

MPPT제어를 적용한 태양광발전 연계형 고온초전도마그넷 충전장치 특성 해석

Characteristic Analysis of HTS Magnet Charging System Combined with PV System Using MPPT Control

김대욱¹, 윤용수^{2,*}, 정윤도³, 조현철⁴, 김호민⁵, 김태중⁶, 오재기⁷, 고태국⁸

Dae Wook Kim¹, Yong Soo Yoon^{2,*}, Yoon Do Chung³, Hyun Chul Jo⁴,
Ho Min Kim⁵, Tae Jung Kim⁶, Jae Gi Oh⁷, Tae Kuk Ko⁸

Abstract: We already fabricated a proto-type HTS charging system with photovoltaic (PV) system and obtained design parameters for DC converter and HTS charging system. In order to develop the real scale charging system efficiently, we suggested a maximum power point tracking (MPPT) controller using a perturb and observe (P&O) MPPT algorithm for PV system. In this paper, we designed and simulated the MPPT controller for the real scale HTS charging system. As well as, the PV module has been analyzed by solving solar cell equivalent equations. The simulated and theoretical results presented here are being considered the next study which addresses the design and fabrication parameters.

Key Words: HTS magnet charging system, MPPT, P&O algorithm.

1. 서 론

최근 화석에너지의 고갈로 인해 대체 에너지원으로 태양광발전, 풍력발전 등의 대체 에너지원 연구개발이 활발해 지고 있다. 그 중에서도 태양광발전은 반도체 소자를 이용하여 태양광을 받아 직접 전기를 발생하는 장치이다. 그 특징으로서는 태양에너지자원의 양이 거의 무한정하고, 공해가 전혀 없는 청정에너지라는 여러 장점들이 있다. 이에 태양광에너지를 전기에너지로 이용한 전력기기 시스템의 개발은 시스템의 효율을 향상시키기 위한 하나의 좋은 모델로 여겨지고 있고 다양한 전력시스템에 적용되고 있다[1-2].

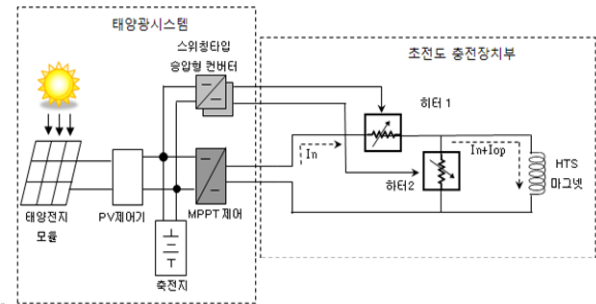


Fig. 1. Schematic diagram of superconducting power supply combined with solar energy system.

그 예로 그림 1과 같이 태양광 발전시스템과 고온초전도마그넷 충전장치를 융합하여 새로운 초전도전원장치가 제안되었다[3-4]. 태양광에너지를 고온초전도 자속펌프시스템의 전원 소스로 사용하게 되면 모든 전력을 태양광 에너지를 사용하므로 상용 전원장치가 필요가 없다. 따라서 시스템의 전력소비 효율을 향상시킬 수 있는 장점이 있다. 새로운 초전도마그넷충전장치는 태양광으로부터 공급된 전기에너지를 초전도마그넷에 안정적으로 충전하는 것이 가능하다. 그 결과로 태양광에너지를 이용한 고온초전도마그넷충전장치는 시스템의 동작 효율을 극대화하고, 무한한 에너지원인 태양광에너지로 활용이 가능하다.

하지만, 기존의 초전도마그넷충전장치에 태양광시스템을 접목하여 기존의 상용전원 대신에 태양광에너지를 사용함으로써 기존 시스템에 비해 전원효율이 향상되었다고 할 수 있지만, 태양광 시스템의 태양전지의 고유한 비선형적인 특성으로 인해, 항상 태양전지의 최대 전력점(Maximum Power Point)에서 동작하도록 하는 제어가 필요하다[5]. 태양전지는 온도와 일사강도에 따라 태양 전지의 단락전류와 개방 전압의 특성이 변화하게 되며 태양전지의 전력 활용의 효율을 극대화 할 수 있는 최대 전력 출력 지점의 위치도 온도와 일사강도에 따라 변화하게 된다. 이러한 외부의 조건(일사량, 온도)으로 인하여 최대전력점이 변해도 태양광 제어가 항상 태양전지 어레이의 최대출력을 얻어지도록 하는 것이 최대전력추종제어(Maximum Power Point Tracking)라고 한다. 이와 같이 외부변화에 따라서 최대 전력 동작점(Maximum Power Operating Point) 또한 달라지기 때문에 태양광 시스템이 최대 전력 동작점에서 운전되기 위해서는 태양전지의 MPPT 알고리즘에 의해서 운행되어야 하고, 태양전지 제어기는 이러한 변화에 따라 능동적으로 최대

