、Ni-MH 蓄電池は Li-I 蓄電池よりもエネルギー密度等は劣るものの、鉛蓄電池より性能が高い上 (表 1 参照)、Li-I 蓄電池より安全性に優れていることから、既にハイブリッドカーに適用され相当量普及している。

Table1. Energy density of commercial batteries

表 1 商用蓄電池のエネルギー密度⁽²⁾

	Nominal voltage [V]	Energy density	
		[Wh/kg]	[Wh/l]
lead acid	2.0	20~40	60~90
Ni-MH	1.2	50~75	250~300
Li-I	3.6	120	250~300

これら新型蓄電池は、鉛蓄電池に比べてエネルギー密度が大きいが高コストであるため、実用化のためには蓄電池自体のコスト低減に加え、設置容量の低減が重要である。一方、蓄電池容量の低減と運転性能の向上は相反するため、最小限の蓄電池容量で高い導入効果を確保するための運用・制御方式の開発が不可欠である。

このため筆者は、新型蓄電池の住宅用 PV への適用検討の第一段階として、経済性は今後の課題に残し、既にハイブリッドカー用として普及している Ni-MH 蓄電池の適用を想定した。住宅用 PV システムにおける受電点電力の安定化を目的として、基本的特性試験とシミュレーションにより、Ni-MH 蓄電池の特性を活かすことで、設置容量を鉛蓄電池に比較してどの程度低減できるかを明らかにした。

2. 検討内容

本検討では 1 時間ごとに 1 年間分のシミュレーションを実施した。主なシミュレーション条件を以下に示す。

2.1 システム構成

*1 日本大学理工学部助教授

(〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台1-8-14)

e-mail : nishikawa@ele.cst.nihon-u.ac.jp

(原稿受付：2007年1月12日)

本研究で対象とした蓄電池付 PV システムの構成を図 1 に示す。

図 1 中の P1~P7 はエネルギーフロー、黒丸は住宅と電力システムの境界である「受電点」、受電点から PCS に向かう点線は受電点電力の情報（電力の大きさ・方向）を伝送するものである。インバータ出力(=P7+P8)が負荷電力(=P8+P9)を下回る場合は系統から不足電力(P9)を受けるが、蓄電池への充電は PV 出力からによるもの(P3)のみとし、系統から充電は行なわないこととした。

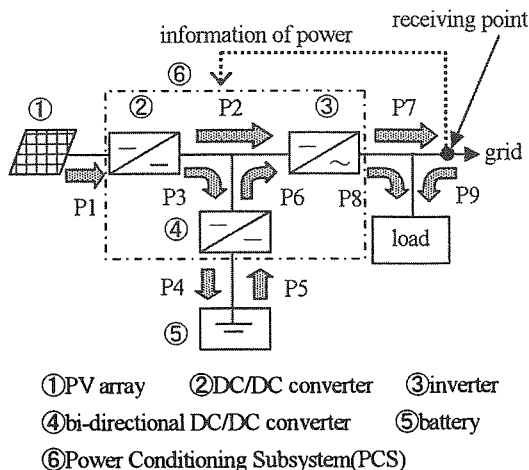


Fig.1 An example of configuration of PV system with battery

図 1 蓄電池付 PV システムの構成例

2.2 システム構成要素の主な仕様

(1) PV システム PV アレイは最大出力（標準試験条件時）4kW, 5kW, 設置条件は南向き・傾斜 30 度とした。コンバータ、双方向コンバータおよびインバータは定格容量をいずれも PV アレイと同じ 4kW または 5kW とし、効率曲線も市販品レベルで共通とした（図 2 参照）。

PV アレイ出力(=P1)は式(1)の簡易式により算出することとした。

$$P1 = I \cdot Pr \cdot [1 - \alpha(T - 25)] \cdot K / Ir \quad (1)$$

但し、P1: PV アレイ出力[kW]

I: アレイ面日射強度[kW・m⁻²]

Pr: 標準試験時のアレイ最大出力[kW]

α: 最大出力の温度係数 (0.004 と仮定)

T: アレイ代表温度[°C] (式(2)により算出) ⁽³⁾

K: アレイ出力補正係数 (0.9 と仮定)

Ir: 基準日射強度[1kW・m⁻²]

$$T = -6.71 \exp(-0.21Vw) + 42.21 \exp(-0.14Vw) + Ta \quad (2)$$

但し、Vw: 風速[m・s⁻¹] Ta: 気温 (°C)

