

太陽光発電システム実習用教材の開発

—太陽光発電用パワーコンディショナの基礎と製作・評価—

職業能力開発総合大学校 電気システム工学科 清水 洋隆・山本 修

1. まえがき

筆者らは、太陽光発電システムに関する学習教材を開発している⁽¹⁾⁽²⁾。本教材は、一般家庭用の太陽光発電システムと商用電力系統との連系に使用するインバータシステムの設計・製作・評価を行うものである。前報では、本教材を用いた学習の流れについて述べるとともに、系統連系PWMインバータ部分の構成と設計・製作・試験における学習要素について示した⁽³⁾。

系統連系インバータとは、太陽電池のような直流電源で発生した電力を交流電力に変換し、商用電力系統のような交流電源側に供給する機能を有する装置のことである。太陽光発電システムに適用されるインバータには、系統連系インバータとしての機能以外に、太陽電池で発生した電力を最大限に引き出すための電力制御機能や、システムあるいは電力系統に異常や故障が発生した場合の保護機能などが備わっている。このような機能を有する装置をパワーコンディショナと呼び、前述の系統連系インバータと区別する。

本教材では、パワーコンディショナの機能の中の最大電力点追従（MPPT：Maximum Power Point Tracking）制御機能を、前報で報告した系統連系PWMインバータに付加することでパワーコンディショナを構成する。その動作を理解するために、ま

ずは、太陽電池の特性について学習する。続いて、太陽光発電システムをモデル化し、計算機シミュレーションにより制御の詳細を把握する。さらに、実際に製作した系統連系PWMインバータに、MPPT制御機能を実装したDSP（Digital Signal Processor）を組み合わせることでパワーコンディショナを実現し、その運転試験を通じて理解を深める。

本教材を用いた実習の最後には、ベースとなる基礎的事項や、システムの設計・製作、シミュレーションや運転試験の結果についてプレゼンテーションする。

本報では、以上の内容について詳細に述べる。

2. 太陽電池の基礎

太陽光発電用パワーコンディショナの機能を理解するためには、太陽電池の発電特性に関する基礎的な知識が必要である。ここでは、その知識について述べる。

2.1 太陽電池の発電原理⁽⁴⁾⁽⁵⁾

半導体に光などのエネルギーを与えると、半導体内部では、原子に束縛されていた電子がそのエネルギーを得て自由電子となる。また、その電子が束縛されていたところが正孔となる。その結果、半導体は導電性を持つようになる。

半導体にはp形半導体とn形半導体とがある。前

者は正孔の密度が自由電子の密度より高いもの、後者は自由電子の密度の方が正孔の密度よりも高いものをさす。これらの半導体を接合したものをpn接合と呼ぶ。pn接合内部では、正孔と自由電子の密度差によって両者の一部が移動する。このこと起因してpn接合の接合部には電界が生じる。この電界はn形半導体からp形半導体への向きを持っている。

pn接合に光が照射されると、前述のとおり、正孔と自由電子が発生する。これらは、pn接合の接合部に生じた電界によって、正孔はp形半導体に、自由電子はn形半導体にそれぞれ流れ込む。その結果、p形半導体が正に、n形半導体が負に帯電し、両者の間に電位差が生じる。この現象を光起電力効果と呼んでいる。図1に示すように、pn接合に負荷を接続すると、p形半導体側から負荷を通じてn形半導体側へ電流が流れ、エネルギーを取り出すことができる。

2.2 太陽電池の発電特性

太陽電池の発電電圧 (V_{PV}) と発電電流 (I_{PV}) との関係は、次式で表される⁽⁴⁾⁽⁶⁾。

$$V_{PV} = \frac{nk_B T N}{q} \ln \left(\frac{-I_{PV} + I_{SC} + I_0}{I_0} \right) \dots\dots(1)$$