¹학생회원: 연세대학교 신에너지전기기술훈동 박사과정
²정 회 원: 신안산대학교 전기과 부교수
³정 회 원: 수원과학대학교 전기과 전임강사
⁴학생회원: 연세대학교 전기전자공학과 박사과정
⁵정 회 원: 제주대학교 전기공학과 조교수
⁶정 회 원: 한국폴리텍1대학 전기계측과 교수
⁷비 회 원: (주)오선텍 대표이사
⁸정 회 원: 연세대학교 전기전자공학과 교수
 *교신저자: ysyoon@sau.ac.kr
 원고접수 : 2011년 10월 13일
 심사완료 : 2012년 03월 07일
 게재확정 : 2012년 03월 07일

전력을 추적할 수 있어야 하는데, 본 논문에서는 제어가 간단하여 널리 사용되는 P&O 제어기법을 활용하여 MPPT를 구현하였으며, 이를 적용한 초전도전원장치와 접목하여 PSIM 시뮬레이션 상용프로그램을 통하여 전체 시스템의 효율극대화를 검증하고자 한다[6].

2. 본 론

2.1. 태양광에너지를 결합한 초전도마그넷 충전장치

그림 1은 태양광에너지를 결합한 초전도마그넷 충전 장치의 개략도이다. 그림 2의 루프 1에 전류를 주입시키기 위하여 MPPT로 제어된 태양광전원을 인가한다(Ms). 전류의 주입이 완료된 후, 태양광전원(V_{pv})을 차단하고 동시에 초전도스위치($R_{heater1}$)를 켜치시키면 트랩된 전류는 루프 2로 보내진다. 트랩된 전류는 접합저항(R_{joint})이 없다면 자속보존의 법칙에 따라서 영구전류가 루프 2에 지속적으로 흐르게 된다.

2.2. 태양광전지의 특성

태양전지의 전압-전류, 전압-전력 곡선은 비선형곡선으로 나타내어진다. 태양전지 어레이를 이루는 것은 solar cell이며, 이것은 빛에너지에서 전기로 바로 전환되어지는 p-n접합 다이오드이다. 이러한 태양전지의 특성곡선은 그림 3과 같은 등가회로로 표현된다.

여기서, 전류원 I_{PH} 는 광기전류로 표현되며, R_{SH} 와 R_S 는 각각 셀의 셉트 저항과 직렬저항이며, 보통 R_{SH} 는 매우 크고, R_S 는 매우 작다. 그러므로 R_S 는 간략화된 분석에서는 무시할 수 있다. 또한 태양전지의 등가회로에 대하여 일반적으로 다음 수식처럼 정리하여 표현할 수 있다.

$$I_{OUT} = I_{PH} - A \exp\left(\frac{q}{BkT} \times V_{out} + I_{out} \times R_S\right) - 1 - \frac{V_{OUT} + I_{OUT} \times R_S}{R_{SH}} \quad (1)$$

- I_{PH} : 광발생전류
- I_{out} : 부하측에 흐르는 전류
- V_{out} : 태양전지 출력전압
- k : 볼츠만상수 (1.38×10^{-23})
- B : PN 접합 재료 계수
- T : 절대온도(기준 300K)
- q : 전하량(1.6022×10^{-19})
- K : 계수(다이오드 순방향 전압)
- R_S : 내부 출력저항
- R_{SH} : 내부 저항

수식 1을 이용하면 일사강도와 온도에 대한 태양전지 어레이의 출력특성을 얻을 수 있으며, 이를 전력전자용 프로그램 PSIM을 이용하여 3 kW급 태양전지 어레이의 simulation 모델과 DLL(Dynamic Link Library)파일로 구성하여, 그림 4와 같이 일사량과 온도를 고려한 PSIM 회로도를 작성하였다.

