

태양전지를 이용한 Water Pumping 시스템 적용에 대한 연구

최성호\* 조정민\* 이승환\*\* 이상집\* 김성남\* 한경희\*  
\*명지대학교 \*대덕대학\*

Study on Water Pumping System using PV Array

Seong-ho Choi\* Jeong-min Jho\* Seung-hwan Lee\*\* Sung-nam Kim\* Kyung-hee Han\*  
\*Myongji University \*\*Taedok College

**Abstract** - This paper describes control of water pumping system using PV array. An integral part of the system with various system components be constructed PV array, maximum power point tracker, BLDC motor and pump.

BLDC motor has the quality of torque output and efficiency, has been more widely used in a field for multifarious application. However pumping system using PV array has limited for application because output characteristics of solar cell are greatly fluctuate on the variations of insolation, temperature and loads. For this reason, in this paper each parts efficiently controlled by the maximum power point tracker, the vector control method of BLDC motor and the pressure PI controller using TMS320C31.

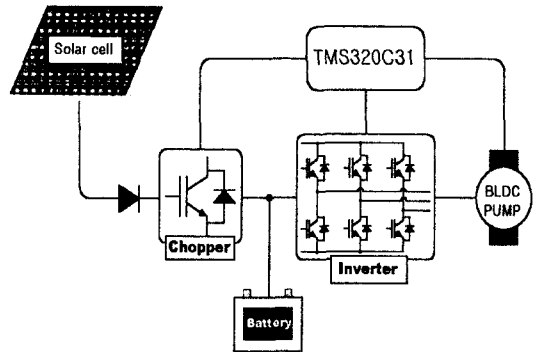


그림 1. 전체 시스템 구성도

1. 서 론

제어 및 재료분야의 발달로 새로운 타입의 모터 설계에 영구자석 브러시리스 DC(Brushless DC:BLDC) 모터가 높은 관심을 보여 왔다. 특히 PWM 인버터에 기반을 둔 전력용 반도체 소자에 의해 공급되는 이 저관성 모터는 높은 전력대 무게비율, 높은 토크대 전류 비율, 고 레벨의 에너지(원동력), 빠른 응답을 가지고 있다. 또한 종래의 직류 모터나 유도모터에 비해서 넓은 속도 범위에서 높은 효율(80~90%)을 가지고 직류 모터에 비해 유지·보수가 저렴하다는 매우 바람직한 특성을 제공한다.

한편, 태양광 전원시스템의 응용분야로서 용수펌프 시스템(Photo Voltaic Water Pumping System)에서의 모터의 선택은 요구되는 크기, 전기적 운전시의 효율 성능에 의존하게 된다. 이러한 이유로 앞서의 장점을 가지는 BLDC 모터가 태양광어레이에 의해 동작되는 용수펌프 시스템에서 수요의 많은 부분을 차지해나가고 있다.<sup>[1]</sup>

본 연구에서는 태양광 용수펌프 시스템을 최적화하기 위해 태양전지의 최대출력점을 추적토록 제어하였고, BLDC 모터에 벡터제어 기법을 사용하여 기동시의 문제점 및 부하변동 등에 대한 강인한 제어를 실현하였다. 또한, 펌프를 일정 압력으로 정량제어함으로써 수요량 증감에 대한 수압변동을 방지하였고 가압 저장수조의 필요성을 제거하였다. 각부 제어에 사용된 프로세서는 TMS320C31을 사용하여 더욱 빠른 제어와 응답을 가능하도록 하였다.

2. 전체 제어시스템

그림 1은 태양광 용수펌프 시스템의 전체 구성도로 태양전지와 펌프장치를 결합하기 위해 전체 시스템을 초퍼와 인버터 그리고 BLDC 모터를 이용하여 구성하였다.

2.1 펌프의 출력특성

BLDC 모터로부터의 출력은 펌프의 입력전력이 된다.

$$P_{mot} = \omega T_L = \frac{2\pi N}{60} T_L \quad (1)$$

여기에서,  $T_L$ 은 펌프의 부하토크[Nm]이다.

펌프의 기계적 출력  $P_{pump}$ 는 식(2)으로 계산된다.<sup>[2]</sup>

$$P_{pump} = \frac{pQ}{\eta_{pump}} = \frac{10^4(p_{in} - p_{out})Q}{102 \eta_{pump}} \quad [kW] \quad (2)$$

$p$  : 압력 [kgf/cm<sup>2</sup>]  
=  $H$ (양정) [m] ×  $\rho$ (물:1000 [kg/m<sup>3</sup>]) ×  $g$ (9.8 [m/s])

$p_{in}$  : 입력측 수압,  $p_{out}$  : 출력측 수압

$Q$  : 유량 [m<sup>3</sup>/s]

$\eta_{pump}$  : 펌프의 효율

축동력은 모터와 펌프의 축이 직결되어 있는 경우 펌프의 기계적 출력과 같다고 본다. 즉, 모터의 출력은 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$P_{mot} = \frac{P_{pump}}{\eta_{mot}} = \frac{pQ}{\eta_{pump} \eta_{mot}} \quad [kW] \quad (3)$$

