

## ■ 報 文 ■

## ディーゼル発電機を併用した太陽光発電システムの最適設備容量

## Optimization of Equipments Size of Photovoltaic Power System with Diesel Generator

塚本 守昭\*・井上 久道\*・隅田 勲\*

Moriaki Tsukamoto Hisamichi Inoue Isao Sumida

井上孝太郎\*・池田 孝志\*

Kotaro Inoue Takashi Ikeda

## 1. はじめに

離島用発電設備として、現在、主としてディーゼル発電機が使用されている。この離島用発電設備には、保守性、燃料の供給不安、発電コスト等多くの問題がある。これらの問題点を軽減する一つの方法として、太陽電池、蓄電池及びディーゼル発電機から構成される太陽電池／ディーゼル・ハイブリッドシステムが注目されている。ハイブリッドシステムは、ディーゼル発電機の代替という観点からは太陽依存率を高く設定する必要があり、ディーゼル発電機を蓄電池の補助充電電源として用いた太陽依存率0.8~0.9のシステムの開発が進められている<sup>1), 2), 3), 4)</sup>。しかし、日本のように季節および毎日の日照変動の大きい地域で太陽依存率を高くしようとすると、負荷需要に比較して大容量の太陽電池と蓄電池を必要とする。また、不日照日が継続した場合でも停電を100%避けるためには、最大負荷需要以上の容量を持つディーゼル発電機を必要とする。したがって、ハイブリッドシステムの経済性を向上するためには、システムを設置する離島に必要な太陽依存を満たし、かつ、最小限の太陽電池、蓄電池及びディーゼル発電機で負荷需要を効率良く賄うことのできるシステム構成及びその設計法の開発が必要と考える。

本論文では、蓄電池及びディーゼル発電機の設備容量を低減するため、不日照継続日数に影響されないシステム構成とその運用法を検討し、鹿児島県の小離島を想定して太陽依存率と経済性を考慮した設備容量の関係を検討した。

## 2. 太陽電池／ディーゼル・ハイブリッドシステムの設備容量最適化法

## 2.1 システム構成の選定

ハイブリッドシステムの代表的なシステム構成法であるDC並列方式及びAC並列方式の例を図-1に示す。いずれの方式においても、日照時には太陽電池からの出力はまず負荷需要を賄い、残りの電力により蓄電池を充電する。夜間などの不日照時には蓄電池により負荷需要を賄う。ディーゼル発電機は太陽電池出力が不足するときに、蓄電池を充電したり負荷電力を供給したりする。

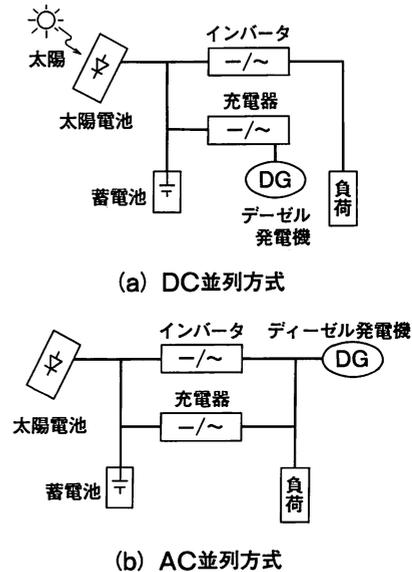


図-1 ハイブリッドシステムにおけるディーゼル発電機の接続方式

\* ㈱日立製作所エネルギー研究所第4部  
〒316 日立市森山町1168

(註) 原稿受理 (63・12・22)

図-1(a)のDC並列方式では、太陽電池の出力とディーゼル発電機の出力を直流で結合し、その直流電力を交流に変換して負荷に供給する。この方式は直流で結合するため制御は比較的簡単である。しかし、ディーゼル発電機の出力は交流→直流→交流と変換されるので効率は低下する。この変換による効率低下の影響を小さくするためには、ディーゼル発電機の運転時間を短くする必要がある。そのため、DC並列方式は太陽依存率の高いシステムに適している。しかし、太陽依存率の高いシステムでは、太陽電池と蓄電池で負荷需要の大部分を賄うことになり、太陽電池出力の50%以上は蓄電池を介して負荷に供給される。蓄電池の充放電効率(60~80%)は必ずしも高くないため、これがシステム効率低下の主な原因の一つになる。また、前記したようにディーゼル発電機の運転時間を短くする必要がある、ディーゼル発電機運用の自由度が小さい。