그림 5는 태양전지 어레이의 일사량 1000 W/m²일 때의 시뮬레이션 결과파형이다. 전압-전력곡선의 일사량에 따라서 최대전력점이 결정되는데, 바로 이 점이 태양전지 어레이가 가질 수 있는 최대전력동작점이 되며, 이러한 최대전력점에 대해 태양전지로부터 최대전력을 얻기 위해서는 동작 전압 또는 전류를 세밀하게 제어되어야 한다.

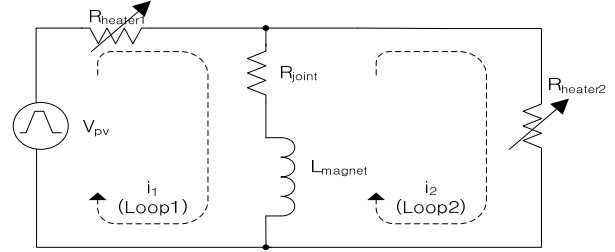


Fig. 2. Equivalent circuit of the HTS magnet charging system combined with PV system.

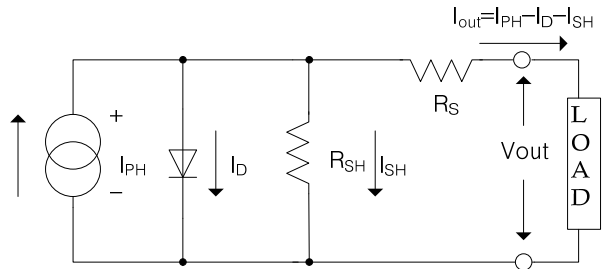


Fig. 3. The equivalent model of photovoltaic cell.

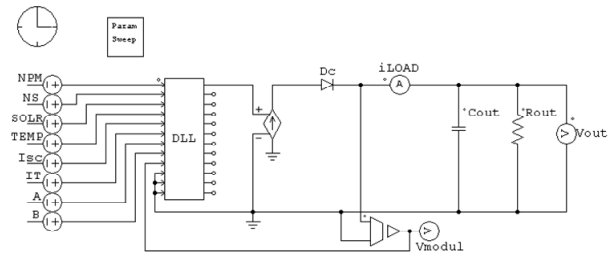


Fig. 4. PSIM model of solar cell array.

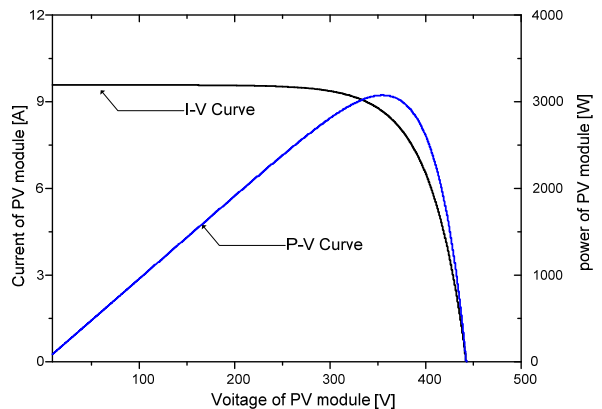


Fig. 5. I-V, P-V characteristics waveform of solar cell array.

2.3. P&O 알고리즘

P&O 알고리즘의 개념은 끊임없이 PV(photovoltaic) 출력 전압(컨버터의 입력 전압)을 섭동(perturbation)시켜서 PV 출력전압 섭동의 결과인 전력(PV 출력 전력)을 sampling한 뒤 결과를 관측(observation)하는 것이다.

