

# Solar Vehicle을 위한 IPMSM 드라이브의 새로운 MPPT 제어

(A Novel MPPT Control of IPMSM Drive for Solar Vehicle)

장미금\* · 최정식 · 정동화\*\*

(Mi-Geum Jang · Jung-Sik Choi · Dong-Hwa Chung)

## Abstract

The solar vehicle is in the spotlight in the eco-friendly aspect of photovoltaic system using unlimited solar energy. The solar vehicle uses energy of photovoltaic and battery. The solar vehicle uses stored energy in battery when photovoltaic power is lower than consumption power by solar vehicle and if photovoltaic power is higher than consumption power by solar vehicle then photovoltaic power is stored to battery. To improve use efficiency of photovoltaic, the researches about MPPT method to operate maximum power point and interior permanent magnet synchronous motor(IPMSM)drive system using photovoltaic is necessary. This paper proposes MPPT control algorithm for solar vehicle using new fuzzy control(NFC). In this paper, to reduce switching loss, the DC-DC converter is omitted. The NFC controller can be use instead of PO. The NFC controller is performed MPPT control using solar cell voltage and  $q$ -axis current of IPMSM. The output of NFC is command  $q$ -axis current of IPMSM and this current is operated IPMSM. The response characteristics of algorithm proposed in this paper is compared response characteristics of conventional PO method by PSIM program and validity of this paper prove using this result.

Key Words : PV System, MPPT Algorithm, Efficiency, Insolation

## 1. 서 론

현재 세계에서 사용되고 있는 에너지를 에너지원별로 분류하여 보면 석유 32[%], 석탄 26[%], 천연가스 20[%]로써 이들 화석연료만으로도 전체의 80[%] 가

가이 차지하고 있다. 또한 인류가 가장 많이 사용하고 있는 전기에너지는 대부분이 화력발전이나 원자력 발전에 의존하고 있는 실정이다. 화력발전의 경우 화석 연료 자원의 한정성, 에너지 대량 소비에 따른 산성비, 지구 온난화, 오존층의 위협 등의 환경파괴 문제가 크게 대두되고 있다. 원자력 발전의 경우에는 연료인 우라늄 1[g]에서 석탄 3[ton]에 해당하는 열에너지가 얻어지나, 핵분열에 의해서 생기는 방사능의 원자로 주변에 누출, 방사성 폐기물의 처분 및 재처리, 발전소 입지 문제 등의 안전도 문제가 제기되고 있다[1].

\* 주저자 : 전자부품연구원 연구원  
\*\* 교신저자 : 순천대학교 전기제어공학과  
Tel : 061-750-3543, Fax : 061-752-1103  
E-mail : hwa777@sunchon.ac.kr  
접수일자 : 2011년 2월 23일  
1차심사 : 2011년 3월 12일, 2차심사 : 2011년 7월 15일  
심사완료 : 2011년 8월 17일

이에 대한 대책으로 선진국에서는 대체 에너지 개발을 추진하고 있으며, 그 중에서도 신 에너지원으로써 공해가 없으며 무한한 태양에너지를 이용하는 태양광 발전시스템이 새로이 각광을 받고 있다[2-3].

Solar Vehicle 및 전기자동차는 환경정화라는 측면에서 각광을 받고 있으며 미래의 중요한 교통수단으로 대두될 전망이다. 미국과 유럽은 대기보전법을 제정하여 무공해 자동차와 저공해 자동차의 보급을 의무화하고 있는 추세이다. 이러한 동향은 미국의 전역에 확산되고 있으며 전 세계적으로 관심이 높아지고 있다. 또한 앞으로 Solar Vehicle 및 전기자동차의 시장 규모는 매우 활발할 것으로 예측된다.

그러나 현재 국내의 축전지 기술은 선진국 대비 90[%]로 지속적인 기술개발을 할 경우 국내의 기술로 충분히 Solar Vehicle에 사용될 축전지를 만들 수 있을 것이다[4-5]. Solar Vehicle의 경우 소모되는 전력보다 태양광에 의해 발전되는 전력이 작을 경우 축전지에 저장된 에너지를 이용하게 된다. 축전지에 저장된 에너지는 한정적이기 때문에 태양광 발전으로부터 출력되는 전력의 값을 최대도 이용할 수 있는 MPPT 제어와 태양광을 이용한 IPMSM 드라이브에 대한 제어기술이 필요하다.

일반적으로 MPPT 제어는 태양광 발전 시스템의 DC-DC 컨버터에서 수행되었으며, 이는 일사량 조건만을 고려하여 최대전력을 찾는 방법이다[6-12]. 이와 같은 방법에서 태양광 발전을 전원으로 한 전동기 제어는 시스템 제어가 복잡하고 DC-DC 컨버터에 의한 부대비용상승과 전력 변환기의 손실이 많아지게 된다. 또한 축전지의 균등충전 및 일정시간이 지나면 축전지를 교체해야하는 번거로움으로 Solar Vehicle에 적용하기에는 비효율적이다[13]. 따라서 Solar Vehicle의 효율개선과 실용화를 위해 일사량 및 부하변화에 대한 MPPT 제어를 수행하며 DC-DC 컨버터를 생략하여 제어가 간단하고 용이한 제어방법이 절실히 필요하다.

태양전지는 일사량과 온도 및 부하에 따라 비선형적으로 하므로 이러한 비선형 특성을 모델링하여 효율을 개선하기 위해 최대 전력점에 운전할 수 있는 MPPT 알고리즘을 개발한다. Solar Vehicle에 이용된

종래의 MPPT 알고리즘에 대한 문제점을 분석하고 DC-DC 컨버터의 유무에 대한 응답특성을 비교하고 전류 리플 등에 결과를 나타낸다. Solar Vehicle을 위한 IPMSM 드라이브는 PSIM 프로그램을 통해 모델링하고 성능 시험을 수행하여 제시한 MPPT 알고리즘을 PSIM 프로그램에 적용하여 종래의 알고리즘과 비교하고 일사량 등의 파라미터 변동에 대한 응답특성을 제시하여 본 논문의 타당성을 입증한다.

