研究論文

太陽光発電電力による大規模水電解水素製造用 供給電力の最適化

Optimization of Supply Power in Solar PV Power Generation System for Large Scale Hydrogen Production

浅海隆義*・朴 敏遠**松浦慶士***道平雅一****Takayoshi AsamiMinwon ParkKenji MatuuraMasakazu Michihira(原稿受付日2001年9月3日, 受理日2002年2月5日)

Abstract

The solar PV power generation system for a large scale hydrogen production has three components; a group of solar PV panels, a converter for power supply and a wiring system. To utilize the electric power generated by PV panels most effectively, it is important to supply the maximum power output to the electrolyzer. For this, an electric power supply should be established to provide maximum power at the inlet of the electrolysis cell. The authors have studied the controlability of these control methods for power supply to a hydrogen production system and compared them. Futhermore, energy losses including those in the wiring system in each case are presented. As a result of optimized control, it can be discovered that the reference voltage control system can realize the highest and most stable input power at the inlet of the conveter.

The authors believe these findings may contribute to the search for an economical production of hydrogen utilizing solar energy.

1. はじめに

地球環境産業技術研究機構(RITE)は、CO2固定化プ ロジェクト¹¹において、太陽エネルギーによる電力で電解 発生させた水素を排煙から回収したCO2と反応させてメタ ノール化し、これをエネルギー消費地に輸送して供給利用 するシステム²⁰の研究を進めてきた.この場合、システム を構成する太陽光発電パネル(以後PVパネルと言う)に よる発電電力の損失を最小限にとどめて電解設備に供給 し、かつ設備が安定して機能するよう電力を供給する制御 システムを構築することが肝要であると考えられるので、 これらの課題を検討し、最適と思われる制御システムを提 案した.

2. 設備構成,主要諸元および所要エネルギー

2.1 全体構成

本システムは、海外の沿海砂漠に設置されることを想定 し、砂漠でのPV発電による電力での水電解水素とタンカ

*()) 地球環境産業技術研究機構 システム研究グループ主任研究員 〒619-0292 京都府相楽郡木津町木津川台9-2 **大阪大学大学院工学研究科電気工学専攻 *** / 名誉教授 〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1 *****神戸市立工業高等専門学校電気工学科講師 〒651-2194 神戸市西区学園東町8-3 E-mail:asami@rite.or.jp ーで海上輸送されたCO2を原料として,沿海部でメタノー ル合成を行う合成設備からなり,必要な電力の総てがPV 発電設備によって供給される.そのエネルギー供給の概念 を図1に示す.

電力供給設備として具備すべき条件は,①砂漠部におい ては,電解槽に定電圧電力を供給すること,および原動機 用電力条件を満足する電力に変換すること,②沿海部に設 置されているメタノール合成設備の連続運転を可能とする ことである.沿海部のメタノール合成設備に対しては,生 産した水素を利用した燃料電池によって電力を供給するこ とにしている.砂漠部設置の水素圧送用圧縮機の原動機へ の電力供給方式等は,最近の加圧水電解システムの技術開 発の動向を考慮に入れ³,別途,検討することにし,本報 告では対象とする負荷を電解槽に限定して検討を行うこと にした.

2.2 設備の概略仕様と所要電力

化学的CO2固定化トータルシステムのモデルとしては, ①国内の100万kW石炭火力発電所から排出されるCO2(約 780トン/h)を対象とし,その60%(約467トン/h)を回 収する.②分離したCO2を液化後,タンカーで海外に輸送 する.一方,海外のPV発電基地で発電した電力による水 電解水素と輸送したCO2により,メタノール合成(323ト ン/h)を行う.