図-1(b)のAC並列方式では、太陽電池の出力とディーゼル発電機の出力を交流で結合して負荷に供給する。この方式は交流で結合するため制御は複雑となるが、ディーゼル発電機の出力は直接負荷に供給されるため、DC並列方式に比較して電力変換による効率の低下はない。また、太陽電池とディーゼル発電機を独立した電源とみなすことができ、ディーゼル発電機運用の自由度が大きい。

したがって、広い範囲の太陽依存率に対して効率良く運用できるシステムとして、AC並列方式を検討の対象とした。

2.2 AC並列システムの基本運用法およびディーゼル発電機容量の設定方法

AC並列システムは前述したように必ずしも太陽依存率を高くする必要がなく、ディーゼル発電機運用の自由度が大きいという特徴を持つ。このシステムではディーゼル発電機が負荷需要に対して100%以上の容量を持たば、蓄電池は不要である。一方、蓄電池を設けることにより、ディーゼル発電機の容量を下げるができる。すなわち、図-2に示すように負荷需要の小さい時間帯、例えば夜間にディーゼル発電機により全負荷需要を賄うと同時に太陽電池による充電不足分を充電する。そして、負荷需要が太陽電池とディーゼル発電機の合計出力を超える時間帯に、不足電力を蓄電池より供給する。しかし、ディーゼル発電機または蓄電池の容量を下げすぎると夜間充電能力が不足して、停電の可能性が生じる。停電しないディーゼル発電機容量と蓄電池容量の関係は、システム運用期間中

に想定される最大負荷日(一日の負荷需要が最大の日)から決定する。

ディーゼル発電機の総建設コストに占める割合は、システム構成によって異なるが1%程度という試算<sup>4)</sup>もあり、非常に小さい。そのため、ディーゼル発電機の容量の大小は総建設コストには大きな影響を与えない。しかし、ディーゼル発電機の容量が必要以上に大きいと、部分負荷運転の時間が増加する。部分負荷運転時の効率は、定格負荷運転時に比較して図-3にその一例を示すように大幅に低下するので、運用コストが高くなる。したがって、部分負荷運転をできるだけ避けるため、ディーゼル発電機の容量を無停電領域内の最低値に設定する。

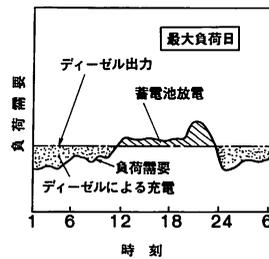


図-2 AC並列システムの基本運用法のご概念

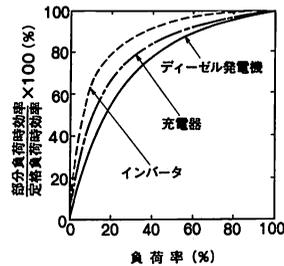


図-3 部分負荷運転時の効率(例)

2.3 太陽電池容量及び蓄電池容量の設定方法

太陽電池容量と蓄電池容量は、日照変動、負荷変動、構成機器の特性及び経済性を考慮して設定する必要がある。最適設定方法としては、システム運転特性のシミュレーション計算に基づく方法<sup>4),5)</sup>、太陽電池の出力変動、負荷変動等を Markov 過程を前提として解析する統計的方法<sup>7)</sup>等がある。これらの方法では、設定した太陽依存率を満たす太陽電池容量と蓄電池容量の関係性を求め、コストが最低となる条件よりそれぞれの容量を設定する。しかし、コストを求めるためには各機器のコスト、寿命、及び燃料の価格予測などの詳

ハイブリッドシステムの運用は、太陽電池出力、負荷需要、蓄電量およびディーゼル発電機容量の大小関係に応じて決定する必要がある。本検討で採用した運用ルールを表1に示す。同表中のマップは、横軸に残存蓄電量Xを、縦軸に太陽電池出力不足割合Yをとり、種々のXとYの値に対応する運転領域と、各運転領域毎の蓄電池及びディーゼル発電機の運転モードを示している。ここで、残存蓄電量Xは放電可能な蓄電量であり、太陽電池出力不足割合Yは太陽電池出力と負荷需要の差をディーゼル発電機容量で規格化したものである。なお、(a)、(b)、(c)で示す領域は、表1の「運転モードの変化ルール」欄に示すように、直前の運転領域に応じてディーゼル発電機の運転モードが異なる領域である。この領域は、負荷変動及び日射変動等によってディーゼル発電機が頻繁に起動、停止を繰り返すのを避けるために設けた。

