

PSCAD/EMTDC를 이용한 수소제조용 태양광 발전 시스템의 모델링

論 文
55B-2-8

Modeling of Solar-Powered Hydrogen Production System using PSCAD/EMTDC

李東瀚* · 朴敏遠** · 劉仁根†
(Dong-han Lee · Minwon Park · In-Keun Yu)

Abstract - This paper presents an effective modeling and simulation scheme of solar-powered hydrogen production system (PV-SPE: Photovoltaic Solid Polymer Electrolyte). Existing Hydrogen production technologies can produce vast amounts of hydrogen from hydrocarbons but emit large amounts of carbon dioxide (CO₂) into the atmosphere. Advanced hydrogen production methods need development. Renewable technologies such as solar and wind need further development for hydrogen production to be more cost-competitive from other resources. In this paper, authors have focused on a renewable technology to move one step further toward commercial readiness of solar-powered hydrogen production system. Software (PSCAD/EMTDC) based model of PV-SPE system is studied for an effective simulation of hydrogen production system. Using the simulation results, an actual PV-SPE system is implemented to verify the simulation results by comparing them with actual values obtained from the data acquisition system.

Key Words : SPE, Solar Cell, PV-SPE System, Optimal Voltage, Reference Voltage Control

1. 서 론

화석연료의 고갈, 자연환경의 심각한 오염으로 인한 환경친화적인 에너지 생산과 소비가 필연적인 현실과, 에너지 소비 증가율에 비해 발전소 건설에 의한 전력생산량의 한계가 돌파구를 찾지 못하고 있다는 점 등으로 인해, 현재 선진 각국에서는 화석에너지에서 무공해 자연에너지로의 에너지 쉬프트(Energy shift) 시기를 맞이할 중장기적 구체적인 계획을 수립하고 차츰 가시적인 성과를 도출해 내고 있다.

에너지 쉬프트를 통한 자원의 재배분이 필수적인 현실점에서 3가지 차세대 대체자원 키워드는 태양광, 풍력, 수소에너지로 대표할 수 있다. 그 중 수소에너지는 연료전지를 이용한 전기자동차의 보급과 가정용 연료전지 등의 확충으로 인해 급격한 수요증가세를 보일 것으로 예상되고 있고, 특히 태양광 발전시스템과 SPE(Solid Polymer Electrolyte)를 이용한 수소제조방식은 청정에너지원에서 청정에너지를 생산할 수 있는 획기적이고 극 친환경적 시스템이라는 특징으로 선진 각국에서 새로운 관심을 불러일으키고 있다. 그러나 태양광발전시스템과 SPE시스템을 연구목적으로 유연성을 가지고 설치운영하기에는 경제적 부담이 가중되게 된다. 이에 저자들은 실제 시스템과 동일한 특성결과를 가지는 태양광 발전시스템과 SPE를 이용한 수소제조시스템(이하, PV-SPE 시스템) 시뮬레이션 해석 기법을 개발하여 국내최

초로 태양광발전 수소제조시스템을 제작하고 시뮬레이션결과와 비교분석하여 제안한 시뮬레이션 기법의 우수성을 입증하였다. 또한 전력시스템 해석 프로그램으로서 가장 넓게 보편적으로 사용되고 있는 EMTDC/PSCAD [1] 프로그램을 본 논문에서 선택하여 사용하였다.

2. 수소제조용 태양광발전시스템 (PV-SPE; Photovoltaic power generation system for Solid Polymer Electrolyte)

연구의 기본적인 배경이 되는 에너지의 흐름 및 PV-SPE 시스템의 원리는 그림 1과 같다 [2, 3].

PV-SPE 시스템은 깨끗한 무공해 에너지, 무한계성의 에너지원, 그리고 환경친화적인 에너지로 여러 가지 장점을 가진 태양광 발전시스템을 이용하여, 저장과 수송이 용이하며 충방전 손실이 적은 새로운 에너지원으로서 각광을 받고 있는 수소에너지를 생성하는 메커니즘이다 [4-6].