なお、日射強度、気温、風速等の気象条件は MetPV-2 の東京の値を引用した。

(2) 住宅負荷 住宅負荷は参考文献(4)に示されているも

のを使用した。文献では 30 分値が示されているが、気象データ MetPV-2 は 1 時間値なので、これに合わせるため 1 時間値を計算により求めた。図 3 に春 (4 月)、夏 (7 月)、秋 (10 月) および冬 (1 月) の例を示す。住宅のため負荷のピークは夜間に存在し、冬は朝にもピークがある。しかしながら、PV 出力が最大となる昼間は比較的軽負荷である。

(3) 蓄電池 蓄電池は鉛蓄電池と Ni-MH 蓄電池の 2 種類を想定し、基本モデルは市販品とした。具体的には、鉛蓄電池は小型制御弁式でサイクルユース用であり、PV システムのように充放電の激しいものには比較的適しており、定格電圧、定格容量は、各々、12V (6 セル直列)、24Ah (20 時間率) である。市販の Ni-MH 蓄電池は、鉛蓄電池より小容量で、特に PV 用というものは無いため、入手可能なものの中では大容量で「動力用」仕様のものを選定した。定格電圧 1.2V (単セル)、7.3Ah (5 時間率) である。PV システムと組み合わせる蓄電池ユニットとしては、何れも定格電圧を 192V (鉛: 96 セル直列, Ni-MH: 160 セル直列) とした。Ah 容量は並列数を変えて調整した。具体的に検討した並列数 (括弧内は蓄電池容量[kWh]) を以下に示す。

鉛: 1 (4.6), 2 (9.2), 3 (13.8), 4 (18.4)

Ni-MH: 1 (1.4), 2 (2.8), 4 (5.6), 6 (8.4), 8 (11.2)

10 (14.0), 12 (16.8)

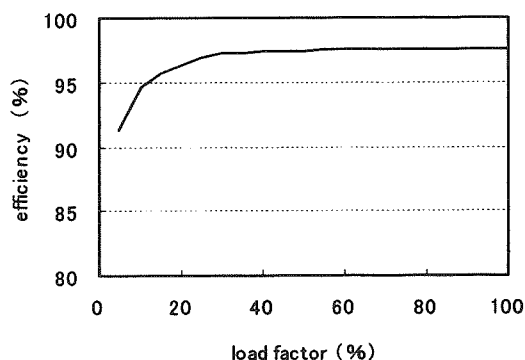


Fig.2. Conversion efficiency of converter and inverter

図 2 コンバータ・インバータの変換効率

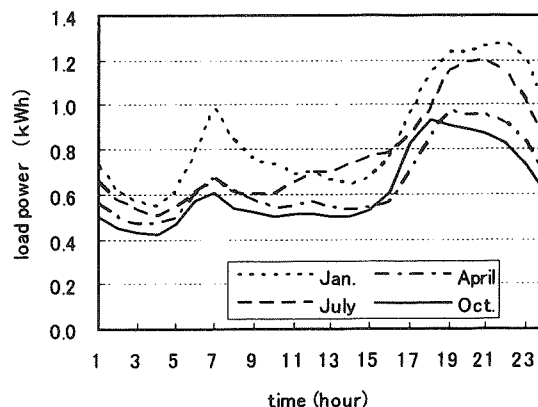


Fig.3. Example of residential load profile

図 3 住宅負荷パターンの例

2.3 蓄電池の運用

蓄電池の運用は、ここでは受電点における潮流（P7 または P9）の絶対値を指定範囲以内（順潮流・逆潮流とも等しく 0.6kW, 0.7kW, 0.8kW の 3 ケース）に抑制する運用とした。（以下、「受電点電力制御方式」という）

もし、蓄電池が満充電状態で PV 出力が大きく受電点電力（逆潮流）が指定範囲を超えようとする場合は、PV ア

レイの出力を抑制することとした。本運用により、電力系統からみると比較的変動の少ない良好な負荷が連系されたことになる。

また、実運用レベルを考慮し、蓄電池の許容可能な最大放電深度を鉛は 0.7, Ni-MH は 1 とした。なお、最大充放電速度は、今回は特に制限を設けないものとした。