## 2. 태양전지 모델링

### 2.1 태양전지 모델링

빛이 조사될 때 광기전력 효과를 이용한 태양전지의 등가회로를 그림 1과 같이 나타내며, 태양전지의 출력 전류에 대한 식은 다음의 등가회로를 기반으로 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

여기서  $I_{ph}$ 는 광전류,  $I_d$ 는 다이오드 포화전류이다.

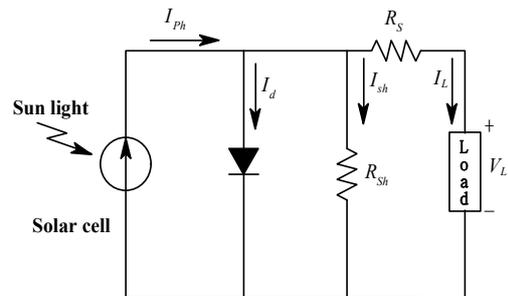


그림 1. 태양전지의 등가회로  
Fig. 1. Equivalent circuit of solar cell

$$I_L = I_{ph} - I_d - I_{sh} \tag{1}$$

태양전지의 전류-전압 특성곡선을 얻기 위한 수식은 다음과 같이 표현된다.

$$I_{ph} = I_{sc} S_N + I_t (T_c - T_r) \tag{2}$$

$$I_d = I_o \left[ \exp \left( \frac{q(V_L + I_L R_s)}{AkT} \right) - 1 \right] \tag{3}$$

Solar Vehicle을 위한 IPMSM 드라이브의 새로운 MPPT 제어

$$I_o = I_{or} \left[ \frac{T_c}{T_r} \right]^3 \cdot \exp \left( \frac{qE_g}{Bk} \left( \frac{1}{T_r} - \frac{1}{T_c} \right) \right) \quad (4)$$

$$I_L = I_{ph} - I_d - \frac{V_L + I_L R_s}{R_{sh}} \quad (5)$$

여기서  $S_N$  : 단위 일사량,  $I_{sc}$  : 태양전지 단락전류 [A]

$I_t$  : 표면온도 1[°C] 상승 시 단락 전류 온도계수 [A/K]

$T_c$  : 태양전지 온도[K]

$T_r$  : 태양전지 동작 기준온도[K]

$B$  : 제조상수

$I_{or}$  : 태양전지 동작 기준온도에서 역포화전류[A]

$E_g$  : 에너지 밴드 갭(Si PN 접합 에너지 Gap, 1.12[eV]),

또한 개방전압  $V_{oc}$ , 단락전류  $I_{sc}$ , 및 Fill Factor (FF) 등 3개의 변수는 에너지 변환 효율과 관련되는 파라미터이며, 태양전지의 동작회로부터 단락전류  $I_{sc}$  는 이상적으로 광전류  $I_{ph}$ 와 일치하고, 다이오드 포화 전류  $I_d$ 에 의해서 결정되는 태양전지의 개방전압은 다음 식과 같다.

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left[ \frac{I_{ph}}{I_d} + 1 \right] \quad (6)$$

여기서  $V_{oc}$ 는 개방전압,  $k$ 는 볼츠만 상수,  $q$ 는 전하 [C],  $T$ 는 태양전지 동작온도[K]를 나타낸다. 또한 온도변화에 따른 단락전류와 개방전압의 관계식은 다음과 같다.

$$I_{sc} = I_o \left[ \exp \left( \frac{qV_{oc}}{kT} \right) \right] \quad (7)$$

태양전지에 연결된 부하 저항의 크기를 조절함으로써 임의의 최적 동작점에서 최대 출력  $P_{mp}$ 가 얻어지게

되며, 다음 식과 같다.

$$P_{mp} = V_{mp} \cdot I_{mp} \quad (8)$$

부하저항에서 소비되는 에너지  $P_{out}$ 는 다음 식과 같다.

$$P_{out} = V \cdot I = V \cdot \left[ I_{ph} - I_o \left[ \exp \left( \frac{qV}{nkT} - 1 \right) \right] \right] \quad (9)$$

최적 부하조건에서  $\frac{dP_{out}}{dV} = 0$ 이므로, 최적 동작전압  $V_{mp}$ , 최적 동작전류  $I_{mp}$ 는 다음 식과 같다.

$$V_{mp} = \exp \left( \frac{qV_{mp}}{nkT} \right) \left( 1 + \frac{qV_{mp}}{nkT} \right) = \frac{I_{sc}}{I_o} + 1 \quad (10)$$

$$I_{mp} = \frac{(I_{sc} + I_o) \cdot \left( \frac{qV_{mp}}{nkT} \right)}{1 + \left( \frac{qV_{mp}}{nkT} \right)} \quad (11)$$

여기서  $P_{mp}$ 가 커지기 위해서는 특성곡선에서  $I_{mp}$ 와  $V_{mp}$ 가  $I_{sc}$ 와  $V_{oc}$ 에 가까워야 한다. 여기서 Fill Factor 는 다음과 같다.

$$FF = \frac{P_{mp}}{V_{oc} I_{sc}} = \frac{V_{mp} I_{mp}}{V_{oc} I_{sc}} = \frac{V_{mp}}{V_{oc}} \left[ 1 - \frac{\exp \left( \frac{qV_{mp}}{nkt} \right) - 1}{\exp \left( \frac{qV_{oc}}{nkt} \right) - 1} \right] \quad (12)$$

변환효율은 태양전지에서 얻을 수 있는 최대의 전기 에너지를 입사광 에너지로 나눈 값으로 다음 식과 같다.

$$\eta_{PV} = \frac{V_{mp} \cdot I_{mp}}{P_{in}} = \frac{FF \cdot V_{oc} I_{sc}}{P_{in}} \quad (13)$$

식 (2)~(5)를 이용하면 태양전지 어레이의 출력특성을 얻을 수 있으며 그림 2와 그림 3은 PSIM으로 구현한 태양전지 어레이의 모의실험 결과 파형으로 일사량과 온도 변화에 대한 전류-전압 특성곡선을 보여주고 있다.

