自然環境エネルギー発電システムに関する研究

正員 逸見 次郎 (横浜国大)

正員 岩 堀 道 雄 (横浜国大)

准員 山 形 裕 (横浜国大)

正員 池 田 吉 堯 (横浜国大)

1. ま え が き

エネルギー危機が叫ばれて以来、将来のエネルギーセキュリティに備え、太陽エネルギー利用技術の開発が世界的規模で着々と進められてきた。特に我が国のようにエネルギー基盤が不安定で脆弱性をもつ場合には、密度は稀薄であるが供給量が膨大で、かつ非枯渇性でクリーンであり、地域偏在性の少ない資源であることから、自然環境エネルギーに大きな関心が寄せられている。中でも太陽光発電、風力発電においては、期待が大きく実用化に向けて着実に進展してきた⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾。

これまでに行われてきたこの種のエネルギー変換方法には、

- (1) 基準太陽電池により、最大出力点を計測し、太陽電池アレイ出力の最大出力動作点を制御する方法⁽⁵⁾⁽⁶⁾。
- (2) アレイ出力特性上の動作点を計測し、コンピュータによりメモリ上のデータと比較しながら最大出力動作点を追跡し、最適な方向へ制御する方法⁽⁷⁾。
- (3) アレイの最大出力点電圧特性が日照量によってあまり変化しないことから、蓄電池電圧によりアレイ電圧を安定化して出力動作点を制御する方法。
- (4) アレイ出力電圧、電流を直接測定して常に最

大出力動作点を追跡するように、インバータに制御をかける方法⁽⁸⁾⁻⁽¹⁰⁾。

などが提案されている。

しかし、これらの制御方法にも一長一短があり、(1)項では基準太陽電池とアレイ特性が必ずしも一致せず、素子によるばらつきの影響があり、(2)項は制御回路が複雑化することで、コスト、応答性に問題が残されており、(3)項では蓄電池の充放電による変動でアレイ出力の有効利用が難しく、またメンテナンスが必要となる。(4)項の方法が簡単に実現可能ならば、家庭用システムに最適であるが、アレイ出力を有効に取出すにあたって、日照量や素子温度に対応した制御を行う場合、制御回路が複雑化する。

著者らは、これらの制御方式を独立電源システムと連系システムの場合について検討した。これに先立って、まず太陽電池出力と負荷とのインタフェースにはオン、オフ制御の変換装置が必要であり、電圧、電流に脈動を伴うことから、この種の使用に対する基礎的問題として、太陽電池をある程度の高周波脈動を許容して使用する場合の動特性を調査した。この結果、太陽電池の接合容量や実際の設置方法から推定されるリード線のインダクタンスなどの影響で実用上留意すべき現象が起こり得る事実を見いだしたので、第2章に述べる⁽¹¹⁾。第3章では太陽光・風力併用システムの変換制御方式を提案し、本システムが従来のコンピュータ制御に比べて応答性が速く、制御回路が簡略化され、独立電源システムに適合している事実について述べる⁽¹²⁾⁽¹³⁾。第4章では、家庭用システムに適した系統連系用多パルス PWM インバータの制御法について述べる⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾。

2. 太陽電池の動特性

太陽電池用変換装置のオン、オフ制御に伴う電圧、

Considerations on the Electric Generation System using Natural Ambient Energy. By Jiro Itsumi, Member, Michio Iwahori, Member, Hiroshi Yamagata, Associate & Yoshitaka Ikeda, Member (Faculty of Engineering, Yokohama National University).

逸見次郎：正員，横浜国立大学工学部電子情報工学科

岩堀道雄：正員，横浜国立大学工学部電子情報工学科〔現在，(株)富士電機総合研究所〕

山形 裕：准員，横浜国立大学工学部電子情報工学科〔現在，トヨタ自動車(株)〕

池田吉堯：正員，横浜国立大学工学部電子情報工学科

図 1 測定回路

Fig. 1. Measurement circuit.