ここで、 n はダイオード係数、 k_B はボルツマン定数 [J/K] ($=1.381 \times 10^{-23}$)、 T は絶対温度 [K]、

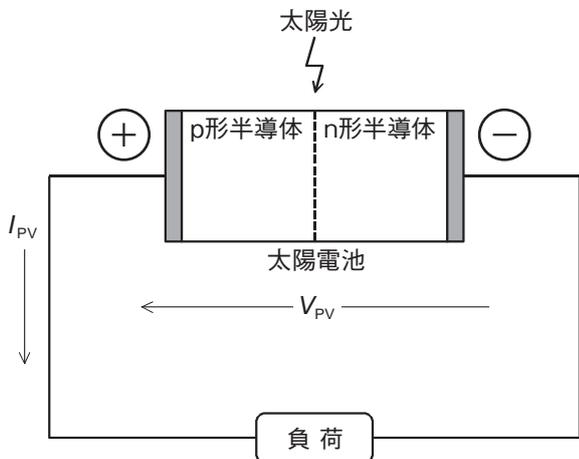
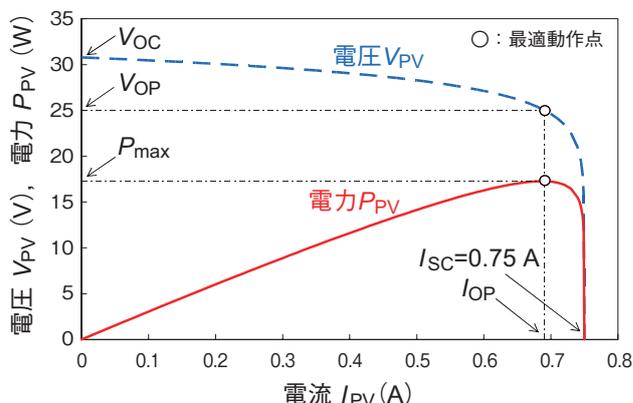


図1 太陽電池の電圧と電流

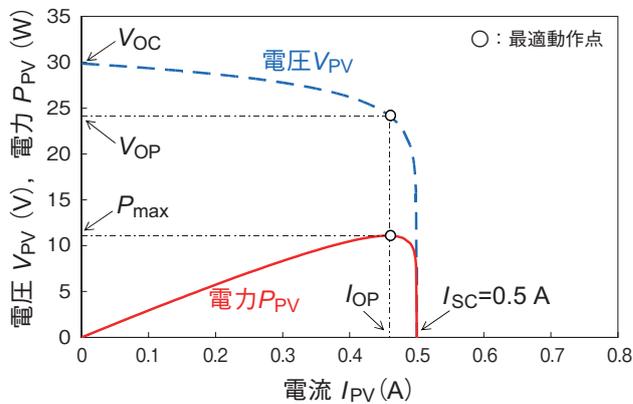
N は太陽電池単セルの直列接続数、 q は電子の電気素量 [C] ($=1.602 \times 10^{-19}$)、 I_{SC} は短絡電流 [A] ($V_{PV} = 0$ となるときの電流)、 I_0 は逆方向飽和電流 [A] である。 $V_{PV} - I_{PV}$ 特性の例を図2に示す。同図は、 $n=2$ 、 $T=300$ K、 $I_0=10^{-6}$ A、 $N=44$ の場合の特性である。図2 (a) および (b) は、 $I_{SC}=0.75$ A および 0.5 A の特性である。電流 I_{PV} がゼロのときの V_{PV} を開放電圧 V_{OC} と呼ぶ。

太陽電池に照射される日射量が低下すると、それに合わせて I_{SC} も減少する。図2における $I_{SC}=0.5$ A の特性は、 $I_{SC}=0.75$ A の場合よりも日射量が低い場合に相当する。日射量の低下により、 $V_{PV} - I_{PV}$ 特性は図2の左向きに平行移動するように変化する。短絡電流 I_{SC} は日射量の変化に対して大きく影響を受けるが、 V_{OC} はそれほど大きく変化しない。

太陽電池の発電電力 P_{PV} と I_{PV} との関係についても図2に示してある。 P_{PV} は V_{PV} と I_{PV} との積である。



(a) 短絡電流 $I_{SC} = 0.75$ A の場合



(b) 短絡電流 $I_{SC} = 0.5$ A の場合

図2 太陽電池の発電特性

発電電力 P_{PV} は $I_{PV}=I_{OP}$ において最大値 P_{max} となる。発電電力 P_{PV} が P_{max} となるときの電圧および電流を最適動作電圧 V_{OP} および最適動作電流 I_{OP} と呼ぶ。図2に示すように、 I_{SC} が変化すると、すなわち日射量が変わると $P_{PV}-I_{PV}$ 特性も変化する。日射量が低下し、 I_{SC} が減少すると、 P_{max} の値も減少する。このとき I_{OP} も低くなるが、 V_{OP} はほとんど変化しない。図2(a)の場合、 $V_{OC}=30.8V$ 、 $P_{max}=17.3W$ 、 $V_{OP}=25.0V$ 、 $I_{OP}=0.69A$ である。図2(b)の場合は、 $V_{OC}=29.9V$ 、 $P_{max}=11.1W$ 、 $V_{OP}=24.1V$ 、 $I_{OP}=0.46A$ である。太陽光発電システムにおいては、常に P_{PV} を P_{max} となるように運転することが望ましいと言える。