그림 2는 일사량에 따른 태양전지 출력의 변화를 보여주고 있으며 일사량의 변화 시 태양전지의 개방전압은 큰 변화가 없는 반면 출력전류가 크게 변화하고 있음을 알 수 있다. 그림 3은 온도 변화에 따른 태양전지의 출력특성을 나타낸다. 일사량이 변화한 경우에 비해 온도가 변화한 경우에는 전류의 변화보다 전압 변화가 큰 것을 알 수 있다.

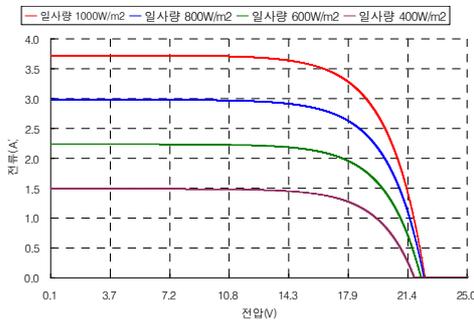


그림 2. 일사량 변화에 대한 I-V 특성곡선  
Fig. 2. I-V characteristic curve with radiation changing

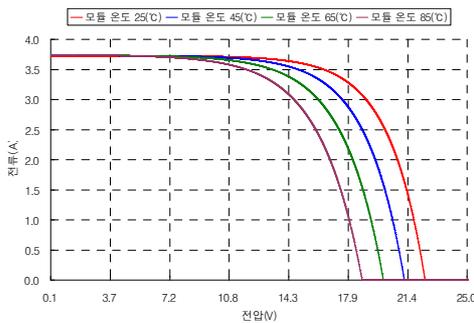


그림 3. 온도 변화에 따른 I-V 특성곡선  
Fig. 3. I-V characteristic curve with temperature changing

## 2.2 IPMSM 모델링

그림 4는 IPMSM의 동특성 등가회로이다.

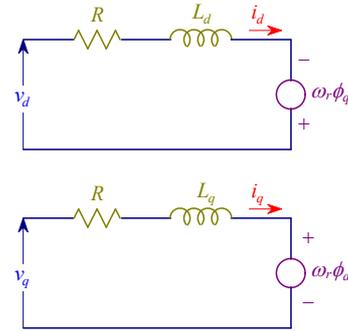


그림 4. 동특성 방정식으로부터 IPMSM 등가회로  
Fig. 4. IPMSM equivalent circuit from dynamic equation

회전자 기준축에서 IPMSM의 고정자  $d, q$  방정식은 다음과 같다.

$$v_d = Ri_d + p\phi_d - \omega_r \phi_q \quad (14)$$

$$v_q = Ri_q + p\phi_q + \omega_r \phi_d \quad (15)$$

여기서  $p$ 는 미분연산자를 나타내며,

$$\phi_d = L_d i_d + \phi_{df} \quad (16)$$

$$\phi_q = L_q i_q \quad (17)$$

전기적인 발생 토크는 다음 식과 같다.

$$\begin{aligned} T_e &= \frac{3}{2} P \{ \phi_{df} i_q + (L_d - L_q) i_d i_q \} \\ &= P_n \{ \phi_{df} i_q + (L_d - L_q) i_d i_q \} \end{aligned} \quad (18)$$

$$T_e = T_L + B\omega_r + Jp\omega_r \quad (19)$$

$P$ 는 쌍극수이며  $T_L$ 은 부하토크,  $B$ 는 댐핑계수,  $\omega_r$ 는 회전자속도이고  $J$ 는 관성 모멘트이다. 인버터의 주파수는 다음과 같이 회전자 속도와 관계가 있다.

$$\omega_s = P\omega_r \quad (20)$$

식 (14)~(17), (19)를 미분 방정식 행렬 형태로 나타

내면 다음 식과 같다.

$$P \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ \omega_r \\ \theta_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L_d} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L_q} & -\frac{\phi_{af}}{L_q} & 0 \\ 0 & \frac{P_m}{J} & -\frac{B}{J} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ \omega_r \\ \theta_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{L_q}{L_d} i_q \\ -\omega_r \frac{L_d}{L_q} i_d \\ \frac{I_m}{J} i_d i_q \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/L_d & 0 & 0 \\ 0 & 1/L_q & 0 \\ 0 & 0 & -1/J \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ T_L \end{bmatrix} \quad (21)$$

여기서  $P_m = P_n \phi_a$ ,  $I_m = P_n(L_d - L_q)$ 이다.

### 3. 종래의 MPPT 제어

종래의 PO 제어방법은 간단한 피드백 구조를 갖고 소수의 추정파라미터를 갖기 때문에 널리 사용된다. 이는 태양전지의 전압을 주기적으로 증가 또는 감소시킴으로써 동작하며, 이전의 교란주기 동안의 태양전지 어레이 출력전력과 함께 현재 어레이 출력전력 비교에 의해 최대전력의 상태를 연속적으로 추적하며 찾는다. 이는 태양전지의 동작점을 규정하는 태양전지 출력단 전압( $V_{PV}$ ) 제어 시에 전압을 일정한 폭으로 변동시킨 후 태양전지 출력전력( $P_{PV}[n]$ )을 관측하고, 이를 이전 출력전력( $P_{PV}[n-1]$ )과 비교하여 출력이 증가하는 방향으로 전압( $V_{PV}^*$ )을 상승 또는 하강시켜 최대 전력점을 추종하는 방식이다.

$\Delta V_{ref}$ 와  $\Delta P(k)$ 의 극성에 따라 스텝 값을 조절하여 다음 기준전압을 결정하는 방법이 PO 방식이며, 제어 알고리즘은 다음과 같다.

그러나 이 방법은 MPP에 도달했을 때 일정 혹은 천천히 변하는 환경조건에서 자려진동(Self-Oscillation) 할 것이며 그 결과 태양전지 어레이의 손실이 발생하게 된다. 또한 환경조건이 급변하는 경우 MPP 속도가 늦어지게 되므로 스텝 값의 결정이 중요하게 되며 급

변하는 일사량에는 적용하기 힘들다는 단점을 가지고 있다.

