

Maximum power point tracking method using open voltage in thermoelectric generation system.

熱電発電システムにおける 開放電圧を用いた最大出力点の探索法

Masatoshi OKU
奥 将俊^{*1}

Tomoko ISHITSU
石津 智子^{*2}

Daisuke TASHIMA
田島 大輔^{*3}

Tatsuya SAKODA
迫田 達也^{*4}

Noriyuki HAYASHI
林 則行^{*4}

Ichijo HODAKA
穂高 一条^{*4}

Abstract

Thermoelectric generators (TEG) are useful tools for the recovery of unused heat energy, and widely used. In order to obtain the maximum power from TEG modules, the output voltages of the modules are usually set to be half of the open circuit voltage. However, operation conditions of each module such as the temperature difference between the electrodes, etc. are not always the same with each other in a single generation system involving many modules and wide area of the heat sources. Under such conditions, the conventional method to determine the output voltage mentioned above is not applicable. The authors propose a new and simple procedure to determine the voltage of maximum power point when the temperature conditions of each module are different from each other. The availability of the proposed method based on some results was obtained by the numerical simulations and experiments.

Key Words: Thermoelectric element, Thermoelectric generation system, Maximum power point tracking, Open circuit voltage

キーワード：熱電素子，熱電発電システム，最大出力追尾，開放電圧

1. はじめに

近年，熱電素子は豊富な未利用熱エネルギーを電力エネルギー変換できる機器として，エネルギーの有効利用の観点から利用が進み，温泉の熱を利用した例⁽¹⁾⁽²⁾や自動車廃熱を利用した例⁽³⁾⁽⁴⁾，工場廃熱を利用した例⁽⁵⁾，太陽熱を利用した例⁽⁶⁾等がある．一般に複数の熱電素子を直列接続した熱電発電モジュール (Thermoelectric module : TEM) が用いられる．この熱電発電モジュールを直並列に接続して熱電発電システムが構築される．一方，同様に構築される発電システムに太陽光発電システムがある．太陽光発電システムには発電能力を活かすために最大出力追尾 (Maximum Power Point Tracking : MPPT) 制御回路が設置されることが多い．熱電発電システムも設備利用

率向上のために同様の回路が必要である．これまでに提案された熱電発電システムの MPPT 制御法には，山登り法⁽⁷⁾，発電システムの開放電圧の 1/2 に運転電圧を追従させる方法⁽⁸⁾⁽⁹⁾，負荷インピーダンスを検出する方法⁽¹⁰⁾，モジュール温度を測定して運転状態を決める方法⁽¹¹⁾がある．

しかし，これらの MPPT 制御の多くは熱電発電システムを熱電発電モジュール 1 つ，もしくは 1 列のみで構成する場合を想定している．著者らは，これまでに熱電発電モジュール毎の出力が異なる場合を想定して様々なシミュレーションや実験を行い，出力特性の調査を実施してきた⁽¹²⁾⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾．これらの結果，太陽光発電システムのように複数列で構成した熱電発電システムの熱電発電モジュールの発電電力がそれぞれ異なる場合，熱電発電システムの出力は開放電圧の 1/2 の電圧に設定しても最大出力点 (Maximum Power Point : MPP) にならないことが分かった．また，前述の MPPT 制御法では電圧や電流，温度など複数の物理量を測定するセンサーが必要となる．そこで熱電発電システムを構成する各熱電発電モジュールの発電電力が異なっても開放電圧を測定するだけで利用できる MPPT 制御を検討する．本方法は電圧を測定するのみ

*1 宮崎大学大学院農学工学総合研究科博士後期課程学生
(〒889-2192 宮崎市学園木花台西 1-1)

e-mail: ncl2004@student.miyazaki-u.ac.jp

*2 宮崎大学大学院工学研究科修士課程学生

*3 福岡工業大学工学部電気工学科助教

*4 宮崎大学工学教育研究部教授

(原稿受付:2016年3月28日，受理日:2016年5月25日)

であるので多種のセンサーや電力演算を必要としない。本論文は次の 3 点を報告する。(1) 新しく提案する方法で熱電発電システムにおける最大出力点の算出を行う。(2) 算出した最大出力点をシミュレーションで確認し、精度を確認する。(3) 小規模な熱電発電モジュールを用いた実験を行い、実際に適用した場合の結果を確認する。

2. MPP を出力する電圧について

2.1 算出方法

一般的に熱電発電モジュールの等価回路は内部抵抗と電圧源を直列接続した形で表される。そして熱電発電モジュールのモジュール列は複数個の熱電発電モジュールと逆流防止ダイオードを直列接続して構成される。図 1 に熱電発電モジュール 3 個を直列接続して構成したモジュール列の等価回路を示す。熱電発電システムは図 1 のモジュール列を複数列並列接続して構成される。図 2 にモジュール列 1 列と負荷 R で構成した熱電発電システムを示す。図 2 の熱電発電システムの回路電流 I と発電電力 P は負荷 R へ加わる電圧 V の関数として次の手順で求めることができる。回路電流 I は、

$$I = \frac{E - V_d}{r + R}$$

となり、上式に $R=V/I$ を代入して整理すると、

$$I = \frac{E - V_d - V}{r} = -\frac{1}{r}V + \frac{E - V_d}{r} = -\frac{1}{r}V + I_s \quad (1)$$