電流の脈動を与える手法として、ここでは図1のチョップ回路を用いた。太陽電池の最大電力点付近において適当な電圧変動を強制した場合の太陽電池出力電圧-電流特性を測定し、この種の使用に対する基礎的問題点を検討した。

使用した太陽電池は表1に示す仕様であり、また太陽電池特性は素子温度にも影響されることから、太陽電池の裏面温度を測定値とした。

図2は表1の試料 No. 1 を用いて、太陽電池アレイからのリード線を極力短くしてリード線のインダクタンス L_a を極力小さくし、かつ往復2本の線をより線にして、20~160 kHz のほぼ正弦波状の電圧変動を与えたときの特性例であり、図3はアレイの実際

表 1 アレイの種類

Table 1. Samples of the arrays.

	開放電圧 V_{oc} (V)	短絡電流 I_{sc} (A)	最大出力 P_{max} (W)	変換効率 η (%)
No. 1	20	0.28	4.2	11.9
No. 2	5.6	1.0	3.6	9.0
No. 3	5	1.0	4.0	14.0

図 2 リード線のインダクタンスを極力小さくした場合

Fig. 2. Case of the array with the negligible lead inductance.

置方法から推定されるリード線のインダクタンス L_a をアレイ出力端に挿入し、試料 No. 1 を用いて行った結果である。いずれも静特性上に重ねて表示している。スイッチング周波数が 20 kHz 程度になると図2 (a)のように静特性と動特性に差異が現れ始め、(c)図のように 50 kHz 程度になると、その差異が顕著になってくる。この現象は表1における試料 No. 2, No. 3 に対しても同様に観測された。

この場合、動特性ループは右回りであることから、図4の等価回路中の接合容量 C_j の充放電電流が静特性に重ねられたものと考えることができる。静特性上

図 3 リード線のインダクタンス L_a を含めた場合

Fig. 3. Case of the array with some lead inductance.

I_0 : 入射光による発生電流
 I_1 : p-n 接合のバイアス電流
 R_1 : 半導体自身の内部抵抗や接触抵抗による直列抵抗
 R_2 : 半導体の漏れ電流に起因する並列抵抗
 C_j : 接合容量を合成したキャパシタンス

図 4 太陽電池の等価回路

Fig. 4. Equivalent circuit of a solar cell.

を移動したときの太陽電池出力と動特性で動作したときの太陽電池出力とは、1サイクル平均を考えれば、変動幅が大きくない限りあまり変らない。図3でリード線のインダクタンス L_a が無視できなくなる場合、太陽電池アレイの接合容量 C_j と L_a との共振による振動をスイッチングごとに生じ、動特性は静特性からかなり離れ乱れたものになっている。電流振動の周波数より、試料 No. 1 における太陽電池アレイの等価接合容量 C_j は $0.01 \mu\text{F}$ 程度と考えられる。

C_j は太陽電池の製造方法や直並列個数に、 L_a はリード線の長さや種類などに影響されるが、条件によっては誘導障害の原因になり得るし、また瞬時電圧、電流が異常に大きくなることもあるので、保護回路や制御回路の設計などにおいては留意する必要がある。また逆流防止用ダイオードがあっても、順バイアス通電状態となるから現象に変化はない。

3. 太陽光・風力発電併用システム

太陽光・風力発電併用システムの主回路構成を図5に示す。最大電力点検索は太陽光・風力発電とも同じ手法を用いるので、ここではまず図6を用いて太陽光発電だけについて述べ、次に全体のシステム構成に触れる。

前章の動特性結果より、不測の振動抑制法として、太陽電池アレイ出力端にコンデンサ C_1 を挿入し脈動を軽減した。動作周波数が高い場合には、 C_1 は特に経済的負担とならない。

〈3.1〉 最大電力点検索法 蓄電池の充放電モード変化が急激かつひんばんでない限り、本制御回路時定数内で蓄電池端子電圧 E_B は実質的に一定と仮定できる。また本質的に必要な仮定ではないが、チョップ損失も無視できるものと仮定して基本的な考え方を述べる。

アレイの出力電力を $P_1 (=V_1 I_1)$ 、チョップの出力電力を $P_2 (=V_2 I_2)$ とすると次式が成り立つ。

$$P_1 = V_1 I_1 = V_2 I_2 = P_2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

図5 ハイブリッドシステムの回路構成

Fig. 5. Circuit configuration of the hybrid system.