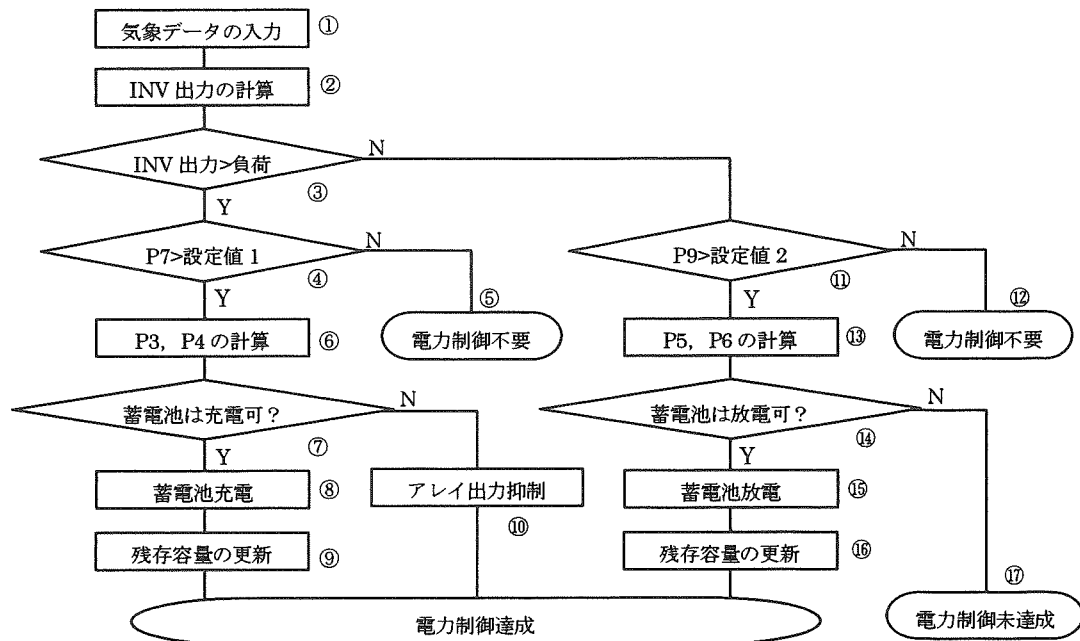


Fig.4 Simulation flow

図 4 シミュレーション手順

2.4 シミュレーション手順

本検討でのシミュレーション手順を図 4 に示す。図中の④の「設定値 1」とは「逆潮流の許容限界値」で、⑪の「設定値 2」とは「順潮流の許容限界値」であり、受電点電力をこの範囲内に制御するような運用を行う。

最初に MetPV-2 に収録されている東京の気象データを読み込み①、式(1)、(2)によりインバータ出力を計算する②。インバータ出力を同時刻の負荷電力と比較し③、前者が後者より大きい場合は逆潮流(P7)が発生するため、P7 が設定値 1 を超えるかどうかを判断し④、超えなければ受電点電力を制御する必要は無い⑤。設定値 1 を超える場合は超過分を抑制するため、蓄電池へ充電する必要がある。蓄電池に超過分を充電するだけの空き容量があれば全超過分を充電するが、反対に蓄電池が満充電またはそれに近い状態で超過分を充電できない場合は、アレイ出力を抑制することにより⑩、受電点電力が設定値 1 以内になるようにする。

インバータ出力よりも負荷が大きい場合は、順潮流(P9)が生じるが、P9 が設定値 2 を下回る場合は受電点の電力制御をする必要は無い⑫⑬。一方、P9 が設置値 2 を上回る場合は蓄電池からの放電により P9 が設定値 2 以下になる

ようにする必要があり、蓄電池に必要な残存容量があれば受電点電力制御は可能となるが、残存容量が不足する場合は制御が未達成になる⑰。

図 4 の計算を、1 時間ごとに繰り返して 1 年間分計算することにより、2.5 に示す 3 つの評価パラメータを算出することができる。

2.5 運転性能の評価方法

2 種類の蓄電池の違いを定量的に評価するためのパラメータとして、以下の 3 種類を想定した。住宅用 PV などの分散電源が大量普及するには、電力系統に悪影響を与えないようにするとともに、システム効率も低下させないことが重要である。これらのパラメータは、今後、住宅用 PV が大量普及するために具備すべき機能の評価に有用なものとする。

(1) 電力制御達成率 (%Rc) 受電点電力を指定範囲以内に制御できた割合を示すもので、式(3)により算出する。受電点電力をある範囲内に収めることは、電力系統から見ると変動の少ない負荷（又は発電設備）が連系されたことになり、電圧変動の抑制にも効果的である。電力制御達成率が高いことは、電圧変動の抑制が容易になることを意味する。To が 0 になると電力制御率は 100% になり、受電点

電力を常に指定範囲内に制御できたことを示す。Tsは負荷電力と（出力抑制をかけない）PV出力で決まり、一般的に夜間の負荷電力が大きかったり、PV出力が大きくなったりする季節に大きな値となる。

$$\%R_C = \frac{T_S - T_O}{T_S} \times 100 \quad (3)$$

但し、Ts：受電点電力制御が無い場合に、受電点電力が指定範囲を超える合計時間[h]

