太陽電池モジュールの動的等価回路

正員 大庭 勝 實 (東京電機大)

正員 藤 巻 忠 雄 (東京電機大)

准員 江 田 寛 (東京電機大)

1. ま え が き

太陽電池エネルギーは将来の増大するエネルギー需要に対する重要なエネルギー供給源として注目されており、太陽光発電システムの研究・開発は国内外で積極的に行われている。その一つはエネルギー変換素子としての太陽電池の製造技術および変換効率の向上についての研究であり、他の一つはシステム技術に関連した研究・開発である⁽¹⁾。後者については個人住宅、集合住宅用システムなどの連系形利用システム、あるいは電力供給システムの制御・運用について、ハード・ソフト両面から研究がなされている。このような研究の中で最も基本的なことは、太陽電池の変換効率に関連していかに効率良く太陽エネルギーを取出すかという問題である。周知のように太陽電池の出力特性は日射量、温度などで大幅に変動し、従って効率良く太陽エネルギーを取出すためには最大出力制御が必要となる。最大出力制御の方法としては種々の方式が提案されているが、いずれも自然条件の変化、あるいは汚損による特性の変化に対して太陽電池の動作点を振動させ、常に最大出力を追跡するようにしているのが主流である^{(2)~(7)}。しかしながら、動作点を振動させたとき、振動周波数にも依存するが、動作点はもはや静特性上を移動せず、全く異なった特性上を動くようになる。特に、チョッパなどによりオン・オフ制御し、動作点を振動させたときは、過渡現象の繰返しとなり、その軌跡はヒステリシスを伴うようになる。このような場合、特性は多価関数となるため、それが一価関数であることを前提に成立していた最大出力制御論

理が成り立たなくなり、エネルギー回収効率を上げようとして振動周波数を高くすると、かえって回収効率が下ってしまう現象が生じてしまうこともある⁽⁸⁾。

以上のようなことから、最大出力制御を伴う太陽光発電システムの設計には太陽電池モジュールの最大電力点近傍の動的等価回路を明らかにしておく必要がある。太陽電池の静的等価回路については半導体理論から導かれたものはあるが、動的等価回路については著者らの知る限りまだ明らかにされていないようである。

著者らは、現在最も実用化されているシリコン単結晶太陽電池モジュールの動的等価回路について考察している。太陽電池モジュールは太陽電池セルが数十個直列に接続された構造となっている。これの動的等価回路を求めるには日射量をステップ状に変化させたときの過渡応答から求めればよいが、モジュールのような大面積の受光面全体にわたり日射量をステップ状に変えることは困難であるので、ここではまず一つのセルについて照射光をステップ状に変えたときの過渡応答から動的等価回路の原形を求め、これを基にモジュールの周波数応答を測定して、出力二端子からみた動的等価回路を算定した。その結果、CRの一次遅れ回路でほぼ実際の動特性を表すことができることが明らかとなった。

もとより太陽電池モジュールの特性は日射量・温度で大きく変わる。従って、等価回路定数もそれらの値によって無数にでてくるが、本論文ではまだ明らかにされていない太陽電池モジュールの最大電力点近傍での動的等価回路とその定数算定法に主眼を置き、一つの自然条件下における例を用いて述べている。求められた等価回路は実際の動特性をほぼ表すことのできるものであり、ある自然条件下での太陽光発電システムの解析的な動作の検討に有用になると思われる。

2. 基本的な動的等価回路

太陽エネルギーを電気エネルギーに変換する最小単

On a Dynamic Equivalent Circuit of Photovoltaic Solar Cell Module. By *Katsumi Ohniwa*, Member, *Tadao Fujimaki*, Member & *Satoru Eda*, Associate (Faculty of Engineering, Tokyo Denki University)

大庭勝實：正員、東京電機大学工学部電気工学科

藤巻忠雄：正員、東京電機大学工学部電気工学科

江田 寛：准員、東京電機大学大学院工学研究科

位の素子は太陽電池セルである。この太陽電池セルの動特性を検討するため、図1のような実験回路に注目してみよう。ここで、LEDアレイは太陽電池セル（定格：開放電圧0.5 V，短絡電流2 A）の受光面に接して200個の高輝度発光ダイオードを取付けたものである。高速度スイッチングトランジスタでオン、オフし、太陽電池セルへの入射光をステップ状に変化できるようにしてある。図の抵抗 R_L を調整して太陽電池セルの初期動作点を静特性上の最大電力点付近（300 mV，81 mA）に設定し、入射光をステップ状に遮断したときの出力電圧は図2のようになる。このような応答は従来の静特性を表す図3のような等価回路⁽⁸⁾で表現することはできず、従って動特性を表す新しい等価回路を必要とする。入射光をステップ状に遮断したときの応答は、キャリアの寿命に関連して（1）式による図2の計算値で示されるように、一本の指数関数で示されることは理論的にも明らかにされているが⁽⁹⁾、幾つかの実験によっても確められた。

$$e(t) = E \exp(-t/T) \quad \dots\dots\dots (1)$$

図1 測定回路
Fig. 1. Measuring circuit.