P&O MPPT 알고리즘은 임의의 일사량과 패널 온도 조건 하에서 단 하나의 최대전력점이 있다는 가정 하

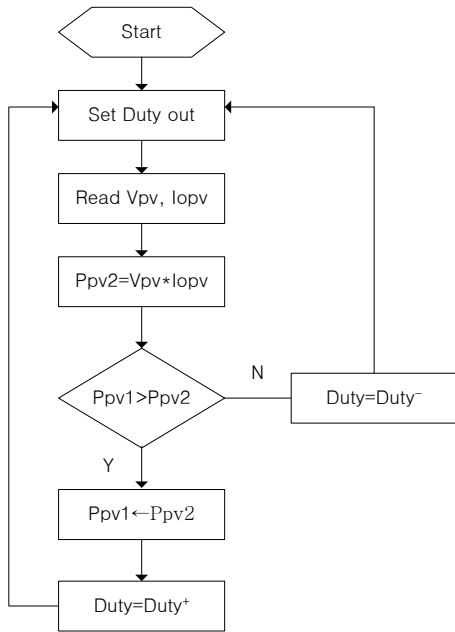


Fig. 6. Flow chart of P&O algorithm.

에서 출발한다. P&O MPPT 알고리즘은 전압 비교와 전력 비교를 통해서 오로지 더 큰 전력을 향해 전압을 바꾸어 나간다. 끊임없이 전력과 전압을 비교하고 전압을 바꾸어 나가는 구조로 인해서 P&O는 MPP 근처에 이르렀을 때, 진동을 한다.

단조로운 전압과 전력 비교 때문에 P&O 알고리즘은 급격히 변하는 일사량 조건하에서는 MPP를 벗어나는 동작을 할 때가 있다.

P&O 알고리즘은 다른 알고리즘에 비해 간단하고 구성하기가 쉬워 널리 사용된다. 그리고 복잡한 연산이 필요하지 않아 연산 속도가 빠르다. P&O 알고리즘 효율은 중요한 파라미터 값 Ta: sampling interval, ∇d: duty step size 두 값에 영향을 받는다. Ta값은 duty 값이 바뀌었을 때, PV 출력 전력은 일시적으로 진동한다. 출력 전력의 일시적인 진동 폭이 작은 오차 값 이내에 일정해지는 시간보다 Ta는 더 긴 시간이어야 한다. Ta가 너무 짧다면 P&O는 의미 있는 전력값을 sampling하지 못하기 때문에 MPP를 효율적으로 추적하지 못하게 된다.

PV 출력 전압을 섭동시키는 것은 DC/DC 컨버터의 스위칭 시그널인 duty를 조절시킴으로써 가능하다. 컨버터의 출력전압이 일정하다는 가정 하에서 컨버터 입

력 전압인 Vref는 duty 비로써 제어가 가능하다. 그러므로 P&O 알고리즘은 그림 6처럼 duty 섭동 flow chart로 표현이 가능하다.

2.4. MPPT를 적용한 제안된 시스템의 시뮬레이션

기존의 태양광에너지를 결합한 초전도 전원장치에 MPPT기법을 적용하여 PSIM을 이용하여 모델링하였다. 그림 7에서 보여지는 것과 같이 A part에는 태양 전지 어레이, B part에는 MPPT를 적용한 buck 컨버터, C part에서는 초전도 전원장치로 구성하였으며, MPPT 알고리즘은 DLL로 구성하였다. DLL은 모두 2 부분으로 이루어져 있는데, 앞서 태양전지 모델링에서 소개된 태양전지부 DLL과 MPPT 제어 DLL로 구성되어 있다.

태양광모듈은 3 kW급 태양광 어레이로 설계하였으며, MPPT제어를 통하여 buck 컨버터로 출력된 에너지는 10 mH의 초전도마그넷에 충전되어진다. 초전도마그넷의 접합저항값은 5 nΩ으로 마그넷양단에 삽입되었다. 실제 마그넷접합저항은 SCS4050선재를 인듐으로 접합시에 8 nΩ으로 측정되어진 보고가 있다[7].

히터 스위치의 타임은 주어진 펄스시간에 따라 교번하여 동작하게 된다. 실제 초전도마그넷충전장치에서는 초전도스위치를 히터에 열을 발생하여 히터에 가해지는 열 스위치의 시간을 제어함으로써 마그넷에 충전되는 전류원을 제어한다. 또한 히터스위치가 극저온에서 동작하기 때문에 실제의 ring time과 falling time은 수십 ms의 상승/하강시간을 가진다. 하지만 본 시뮬레이션에서는 히터 스위치를 모사하는 펄스신호로 대체하여 모사하였다. 히터1과 2의 펄스신호는 아래 그림 8에서 표현되어진 히터스위칭의 제어시그널에 따라 움직이며, ring time과 falling time은 각각 10 ns의 시간으로 주어졌다. 표1에서 설명되어진 모드 1, 2, 3으로 히터동작시간을 조정하였다.

