

BLDC용 인버터를 이용한 PV 양수펌프의 MPPT 제어

백승길*, 조정민*, 이승환**, 김성남*, 오봉환***, 이훈구****, 한경희*
 *명지대학교, **태덕대학, ***영지전문대학, ****용인송담대학

MPPT Control of PV Water Pump Using BLDC-Inverter

S.K. Baek*, J.M. Jho*, S.H. Lee**, S.N. Kim*, B.H. Oh***, H.G. Lee****, K.H. Han*
 *Myongji Univ. **Taedok Col, ***Myongji Col, ****Yong-In Songdam Col.

Abstract - This paper shows how to design a Global control, using Field Orientation, avoiding to use the DC/DC converter, and finding the relationships among the DC magnitudes and AC ones. And This paper deals with water pumping system which economic and durable storage systems for sustained production of power and propose MPPT methods using i_{qs} of BLDC motor without battery module and chopper circuit.

1. 서 론

현재, 요르단, 인디아, 네팔, 호주등과 같은 나라들은 격오지나 산간벽지에 식수원 또는 관개용수로 사용하기 위해 많은 수의 PV(photovoltaics) 펌프세트를 설치하여 국가적 프로젝트로 수행하고 있다. 이중 에너지 저장장치인 축전지를 생략하고 연중 일사량을 고려한 수조탱크가 직접적인 에너지 저장장치로 이용된 논문들이 발표되고 있다.^{[1]-[3]} 이러한 논문들은 두 개의 독립적인 제어부 즉, DC/DC 컨버터와 DC/AC인버터를 갖는다. 그러나 이러한 시스템은 제어가 복잡하고 부대비용상승과 전력 변환기의 손실이 많아지게 된다.

본 논문에서는 DC/DC 컨버터의 사용을 피하기 위하여 DC량과 AC량의 관계를 찾아내고 자속기준 벡터제어를 이용하여 전체적인 제어를 구상하는 방법을 제시하였다. 그리고 인버터만으로 PV어레이로부터 최대출력점을 추적하였다. 또한, 3상 인버터 전류리플에 의한 최대출력점 추종제어의 불안정성을 보완하기 위해, BLDC 모터에 흐르는 3상 전류를 좌표변환한 토크성분 전류를 이용하여 P&O(Perturbation and Observation) MPPT(Maximum Power Point Tracker) 제어 알고리즘을 원활히 수행하는데 적합하도록 제어하였다. 간소화된 알고리즘의 수행성능을 확인하기 위하여, J.A. Domfnguez가 비동기모터에 적용한 제어방식을 BLDC 모터에 적용한 결과와^[4] 본 논문에서 제시한 간략화된 제어방식을 시뮬레이션을 통하여 비교 검토하고 실험을 통하여 그 타당성을 입증하였다.

2. 전체 시스템 구성

전체 시스템의 구성은 PV어레이, 인버터부, 그리고 프로세서부로 구성되며 그림 1에 나타내었다.

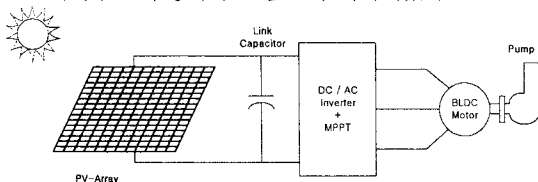


그림 1 전체 블럭도

2.1 BLDC 모터의 방정식

BLDC 모터 방정식을 정리하면 식(1)과 같은 $d-q$ 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_s/L_s & \omega_r \\ -\omega_r & -R_s/L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_s} \begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \end{bmatrix} - \frac{1}{L_s} \begin{bmatrix} 0 \\ e_{qs} \end{bmatrix} \quad (1)$$

식(1)은 $d-q$ 축 전기자 전압인 v_{ds} 와 v_{qs} 로 전기자 전류인 i_{ds} 와 i_{qs} 를 제어할 수 있음을 나타낸다. 또한 토오크식을 정리하면, 식(2)와 같다.

$$T_e = P \lambda_m i_{qs} \quad (2)$$

운동방정식에서 점성 마찰계수를 무시한 모터 출력축의 회전각속도(기계각)를 w_m , 극수를 P 로 하면 식(3)과 같이 표현될 수 있다.

$$pJ \left(\frac{w_r}{P} \right) = pJ w_m = T_e - T_L \quad (3)$$

여기서, T_e 는 모터의 부하 토크, J 는 모터와 부하의 관성 모멘트($J_L + J_m$), $p(=d/dt)$ 는 미분 연산자이다

3. PV 양수펌프를 위한 제어기법

3.1 기존의 PV 양수펌프 제어 블럭도

그림2는 J.A. Domfnguez가 비동기 모터에 적용한 제어 알고리즘을 BLDC모터에 적용한 제어블럭도이다. PV양수펌프를 하는데 있어서, DC/DC 컨버터가 필요하지 않기 때문에 하위 시스템(subsystem)은 PV어레이를 포함한 DC부와 링크 캐패시터, AC 인버터부 그리고 펌프로 구성되어 있다. 여기에서 인버터의 역할은 PV어레이로부터 최대출력을 얻으며, 양수를 펌핑하는 모터의 자속과 토크 성분을 제어한다.