表1の運用ルールに従ったシステム運転状況の概念図を、図-6に示す。同図には太陽電池出力が安定な場合について、負荷需要、太陽電池出力、及びディーゼル発電機出力の変化と、その時の残存蓄電量X、太陽電池出力不足割合Y、及びXとYに対応する表1の運転領域を示す。

図-6において、0時には運転領域②にあり、ディー

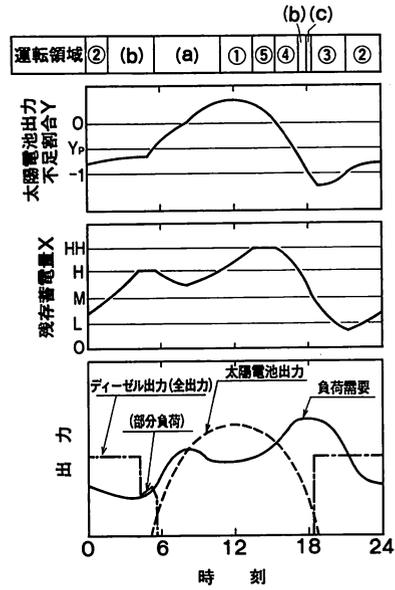


図-6 システム運転状況の概念図

ゼル発電機は全出力で負荷需要を賄うと同時に充電する。残存蓄電量XがMを超えると運転領域(b)に入るが、ディーゼル発電機はそのまま全出力で運転を継続する。そして、XがHに達すると充電を中止して部分負荷運転に移行し、太陽電池出力の不足分を負荷追従する。その後、太陽電池出力が増加して太陽電池出力不足割

表1 システム運用ルール

項目	システム運用ルール
基本ルール	電源優先度：太陽電池>蓄電池>ディーゼル発電機
制約ルール	(1) 無停電 ⇒ 常に〔電力供給能力>負荷需要〕を確保。 (2) ディーゼル発電機は、できるだけ高負荷で運転する。 (3) ディーゼル発電機を起動したら、一定時間以上運転を継続。
運転ルールのマップ	
運転モードの変化ルール	(1) ある運転領域から(a)、(b)、(c)のいずれかの領域に入る時、下記②の場合を除いて直前のディーゼル運転モードを継続。 (2) ②、(b)⇒(a)：D(ディーゼル)全出力でHまで充電後、D停止。 ②、(c)⇒(b)：D全出力でHまで充電後、D部分負荷運転。
【記号】	①, ②……(a)、(b)……運転領域を示す記号 X=残存蓄電量-蓄電池容量×(放電深度-上限放電深度) Y=太陽電池出力不足割合 =(太陽電池出力-負荷需要)/(ディーゼル発電機容量) L=夜間充電終了の下限残存蓄電量 M, H=残存蓄電量に関するディーゼル起動上限レベルおよび停止レベル HH=最大の実効蓄電容量=蓄電池容量×上限放電深度 Yp=ディーゼル部分負荷の下限値 S:太陽電池 D:ディーゼル発電機 B:蓄電池

細なモデル化が必要となる。

したがって、上記の方法に比較して簡便に容量を最適化する方法として燃料節約指数Mを導入した。本方法では運転特性を一年間にわたってシミュレーション計算し、太陽電池容量と蓄電池容量の種々の組合せに対する燃料節約量(=F<sub>D</sub>-F<sub>S</sub>)及び燃料節約指数Mを求める。そして、燃料節約指数Mが最大の条件から太陽電池容量と蓄電池容量の最適値を求める。

この燃料節約指数Mを下記により定義する。

$$M = (F_D - F_S) / Q_{eff} \quad (1)$$

ただし、

M: 燃料節約指数 (m<sup>3</sup>/年/kWp<sup>\*</sup>)

F<sub>D</sub>: ディーゼル単独システムの年間燃料消費量 (m<sup>3</sup>/年)

F<sub>S</sub>: ハイブリッドシステムの年間燃料消費量 (m<sup>3</sup>/年)

Q<sub>eff</sub>: 当価の太陽電池に換算した追加設備容量 (kWp<sup>\*</sup>)

であり、Q<sub>eff</sub>を次式で定義する。

$$Q_{eff} = Q_S + (C_B / C_S) \cdot Q_B \quad (2)$$

Q<sub>S</sub>: 太陽電池容量 (kWp)