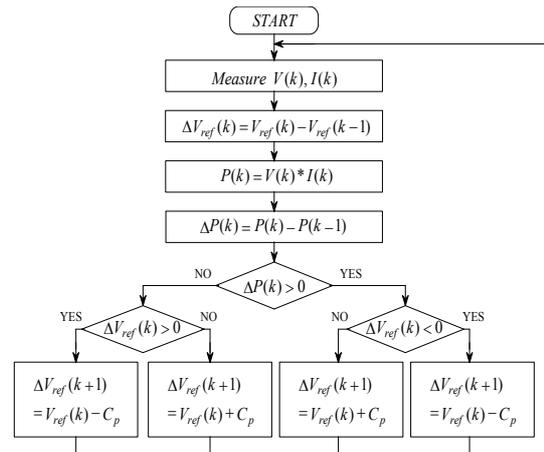


그림 5. PO MPPT 방법의 제어 알고리즘  
Fig. 5. Control Algorithm of PO MPPT method

### 4. 제시한 MPPT 제어

본 논문에서 제시한 NFC는 종래의 PO MPPT 제어를 대체하여 최대전력점 추종 제어에 적용할 수 있으며 일사량 및 온도 등의 파라미터 변동과 부하외란 영향에도 강인성 제어를 할 수 있다. NFC 시스템의 일반적인 구조는 그림 6에 나타내고 제어신호 U는 두 상태변수인 오차(e)와 오차의 변화(cc)로부터 추론한다. 또한 퍼지제어는 최소 오버슈트로서 고속 과도응답의 조건을 만족할 수 있다.

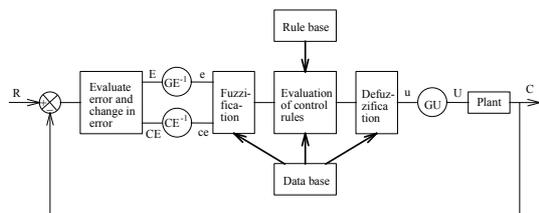


그림 6. NFC 시스템의 기본적인 구조  
Fig. 6. Base structure of a NFC system

NFC는 2개의 입력변수를 갖고 샘플링 구간  $k$ 에서의 입력변수  $E(k)$ 와  $CE(k)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$E(k) = \frac{V_{pv}(k) \cdot I_q(k) - V_{pv}(k-1) \cdot I_q(k-1)}{V_{pv}(k) - V_{pv}(k-1)} \quad (22)$$

$$CE(k) = E(k) - E(k-1) \quad (23)$$

퍼지언어 변수는 7단계, 즉 PB(Positive Big), PM(Positive Middle), PS(Positive Small), ZO(Zero), NS(Negative Small), NM(Negative Middle), NB(Negative Big)로 정하였으며, 그림 7은 입·출력에 대한 7개의 기본 언어변수에 따른 삼각형 모양의 소속함수를 나타낸다.

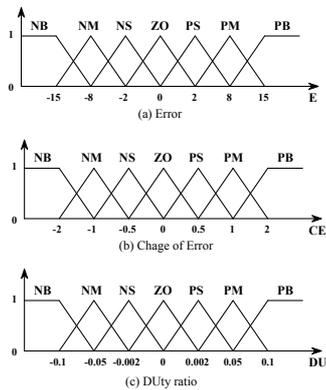


그림 7. E, CE 및 DU에 대한 멤버십 함수  
Fig. 7. The membership function for the E, CE and DU

표 1은 퍼지제어의 제어규칙을 나타내는데, 여기서는 행렬의 각각의 요소들은  $E(error)$ ,  $CE(change\ of\ error)$ 와 인버터의 시비율 변화량  $dD$ 를 나타낸다.

표 1에서 제어규칙의 한 가지 예를 들면 아래와 같다.

“IF E is PB AND CE is ZO THEN DU is PB.”

즉 전압에 대한 전력의 특성곡선에서 기울기가 매우 크고 그 기울기에 대한 변화량이 없으면 제어 출력값을 매우 크게 증가시키라는 의미이며 또한 입력신호인 오차  $E$ 를 ‘Zero’로 취하는 의미는 시비율이 ‘0’이 되도록 제어규칙을 설계한다는 것이다.

그림 8은 NFC 제어를 적용한 MPPT 제어 알고리즘으로 태양전지로부터 최대전력을 얻기 위하여 필요한 전압과 전류는 인버터의 DC 링크단의 전압과 전동기의 좌표변환된 전류를 이용하였다. 벡터제어를 위해 필요한 정보를 얻기 위해서 전동기로부터 자극위 치검출과 Encoder 펄스를 입력으로 사용하였다.

표 1. NFC 규칙 베이스  
Table 1. NFC Rule Base

E \ CE	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZO
NM	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	PS
NS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PM
ZO	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
PM	NS	ZO	PS	PM	PM	PB	PB
PB	ZO	PS	PM	PB	PB	PB	PB

시스템의 전체적인 제어처리는 DC-AC 인버터의 출력전류를 입력받아 Park's Transform을 이용하여 좌표 변환하였다. 그리고 변환된 전류와 DC 링크단의 전압을 받아 MPPT 제어에서 지령  $q$ 축 전류를 출력한다.

출력된  $q$ 축 전류와 전동기를 효율적으로 운전할 수 있도록  $d$ 축 전류지령치를 ‘0(zero)’로 설정하여 전류제어를 통하여 제어한다. 마지막으로 출력된 전압값을 좌표변환하여 SV PWM 인버터에 인가하는 방식으로 운전한다.