が得られる。更に式 (2) を使って発電電力 P を求めると

$$\begin{aligned} P = VI &= -\frac{1}{r}V^2 + \frac{E - V_d}{r}V \\ &= -\frac{1}{r}\left(V - \frac{E - V_d}{2}\right)^2 + \frac{(E - V_d)^2}{4r} \end{aligned} \quad (2)$$

となる。ただし、 I [A]: モジュール列の回路電流、 r [Ω]: モジュール列の内部抵抗、 V [V]: 負荷 R へ加わる電圧、 I_s [A]: モジュール列の短絡電流、 E [V]: モジュール列の開放電圧、 V_d [V]: ダイオードの電圧降下、 P [W]: 発電電力である。

図 3 に式 (1) と式 (2) から求めた回路電流 I と負荷 R へ加わる電圧 V の関係 (V-I 特性)、負荷 R へ加わる電圧 V と発電電力 P の関係 (V-P 特性) を示す。図 3 から発電電力 P は電圧 $V=(E-V_d)/2$ の時に最大値 $(E-V_d)^2/4r$ を示す、上に凸な放物線を描くことが分かる。図 4 に図 1 のモジュール列を並列に n 列 (1, 2, 3, \dots , n) 接続して構成した熱電発電システムの等価回路を示す。図 4 のモジュール列の開放電圧と内部抵抗、回路電流は小さい順にそれぞれ $E_n, E_{n-1}, E_{n-2}, \dots, E_1, r_n, r_{n-1}, r_{n-2}, \dots, r_1, I_n, I_{n-1}, I_{n-2}, \dots, I_1$ と示している。また、図 5 に n 列のモジュール列で構成した熱電発電システムの V-I 特性を示す。図 5 の $I_{n-1s}, I_{n-2s}, \dots, I_{1s}$ はモジュール列の短絡電流を示している。

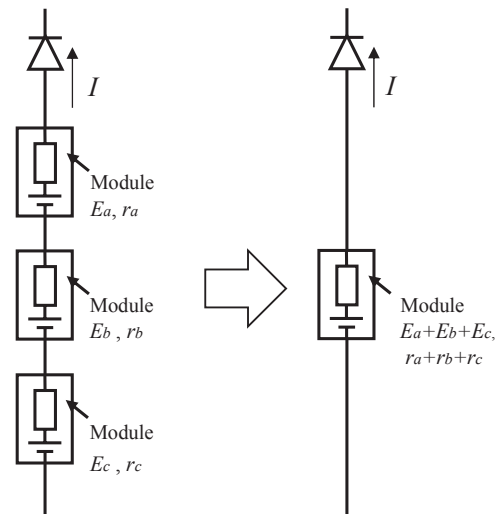


Fig.1 Equivalent circuit of thermoelectric module line.

図 1 熱電発電モジュールのモジュール列の等価回路

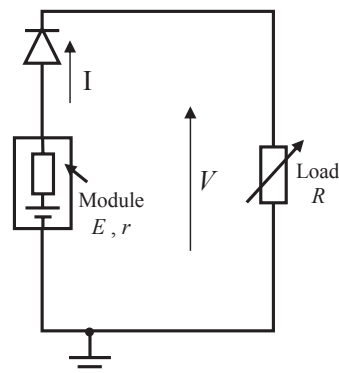


Fig.2 Equivalent circuit of module line and load.

図 2 モジュール列と負荷で構成された回路

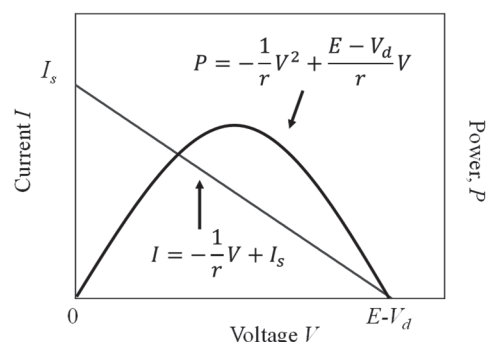


Fig.3 V-I and V-P characteristics of the module line shown in Fig.2.

図 3 図 2 で示したモジュール列の V-I 特性と V-P 特性

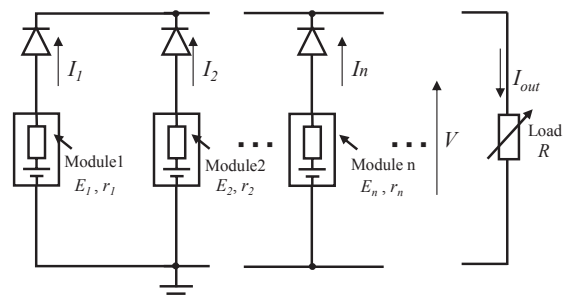


Fig.4 Diagram of thermoelectric generation system.