Q<sub>B</sub>: 蓄電池容量 (kWh)

C<sub>S</sub>: 太陽電池及びその付随設備の単価 (¥/kWp)

C<sub>B</sub>: 蓄電池及びその付随設備の単価 (¥/kWh)

Q<sub>eff</sub>は、既存のディーゼル発電機システムに太陽光発電システムを追設したと考えた時の、当価の太陽電池に換算した追加設備容量に相当する。この追加設備容量Q<sub>eff</sub>は、太陽電池と蓄電池の容量と、それぞれの単価を設定すれば、容易に追加設備コストに換算できる。したがって、燃料節約指数Mは、追加設備容量あたり、または追加設備コスト当たりの年間燃料節約量を表わす。また、システムの寿命L(年)と燃料コストC<sub>F</sub>(¥/m<sup>3</sup>)を与えれば、次式により追加設備のブレークイーブンコストC<sub>BS</sub>(¥/kWp<sup>\*</sup>)を求めることができる。

$$C_{BS} = M \cdot L \cdot C_F \quad (3)$$

このC<sub>BS</sub>が追加設備コストより大きい時には太陽光発電を導入するメリットがあり、さらに、燃料節約指数Mが大きいくほど追加設備コストの回収年数を短くできる。したがって、本検討では、与えられた条件のもとで燃料節約指数Mを最大とすることにより、設備容量を最適化する。この燃料節約指数Mは太陽電池と蓄電池の容量に依存するとともに、次章で述べるように太陽依存率にも依存する。

### 3. 最適設備容量の検討

年間の平均負荷需要が約30kWの九州地区の離島にハイブリッドシステムを設置するとし、このシステムの最適な設備容量について検討した。

#### 3.1 システム解析条件

##### (1) 気象及び負荷需要データ

気象データとして、1983年の福岡市の水平面全天日射量、気温、風速などを用いた。図-4に代表月の水平面全天日射量を示す。また、負荷需要データとして、鹿児島県の小離島の1984年のデータ<sup>5)</sup>を用いた。図-5に季節毎の代表負荷パターンを示す。

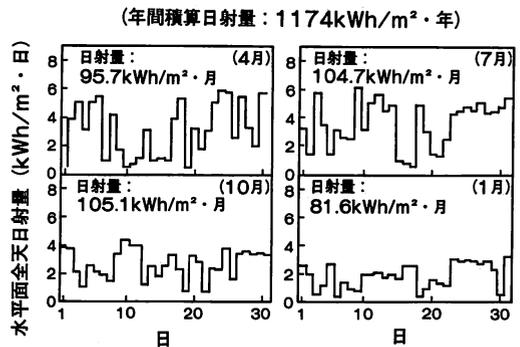


図-4 代表月の水平面全天日射量 (1983年 福岡)

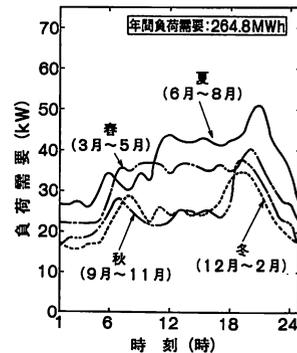


図-5 鹿児島県の小離島の代表負荷パターン (1984年)

##### (2) システム構成

システム構成として、図-1(b)のAC並列方式とした。このシステムについて下記の運用法によりシミュレーション計算して、太陽電池アレイの傾斜角度と燃料節約指数Mの関係を求めた。そして、燃料節約指数Mを最大にできる条件から、太陽電池アレイの傾斜角度を30度に設定した。

##### (3) 運用法

合Yが $Y_F$ を超えると運転領域(a)に入る。この運転領域に入るときにはすでにXがHに達しているため、ディーゼル発電機は停止し、太陽電池と蓄電池により負荷需要を賄う。その後、運転領域は①→⑤→④→(b)→(c)と移行するが、この間は太陽電池と蓄電池により負荷需要を賄う。そして、18時付近でXがMより低下すると運転領域③に入り、ディーゼル発電機は全出力運転に入る。

日射変動等により太陽電池出力が不安定な場合、例えば運転領域が短時間のうちに(a)→③→(a)→③→(a)と移行しても、表1の「運転モードの変化ルール」によりディーゼル発電機の起動、停止が繰り返されることなく、安定に運転できる。

