

퍼지제어를 이용한 태양광발전 시스템의 출력특성

임흥우*, 김성결*, 최연옥*, 서진연**, 오금곤*, 조금배*, 백형래*
 *조선대학교, **한영대학

Output Characteristics of PV System Using Fuzzy Controller

H.W Lim*, S-K Kim*, J.Y. Seo**, G.G. Oh*, G.B Cho*, H.L. Baek*
 *Chosun University, **Hanyoung College

Abstract - In order to improve the system utility efficiency of energy conversion, it is desirable to operate the PV system at maximum power point of solar cell under versable condition.

This paper describes the experimental results of the PV system that contains a solar modules and DC-DC converter(boost type chopper). The Simulation results show that the PV system always operate at maximum power point of solar cells having stabilize output voltage waveform with relatively small ripple component.

전지 내에서 흡수되어 광자수는 지수함수적으로 감소한다. 그림1은 빛이 조사될 때 광기전력효과를 이용한 태양전지의 등가회로를 보여주고 있다.

여기서 I_{ph} 는 입사된 빛에 의해 생성된 캐리어(Carrier)가 외부로부터 방해받지 않을 때 폐회로를 통해 흐르는 광전류이고, I_d 는 암전류로서 I_{ph} 와는 반대 방향이다. 병렬저항 R_{sh} 는 이상적인 다이오드 특성에서 벗어나 일정한 상수 저항으로 표시되는 누설저항을 나타내며, R_s 와 R_L 은 각각 전지 내부에 존재하는 직렬 저항과 외부에서 걸어주는 부하저항을 나타낸다.

1. 서 론

태양전지모듈이 아직까지는 고가이고 일사량, 소자온도, 부하와 같은 외부환경 등에 따라 최대출력점이 변하는 특성을 가지고 있으며 변환효율이 십수 % 정도밖에 되지 않기 때문에 가능한 많은 에너지를 태양전지에서 얻을수 있도록 해야하며, 항상 최대출력점에서 동작하도록 제어해야 할 필요가 있다.

본 논문에서는 태양전지 모듈로부터 직류전력을 얻으나 일사량, 온도 및 주위상황에 따라 출력특성이 다르기 때문에 최대전력을 얻을수 있는 퍼지제어 알고리즘을 적용하여 시뮬레이션 행하였다.

일반적으로 최대출력점을 찾기 위한 방법으로는 Boehringer에 의한 hill climbing method가 사용된다. 이 방법은 태양전지의 출력을 검출하여 단순히 비교하여 최대출력점을 추종해 가는 방법이며 이 방법을 적용하는 경우 최대전력점을 찾는데 걸리는 시간과 전력의 맥동 사이에는 Trade-off 관계가 있으므로 추종시간이 길어질 뿐만 아니라 컨버터 출력맥동이 커지므로 에너지 변환효율을 저하시키는 요인이 된다.⁽¹⁾

이러한 문제점을 보완하기 위하여 본 논문에서는 퍼지 논리를 사용한 최대출력점 추종방법을 승압형 초퍼 및 인버터에 적용하여 최대전력점을 추적해 가는 방식을 제안했다. 제안된 퍼지제어 알고리즘은 시뮬레이션을 통해 고찰하였다. 본 논문에서는 기존방식의 제어방법에서 나타났던 Trade-Off 문제를 개선할 수 있었으며 최대출력점을 추종하면서 일정출력전압을 얻을수 있었다.

2. 본 론

2.1 태양전지의 특성

태양전지는 한 개의 이상적인 다이오드와 I_{ph} 의 크기를 갖는 정전류원으로 구성되어 있지만 이상적인 다이오드를 제작하는 것이 불가능하므로 접촉저항 및 표면층의 시트(sheet)저항 등을 표시하는 직렬저항 R_s 와 병렬저항 R_{sh} 를 고려해야 한다. 태양전지 표면에 입사하는 빛의 일부는 표면에서 반사되며, 표면을 투과한 빛은 태양

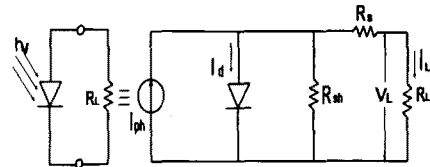


Fig. 1 The equivalent circuit of solar cell

등가회로에서의 태양전지의 출력전류는 식(1) 및 식(2)와 같이 구할 수 있다.

$$I = I_{ph} - I_d - V/R_{sh} = I_{ph} - I_0(\exp qV/nKT - 1) - V/R_{sh} \quad (1)$$

$$V_d = V + IR_s = [nKT/q \ln \{ (I_{ph} - I/I_0) + 1 \}] + IR_s \quad (2)$$

여기서, I_0 는 다이오드 포화전류이다.