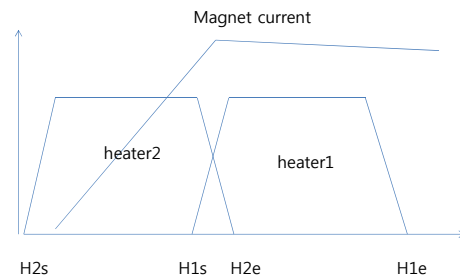


Fig. 8. Operating diagram of the HTS charging system.

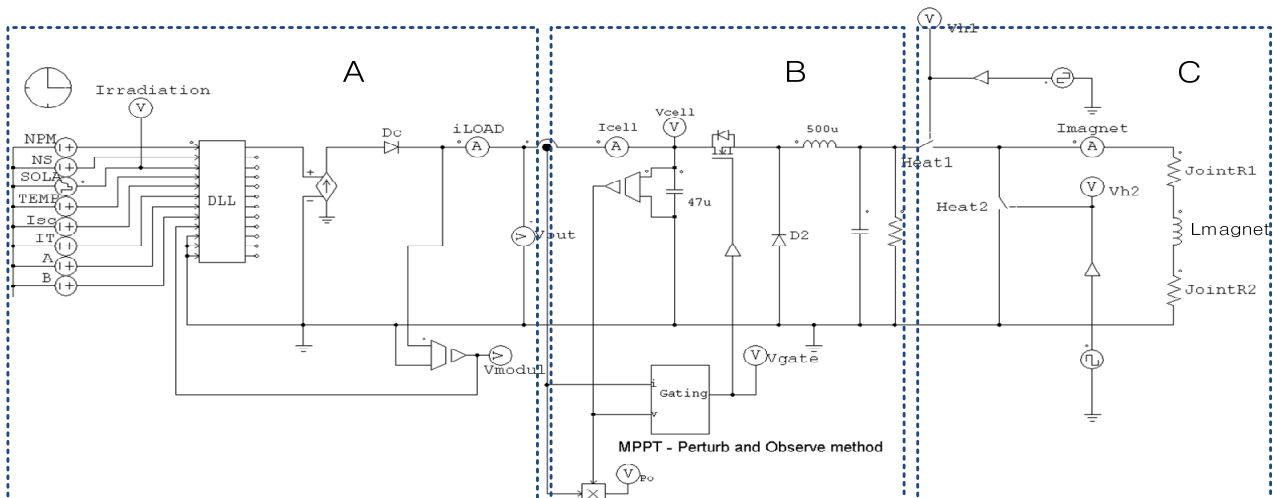


Fig. 7. The overall configuration of the proposed MPPT converter.

Table 1. Parameter values for simulation.

항목	세부 사항		
태양전지 어레이			
Temp(Cell 온도)	50 °C		
Isc(단락전류)	4.7 A		
Irradiation(일사량)	600→800→1000 W/m ²		
NPM(Cell 병렬갯수)	2		
NSS(Cell 직렬갯수)	720		
초전도마그넷충전장치			
	Mode1	Mode2	Mode3
H2s: Heater2 start Time[sec]	0	0	0
H2e: Heater2 end Time[sec]	0.5	1	2
H1s: Heater1 start Time[sec]	0.5	1	2
H1e: Heater1 end Time[sec]	1	2	4
마그넷 인덕턴스	10 mH		
마그넷 접합저항	5 nΩ		
히터스위치 저항	37 Ω		

본 시뮬레이션을 통하여 다음과 같은 결과를 확인하고자 한다.

