実天候条件を用いた太陽光発電システムの新しいシミュレーション方法及びその応用例

学生員 朴 敏 遠 終身会員 松 浦 虔 士 (大阪大学)

学生員 山 下 博 史 正員 道 平 雅 一 (神戸高専)

A Novel Simulation Method for PV Power Generation System using Real Field Weather Condition and its Application

Minwon Park, Student Member, Kenji Matsura, Life Member (Osaka University)

Hiroshi Yamashita, Student Member, Masakazu Michihira, Member (Kobe City College of Technology)

In order to verify the efficiency or availability and stability of photovoltaic generation systems, huge system apparatuses are needed, in general, in which an actual size of solar panel, a type of converter system and some amount of load facilities should be installed in a particular location. It is also hardly possible to compare a MPPT control scheme with others under the same weather and load conditions in an actual PV generation system. The only and a possible way to bring above-mentioned problem to be solved is to realize a transient simulation scheme for PV generation systems using real weather conditions such as insolation and surface temperature of solar cell. The authors, in this paper, introduce a novel simulation method, which is based on EMTP and EMTDC, for PV generation systems under the real weather conditions. Firstly, VI characteristic equation of a solar cell is simulated and implemented, and then the real data of weather conditions are interfaced to EMTP and EMTDC program using Fortran program interface method. The outcome of the simulation demonstrates the effectiveness of the proposed simulation scheme. The result shows that the cost effective verifying for the efficiency or availability and stability of PV generation systems and the comparison research of various control schemes like MPPT under the same weather conditions are possible.

Key words: Photovoltaic generation system, EMTP, ATP, EMTDC, VI characteristic equation, Simulation

1. まえがき

近年、太陽光発電、風力発電、燃料電池の3つが、環境負荷の少ない新しいエネルギー源としてもっとも熱い脚光を浴びている。太陽光発電の場合、導入支援、規制の合理化、技術開発そして標準化など、国としても「新エネルギー大綱」を策定し、太陽光発電システムの導入促進を推し進めてきた結果、日本で一番普及が進んでいる新エネルギー源となっている。太陽光発電は、クリーンで無公害であり、放棄エネルギーが有効利用できるなど様々な長所がある。しかしながら、太陽光発電の発電電力量は、天候条件に強く依存するという本質的な問題がある。これを解決し、効率良く電力を得るためには最大電力追従制御が不可欠となり、また、交流負荷への連系を考える場合、太陽光発電から得られた直流電力を交流電力へ変換するインバータが必要となる。このように制御装置や電力変換装置、太陽電池モジュールを必要とする太陽光発電システムは、実用化はもちろんのこと研究段階においても実験的に検証を行おうとすればかなりの費用がかかることになる。特に研究段階では、太陽電池の種類や規模、インバータの構成、最大電力追従制御方式など様々な組み合わせが考えられ、それぞれについてシステムを製作し、安定性や効率などの評価

をしなければならない。また、制御方式など新たな提案を行った場合、その有効性を明らかにするには従来方式との比較検討が必要となるが、同じ天候条件で比較検討を行おうとすれば、同一規格の装置を最低でも2台以上準備しなければ同時に実験を行い評価することは不可能である。このように、信頼性の高い実験、評価を行うにはかなりの設備投資が要求され、決して経済的であるとはいえない。

そこで、実験に代わる評価方法としてシミュレーション解析がある。シミュレーション手法は主にその使用する目的によって、定常状態シミュレーションと過渡現象シミュレーションに別けられる。定常状態シミュレーションは、実際の天候データを瞬時値として取り扱うのではなく、短くても10分程度の期間でこれらを積算し、その積算値を環境データとして用いるもので太陽光発電システムの提案や経済的評価⁽¹⁾、デザインや規模の評価⁽²⁻³⁾などを目的としている。この手法は、広く普及しており多くの研究報告もなされている。しかしながら、この手法では積算期間内に実際に天候が急変したとしても考慮されないため、MPPT制御の提案や追従性、制御性などの評価はできない。これらを実評価するには、天候条件を秒単位で取り扱う過渡状態シミュレーションが不可欠なる。太陽光発電システムにおいて、MPPT制御を含む制御方式の検討は、システムの高効