윗 식으로부터 태양전지의 출력전류를 구하면 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V + IR_s)}{nKT} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (3)$$

그림 1에서 광 투사시 $R_s = 0$, $R_{sh} = \infty$ 인 이상적인 PN접합 다이오드인 경우 부하에 흐르는 전류 I_L 은 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$I_L = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{qV}{nKT} \right) - 1 \right] \quad (4)$$

여기서, I_L 은 출력전류, I_{ph} 는 광전류, I_0 는 다이오드 포화전류, n 은 다이오드 상수, K 는 볼츠만 상수이고 q 는 전자의 전하량이다.

일정온도와 일정 일사조건에서 태양전지의 전압-전류 특성 곡선은 그림 2와 같이 된다. 여기서 개방 전압 V_{oc} , 단락전류 I_{sc} , 충진율 FF(Fill Factor)등 3개의 변수는 에너지 변환효율과 관련되는 파라미터로서, 우선 식(4)로부터 $I_L = 0$ 인 조건에서 개방전압 V_{oc} 는 식(5)와 같다.

$$V_{oc} = \frac{nKT}{q} \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_0} + 1 \right) \quad (5)$$

단락전류 I_{sc} 는 $V_L=0$ 인 조건으로부터 $I_{sc}=I_{ph}$ 가 된다. 전지에 연결된 부하저항의 크기를 조정함으로써 어떤 최적 동작점에서 최대의 출력 P_{max} 를 식(6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{max} = V_m \cdot I_m \quad (6)$$

부하저항에서 소비되는 에너지를 P_{out} 라 하면 식(7)과 같다.

$$P_{out} = V \cdot I = V \cdot I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (7)$$

최적부하조건에서 $\frac{dP_{out}}{dV} = 0$ 이므로 최적동작전압 V_m 은 식(8)과 같다.

$$V_m = \exp\left(\frac{qV_m}{nkT}\right) \left(1 + \frac{qV_m}{nkT}\right) = \left(\frac{I_{ph}}{I_0}\right) + 1 \quad (8)$$

또한 이때의 최적동작전류 I_m 은 식(9)와 같다.

$$I_m = \frac{(I_{ph} + I_0) \cdot \exp\left(\frac{qV_m}{nkT}\right)}{1 + \left(\frac{qV_m}{nkT}\right)} \quad (9)$$

P_{max} 이 커지기 위해서는 특성곡선에서 V_m 과 I_m 이 I_{sc} 와 V_{oc} 에 가까워야 함을 알 수 있다.

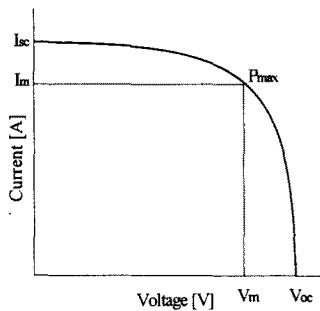


Fig. 2 The voltage and current curve of solar cell

태양전지의 특성을 평가하는데 있어서 단락전류, 개방전압과 더불어 가장 중요한 요소 중의 하나는 충전율이며 식(10)과 같이 정의된다.

$$FF = (V_m \times I_m) / (V_{oc} \times I_{sc}) \quad (10)$$

태양전지의 에너지 변환효율은 태양전지에서 얻을 수 있는 최대의 전기 에너지를 입사광에너지로 나눈 값으로 다음 식(11)과 같다.

$$\eta = \frac{V_m \times I_m}{P_m} = \frac{V_{oc} \times I_{sc}}{P_m} \times FF \quad (11)$$

여기서, P_m 은 입사된 태양광 에너지이다.

따라서 태양전지의 효율을 높이기 위해서는 단락전류 I_{sc} , 개방전압 V_{oc} , 그리고 충전율 FF 를 높여야 한다.