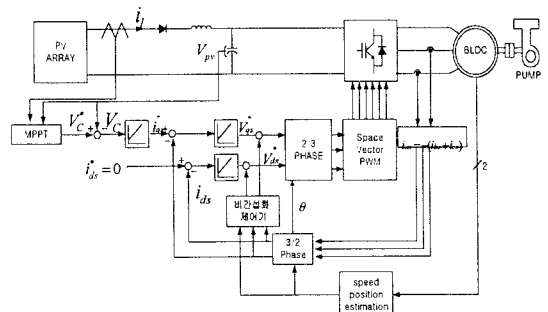


그림 2 J.A. Domfnguez가 제안한 제어 블럭도

PV 어레이는 전류원으로써, 제어의 용이성을 위해 전압원으로 동작될 수 있도록, PV어레이와 DC/AC 인버

터 사이에 링크 캐패시터가 필요하다. 그리고 이 전압은 BLDC 모터에 의해 요구되는 에너지와 PV에 의해 공급되는 에너지가 독립적으로 일정하게 유지되어야 한다. 그래서 DC/AC 인버터 및 그 외의 손실을 무시한다면 DC 인버터 입력 전력은 BLDC모터의 기계적 출력으로 식(4)와 같이 변환될 수 있다.

$$V_{cc} \cdot I_{inv} = T_m \cdot \omega_m \quad (4)$$

그리고, 캐패시터 링크에서 모든 전류의 합은 zero이다.

$$I_{PV} = I_c + I_{inv} \quad (5)$$

따라서, 링크 캐패시터의 특성 방정식으로 시스템은 그림 3과 같은 블록다이어그램으로 표현될 수 있다.

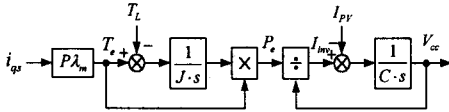


그림 3 BLDC모터와 링크 캐패시터와의 관계

PV어레이를 이용한 모터구동방법에 J.A. Domfnguez가 제안한 비동기 모터 제어방식은 DC 전압 제어루프에 의해 이루어진다. 여기에서 DC 전압제어는 고정자 전류의 q축 성분으로 가능하다.

이러한 제어블럭도는 DC 전압 제어의 지령전압이 PV어레이의 최대출력점(Maximum Power Point)을 추종하도록 한 값이고 DC/AC인버터는 이러한 기능을 충분히 수행할 수 있기 때문에 DC/DC 컨버터를 제거할 수 있는 방식이다.

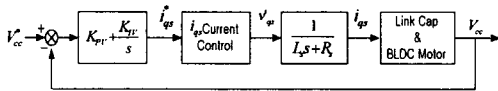


그림 4 DC 전압 제어 루프

만일 DC/AC 인버터로 DC전압을 제어할 수 있고, 매 순간마다 BLDC 모터에 발생되는 유효전력을 계산할 수 있다면, MPPT를 추적할 수 있는 지령치 V_{cc} 값을 P&O 알고리즘을 이용하여 계산할 수 있다. 따라서 DC/DC 컨버터를 이용하지 않아도 된다. 그러나 이와 같은 방법은 다중의 제어루프를 갖게 됨으로 최종 제어 루프의 제어주기는 자연히 길어지게 된다. 이로 인하여 모터의 속도 지령치가 매 주기마다 큰폭으로 변하게 되어 속도 리플 현상을 보이게 된다.

3.2 제안한 MPPT 제어기법

그림 5는 본 논문에서 제안한 PV 양수펌프 시스템의 제어블럭도이다. 태양전지로부터 최대전력을 얻기위하여 필요한 전력계산은 인버터의 DC링크단 전압과 전동기의 좌표변환된 전류를 이용하였다. 또한, 벡터제어를 위해 필요한 정보를 얻기 위하여 전동기로부터 자속위치검출과 Encoder 펄스를 입력으로 사용하였다.