図 4 熱電発電システムの構成図

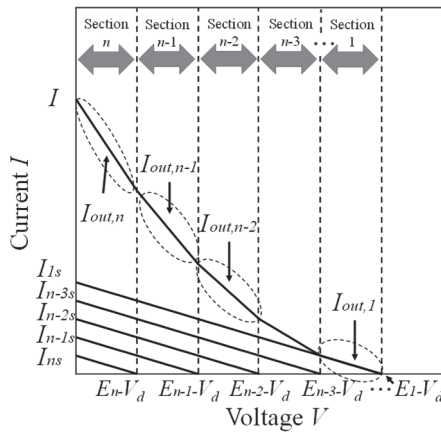
Fig.5 V-I characteristic in module line number n .図5 モジュール列数 n 列における V-I 特性

図5から n 列のモジュール列で構成した熱発電システムの V-I 特性の I の傾きは開放電圧で区切った n 個の区間で変化することが分かる。これは負荷 R に加わる電圧 V によって電流を出力できるモジュール列と電流を出力できないモジュール列が生じるためである。負荷 R に加わる電圧 V は図4中の負荷 R と共に大きくなる。例えば区間 n では負荷 R に加わる電圧 V が E_n より小さく、負荷 R に接続する全モジュール列が電流を出力できる。しかし、区間 $n-1$ では負荷 R に加わる電圧 V が E_n より大きくなり開放電圧 E_n のモジュール列は逆流防止ダイオードによって熱発電システムから離脱されて回路電流は0となる。更に区間 $n-2$ では負荷 R に加わる電圧 V が E_{n-1} を超え、開放電圧 E_{n-1} のモジュール列の回路電流も0となる。このように n 列のモジュール列で構成した熱発電システムの V-I 特性は n 個の区間毎に異なる傾きを持つ。この n 個の区間において熱発電システムの回路電流は式(3)から式(6)のように表すことができる。

V が0以上 E_n 未満 (図5の区間 n) の回路電流 $I_{out,n}$

$$I_{out,n} = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_{n-1} + I_n \quad (\text{全ての電流和})$$

$$= -\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} + \dots + \frac{1}{r_n}\right)V$$

$$+ \left(\frac{E_1 - V_d}{r_1} + \frac{E_2 - V_d}{r_2} + \frac{E_3 - V_d}{r_3} + \dots + \frac{E_n - V_d}{r_n}\right) \quad (3)$$

$I_{out,n}$ [A]: 区間 n における回路電流, $I_1 \sim I_n$ [A]: 各モジュール列電流, $E_1 \sim E_n$ [V]: 各モジュール列開放電圧, $r_1 \sim r_n$ [Ω]: 各モジュール列内部抵抗, V_d [V]: ダイオード電圧降下

V が E_n 以上 E_{n-1} 未満 (区間 $n-1$) の回路電流 $I_{out,n-1}$

$$I_{out,n-1} = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_{n-1} \quad (I_n \text{ が除外される})$$

$$= -\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \dots + \frac{1}{r_{n-1}}\right)V$$

$$+ \left(\frac{E_1 - V_d}{r_1} + \frac{E_2 - V_d}{r_2} + \frac{E_3 - V_d}{r_3} + \dots + \frac{E_{n-1} - V_d}{r_{n-1}}\right) \quad (4)$$

V が E_{n-1} 以上 E_{n-2} 未満 (区間 $n-2$) の回路電流 $I_{out,n-2}$

$$I_{out,n-2} = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_{n-2} \quad (I_n \text{ と } I_{n-1} \text{ が除外される})$$

$$= -\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \dots + \frac{1}{r_{n-2}}\right)V$$

$$+ \left(\frac{E_1 - V_d}{r_1} + \frac{E_2 - V_d}{r_2} + \frac{E_3 - V_d}{r_3} + \dots + \frac{E_{n-2} - V_d}{r_{n-2}}\right) \quad (5)$$

他のモジュール列も負荷に加わる電圧 V が各モジュール列の開放電圧を超えると電流を出力できなくなるため、同様に各区間において負荷 R に対して電流を供給できないモジュール列の回路電流を除いた式を考える。

V が E_2 以上 E_1 未満 (区間 1) の回路電流 $I_{out,1}$

$$I_{out,1} = I_1 = -\left(\frac{1}{r_1}\right)V + \left(\frac{E_1 - V_d}{r_1}\right) \quad (6)$$

以上の要領で式の導出を行って n 個の式を作る。続いて各区間における発電電力を算出する。まず、区間 n における発電電力 P_n は区間 n の回路電流 $I_{out,n}$ と負荷 R に加わる電圧 V を使って式(7)のように表される。

$$P_n = VI_{out,n}$$

$$= -\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} + \dots + \frac{1}{r_n}\right)V^2$$

$$+ \left(\frac{E_1 - V_d}{r_1} + \frac{E_2 - V_d}{r_2} + \frac{E_3 - V_d}{r_3} + \dots + \frac{E_n - V_d}{r_n}\right)V \quad (7)$$

式(7)から区間 n における発電電力 P_n は極大値を持つことが分かる。発電電力 P_n が最大となる時の負荷 R に加わる電圧の算出は式(8)を使って算出する。

$$\frac{dP_n}{dV} = 0 \quad (8)$$

式(7)を式(8)へ代入する。

$$-2\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} + \dots + \frac{1}{r_n}\right)V$$

$$+ \left(\frac{E_1 - V_d}{r_1} + \frac{E_2 - V_d}{r_2} + \frac{E_3 - V_d}{r_3} + \dots + \frac{E_n - V_d}{r_n}\right) = 0$$