3. 太陽光発電システム

本教材が対象とする太陽光発電システムの構成やパワーコンディショナの機能について理解する必要がある。それらについて以下にまとめる。

3.1 システム構成

図3に一般家庭用の太陽光発電システムの構成例を示す⁽⁷⁾⁽⁸⁾。太陽電池で発電された直流電力は、接続箱を介してパワーコンディショナに送られ、交流電力に変換される。パワーコンディショナは分電盤に接続される。分電盤には一般の負荷が接続されており、太陽電池で発電された電力が供給される。現在、一般家庭用の太陽光発電システムは、商用電力システムと連系し、余剰分を系統側へ逆潮流させる方式をとっている。商用電力システムには、分電盤から売電用および買電用積算電力量計を介して接続される。

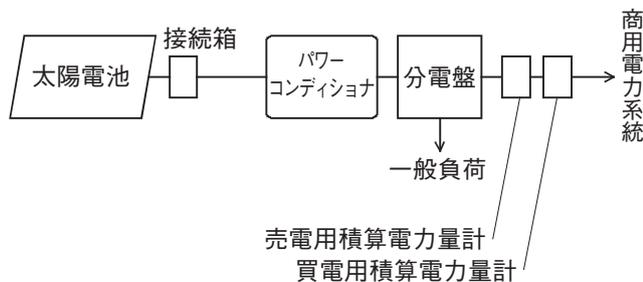


図3 太陽光発電システムの構成例

3.2 パワーコンディショナの機能

パワーコンディショナは、系統連系インバータとしての機能以外に、以下に示す機能を備えている⁽⁶⁾⁽⁸⁾。

- ① 直流／交流変換（インバータ）機能
- ② 力率制御機能
- ③ 最大電力点追従（MPPT）制御機能
- ④ 自動運転停止機能
- ⑤ 過不足電圧検出機能
- ⑥ 周波数上昇低下検出機能
- ⑦ 単独運転防止機能
- ⑧ 自動電圧調整機能
- ⑨ 直流検出機能
- ⑩ 直流地絡検出機能

前報で説明した系統連系PWMインバータは、上記①および②の機能を有している⁽³⁾。本教材は、さらに③の最大電力点追従（MPPT）制御機能を追加する。

3.3 最大電力点追従（MPPT）制御⁽⁶⁾

2.2節で述べたとおり、太陽光発電システムの運転においては、太陽電池の発電電力 P_{PV} が常に最大値 P_{max} となるようにすることが望ましい。この機能を最大電力点追従（MPPT）制御という。MPPT制御の方法にはいくつかあるが、本教材では、「山登り法」と呼ばれる方法を適用する。

図4の $P_{PV}-I_{PV}$ 特性を使って、山登り法について説明する。パワーコンディショナの起動時の I_{PV} を I_0 とする。このときの P_{PV} は P_0 である。次に、電流 I_{PV} を増加させ、 $I_{PV}=I_1$ となるように制御する。このときの P_{PV} は P_1 となる。ここで P_0 と P_1 とを比

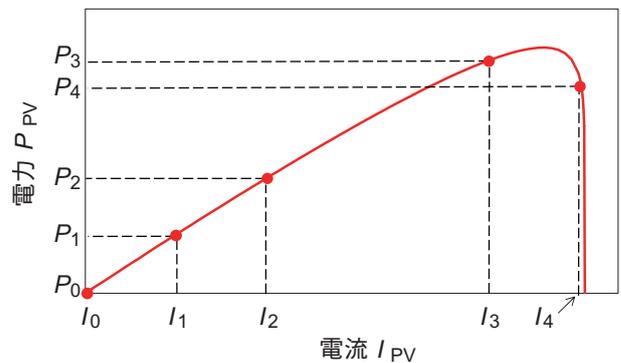


図4 山登り法の説明図

較すると、 P_1 の方が大きくなっている。電流 I_{PV} を増加させることにより P_{PV} を上昇させることができたことになるので、さらに I_{PV} を I_2 に増加させる。電流 I_{PV} が I_2 のときの電力 P_2 と P_1 とを比較したとき P_2 の方が大きいので、さらに I_{PV} を増加させる。これを繰り返すことにより、 P_{PV} は P_{max} に近づくことになる。

電流 I_{PV} を図4の I_3 からさらに増加させ I_4 としたとき、 P_{PV} は P_3 から P_4 に変化する。このとき、 I_{PV} が最適動作電流 I_{OP} を超えてしまうため、 P_4 は P_3 を下回ってしまう。このように、 I_{PV} を増やした結果、 P_{PV} が減少した場合には、次の段階で I_{PV} を減少させるようにする。

電流 I_{PV} が I_{OP} を大きく上回ってしまった場合は、 I_{PV} を減少させることにより P_{PV} が増加するため、さらに I_{PV} を減少させることになる。電流 I_{PV} が I_{OP} を下回ると P_{PV} が減少に転じる。その場合には、次の段階で I_{PV} を増加させる。以上の制御を繰り返すことにより、 P_{PV} を P_{max} に近い値に維持することができる。