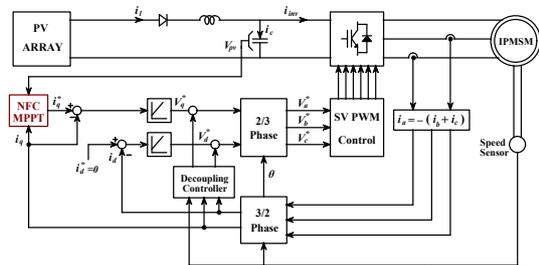


그림 8. 제시한 MPPT 제어 알고리즘  
Fig. 8. The Control algorithm of the proposed MPPT method

### 5. 시스템 성능결과

표 2는 PSIM 모델링을 위한 태양 어레이의 파라미터 값과 태양전지 모듈의 사양을 나타내고 있다.

표 2. PV 모듈의 사양  
Table 2. Specification of PV Module

Maximum power( $P_{max}$ )	[W]	200
NP	[수]	4
NS	[수]	16
셀 직렬 저항( $R_s$ )	[ $\Omega$ ]	0.00005
셀 shunt 저항( $R_{sh}$ )	[ $\Omega$ ]	$5 \times 1$
Max.power voltage( $V_{mp}$ )	[V]	24.5
Max.power current( $I_{mp}$ )	[A]	8.16
Open circuit voltage ( $V_{oc}$ )	[V]	30.8
Short circuit current( $I_{sc}$ )	[A]	5.57
Warranted minimum power( $P_{min}$ )	[W]	190.5
Output tolerance	[%]	+10/-5
Maximum system voltage	[V]	600
Temperature coefficient of $P_{max}$	[%]	-0.5
Temperature coefficient of $V_{oc}$	[V/ $^{\circ}C$ ]	-111
Temperature coefficient of $I_{sc}$	[mA/ $^{\circ}C$ ]	0.065
Standard Test Conditions : Air mass 1.5 Irradiance= $1000W/m^2$ , Cell temperature= $25^{\circ}C$		

그림 9는 Solar Vehicle의 구동을 위하여 제시한 IPMSM의 MPPT 제어를 나타내는 회로도이다.

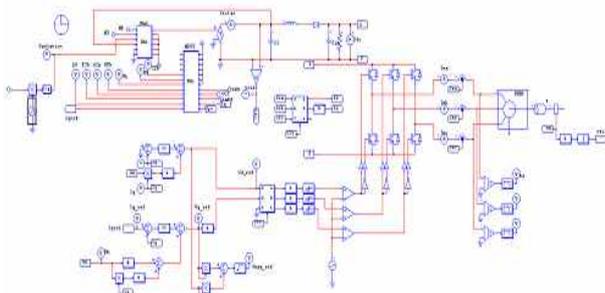


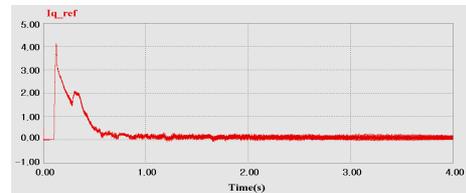
그림 9. MPPT 제어를 위한 PSIM 회로도  
Fig. 9. PSIM circuit for MPPT control

### 5.1 일사량이 일정한 경우의 성능 시험

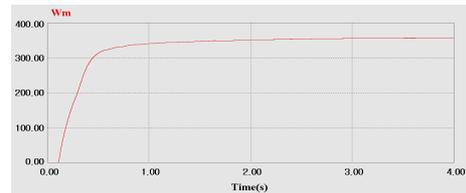
일사량이 일정한 경우의 성능시험은 일사량을  $1,000[W/m^2]$ , 온도는  $45[^{\circ}C]$ 로 설정하였다.

#### 5.1.1 종래의 MPPT 제어방법

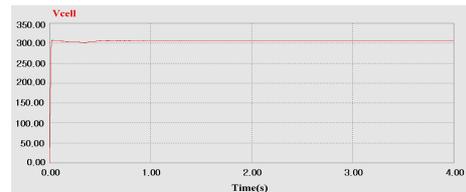
그림 10은 PO 제어방법을 적용하였을 경우이며, 그림 10 (a)는 지령 q축 전류, 그림 10 (b)는 IPMSM의 회전자 속도, 그림 10 (c)는 태양전지의 전압, 그림 10 (d)는 태양전지의 전류를 나타낸다.



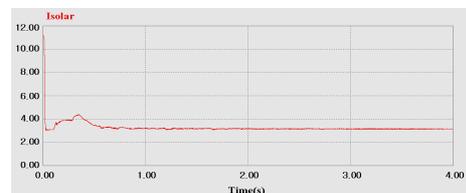
(a) q-axis current reference



(b) Rotor speed of IPMSM



(c) Output voltage of solar cell

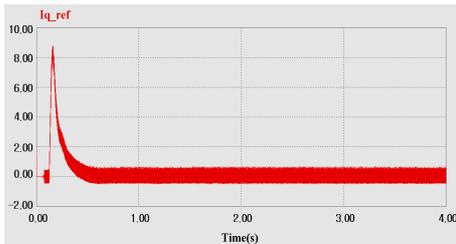


(d) Output current of solar cell

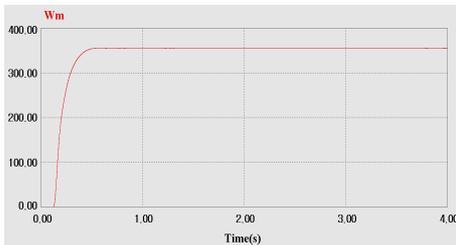
그림 10. PO 제어 방법에 의한 응답특성  
Fig. 10. Response characteristic of PO control method

5.1.2 제시한 MPPT 제어방법

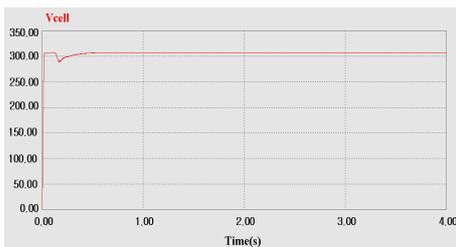
그림 11은 NFC 제어방법을 적용하였을 경우이며, 그림 11 (a)는 지령 q축 전류, 그림 11 (b)는 IPMSM의 회전자 속도, 그림 11 (c)는 태양전지의 전압, 그림 11 (d)는 태양전지의 전류를 나타낸다.



