ディーゼル発電系統に連系した太陽光発電の 最適容量と周波数変動の検討

正員 本間 琢也 (筑波大)

非会員 仲間 健一 (筑波大)

正員 大澤 靖治 (筑波大)

1. ま え が き

現在、我が国の離島の多くは、ディーゼル発電を用いた電力系統によって電力供給されているが、燃料、保守などのコストが高いために発電コストが高く、電源の増設や更新を契機として、太陽光発電が最も早く実用的に導入される分野の一つと考えられている。沖縄県の離島においては、電力貯蔵システムとして蓄電池を有する一応独立した電源として太陽光発電システムを構成し、日照不足時にディーゼル発電でバックアップする方式で試験が行われている⁽¹⁾⁽²⁾。しかし、太陽電池のコストが近年の技術開発によって低下しつつあるのに対して、蓄電池のコストは大幅に低下する見とおしがなく、太陽光発電システム全体に占める蓄電池のコストの割合が相対的に大きくなる傾向にある⁽³⁾。この相対的コストの変化が蓄電池の設備容量にも影響を及ぼすと考えられる。

本論文は電力貯蔵設備を省略した太陽光発電システムをディーゼル発電系統に連系したときの運転特性を明らかにする目的で、太陽光発電の設備容量と動作との関係、ならびに系統周波数変動特性について検討したものである。まず、太陽光発電システムのモデル化の手順と運用方式について略述し、日射データおよび実際のディーゼル発電系統の特性を用いた年間シミュレーションによって、ディーゼル発電容量に対する太陽光発電の比率と燃料節減率の関係などを求める。ま

た、太陽エネルギーの有効利用の点から、太陽光発電の最適容量について検討する。蓄電池の省略により太陽光発電システムは、発電時常にディーゼル発電系統に並列されることになるため、日射変動に起因する出力変動が周波数変動を引き起こす恐れがある。この問題に関しても、単純な例題系統によって検討する。

2. 太陽光発電システムのモデル化と運転方式

年間シミュレーションによってディーゼル発電系統における太陽光発電システムの有効性、最適容量を検討するために、太陽光発電システムのモデル化と運用方式の決定を行う必要がある。本章では、これらについて簡単に記述する。

〈2.1〉 太陽電池アレイ 対象とする太陽光発電システムの構成図を図1に示す。太陽電池の I - V 特性は、周知のように次式で表すことができる。

$$I = I_p - I_0 \left[\exp \left\{ \frac{q}{nkT} (V + R_s I) \right\} - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (1)$$

ただし、 I_p : 光電流 (A), I_0 : ダイオード飽和電流 (A), n : 材料によって決まる定数, k : ボルツマン定数 ($=1.38 \times 10^{-23}$ J/K), T : 絶対温度 (K), q : 電子1個の電荷 ($=1.6 \times$

Studies on Optimum Capacity and Frequency Deviation of Photovoltaic Generation Interconnected to Diesel Generation Power System. By Takuya Homma, Member, Ken-ichi Nakama, Non-member & Yasuharu Ohsawa, Member (Institute of Engineering Mechanics, University of Tsukuba).

本間琢也: 正員, 筑波大学構造工学系

仲間健一: 非会員, 筑波大学理工学研究所 [現在, (株)日本板硝子 筑波研究所]

大澤靖治: 正員, 筑波大学構造工学系

図1 太陽光発電システムの構成図

Fig. 1. Block diagram of photovoltaic generation system.

表 1 太陽電池の定数
Table 1. Constants of solar cell.

$\kappa (=q/nkT)$	0.3982
I_0	$1.966 \text{ E}-6$
R_s	0.7Ω
R_{sh}	$1,750 \Omega$
$I_p (1 \text{ kW/m}^2)$	5.35 A
β	$3.956 \text{ E}-3$

10^{-19} C), R_s : 電極などの直列抵抗 (Ω), R_{sh} :

PN 接合欠陥などによる分路抵抗 (Ω)

また素子温度の変化によるパラメータの変化は、短絡電流 I_{sc} が実用的な使用温度範囲内ではほとんど変化しないので、付録(1)に示すような温度補正式で特性曲線を補正できるものとする。