(合成反応:CO₂+3H₂=CH₃OH+H₂O)

表1に水素製造設備およびメタノール合成設備における処



図1 PV発電設備によるエネルギー供給概念

表1 水素製造設備およびメタノール合成設備での主要諸元

メタノール合成設備での製品,供給品等				
名 称	処理量 (トン/h)			
供給 CO ₂	467			
製品メタノール	323			
供給水素	64			
雷解用淡水	389			

表2 砂漠部での発生水素と各部での所要電力

領	設備名等	所要 H ₂ 発生量	所要電力	電力源	運転時間
域		(Nm³/h)	(kWh/h)		(h)
砂	CH ₂ OH 合成 H ₂ 用	2,246,700	8,874,400	PV	8
漠	H₂ 圧縮機用およびその他	-	323,700	PV	8
部	小計	2,246,700	9,198,100	-	-
沿	CH₂OH 合成 H₂ 用	23,800	50,700	FC	24
海	造水設備用およびその他	14,600	31,000	FC	24
部	小計	38,400	81,700	_	_
	合計	2,285,100	9,279,800	—	—

理量等を4,表2に各設備の所要電力量等を示す5.

3. 供給電力の制御方法による制御特性

本システムにおける水素製造設備の基本的構成はPVパ ネル, DC/DC変換器(以下変換器と言う)および電解槽 である.本システムで安定した電力を供給するための最適 条件を検討するためシステムの構成を設定し,制御方法を 検討する.

3.1 制御方法の特性比較

以下にPVパネル,変換器および負荷(電解槽)の構成 において配線材を抵抗として表すと,その位置により以下 に示す3ケースが考えられる.それぞれの概念図を図2に 示し,ケース2および3についてはその等価回路を併せて 示す.ケース1は各構成機器間が短く抵抗損失がシステム の電力供給に影響しないと考えられる場合,ケース2とケ ース3はそれぞれPVパネルと変換器間および変換器と負 荷間の距離が長い場合を示す.これらの場合につき制御特 性を検討するため下記の制御方法を適用した場合について 考察する.

(1) 一定電圧制御

PVパネルの出力電圧および変換器の入力電圧を一定に

保つことによりシステム全体の安定化が可能であり,また, PVパネルの出力電圧のみのフィードバックで制御ができ 制御系が単純化できる⁶⁷⁷.

(2) 基準電圧制御

PVパネルの表面温度から最適電圧を算出し,それを変換器の入力電圧の参考電圧として,変換器の入力電圧と比較し,最大出力に近い電力を供給する制御方式である.また,日射量の急激な変化に対しては,参考電圧を変えずに



(a)ケース1.太陽光パネルと変換器と負荷との距離が短い場合



(b)ケース2.太陽光パネルと変換器の距離が離れた場合



(c)ケース3.変換器と負荷の距離が離れた場合

 注) 1)文字説明: Vs, Vcon, Vlo はそれぞれ,電源側,変換器入力側および 負荷入力側の電圧を示す.
 2)記号説明:



図2 PV発電による電力供給システムのモデルケース

判断するため安定制御が可能なこと、PVパネルの出力電 圧と表面温度のフィードバックで制御でき制御系が単純化 できる⁸⁾.安定性と高効率性を同時に期待できるが、制御 対象となるPVパネルの正確な電流電圧方程式の設定が必 要となる⁹¹⁰⁾.

(3) 山登り制御

PVパネルの出力電流と電圧のフィードバックのみで最 大電力追尾制御が可能である.ただし,常に電力の比較計 算に基づき電力が増加する方向に電流を制御するので制御 系が複雑化する.また,日射量の急激な変化に対しては, 比較変化量の積で判断するため制御あるいは日射量何れの 変化に起因するものかの判別ができず,最大電力追尾制御 ができない場合も考えられる.問題点としては,制御量を 決定するアルゴリズムとその制御問隔に制御性が依存する ことである.