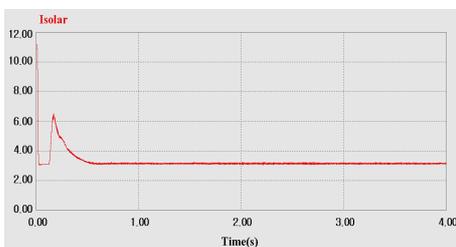
(a) q-axis current reference



(b) Rotor speed of IPMSM



(c) Output voltage of solar cell



(d) Output current of solar cell

그림 11. NFC 제어 방법에 의한 응답특성  
Fig. 11. Response characteristic of NFC control method

표 3은 일사량이 일정한 경우, 종래의 PO 제어방법과 본 논문에서 제시한 NFC 제어방법의 응답특성을 비교하여 나타내었다. 본 논문에서 제시한 NFC 방법이 종래의 PO 방법 보다 상승시간, 진동 및 안정화 시간이 매우 빠르게 나타났다.

표 3. PO 제어방법과 NFC 제어방법의 응답특성 비교  
Table 3. Response characteristic comparison of PO and NFC method

	PO	NFC
Rising time	0.404[sec]	0.184[sec]
Perturbation	13[rpm]	0.49[rpm]
Settling time	1.453[sec]	0.443[sec]

5.2 일사량이 변동하는 경우의 성능 시험

일사량이 변동하는 경우의 성능시험을 하기 위해 온도는 45[°C]로 일정하게 하고, 임의로 0[sec]에서 1,000[W/m<sup>2</sup>], 1[sec]에서 400[W/m<sup>2</sup>], 2[sec]에서 600[W/m<sup>2</sup>], 3[sec]에서 1,000[W/m<sup>2</sup>]으로 변화하도록 하였다.

5.2.1 종래의 MPPT 제어방법

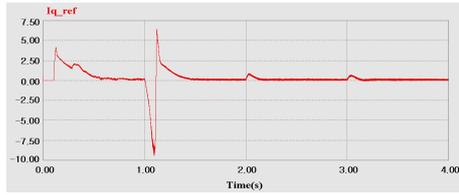
그림 12는 PO 제어방법을 적용하였을 경우이며, 그림 12 (a)는 지령 q축 전류, 그림 12 (b)는 IPMSM의 회전자 속도, 그림 12 (c)는 태양전지의 전압, 그림 12 (d)는 태양전지의 전류를 나타낸다.

5.2.2 제시한 MPPT 제어방법

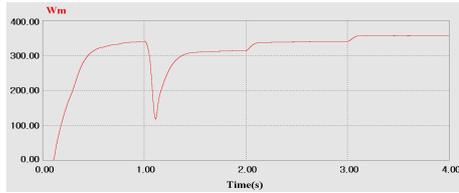
그림 13은 NFC 제어방법을 적용하였을 경우이며, 그림 13 (a)는 지령 q축 전류, 그림 13 (b)는 IPMSM의 회전자 속도, 그림 13 (c)는 태양전지의 전압, 그림 13 (d)는 태양전지의 전류를 나타낸다.

그림 14는 일사량이 1,000[W/m<sup>2</sup>]에서 400[W/m<sup>2</sup>]로 변화하는 0.9[sec]에서 1.3[sec] 구간의 응답특성을 확대한 그림으로 그림 14 (a)는 PO MPPT 제어방법, 그림 14 (b)는 NFC MPPT 제어방법을 나타낸다. 그림 14 (a)의 PO MPPT 제어방법에서는

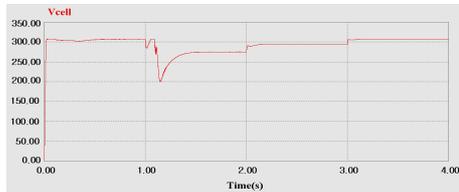
Solar Vehicle을 위한 IPMSM 드라이브의 새로운 MPPT 제어



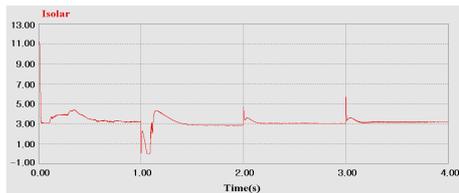
(a) q-axis current reference



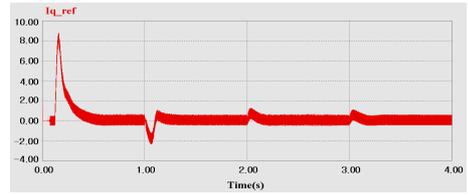
(b) Rotor speed of IPMSM



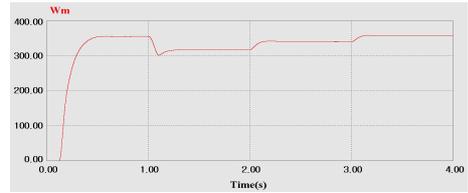
(c) Output voltage of solar cell



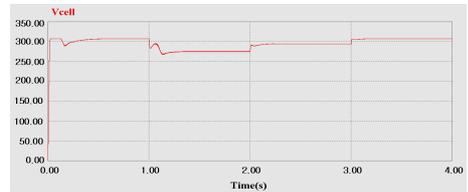
(d) Output current of solar cell



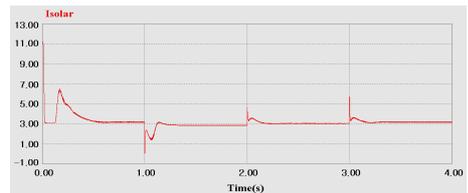
(a) q-axis current reference



(b) Rotor speed of IPMSM



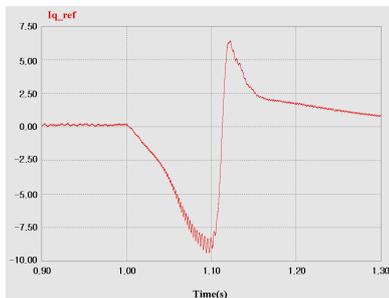
(c) Output voltage of solar cell



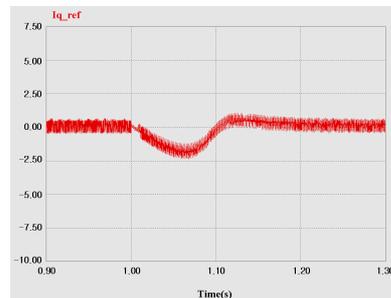
(d) Output current of solar cell

그림 12. PO MPPT 방법에 의한 응답특성  
Fig. 12. Response characteristic of PO MPPT method

그림 13. NFC MPPT 방법에 의한 응답특성  
Fig. 13. Response characteristic of NFC MPPT method