$\eta_{mot}$  : 모터의 효율

송수관의 길이와 지름 등에 따른 압력과 유량사이의 관계는 다음과 같다.

$$Q = \frac{\pi r_2^4 (p_{in} - p_{out})}{8 \mu l} \quad [cm^3/s] \quad (4)$$

$r_2$  : 토출구의 지름

$l$  : 관의 길이 (=양정)

$\mu$  : 물의 경우  $1.02 \times 10^{-8}$  [kgf · s/cm<sup>2</sup>]

이상과 같은 관계식에서 펌프가 정상운전 영역에서 운

전하고 있다고 하면 유량과 수압은 모터의 속도에 상응하는 것을 알 수 있다.<sup>(3)</sup>

## 2.2 BLDC 모터의 모델링

다음은 BLDC 모터의 전기적인 등가회로를 나타낸다.

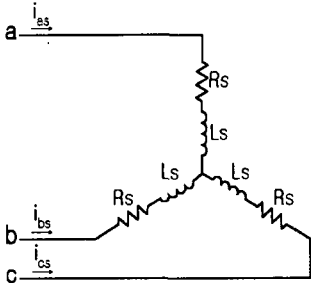


그림 2. BLDC 모터의 전기적인 등가회로

모터의 특성을 결정짓는 방정식의 유도는 그림 2를 이용하여 식 (5), (6)과 같은 모터내에서의 상전압과 쇠교자속의 관계식에서부터 시작된다.<sup>(3)</sup>

$$V_{abc} = R_s i_{abc} + \frac{d}{dt} \lambda_{abc} \quad (5)$$

$$\lambda_{abc} = L_s i_{abc} + \lambda_m \quad (6)$$

(5), (6)의 방정식은 역기전력을 고려하여 식 (9)과 같은 전압방정식으로 유도되어질 수 있다.

$$V_{abc} = R_s i_{abc} + \frac{d}{dt} (L_s i_{abc}) + e_{abc} \quad (7)$$

$e_{abc}$ 는 회전자에 회전함에 따라 각상의 코일에 유기되는 전압(역기전력)을 나타낸다. 앞서의 식을 다음과 같이  $d-q$  2축 표현법에 의하여 나타낼 수 있다.

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + L_s \frac{d}{dt} i_{qs} + \omega_r L_s i_{ds} + \omega_r \lambda_m \quad (8)$$

$$v_{ds} = R_s i_{ds} + L_s \frac{d}{dt} i_{ds} - \omega_r L_s i_{qs} \quad (9)$$

이것은 또,

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_s} & \omega_r \\ -\omega_r & -\frac{R_s}{L_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_s} \begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \end{bmatrix} - \frac{1}{L_s} \begin{bmatrix} 0 \\ e_{qs} \end{bmatrix} \quad (10)$$

의 형태로 상태방정식으로 정리해볼 수 있다. 여기서  $e_{qs} = \omega_r \lambda_m$ 이다.

식(10)은  $d-q$ 축 전기자 전압인  $v_{ds}$ 와  $v_{qs}$ 로  $d-q$ 축 전기자 전류인  $i_{ds}$ 와  $i_{qs}$ 를 제어할 수 있음을 나타낸다.

토오크식을 나타내 보면,

$$T_e = P \lambda_m i_{qs} \quad (11)$$

이고 운동방정식은 점성 마찰계수를 무시한 모터 출력축의 회전각속도(기계각)  $w_m$ 은 극수를  $p$ 로 하면  $w_r/p$ 이므로 다음으로 표현될 수 있다.

$$PJ \left( \frac{w_r}{p} \right) = PJ w_m = T_e - T_L \quad (12)$$

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

그림 4는 앞서의 관계식들로부터 구할 수 있는 블록선도이다.