2.2 태양전지의 온도 및 일사량관계

지금까지 태양전지의 특성을 고찰한 결과 태양전지의 전기적 특성을 결정하는 요소를 보면 내부적인 변수로서 내부직렬저항 R_s , 내부병렬저항 R_{sh} 그리고 다이오드 포화전류 I_0 이고, 외부적인 변수로서는 일사량과 온도의 변화 등이 있다. 여기서 내부 직렬저항은 태양전지에 광전류가 흐를 때 이 전류의 흐름을 방해하는 저항값으로서 $n+$ 층의 표면저항, p 층의 기판저항, 전극 접촉저항 및 전극자체의 고유저항 등이 포함되고 최대의 효율을 얻기 위해서는 직렬저항 값이 최소로 되어야 한다. 특히 집광형 태양전지에서와 같이 일사강도가 크고 고온인 경우 직렬저항이 미치는 영향은 매우 크다.

태양전지의 직렬저항을 낮추기 위해서는 도핑 농도가

크고 접합깊이가 깊어야 하나, 이렇게 하면 진류가 작아 지므로 이에 대한 최적화가 필요하며, 일반적인 태양전지의 경우에는 접합 깊이를 $0.3 \sim 0.5 (\mu m)$, 표면저항은 $50 \pm 10 (\Omega)$ 정도로 하고 있다. 그리고 태양전지의 전극면적을 $5 \sim 10 \%$ 로 유지시키면서, Grid finger 폭을 줄이고 Finger 사이의 거리를 좁혀 Finger의 수를 증가시키면 직렬저항을 줄일 수 있다. 일반적인 태양전지의 경우에는 $1 (cm^2)$ 면적당 $1 (\Omega)$ 이하의 직렬저항을 가지면 높은 충전율을 얻을 수 있다.

3. Fuzzy를 이용한 MPPT 태양광발전 시스템

3.1 MPPT 제어

태양전지의 발생전력은 일사량, 태양전지의 소자온도 및 동작온도 등에 의존하고, 에너지 변환효율은 십수 % 정도로 매우 작은 편이다. 그러므로 시스템을 소형화 하여 손실을 줄여야 하며, 가능한 한 태양전지로부터 많은 에너지를 끌어내어 효율을 증대시켜야 한다. 태양전지의 출력특성은 일사량, 동작전압 및 온도 등에 따라 동작특성이 변하고 최대출력점도 항상 변하고 있다.

여기서 태양전지의 출력특성은 일사량 변화에 따른 태양전지의 최적동작점인 출력전력의 P_{max} 점을 각각 가지고 있는데 이 P_{max} 점이 각 일사량 값에서 태양전지에너지효율이 가장 높은 점이라 할 수 있다.^[2-3]

P&O MPPT 제어방법은 간단한 피드백 구조를 갖으며 소수의 추정 파라미터를 갖기 때문에 널리 사용된다. 이는 태양전지전압을 주기적으로 증가, 감소시키으로써 출력전력과 함께 현재 어레이 출력전력 비교에 의해 최대전력의 상태를 연속적으로 추적하며 찾는다. 이 방법은 그림 3과 같은 순서도에 의해 동작한다.

만약 전력이 증가하면 교란은 다음 주기동안 계속해서 같은 방향으로 증가할 것이며 그렇지 않으면 교란의 방향은 반대가 될 것이다. 이것은 어레이 단자전압이 모든 MPPT에 이르렀을 때 P&O 알고리즘은 일정 혹은 천천히 변하는 환경조건에서 자러진동할 것이며 그 결과 태양전지 어레이의 손실이 발생하게 된다. 이 문제는 MPP에 도달했을 때를 검출하기 위해 바로 앞의 주기동안의 두 개의 파라미터 비교와 교란부를 바이패스하기 위한 P&O 알고리즘의 개선에 의해 해결할 수 있다.

또한 전력손실을 줄이기 위한 다른 방법으로는 교란 증가치의 감소를 들 수가 있다. 그러나 환경조건이 급하게 변할 경우 MPP의 추적속도가 늦어지게 되므로 증가치의 결정이 중요하게 된다.