To：受電点電力制御を行う場合に、受電点電力が指定範囲を超える合計時間[h]

(2) アレイ出力抑制率(%Rs) 2.3で述べたように、蓄電池が満充電状態において逆潮流により受電点電力が指定範囲を超えようとする場合、PVアレイ出力を抑制する。抑制率は、本来なら有効に利用できたアレイ発電量の内、どの程度の割合が抑制されて損失になったかを示すもので、式(4)により算出する。逆潮流を単に設定値内におさめるだけであればアレイ出力を抑制すればいくらかでも可能であるが、システム効率の低下となるので抑制率には注意が必要である。

$$\%R_S = \frac{E_I - E_O}{E_I} \times 100 \quad (4)$$

但し、EI：本来のPVアレイ発電量[kWh]

EO：実際のPVアレイ発電量[kWh]

(3) PV依存率(%Rd) 負荷電力量のうち、どの程度の割合をPV発電量により賄ったかを示すもので式(5)により算出する。PVの普及程度をPVシステムの導入容量で表現することが多いが、設備利用率が既存電源と大きく異なるので必ずしも適切ではない。既存エネルギーの代替として評価するのであれば、負荷電力量の何%がPVエネルギーによるものかを評価することが適切である。負荷電力量の全てをPV発電量だけで賄う（順潮流量が0）場合には、PV依存率は100%になる。

$$\%R_D = \frac{E_L - E_N}{E_L} \times 100 \quad (5)$$

但し、EL：負荷電力量[kWh] (=Σ(P8+P9))

EN：順潮流量[kWh] (=ΣP9)

3. 蓄電池特性試験

3.1 試験方法

蓄電池のモデル化のため、充放電特性試験を実施した。なお、今回は基本検討ということで、通常実施されている定電流試験とした。具体的には参考文献(5)と(6)の内容をベースに、充放電速度（電流）の違いの影響を把握するため、以下のとおり速度を変化させて実施した。

（鉛蓄電池）

①I₂₀A (1.2A) ②4I₂₀A (4.8A) ③8I₂₀A (9.6A)
(Ni-MH蓄電池)

①I₅A (1.46A) ②0.25I₅A (0.365A)

③2I₅A (2.92A) ④5I₅A (7.3A)

ただし、I₂₀：20時間率電流 I₅：5時間率電流

参考文献(5)、(6)では、小型制御弁式鉛蓄電池の定格放電容量は20時間率、密閉形Ni-MH蓄電池の定格放電容量は5時間率で定義されている。ここで「〇〇時間率」とは、蓄電池が満充電状態から、一定電流で放電した時に「放電終止電圧」に到達するまでに〇〇時間要することを示している。例えば「20時間率」とは、一定電流で放電し20時間かけて放電終止電圧に到達することを意味し、この場合の一定電流を「20時間率電流」という。本論文では、各規格に基づき、2種類の時間率を使用した。

3.2 試験結果

充放電速度と充電容量および放電容量の関係を、図5（鉛）、図6（Ni-MH）に示す。ここでの「充電容量」とは蓄電池を完全放電状態から満充電状態するのに必要な充電電力量、「放電容量」とは満充電状態の蓄電池から取り出せる電力量を指す。前者は小さいほど充電効率がよく、後者は大きいほど放電効率がよいことになる。

何れも定格電流時の充電容量または放電容量を100%としているが、電流が大きくなるほど充電容量は大きく、放電容量は小さくなるのが分かる。これは、電流が大きくなるほど、蓄電池内のセル間配線・極板の抵抗により電圧上昇（充電時）または電圧降下（放電時）が大きくなるためである。また、電流が大きくなると電極面上での反応にむらができ、場所により電解質の濃度分布にばらつきが生じることも影響している。

特に、鉛蓄電池の変化が大きく、Ni-MH蓄電池に比べ大電流時の充電効率および放電効率の低下が著しいことが分かる。このことから、蓄電池容量が同一であればNi-MH蓄電池が高効率なシステムを構築できる可能性があることが分かる。