発電電力 P_n が最大になるときに負荷 R に加わる電圧を V_n とすると V_n は式(9)のように示される

$$V_n = \frac{\frac{E_1 - V_d}{r_1} + \frac{E_2 - V_d}{r_2} + \frac{E_3 - V_d}{r_3} + \dots + \frac{E_n - V_d}{r_n}}{2\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} + \dots + \frac{1}{r_n}\right)} \quad (9)$$

同様に考えると区間 $n-1$ における発電電力 P_{n-1} が最大になるときの電圧 V_{n-1} は式(10)のように示される。

$$V_{n-1} = \frac{\frac{E_1 - V_d}{r_1} + \frac{E_2 - V_d}{r_2} + \dots + \frac{E_{n-1} - V_d}{r_{n-1}}}{2\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} + \dots + \frac{1}{r_{n-1}}\right)} \quad (10)$$

区間 1 における発電電力 P_1 が最大になるときの電圧 V_1 は式(11)のように示される。

$$V_1 = \frac{\frac{E_1 - V_d}{r_1}}{2\frac{1}{r_1}} = \frac{E_1 - V_d}{2} \quad (11)$$

ここで各モジュールの内部抵抗が互いにほぼ同じ ($r_1 \div r_2 \div r_3 \div \dots \div r$) であるとすれば式(9)は式(12)に変形できる。

$$V_n = \frac{\frac{1}{r}(E_1 + E_2 + \dots E_n - nV_d)}{2n \frac{1}{r}} = \frac{E_1 + E_2 + \dots E_n - nV_d}{2n} \quad (12)$$

V_n [V]: 区間 n において発電電力 P_n が最大になるときに負荷 R に加わる電圧, $E_1 \sim E_n$ [V]: 各モジュール列開放電圧, n : 区間 n において熱電発電システムに接続されているモジュール列の数, r [Ω]: 各モジュール列内部抵抗, V_d [V]: ダイオードの電圧降下.

他の式も同様に考えると式 (10) は式 (13) のように表すことが出来る.

$$\begin{aligned} V_{n-1} &= \frac{\frac{1}{r}\{E_1 + E_2 + \dots E_{n-1} - (n-1)V_d\}}{2(n-1) \frac{1}{r}} \\ &= \frac{E_1 + E_2 + \dots E_{n-1} - (n-1)V_d}{2(n-1)} \end{aligned} \quad (13)$$

式 (12) と式 (13) を比べると式中含まれる開放電圧と熱電発電システムに接続されているモジュール列の数が 1 つ減少している. このように発電電力 P が最大になるときの負荷 R に加わる電圧 V を求める際は, まずは熱電発電システムに接続されているモジュール列の開放電圧と熱電発電システムに接続されているモジュール列の数を 1 つずつ減らしていった式を n 個作る. そして各 n 個の式に値を代入し, 各式において算出した V が各式の電圧の設定範囲に収まっているか確認することで求める. 例えば式 (12) の V_n は区間 n を想定して立てた式である. そのため V_n が区間 n (負荷 R へ加わる電圧 V が 0 以上 E_n 未満) を満たしていなければ V_n は MPP を出力する電圧に該当しない. このように確認を行い, 電圧の設定範囲を満たした V が熱電発電システムにおける MPP を出力する電圧となる.

2.2 計算手順

一例としてモジュール列を 2 列並列に接続して熱電発電システムを構成する. 図 6 はモジュール列を 2 列並列に接続した熱電発電システムの等価回路である ($E_1 > E_2$ とする). 図 7 は 2 列のモジュール列で構成した熱電発電システムの V - I 特性を示している. モジュール列が 2 列なので区間は 2 つ生じることから $n = 2$ として MPP を出力する際の電圧の式は以下の手順で算出する.

手順 1: $n=2$ より式 (14), 式 (15) の 2 式を作る.

(1) $0 \leq V_2 < E_2$ (図 7 中の区間 2) において

$$V_2 = \frac{E_1 + E_2 - 2V_d}{2 \times 2} \quad (14)$$

(2) $E_2 \leq V_1 < E_1$ (図 7 中の区間 1) において

$$V_1 = \frac{E_1 - V_d}{1 \times 2} \quad (15)$$

手順 2: 式 (14) と式 (15) へ値を代入し, V_1 と V_2 を算出する.

手順 3: V_2 が区間 2 ($0 \leq V_1 < E_2$), V_1 [V] が区間 1 ($E_2 \leq V_2 < E_1$) に収まるか確認し, 各区間に収まった V が熱電発電システムの MPP の出力電圧となる.

次の例として熱電発電モジュール 4 基を並列接続した熱電発電システムを想定する ($E_1 > E_2 > E_3 > E_4$ とする). モジュール列が 4 列なので $n=4$ として MPP を出力する際の電圧の式は式 (16) ~ 式 (19) の 4 式が出来る.

