

リミットサイクル方式MPPT制御による太陽光バッテリー充電器の設計法

Design on Photovoltaic Battery Charger for Maximum Power Point Tracking Control of Limit Cycle Operation

北 野 達 也 関 口 慎 也*
Tatsuya Kitano, Shinya Sekiguchi

In order to track the time varying maximum power point of the solar array depending on its operating conditions of insolation and temperature, the MPPT (maximum power point tracking) control technique plays an important role in the practical PV systems. A variety of MPPT schemes have been proposed so far. However, most of the conventional schemes have been based on the “hill climbing method” using the actual output power information. The authors have been focusing on the simplification of the MPPT control system by reducing the number of required voltage and current sensors and eliminating the calculation of the actual output power. And this system has proposed limit cycle MPPT control schemes with power sensorless approaches. To confirm the availability of proposed methods, digital simulation studies using PSIM is carry out.

1. まえがき

現在、クリーンなエネルギーとして、太陽の光エネルギーが注目されている。太陽電池の出力は、日射量に応じて出力電圧が変動するため、DC/DCコンバータ等により安定した出力に変換する必要がある。特に、太陽電池を利用したバッテリー充電器においては、バッテリーに充電できる電流ができるだけ多くなることが望まれている。本稿では、太陽電池からとりだせる電力を効率よく利用するため、リミットサイクル方式最大電力点追尾制御 (MPPT) をバッテリー充電器に適用し、リミットサイクル動作を確実に発生させるための条件の明確化、回路パラメータと制御パラメータの設計法を確立し、その動作をシミュレーションにより検討したので報告する。

2. リミットサイクル方式MPPT制御

図1に提案回路の構成を示す。太陽電池に降圧チョッパを接続し、バッテリーに電力を回生させる。充電電流 I_{bat} を電流指令 I_{bat}^* に追従するように電流マイナーループ内の誤差信号 ε_i のPI演算量により与える。この状態で図2のように I_{bat}^* を増加すると、出力電力 P_{pv} を増加させることができ、

P_{pv} がその最大電力 P_{max} に達していない時すなわち $P_{pv} < P_{max}$ の時には、チョッパ部の PI 演算により $\varepsilon_i \simeq 0$ に保たれるので積分器の入力に正の値 $1/T_{iu}$ [A/s] を与えることにより I_{bat}^* をゆっくりと増加させる。更に I_{bat}^* を増加して出力電力を増加させようとする $P_{pv} > P_{max}$ となるので供給電力には余裕がなくなり、電力の需給バランスが崩れるので I_{bat} が急激に低下するため ε_i は急激に増加する。そこで P_{max} に達したことを ε_i の急激な増加によって検知するため、 $\varepsilon_i > \Delta \varepsilon_i$ となったら積分器の入力を負の値 $-1/T_{id}$ [A/s] に切り替え、 I_{bat}^* を速やかに減少させる。

このように、本提案方式の電力の最大化は電力を取れるだけとり、太陽電池の最大供給電力を超えたところで電力需給のバランスが崩れて I_{bat} が I_{bat}^* に追従できなくなる現象を利用し、系を定常的にこの電力平衡/不平衡の境界点でリミットサイクル動作させることによって実現される。

3. システムの動作解析

3.1 フィルタリアクトルL、 $\Delta \varepsilon_i$ の決定方法

図1の降圧チョッパのLはスイッチングフィルタの役割をする。図3のようにスイッチがONのとき、実電流 I_{bat} は上昇、スイッチがOFFのときは下降する。スイッチングリップルの大きさは、 $\Delta \varepsilon_i$

*平成17年度電子システム工学専攻科卒業

に影響を与えるため実電流のリップルの大きさ Δ により L を決定する必要がある。図3においてスイッチ(Sw)の確率を d_{sw} とすると、 L の左側に印加される電圧は $d_{sw}V_{pv}$ となるので I_{bat} は、

$$I_{bat} = \frac{d_{sw}V_{pv} - V_{bat}}{sL} \quad (1)$$

で示される。(1)式に前進オイラー法を適用して離散値系で表すと、

$$I_{bat}(n+1) = I_{bat}(n) + \frac{d_{sw}V_{pv}(n) - V_{bat}(n)}{L}T \quad (2)$$