図2 光遮断時の太陽電池セルの出力
Fig. 2. Initial response of solar cell.

（1）式の形の出力が得られる回路は視察によって、図4のようなCRの一次遅れ回路で代表させることができる。すなわち、図4で $E_0 = (1 + R_0/R_L)E$ をステップ状に零にしたときの出力電圧は $R_p = R_0 // R_L$ として（2）式で与えられるからである。

$$v(t) = E \exp\{-t/(R_p C_0)\} \quad \dots\dots\dots (2)$$

図4で R_0 は太陽電池セルの静特性上の初期動作点における接線の傾きより、また E_0 はこの接線と電圧軸の交点よりそれぞれ求められる。更に C_0 は出力電圧応答の時定数より算出される。

以上のような方法で求められる等価回路の妥当性を調べるため、セルの最大電力点を挟む二点に初期動作点〔①（352 mV，67 mA） ②（300 mV，81 mA）〕を置いて得られた等価回路（図5）によるシミュレーション

図3 静的等価回路
Fig. 3. Static equivalent circuit of solar cell.

図4 提案する動的等価回路
Fig. 4. Proposed dynamic equivalent circuit of solar cell.

初期条件①（ ）内は初期条件②
図5 太陽電池セルの等価回路
Fig. 5. Equivalent circuit of solar cell.

図 6 実測と計算による動特性の比較
Fig. 6. Comparison of the simulated dynamic characteristic (broken line) with the measured result (solid line) of the solar cell (at 5 kHz).

ョンと実測を比較したのが図 6 である。ここでは、電流を 60 mA から 83.5 mA まで指数関数的に 5 kHz で上昇させたり、下降させたりして実験を行った。なおシミュレーションでは、図 5 の等価回路の電圧源の電流が図 6 の静特性の折線近似 1, 2 の交点電流(= 76.16 mA)より大きい小さいかで二つの等価回路を使い分けている。これで明らかなように、セルの動特性を表す等価回路は図 4 のような CR の一次遅れ回路で表すことができると言える。

3. 太陽電池モジュールの動的等価回路

太陽電池モジュールは太陽電池セルが数十個直列に接続された構成の一つの集合体である。従って、その動的等価回路の形はセルの場合と同じ形になると考えられる。しかしこの場合、太陽電池モジュールは受光面積が広く、実用規模のエネルギーをもった照射光をステップ状に遮断することは実際上不可能であり、この方法で等価回路定数を求めることはできない。そこで何か実用的な新しい方法を見いださなければならないが、ここでは、太陽電池モジュールの動的等価回路も一次遅れ回路で表せるであろうということを念頭に置き、図 7 のような測定回路を用いてその周波数特性を調べた。

〈3・1〉 太陽電池モジュールの周波数特性 ある日射量の太陽光の下での太陽電池モジュール (N 社

図 7 測定回路
Fig. 7. Practical measuring circuit.

図 8 太陽電池モジュールの静特性
Fig. 8. Static characteristics of solar cell module.

製, 34 セル直列, 定格: 1 kW/m² の日射量時開放電圧 19 V, 短絡電流 2 A) 一枚の静特性を示せば図 8 のようである。これからもわかるように、その特性は強い非線形性を示している。従って、周波数特性を調べるにはモジュールの静特性をほぼ線形性が成り立つと考えられる幾つかの領域に分けて測定せざるを得ない。そこで、ここでは図 8 の折れ線で示したような三つの領域、すなわち開放点側、最大出力点近傍および短絡点側の三つの領域について、それぞれの領域の中央を動作点の中心にして電流を正弦波状に振動させ、そのときのモジュールの出力電圧を測定した。図 9、図 10 および図 11 はそれぞれの領域における周波数特性である。

ところで、太陽電池モジュールはセルの直列接続さ

図 9 太陽電池モジュールの周波数特性 (開放点側)

Fig. 9. Frequency response of solar cell module (on the region of open circuit current).

図 10 太陽電池モジュールの周波数特性 (最大電力点近傍)

Fig. 10. Frequency response of solar cell module (on the region of the maximum power point).