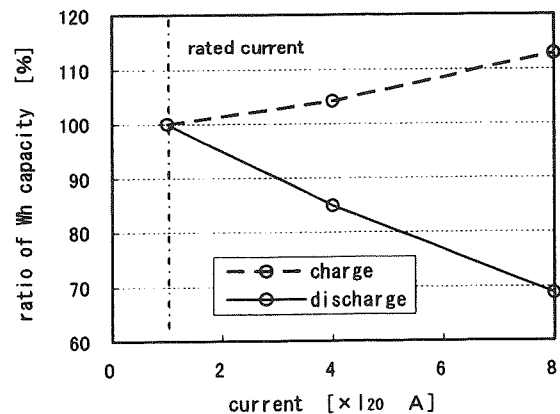


Fig.5 Relationship between current speed and energy capacity (lead-acid battery)

図5 充放電速度と充放電容量の関係（鉛）

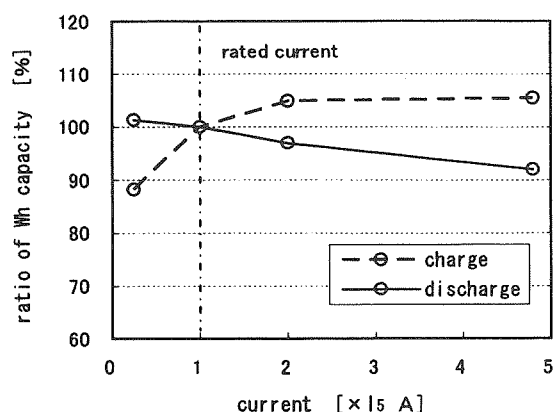


Fig.6 Relationship between current speed and energy capacity (Ni-MH battery)

図6 充放電速度と充放電容量の関係 (Ni-MH)

蓄電池の充放電試験は定電流で行なっているが、PV出力も負荷電力も変動しており、充放電も不規則に行なわれている。この場合の残存容量の推定は、以下の手順で実施した。

- a. 図4中の⑧、⑨で求めた充電量や放電量を、図5または図6により定格電流時（鉛は $I_{20}[A]$ 、Ni-MHは $I_5[A]$ ）の値に換算する。例えば、鉛蓄電池の場合、 $8 \times I_{20}[A]$ の充電電流で $K[Ah]$ だけ充電したときの定格電流時の充電量への換算は、図5から充電電流が $8 \times I_{20}[A]$ の時のWh容量比が112[%]なので、 $K \times 100 \div 112$ となる。放電の場合はWh容量比が70%であるから、定格電流時の放電量への換算は $K \times 100 \div 70$ になる。
- b. aで求めた（定格電流による充放電量に換算した）充放電量で1時間毎に残存容量を更新する（図4中の⑨）。

なお、図5、図6は充電・放電電流とWh容量比の関係であるが、シミュレーションでは充電・放電電力とWh容量比の関係に置換して計算を実施した。この際、蓄電池電圧は、計算を簡易にするため鉛蓄電池、Ni-MH蓄電池ともに一定電圧（192V）とした。これは、定電流充放電であれば（充放電初期・終期を除き）充電・放電中の電圧は比較的安定していることに基づくものである。

4. シミュレーション結果

4.1 受電点電力制御を行わない場合

受電点電力制御を行わない場合の、受電点電力が任意の値を超過する年間の累積時間の例(PV5kW)を図7に示す。

図7より、受電電力量PRPが1kWh以上の領域では逆潮流の累積発生頻度が順潮流を上回ることが分かる。なお、PV容量が4kWの場合は、PV出力が小さくなることから逆潮流も小さくなる。PRPが1.1kWh以上の領域で逆潮流が順潮流の発生頻度を上回り、1.5kWh以上の逆潮流の発生

時間は1000時間を下回るなどの違いはあるが、基本的な傾向は同じである。

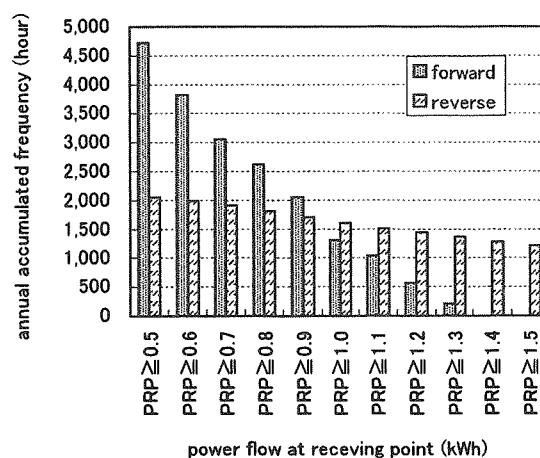


Fig.7 Accumulated frequency distribution of power at receiving point without power control (PV5kW)

図7 電力制御無しPVシステム導入時の受電点電力の累積発生頻度 (PV容量5kW)