小規模な実験システムに用いた太陽電池アレイ (素子温度 28°C , 日射量 1 kW/m^2 の標準状態で開放電圧 $V_{oc}=20.2 \text{ V}$, 短絡電流 $I_{sc}=2.70 \text{ A}$, 最大電力 $P_m=40 \text{ W}$ の太陽電池モジュールを直列に 2 枚, 並列に 2 枚接続した 4 枚からなるアレイ) の諸定数を求めると表 1 のようになった。ただし, q/nkT を κ とおいた。太陽電池は容量によって特性が変化しないので, 第 4 章のシミュレーションにおいては表 1 の特性を用いる。また, 太陽光発電の容量 S_c はディーゼル発電の定格容量を基準にした次式の単位法で表すことにする。

$$S_c = \frac{\text{標準状態での太陽電池アレイの最大出力}}{\text{ディーゼル発電機の定格容量}} \quad (2)$$

〈2・2〉 直交変換装置と運転方式 DC フィルタを含めたインバータの特性は、付録(2)に示す等価回路によって近似することができる⁽⁴⁾。太陽電池の出力を有効に利用するために、太陽電池アレイの最大出力 P_m や太陽光発電システム全体の最大出力 P_{sm} を追尾する制御 (それぞれ P_{max} 追尾制御および P_{sm} 追尾制御と呼ぶことにする) が行われる。簡単なシステムにおいては、このような制御を行わず一定のインバータ電圧で運転されることもある。最適な一定運転電圧は、設置点の年間気象データを用いたシミュレーションを行うことによって決定できる。しかし、より簡便な方法として、日射量および気温の範囲を設定し、その範囲内で P_{sm} 追尾制御に対して出力低下が最も小さくなるように、インバータ電圧 V_d を決定することができる⁽⁴⁾。

直交変換装置は大容量になるほど効率が向上するので、直交変換装置のシミュレーションモデルとしては、最も効率の低いモデルとして、④実験システムのインバータに電圧一定制御を行った場合、また最も効

図 2 ディーゼル発電機の燃料消費率特性

Fig. 2. Fuel consumption rate of diesel generator.

率の高いモデルとして、⑧効率が 100% の理想インバータを仮定し、これに P_{sm} 追尾制御を適用した場合、の二種のモデルを考える。⑧のモデルはシステム効率 100% であり、太陽光発電システムの限界性能を与える。

3. ディーゼル発電系統の特性

〈3・1〉 ディーゼル発電機 ディーゼル発電機は、離島で現実使用されている 2 機の発電機の燃料消費率の測定データを用いて特性をモデル化する。2 機の発電機 (定格 50 kW と 100 kW) の負荷率に対する燃料消費率特性を図 2 に示す。同図から、燃料消費率 $V_c (l/h)$ は、火力発電機の場合と同様に⁽⁵⁾ 負荷率の二次関数で近似できることが予想される。最小二乗近似の結果、図示のように次式で十分正確に近似できることがわかる。

$$V_c/P_{LN} = 0.112 + 0.127 F_R + 0.104 F_R^2 \quad (3)$$

ただし, P_{LN} : ディーゼル発電機の定格容量 (kW), F_R : 負荷率

また、第 5 章で示すように、ディーゼル発電機の負荷変動に対する追従性は比較的優れており、全負荷しゃ断などの急激な変動に対して数秒で追従できる。従って、日射変動による太陽電池の出力変動に対しても十分に追従できると考えられるので、本節でのディーゼル発電機のモデルは過渡特性は問題ないものとし、燃料消費率は(3)式で表されるものとする。

〈3・2〉 負荷パターンと気象データ 負荷パターンについては、九州の離島における実例を用いた。このデータは月別、時間ごとの平均値として与えられて

おり、年負荷率 62% である。一般の日負荷曲線と比較すると日中に比べて夜間の負荷が大きくなっており、貯蔵設備なしの太陽光発電にとっては不利な負荷パターンとなっている。気象データには、離島の条件に近いものとして高知の一年間の日射量と気温の値を用いた。また、システム全体の運用については、昼間、太陽光発電システムの出力が負荷を上回ったとき余剰電力を生じるが、これは遅れ制御角 α を調整することにより吸収し、負荷との整合を図る。太陽光発電の出力が不足しているときおよび夜間は、ディーゼル発電から供給するものとしてシミュレーションを行う。

4. 連系システムのシミュレーション結果

モデル④（実験システム）およびモデル⑤（理想システム）を用いたシミュレーションの結果をそれぞれ図 3、図 4 に示す。ディーゼル発電機と太陽光発電の全発電電力量を E_G 、負荷電力量を E_L 、ディーゼル発

電機の発電電力量を E_{DG} 、太陽光発電システムの発電電力量を E_{SC} 、余剰電力量を E_{SUR} とすれば E_{SC} 、 E_{SUR} は次式で表される。

$$\left. \begin{aligned} E_{SC} &= E_G - E_{DG} \\ E_{SUR} &= E_G - E_L \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