3.2 ディーゼル発電機容量の設定

図-5に示した夏期の代表負荷パターンの負荷電力の1.1倍をシステム運用期間中の最大負荷日の負荷パターンと想定した。そして、表1の運用条件のもとで運転特性をシミュレーション計算し、一日中日照がなくても停電しない条件を満たすディーゼル発電機容量と蓄電池容量の関係性を求めた。その結果を図-7に示す。同図よりディーゼル発電機の容量を無停電領域の最低値である43kWとした。このとき、最低必要な蓄電池の容量は、133kWhである。なお、この蓄電池の容量は公称蓄電池容量であり、運転特性のシミュレーション計算では、電池保護のため放電深度0.7以下で運用するとしている。

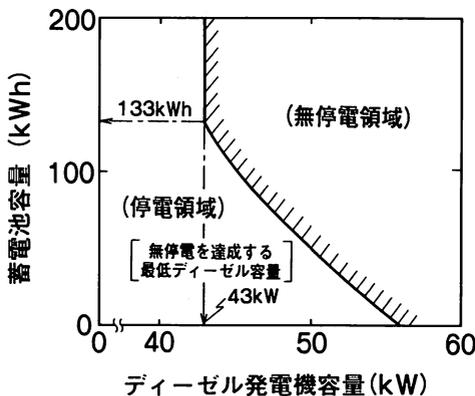


図-7 無停電条件を満たすディーゼル発電機容量と蓄電池容量の関係

3.3 太陽電池容量と蓄電池容量の検討

ディーゼル発電機容量を43kWとし、種々の太陽電池容量と蓄電池容量の組み合わせについて運転特性をシ

ミュレーション計算し、太陽依存率S及び2.2節で述べた燃料節約指数Mを求めた。

太陽電池容量と太陽依存率Sとの関係を蓄電池容量をパラメータとして図-8に示す。なお、太陽依存率Sを次式で定義した。

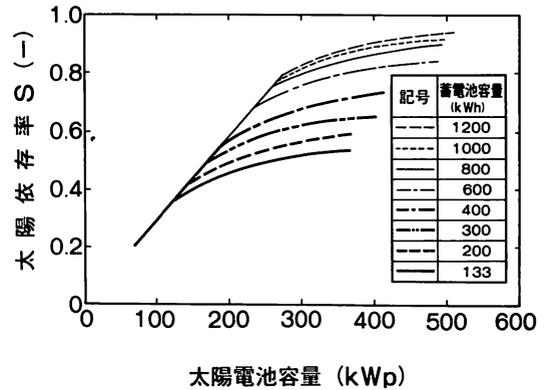


図-8 太陽依存率Sの太陽電池容量及び蓄電池容量依存性

$$S = 1 - (F_s / F_D) \tag{4}$$

同図より、蓄電池容量を一定として太陽電池容量を増加すると、太陽依存率Sはある値までは太陽電池容量に比例して増加するが、それ以上では太陽依存率Sの増加率は急激に低下している。この増加率の低下は、蓄電池容量が不足して、太陽電池が負荷需要を賄った残りの電力の一部しか蓄電できなくなることを示している。したがって、設計条件として太陽依存率Sが与えられた場合には、同図より最低必要な太陽電池容量と蓄電池容量を選定できる。しかし、選定した容量が経済的に最適か否かは同図からは不明である。最適な容量の組み合わせは、以下に述べるように燃料節約指数Mを最大にする条件から設定する。

蓄電池と太陽電池のコスト比  $C_B / C_S$  を0.1とし、太陽電池容量と蓄電池容量を変化させたときの燃料節約指数Mを図-9に示す。このコスト比  $C_B / C_S$  は、現状における蓄電池と太陽電池のコスト比にほぼ相当する。

図-9より、太陽電池容量が比較的小さい領域（太陽依存率が比較的小さい領域）では、蓄電池容量が133kWh（停電させないための最低限の蓄電池容量）、太陽電池容量が130kWpの時、燃料節約指数Mは最大値0.23をとる。この時の太陽依存率Sは、図-8より0.36である。太陽電池容量を大きくしていくと燃料節約指数Mを最大にする蓄電池容量が太陽電池容量の増加以上に増加し、燃料節約指数Mの最大値は低下する。