率化や性能を評価する上で重要であるにも関わらず、現在のところ過渡状態シミュレーションに関する報告はほとんどないと言っても過言ではない。そこで、著者らは太陽光発電システムの制御性や系統への影響等の評価を可能にするため、太陽電池の詳細なモデル化を提案し、天候条件の瞬時値を用いる新しい過渡状態シミュレーション法を提案した^(4,5)。(以後、本稿で記述する実天候条件とは環境データの瞬時値を示す)この特徴は、太陽電池を特性方程式を用いて詳細にモデル化することにより、太陽光発電容量や太陽電池の種類(単結晶或多結晶など)を自由に設定できるようにしたところである。また、過渡的に変化する実際の天候条件をデータとして読み込み、そのデータからシミュレーションを行うことで、最も現実に近い太陽光発電システムの過渡現象解析を実現させた。さらに、シミュレーションツールとしては、電力システムの過渡現象解析プログラムとしてもっとも信頼性が高いとされている EMTP 型シミュレータ⁽⁶⁾である EMTF/ATP⁽⁷⁾、EMTDC⁽⁸⁾を用いている。これらのツールを使用したのは、過渡現象解析プログラムとして一般性が強いこと、太陽光発電システムの系統への影響など発電から系統までのトータルな解析が行えることが大きな理由である。本論文では、提案するシミュレーション方法を示し、得られた解析結果と実験結果との比較検討を行いその妥当性について述べる。また、最大電力追従制御方式や電力変換装置の構成を変化させ、得られた結果を示すとともに、提案シミュレーション方法の汎用性と有効性について述べる。

2. 太陽電池の電圧電流特性方程式のモデル化

<2.1>電圧電流特性方程式 単一太陽電池セルの電圧電流特性方程式を正確に定義するのは難しく、最も一般化されているのは式(1)⁽⁹⁻¹⁰⁾である。式(2)は飽和電流を示す。

$$I = I_{sc} - I_{os} \left\{ \exp \left[\frac{q \cdot (V + I \cdot R_s)}{n \cdot k \cdot T} \right] - 1 \right\} - \frac{V + I \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

$$I_{os} = AT^\gamma \exp \left(\frac{-E_g}{n \cdot k \cdot T} \right) \quad (2)$$

$$I_{sc} = B \cdot s \quad (3)$$

ここで、 I = 太陽電池セルの出力電流[A]、 I_{sc} = 短絡電流[A]、 I_{os} = 飽和電流[A]、 s = 日射強度[kW/m²]、 q = 電子の電荷量; 1.6e-19[C]、 k = ボルツマン定数; 1.38e-23 [J/K]、 T = 太陽電池 PN 接合部分温度[°K]、 n = 接合定数、 A = 飽和電流温度係数、 B = 日射強度 1.0kW/m²での短絡電流レベル、 γ = 温度依存度、 E_g = エネルギーギャップ[eV]、 V = 太陽電池セルの出力電圧[Volt]、 R_s = 直列寄生抵抗[Ω]、 R_{sh} = 並列寄生抵抗[Ω]である。

表 1 本稿で用いた太陽電池セルの特性パラメータ

Table 1 Characteristic parameters of the solar cell used

n	1.5	γ	3	A	9.0e-2	E_g	1.103eV
R_s			0.028 Ω		R_{sh}		1k Ω
V_{oc} at 25°C			0.58 Volt		B		3.0

表 1 は、本稿で用いた多結晶シリコン太陽電池セルの特性パラメータである。これらの特性パラメータは、実際に使用する太陽電池セルの数値に書き変えるだけで様々な太陽電池セルを模擬することができる。

<2.2>EMTF/ATP および EMTDC を用いた太陽電池電圧電流方程式のモデル化 電力システムのシミュレーションツールには、電源として電圧源と電流源が備わっている。しかしながら、太陽光発電システムのシミュレーションを考えた場合、電源となる太陽電池は、電圧源とも電流源とも言えない電圧電流特性となるため、新たなモデル化が必要となる。そこで、図 1 に示すような太陽電池の電圧電流特性方程式を用いた新しい太陽電池のモデルを提案する。