太陽光発電の容量 S_c の増大に伴い、 E_{SC} が増加するために E_{DG} は減少する。しかし、ある限度以上に S_c を増加しても、 E_{SC} の増加量の大部分が E_{SUR} となり、 E_{DG} はほとんど減少しなくなる。 E_{DG} の収束値はインバータの効率および運転方式に依存することがわかる。

太陽光発電を補助的に使用する場合には、 $E_{SUR}=0$ 、つまり全発電量が負荷に等しい範囲内で S_c を設定すればよい。モデル④では $S_c < 1.1$ 、モデル⑤では $S_c < 0.8$ である。太陽光発電システムのより積極的な利用を検討するために、次式のような評価指標を導入する。

図 3 シミュレーション結果 (モデル④)
Fig. 3. Results of simulation by model ④.

図 4 シミュレーション結果 (モデル⑤)
Fig. 4. Results of simulation by model ⑤.

図5 月別発電特性 ($Sc=2.7$, モデルA)
Fig. 5. Variation of monthly output by model A ($Sc=2.7$).

太陽光有効発電率 (η_{sc})

$$= (E_{sc} - E_{sur}) / E_G$$

$$= (E_{sc} - E_{sur}) / (E_{sc} + E_{DG}) \dots\dots\dots (5)$$

η_{sc} は太陽光発電システムから実際に負荷に供給された電力の全発電電力量 (余剰分 E_{sur} も含む) に対する比を表す。モデルAの場合、 $Sc=2.7$ で η_{sc} は最大となり、このときディーゼル発電機の発電電力の減少量 (定格で規格化) ΔE_{DG} は 1,224 h であり、減少率は 22.4% である。モデルBではインバータの効率が高いため、 $Sc=1.7$ で η_{sc} が最大となり、このとき $\Delta E_{DG}=1,707$ h, 減少率は 31.2% である。ディーゼル発電機の燃料消費量 V_{DG} は、図3(b)、図4(b)からわかるように、無負荷運転時においても燃料を消費するため、電力量の減少と比較して節減できる割合は小さくなり、モデルAの場合、 $Sc=2.7$ で燃料節減量 ΔV_{DG} は年間で 250.8 l/kW, 節減率は 12.2%, モデルBでは、 $Sc=1.7$ のとき $\Delta V_{DG}=356.5$ l/kW, 節減率 17.2% である。

モデルAで $Sc=2.7$ の場合の月別発電特性を図5に示す。同図からわかるように、冬期に余剰電力が増加している。これは冬期の昼間負荷が小さいことと、気温が低いために太陽電池の変換効率が高くなるために太陽光発電の出力が増加することによる。6月は梅雨のために日射量が少なく、余剰電力はほとんど出ない。

5. 周波数変動の検討

太陽光発電のような変動性の電源が、ある比率以上電力システムに連系されると周波数変動、電圧変動などが問題となる可能性がある。これらのうち、本章では前章で分析したような電力貯蔵設備をもたない太陽光発電システムが、ディーゼル発電システムに連系された場合について、雲の移動による日射変動時の太陽光発電の出力変化が系統周波数に及ぼす影響を単純なモデルシステムを用いて検討する。

〈5.1〉 系統のモデル化 図6に示すような集中負荷に、送電線を介して電力を供給している 150 kW 定格のディーゼル発電システムを考える。発電機は過渡リアクタンスに直列接続された一定電圧モデルで表現する。発電機定数は表2に示す。調速機の特性は実際のディーゼル発電機の負荷遮断試験時の周波数変動より伝達関数の形と定数の値を求めた。

$$\Delta P_m = \frac{-K_g(1+s)}{(1+T_a s)(1+T_g s)} \Delta \omega \dots\dots\dots (6)$$

ただし、 ΔP_m : 発電機への機械入力の変化、
 $\Delta \omega$: 発電機の回転子角速度の変化 (周波数の変化)、 $K_g=41.7$, $T_a=8.3$ s, $T_g=0.025$ s

このとき、系統の方程式は線形微分方程式となり

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\omega} \\ \Delta \dot{P}_m \\ \Delta \dot{P}_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D/M & & \\ 0 & * & \\ -(1-D/M)K_g/(T_a T_g) & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \omega \\ \Delta P_m \\ \Delta P_a \end{bmatrix}$$

$$* = \begin{bmatrix} 1/M & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\times \begin{bmatrix} \Delta \omega \\ \Delta P_m \\ \Delta P_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/M & 0 \\ 0 & -K_g/(M T_a T_g) \end{bmatrix} \Delta P_{sc} \dots\dots\dots (7)$$

図6 系統モデル

Fig. 6. Model power system.