例えば、太陽電池容量を250kW<sub>p</sub>とすると燃料節約指数Mの最大値は0.21に低下し、蓄電池容量は400kWh、太陽依存率Sは0.63となる。これは太陽電池容量の大きい領域では、日照時の太陽電池出力が大幅に負荷需要を超過する。停電を避けるためには前節で述べたように133kWhの蓄電池容量で十分であるが、システム効率を低下させないためにはこの超過電力の大部分を蓄電する必要がある、必要な蓄電池容量が大きくなるためである。

太陽電池のコストが相対的に低下した場合を想定して、コスト比  $C_B/C_S$  を0.2としたときの燃料節約指数Mを図-10に示す。この場合には、同図に示すように燃料節約指数Mは、太陽電池容量の全領域にわたって図-9に比較して低下し、蓄電池容量が133kWh（停電させないための最低限の蓄電池容量）、太陽電池容

量が137kW<sub>p</sub>の時、燃料節約指数Mは最大値0.21をとる。これはコスト比  $C_B/C_S$  を0.2としたので、太陽電池容量と蓄電池容量が同じであっても、太陽電池に換算した追加設備容量  $Q_{eff}$  が増加するためである。そのため、太陽電池容量に比較して大容量の蓄電池を必要とする太陽電池容量の大きい領域では、図-9に比較して燃料節約指数Mの低下が大きい。しかし、蓄電池容量を一定としたときの燃料節約指数が最大となる太陽電池容量（ピーク位置）は、図-9に比較してわずかに大容量側にシフトするのみであり、ピーク位置に対するコスト比の影響は小さい。

太陽依存率は、離島への石油の供給環境に依存しており、太陽依存率を高くすることにより石油運搬回数を低減できる等の効果がある。そのため、システム設計では太陽依存率を設計条件の一つとして与えられることが多い。太陽依存率が与えられたときの最適な太陽電池容量と蓄電池容量は図-11より求めることができる。同図は与えられた太陽依存率Sを満たす太陽電池容量と蓄電池容量の関係、及び燃料節約指数を最大にする太陽電池容量と蓄電池容量の関係を示している。例えば設計条件として太陽依存率0.7が与えられ、蓄電池と太陽電池のコスト比が0.1の場合には、図-11の曲線Aと曲線Bの交点Pに対応する太陽電池容量と蓄電池容量を最も経済的な組合せとして選定できる。

以上の検討結果より、太陽依存率の比較的小さいシステムは太陽電池容量に比較して小容量の蓄電池でシステムを構成できるので、コスト比  $C_B/C_S$  の大小にかかわらず太陽依存率の大きいシステムに比較して燃料節約指数Mが大きく、経済的に有利であると考える。

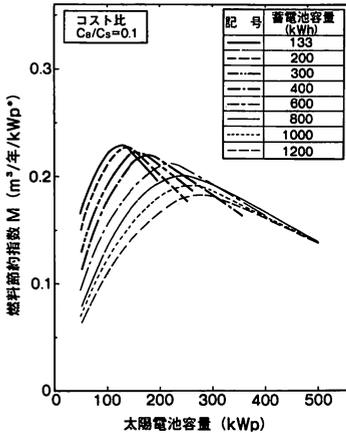


図-9 燃料節約指数Mの太陽電池容量及び蓄電池容量依存性（コスト比=0.1）

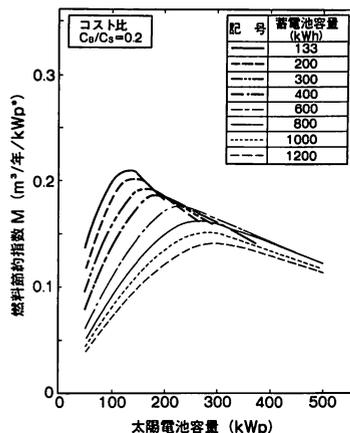


図-10 燃料節約指数Mの太陽電池容量及び蓄電池容量依存性（コスト比=0.2）

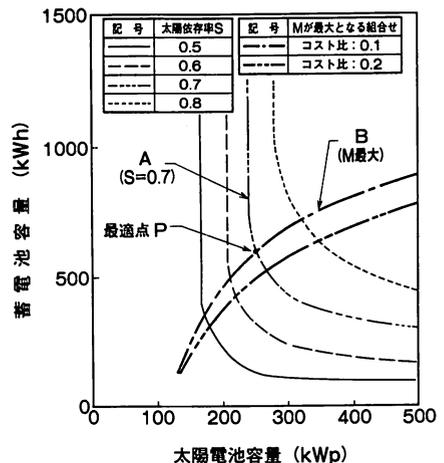


図-11 太陽依存率Sが与えられたときの最適容量選定法

太陽依存率の小さいシステムが比較的小容量の蓄電池でシステムを構成できるのは、ディーゼル発電機による夜間充電、大負荷需要時におけるディーゼル発電機と蓄電池の同時電力供給等の運用法の効果である。一方、太陽依存率の大きいシステムでは、必要な蓄電池の容量は太陽電池の出力をできるだけ有効に蓄電する条件から主として決まり、上記運用法の効果は小さくなる。