- (1) 일사량 급변시 어레이 출력전압, 전류 및 전력의 새로운 최대출력점의 추종시간
- (2) 일사량 가변에 따른 MPPT 추종 전력
- (3) MPPT제어를 통해 발생된 태양에너지가 buck 컨버터를 통하여 초전도마그넷에 충전되는 전류량
- (4) 히터1과 히터2의 동작시간에 따른 초전도마그넷에 충전되는 전류의 양

P&O 알고리즘에 근거하여 구현한 MPPT 결과파형을 아래에 나타내었으며, 태양전지 어레이의 온도는 50 °C로 놓고, 일사량을 600 W/m²에서 1,000 W/m²까지 200 W/m²의 간격으로 증가시켰을 경우를 나타내었다.

그림 9는 일사량 600 W/m²일 때의 P&O 알고리즘의 정상상태를 나타낸다. 태양광어레이의 출력전압, 출력전류, 출력전력을 살펴보면 제어 알고리즘이 일정한 주기로 최대전력점과 그 주위를 추종하는 것을 알 수 있다. MPPT를 추종할 때 태양전지와 출력전압이 주기적으로 증가, 감소하며 이전의 출력전압과 현재의 출력전압을 비교하여 최대전력의 상태를 추종하는 결과를 잘 보여주고 있다. 그림 10의 (a)는 MPPT를 적용하지 않고 일반적인 제어시의 최대전력점을 나타내었고, 그림 10의 (b)는 P&O 알고리즘을 적용했을 때 최

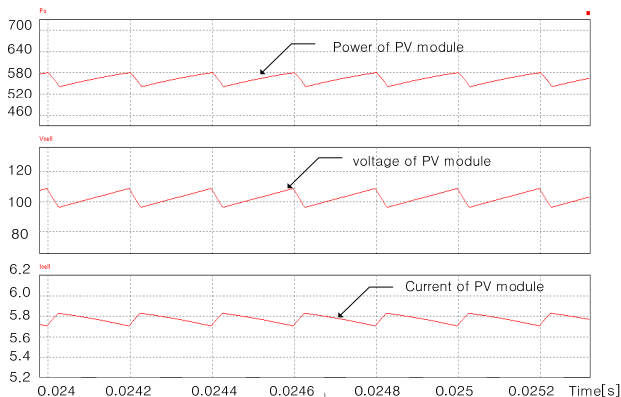
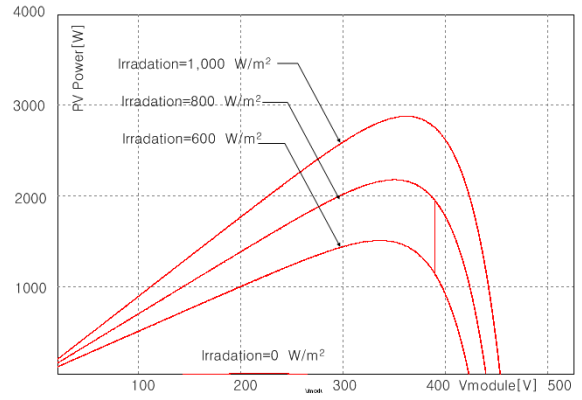
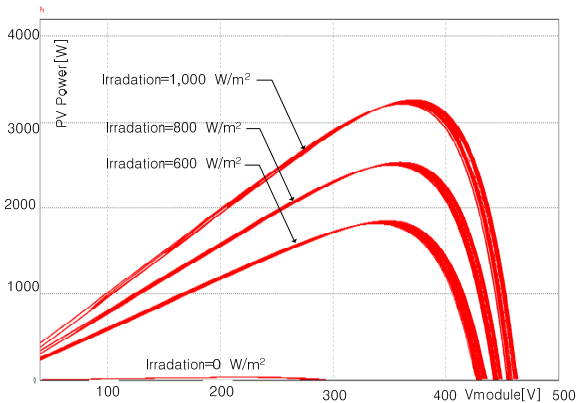


Fig. 9. The steady-state waveform of P&O.



(a)



(b)

Fig. 10. (a) At the normal control method applied the operation of the system. (b) At the P&O algorithm applied the operation of the system.