4. 太陽光発電システムの計算機シミュレーション

装置の開発においては、設計の段階で適宜計算機シミュレーションを実施し効率的に作業を進めるといのが一般的である。本教材においても、前述のMPPT制御機能を、製作した系統連系PWMインバータに組み込む前に、計算機シミュレーションを利用して動作を確認する。その際、MPPT制御系における適切な制御パラメータの値の決定方法についても検討する。

4.1 シミュレーション手法

シミュレーションソフトとして、PSIM (Powersim Inc.) を用いる。PSIMはパワーエレクトロニクス用シミュレーションツールであり、高速計算、使いやすいインターフェイスなどの特長がある。

4.2 系統連系PWMインバータのシミュレーション

まず、実際に設計・製作・評価した系統連系PWMインバータをモデル化・シミュレーションする。PSIMでは、回路を画面上に作成すると、その回路の任意の場所の電圧、電流等が計算できる。図5はPSIMを用いて作成したシミュレーション回路である。計算して求めた素子の値など、実際の回路に合わせて作成する。シミュレーション結果を図6に示す。上から、交流電流値 i_{ac} 、交流電流指令値 i_{ac}^* および交流電圧位相信号 v_{ac0} を示している。この結果は、前報で示した実験結果とよく一致している⁽³⁾。

4.3 太陽電池のシミュレーション

パワーコンディショナのMPPT制御では、図2に示すような太陽電池の発電特性の特徴を利用する。したがって、MPPT制御のシミュレーションを行うためには、太陽電池の発電特性が模擬できなくてはならない。

本教材では、文献(9)を参考に、図7に示す回路で太陽電池をモデル化した。本モデルは、太陽電池の出力電圧 V_{PV} の値から、太陽電池の $V_{PV}-I_{PV}$ 特性で得られる電流 I_{PV} の値を数式関数ブロックにより計算し、その値を電流源から出力させるというものである。電圧 V_{PV} から I_{PV} を求める式は、(1)式を変形して、

$$I_{PV} = -I_0 \left(e^{\frac{qV_{PV}}{nk_B T N}} - 1 \right) + I_{SC} \quad \dots\dots\dots(2)$$

と表される。図7のモデルでは、図中の I_{SC} と記された直流電源の値を、計算させたい太陽電池の I_{SC} の値に設定することで、対応した太陽電池の特性を得ることができるようになっている。

図7の抵抗 R_{PV} の値を変化させてそれぞれに対応する V_{PV} と I_{PV} を計算することで、本モデルの $V_{PV}-I_{PV}$ 特性を確認することができる。計算結果から、本モデルの太陽電池の P_{max} 、 V_{OP} および I_{OP} を確認する。