図 1 太陽電池モジュールのシミュレーション概念図

Fig. 1 Image diagram of simulation for a solar module

図 1 から、 E_d = 太陽電池セルの理想出力電圧[Volt]、 E_{d-all} = 太陽電池モジュールの理想出力電圧[Volt]、 I_d = 太陽電池セルの理想出力電流[A]、 I_{d-all} = 太陽電池モジュールの理想出力電流[A]、 V_{out} = 太陽電池モジュールの出力電圧[Volt]、 I_{out} = 太陽電池モジュールの出力電流[A]、 N_{sh} = セルの並列数、 N_s = セルの直列数、 R_{s-all} = モジュール全体直列寄生抵抗[Ω]、 R_{sh-all} = モジュール全体並列寄生抵抗[Ω]、 R = 外部負荷である。図 1 の寄生抵抗分を除いた単一太陽電池セルの理想 P-N 接合太陽電池の VI 特性非線型方程式は式(4)で示す。

$$I_d = I_{sc} - I_{os} \left\{ \exp \left[\frac{q}{n \cdot k \cdot T} \cdot E_d \right] - 1 \right\} \quad (4)$$

本論文では、パラメータである日射強度、太陽電池表面温度及び I_{d-all} から得られた I_d を式(4)に代入し、 E_d を計算する。その E_d から E_{d-all} を計算し、それを EMTF/ATP や EMTDC の GUI (Graphic User Interface) 上で、電圧源として用いる。一計算刻み毎に電流(I_d)を含むパラメータを電圧(E_d)に反映させるため、正確には一計算刻み分、電圧の応答は遅れるが、遅れは回路応答に比べ非常に短いため、影響は無視できる。すなわち、図 1 の A-B 端子間電圧と電流が、太陽電池モジュールの出力となる。

<2.3>実天候条件の使用 EMTF/ATP や EMTDC などの電力システム用の過渡現象デジタルシミュレーションツールを用いた太陽光発電システムのシミュレーションでは実際の天候条件を模擬することは不可能である。そのため天候条件などの外部パラメータが必要なシミュレーションで

は信頼性が低いと言える。そこで、提案シミュレーション方法ではフォートラン言語とのインターフェース方法を導入し、ノンリニアな外部パラメータすなわち実天候条件を EMTF/ATP 及び EMTDC に読み込ませることにした。この結果、実データの天候条件を用いた太陽光発電システムのシミュレーション解析がはじめて実現されることになった。

図2は EMTDC を用いる提案した非線形な外部パラメータを考慮したシミュレーション方法のフローチャートである。実際に測定した日射強度、表面温度のデータは、フォートラン言語とのインターフェース方法を用いて、シミュレーション内部に読み込ませる。よって、日射強度などの実データを用いたシミュレーション解析が可能となる。EMTP/ATP の場合も同じ概念図であるが、EMTDC とは異なる OS を使用するため PC だけですべて動作が可能となる。

図2 EMTDCで実天候条件を用いるための概念図
Fig. 2 Simulation diagram on EMTDC using real weather condition

＜2.4＞日射強度データの再構成 既に知られているように測定された日射強度のデータは式(5)のように使用する日射計の種類によって異なるが特性応答性によって歪みを受ける。

$$RI(s) \frac{G}{1+sT} = MI(s) \quad (5)$$

図3 日射強度データの再構成
Fig. 3 Reformation of the insolation data

ただし、 $RI(s)$ =実際の日射強度、 $MI(s)$ =測定された日射強度、 G =日射計のゲイン定数、 T =時定数である。本研究で用いた日射計⁽¹¹⁾の応答速度が 17 秒であるため、パラメータは $G=1.0$ 、 $T=5.67$ である。

太陽電池の出力は実日射強度 $RI(s)$ によってダイナミックに変化するため、測定された $MI(s)$ によるシミュレーション解析は本来の過渡解析とは異なる。シミュレーションでは式(5)を逆変換し、 $MI(s)$ から求めた $RI(s)$ を使用した。図3に日射計から測定されたデータと再構成した実日射強度データを示す。このように再構成することにより日射強度のダイナミックな変化を捉えることができる。本研究のシミュレーションで使用した日射強度データは、全て式(5)により再構成したものである。