(1) 区間 4 ($0 \leq V_4 < E_4$)

$$V_4 = \frac{E_1 + E_2 + E_3 + E_4 - 4V_d}{4 \times 2} \quad (16)$$

(2) 区間 3 ($E_4 \leq V_3 < E_3$)

$$V_3 = \frac{E_1 + E_2 + E_3 - 3V_d}{3 \times 2} \quad (17)$$

(3) 区間 2 ($E_3 \leq V_2 < E_2$)

$$V_2 = \frac{E_1 + E_2 - 2V_d}{2 \times 2} \quad (18)$$

(4) 区間 1 ($E_2 \leq V_1 < E_1$)

$$V_1 = \frac{E_1 - V_d}{1 \times 2} \quad (19)$$

式 (16) ~ (19) に値を入れ, $V_1 \sim V_4$ を算出して V_1 が区間 1 ($E_2 \leq V_1 < E_1$), V_2 が区間 2 ($E_3 \leq V_2 < E_2$), V_3 が区間 3 ($E_4 \leq V_3 < E_3$), V_4 が区間 4 ($0 \leq V_4 < E_4$) に収まるか確認する. この中で各電圧区間に収まる電圧が熱電発電システムの MPP を出力する電圧となる.

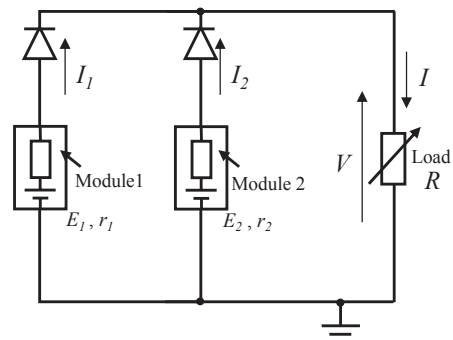


Fig.6 Diagram of thermoelectric generation system.

図 6 熱電発電システムの構成図

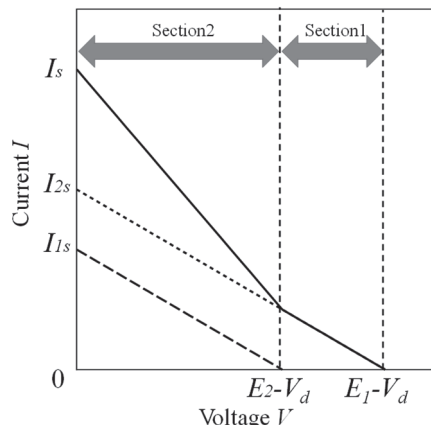


Fig.7 V-I characteristic of thermoelectric generation system.

図 7 熱電発電システムの V-I 特性

3. シミュレーションによる精度の確認

3.1 シミュレーションの内容

本節では 2 節の理論の精度についてシミュレーションによる確認を行った結果を示す。シミュレーションソフトには LT-spice を用いた。図 8 にシミュレーションで使った回路を示す。シミュレーション回路のモジュール列は熱電発電モジュールを 2 つ直列接続して構成した。熱電発電システムは、このモジュール列を 2 列並列に接続して構成した。表 1 にシミュレーションで使った各熱電発電モジュールの内部抵抗や電圧を示す。熱電発電モジュールの内部抵抗や電圧は実験で使用する熱電発電モジュール (株式会社高木製作所 SU-05B) 4 個の値を使った。

シミュレーションでは Module1 と Module2 の列と Module3 と Module4 の列を構成し、まず Module1 を 100℃、他の Module は 190℃ に設定してシミュレーションを行った。そして負荷 R を変化させて負荷 R へ加わる電圧 V 毎の回路電流 I をシミュレートして発電電力 P を算出した。次に Module1 を 30℃、その他の Module は 190℃ に設定して同様にシミュレーションを行った。

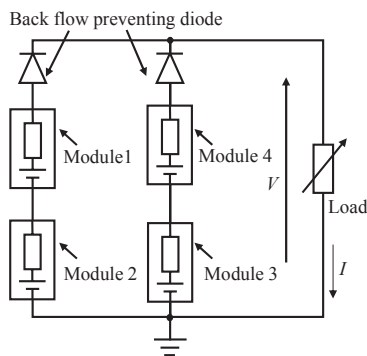


Fig.8 Architectonics of simulation circuit.

図 8 シミュレーション回路の構成

表 1 各熱電発電モジュールの設定値⁽¹²⁾

Table.1 Setting value of each TEM.

		V [V]	r [Ω]
Module1	100℃	2.932	2.646
	30℃	0.295	2.305
Module2		5.872	2.907
Module3		5.656	2.831
Module4		5.596	2.722

3.2 シミュレーション結果の考察

Module1 と Module2 が接続されたモジュール列の開放電圧を E_2 、Module3 と Module4 が接続されたモジュール列の開放電圧を E_1 とする。列数は 2 なので式 (14) と式 (15) を使用して以下の 2 区間を考える。

(1) 区間 2: 負荷 R へ加わる電圧 V が 0 以上 E_2 未満

(2) 区間 1: 負荷 R へ加わる電圧 V が E_2 以上 E_1 未満

区間 1 において発電電力 P が最大になるときの電圧を V_1 、区間 2 において発電電力 P が最大になるときの電圧を V_2 とする。開放電圧 E_1 と E_2 、 V_d を代入する。シミュレーションは Module1 の加熱温度が 100℃の場合と 30℃の場合で行った。それぞれの場合について考える。