4.2 電力制御達成率

蓄電池の充放電による受電点電力の制御の例を図8に示す。蓄電池電力は正が放電、負が充電を意味する。

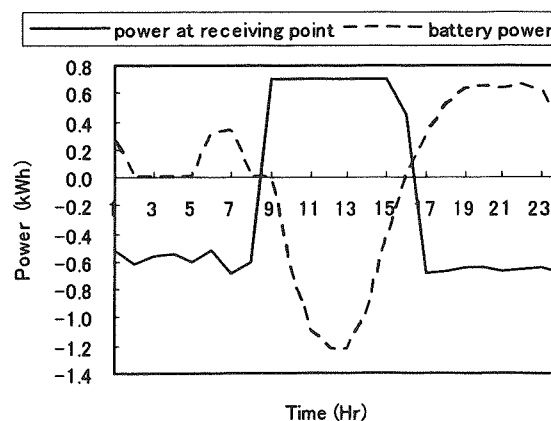


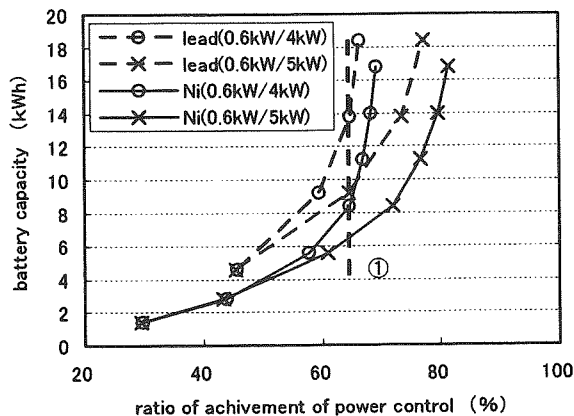
Fig.8 An example of power control by battery power
図8 蓄電池の充放電による受電点電力制御の例

放電が1, 6~7, 17~24時に発生しているがこれは負荷電力が0.7kWを超える（この時間帯はPV出力が0）ためである。また、充電は10時から15時まで連続して発生しているが、これは負荷電力に対しPV出力が大きく、逆潮流が0.7kWを超えるためである。

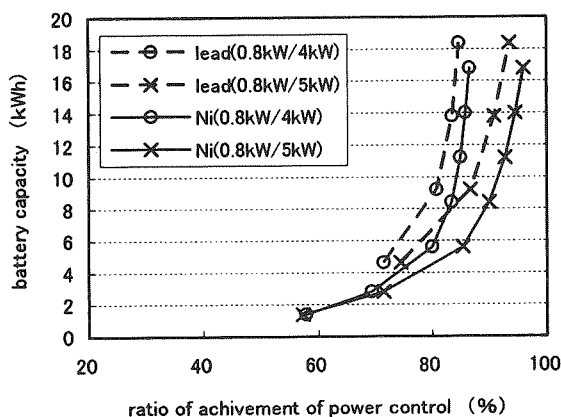
一方、蓄電池の充放電により受電点電力が制御できないのは、①蓄電池が満充電状態の時の逆潮流、②蓄電池に残存容量がなく放電不可能な時の順潮流である。しかしながら、①についてはPVアレイの出力抑制により逆潮流が指定範囲を超えるのを防ぐことができるため、電力制御がで

きなくなるのは、実質上、②の場合だけである。

電力制御達成率と必要な蓄電池容量の関係の例を図9に示す。(a)は受電電力の制御範囲が0.6kW, (b)は0.8kWの結果である(0.7kWは中間的な結果となる)。また、凡例中の括弧内の数値は(受電点電力制御範囲/PV容量)を示す。



(a) Max. absolute value of power at receiving point : 0.6kW



(b) Max. absolute value of power at receiving point : 0.8kW

Fig.9 Relationship between ratio of achievement of power control and needed battery capacity

図9 電力制御達成率と必要な蓄電池容量の関係

電力制御達成率を上昇させるには必要な蓄電池容量が大きくなり、特に達成率が大きくなるほど蓄電池容量の増加率が著しく大きくなる。また、必要な蓄電池容量は鉛蓄電池が大きく、(a)中の達成率が約65%の場合(線①)、PV容量が4kWではNi-MH蓄電池が約8kWhの蓄電池容量になるのに対し、鉛蓄電池では約14kWhと2倍弱も大容量になることが分かる。これは、両蓄電池の最大放電深度の差に、充放電効率の差が加わったためである。