SPE를 이용한 물 전기분해로 생산한 산소와 수소는 고순도이므로 산소는 의료용으로, 수소는 최근 잉여 전력 저장시스템으로 주목받고 있는 등 여러 가지 산업용으로 사용할 수 있다. 이러한 SPE를 이용한 물 전기분해는 SPE의 양극에 전극촉매를 접합시켜 전해 셀에 걸어서 물을 전기분해시키는 방법이며, 높은 전류밀도에서도 고효율의 전기분해가 가능하다. 또한 PV-SPE 시스템에서 전기적인 요구사항은 얼마만큼 다량의 전류를 SPE에 흘려 보내느냐 하는 것이며, 그림 2는 단일 SPE 셀의 전압전류 특성곡선을 나타낸 것이다. 그림과 같이 SPE 셀은 전류 의존성 부하로서 소비전력

* 교신저자, 昌原大 工大 電氣工學科 教授 · 工博
E-mail : yuik@sarim.chanwon.ac.kr

* 正 會 員 : 昌原大 工大 電氣工學科 碩士課程

** 正 會 員 : 昌原大 工大 電氣工學科 專任講師 · 工博

接受日字 : 2005年 10月 4日

最終完了 : 2005年 11月 8日

은 셀내의 순시전류밀도와 비례하므로, DC/DC 컨버터부가 시시각각 변하는 어느 특정 기상조건하에서 얼마만큼 많은 양의 전력을 SPE 셀에 공급해 주느냐가 관건이다.

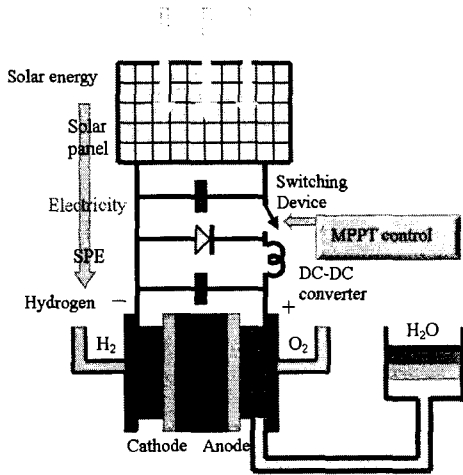


그림 1 PV-SPE 시스템의 개념도
Fig. 1 PV-SPE system

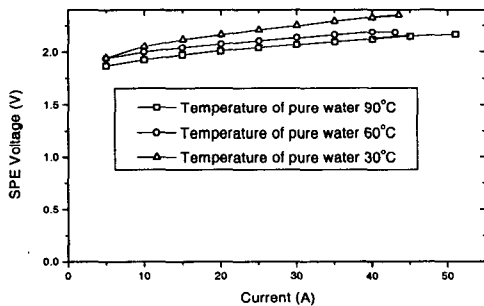


그림 2 SPE의 전압전류 특성
Fig. 2 V-I characteristics curve of SPE cell

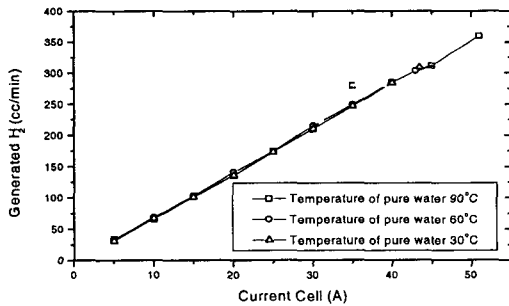


그림 3 SPE의 전류에 의한 수소발생 곡선
Fig. 3 Effect of current against production rate of hydrogen

SPE 셀은 그림 2에서 나타난 것과 같이 공급 물의 온도를 높여주면 셀의 단자동작전압이 낮아지고 그로인해, 같은 전력하에서는 보다 높은 전류를 흘릴 수 있으므로 인해 물의 온도가 높을 때, 보다 많은 양의 수소를 발생시킨다. 또한, 그림 3에서 나타난 바와 같이 수소의 생산량은 셀내에 흐르는 전류량과 정비례하므로 DC/DC 컨버터에 의한 MPPT 변환효율이 수소생산량과 비례적인 상관관계를 유지함을 알 수 있다.