ここで、 V_2 は蓄電池端子電圧 E_B に等しいから、 $P_1 = E_B I_2$ となり、アレイ出力最大条件は昇圧チョップ出力電流 I_2 (平均値) が最大時である。一方、太陽電池動作点電圧 V_1 とチョップ出力電圧 $V_2 (=E_B)$ ならびに通流率 D との間には

$$V_1 = (1-D)V_2 = (1-D)E_B \quad \dots\dots\dots (2)$$

の関係があり、 D の制御によって太陽電池動作点電圧 V_1 が変り、従って I_2 が最大となるように D を制御すればよいことになる。

図7にその流れ図を示す。これは現在の I_2 と Δt 秒前の I_2 とを比較し、 I_2 が増加する方向に D を Δt 秒ごとにステップ状に変化させる手法である。動作点は一点に収束せず、常に I_2 の最大点を中心に動いているが、電池の充放電モード変化による電圧変動はもとより、日照量、温度変化にも対応できる制御であり、動作点決定のためのデータが I_2 のみで済むことから、制御回路が簡単になり、検索時間も短くなる。以上の制御法は蓄電池を共有することにより、複数の

図6 主回路構成

Fig. 6. Main circuit configuration.

図7 流れ図

Fig. 7. Flow chart.

自然エネルギー発電制御システムに拡張できる。

その一例が、図5で示した太陽光と風力発電を併用したハイブリッドシステムの回路構成である。太陽電池アレイ出力も風力発電出力もチョッパによって最大出力に制御され、共通の蓄電池を浮動充電すると共に直流負荷に電力が供給される。

ハイブリッドシステムを利用する場合、通常は並列のチョッパを別々に制御する必要があるが、本システムではマルチプレクサを用いて、タイムシェアリングを行うことによって、1台のマイクロコンピュータで制御を行っている。現在、電流検出を24msごとに行っているが、実際のプログラム実行に要する時間は4ms程度であり、現状のシステムでは6台のチョッパまで同じ遅れ時間で制御が可能である。

〈3.2〉各シミュレータ特性と動作特性 太陽光発電用シミュレータとしては、あらかじめ太陽電池特性をROMに書込んでおき、定電圧源と降圧チョッパで構成される主回路の出力が、ROMのデータと一致するようにフィードバックをかけたものである。日照量をパラメータとした P - V 特性を図8(a)に示す。日照量が急激に変化した場合の(特性を $S4$ から $S0$ にステップ状に変化させたとき)応答時間は約3msであるが、動特性では25Hz付近からループが現れるので、太陽電池出力端に比較的大きなコンデンサを挿入した場合のシミュレータと考えることができる。

次に風力発電について考える。単位面積を横切る風の持つ運動エネルギーは風速の3乗に比例する。また、風車はその回転数と風速の比(周速比)がある一定のところで最大の効率となる⁽¹⁶⁾。この条件を満たすために、風車で駆動する一定励磁の同期発電機出力を整流した直流出力を想定してシミュレータを製作した。風速に対応した入力電圧 V_{in} に対して、出力電圧を V_w とした場合、出力電流 I_w が次式の関係を満たすように主回路にフィードバック制御をかけたものである。

$$I_w = k_w V_{in}(V_{in} - V_w) \quad (k_w: \text{定数}) \dots (3)$$

このとき、最大出力電力 P_{max} は、 $V_w = V_{in}/2$ で発生し、 $P_{max} = k_w V_{in}^3/4$ となる。これより風車回転数と発電機出力電圧を対応させることで、風速の変化がシミュレートできるものとした。図8(b)は風速をパラメータとした P - V 特性である。実際の風車では慣性があるため、回転数の変動は緩やかであるが、風速が急激に変化した場合の(特性を $W2$ から $W0$ にステップ状に変化させたとき)応答時間は約2msであり、慣性が非常に少ない場合に対応している。