4.2 アレイ出力抑制率

アレイ出力が抑制されている日の負荷電力、理想アレイ出力、実際のアレイ出力および受電点電力の変化の例を図10に示す。また、アレイ出力抑制率と必要な蓄電池容量の関係の例(制御範囲が0.6kW, 0.8kW)を図11に

示す。

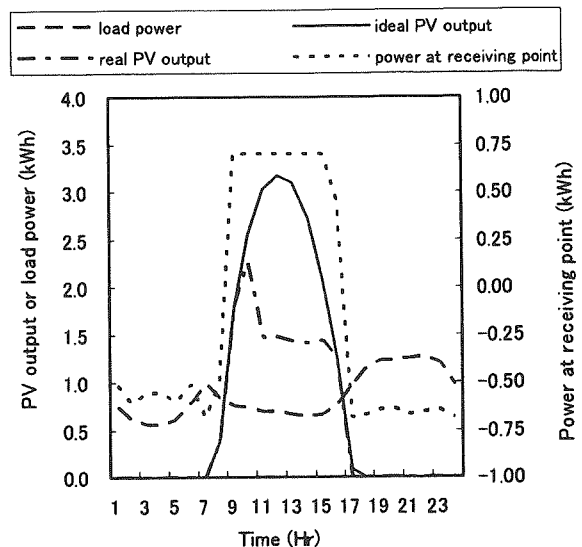
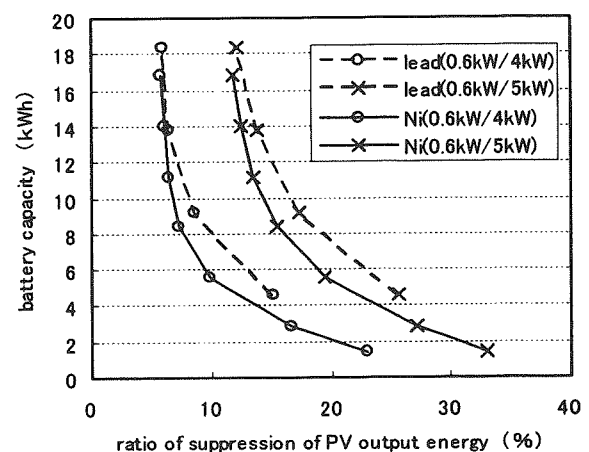
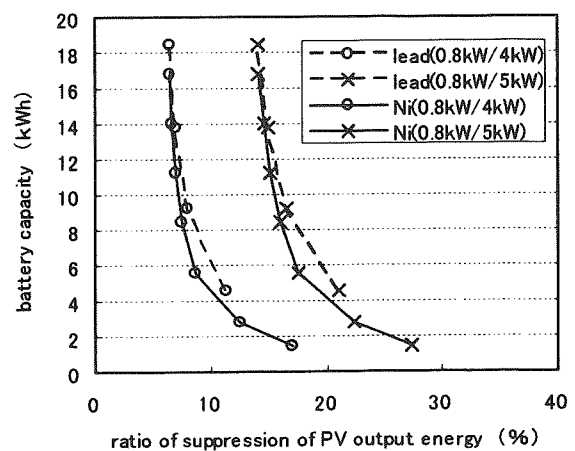


Fig.10 An example of suppression of PV output

図10 アレイ出力抑制の発生例



(a) Max. absolute value of power at receiving point : 0.6kW



(b) Max. absolute value of power at receiving point : 0.8kW

Fig.11 Relationship between ratio of suppression of PV output energy and battery capacity

図11 アレイ出力抑制率と必要な蓄電池容量の関係

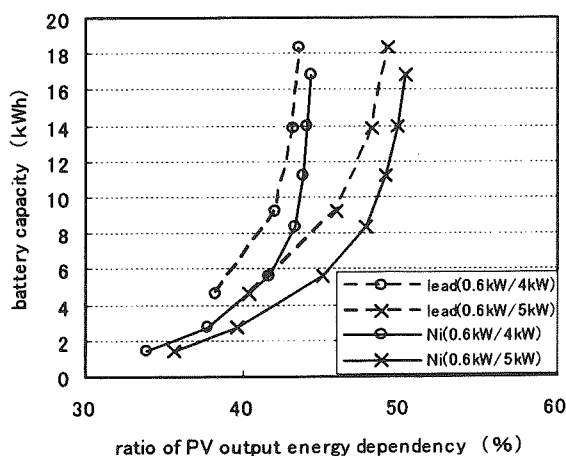
図 10 において、理想アレイ出力とは出力抑制がかからない場合のアレイ出力で、実際のアレイ出力とは出力抑制がかかった状態のアレイ出力を指す。この例では、10時から15時頃まで出力抑制がかかっていることが分かる。アレイ出力が最大になる12時には、理想状態では3kWを超える出力が、実際の出力は1.5kW程度にまで低下し、約1.5kWも抑制されている。しかしながら、出力抑制により10時から15時までの受電点電力は制御限界の0.7kWで一定になっている。この日の場合、日間発電量の36%が出力抑制されており、システム効率を大きく低下させている。