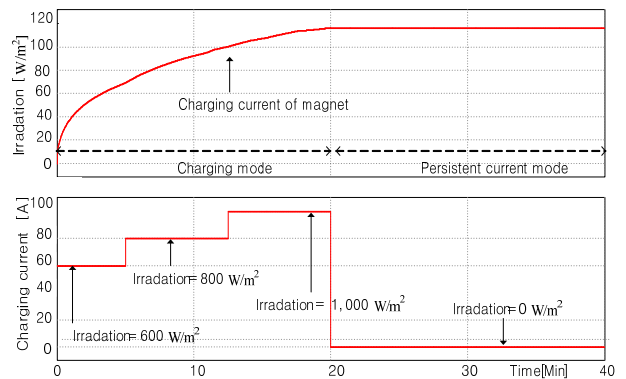


Fig. 11. Response characteristic in charging current of magnet.

대전력점을 나타내었다. P&O 알고리즘 적용시 최대전력이 10 % 정도 증가하였음을 알 수 있다. 기존의 문헌에서도 실제 시스템 구현시에 효율이 정전압제어시 78 %, P&O 제어시 93 %, Inc Cond 제어시 91 %로 나온다고 보고된 사례가 있다[8]. 그림 11은 일사량이 가변되었을 때 마그넷에 116 A의 전류가 충전이 됨을 알 수 있으며, 이때의 히터 동작시간은 각각 2초로 주어졌다. 2초까지는 히터1의 스위치가 동작하여 충전모드로 동작하였으며, 2초 후에는 히터2의 스위치가 동작하여 영구전류모드로 동작함을 알 수 있다. 일사량이 0 W/m²일 때에도 영구전류모드로 잘 동작됨을 알 수 있다.

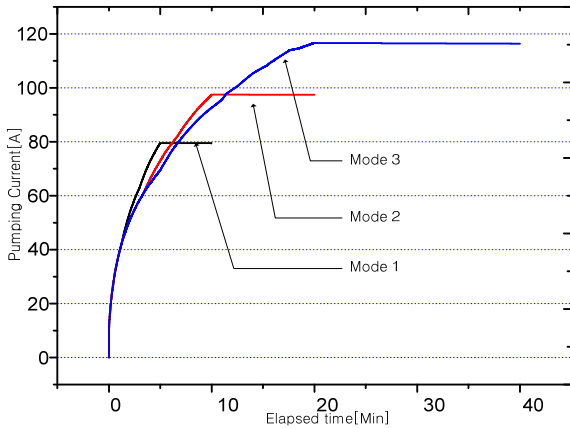


Fig. 12. Simulation results of pumping current under different heater switching time.

그림 12는 표 1의 조건과 같이 일사량이 600 W/m²에서 1,000 W/m²까지 가변이 되고, 초전도스위치의 동작시간에 따른 초전도마그넷에 충전되는 전류의 양이 어떻게 변화하는 가를 나타내었다. 초전도스위치의 on time이 길수록 초전도마그넷에 충전되는 전류의 양이 많음을 알 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 MPPT기법을 적용한 태양광에너지 시스템을 결합한 고온초전도 전원장치 동작특성에 대하여 PSIM을 이용한 시뮬레이션으로 구현하였다.

태양전지는 전류-전압, 전력-전압의 관계가 비선형적 특성을 가지고 있고, 외부조건(온도, 일사량)에 의해서 최대전력점이 수시로 변하여 태양전지로부터 최대전력을 얻는 것은 중요한 일이다. 기존의 태양광에너지 이용을 이용한 초전도전원장치의 경우 MPPT기법이 적용되지 않아 최대전력을 추종할 수 없었으나, 본 논문에서는 MPPT기법의 하나인 P&O 알고리즘을 적용하여 MPPT제어를 한 경우와 하지 않았을 경우의 전력량을 비교해보았다. 또한 실제 실험을 하기 전에 미리 시뮬레이션을 수행하여 시스템의 특성을 예측해볼 수 있었다.

차후 연구로서는 본 시뮬레이션 데이터를 바탕으로 실제 실험 장치를 제작하여 MPPT 적용후의 시스템 효율 향상을 검증해보고자 한다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임.(과제번호 2011-0009232)

참 고 문 헌

[1] 변상필, 정훈영, 박정규, 채민영, “태양광발전을 통한 하이브리드 자동차의 전력 공급 시스템”, 전력전자학회지, 제 13권 제 4호, pp. 56-57, 2008년 9월.

[2] 강병복, 차인수, 임중열, 윤정필, 박세준, “태양광을 이용한 정원등”, 전력전자학회 2004년도 전력전자학술대회 논문집(I), pp. 129-132, 2004년 7월.