ハイブリッドシステムとして、特性の大きく異なる

(a) 太陽電池シミュレータ特性と特性上の動作点

(b) 風力発電シミュレータ特性と特性上の動作点

図8 各シミュレータの定常特性

Fig. 8. Steady-state characteristics of the simulators.

両シミュレータを個々のチョッパを用いて各種条件で運転し、定常的に各シミュレータとも常に図8(a)、(b)の最大出力動作点(P_{max})で運転されることが確認された。

いま、併用システムが図8(a)の太陽電池シミュレータ特性および(b)図の風力発電シミュレータ特性の図中に示す特性点 $S4$ 、 $W3$ で運転中に、太陽電池シミュレータのみ $S4$ から $S0$ にステップ状に変化させたときの太陽電池シミュレータ出力電圧 V_s 、電流 I_s の波形例を図9(a)に示す。 $S4$ の P_{max} 点から $S0$ の P_{max} 点に移行するのに約0.2秒を要している。(b)図は両シミュレータをそれぞれ特性点 $S3$ 、 $W2$ の P_{max} 点で運転中に、風力発電シミュレータのみを $W0$ の特性点までステップ状に上昇させたときの各

図 9 Transient state waveforms for the change of input condition.

図 10 Output waveforms for the change of input condition.

動作点の電圧波形例 (V_s : 太陽電池, V_w : 風力発電)を示したものである。 $W2$ P_{max} 点への移行に 0.2 秒要しているが、太陽電池シミュレータの動作点は全く影響を受けず安定に動作していることが見られる。更に図 10 では、両シミュレータを特性点 $S4$, $W3$ で運転中に、各シミュレータをそれぞれ 0.6 秒の間隔で $S0$, $W1$ に変化させたときのチョップ出力電圧 E_s と、出力電流 I_{out} の波形例を示したものである。図中 I の期間における両者のチョップ出力は約 20.9 W、入力 23 W であった。また、II の期間では出力 35.1 W に対して入力は 39 W、III の期間では両者の出力の合計が 47.3 W に対して、入力の合計は 53 W と計算され、チョップ効率 90% に対して、各シミュレータとも最大出力動作点で運転していることがわかる。

負荷変動特性では、各シミュレータ特性を $S3$, $W3$ として運転中に、負荷電流 I_L を 0A から 5A に切替えたときの各部波形例を図 11 に示す。負荷電流の急変によって蓄電池電圧が変動し、各シミュレータの動作点が P_{max} より一時的にはずれているが、約 0.3 秒程度で P_{max} 点に復帰している。

4. 太陽光発電用小規模分散形連系変換装置

前章に述べたシステムは直流負荷にも独立電源シス

図 11 負荷変動特性
Fig. 11. Characteristic for load variation.

テムにも極めて適合する。しかし、我が国のような系統網の発達した環境の下では、系統との連系可能な家庭用システムが有効であり、変換装置の高効率化、低コスト化、小形化という面で有利となるので、将来のエネルギー問題緩和手段として検討されるべきである。

その一つの方法として、インバータによってすべての制御動作が可能な系統連系用多パルス PWM インバータの新しい運転方法について検討する。

図 12 は太陽光発電用変換装置の主回路構成である。アレイに正弦波出力 PWM インバータを接続して直交変換を行い、交流フィルタを通して配電系統と連系している。また、フィルタのインダクタンス L_F は有効電力を系統に注入するための連系リアクトルも兼ねている。アレイ出力端の C_s は直流負荷の場合、第 2 章の動特性効果抑制の面から決まるが、この場合にはインバータ出力基本波電流に基づく電圧変動抑制の面から決定される。また、 D は逆流防止用ダイオードである。インバータ出力電圧 V_0 がひずまない条件として、アレイ最大出力点における直流電圧 V_s が、日照量や素子温度の変化に対して、常に $V_s > |V_{imax}|$ の範囲で運転されるように設計する。この回路では、 C_s の許容電圧変動（出力のひずみに影響）の面からその容量に見合った無効電力調整も可能である。