(a) PO MPPT 방법



(b) NFC MPPT 방법

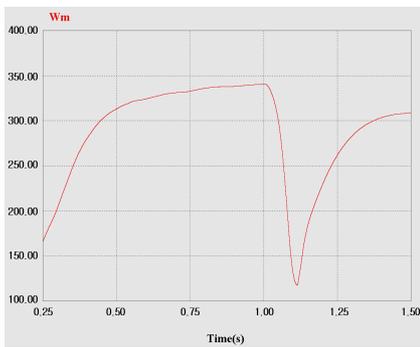
그림 14. 지령 q축전류 응답특성 확대(1,000[W/m<sup>2</sup>] $\rightarrow$  400[W/m<sup>2</sup>])  
Fig. 14. q-axis current reference response characteristic enlargement(1,000[W/m<sup>2</sup>] $\rightarrow$  400[W/m<sup>2</sup>])

-9.388[A]에서 6.386[A]까지 15.774[A]만큼 오버슈트가 발생하며 그림 14 (b)의 NFC MPPT 제어방법은 -1.689[A]에서 0.548[A]까지 2.237[A]만큼 오버슈트가 발생한다.

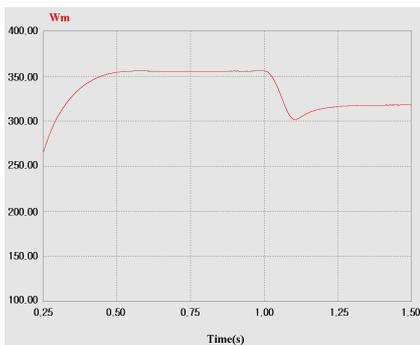
그림 15는 일사량이 1,000[W/m<sup>2</sup>]에서 400[W/m<sup>2</sup>]로 변화하는 0.25[sec]에서 1.5[sec] 구간의 응답특성을 확대한 그림으로 그림 15 (a)는 PO MPPT 제어방법, 그림 15 (b)는 NFC MPPT 제어방법을 나타낸다. 그림 15 (a)의 PO MPPT 제어방법에서는 일사량이 변동할 때 117.50[rpm]까지 떨어지고 정상상태에 도달하지 못하지만 그림 15 (b)의 NFC MPPT 제어방법은 301.89[rpm]으로 떨어진 후 317.85[rpm]으로 정상상태에 도달함을 알 수 있다.

그림 16은 일사량이 1,000[W/m<sup>2</sup>]에서 400[W/m<sup>2</sup>]로 변화하는 1.6[sec]에서 2.4[sec] 구간의 응답특성을 확대한 그림으로 그림 16 (a)는 PO MPPT 제어방법, 그림 16 (b)는 NFC MPPT 제어방법을 나타낸다. 그림 17 (a)의 PO MPPT 제어방법은 회전자 속도가 정상상태에 도달한 듯 보이나 지속적인 섭동폭이 나타나며 그림 17 (b)의 NFC MPPT 제어방법은 342.02[rpm]으로 올라간 후 341.26[rpm]으로 정상상태에 도달함을 알 수 있다.

표 4는 일사량이 변동하는 경우, 종래의 PO 제어방법과 본 논문에서 제시한 NFC 제어방법의 응답특성을 비교하였다.

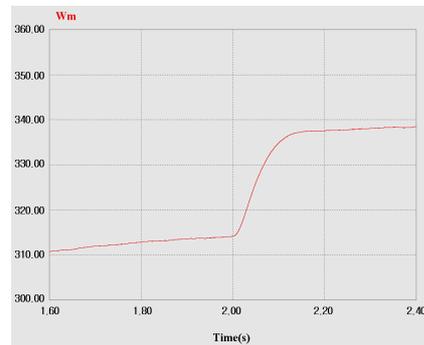


(a) PO MPPT 제어방법

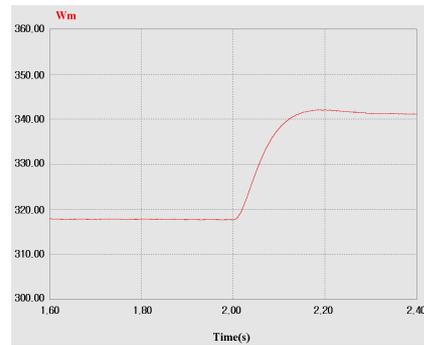


(b) NFC MPPT 제어방법

그림 15. IPMSM 회전자속도 응답특성 확대 (1,000[W/m<sup>2</sup>]→ 400[W/m<sup>2</sup>])  
Fig. 15. Rotor speed of IPMSM response characteristic enlargement (1,000[W/m<sup>2</sup>]→ 400[W/m<sup>2</sup>])

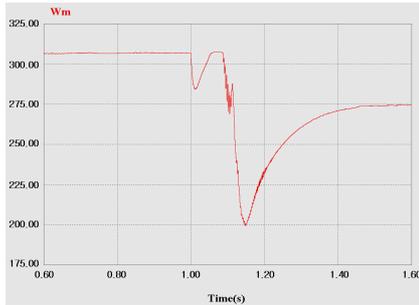


(a) PO MPPT 제어방법

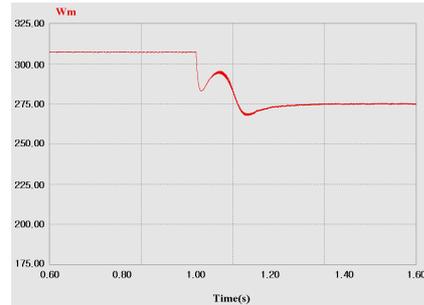


(b) NFC MPPT 제어방법

그림 16. IPMSM 회전자속도 응답특성 확대 (400[W/m<sup>2</sup>]→ 600[W/m<sup>2</sup>])  
Fig. 16. Rotor speed of IPMSM response characteristic enlargement (400[W/m<sup>2</sup>]→ 600[W/m<sup>2</sup>])