3. EMTDC를 이용한 PV-SPE 시스템의 모델링

3.1 EMTDC를 이용한 PV system의 component 모델

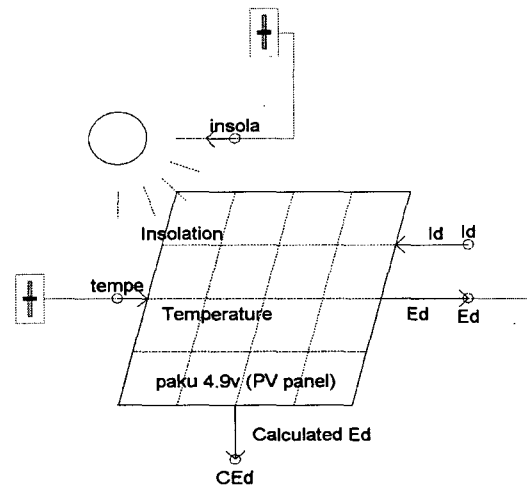


그림 4 EMTDC를 이용해 구성된 PV array
Fig. 4 EMTDC model component of PV array

그림4는 PSCAD/EMTDC를 이용하여 모델링한 PV array이다. 본 EMTDC 모델은 여러논문[7-10]을 통해 이미 자세히 소개된 바 있다. 단락전류는 3[A], 개방전압은 20[V], 2X4(직·병렬)연결, 제한전압은 35[V]로 설정하였다. 그림4에서 보는 것과 같이 슬라이더를 통해서 일사량과 셀의 표면온도를 조절할 수 있으며, 또한 실제기상조건 데이터를 입력할 수도 있도록 구성되어 있다. 식 (1)은 그림 4의 모델에서 사용된 태양전지의 특성방정식이다.

$$I = I_{sc} - I_{os} \left[\exp\left(\frac{q(V + IR_s)}{nkT}\right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

I = current flowing into load [A]

I_{sc} = short-circuit current [A]

I_{os} = saturation current [A]

q = electron charge, $1.6e-19$ [C]

k = Boltzman constant, $1.38e-23$ [J/K]

T = PN junction temperature [K], °[C]

n = junction constant

E_g = energy gap [eV]

R_s = series parasitic resistance [Ω]

R_{sh} = shunt parasitic resistance [Ω]

3.2 EMTDC를 이용한 SPE cell component 모델

태양광 셀은 문헌[7-10]을 통해서 제안된 방식을 이용하여 일사량과 태양전지 표면온도를 임의대로 조절할 수 있도록 하였고, 표면온도로부터 계산된 최적전압이 피드백되어 제어에 사용되도록 설계하였다. SPE 셀에서 공급되는 물의 온도는 SPE 셀의 전압을 변화시키고, 변화된 SPE 셀의 전압은 전류가 일정하다면 전류에 영향을 미친다. 그러므로 전류와 저항의 관계를 알기위해, 물의 온도와 SPE 셀의 전압, 전류에 따른 SPE 셀의 저항식이 필요하다.[4-6] 본 논문에서는 전류에 대한 내부저항 값을 실험식으로 표현하였다. 식 (2)는 실험을 통해서 구한 SPE셀의 내부저항 특성방정식이다. 이 때의 셀 온도는 기준 25[°C]이며, 사용된 실험 결과 값은 그림 5의 SPE에서의 저항-전류 특성곡선 실험이다.

$$R \approx 0.31 \left\{ \frac{e^{\left(\frac{I_{SPE} + 1}{5.7}\right)} + 1}{e^{\left(\frac{I_{SPE} + 1}{5.7}\right)} - 1} \right\} \quad (2)$$

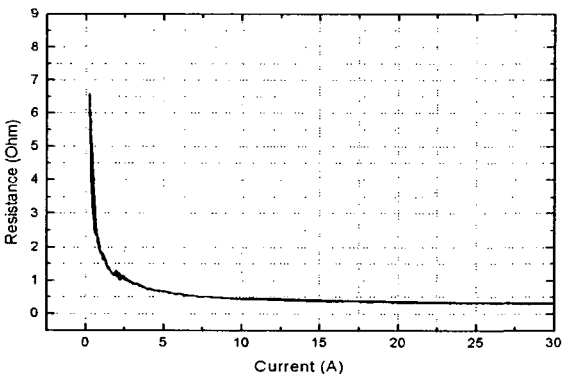


그림 5 SPE R-I 특성곡선(셀온도 25[°C])
Fig. 5 R-I characteristics curve of SPE

그림6은 온도에 따른 전압-전류 특성곡선을 보여주는데, 온도가 높을수록 같은 전압이 동일 값일때 많은 전류를 생산하는 것을 보여주며, 본 실험시스템의 동작특성을 잘 표현하고 있다.