図5の主回路における直流電源の部分太陽電池

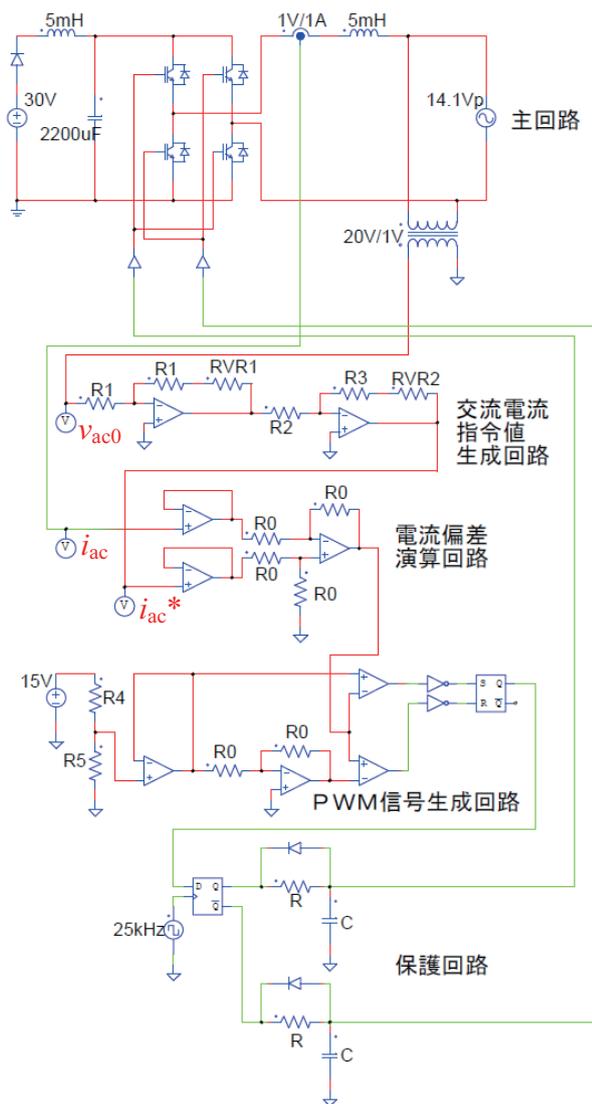


図5 系統連系PWMインバータのシミュレーション回路

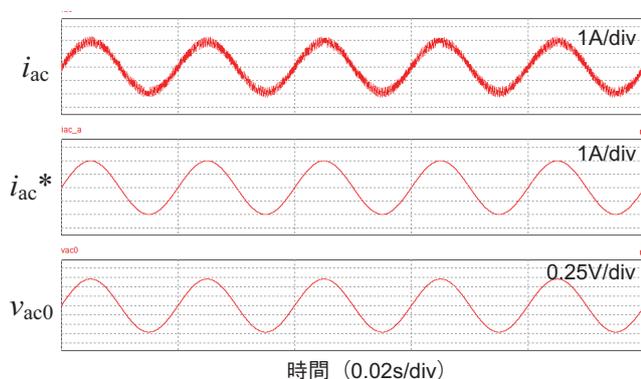


図6 系統連系インバータのシミュレーション結果

のモデルに置き換えて、系統連系PWMインバータと組み合わせた場合の動作についてもシミュレーションする。太陽電池には、電流が大きくなると電

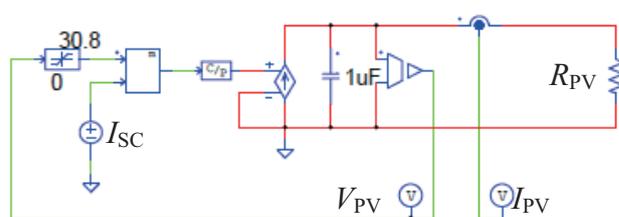


図7 太陽電池モデル

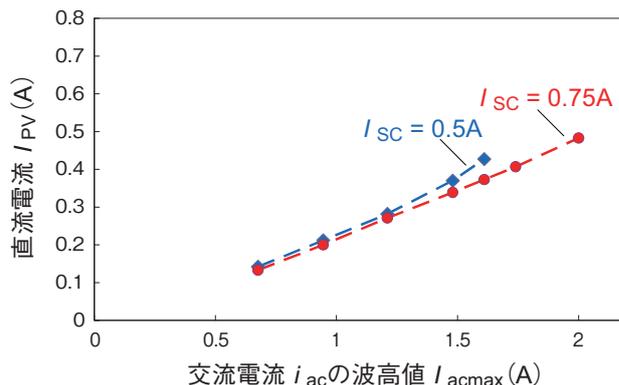


図8 太陽電池出力電流と交流電流波高値との関係

圧が大きく低下する特性があるため、交流電流指令値が大きくなりすぎると制御不能となる。このシミュレーションにより、システムの動作範囲が確認できる。また、MPPT制御を行う場合、交流電流の値を変化させることによって、間接的に太陽電池の発電電流を変化させることになるため、交流電流と直流電流との関係について理解しておくがよい。図8は、図2の特性をもつ太陽電池と系統連系PWMインバータとを組み合わせた場合の直流電流 I_{PV} と交流電流 i_{ac} の波高値 I_{acmax} との関係を示したものである。電流波高値 I_{acmax} は、交流電流指令値生成回路の抵抗 R_{VR2} を変化させることによって0.67A～2Aの範囲で調整する。電流 I_{SC} が0.75Aの場合、 I_{PV} は I_{acmax} の増加に伴って、直線的に増加する。この場合、 I_{acmax} を2Aまで増加させても、 I_{PV} の値は0.5A程度であり、 I_{SC} の値である0.75Aに対して低いため、系統連系PWMインバータとして正常に機能する。一方、 $I_{SC}=0.5A$ の場合は、 I_{acmax} が約1.7Aを超えると、 I_{PV} が0.5Aに近い値に達するため、太陽電池の電圧が大きく低下して、系統連系PWMインバータとしては機能しなくなる。

4.4 最大電力点追従 (MPPT) 制御のシミュレーション

3.3節で説明したMPPT制御をモデル化する方法はさまざま考えられる。図9にその一例を示す⁽⁹⁾。太陽電池の発電電圧 V_{PV} に発電電流 I_{PV} を乗じて発電電力 P_{PV} を計算し、ゼロ次保持、コンパレータ、XORゲート、Dフリップフロップ、マルチプレクサ、積分器等を組み合わせてMPPT制御を実現する。MPPT制御では、 P_{PV} が P_{max} となるように I_{PV} を変化させるが、本システムでは、交流電流 i_{ac} の波高値 I_{acmax} を変化させることで間接的に I_{PV} を変化させる。図9の制御回路には、 V_{PV} が所定の値 V_{min} を下回ると I_{PV} を強制的に低下させる機能も付加している。これは、 I_{PV} が I_{OP} を上回ると急激に V_{PV} が低下し、それによって動作が不安定になるのを防ぐ働きがある。