〈4.1〉 正弦波出力 PWM インバータの制御方式

図 12 の変換装置において、交流フィルタのインダクタンス L_F に基づくリアクタンスを X とすると、図 13 (a) の等価モデルで表され、次の回路理論的事実が良く知られている。インバータ出力電圧 V_0 を系統電圧 V_i に対して、(b) 図のように進み位相とすることにより、系統に電力を供給できる。また、同時にインバータ出力電圧 V_0 を (c) 図のように制御すれば、所望の無効電力（系統に対して遅れ電力）が制御

図 12 太陽光発電用変換装置の主回路構成

Fig. 12. Main circuit configuration of the converter for the solar generation.

図 13 等価モデルと有効、無効電力制御ベクトル図

Fig. 13. Equivalent circuit model and the vector diagram for active and reactive power control.

できる。(d)図に有効、無効電力(系統に対して進み電力)制御時のベクトル図を示す。

系統電圧を V_i としたときのインバータ出力基本波電圧 V_0 を

$$V_0 = k V_i e^{j\phi} \dots\dots\dots (4)$$

ただし、 ϕ : 微少量、 k : 無効電力に見合った 1 に近い実数

とすれば、インバータから系統へ流れ込む基本波電流 I_0 は次式で与えられる。

$$I_0 = (k V_i e^{j\phi} - V_i) / jX \dots\dots\dots (5)$$

よって、インバータから系統へ供給される有効電力 P_0 、無効電力 Q_0 は ϕ が小さい場合次式となる。

$$P_0 = k \phi V_i^2 / X \dots\dots\dots (6)$$

$$Q_0 = [k - 1] V_i^2 / X \dots\dots\dots (7)$$

上式から ϕ を制御することにより有効電力が、更に k を制御することにより無効電力が制御される。

図 14 は一定温度における太陽電池の出力電圧-電力特性を日射量をパラメータに示したもので、最大出力点における電圧が、日射量の増加に伴って多少上昇していく傾向が見られる。

本制御方式は、この傾向を利用してインバータ入力電力をアレイ出力電圧の関数として制御することによ

図 14 太陽電池出力特性と変換装置入力特性との関係

Fig. 14. Relation between the input characteristics of the inverter and the output ones of solar cell array.

り、アレイ出力を常に最大出力点において動作させると同時に、抽出される有効電力 P_0 はインバータ電圧 V_0 と系統電圧 V_i との位相差 ϕ に比例することを利用して、系統へ有効電力を送出するものである。

いま、インバータ損失がないものとして、インバータの送有効電力 P_s を、最大出力軌跡に沿って図 14 のように V_s (アレイ出力電圧) の一次関数

$$P_0 = A(V_s - V_R) \dots\dots\dots (8)$$

ただし、 $A(A > 0)$ 、 V_R : 定数

を満足するよう ϕ を制御すれば、 P_0 は必然的にアレイ最大出力点 P_{max} に等しくなり、そのときの位相差 ϕ は(6)、(8)式より次式で与えられる。

$$\phi = (AX / k V_i^2) (V_s - V_R) \dots\dots\dots (9)$$

図 14 において、計画動作点より電圧が低い動作領域では、インバータ入力特性がアレイ出力特性より下にあるため、この差の電力がコンデンサ C_s を充電し

直流電圧を上昇させ、同図 ① のように最大出力動作点に向かうように制御される。逆に計画動作点より電圧が高い動作領域では、インバータ入力特性がアレイ出力特性より上にあるため、この差の電力を C_s が放電して直流電圧を低下させ、②のように最大出力動作点に向かうように制御される。