3. 太陽電池に関する解析結果

<3.1>用いた太陽電池アレイと測定装置 実際のデータを測定するために設置した太陽電池アレイの仕様を表2に示す。ただし、セル単体の特性は表1に示すものである。また測定を行うための測定装置の概略を図4に示す。本研究では、これらの装置を用いて実験を行っている。

表2 設置された太陽電池アレイの規模
Table 2 Size of the established PV array

A panel = 36 cells in series	$V_{oc-array}$	120V	$I_{sc-array}$	6A
An array = ($N_s=216$, $N_{sh}=2$)	Fill Factor	62.9%	Rated Power	445W
6 panels in series $\times$ 2 in parallel

図4 測定装置の概念図

Fig. 4 Diagram of the measurement apparatus

<3.2>天候条件と太陽電池アレイの出力変化 提案した太陽電池のモデル化の妥当性を確認するために、まずは設置した太陽電池アレイの出力電圧、電流の測定を行った。測定条件として、太陽電池アレイの出力端子に電子負荷装置を接続し、50 秒間負荷を変化させたときの出力電圧、電流をアナログ/デジタルコンバータからパソコンにより測定、データ化した。電子負荷装置による負荷アドミタンスの変化は図5に示す通りである。

図5 電子負荷装置による負荷アドミタンスの変化

Fig. 5 Changed admittance of load by electric load

また、このとき日射強度、太陽電池の表面温度も 50 秒間測定している。その結果は図 6 に示す。

図6 太陽電池パネルの表面温度と日射強度

Fig. 6 Module surface temperature of PV panel and insolation

図7 太陽電池アレイの出力電圧、電流の比較

Fig. 7 Voltage and current curves by real apparatus and simulation

図8 電圧電流特性曲線

Fig. 8 Voltage-current characteristics curves

<3.3>シミュレーション結果との比較検討 図6に示す日射強度、表面温度の測定データを式(4)に代入、また図5に示す負荷アドミタンスの測定データは図1の外部負荷Rのアドミタンスとして入力し、50秒間のシミュレーション解析を行った。シミュレーションのサンプリング時間は40μs、データの入力サンプリング周期は100Hzである。図7、8に測定結果とシミュレーション結果を示す。図7は、太陽電池アレイの出力電圧、電流であり、図8はそれらの結果から得られたVI特性である。これらの図から明かなように測定結果とシミュレーション結果はよく一致しており、提案した太陽電池のモデル化と実データを用いたシミュレーション方法から得られる解析結果の妥当性は確認されたものと言える。尚、紙面の都合上、解析結果の一例を示すにとどまっているが、様々な条件下での比較検討も行っており、これらもよく一致した結果が得られている。

4. DC-DC コンバータを用いた太陽光発電システムの出力特性

<4.1> DC-DC コンバータを用いた太陽光発電システム この章では、電力変換装置により出力制御を行った時の太陽電池アレイの動作及び出力特性を確認するため、図9に示す太陽光発電システムを構築し検討を行う。電力変換装置としてDC-DCコンバータを適用し、太陽電池アレイの出力端子に接続する。制御は、このDC-DCコンバータで太陽電池出力電圧一定制御⁽¹²⁾を行うものとする。また、負荷は単独負荷を想定している。使用した回路定数、制御条件は表3に示す通りである。次に、実験及びシミュレーションで用いた天候条件は図10に示した50秒間である。出力電圧一定制御の応答も確認するため、厚い雲が設置している太陽電池アレイの上空から去って行き、日射強度に急激な変動が起こった期間を選択した。

図9 DC-DC コンバータを用いた太陽光発電システム

Fig. 9 Diagram of the PV power system using DC-DC converter

表3 回路定数及び制御条件

Table 3 Circuit parameters and control condition

PWM switching frequency		10kHz	
Control of the output voltage of PV array		80 Volt constant	
C1	10mF	C2	5μF
L	0.8mH	R	45Ω
Simulation sampling frequency		10μs	
Cycle of the real weather condition input data		100Hz