となる。 $V_{bat}(n)$ はバッテリー電圧 V_{bat} であるので、 $V_{bat}(n) = V_{bat}$ となり、スイッチはONで $d_{sw}=1$ 、OFFで $d_{sw}=0$ である。太陽電池の出力電圧は最適動作電圧 V_{opt} に制御されているので、 $V_{pv}(n) = V_{opt}$ となる。図3の T_1 の区間での電源電流のサンプル値は $I_{bat}(n) = I_{bat}^* - \Delta/2$ となり、次サンプル値は、 $I_{bat}(n+1) = I_{bat}^* + \Delta/2$ となるので、(2)式に代入し T_1 を求めると、

$$T_1 = \frac{L}{V_{opt} - V_{bat}} \Delta \quad (3)$$

同様に T_2 の区間では、

$$T_2 = \frac{L}{V_{bat}} \Delta \quad (4)$$

となる。スイッチング周波数を f_s すると、 $f_s = 1/(T_1 + T_2)$ より、

$$L = \frac{V_{bat}(V_{opt} - V_{bat})}{\Delta V_{opt} \cdot f_s} \quad (5)$$

となる。一方 $\Delta \varepsilon_i$ は I_{bat}^* と I_{bat} の差は最大で $\Delta/2$ であることを考慮し、

$$\Delta \varepsilon_i > \frac{\Delta}{2} \quad (6)$$

となるように設定する。

3.2 PIゲインの決定方法

図1において、電流制御ループおよび(1)式のチョッパ部の状態平均化モデルを考慮すると、図4の伝達関数モデルで示することができる。指令電流 I_{bat}^* から出力 I_{bat} までの閉ループ伝達関数は、

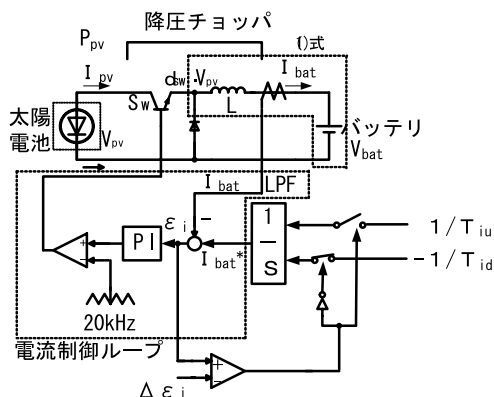


図1 リミットサイクル方式最大電力点追尾制御を用いた提案回路

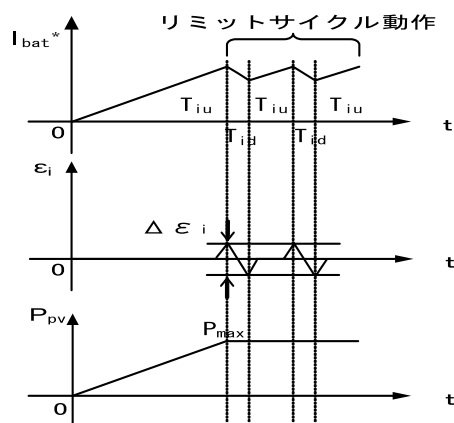


図2 リミットサイクル動作

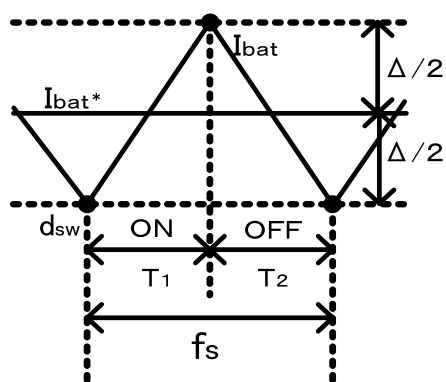


図3 降圧チョッパ部出力実電流波形

$$G(s) = \frac{sK_p V_{PV} + K_i V_{PV}}{s^2 L + sK_p V_{PV} + K_i V_{PV}} \quad (7)$$