[3] Yoon Do Chung, Dae Wook Kim, Hyun Chul Jo, Yong Soo Yoon, and Tae Kuk Ko, “Fundamental performance of novel power supply for HTS magnet using solar energy”, Cryogenics, vol. 51, issue 6, pp. 220-224, June, 2011.

[4] 김대욱, 정윤도, 조현철, 윤용수, 김현기, 고태국, “태양광에너지 시스템이 결합된 HTS 자속펌프의 제작 및 예비실험”, 한국초전도·저온공학회 논문지, vol. 13, no. 1, pp. 22-26, 2011년 3월.

[5] Femia, N. Petrone, G. Spagnuolo, G. Vitelli, M., “Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method”, IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 20, Issue 4, pp. 963-973, July, 2005.

[6] Chihchiang Hua, Chihming Shen, “Study of maximum power tracking techniques and control of DC/DC converters for photovoltaic power system”, Power Electronics Specialists Conference, 1998. PESC 98 Record. 29th Annual IEEE, vol. 1 pp. 86-93, May, 1998.

[7] Hyun Sung Kim, Na Young Kwon, Ki Sung Chang, Tae Kuk Ko, Ho Min Kim, Woo Seok Kim, Chan park, and Haigun Lee, “Characteristics of the YBCO Coated Conductor(CC) by Chemical Etching”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 19, no. 3, June, 2009.

[8] 김기현, 유권중, 정영석, 김영석, “Computer Simulation을 통한 MPPT제어 알고리즘 고찰”, 추계전자학술대회 논문집, pp. 107-110, 2000년 11월.

저 자 소 개



김대욱(金大旭)

1973년 2월 7일생, 1996년 경남대학교 전기공학과 졸업, 1998년 동대학원 전기공학과(공학석사), 2007~2008, Conergy, Central Engineering팀 차장, 현재 연세대학교 신에너지전기기술훈동과정 박사과정.



윤용수(尹庸錫)

1961년 8월 27일생, 1983년 성균관대 공대 전기공학과 졸업, 1995년 연세대 공학석사, 2001년 동 대학원 공학박사, 1985~1998년 대우전자(주)개발팀장, 현재 신안산대학교 전기과 부교수.



정윤도(鄭允道)

1972년 2월 16일생, 1999년 건국대학교 전기공학과 졸업, 2001년 연세대학교 전기전자공학과 졸업(공학석사), 2007년 京都(Kyoto)대학교 전기공학과 졸업(공학박사), 현재 수원과학대학교 전기과 전임강사.



조현철(趙賢哲)

1979년 11월 30일생, 2007년 동국대 공대 전기공학과 졸업, 2009년 연세대 대학원 전기전자공학과 졸업(공학석사), 현재 동 대학원 전기전자공학과 박사 과정.



오재기(吳在寄)

1962년 9월 27일생, 2001년~현재 (주)오선택 대표이사, 현재 성균관대학교 정보통신공학과 석사과정.



김호민(金鎬民)

1970년 8월 23일생, 2002년 연세대학교 전기전자공학과 졸업 (공학박사), 2002년~2004년 M.I.T. Francis Bitter Manget Lab. Post-Doctoral Research Associate, 2004년~2006년 LG산전(주) 전력연구원 선임연구원, 2006년~2011년 한국전기연구원 초전도연구센터선임연구원, 2011~현재 제주대학교 전기공학과 조교수.



고태국(高太國)

1955년 7월 4일생, 1981년 연세대 공대 전기공학과 졸업, 1983년 Case Western Reserve Univ. Dept. of EEAP졸업(M.S.C). 1986년 Case Western Reserve Univ. Dept. of EEAP졸업(Ph.D), 1986년~1988년 Ohio Cleveland State Univ. 전기공학과 조교수, 2008년~2010년 한국초전도·저온공학회 회장, 현재 연세대학교 전기전자공학과 교수, 현재 한국 초전도 저온공학회 명예회장.



김태중(金泰重)

1960년 3월 28일생, 2008년 연세대학교 대학원 전기전자공학과 졸업(공학박사), 현재 한국폴리텍1대학 전기계측과 교수.