3.2 電力供給システムのモデルケースに対する最適制御

PVパネルにより変換器を介して負荷に電力を供給する 場合, PVパネル側および負荷側における電力・電流特性 が異なるので,その差異をシミュレーションによって検討 する.ここでは1例として,簡単のため配線材による抵抗 値が1.5Ωとした場合のケース2のPVパネルと変換器それ ぞれの位置での電力・電流特性のシミュレーション結果を 図3に示す.それぞれの位置に於ける最大電力での電流値 は異なり,負荷側に最大電力を供給しようとする時,PV パネル側の検出端の情報のみによって目的を達成すること はできないことがわかる.それゆえ最適制御を行うには 個々の電力供給システムによる電力・電流特性を考慮し, 適切な検出点を選んで制御を行う事が必要である.ケース 3についても同様で,この場合,ケース2のV_s,V_{con}の関 係はケース3のV_{con},V_bの電力・電流特性に相当する. 3.2.1 ケース2に対する各制御特性

制御特性を考察するに当たり、太陽電池の特性方程式を (1) ~ (4) に示す.



 $I = I_{sc} - I_{os} [exp(KK \cdot V) - 1] \cdots (1)$

 $KK = q/[nk(273.16 + T)] \dots (2)$ $I_{OS} = AT^{\gamma} \exp[qE_g/k(273.16 + T)] \dots (3)$ $I = I_{SC} - I_{OS} [\exp(KK \cdot (V_C + IR)) - 1] \dots (4)$

ここで, I: 負荷への電流 (A), Isc: 短絡電流 (A), Ios: 飽和電流 (A), q:電荷 (C), k:ボルツマン定数 (J/K), T: pn接合部温度 (C), n: セルの接合定数, A:温度定数, γ :温度依存度, Es: エネルギーギャップ (eV), V: PV電池の電圧 (volt), Vc: 変換器入り口電圧 (volt), R: 抵抗 (Ω)

式(1)はケース1での電流電圧方程式を示し、ケース 2のように直列抵抗となる配線材が入った場合は式(4) で示される.

(1) 一定電圧制御による場合

太陽電池の昼間平均表面温度をもとに,その温度に対す る最適電圧点を制御基準とするため,表面温度が設定温度 と離れるにしたがい,効率が低下する.

(2) 基準電圧制御による場合

図3においてパネル側および変換器側の電力・電流特性 は変換器がパネルと負荷の間に存在するため,最大電力値 はパネル側および変換器側でのそれぞれ異なる電流値で, それぞれの最大電力値となる.従って負荷側に最大電力を 供給するにはパネル側のPsM値を目標値とせず,PcMに対応 する電流を目標値に設定することにより変換器後の負荷に 最大電力を供給することができる.ケース2での制御は基 準電圧で制御しているので基準電圧との対比によって制御 される.したがって電力の減少を無視して制御を行うこと にはならず変換器側電力Pcmの最大値,PcMへ収斂する. (3) 山登り制御の場合

図2のケース2に山登り制御を適用した場合, PVパネ ル側で検出された電力をもとに,より高い出力方向へと進 むため,変換器側での出力はその最大値の位置で出力され ないから(2)と同様の配慮を必要とする.即ち変換器の 入力電圧および電流のフィードバック制御を併せて制御す れば変換器の入力電圧をPcM値の近傍で制御することが可 能である.

PVパネルと変換器間の距離による電力損失最小 化のための制御方式

4.1 PVパネルと変換器間の抵抗損失の影響評価

本計画でのPV回路の基本構成を表3に示す.

PVパネル側出力および変換器側入力をそれぞれ最大とな る制御を行った場合でのパネル側出力および変換器側入力 をシミュレーションにより評価する.

4.1.1 検出点,制御点と制御性

PVパネルと変換器間は、配線材によって接続されてい るのでこのシステムに相当する図2のケース2についてシ

図3 ケース2におけるシステムの電力・電流特性

表3 本計画でのPV回路の基本構成

PV パネル		モジュール					
並列	10 ユニット	定格電圧	20V				
直列	50 ユニット 定格電流		6A				
定格電圧	1kV	解放電圧	30V				
定格電流	60A	短絡電流	7.2A				
配線材							
タイプ:	VVR 8mm ²	抵抗:	$2.36\Omega/{ m km}$				
長さ:	+ 侧: 258.5m.	一側: 2	58.5m				

ミュレーションを行う.シミュレーションの前提条件を下 記に示す.