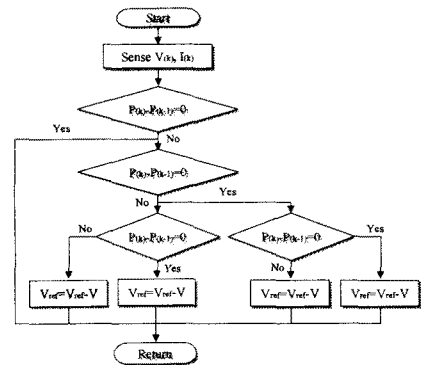


Fig. 3 Flowchart of P&O MPPT Algorithm

3.2. Fuzzy 제어기

태양전지의 출력특성은 일사량 및 온도 등에 따라 항

상 변하고 있으므로 최대전력출력점도 항상 변화하는 것을 알수 있는데 본 논문의 제어기의 목적은 어떠한 일사량 변화에 대해서도 빠른 시간에 섭동없이 정확하게 최대전력점에서 운전할수 있도록 제어하는데 있다.

퍼지제어기는 2개의 입력변수를 갖는데, 샘플링구간 k에서의 입력변수 E(k)와 CE(k)는 다음과 같이 정의된다.

$$E(k) = \frac{V_{ph}(k) \cdot I_{ph}(k) - V_{ph}(k-1) \cdot I_{ph}(k-1)}{I_{ph}(k) - I_{ph}(k-1)} \quad (12)$$

$$CE(k) = E(k) - E(k-1) \quad (13)$$

퍼지언어 변수는 7단계, 즉 PL(Positive Large), PM(Positive Middle), PS(Positive Small), ZO(Zero), NS(Negative Small), NM(Negative Middle), NL(Negative Large)로 정하였으며, 그림 4는 입출력에 대한 7개의 기본 언어변수에 따른 삼각형 모양의 소속함수를 갖도록 하였다.

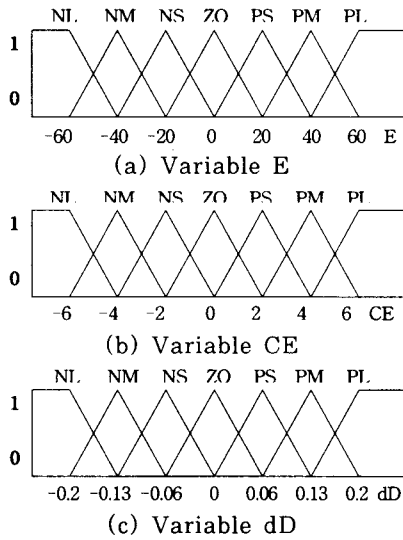


Fig. 4 The membership function for the input E and CE, output dD

표 1은 퍼지제어기의 제어규칙을 나타내는데, 여기서는 행렬의 각각의 요소들은 E(error), CE와 컨버터의 시비율 변화량 dD를 나타낸다. 표 1에서 제어규칙의 한 가지 예를 들면 아래와 같다.

“ IF E is PL AND CE is ZO THEN dD is PL.”

즉, 전류에 대한 전력의 특성곡선에서 기울기가 매우 크고 그 기울기에 대한 변화량이 없으면 제어출력값을 매우 크게 증가시키라는 의미이며 결국 입력신호 E를 zero가 되도록 제어규칙을 설계해야 한다.

Table 3-1. Fuzzy Rule Table

CE \ E	NL	NM	NS	ZO	PS	PM	PL
NL	NL	NL	NL	NL	NM	NS	ZO
NM	NL	NL	NM	NM	NS	ZO	PS
NS	NL	NM	NS	NS	ZO	PS	PM
ZO	NL	NM	NS	ZO	PS	PM	PL
PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PL
PM	NS	ZO	PS	PM	PM	PL	PL
PL	ZO	PS	PM	PL	PL	PL	PL

제어기의 출력값은 퍼지변수로서 소속함수로 표현되는 반면, 실제 플랜트에는 퍼지변수가 적합하지 않으므로 플랜트에 적합한 보통값으로 변환하는 과정인 비퍼지화

단계가 필요하다. 일반적인 비퍼지화 방법으로는 최대평균방법과 무게중심방법을 많이 사용하는데, 본 연구에서는 무게중심방법을 이용하고 이산적인 계산을 수행하기 위해서는 다음과 같은 식(14)로 표현된다.

$$dD_n = \frac{\sum_{j=1}^n \mu(dD_j) \cdot dD_j}{\sum_{j=1}^n \mu(dD_j)} \quad (14)$$

여기서, n은 제어입력 변화량에 대한 양자화 단계이고, dD_j는 j번째 양자화 단계에서 제어입력 변화량을 의미하며, μ(dD_j)는 그 변화량에 대한 소속함수값을 나타내고 있다.