図 10 急激な日射強度変動を伴った実天候条件

Fig. 10 Real weather condition with the fluctuation of insolation

<4.2> 実験結果とシミュレーション結果の比較検討

図 9 で示したシステム、図 10 で示した天候条件下で出力電圧一定制御（出力電圧を 80[Volt] に設定）を行った実験結果及びシミュレーション結果を図 11、図 12 に示す。図 11 は、太陽電池アレイの出力電圧波形、図 12 は太陽電池アレイの出力電流波形である。出力電圧波形からわかるように、実験結果、シミュレーション結果ともに 80[Volt] に制御がなされており、DC-DC コンバータが正常に動作していることが確認できる。また、出力電流波形から、日射強度の変化とともに出力電流が増加している現象が確認でき、その現象は実験結果とシミュレーション結果はよく一致している。

図 11 太陽電池アレイの出力電圧波形

Fig. 11 The output voltage curves of PV array

図 12 太陽電池アレイの出力電流波形

Fig. 12 The output current curves of PV array

しかし、図 12 の拡大波形を見ると、微妙に 2 つの波形に誤差が生じている。これは、設置した太陽電池アレイの面積（6 m²）と日射計センサー部の面積（6 cm²）の面積差による雲陰の消去時間の差、つまり、実際に太陽電池ア

レイが受けた日射強度とセンサー部で感じた日射強度との時間差による誤差と考えられるため、本質的な問題ではないといえる。以上の結果より、電力変換装置と出力制御を含むシステムに対しても提案したシミュレーション方法及び太陽電池アレイのモデル化により良好な解析結果が得られることが確認された。

5. 太陽光発電系統連系システムの特性解析

<5.1> 系統連系システムとシミュレーション条件

この章では、妥当性が確認された提案シミュレーション法を用いて、太陽光発電系統連系システムについて動作解析を行う。ここでは、系統連系を行った太陽光発電システムに対して、最大電力追従制御を行った時の動作解析、異なる制御方式を用いた時の動作の違いなどについて検討を行う。図 13 にシミュレーション解析に用いた系統連系太陽光発電システムの概念図を示す。電力変換装置は、交流出力をするために DC-AC コンバータ（系統連系用インバータ）とした。ここで、 I_{pv} = 太陽電池アレイの出力電流、 V_{pv} = 太陽電池アレイの出力電圧、 P_{pv} = 太陽電池アレイの出力電力、 V_{ref} = MPPT 制御からのレファレンス電圧、 I_o = コンバータの出力電流、 V_o = コンバータの出力電圧、 I_{rms} = 指令値電流レベル、 I_{ref} = 指令値電流、sw1 = 分散電源側スイッチ、sw2 = 系統側スイッチである。

図 13 太陽光発電系統連系システムの概念図

Fig. 13 Diagram of the PV power system with grid connection

表 4 シミュレーション条件および回路パラメータ

Table 4 Simulation condition and circuit parameters

PV Array	13 panels in series × 2 in parallel ($N_s=468$, $N_{sh}=2$, Rated power=900W)		$V_{oc-array}$	250 Volt
			$I_{sc-array}$	6 A
Simulation Parameters	Simulation time period : 5 sec		Calculation sampling time	1 μ sec
	Data input cycle : 100 Hz			
DC-AC Converter and MPPT	PWM switching frequency		10 kHz	
	Power comparison MPPT control (Control cycle 20Hz)		A-1	$\Delta V = 2$ Volt
			A-2	$\Delta V = 5$ Volt
	Constant voltage control		B	200 Volt
DC and AC Filter	C1	8000 μ F	L1	1 mH
	C2	2 μ F	L2	7 mH
Utility network	Voltage of utility power network		AC 100 Volt	
	Frequency of utility power network		60 Hz	

表4は、シミュレーション条件及び回路定数である。また、天候条件は図14に示す。

図14 シミュレーション上で用いた実天候条件
Fig. 14 Real field weather condition used in the simulation

<5.2> シミュレーション解析結果 今回、最大電力追従制御としては、制御系が簡単で安定性が高いとされる一定電圧方式と最も一般化された山登り方式⁽¹³⁻¹⁴⁾の2方式を取り上げ、それぞれについて解析を行った。表4に示すように、山登り方式は制御周期 20Hz で電圧変化量を 2[Volt]、5[Volt]とした時、一定電圧方式は 200[Volt]一定とした時の解析を行った。図15、図16に太陽電池アレイの出力電力と電圧電力(PV)特性を示し、図17にインバータの出力電流波形を示す。