表2 発電機の定数

Table 2. Constants of generator.

慣性定数	$M=5$ s
制動係数	$D=0$ pu
過渡リアクタンス	$x_d'=0.3$ pu

図 7 太陽電池出力変化

Fig. 7. Time variation of photovoltaic output.

で与えられる(導出は付録(3)参照)。

太陽光発電については太陽電池パネルの所要面積を $20 \text{ m}^2/\text{kW}$ とし、 25 m 四方の用地に設置していると仮定する。雲の通過によって太陽電池の出力が直線的に減少または増加するものとし、雲の速度を $5 \sim \infty \text{ m/s}$ とすると、日射が減少し始めてから太陽電池が完全に雲に覆われるまでの時間 T_s は $5 \sim 0 \text{ s}$ となる。時間 T の原点を日射減少開始時ととり、日射が再び増加する時間を T_m として、図 7 のように太陽光発電出力の変動をモデル化し

ケース 1 雲の面積が十分大きく、一度影になると当分晴れない ($T_m \rightarrow \infty$)

ケース 2 雲の進行方向の幅が太陽電池アレイの幅 (25 m) に等しい ($T_s = T_m$)

ケース 3 雲の幅が太陽電池アレイの幅より小さいか、ある程度大きい ($T_s \neq T_m < \infty$)

の三つの場合について計算を行った。

〈5.2〉 計算結果と考察 ケース 1 の結果を T_s をパラメータとして図 8 に示す。 T_s が小さく、出力変化速度が大きいほど周波数の低下も大きく、出力変動が終了してから一定周波数に安定するまでの時間も長くなることからわかる。定常偏差はゲイン K_s を大きくすることによって減らすことができるが、実際の

図 8 ケース 1 の周波数変動

Fig. 8. Frequency change in case 1.

図 9 ケース 2 の周波数変動

Fig. 9. Frequency change in case 2.

図 10 ケース 3 の周波数変動 ($T_s = 1 \text{ s}$)

Fig. 10. Frequency change in case 3 ($T_s = 1 \text{ s}$).

図 11 ケース 3 の周波数変動 ($T_s = 3 \text{ s}$)

Fig. 11. Frequency change in case 3 ($T_s = 3 \text{ s}$).

調速機ではこの程度の定常偏差が生じる。

ケース 2 の結果を $T_s (= T_m)$ をパラメータとして示すと図 9 のようになる。 $T_s = T_m$ であるので、出力が 0 となると同時に増加し始めるため、周波数低下はケース 1 よりも小さくなる。

$T_s = 1 \text{ s}$ および $T_s = 3 \text{ s}$ としたときのケース 3 の結果を図 10、図 11 にそれぞれ示す。 T_m が大きくなる

ほど、出力減少による周波数低下と出力増加による周波数上昇の間の関連が小さくなり、 $T_m=4s$ のときに最も周波数上昇が大きくなる。この系の固有値を計算すると固有振動数が 0.13 Hz (周期 7.7 s) であるので、 T_m が固有周期の半分のときに共振条件に近くなり、周波数変動の幅が最大になると言える。

以上、いずれのケースについても、太陽光発電がディーゼル発電の 20% の容量のときには、周波数変動は最大 1 Hz 程度であることがわかる。周波数計算の(7)式は線形であるので、 100% 太陽光発電から供給されている場合でも 5 Hz 程度の周波数変動で収まるということであり、これはディーゼル発電にとって許容範囲内である。

6. あとがき

文献(1)、(2)の試験設備は年平均 103 kWh/日 の負荷に対して、出力 50 kWp の太陽電池アレイと貯蔵容量 300 kWh の蓄電池を使用するものである。この設備の設計の詳細は明らかではないが、太陽電池のコストが下がれば当然設計も異なったもの、つまり貯蔵容量のより小さいシステムになると考えられる。本論文では蓄電池なしの場合の太陽光発電の容量とディーゼル発電電力および燃料消費の節約量の関係について分析した。現実には、ディーゼル発電の燃料費、太陽電池のコスト、蓄電池のコストと寿命などを考慮した最適なシステム設計が必要であると思われる。