4. 시뮬레이션 및 고찰

4.1. 태양전지 출력특성 시뮬레이션

본 논문에서는 태양전지의 출력특성 및 기존의 MPPT 제어 기법과 제안한 퍼지제어기법에 의한 출력특성을 시뮬레이션을 통하여 고찰하였고 퍼지제어기를 이용하여 MPPT를 위한 태양광발전시스템 부분을 모델링하였다. 시뮬레이션 툴은 Matlab m-file을 이용하였고 태양전지 모듈의 파라미터는 표2와 같다.

Table 2. Parameter of Photovoltaic module

Parameter	Value	Parameter	Value
최대전력	53 [W]	표준온도	25 [°C]
개방전압	21.0 [V]	정격전압	17.4 [V]
단락전류	3.35 [A]	정격전류	3.04 [A]

그림 5는 온도변화에 따른 태양전지의 전압-전류특성을 시뮬레이션한 파형으로 온도변화가 0 °C에서 75°C까지 변화시켰을 때 특성을 나타내고 있다. 온도가 변함에 따라 최대전력점이 변동함을 알 수 있으며, 따라서 최대 출력점 기준값도 변동값에 따라 가변하여야 함을 알 수 있다.

태양전지에 저항부하를 연결하여 개방상태에서 단락상태로 서서히 가변하여 전압-전류변화를 시뮬레이션한 결과를 그림 6에 나타내었다. 저항값이 감소함에 따라 전류는 증가하는 반면 전압은 감소하며 곡선 부분에서 전압감소가 적음을 확인할 수 있다. 한편, 그림 7에는 일사량변화에 따른 출력특성을 시뮬레이션한 그림으로 전압의 변화는 미소하지만 단락전류는 크게 변화함을 확인할 수 있다. 또한 그림 8은 일사량을 1000[W/m²]을 기준으로 하고 일사량을 250[W/m²]간격으로 감소한다는 가정하에 시뮬레이션을 수행한 결과 일사량의 감소에 따라 최대전력점이 감소함을 확인할 수 있었다.

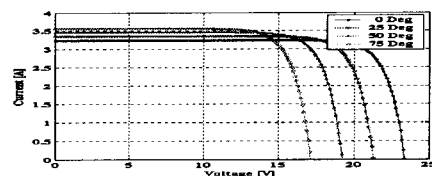


Fig.5 V-I characteristic curve according to variation temperature

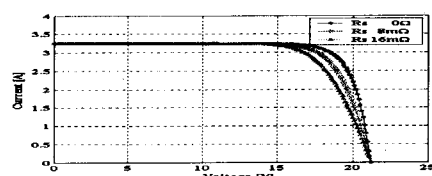


Fig.6 V-I characteristic curve of operation at difference resistance

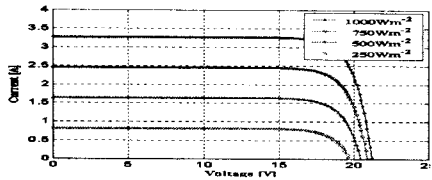


Fig. 7 V-I characteristic curve at different insolation

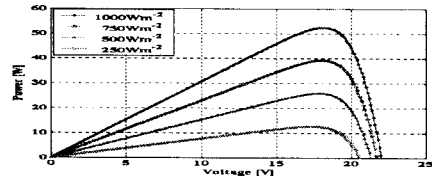


Fig. 8 Output Power Characteristic curve according to variation insolation

4.2. Fuzzy 제어 MPPT 특성

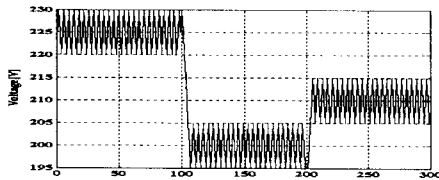
본 논문에서는 태양광어레이 출력을 최대전력점에서 동작하여 안정된 출력전류를 얻기위한 제어 시뮬레이션을 수행하였다.

그림 9는 기존의 제어기로 구현한 MPPT 시뮬레이션 출력파형을 나타내며 그림 10은 Fuzzy 제어를 적용한 MPPT 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다.