まず Module1 の加熱温度が 100℃の場合、表 1 から $E_2 = 2.93 + 5.87 = 8.80$ V, $E_1 = 5.66 + 5.60 = 11.25$ V である。 $V_d = 0.70$ V とすると式 (14) と式 (15) から V_1 と V_2 は式 (20) と式 (21) のように算出できる。

$$V_2 = \frac{(8.80 + 11.25 - 2 \times 0.70)}{4} = 4.66 \text{ V} \quad (20)$$

ただし $0 \leq V_2 < 8.80$ V.

$$V_1 = \frac{11.25 - 0.7}{2} = 5.28 \text{ V} \quad (21)$$

ただし $8.80 \text{ V} \leq V_1 < 11.25 \text{ V}$.

計算結果より $V_2 = 4.66$ V のみが適当である。そのため Module1 の設定温度が 100℃の場合、熱電発電システムの発電電力 P が最大になる電圧は 4.66 V である。

図 9 は V-I 特性のシミュレーション結果を示している。また、図 10 は熱電発電システムの発電電力 P と負荷 R に加わる電圧 V の関係を示した V-P 特性のシミュレーション結果を示している。図 9 において Module1 の設定温度が 100℃及び 30℃の時、 $E_2 - V_d$ の付近で I の傾きが変化している。これは負荷 R へ加わる電圧 V が E_2 を超え、Module1 と Module2 のモジュール列が熱電発電システムから離れたためである。図 10 においても Module1 の設定温度が 100℃及び 30℃の時、 $E_2 - V_d$ の付近で熱電発電システムの発電電力 P の傾きが変化している。また、図 10 から熱電発電システムの発電電力 P が最大になる電圧 V は 4.61 V であることが分かった。シミュレーションで算出した熱電発電システムの発電電力 P が最大になるときの負荷 R に加わる電圧 V を真値として、計算式で導出した熱電発電システムの発電電力 P が最大になるときの負荷 R に加わる電圧 V の誤差を求めると式 (22) のような結果となった。式 (22) から誤差 1%程度と正確に熱電発電システムの発電電力 P が最大になるときの負荷 R に加わる電圧 V を算出することができたことが分かる。

$$\frac{4.66 - 4.61}{4.61} \times 100 = 1.08 \% \quad (22)$$

次に Module1 の設定温度が 30℃の場合、表 1 から $E_2 = 0.30 + 5.87 = 6.17$ V, $E_1 = 5.66 + 5.60 = 11.25$ V である。また、 $V_d = 0.70$ V とすると式 (14) と式 (15) から V_1 と V_2 は式 (23) と式 (24) のように算出できる。

$$V_2 = \frac{(6.17 + 11.25 - 2 \times 0.70)}{4} = 4.01 \text{ V} \quad (23)$$

ただし、 $0 \leq V_2 < 6.17$ V.

$$V_1 = \frac{11.25 - 0.7}{2} = 5.28\text{V} \quad (24)$$

ただし $6.17\text{V} \leq V_1 < 11.25\text{V}$.

したがって、 V_1 は不適であり $V_{R2} = 4.01\text{V}$ のみが適当である。そのため Module1 の設定温度が 30°C の場合において熱電発電システムの発電電力 P が最大になるときの電圧は 4.01V である。また、シミュレーション結果から熱電発電システムの発電電力 P が最大になるときの負荷 R に加わる電圧 V は 3.93V であることが分かった。シミュレーションから算出した熱電発電システムの発電電力が最大になるときの負荷 R に加わる電圧 V を真値として、計算式から導出した熱電発電システムの発電電力 P が最大になるときの負荷 R に加わる電圧 V の誤差を求めると式 (25) のような結果となった。

$$\frac{4.00 - 3.93}{4.00} \times 100 = 2.01\% \quad (25)$$

式 (25) から誤差が 2% 程度となり正確に熱電発電システムの発電電力 P が最大になるときの負荷 R に加わる電圧 V を算出することができた。

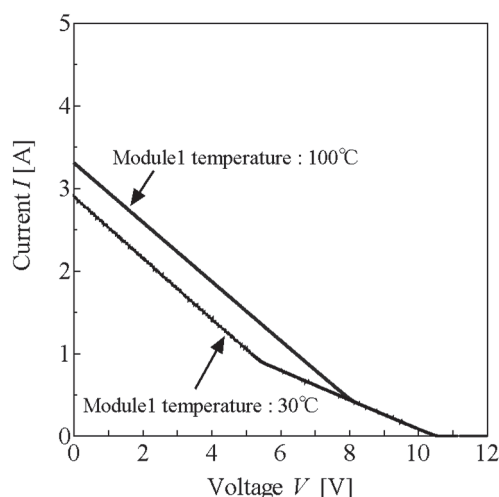


Fig.9 Simulation result of V-I characteristic.