れたものである。その動的等価回路も図4のように表せると考え、各領域について微小正弦波変動電流を入力、そのときのモジュール出力二端子の電圧を出力としたとき、両者の位相特性 ϕ (位相特性が反転しているので変化分だけを考慮する)は

$$\phi = -\tan^{-1} \omega R_0 C_0 \dots\dots\dots (3)$$

であるので、時定数 $R_0 C_0$ は次式によって求められる。

$$R_0 C_0 = -\frac{1}{\omega} \tan \phi \dots\dots\dots (4)$$

なお、ここで R_0 は各折れ線近似直線の傾きより求めればよい。

そこで、いま求めた周波数特性から(4)式により時定数 $R_0 C_0$ を各周波数について求めてみると、図12に示されるように周波数の低い領域では、測定誤差が大きく時定数の値は幾分ばらつくものの、開放点側および

図 11 太陽電池モジュールの周波数特性 (短絡点側)

Fig. 11. Frequency response of solar cell module (on the region of short circuit current).

図 12 太陽電池モジュールの時定数

Fig. 12. Time constants of a solar cell module.

最大電力点近傍ではほぼ一定の値が得られ、従ってこの領域では図4の等価回路が適用できると考えられる。しかしながら、短絡点側で同様の算定をしてみると周波数が高くなると、もはやこの領域では図4の等価回路でその特性を表すことができないことがわかった。

〈3・2〉 最大電力点近傍の動的等価回路とその妥当性

太陽光発電システムでは、一般に最大出力制御が行われる。従って、モジュールの最大電力点近傍での動的等価回路は特に重要である。前節で示したように、この領域での周波数特性が一次遅れ回路のそれであることから、図4の回路が動特性を表す等価回路となる。この回路で、 R_0 はモジュールの静特性上の最大電力点での接線の傾きとして求められ、 E_0 はその接線の延長線の電流零のときの電圧値として求められる。また、 C_0 は周波数特性の位相特性から(4)式により簡単に求められる。以上により、図8および図10の5 kHz時 (数 kHz以上ではどの周波数で読取っ

てもよいが、ここでは測定しやすさと読取りやすさから5 kHzとした)の値より各定数を求めた等価回路を図13に示す。ここで求められた動的等価回路の妥当性を検討するため、第2章で行ったと同じ方法により実測とシミュレーション結果を比較したのが図14である。ここで、モジュールの出力電流は次のように動作点を指数関数的に3 kHzで振動させ実験を行った。

$$\begin{aligned} & \text{(i)} \quad 0 \leq t \leq T/2 \text{ のとき} \\ & \quad i(t) = I_1 e^{-t/\tau} \\ & \text{(ii)} \quad T/2 \leq t \leq T \text{ のとき} \\ & \quad i(t) = I_1(1 - e^{-(t-T/2)/\tau}) + I_2 \\ & \quad \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

図13 太陽電池モジュールの等価回路
Fig.13. Dynamic equivalent circuit of solar cell module.

図14 実測と計算による動特性の比較
Fig.14. Comparison of the simulated dynamic characteristic (broken line) with the measured result (solid line) of the solar cell module (at 3 kHz).

ただし、 $I_1=0.94 \text{ A}$ 、 $I_2=0.82 \text{ A}$ 、 $\tau=1.22 \text{ ms}$ 、 $T=0.33 \text{ ms}$

実験では自然光を相手としているため、図8の静特性を測ったときと図14の実験を行ったときの条件は完全には同じではないが、等価回路より得られる結果は実測結果をほぼ表していると考えられる。

〈3・3〉 モジュールを複数枚直並列接続したときの動的等価回路 太陽光発電システムでは、太陽電池モジュールを多数使用して大きなエネルギーを得ている。従って、本太陽電池モジュールの動的等価回路を最大出力制御を行う太陽光発電システムの設計に用いるためには、太陽電池モジュールを複数枚直並列接続したときの動的等価回路を算定する必要がある。そこで本節では、その基本としてモジュールを二枚直列あるいは並列接続した場合について動的等価回路を算定し、その妥当性を検討した。

太陽電池モジュールを n 枚直列あるいは並列接続したときの動的等価回路は、回路理論的に図4から図15となる。従って、モジュールを仮に二枚直列あるいは並列接続したときの動的等価回路は、図13の動的等価回路より図16になると考えられる。そこで、これら二つの動的等価回路のシミュレーション結果と実測値を前と同じように次のように比較した。

() 内は直列接続時
図15 n 枚を直列・並列接続したときの等価回路

Fig.15. Dynamic equivalent circuit in the case of n series or n parallel modules.

() 内は2枚を直列に接続したとき
図16 2枚を並列に接続したときの等価回路

Fig.16. Dynamic equivalent circuit for two parallel modules.