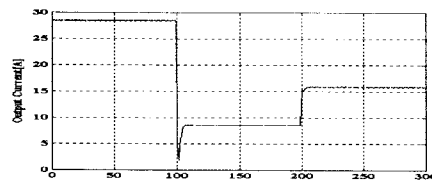
일사량을 0에서 100[ms] 동안에는 1000[W/m²]로 설정하고 100[ms]에서 200[ms] 구간에는 어두운 환경을 가상하여 250[W/m²]의 일사량으로 설정하였으며 200[ms]에서 300[ms] 구간에는 약간 어두운 기상조건을 가상하여 500[W/m²]의 일사량으로 시뮬레이션을 수행하였다.

그림 9는 정상적인 주기로 MPPT 동작 기준전압이 225[V]로 추종되어 동작하지만 명암 변화시 속응특성이 떨어짐을 확인할 수 있었다.

반면 Fuzzy 제어를 이용한 MPPT 제어특성을 모의결과 그림 10의 동작기준전압은 225[V]로 추종됨을 확인하였다. 출력파형에서 알 수 있듯이 기존의 제어기보다 동작전압이 유동적으로 변하여 안정된 출력을 얻기 위한 MPPT 제어가 효과적으로 수행됨을 확인할 수 있었다.

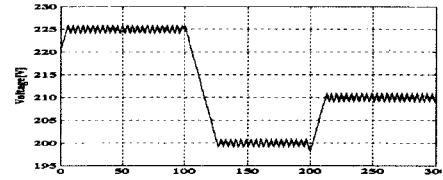


(a) voltage waveform

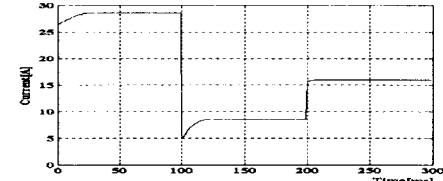


(b) Output current

Fig.9 Output characteristic according to variation insolation in conventional control method



(a) Voltage waveform



(b) Output current

Fig.10 Output characteristic according to variation insolation in Fuzzy control method

5. 결론

본 논문에서는 태양전지의 모델링 및 퍼지논리를 사용한 새로운 최대전력 추종제어방식을 시뮬레이션하였고 그 제어특성을 평가, 검토하였다.

제안된 퍼지제어기는 Boehring에 의한 hill climbing method에서 Trade-off 관계로 인하여 추종 시간의 길어지는 문제와 커다란 맥동이 나타났던 문제점을 보완할 수 있었고, 시뮬레이션에서 섭동이 거의 없이 최대전력을 추종하는 것을 확인했으며 그 결과 빛에너지를 전기에너지로 변환하는 태양광발전시스템의 에너지 변환효율이 향상됨을 알 수 있었다. 또한 일사량 변화에 따른 태양전지어레이 출력전압을 얻을 수 있었으며 시뮬레이션 결과에서 볼수 있듯이 MPPT제어가 됨을 알 수 있었다.

본 논문의 궁극적인 요지는 태양광 발전이 태양에너지를 직접 전기에너지로 변환하는 시스템이므로 연료가 필요 없고, 설비자체가 가동부품이나 열기관이 없어 수명이 길고, 다른 발전방식에 비하여 운전과 유지보수가 용이하며 모듈로 구성하기 때문에 수요나 지형에 맞게 설계할 수 있으므로 송전시설이 필요하지 않아 송배전 손실이 없다는 장점들을 살려, 보다 최적화된 제어와 효율이 나은 태양광 발전시스템을 구현하고자 하는 것이다.

(참 고 문 헌)

[1] Fumio Harashima and seiji Kondo, "Optimal Power Flow Control of Photovoltaic Solar Energy System", Institute of Industrial Science, University of Tokyo, 7-22-1, Roppong, Minato-ku, Tokyo 106, JAPAN

[2] Victorio Arcidiacono, Sando Corsi, Luciano Lambri, "Maximum Power Point Tracker for Photovoltaic Power Plants", IEEE, pp. 507-512, 1982.

[3] Masato Hoshino, Gunji Kimula, Mitsuo Shioya, "DC-DC Converter and Inverter for Photovoltaic Modules", IECON, pp. 569-574, 1988.