(a) PO MPPT 제어방법



(b) NFC MPPT 제어방법

그림 17. 출력전압 응답특성 확대(1,000(W/m<sup>2</sup>)→ 400(W/m<sup>2</sup>))

Fig. 17. output power of solar cell response characteristic enlargement(1,000(W/m<sup>2</sup>)→ 400(W/m<sup>2</sup>))

표 4. PO 제어방법과 NFC 제어방법의 응답특성 비교  
Table 4. Response characteristic comparison of PO and NFC method

		PO	NFC
1,000[W/m <sup>2</sup> ]	Settling time	-	0.443[sec]
1,000[W/m <sup>2</sup> ]	Perturbation	238[rpm]	54[rpm]
→			
400[W/m <sup>2</sup> ]	Settling time	0.79[sec]	0.31[sec]
400[W/m <sup>2</sup> ]	Perturbation	39[rpm]	24[rpm]
→			
600[W/m <sup>2</sup> ]	Settling time	0.52[sec]	0.27[sec]

## 6. 결 론

본 논문에서는 고 효율, 고 역률 및 고 토크밀도의 장점을 가지고 있는 IPMSM 드라이브에 태양광 전원을 이용한 Solar Vehicle의 MPPT 제어를 제시하였다.

제시한 MPPT 제어기를 IPMSM 드라이브에 적용하여 Solar Vehicle을 위한 드라이브 시스템을 구성하여, PSIM 프로그램을 이용하여 PO 제어방법과 NFC 제어방법을 모델링하고 응답특성을 비교, 분석하였다. NFC 제어방법이 PO 제어방법에 비해 일사량이 일정한 경우 상승시간이 2.2배, 진동 폭이 26.53배, 안정화 시간이 3.28배로 감소하였으며 일사량이 변동하는 경우에도 빠른 속도로 정상상태에 도달하였다.

따라서 본 논문에서 제시한 IPMSM 드라이브에 태양광 전원을 이용한 Solar Vehicle의 MPPT 제어의

응답성능이 양호하게 나타났으며 본 논문의 타당성을 입증할 수 있었다.

## References

- [1] 송길영, “최신 발전공학”, 동일출판사 pp. 1~30, 2008.
- [2] 한전기술연구원, “소규모 계통선 연결형 태양광발전 시스템 개발”, KRC-89G-J08, pp. 149-151, 1992.
- [3] 송진수, “태양광발전 기술의 개발동향 및 국내현황”, 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 859-862, 1994.
- [4] 산은경제연구소, “세계 전기자동차 개발현황과 국내업체의 경쟁력 분석”, 2009.
- [5] 산업연구원, “차세대 자동차의 2020 비전과 전력”, pp. 39, 2007.
- [6] N. Femia, G. Petron, G. Spagnuolo, and M. Vitelli, “Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method,” IEEE Trans. Power Electron., Vol. 20, no. 4, pp. 963-973, 2005.
- [7] P. Wolfs, Q. Li “A current-sensor-free incremental conductance single cell MPPT for high performance vehicle solar arrays” PESC06. pp. 1-7, 2006.
- [8] L. Zhang, A. Al-Amoudi, Y. Bai, “Real-time maximum power point tracking for grid-connected photovoltaic systems”, IEEE Pabl. No. 475, pp. 124-129, 2000.
- [9] Tae-Kyung Kang, Kang-Hoon Koh, Young-Cheal Kim, “The study on MPPT algorithm for improved incCond algorithm” 한국태양 에너지학회. pp. 299-306, 2004.
- [10] E. Roman, P. Ibanez, S. Elorduzapatrietxe, R. Alonso, D.Goitia, and I. Martinez de Alegia “Intelligent PV module for grid-connected PV systems,” in Proc. IEEE 30th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, pp. 3082-3087, 2004.
- [11] X. Sun, W. Wu, X. Li, Q. Zhao, “A research on photovoltaic energy controlling system with maximum power point tracking”, Proc. of PCC '02, Vol. 2, pp. 822-826, 2002.

- [12] Geoff Walker, "Evaluating MPPT converter topologies using a matlab PV model" Journal of Electrical & Electronics Engineering, Australia, pp. 49-55, 2001.
- [13] J. A. Domínguez, S.Lorenzo, S.de Pablo, S.Caceres. "Global control for two photovoltaic application : Pumping and connecting to the grid system". EPE. 1997.

◆ 저자소개 ◆



**장미금 (張媚琴)**

1986년 3월 3일생. 2009년 2월 순천대학교 공대 전기제어공학과 졸업. 2011년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2012년 3월~현재 동 대학원 전기공학과 박사 과정. 2011년 12월~현재 전자부품 연구원 디지털컨버전스연구센터 연구원.

Tel : (062)975-7037  
Fax : (062)975-7039  
E-mail : kumi0145@keti.re.kr



**최정식 (崔正植)**

1980년 2월 9일생. 2005년 순천대학교 공대 전기제어공학과 졸업. 2007년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2011년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2011년 1월~현재 전자부품연구원 선임 연구원.

Tel : (062)975-7038  
Fax : (062)975-7039  
E-mail : cjs1108@keti.re.kr



**정동화 (鄭東和)**

1955년 8월 15일생. 1979년 영남대 공대 전기공학과 졸업. 1981년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1988~1989년 현대중전기(주) 기술연구소 책임연구원. 1989년~현재 순천대학교 정보통신공학부 교수.

Tel : (061)750-3543  
Fax : (061)752-9841  
E-mail : hwa777@scnu.ac.kr