図 17 2枚を並列に接続したときの動特性の比較(3 kHz)

Fig. 17. Comparison of the simulated dynamic characteristic (broken line) with the measured result (solid line) in the case of two parallel modules (at 3 kHz).

(1) 並列接続時

(i) $0 \leq t \leq T/2$ のとき

$$i(t) = I_1 e^{-t/\tau}$$

(ii) $T/2 \leq t \leq T$ のとき

$$i(t) = I_1(1 - e^{-(t-T/2)/\tau}) + I_2 \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで, $I_1 = 1.85 \text{ A}$, $I_2 = 1.65 \text{ A}$, $\tau = 1.5 \text{ ms}$,
 $T = 0.33 \text{ ms}$, $k = I_2/I_1 = 0.89$

(2) 直列接続時

(i) $0 \leq t \leq T/2$ のとき

$$i(t) = I_1 e^{-t/\tau}$$

(ii) $T/2 \leq t \leq T$ のとき

$$i(t) = I_1(1 - e^{-(t-T/2)/\tau}) + I_2 \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで, $I_1 = 0.92 \text{ A}$, $I_2 = 0.83 \text{ A}$, $\tau = 1.6 \text{ ms}$,
 $T = 0.33 \text{ ms}$, $k = I_2/I_1 = 0.90$

図 17, 図 18 は出力電流がそれぞれ(6)式, (7)式となるように動作点を振動させたときの実測とシミュレーション結果の比較である。これらの結果より, モジュール一枚の動的等価回路からモジュール複数枚の動的等価回路を回路理論的に算定すればよいと言える。

図 18 2枚を直列に接続したときの動特性の比較(3 kHz)

Fig. 18. Comparison of the simulated dynamic characteristic (broken line) with the measured result (solid line) in the case of two series modules (at 3 kHz).

以上, 提案した太陽電池モジュールの動的等価回路は, ある代表的な日射量, 温度のときのものである。従って, 一つの等価回路であらゆる日射量, 温度のときの動特性を表すことはできない。しかしながら, 最大出力制御を行う太陽光発電システムの特定の自然条件の下での動作解析, あるいはそのようなシステムの下での動作限界などの特性を検討する場合などに本動的等価回路はその有用性が発揮される。

4. あとがき

本論文では, まだ明らかにされていない太陽電池モジュールの動特性を表す等価回路を提案した。これは, 太陽電池モジュールの動作領域のうち最も重要な最大電力点近傍で動作点を微小振動させたときの特性を表すもので, CR の一次遅れ回路で代表させることができ, その定数も周波数応答法により容易に算定することができる。この動的等価回路の特長は次のようにまとめることができる。

(1) モジュールの最大電力点近傍の動特性を十数 kHz の振動周波数範囲については表すことができる。

(2) 回路構成が簡単であるのでシステム解析に有用である。

(3) 回路定数の算定法が容易である。

(4) モジュール一枚の動的等価回路から、モジュール複数枚を直並列接続したときの等価回路を回路理論的に算定できるので、大規模な太陽発電システムの設計、解析へも適用できる。

最後に、本研究は本学総合研究所の援助のもとに行われたことを記し、本研究の機会を与えて下さった同研究所に深謝の意を表したい。

(昭和 63 年 8 月 23 日受付, 同 64 年 1 月 5 日再受付)

文 献

- (1) 黒川: 「太陽電池発電の最近の開発動向」, 電学論 D, 108, 106 (昭 63-2)
- (2) 茂木, 他: 「太陽光発電インバータの最大出力トラッキング制御」, 昭 61 電気学会大全, No. 509
- (3) 星野, 他: 「DC-DC コンバータを用いた太陽電池から蓄電池への充電特性」, 昭 62 電気学会産業応用部門大会, No. 113
- (4) 北村, 他: 「太陽光発電用電力調整装置の最大出力制御」, 第 49 回パワーエレクトロニクス研究会, Vol. 8 (昭 57~58)
- (5) A. F. Boehringer: "Strukture und Regelung von Energieversorgungssystemen in satelliten", *Elektrotech. Z. (ETZ)-A*, 92 H. 2, 114 (1971)
- (6) 大庭, 他: 「太陽光発電システムの最大出力追跡制御法」, 電学論 B, 106, 626 (昭 61-7)
- (7) 大庭, 他: 「太陽電池パネルアレイの最大出力簡易制御法」, 同上 D, 108, 143 (昭 63-2)
- (8) 電気学会太陽電池調査専門委員会編: 太陽電池ハンドブック, p. 10 (昭 60) 電気学会
- (9) 深海: 半導体工学, p. 47 (昭 62) 東京電機大学出版局

(1) 黒川: 「太陽電池発電の最近の開発動向」, 電学論 D, 108,