図10にパワーコンディショナのシミュレーション回路を示す。主回路の直流電源は太陽電池モデルになっている。パワーコンディショナでは、MPPT制御回路によって発電電力が最大となるように交流電流指令値 i_{ac}^* が生成されることになる。すなわち、系統連系PWMインバータの制御回路の交流電流指令値生成回路がMPPT制御回路に置き換わることになる。ただし、MPPT制御回路を組み合わせる際には、新たに太陽電池の電圧 V_{PV} および電流 I_{PV} の信号を取り込む必要がある。

MPPT制御回路では、いくつかの制御パラメータを設定しなければならない。例えば、 P_{PV} の大小関

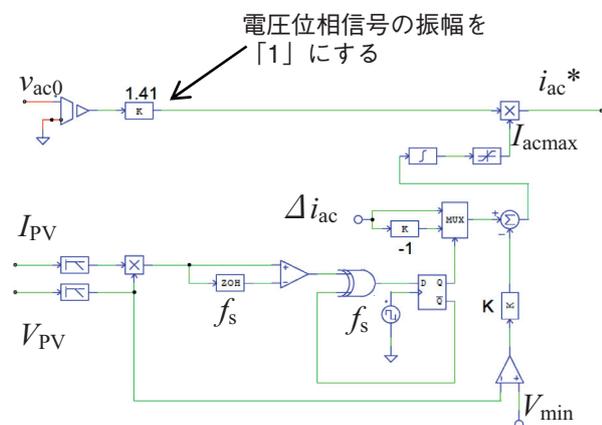


図9 最大電力点追従 (MPPT) 制御回路モデル

係を比較する周期に対応した周波数 (図10の " f_s ") や、 I_{acmax} の増減幅 (図10の " Δi_{ac} ") などである。これらについては、シミュレーション結果を検討しながら値を決定する。

図11にシミュレーションの結果を示す。同図(a)は、 $I_{SC}=0.75A$ の場合の結果である。計算開始後、 I_{PV} が増加するとともに V_{PV} がわずかに減少してい

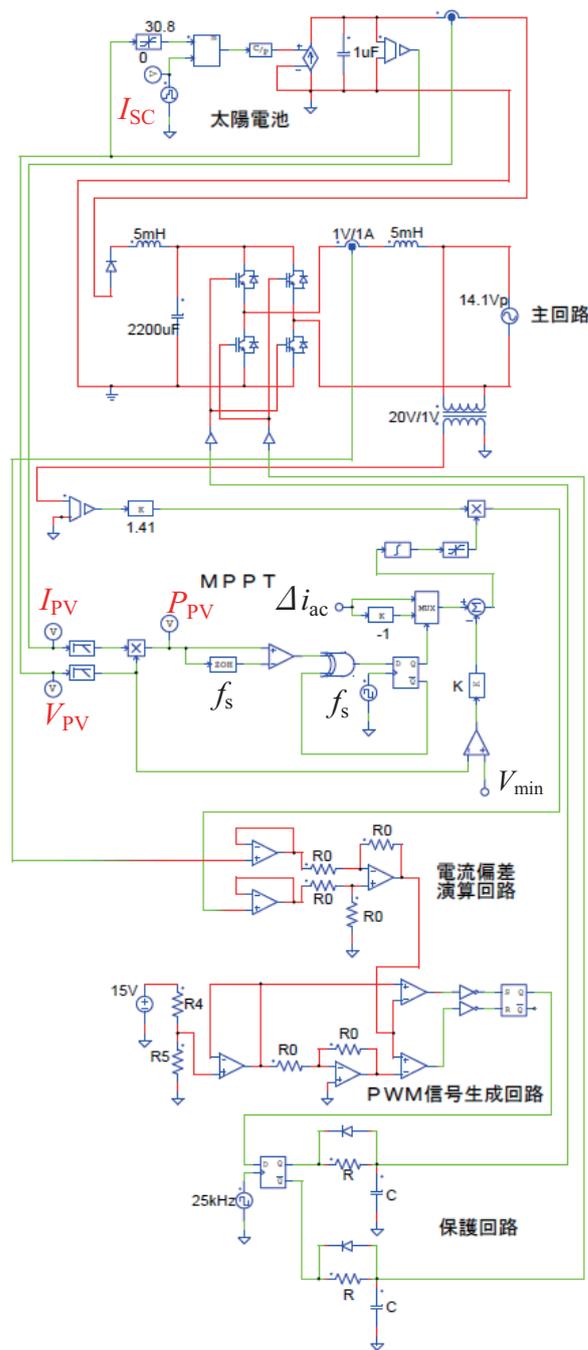
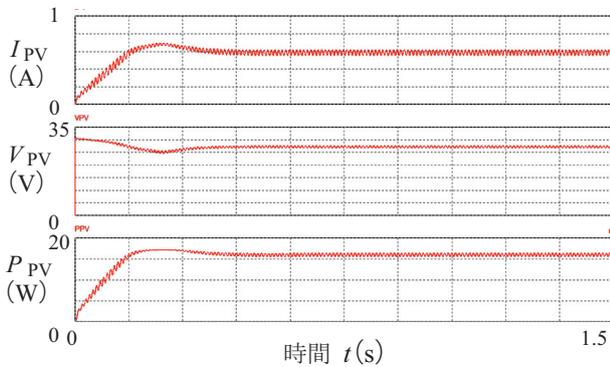
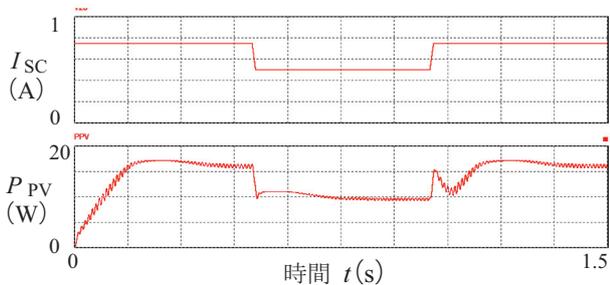