図15 MPPT制御による太陽電池アレイの出力電力推移
Fig. 15 Output power curves of PV array by MPPT controls

図16 MPPT制御による太陽電池アレイの電圧電力特性
Fig. 16 Voltage-power characteristics of PV array by MPPT controls

図17 MPPT制御によるインバータ出力電流特性
Fig. 17 Output current characteristics of converter by MPPT controls

図15から、一定制御方式よりも山登り方式の方が、高い電力を得られることが確認できる。図16のPV特性から、一定電圧方式は出力電圧の変動が少なく安定した動作をするが、山登り方式は、常に最大電力点に追従しようとするため出力電圧の変動が大きく現われることが確認できる。これらの電圧変動の影響により、図17に示すようにインバータの出力電流にも変動が生じている。以上の結果より2つの制御方式の特徴を簡単にまとめると、山登り方式は、常に最大電力点を追従するため高い電力量が得られるが、電圧変化量の選択などによって出力の電圧、電流変動が大きく現われる。これは、接続される系統から見れば安定して供給している電力に不安定要素が重畳されたことと等しくなるため、系統に対する影響を懸念しなければならない。一方、一定電圧方式は電圧、電流変動がほとんど現われないため、系統に対する影響を懸念する必要はない。しかし、最大電力点からは外れた動作電圧となるため、高い電力量を得ることはできない。このような2つの制御方式の特徴やデメリットは、これまでに行われてきた様々な研究者による報告の中で広く認知されてきていた内容と一致しており⁽¹⁵⁾、系統や制御も含んだシステムに対しても提案したシミュレーション方法により得られる解析結果の妥当性は確認されたといえる。最後に、この解析は同じ天候条件を用いて行っている。今までは、複数の同一規格の装置を準備した実験でなくてはできなかった同じ天候条件下での解析結果は得られなかったが、シミュレーションでそれを実現できたことが大きな成果の1つである。

6. むすび

本論文では、実際の天候条件を用いた太陽光発電システムの新しいシミュレーション方法を提案し、実験結果との比較検討を行った。得られた結果は以下に示す通りである。

(1)シミュレーションツールとして電力システム研究者たちの間に最も一般化されている EMTP 型シミュレータを用い、ツール上で新しい太陽電池の詳細なモデルを示した。

(2) フォートラン言語とのインターフェース法を導入することにより、ノンリニアな外部パラメータである日射強度や表面温度をデータとしてツールに読み込み、実天候条件を考慮したシミュレーション解析が行えるようになった。

(3) 実際に設置した太陽電池アレイの出力電流、電圧の測定結果とシミュレーション結果とを比較したところ、よく一致することが確認され太陽電池の詳細なモデル化の妥当性を示すことができた。

(4) 電力変換装置、最大電力追従制御、系統連系を含んだ太陽光発電システムの特性解析を行った結果、実験結果ともよく一致し、制御系の違いによる動作の特徴も捉えることが可能であることが確認された。

以上の結果より、実天候条件を用いた新しいシミュレーション方法の有効性および妥当性が確認された。提案したシミュレーション方法を利用すれば、太陽電池の種類や規模、電力変換装置、最大電力追従制御など様々な条件下での解析が容易に安価で行えることになる。そして、実際の天候条件を用いることでより現実に近いシミュレーション解析が行えることになったことが大きな成果の1つであると思われる。今後、シミュレーション解析も含め太陽光発電に関する研究開発が益々盛んに行われることを期待する。

(平成 13 年 2 月 9 日受付、平成 13 年 5 月 18 日再受付)