#### 4. 結 言

離島用の太陽光発電システムとしては、

(イ) 設備容量当たりの燃料節約量を多くすること  
 (ロ) 石油の消費量を少なくすること  
 が、必要である。本論文は、このうち(イ)について検討したものであり、太陽電池とディーゼル発電機を交流で結合するAC並列方式のハイブリッドシステムを対象として、太陽電池、蓄電池、及びディーゼル発電機の最適容量を検討した。

蓄電池及びディーゼル発電機の設備容量を低減するための運用法として、ディーゼル発電機による夜間充電、大負荷需要時におけるディーゼル発電機と蓄電池の同時電力供給等を採用した。また、最適容量の設定指標として燃料節約指数 $M$ （＝燃料節約量／当価の太陽電池に換算した追加設備容量）を導入した。そして、年間平均負荷需要が約30kWの九州地区の離島（鹿児島県の小離島）を対象として、前記運用条件のもとでシステムの運転特性を一年間にわたってシミュレーション計算して、太陽電池容量と蓄電池容量の種々の組合せに対する燃料節約指数 $M$ を求め、最適容量を検討した。

検討結果を要約すると、つぎようになる。

(1) 燃料節約指数 $M$ を最大にする太陽電池容量と蓄電池容量の組合せは、太陽電池容量の比較的小さい領域にあり、経済的には太陽依存率の比較的小さいシステム（太陽依存率 $\approx 40\%$ ）が有利である。  
 (2) 蓄電池と太陽電池のコスト比 $C_b/C_s$ が大きくなると、上記(1)の傾向はより大きくなる。

(3) 上記(1)と(2)は、ディーゼル発電機による夜間充電、大負荷需要時におけるディーゼル発電機と蓄電池の同時電力供給等の運用法により、必要な蓄電池容量を低減している効果である。また、この運用法により、不日照日の継続および太陽電池系の故障による停電は発生しない。しかし、ディーゼル発電機の故障は、太陽依存率の比較的小さいシステムでは直ちに停電に至る可能性があり、冗長性を持たせておく必要がある。

(4) 石油の供給環境等の条件から太陽依存率が与えられた場合にも、その条件のもとで燃料節約指数 $M$ を最大にする太陽電池容量と蓄電池容量の組合せを選択できる。

本研究の遂行にあたり、有益なご助言を頂いた九州電力総務総合研究所の小屋松勝行氏をはじめとする関係各位、ならびに離島の負荷需要などの調査に快く協力頂いた関係各位に深く感謝いたします。

#### 参 考 文 献

- 1) 掘米 孝：太陽光発電の過去、現在そして未来、光発電 No. 1 (1987), 16~23.
- 2) 熊野昌義, 他 5 名：太陽光とディーゼルを併用した離島用電力供給システム, 電気学会研究会資料, SPC-85-86 (1985), 101~110.
- 3) 熊野昌義, 他 3 名：離島用太陽光発電システムの運転研究, 電気学会研究会資料, SPC-86-75 (1986), 48~58.
- 4) T.M.Calloway : Design of Intermediate-Sized, Autonomous Photovoltaic-Diesel Power Plant, US DOE Rep., No. SAND-85-2136 (1986).
- 5) 井上久道, 小屋松勝行, 他 5 名：離島用太陽光発電システムのシミュレーション, エネルギー・資源研究会, 第 7 回研究発表会講演論文集 (1988), 45~50.
- 6) W.A.Brainard : Analysis of The Economics of Photovoltaic-Diesel-Battery Energy Systems for Remote Applications, US DOE Rep., No. CONF-830622-PT-5 (1983), 591~596.
- 7) J.M.Gordon : Optimal Sizing of Stand-Alone Photovoltaic Solar Power Systems, Solar Cells, Vol. 20, No. 4 (1987), 295~313.