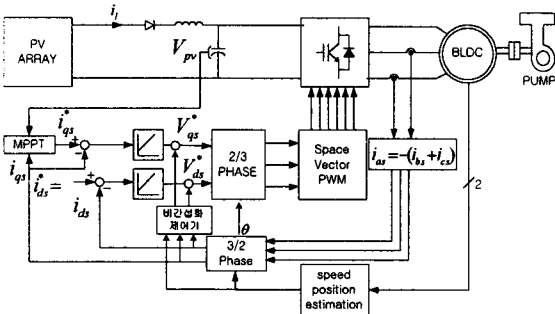


그림 5 PV 양수 펌프 시스템의 제어블럭도

그림 6은 제안한 P&O 알고리즘 순서도이며, MPPT제어를 위하여, 동기회전좌표계의 토크성분전류 i_{qs}^* 를 다음과 같이 제어하였다.

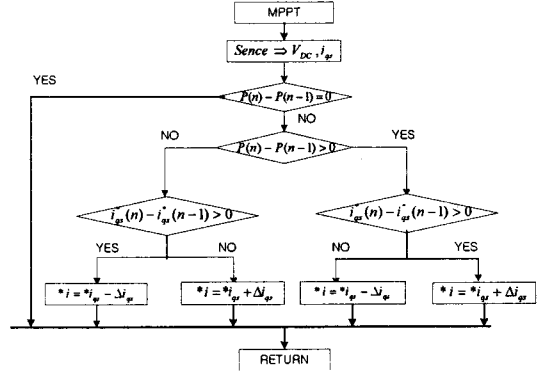


그림 6 제안된 MPPT 알고리즘 순서도

- DC 링크단으로부터 전압검출과 BLDC모터로부터 좌표변환된 토크성분전류 i_{qs} 로 전력을 계산한다.
- 계산된 전력 $P(n)$ 과 $P(n-1)$ 값을 비교하여 토크 성분 전류 i_{qs}^* 를 산출한다.
- $i_{ds} = 0$ 으로 설정하여 무효전력에 의한 동손을 제거함으로써 최대의 효율을 얻을 수 있다.
- 지령치 전류 i_{qs}^* , i_{ds}^* 와 피드백된 전류 i_{qs} , i_{ds} 를 각각의 PI 제어기를 통하여 지령치 전압 V_{qs} , V_{ds} 를 산출한다.
- 산출된 지령치 전압 V_{qs} , V_{ds} 를 좌표 변환하여 전압원 인버터에 인가한다.

4. 시뮬레이션 및 실험파형

표 1은 BLDC 모터의 파라미터로서 시뮬레이션 및 실험에 적용하였다.

표1 BLDC 모터의 파라미터

T_{cs} (최대연속토크)	3.4 Nm
K_T (토크 상수)	1.13 Nm/A
L_a (상간 인덕턴스)	18 mH
R_a (상간 저항)	6.4 Ω
J (관성)	$0.32 \text{ Kg} \cdot \text{m}^2 \times 10^{-3}$
I_{cs} (최대 연속 정격 전류)	3.4 A

표 2는 실험에 적용한 솔라셀 파라미터로서 M65모델을 직렬로 10개 연결하여 실험하였다.

표 2 솔라셀의 파라미터

모델명	M65 (SIEMENS)
개방전압 (V_{oc})	18.0 [V]
단락전류 (I_{sc})	3.32 [A]
정격전압	13.6 [V]
정격전류	2.95 [A]

그림 7은 그림2의 제어블럭도를 이용하여 시뮬레이션한 결과이다. 시뮬레이션에 이용된 각각의 제어기에 적용한 조건은 다음과 같다.

- ▶ 전류제어주기: 100[us]
- ▶ 전압제어주기: 1[ms]
- ▶ MPPT제어주기: 5[ms]

시뮬레이션 조건은 0.92초에 일사량이 감소하고, 1.85초에 복원된다. 시뮬레이션 결과에서 볼 수 있듯이 최대출력점은 셀 개방전압의 77[%]정도이며, 셀의 조건 변화시 BLDC모터의 속도는 과도상태가 길어짐을 볼 수 있다.

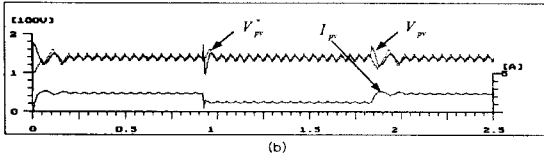
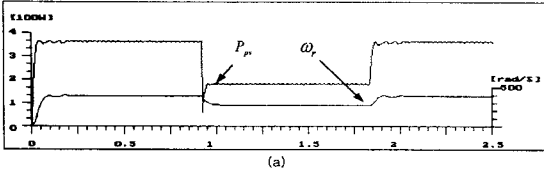


그림 7 J.A. Domfnguez가 제시한 방법에 의한 출력파형 (ΔV : 10V)

그림 8은 그림5에서 보이는 제어블럭도를 이용하여 시뮬레이션한 결과이다. 시뮬레이션에 이용된 각각의 제어기에 제어시간은 다음과 같다.