また V_R は次のように表され、

$$V_R = V_{R0}(1 - \alpha \Delta T) \quad \dots\dots\dots (10)$$

ただし、 V_{R0} : 25°C の値、 ΔT : 25°C からの温度偏差、 $\alpha \triangleq \Delta V_R / \Delta T \triangleq 0.003 \text{ V/K}$

温度によりわずかに変化する関数であり、アレイ温度上昇と共に自動的に低下するように調整することが望ましい。

一般に家庭用の小規模分散形システムにおいて、系統の無効電力を補償することは、制御回路の複雑化やコスト高を招きあまり得策とは言えない。従って、本変換装置では系統へ有効電力のみを送出する力率 1 の制御を対象とした。そのときには(9)式中の k は 1 となる。

〈4.2〉 インバータ損失の取扱い インバータ損失

P_L を考慮した場合、インバータ入力電力 P_{IN} は次式で与えられる。

$$P_{IN} = P_0 + P_L = A(V_s - V_R) + P_L \quad \dots\dots\dots (11)$$

ところで、インバータは効率向上のために低損失スイッチング素子の採用、高周波化によるフィルタの小形化などが図られた結果、主要動作領域では出力によって効率はほとんど変化しなくなった⁽¹⁷⁾。効率が一定であるとすれば、 P_L は P_0 に比例することになり、インバータ損失 P_L は近似的に次式で与えられることになる。

$$P_L = B(V_s - V_R) \quad \dots\dots\dots (12)$$

ただし、 B : 定数 ($B > 0$)

また、(11)、(12)式より P_{IN} は次式で表される。

$$P_{IN} = (A + B)(V_s - V_R) \quad \dots\dots\dots (13)$$

〈4.3〉 全体の制御系 以上をまとめて示したのが、図 15 の構成図である。

正弦波出力 PWM インバータの駆動信号は、キャリア周波数の三角波振幅①と出力周波数の正弦波信号波振幅②との比較により作られる。アレイ電圧および系統電圧や周波数の変動に対して、比較に用いる三角波の波高値をインバータ入力電圧に比例させ、また正弦波信号波の振幅を系統電圧 V_i に比例させ、その V_i に対する位相差 ϕ を(13)式を加味した(9)式の関係为满足するように制御している。試作装置における位相差 ϕ の最大値は約 10° と設定した。

①三角波振幅 $\propto V_s V_0$ (V_t : 三角波高値)
②正弦波信号波振幅 $\propto (1 + j\phi) V_2 = V_2 e^{j\phi}$

図 15 制御系の構成図

Fig. 15. Block diagram of the control system.

図 16 インバータ出力電流 I_0 と系統電圧 V_i の波形例および出力電流 I_0 の高調波含有率

Fig. 16. Waveforms for the power system voltage V_i and the inverter output current I_0 , and the harmonic contents in the output current.

〈4.4〉 試作装置の運転特性 試作装置として、

図 12 の太陽光発電用主回路構成における太陽電池アレイを図 8 (a) の太陽電池シミュレータに置き換えた回路構成により行った。

図 16(a) は試作装置のインバータ出力電流と系統電圧の波形例であり、(b)図はインバータ出力電流の高調波含有率を示したもので、高調波のほとんどない交流電流を系統へ供給している。また、図 17 は図 8 (a)における日射量を $S3$ から $S0$ にステップ状に増加させたときの動特性である。図 12 における主回路構成のコンデンサが $10,000 \mu\text{F}$ と大きいので、シミュレータ特性の急しゅんな変化は見られないが、制御系は満足な動作をしていることを示している。図 18 は図 8 (a)における日射量を、 $S0$ の動作点において系統電圧をスライダックによって、14%低下させたときの動特性である。系統電圧を低下させると出力電

図 17 日照量変動に対する応答

Fig. 17. Response to the variation of the solar illumination.