図 9 V-I 特性のシミュレーション結果

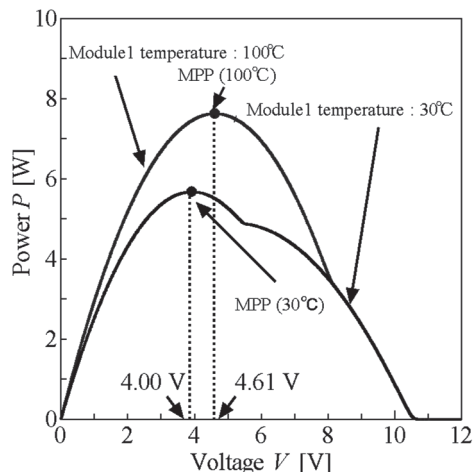


Fig.10 Simulation result of V-P characteristic.

図 10 V-P 特性のシミュレーション結果

4. 実験による確認

本節では 2 節で示した設定で実際に実験を行い、V-I 特性と V-P 特性結果を確認した結果を示す。実験では図 8 の回路を市販の熱電発電モジュール (株式会社高木製作所製 SU-05B) を 4 つ、熱電発電モジュールを加熱するためのヒーターを 4 つ、熱電発電モジュールが出力した電流と電圧を測定する電流計と電圧計 (岩通通信機株式会社製 VOAC7521H)、逆流防止ダイオード (SB540)、及び電子負荷 (菊水電子工業株式会社製 PLZ-1007H) で構成した。図 11 は実験に用いた実験装置と測定回路を示している。実験ではヒーターを用いて熱電発電モジュールの高温側をシミュレーション条件と同様に 30°C と 100°C で加熱した。熱電発電モジュールの低温側は 21°C の水道水で常時冷却し、熱電発電モジュールへ一定の温度差 ΔT を与えて発電させた。ここで熱電発電モジュールの温度差 ΔT はヒーター温度と冷却水温度の温度差から導出した。そして、図 8 中の抵抗負荷の値を変化させて負荷 R に加わる電圧 V と回路電流 I を測定し、この結果から熱電発電モジュールの V-I 特性と V-P 特性結果を確認した。

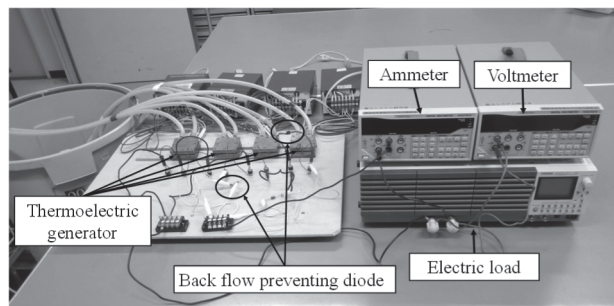


Fig.11 Experimental circuit.

図 11 実験回路

実験の結果、Module1 のヒーター設定温度が 30°C の時の Module1 と Module2 が接続されているモジュール列の開放電圧は $E_1 = 6.72\text{V}$ 、Module3 と Module4 が接続されているモジュール列の開放電圧は $E_2 = 11.82\text{V}$ となった。したがって熱電発電システムの発電電力 P が最大となる電圧は 4.29V となる。図 12 に V-I 特性、図 13 に V-P 特性を示す。図 12 からシミュレーションと同様に E_2 付近で回路電流 I の傾きが変化しており、図 13 から熱電発電システムの発電電力 P は 4.50V 付近で 6.74W と最大となることが分かる。また、Module1 のヒーター設定温度が 100°C の時の Module1 と Module2 が接続されたモジュール列の開放電圧は $E_1 = 9.32\text{V}$ 、Module3 と Module4 が接続されたモジュール列の開放電圧は $E_2 = 11.78\text{V}$ となったことから熱電発電システムの発電電力 P が最大となる電圧は 4.93V となる。図 12 から熱電発電システムの発電電力 P は 5.00V 付近で 8.90W で最大となることが分か

る。なお、実験の値は 15℃の水道水を用いて測定されたが、シミュレーションで使用した表 1 の値は水温 22℃の水道水を用いて測定された。そのため水道水温度の違いにより開放電圧の値に差が生じ、実験の結果とシミュレーションの結果に差が生じている。しかし、傾向は概ね同様のものであり、かつ、両者の MPP は正確に予想できているため提案方式が妥当であることを確認した。

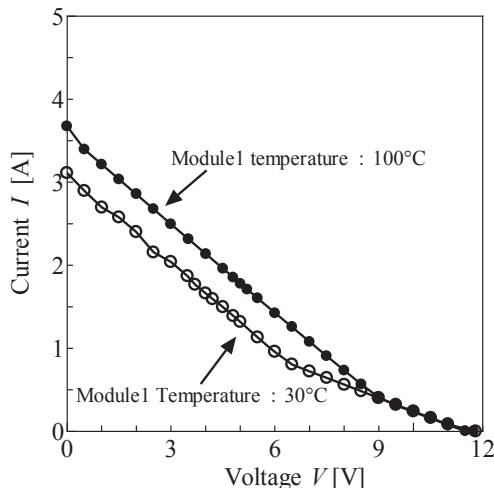


図 12 V-I 特性の実験結果

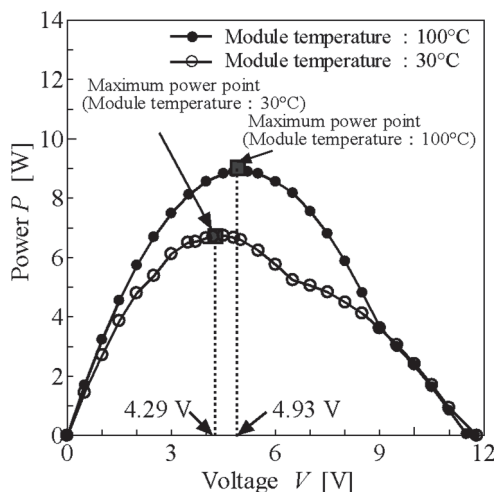


Fig.13 Experimental result of V-P characteristic.