(1) 日射条件:1kW/m²

(2) 抵抗条件範囲: 0~10Ω

(3) 制御条件:

a.パネル側の出力最大とした時の変換器の入力PsとPc

b. 変換器の入力最大とした時のパネル出力PsとPc

ここでPs, Vs, PcおよびVcは, それぞれ太陽電池側出力電 力 (kW), 同電圧 (V), 変換器側入力電力 (kW) および 同電圧 (V) とする.

シミュレーションの結果を図4 (a), (b) に示す.これ より,同図(a) は配線材の抵抗値の変化によるパネル側 および変換器側の各電力変化と各条件による損失を,また, 同図(b) は電圧および電流を示す.同図(a) より,パ



(a) 配線材抵抗値の変化によるパネル側および変換器側の 各電力



ネル側および変換器側各電力にそれぞれ最大値制御を行っ た際,抵抗10Ωでの変換器側入力は,それぞれ22.7kWお よび30.3kWで7.6kWの損失差がある.また,同図(b)よ り同条件での電圧は約980Vの設定に対し,パネル側出力 および変換器側入力をそれぞれ最大とする制御を行った場 合,それぞれ約600Vおよび約150Vの電圧降下となり,電 圧変動が大となる.電気分解の場合,電圧を一定値以上に 維持するにはパネル側出力制御は不適当となる.

4.1.2 制御点による各電力と電力損失

制御に際し検出するパラメータによる制御特性について 検討を行う.下記に示す(1)および(2)のシミュレーシ ョンの前提条件を以下に示す.

- (1) PVパネルの温度検出による各電力と電力損失
- a. 表面温度範囲: 0~75℃
- b. 日射量:1kW/m²
- c. 抵抗:5Ω
- (2) 日射量の変化による各電力と電力損失
- a. 日射範囲: 0.2~1.0kW/m²
- b. パネル温度:25℃
- c. 抵抗:5Ω

シミュレーションの結果を図5(a),(b)に示す.これ より表面温度を検出パラメータとした場合、全範囲におい



(a) PVパネル表面温度の変化による各電力および 電力損失



(b) 日射量の変化による各電力および電力損失図5 制御点による各電力と電力損失

てパネル側出力と変換器側入力の電力差はほぼ一定であ る.ただ,電流の増加にしたがい検出点の位置による損失 差が徐々に増大した結果を示す.日射量の変化による各電 力および電力損失差は殆どないが,これより1kW/m²に向 かうにしたがい,多少の差違が生じる.この二つの結果よ りパネル表面温度が日射量の測定より容易であることを考 慮するとPVパネル表面温度をパラメータとして選択する 方が現実的であると考えられる.

5. 電解槽への電力供給のための最適制御の検討

5.1 最適制御を検討するためのシミュレーション

実測日射量に基づき最適の制御方法を検討するため、シ ミュレーションを行い¹¹⁾本システムの最適制御方法を考察 する.シミュレーション条件を下記に示す.

- (1) 日射量:日射量などを図6に示す.
- (2) シミュレーション時間:30秒
- (3) シミュレータ: EMTDC (Electromagnetic Transients software simulation Package for the study of AC and DC Power systems)
- (4) 山登り制御方式の電圧変化値 (ΔV):10 volts
- (5) シミュレーションの計算サンプリング:1µsec (ただ しグラフでの表現は0.1m sec)
- 5.2 ケーススタディとその結果

前述の3制御方式の安定性および効率等についてのシミ ュレーションの結果を図7(a)~(c)に示す.

図7に示す(a)~(c)のシミュレーション結果より次の 評価ができる.