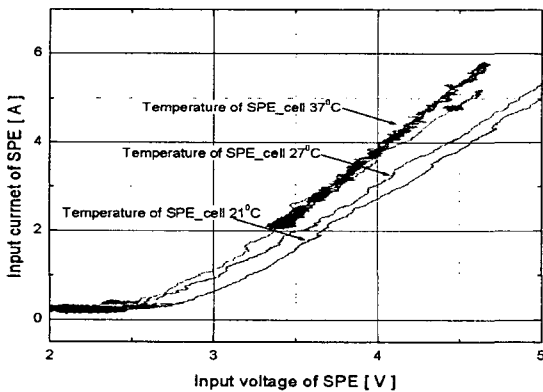


그림 6 SPE에서의 온도에 따른 V-I 특성곡선
Fig. 6. V-I characteristics curve of SPE according to cell temperatures

이상과 같이 언급된 SPE 셀의 특성 방정식과 온도에 따른 전압-전류 특성을 적용하여 SPE 셀 모델을 EMTDC상에서 구현하였다. 그림 7은 EMTDC상에서 구현된 Component 모델의 개념도이다.

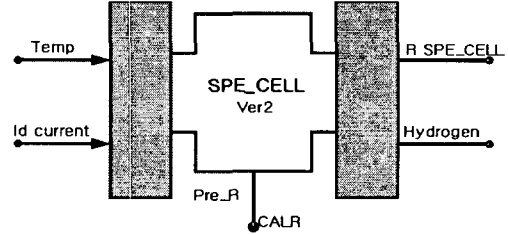
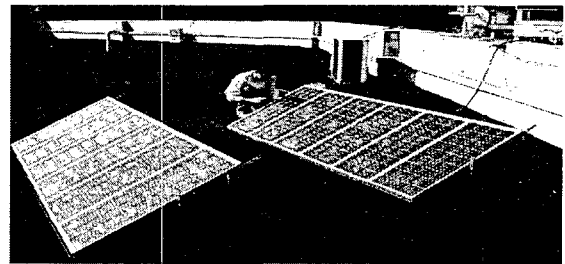


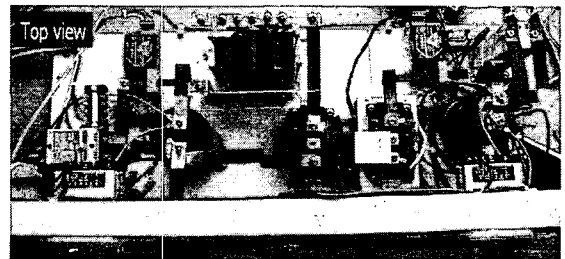
그림 7 EMTDC상에서 구현된 새로운 SPE 셀 component 모델 개념도
Fig. 7 EMTDC model component of SPE

4. 실제 PV-SPE 시스템 제작과 시뮬레이션

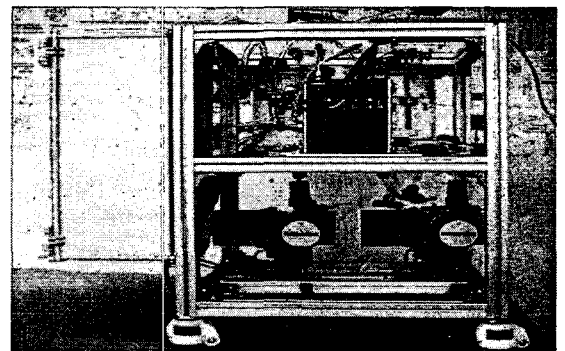
실제 시스템과 시뮬레이션에 의한 결과를 비교 분석하기 위해서 실제 PV-SPE 시스템을 그림 8와 같이 제작하였다.



(a) photovoltaic array



(b) DC/DC converter system



(c) SPE system

그림 8 실제 제작된 PV-SPE 시스템
Fig. 8 Actual system of PV-SPE and DC/DC converter

표 1은 실제 제작된 시스템의 주요사양을 나타내고 있으며, 설치된 태양광 어레이는 600W급이고, 최적 운전전압은 30[Volt] 주위에서 동작하게 제작, 설치되었다. 제작된 DC/DC converter는 보다 많은 전류를 SPE 셀에 보내기 위해 감압형(step-down type)으로 제작되었으며 PWM을 이용한 고주파 스위칭 방식을 채택하였다. 설치된 SPE 시스템은 정격전력 500[W]급으로서 설계되었고, 시간당 30[L]의 1기압 상태 수소를 생산할 수 있는 용량을 가지고 있다.