- ▶ 전류제어주기: 100[us]
- ▶ MPPT제어주기: 1[ms]

시뮬레이션 조건은 0.92초에 일사량이 감소하고, 1.85초에 복원된다. 그림 8의(b)결과에서 볼 수 있듯이 최대출력점은 J.A. Domfnguez가 제시한 방법과 같이 셀 개방전압의 77[%]정도이며, 외부환경변화에 대체적으로 빠른 결과를 갖는다.

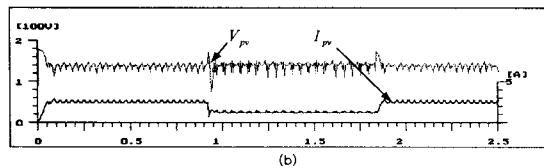
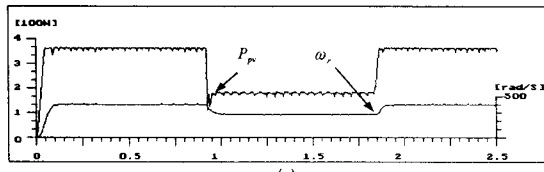


그림 8 간소화된 제어방법에 의한 출력파형 (ΔI : 0.15A)

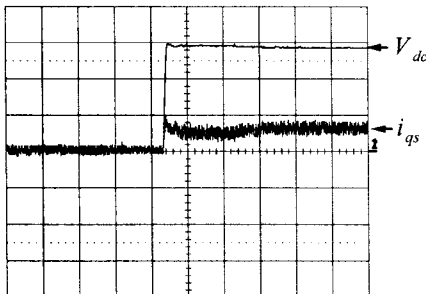


그림 9 DC 링크전압과 q축 전류파형 (CH1:50(V/div), CH2:5(A/div))

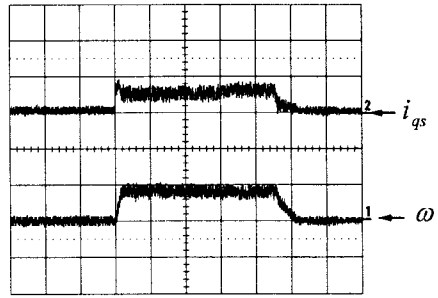


그림 10 q축 전류와 속도파형 (CH1:5(A/div), CH2:500(rad/s))

그림 9는 PV어레이의 DC링크단 전압과 BLDC모터의 q축 전류 파형으로 최대출력이 77[%]정도에서 이루어지고 q축 전류는 3[A]정도로 시뮬레이션과 유사한 특성을 나타낸다.

그림 10은 BLDC모터의 q축전류 파형과 속도를 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이 i_{qs} 로 MPPT제어를 하므로서 비교적 안정적인 출력속도를 보인다. 이상으로부터 표2에 나타난 셀의 특성중 정격전압과 정격전류는 시뮬레이션 및 실험결과와 일치함으로 본 논문에서 제안한 MPPT제어 방법으로 최대출력이 원활히 수행되었음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 일사량, 환경등의 변화에 따른 어레이의 동작 특성을 DC/DC컨버터 없이 좌표변환된 토크성분전류를 검출받아 P&O MPPT 제어 알고리즘을 원활히 수행함으로써 최대출력점을 추종하였다. 그 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 부대장치의 간소화로 기술적 격오지에 설치되는 양수펌프의 내구성을 향상시킬 수 있다.
- (2) 부수적으로 부대비용절감 및 전력 변환기의 손실을 줄일 수 있었다.
- (3) J.A. Domfnguez가 제안한 기법보다 간략화 함으로서 제어주기를 줄일 수 있었고 속도리플도 감소하였다.
- (4) 제안된 알고리즘을 검증하기 위해서, C^{++} 을 이용하여 시뮬레이션을 수행하고, 실험을 통하여 알고리즘의 타당성을 확인하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] Eduard Muljadi, "PV Water Pumping with a Peak-Power Tracker Using a Simple Six-Step Square-Wave Inverter" IEEE Transactions on industry applications, Vol. 33, No. 3, May/June 1997
- [2] Jagan Nath Shrestha, "Solar PV Water Pumping System for Rural Development in Nepal", IEEE, 1996
- [3] M.Mahmoud, PHD. "Experience results and techno-economic feasibility of using photovoltaic generators instead of diesel motors for water pumping from rural desert wells in Jordan" IEE Proceedings, Vol. 137,Pt.C,No.6, November 1990
- [4] J.A. Domfnguez, S.Lorenzo, S.de Pablo, S.Caceres. "Global control for two photovoltaic application:Pumping and connecting to the grid system". EPE, 1997