(a) について:一定電圧制御(1kV基準)および基準電圧 制御(最適電圧点:0.92~0.94kV)はそれぞれの制御基準 に基づき変換器側入力電圧が作動し,安定した制御が可能 で,後者は前者より高い効率を示す.一方,山登り制御は 最大約100Vの激しい振動を伴いながら最大電力に向かい, その近傍で振動する.



(b) について:基準電圧制御の場合の測定温度誤差によ



(a) 各制御方法による変換器入力側の電圧・電力追尾



(b)測定温度誤差による変換器入力電力効率変化 (基準電圧制御の場合)



る入力電力の効率を実測データに基づき日射量をパラメー タとして表す.これより,測定温度誤差が±5℃の範囲内 では日射量0.25~0.75kW/m²の範囲での変動による入力電 力の効率差は約1%未満で,ほとんど変わらない.

(c) について:3つの制御方法による入力電力の効率を示す.このうち,一定電圧制御および山登り制御は理想条件での効率を示す.これより,効率面では測定温度誤差が±5℃の範囲内にあれば基準電圧制御および山登り制御は定電圧制御に比べ,約2%高い効率を示す.



図8 最大電力追尾制御による変換器側入力電圧変動

図8に最大電力追尾制御による変換器側の入力電圧の変動を時間軸で表すと、定電圧制御および基準電圧制御が山登り制御に対し、極めて安定した電圧変動を示す.

6. むすび

シミュレーションによるケーススタディの結果によれば RITEの太陽光発電によるグローバルリサイクルシステム には次のパラメータの検出と制御方法が発電電力を安定か つ最大利用するのに適切な方法と考えられる.

(1) 変換器入力側に検出点を設け出力最大となる制御.

(2) 基準電圧制御を採用し,基準電圧はPVパネル表面温 度により基準電圧を算出する.

実施したケーススタディの中では,最適の制御点および制 御方法は,それぞれ変換器の入力側および基準電圧制御で あると考えられ,本制御方式を採用することにより,電力 の有効利用が可能で,PV発電による経済的な水素の製造 を行うには,その電力供給の最適制御を前提として設計す ることが不可欠の条件である事がわかる.

本研究は新エネルギー・産業技術総合開発機構の指導・ 支援のもとに実施された委託研究の成果を活用した.

参考文献

- () ())) 助地球環境産業技術研究機構(RITE);接触水素化反応利用 CO2固定化・有効利用技術研究開発成果報告書,(1992~ 1995).
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO), RITE, エ ネルギー・資源学会 (JSER);自然エネルギーによるCO²グ ローバルリサイクルシステムの可能性調査報告書, (1992~ 1993).
- 3) 鷲田伸也,三村富雄,久米長生,清水克俊;太陽電池を用いた高圧型水電解システムによる水素製造,エネルギー・資源学会第18回研究発表会講演論文集,12-6 (1999),417-418.
- 4) 浅海隆義,前澤彰二,丹羽宣治,柳沢幸雄;砂漠の太陽エネ ルギー基地におけるエネルギー変換とその輸送の最適化,エ ネルギー・資源学会第15回研究発表会講演論文集,10-7 (1996),231-236.
- 5) 浅海隆義,松宮紀文,丹羽宣治;地球環境対策としてのグロ ーバルエネルギーシステムの位置づけ,エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集,11-4 (2000), 485-490.
- 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,5-161~5-162 (1993).
- 7)小玉博一;太陽光発電システム系統連係(Ⅱ),(1995),47-56,パワーエレクトロニクス研究会第10回専門講演会.
- 8) Minwon Park, Masakazu Michihira, Kenji Matuura ; A Novel MPPT control Method using Optimal Voltage of PV with Secondary Phase-shift PWM control DC-AC Converter IEEE, Power Tech'99, Budapest Hungary, (1999), 99-230-55
- 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;太陽電池の光照射状態での電圧 電流特性式を用いたI Vカーブ作成法とその活用,電学論D,116-10 (1996),1001-1009.
- 11) 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-B-2 (2001), 262-263.