図10 パワーコンディショナのシミュレーションモデル

る。これに伴って P_{PV} も増加し、0.4 s程度で約16.5Wに落ち着いている。この値は P_{max} (=17.3W)とほぼ一致している。図11 (b)は計算開始からの時間 t が0.5 s ~ 1.0 sの間だけ I_{SC} を0.5Aとした場合の結果である。これは、太陽の日射量が一時的に低下した場合を想定している。電流 I_{SC} が低下した直後から、 P_{PV} が制御され、約10W程度となっている。これは、 $I_{SC}=0.5A$ に対する P_{max} (=11.1W)に近い値といえる。さらに、 I_{SC} が0.75Aに復帰した際も、 P_{PV} が最大値に近い値に制御されていることが確認できる。



(a) $I_{SC}=0.75 A$ の場合



(b) I_{SC} を変化させた場合

図11 パワーコンディショナのシミュレーション結果

5. 太陽光発電システムの総合運転試験

実際に製作した系統連系PWMインバータにMPPT制御機能を付加したパワーコンディショナの動作試験を実施する。

図12に試験回路の構成を示す。本試験回路は、太陽電池模擬電源システム、商用電力系統模擬電源システムおよびパワーコンディショナで構成されている。パワーコンディショナと商用電力系統模擬電源

との間に負荷を接続することも可能であるが、本報では、負荷を接続しない場合について説明する。この場合、太陽電池側で発生した電力はすべて商用電力系統側に流入することになる。

太陽電池には太陽電池模擬電源システム (SPEC90160, 菊水電子) を用いる。本電源システムは、プログラマブル直流電源と制御用PCとで構成される。図13 (a) にその外観を示す。制御用PCを用いて太陽電池の $V_{PV}-I_{PV}$ 特性を設定すると、直流電源がその特性のとおり出力をする。図13 (b) に設定した $V_{PV}-I_{PV}$ 特性の例を示す。これは図2 (a) の特性に合わせて設定したものである。本システムで設定した特性は、このようにPCのディスプレイ上に表示される。運転中の動作点をリアルタイムで表示することもできる。 $V_{PV}-I_{PV}$ 特性は同時に5種類まで登録でき、所定の時刻に自動的に切り換えることも可能である。

商用電力系統を模擬する電源は、太陽電池模擬電源システムからパワーコンディショナを介して流入してくる電力を吸収できなければならない。本教材では、バイポーラ電源 (HSA4014, NF) を用いる。本電源は一種の電力増幅器であり、出力電圧はファンクションジェネレータからの信号を増幅することで発生させる。ファンクションジェネレータとしてはマルチファンクションシンセサイザ (WF1946A, NF) を用いる。図14は商用電力系統模擬電源システムの写真である。