となる。制御ループ内の極によりPI制御ループの応答速度が決定される。極は2つ存在するが、系が振動的にならないよう極を $-\alpha$ (α は実数)に指定するものとして、PI制御ループの等価的な時定数 τ_{pi} は、

$$\tau_{pi} = \frac{2}{\alpha} \quad (8)$$

となる。(7)式より特性方程式は、

$$s^2 + \frac{K_p V_{PV}}{L}s + \frac{K_i V_{PV}}{L} = (s + \alpha)^2 = 0 \quad (9)$$

となり、(8),(9)式より K_p と K_i は次式により決定できる。

$$K_p = \frac{4L}{\tau_{pi} \cdot V_{PV}}, \quad K_i = \frac{K_p}{\tau_{pi}} \quad (10)$$

3.3 $T_{iu}, T_{id}, \tau_{pi}$ の決定方法

T_{iu} と τ_{pi} の間には、 I_{bat} を増加する速度に比べてPI制御ループの応答が遅いと、要求される電力をチョッパにより供給できず、 P_{max} に達する前にリミットサイクル動作が発生することになるため、 $\tau_{pi} < T_{iu}$ の条件が成り立たねばならない。一方、 $\varepsilon_i > \Delta \varepsilon_i$ となったら負の値にスイッチを切り替えるが、この時PI制御ループの等価時定数 τ_{pi} で実電流が減少するため、 I_{bat}^* を減少する速度をPI制御ループの応答よりも早く保たなければ、チョッパのデューティ比が急速に1に飽和して V_{pv} は短絡状態となり、 P_{pv} は零になるため、 τ_{pi} と T_{id} の間には $T_{id} < \tau_{pi}$ の条件が成り立たねばならない。したがって、 T_{id} と τ_{pi} と T_{iu} の間には、

$$T_{id} < \tau_{pi} < T_{iu} \quad (11)$$

の関係になれば、最大電力でリミットサイクルを維持できない。日照条件が変化すると τ_{pi} も変化し、この時(11)式の条件が満たされなくなると、定常動作点は最適動作点から徐々にずれることになるため、 $T_{id}, \tau_{pi}, T_{iu}$ を設定する時ある程度余裕をもたせる必要がある。

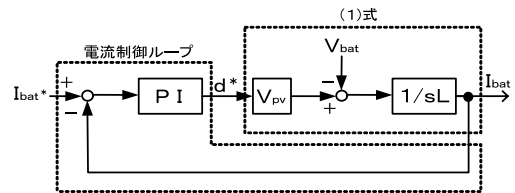


図4 伝達関数モデル

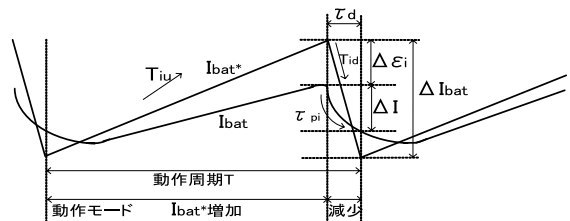


図5 リミットサイクル動作の1周期分

3.4 ΔI_{bat} ,動作周期 T の決定方法

図5にリミットサイクル動作の1周期分を示す。図5で τ_d はコンパレータの遅れ時間で、その時間は ε_i と $\Delta \varepsilon_i$ の比較できない時間である。ここで I_{bat}^* の減少時間を τ_d とすると、

$$\Delta I_{bat} [A] = \frac{\tau_d [s]}{T_{id} [s/A]} \quad (12)$$

の関係になる。 $t[s]$ 後の I_{bat} の減少分を ΔI とすると、減少成分は τ_{pi} で ΔI_{bat} は、

$$\Delta I_{bat} > \Delta \varepsilon_i + \Delta I \quad (13)$$

の値に設定する。動作周期 T は、ほぼ ΔI_{bat} を T_{iu} で上昇させる周期となるので

$$T[s] \doteq \Delta I_{bat} [A] \cdot T_{iu} [s/A] \quad (14)$$

で与えられる。

3.5 制御パラメータの設計方法

図3でスイッチング周波数20kHzにおいて、 Δ が0.1[A]となるように(5)式より、 $L=3.2[mH]$ とする。 $\Delta=0.1$ としたため、(6)式より $\Delta \varepsilon_i=0.1$ と設定した。次に、システムにおける τ_d の最小値は、DSPシステムの場合スイッチング周波数に合わせたサンプリング時間の50[μs]となる。し