文 献

- [1] Francois Giraud, Ziyad M. Salameh, "Steady-State Performance of a Grid-Connected Rooftop Hybrid Wind-Photovoltaic Power System with Battery Storage", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 16, No. 1, pp.1-7, March 2001
- [2] Bogdan S. Borowy, Ziyad M. Salameh, "Methodology for Optimally Sizing the Combination of a Battery Bank and PV Array in a Wind/PV Hybrid System", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 11, No. 2, pp.367-373, June 1996
- [3] M. Muselli, G. Nottton, P. Poggi, A. Louche, "PV-hybrid power systems sizing incorporating battery storage: an analysis via simulation calculations", Renewable Energy 20 (2000) 1-7
- [4] 朴敏遠、松浦虔士、道平雅一、「実データを用いた太陽電池の新しいシミュレーション方法」、電気学会 B 部門論文誌、121 巻 2 号、平成 13 年、pp262-263
- [5] 山下博史、道平雅一、津吉彰、朴敏遠、舟木剛、松浦虔士、「太陽光発電の実データを用いたシミュレーション解析法」、平成 13 年半導体電力変換研究会 SPC-01-14、2001
- [6] 「パワーエレクトロニクスシステムのシミュレーション技術」、電気学会技術報告、第 761 号、平成 13 年
- [7] [EMTP Rule Book] Bonneville Power Administration, Route EOGB, P.O. Box 3621, Portland, Oregon, USA.
- [8] [PSCAD/EMTDC Power System Simulation Software Manual] Manitoba HVDC Research Centre
- [9] Martin A. Green "Solar Cells Operating Principles, Technology, and System Applications", 1982 by Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J. 07632
- [10] 伊賀淳、「太陽電池の照射状態の電圧-電流特性式を用いた I-V カーブ作成法とその活用」、電気学会 D 部門論文誌、116 巻 10 号、平成 8 年、pp1001-1009
- [11] 「全天日射計 MS-601、601F 取扱説明書」EKO 精機株式会社
- [12] 丁路、牧野康宏、「太陽電池の一定電圧制御に関する検討」平成 5 年電気学会全国大会 p5 - 161-5 - 162、1993
- [13] T. Kawamura et al. "Analysis of MPPT Characteristics in Photovoltaic Power System", Journal, Solar Energy Materials and Solar Cells Vol.47 pp.155-165, 1997
- [14] Tsai-Fu Wu, Chien-Hsuan Chang, Yu-Kai Chen, "A Fuzzy-Logic-Controlled Single-Stage Converter for PV-Powered Lighting System Applications", T. IEEE on Industrial Electronics, Vol. 47, No. 2, pp287-296, April 2000
- [15] 小玉博一、「太陽光発電システムと系統連係 (II)」第 10 回専門講習会テキスト、分散型電力変換システムの基礎と応用、1995

朴 敏遠

(学生員) 昭和 45 年 2 月 12 日生。平成 7 年 2 月韓国国立昌原大学校工科大学電気工学科卒業。平成 9 年 2 月、同大学修士課程修了。平成 10 年 4 月大阪大学大学院工科研究科博士前期課程入学、平成 12 年 4 月同大学博士後期課程入学、現在に至る。主に、パワーエレクトロニクス制御、分散電源システムに関する研究に従事。

松浦 虔士

(終身会員) 昭和 13 年 1 月 1 日生。昭和 37 年 3 月大阪大学大学院工科研究科博士前期修了。同年 4 月住友電気工業 (株) 入社。昭和 52 年 1 月大阪大学工学部電気工学科助教授。昭和 63 年 3 月同教授。工学博士。主に、電気エネルギーの発生・伝送・変換・制御に関する研究に従事。電気学会終身会員。

山下 博史

(学生員) 昭和 54 年 9 月 12 日生。平成 12 年 3 月神戸市立工業高等専門学校電気工学科卒業。同年 4 月神戸市立工業高等専門学校専攻科電気電子工学専攻入学、現在に至る。主に太陽光発電、パワーエレクトロニクス回路方式に関する研究に従事。電気学会学生員。

道平 雅一

(正員) 昭和 44 年 12 月 3 日生。平成 7 年 3 月神戸大学大学院工学研究科修士課程修了。平成 10 年 3 月大阪大学大学院工学研究科博士後期課程修了、同年 4 月神戸市立工業高等専門学校電気工学科助手、平成 11 年 4 月同講師、現在に至る。工学博士。主に、パワーエレクトロニクス回路方式及び制御に関する研究に従事。