図 11 より、出力抑制率を小さくするには、蓄電池容量が大きくなり、特に5%以下(PV容量4kW時)または15%以下(PV容量5kW時)にするには、蓄電池容量は20kWh以上必要なことが分かる。鉛とNi-MHを比較すると前者が大容量になるが、両者の差は電力制御達成率に比べると小さくなっている。

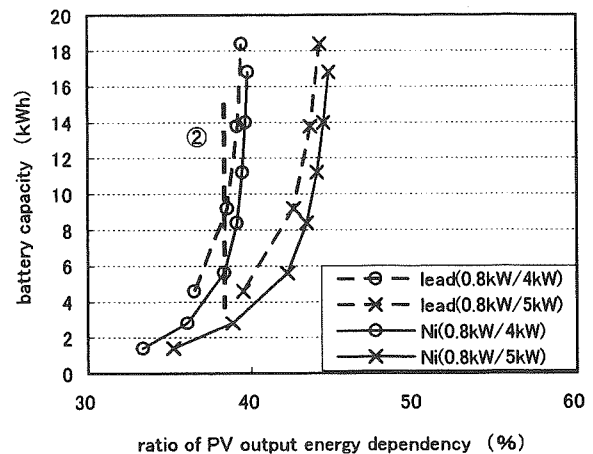
4.3 PV 依存率

PV 依存率と蓄電池容量の関係例(制御範囲 0.6kW, 0.8kW)を図 12 に示す。(0.7kW は中間的な結果となる。)

これより、PV 依存率を増加させるには蓄電池が大容量化し、特に40%以上(PV容量4kW時)または45%以上(PV容量5kW時)にしようすると蓄電池容量の増加率が著しく大きくなることが分かる。また、Ni-MH蓄電池が鉛蓄電池よりも小容量で、(b)中の破線②の条件では蓄電池容量の差は50%以上もあり、放電深度の差以上の違いが見られる。これは既述のとおり、蓄電池が小容量になると充放電速度が大きくなり、鉛蓄電池とNi-MH蓄電池の充電効率・放電効率の差が顕著になるためである。



(a) Max. absolute value of power at receiving point : 0.6kW



(b) Max. absolute value of power at receiving point : 0.8kW

Fig.12 Relationship between ratio of PV output energy dependency and battery capacity

図 12 PV 依存率と蓄電池容量の関係

5. おわりに

住宅用 PV システムにおける受電点電力の安定化を目的とし、鉛蓄電池と Ni-MH 蓄電池を適用した場合について、蓄電池の基本的な定電流試験結果とシミュレーション結果を基に、導入効果を比較評価した。今回は評価基準として、①受電点電力の制御の達成率、②PV アレイ出力抑制率および③PV 依存率の3つのパラメータを定義し、何れのパラメータにおいても Ni-MH 蓄電池が優れており、同じ電力制御達成率と PV 容量の基で、Ni-MH 蓄電池容量を鉛蓄電池容量の半分強程度まで低減できることを確認した。

しかしながら、本検討は一種類の蓄電池運用方式についてであり、最大充放電速度の蓄電池による違いなども考慮していないことから、更なる検討が必要である。また、蓄電池の運用・制御方式は蓄電池寿命に大きな影響を及ぼし、蓄電池付 PV システムの経済性を大きく変えることが予想されるため、今後は、この点も研究を進めていく。

なお、本研究は平成 17 年度日本大学理工学部特別推進研究費により実施したものである。

参考文献

- (1) NEDO 技術開発機構, PV2030 検討委員会報告書, p12, 2004 年 6 月
- (2) 電池便覧編集委員会:「第3版電池便覧」, 丸善
- (3) 西川:「スタンドオフ方式太陽電池アレイの温度特性と空冷効果」, 日本太陽エネルギー学会誌, Vol.23, No.1, pp.52~59, 1997
- (4) エネルギー総合工学研究所他, H13 年 NEDO 委託業務成果報告「集中連系型 PV システムに係る調査研究」
- (5) JIS C 8702-1: 2003 小形制御弁式鉛蓄電池 第1部
- (6) JIS C 8708: 2004 密閉形ニッケル・水素蓄電池