したがって ΔI_{bat} は(13)式を満たすように0.5[A]と決定すると、(12)式より T_{id} は0.1[ms]となる。また、(11)式を満たし、それぞれの値にある程度余裕をもたすように、 $\tau_{pi}=2.5[ms]$ 、 $T_{iu}=20[ms]$ に設定した。設定した τ_{pi} を満たすPIゲインは(10)式より、 $K_p=0.2$ 、 $K_i=80$ と決まる。動作周期 T は、(14)式より $T=0.01[s]$ と決まる。これらの設定したパラメータを表1にまとめる。

4. シミュレーションによる検証

4.1 太陽電池モデル

本稿では、回路シミュレータP-SIMを利用し提案回路の検討を行う。P-SIMで検討するためには太陽電池をモデル化する必要がある。一般的な太陽電池の電圧 V －電流 I 特性は、図6に示すように電圧 V 、電流 I に非線形な特性となる。図6の電圧、電流の関係式を(15)式で示す。

$$\left(\frac{V_{PV}}{V_0}\right)^n + \left(\frac{I_{PV}}{I_s}\right)^m = 1 \quad (15)$$

(15)式において、 V_0 は太陽電池の開放電圧、 I_s は太陽電池の短絡電流である。指数 n, m の値は、太陽電池の出力電力が最適電圧 V_{po} と、最適電流 I_{po} の時に最大になるように次式より n, m を決定する。

$$V_{po} = V_0 \sqrt[n]{\frac{m}{m+n}} \quad (16)$$

$$I_{po} = I_s \sqrt[m]{\frac{n}{m+n}} \quad (17)$$

使用した太陽電池モデルは、本校屋上に設置されているSHARP製NE51FLR(表2)とした。特性は、公称最大出力127[W]、公称開放電圧 $V_0=31.9[V]$ 、公称短絡電流 $I_s=5.31[A]$ 、公称最大出力動作電圧 $V_{po}=25.7[V]$ 、公称最大出力動作電流 $I_{po}=4.95[A]$ である。(16) (17)式より、 n, m を求めると、 $n=0.83$ 、 $m=14.1$ となる。求めた n, m を(15)式に代入すると、電圧 V 、電流 I の関数になるので、PVのモデルが電流源であることに留意し、電圧 V を検出して電流 I を出力する方法で模擬する。図3に、求めた n, m を用いて、開放電圧 V_{po} を31.9[V]にし、 I_{sc} を5.31[A](日照条件A)と、2.8[A](日照条件B)にした場合の特性を示す。

表1 各パラメータの設定値

名称	値	名称	値
L	3.2[mH]	T_{iu}	20[ms/A]
$\Delta \varepsilon_i$	0.1[A]	K_p	0.2
T_{id}	0.1[ms/A]	ΔI_{bat}	0.5[A]
τ_{pi}	2.5[ms]	T	0.01[s]

表2 太陽電池モデル

型式	NE51FLR
メーカー	SHARP
公称開放電圧 V_0	31.9[V]
公称短絡電流 I_s	5.31[A]
公称最大出力	127[W]
公称最大出力動作電圧 V_{Po}	25.7[V]
公称最大出力動作電流 I_{Po}	4.95[A]