표 1 제작된 시스템의 주요사양

Table 1 Main specification of manufactured system

Established PV array	Max. Power	Optimal voltage	Maximum current
	600[W]at 1.0kW/m ² of irradiance	around 30[Volt]	around 20[A]
DC/DC converter	Rated Power	Type	Switching Frequency
	1,000[W]	Step Down	3kHz
SPE system	Rated Power	Optimal operating voltage	Optimal operating current
	500[W]	15[Volt]	30[A]

그림 9와 10에서 보는 것과 같이 실제 제작된 PV-SPE 시스템은 우수한 동작특성을 보여준다. PV-array의 출력이 최고 일때, SPE 역시 최고 출력값을 가지는 것을 볼 수 있다.

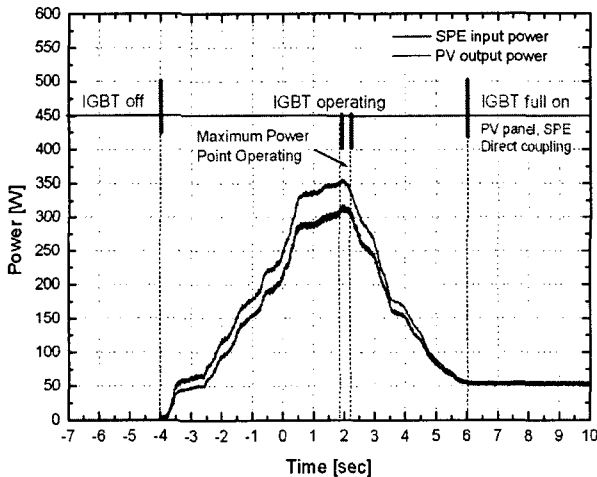


그림 9 DC/DC 컨버터를 이용한 PV-SPE 시스템의 전력특성곡선

Fig. 9 Characteristics curve of PV-SPE using DC/DC converter

IGBT가 Off 상태에서는 태양전지가 개방상태이고 IGBT의 On이 시작되면서 SPE에 전력이 공급되기 시작한다. 기상조

건에 따라 최적 IGBT Duty Ratio가 다르지만, IGBT의 Full On 상태에서는 태양전지와 SPE 시스템이 직접연결된 것과 동일한 상태이므로 그림 9에서와 같이 본 시스템은 태양전지와 SPE 셀의 직접연결보다 DC/DC converter에 의한 제어운전 결과가 보다 효율적임을 알 수 있다.

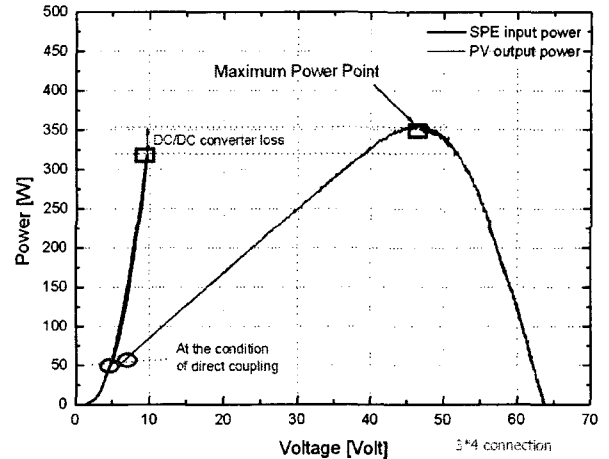


그림 10 PV와 SPE 시스템의 P-V특성곡선

Fig. 10 Power-voltage curve of PV and SPE system

또한 그림 10에서와 같이 태양전지가 최대출력운전중에 동일하게 SPE 셀의 입력전력도 최대 입력됨을 알 수 있다. 그때의 DC/DC converter 변환효율은 약 92%이다.

그림 11은 PSCAD/EMTDC를 이용하여 모델링한 PV-SPE 시스템의 전체 회로도이다. 이 때 외부기상조건의 실제데이터를 사용하였으며 SPE셀 모델링도 그림 8(C)의 시스템 특성을 그대로 적용하였다.