また、日射変動に伴う太陽光発電の出力変化が系統周波数に及ぼす影響について計算した結果、日射の変化が系統の固有振動数に近い周波数の周期的なものでない限り、問題ないことがわかった。電圧変動については今回検討を行わなかったが、これについても分析する必要がある。

最後に、資料を提供していただいた電子技術総合研究所および九州電力(株)の関係各位に感謝の意を表します。実験および数値計算に協力していただいた大学院生(当時)阿部精順、近藤 敬の両氏に感謝します。(昭和62年6月18日受付、同62年9月30日再受付)

文 献

- (1) 熊野, 他:「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」, 電気学会半導体電力変換研究, SPC-85-86 (昭60-11)
- (2) 熊野・浅岡・湯川・山本:「離島用太陽光発電システムの運転研究」, 同上, SPC-86-75 (昭61-9)
- (3) 武田:「太陽光発電システムにおける蓄電池の役割」, 太陽エネルギー, 10, 15 (昭59-6)
- (4) 仲間, 他:「ディーゼル発電と併用した太陽光発電システムの検討」, 電気学会電力技術研究, PE-86-158 (昭61-8)
- (5) 関根:電力系統工学, p. 101 (昭41-5) 電気書院

付 録

(1) 太陽電池の I - V 特性式の温度補正

$$\left. \begin{aligned} I_{\text{NEW}} &= I_{\text{REF}} \\ V_{\text{NEW}} &= V_{\text{REF}} \{1 + \beta(T_{\text{REF}} - T_{\text{NEW}})\} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (\text{付 } 1)$$

ただし、 T_{REF} : 基準素子温度 (K), T_{NEW} : 実際の素子温度 (K), $I_{\text{REF}}, I_{\text{NEW}}$: 素子温度がそれぞれ $T_{\text{REF}}, T_{\text{NEW}}$ のときの電流 (A), $V_{\text{REF}}, V_{\text{NEW}}$: 素子温度がそれぞれ $T_{\text{REF}}, T_{\text{NEW}}$ のときの電圧 (V), β : 補正係数

(2) インバータの等価回路表現 インバータは内部にブロッキングダイオードやサイリスタなどの非線形素子を含むが、これらを線形近似すると太陽電池アレイに対するインバータの直流側等価回路は付図1に示すように、インバータ直流側電圧の直流成分 V_d 、電圧降下 V_i 、内部抵抗 R_i によって表現できる。実験システムのインバータの I - V 特性の測定結果から決定したパラメータの値は $R_i=0.81\Omega$, $V_i=2.40\text{ V}$ であった。また、インバータの損失を R_i, V_i による損失と直交変換による転流損失とに分離して考え、後者を遅れ制御角 α の値によらず一定(実験システムでは 11.2 W)としてインバータの効率を計算すると付図2のようになる。 α の最大値(約 168°)において最大効率 73% が得られる。

付図1 試作インバータの直流側等価回路
app. Fig. 1. Equivalent circuit of DC side of experimental inverter.

付図2 インバータの効率
app. Fig. 2. Efficiency of inverter.

(3) 系統方程式(7)の導出 発電機回転子の回転の方程式は発電機への機械入力を P_m , 太陽光発電の出力を P_{sc} , 負荷の電力を P_L とすると

$$M \cdot d\Delta\omega/dt + D\Delta\omega = P_m + P_{sc} - P_L \quad \dots\dots\dots (付2)$$

変分をとり, d/dt を s で表すと

$$s\Delta\omega = -(D/M)\Delta\omega + \Delta P_m/M + \Delta P_{sc}/M \quad \dots\dots\dots (付3)$$

また, 调速機の伝達関数式(6)より

$$\begin{aligned} \Delta P_m + (T_a + T_g)s\Delta P_m + T_a T_g s^2 \Delta P_m \\ = -K_g(1+s)\Delta\omega \quad \dots\dots\dots (付4) \end{aligned}$$

$s\Delta P_m$ を ΔP_a において(付3)式を代入すると

$$\begin{aligned} s\Delta P_a = & -\left(1 - \frac{D}{M}\right) \frac{K_g}{T_a T_g} \Delta\omega \\ & - \left(\frac{K_g}{M} + 1\right) \frac{1}{T_a T_g} \Delta P_m \\ & - \left(\frac{1}{T_a} + \frac{1}{T_g}\right) \Delta P_a - \frac{K_g}{M} \frac{1}{T_a T_g} \Delta P_{sc} \quad \dots\dots\dots (付5) \end{aligned}$$

(付3), (付4)式および $s\Delta P_m = \Delta P_a$ より, (7)式となる。