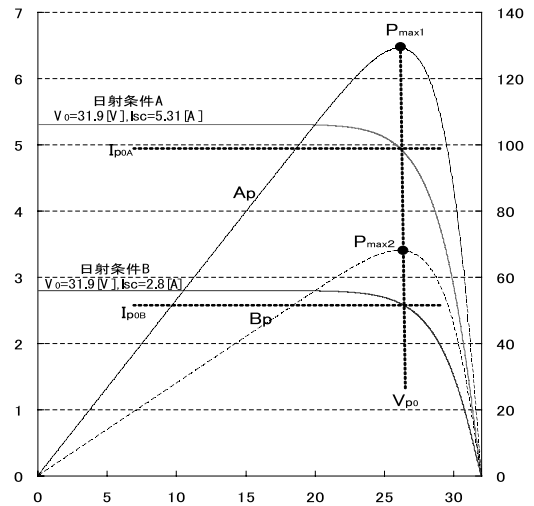


図6 V_{pv} と I_{pv} 、 P_{pv} の関係

4.2 提案システムの動作結果

表2の太陽電池モデルを利用し、提案回路の動作を確認するため、表1のパラメータで設定したシミュレーション結果を図7に示す。図7で、 $\Delta \varepsilon_i=0.1$ になったところで指令電流 I_{bat}^* が急激に減少していることがわかり、積分器への入力が設定通りに T_{iu} から T_{id} に切り替わったことを示す。また、 I_{bat} の落ちる速度よりも I_{bat}^* の落ちる速度のほうが速く戻り、安定してリミットサ

イクル動作が実現されている。また、 ΔI_{bat} も設定通りの0.5[A]、動作周期 T も0.01[s]となり、設定通りのリミットサイクル動作で最適動作点付近にとどまっていることがわかる。

次に、日照条件A、Bと変更したシミュレーション結果を図8に示す。日照条件Aは、最適電圧 V_{po} を25.7[V]で最適電流 I_{poa} を4.95[A]（公称出力時）、条件Bは V_{po} を25.7[V]で I_{pob} を2.8[A]とした。図8で、時刻0～2[s]までは日照条件Aで起動し、2～4[s]までは条件Aから日照条件Bへ徐々に変化させ、4～6[s]までは条件Bで動作させ、6～8[s]は条件Bから条件Aへ変更し、8～10[s]は条件Aで動作させた。条件A,Bともに V_{pv} , I_{pv} は最適点に制御され、出力電力も最大電力点に制御されていることが確認できる。

5. あとがき

本稿では、リミットサイクル動作を確実に発生させるための条件の明確化、回路パラメータと制御パラメータの設計法の確立をすることができた。そして、リミットサイクル方式MPPT制御をバッテリー充電器に利用して、日射量が変わっても、常にその日射時の最大電流で充電されていることをシミュレーションにより確認し、その有用性を示した。

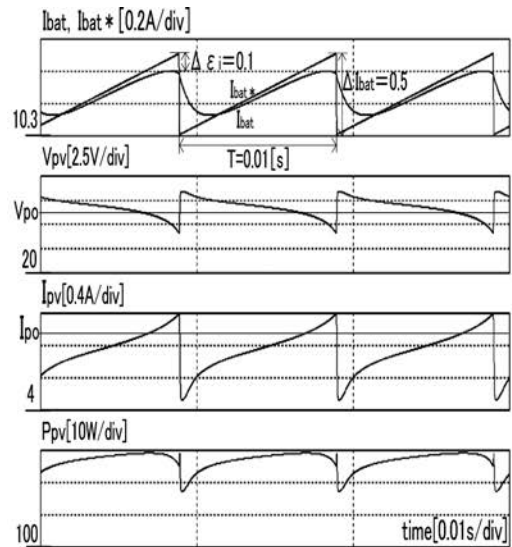


図7 公称出力時の動作波形

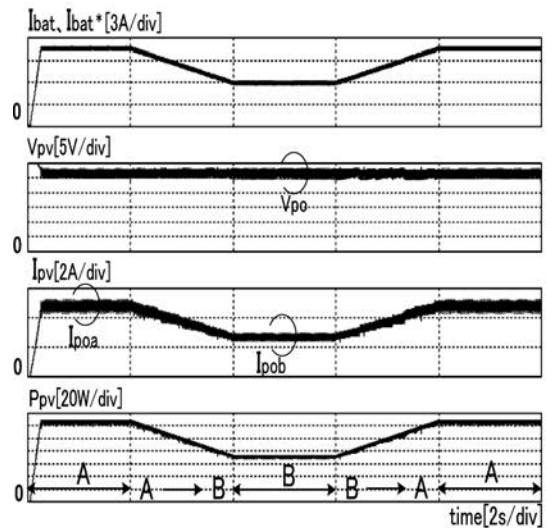


図8 日照条件を変更したシミュレーション結果

[参考文献]