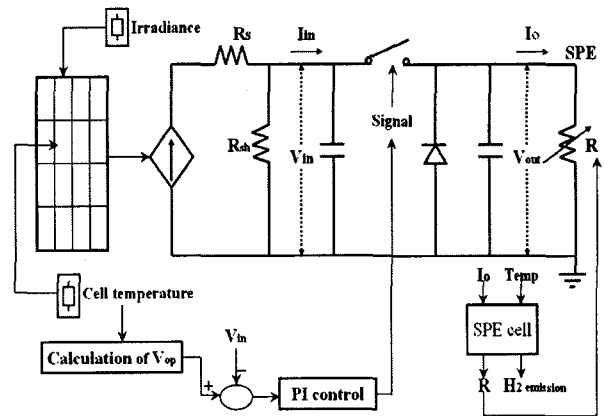


그림 11 EMTDC를 이용한 SPE 셀 회로도

Fig. 11 Conceptual diagram of PV-SPE simulation in EMTDC

그림 12는 실험 시 적용된 실제 기상조건인 태양전지의 표면온도와 일사량의 데이터를 그래프로 나타낸 것이다.

그림 12의 실제 기상조건을 근거로 시뮬레이션을 실행하고 실제 시스템의 운전결과와 데이터와 비교하였다. 그림 13과 그림 14는 태양전지 출력 전압 값과 SPE 유입전류의 실제 데이터와 시뮬레이션 결과 값을 각각 보여준다.

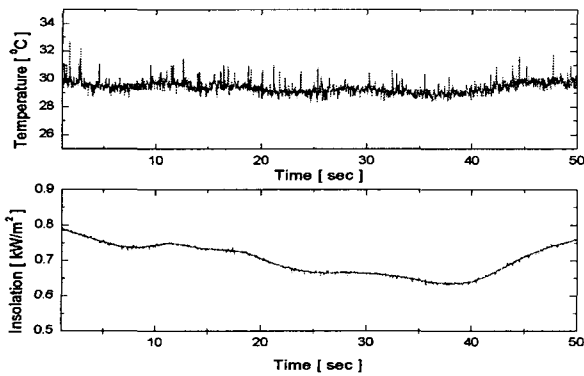


그림 12 시뮬레이션에 적용된 실제기상조건
Fig. 12 Real weather condition applied to simulation

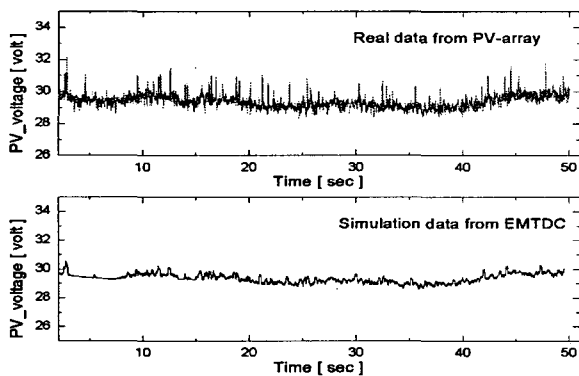


그림 13 태양전지의 출력전압 비교 곡선
Fig. 13 Output voltage of PV-array for 50[sec]

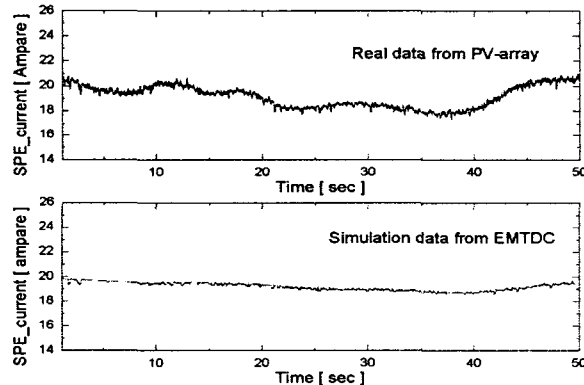


그림 14 SPE 셀의 유입전류 비교
Fig. 14 Input current into SPE-cell for 50[sec]

그림 13에서와 같이 전압의 경우는 실제 값과 시뮬레이션 값이 거의 일치하는 것을 볼 수 있다. 그러나 그림 14를 보게 되면 SPE에 유입되는 실제 전류와 시뮬레이션 결과에 차이가 있다. 이는 일사량계의 시정수 때문인데 일사량계의 출력신호가 일사량에 즉각 반응하지 못하고 그에 따른 차이가 발생하는 것으로 판단할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 과도현상 해석용 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 PV-SPE 시스템을 모의 분석하였다.