図 13 V-P 特性の実験結果

5. まとめ

本論文では熱電発電システム内の MPPT 制御の指標として各熱電発電モジュールの開放電圧のみを使用した MPPT 制御の方法を提案した。そして以下の知見を得た。

- (1) 熱電発電モジュールの開放電圧を測定することで熱電発電システムの発電電力が最大になるときの負荷 R に加わる電圧を算出した。
- (2) シミュレーションを行って開放電圧を指標とした熱電発電システムの発電電力が最大になるときの負荷 R に加わる電圧を調査した。そして算出した結果と比較した。その結果、誤差 2%程度で熱電発電システ

ムの最大出力を算出した。

- (3) 実験を行い、開放電圧を指標とした熱電発電システムの発電電力が最大になるときの負荷 R に加わる電圧を調査した。その結果、正しく熱電発電システムの MPP を予想できることを確認した。
- (4) 本論文の提案手法は各モジュールの内部抵抗が互いにほぼ同じ場合に適用できる。実際の熱電発電システムにおいて r のばらつきが本手法を用いた場合に MPP の推定精度に与える影響は今後の検討を要する。

6. 謝辞

本研究は宮崎大学名誉教授 大坪昌久氏、及び宮崎大学大学院農学工学総合研究科博士後期課程学生平田拓也氏の協力により実施された。関係の皆様に謝意を表する。

7. 参考文献

- (1) 新藤尊彦, 中谷祐二郎, 大石高志, 未利用エネルギーを有効に活用する熱電発電システム, 東芝レビュー, 63-2, (2008) 7-10.
- (2) Changwei Liu, Pingyun Chen, Kewen Li, A 1KW Thermoelectric Generator for Low-temperature Geothermal Resources, PROCEEDINGS, Thirty-Ninth workshop on geothermal reservoir engineering, (2014-2), 1-12, California, USA.
- (3) 梶川武信, 熱電変換システム総覧, (2004), 252-257, リアライズ理工センター, 東京.
- (4) Shiho Kim, Soonseo Park, Sunkook Kim, Seok-Ho Rhi, A Thermoelectric Generator Using Engine Coolant for Light-Duty Internal Combustion Engine-Powered Vehicles, Journal of electronic materials, 40-5 (2011), 812-816.
- (5) 海部宏昌, 梶原健, 藤本慎一, 牧野一也, 八馬邦邦, 熱電発電による工場廃熱回収, コマツ技報, 57-164, (2011), pp.26-30.
- (6) 梶川武信, 自然エネルギー利用システムの可能性, 技術総合誌 OHM, 98-2, (2011.2), 31-34.
- (7) トヨタ自動車株式会社, 熱発電装置, 特許公開 2008-34940 (2008).
- (8) Andrea Montecucco, Andrew R. Knox, Maximum Power Point Tracking Converter Based on the Open-Circuit Voltage Method for Thermoelectric Generators, IEEE Transactions on power electronics, 30-2, (2015), 828-839.
- (9) 永吉浩, 梶川武信, 最大電力制御方式, 特許公開 2010-41903 (2010).
- (10) 永吉浩, 梶川武信, 最大電力動作追尾制御方式, 特許公開 2008-22688 (2008).
- (11) 山田洋明, 花本剛士, 石山俊彦, 坂口直志, 高橋剛, 温度検出による熱電発電用 MPPT 制御法の検討, パワーエレクトロニクス学会誌, 36, (2011), 151-156.
- (12) Tomoko Ishitsu, Masatoshi Oku, Daisuke Tashima, Noriyuki Hayashi, Improvement of Output Characteristic of Thermoelectric Generation System by Using a Diode Bypass Circuit, ICEE2015, (2015), A-186, Hong Kong China.
- (13) Masatoshi Oku, Daisuke Tashima, Tatsuya Sakoda, Noriyuki Hayashi, Compensation of output power characteristics of a partly-malfunctioned thermoelectric generator system by using a diode bypass circuit, ICEE2014, (2014), 384-389, Jeju, Korea.
- (14) 奥将俊, 石津智子, 田島大輔, 林則行, 熱電発電システム内の熱電発電モジュール出力不均衡時における出力特性, 04-2P-08, 平成 26 年度 電気・情報関係学会九州支部連合大会講演論文集, (2014), 472, 鹿児島.
- (15) 奥将俊, 山口昂平, 田島大輔, 林則行, ダイオードバイパス回路による故障した熱電発電モジュールの出力補償特性, 7-043, 平成 26 年電気学会全国大会, (2014), 68-69, 愛媛.