図 18 系統電圧変動に対する応答

Fig. 18. Response to the variation of power system voltage.

流が増加して系統へ供給される電力が、ほぼ一定に保たれていることがわかる。

このように、試作装置の動特性に対する制御特性はほぼ満足した特性であることが確認された。

5. あとがき

まず太陽電池アレイの動特性を基礎的に検討した。太陽電池用変換装置のスイッチング周波数が高くなると、太陽電池の接合容量とリード線のインダクタンスとの共振により、太陽電池出力端の瞬時電圧、電流が異常に大きくなることがあるので注意が必要である。

次に、独立電源直流負荷に対するハイブリッドシス

テムを提案し、最大出力動作点決定のパラメータとして直接電圧、電流を測定することなく、電池に接続されるチョッパの出力電流最大値を検索するだけで済むことから、従来の方法に比べて制御回路が簡単になり、検索時間も短くできるようになった。

一方、太陽電池の静特性を検討した結果、温度一定の場合、出力特性 ($P-V$) の最大出力点における出力電圧が、日照量によって正の傾きを持つことに着目して、インバータ入力電力をアレイ出力電圧の関数として制御する方法を提案し、実用化に向けて従来に比べ、制御回路の簡単化と低コスト化を示した。

終りに、本学在学中本研究に御協力下さった古川誠一君 (日本テレビ)、福田 博君 (ソニー) ならびに御協力いただいた東芝 (株) 重電技術研究所 中島喜平氏に謝意を表する次第である。

(昭和 62 年 2 月 3 日受付)

文 献

- (1) 堀米, 他: 「小特集, 自然エネルギー利用技術の開発動向」, 電学誌, 105, 203 (昭 60-3)
- (2) 浜川, 他: 80 年代太陽光発電の開発 (昭 56-4) 日刊工業社
- (3) 石田・横江・神本: こまで来た太陽光発電 (米国編) (昭 59-2) 電力新報社
- (4) 浜川, 他: 「太陽光発電の現状と将来」, 電学誌, 102, 10 (昭 59-12)
- (5) 北川, 他: 「太陽光発電システム」, サンケイ技報, 14, 31 (昭 59-1)
- (6) D. A. Fox, et al.: "Peak power tracking technique for photovoltaic Arrays", IEEE PESC, p. 219 (1979)
- (7) 大西, 他: 「マイクロコンピュータによる太陽光発電最大出力追従制御システム」, 昭 57 電気学会四国支部連大, No. 9-8
- (8) 原島, 他: 「太陽光発電システムにおけるエネルギーフロー制御」, 電気学会半導体電力変換研究, SPC-84-1 (昭 59-12)
- (9) 上之園, 他: 「太陽光発電用変換装置」, 東芝レビュー, 35, 1065 (昭 55-12)
- (10) 川平・市東・江口・徳永: 「太陽光発電システムの開発」, 日立評論, 63, 25 (昭 56-7)
- (11) 逸見・岩堀・高橋・池田: 「太陽光発電システム開発に関する諸考察」, 電気学会半導体電力変換研究, SPC-82-48 (昭 57-11)
- (12) 逸見・高橋・古川・池田: 「太陽光・風力発電併用システムに関する諸考察」, 昭 60 電気学会全大, No. 1187
- (13) 古川・逸見・山形・福田・池田: 「太陽光・風力発電併用システムに関する研究」, 同上, No. 1174
- (14) 逸見・岩堀・高橋・古川・池田: 「太陽光発電用変換装置とその制御に関する考察」, 電気学会半導体電力変換研究, SPC-84-25 (昭 59-2)
- (15) 林, 他: 「太陽光発電用 3 kW 高周波インバータの開発」, 昭 57 電気学会全大, No. 1070
- (16) 本間編: 風力エネルギー読本, p. 51 (昭 55) オーム社
- (17) 太陽電池ハンドブック: 電気学会太陽電池調査専門委員会編 p. 245 (昭 60)