이 과정 중 기존에 개발된 태양광셀 모델과 더불어 SPE 셀 component를 개발하였다. 또한 실증 비교분석을 위해 DC/DC 컨버터를 이용한 PV-SPE 시스템을 실제 제작 하였으며, 실 제작된 시스템은 우수한 동작 특성을 보여주었다. 그리고 EMTDC를 이용한 모의분석 결과와 실제 시스템의 데이터 값이 거의 일치함을 알 수 있었다. 이는 본 논문에서 소개된 EMTDC를 이용한 PV-SPE 시스템 시뮬레이션 모델이 충분히 설득력을 가지고 있으며, 특히 SPE의 모델 컴포넌트 개발에서는 실험에 의한 결과 값을 전류에 의한 저항 값의 변화식으로 표현한 방법을 사용한 것이 가장 특징적이라고 할 수 있다. 본 시뮬레이션 기술을 많은 연구자들이 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부 지방기술혁신사업(RTI04-01-03)의 지원과, 2005년도 창원대학교 연구비에 의하여 수행된 것임.

참 고 문 헌

- [1] "PSCAD/EMTDC Power System Simulation Software Manual", Manitoba HVDC Research Centre, 1995
- [2] P. Millet, H. Andolfatto, "Design and Performance of a Solid Polymer Electrolyte Water Electrolyzer", Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 21, No. 2, pp. 87-93, 1996
- [3] K. Scott, W.Taama, "Performance and Modelling of a Direct Methanol Solid Polymer Electrolyte Fuel Cell", Journal of Power Sources 65, pp. 159-171, 1997
- [4] Signe Kjlstrup Ratkje, MagnarOttoy, "Thermoelectric Power Relevant for The Solid-Polymer- Electrolyte Fuel Cell", Journal of Membrane Science 107, pp. 219-228, 1995
- [5] Kazuo Murata, Shuichi Izuchi, "An Overview of The Research and Development of Solid Polymer Electrolyte Batteries", Electrochemica Acta 45, pp. 1501-1508, 2000
- [6] P. A. Lehman, C. E. Chamberlin, "Operating Experience with a Photovoltaic-Hydrogen Energy System", Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 22, No. 5, pp. 465-470, 1997
- [7] Minwon Park, In-Keun Yu, "Photovoltaic Generation System Simulation using Real Field Weather Conditions", Journal of IKEEE, Vol. 5, No. 2, pp. 1-7, 2001
- [8] Minwon Park, In-Keun Yu, "Simulation Method of Photovoltaic Generation Systems Using EMTP Type Simulations", Trans. KIEE, Vol 54B, No. 6, pp. 303-308, 2005
- [9] Minwon Park, In-Keun Yu, "A Novel Real-Time Simulation Technique of Photovoltaic Generation Systems using RTDS", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 19, No. 1, pp. 164-169, 2004
- [10] Minwon Park, Kenji Matsuura, Masakazu Michihira, "A Novel Simulation Method for PV cell using Field Data", Trans. on IEE Japan, Vol. 121-B, No.2, pp. 262-263, 2001

저 자 소 개



이 동 한(李東瀚)

1979년 4월 17일생. 2005년 창원대 전기공학과 졸업. 2005년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정

Tel : 055-281-3150

Fax : 055-281-3150

E-mail : hany417@lycos.co.kr



박 민 원(朴敏遠)

1970년 2월 12일생. 1995년 창원대 전기공학과 졸업. 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2002년 일본 오사카대학 대학원 전기공학과 졸업(석사/박사). 2001년 10월~2004년 8월 한국전기연구원 차세대초전도응용기술개발사업단 기술팀장. 2004년 9월~현재 창원대학교 전기공학과 전임강사

Tel : 055-279-7519

Fax : 055-281-3150

E-mail : paku@sarim.changwon.ac.kr



유 인 근(劉仁根)

1954년 2월 18일생. 1983년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1985년 6월~1988년 2월 한국전기연구원 선임연구원(지중송전연구실장). 1990년 12월~1992년 2월 University of Texas At Arlington(Post Doc.). 1996년 12월~1998년 2월 Brunel University, UK (Visiting Scholar). 1988년 3월~현재 창원대학교 전기공학과 교수

Tel : 055-279-7512

Fax : 055-281-3150

E-mail : yuik@sarim.chanwon.ac.kr