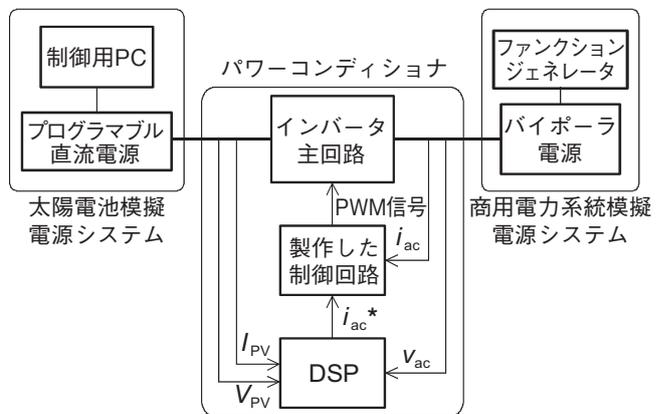
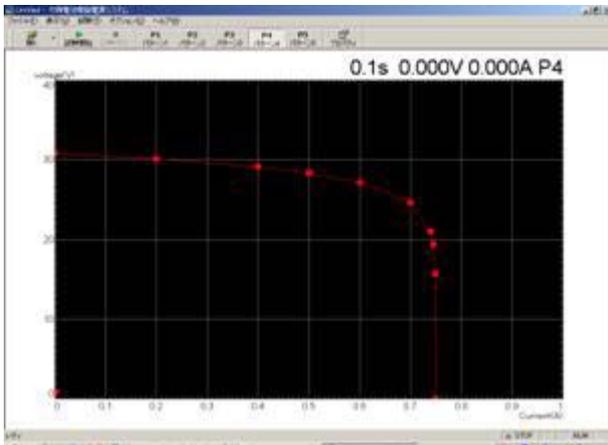


図12 総合運転試験回路の構成



(a) 外観



(b) 制御用PCの画面
図13 太陽電池模擬電源システム

MPPT制御部にはDSP (PE-Expert3, Mywayプラス) を用いる。図15にその写真を示す。4.4節で示したMPPT制御回路のシミュレーション結果をもとに制御プログラムを作成する。

動作試験により、系統連系インバータとしての機能を満足しつつ、出力電圧および電流が最適動作点に追従していることを確認する。実際には、測定する電圧や電流の信号に重畳するノイズ等の影響により、最適動作点に維持されず、電圧および電流が大きく変動する場合がある。また、最適動作点に到達するまでに長い時間を要することもある。このような課題について確認するとともに、その対策についても考察する。



図14 商用電力系統模擬電源システム



図15 DSPの外観

6. プレゼンテーション

本教材を用いた実習の最後に、全体を通して結果をまとめ、プレゼンテーションの形式で報告する。報告事項の例を以下に示す。

- ① PWMインバータ回路の構成、動作原理
- ② 系統連系インバータの制御回路の動作と設計
- ③ 太陽電池の発電原理
- ④ 太陽光発電システムの構成要素と役割
- ⑤ パワーコンディショナのシミュレーション評価
- ⑥ 動作試験の方法と結果・考察

7. おわりに

本報では、太陽光発電システムを対象とした実習教材について報告した。本教材は、電気・電子回路や測定・制御といった基礎的な内容をベースとして、電力・エネルギー分野の先端技術を総括的に学ぶことができるものであり、きわめて有用であると考える。また、近年注目を集めている太陽光発電システムを対象としている点も、興味を持っている学習者が多いという意味で、本教材の特長といえる。

本教材は、職業能力開発総合大学校長期課程4年生の実習に実際に活用している。本報では、その内容について述べたが、指導員研修や能力開発セミナー等への展開も可能である。その場合、学習者の目的に合わせて、内容を追加・修正する必要がある。以下に、追加事項の例をあげる。

① インバータ機能の性能向上

- ・DC/DCコンバータの適用による動作範囲の拡大
- ・高調波成分の分析と抑制方法の検討

② MPPT制御の精度評価と性能向上

- ・日射量変化に対する追従性評価

- ・実際の太陽電池を用いたの運転試験
- ・長期運転時の特性の把握

③ パワーコンディショナのその他の機能追加

- ・単独運転防止機能, ほか

最後に、卒業研究として太陽光発電用パワーコンディショナの教材開発に寄与したハチャングーナッタボン氏（タイ王国）に謝意を表する。

<参考文献>

- (1) 稲葉聡:「力率補償付き正弦波PWMコンバータの設計製作」, 平成17年度職業能力開発総合大学校電気システム工学科卒業論文 (2006)
- (2) ハチャングーナッタボン:「太陽光発電システムの実験装置の開発」, 平成18年度職業能力開発総合大学校電気システム工学科卒業論文 (2007)
- (3) 山本修・清水洋隆:「太陽光発電システム実習用教材の開発－系統連系インバータの基礎と設計・製作－」, 技能と技術, 4/2010号, pp.23-29 (2010)
- (4) 石田哲朗・清水東:「改訂半導体素子」コロナ社 (1988)
- (5) 清水洋隆:「絵とき電池基礎のきそ」日刊工業新聞社 (2010)
- (6) 「光エネルギー－太陽電池とその応用－」オーム社 (2002)
- (7) 太陽光発電協会:「設計者向け太陽光発電システム手引書 (基礎編)」
- (8) 太陽光発電協会:「太陽光発電システムの設計と施工」オーム社 (2009)
- (9) 北野達也:「“PSIM”による太陽電池のモデル化と最大電力点追尾制御」, OHM, 2004年11月号, p.112, オーム社 (2004)