- (1) 石原：「太陽光発電システムの現状と将来」, 電気学会論文誌C,115巻,1号p.1, (1998)
- (2) 千住・上里・大熊：「ファジー制御による太陽電池の最大電力点の探索」,電気学会論文誌D,114巻,9号p.843-848, (1994)
- (3) 黒川：「システムとしての太陽光発電-1-太陽光発電システムの構成」, 電気学会論文誌C,115巻,1号p.14-20, (1998)
- (4) 岡土：「太陽光発電システムの要素技術-2- 太陽光発電用インバータ技術」, 電気学会論文誌C,115巻,1号p.34-40, (1998)
- (5) 根葉・東：「PWM電流形インバータによる系統連系太陽光システムの最大出力制御法」, 電気学会論文誌D,116巻,5号p.598-604, (1996)
- (6) 道平・中岡・松浦：「新しい高周波トランスリンクソフトスイッチングPWM DC-DCコンバータと閉ループ特性」, 電気学会論文誌D, 116巻,5号 p.546-555 (1996)
- (7) 門田・榊川：「電流形インバータとDC-DCコンバータを用いた太陽光発電系統連系システム」, 電気学会論文誌D116巻, 6号p.718-723 (1997)
- (8) 高原・松田：「太陽光発電システムの最大電力適応取得制御法」, 電気学会論文誌D,118巻,6号p.810-811, (1998)
- (9) 薫・杉本・西尾：「電力の電圧微分に基づく太陽光発電システムの最大電力制御法」, 電気学会論文誌D,118巻,12号p.1435-1442, (1998)
- (10) 野口・富樫・中本：「太陽電池の短絡電流パルスに着目した適応最大出力点追跡法」, 電気学会論文誌D,121巻,1号p.78-83, (1998)
- (11) 石井・吉田・大庭：「遺伝的アルゴリズムを用いた太陽光発電システムの最大電力点追跡制御」,平成12年電気学会産応大会 p.684, (2000)
- (12) 高橋：「太陽光発電システムの実用化研究」, 平成12年電気学会全国大会4分冊p.1795-1897, (2000)
- (13) 黒川：「太陽光発電の現状と展望」,計測と制御,1巻,1号,p.8-13 (2000)
- (14) 冬木：「太陽光発電システムの将来展望」, 平成12年電気学会全国大会4分冊p.1806-1807, (2000)
- (15) 板子, 森：「独立型太陽光発電システムにおける最大電力点追跡のための一制御方式」, 電気学会論文誌D 123 巻,12 号,p.1537-1542, (2003)
- (16) 竹田・下津浦・根葉：「電流形インバータによる系統連系太陽光発電システムの降圧チョッパ並列多重化について」, H15年電気学会産業応用部門大会,Y-44, (2003)
- (17) 大越,中野：「太陽電池アレイ直列接続時の最大電力制御法」, H15年電気学会産業応用部門大会,Y-48, (2003)
- (18) 中村・和田・清水：「AC モジュール用フライバックインバータにおける直流側電力脈動補償」, 電気学会研究会, SPC-03-13, pp. 71-76, (2003)
- (19) 森田・坂井田・石川・内藤：「多段接続太陽電池AC モジュールの出力制御」, H16年電気学会産業応用部門大会,1-17,p.191-192 (2004)
- (20) 小田・武藤：「太陽光発電システムにおける予測型MPPT 制御を用いた電気二重層コンデンサの充電制御の検討」, H17年電気学会産業応用部門大会,1-68,pp.283-284 (2005)
- (21) 鶏内・北條・大西：「直並列制御チョッパを用いた太陽電池の出力制御」, H17年電気学会産業応用部門大会,Y-113 (2005)
- (22) 安波・橋本・根葉：「直流部2倍周波数変動を利用した最大電力点探索による単相系統連系電圧形インバータ太陽光発電システム太陽電池アレイ直列接続時の最大電力制御法」,平成18年電気学会全国大会4分冊,4-044,p.66 (2006)