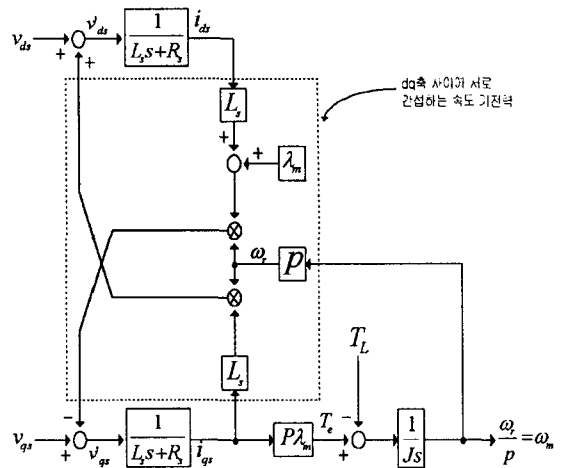


그림 3. BLDC 모터의 모델링과 블록선도

## 2.3 BLDC 모터의 제어

그림 3에서와 같이  $d-q$ 축 사이에는 서로 간섭하는 속도 기전력을 존재한다. 최대 토크를 발생하기 위하여 연구되어져온 벡터 제어의 기본개념은 자속분 전류인  $d$ 축 전류와 토크분 전류인  $q$ 축 전류를 분리하여 독립적으로 제어하는 기법을 말한다. BLDC 모터의 제어에서도  $d-q$ 축을 서로 비간섭화 하여 제어할 필요성이 있게 된다. 비간섭화 제어법을 이용하면,  $v_{ds}$ ,  $v_{qs}$ 의  $d-q$ 축 전기자 권선 임피던스 인가전압을 비간섭화된 상태에서는 제어가능한 입력변수가 되도록하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P i_{da} = -\frac{R_s}{L_s} i_{ds} + \frac{1}{L_s} v_{ds} \quad (13)$$

$$P i_{qa} = -\frac{R_s}{L_s} i_{qs} + \frac{1}{L_s} v_{qs}$$

비간섭화 제어된 BLDC 모터의 블록선도는 다음과 같다.

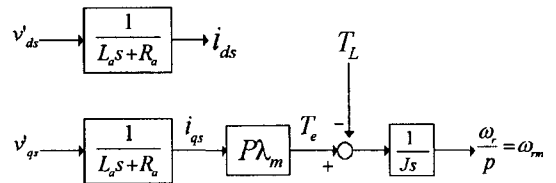


그림 4. 비간섭화 제어된 BLDC 모터의 블록선도

펌프용 모터를 제어함에 있어 펌프의 토출구의 유량 변동이나 수요처의 변동으로 인한 양정의 변화는 압력의 변화를 유발하게 된다. 또 관의 굴곡으로 인한 관로저항의 변화가 모터에는 부하토크로 작용하게 된다. 이때문에 모터의 회전수를 가변하여 일정압력으로 펌프를 제어함으로써 목표치 압력을 유지하도록 제어할 수 있다. 그림 5은 전체 제어회로를 구성하여 나타낸 것이다. 그림 4에 압력 PI제어기를 부가하여 검출압력과 차로 전류·속도 PI제어기의 지령치를 결정하게 하여 펌프 부하에 따른 변동토크에도 강한 제어가 될 수 있도록 하였다.

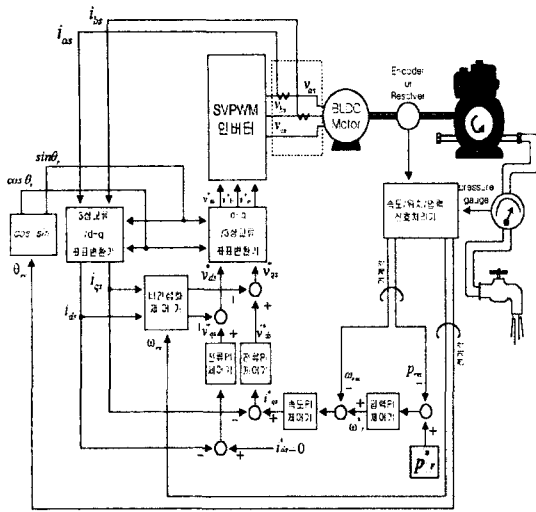


그림 5. BLDC 모터와 펌프의 제어 블록선도

### 3. 시뮬레이션 및 실험 결과

그림 6은 펌프의 정상부하시의 BLDC 모터의 시뮬레이션 파형을 보여주고 있다. 압력 지령치에 의해 순시적으로 정해지게될 임의의 속도지령치에 대한 속도 응답과  $i_{qs}$  전류를 함께 비교함으로써 펌프 부하시 BLDC 모터가 우수하게 추종할수 있음을 예측해 볼수 있다.

그림 7은 압력(0.8~1.5kgf/cm<sup>2</sup>)의 변화에 따라 제어된 속도의 지령치와 그응답을 실제 실험한 것으로 PI 제어기를 사용하여 BLDC 모터의 속도를 제어함으로써 일정압력이 되도록 제어되는 결과 파형을 나타낸다. 또한 유량 및 양정의 변화에 따른 압력의 변화에도 불구하고 목표치 압력을 우수하게 추종해 가고 있음을 볼수 있다.

그림 8은 그림7과 같은 압력의 변화시 제어된 전류의 지령치와 그 응답의 실제 파형이다. 파형에서 전류의 지령치와 응답은 거의 일치함을 보이고 있다.

결과적으로 펌프를 제어하기 위한 시스템 응답의 파형에서 우리가 살펴본 대로 일정압력 제어를 위한 목적과 그에 상응하는 시스템의 동작을 또 제어응답의 속도성과 강인성을 확인해 볼수 있다.

### 4. 결 론

본 연구에서는 PV 용수 시스템에 BLDC 모터를 적용한 결과로부터 펌프의 일정압력 제어를 위한 성능을 실험을 통하여 확인하여 보았다. 또한 전술한 여러 제어 기법들을 이용하여 태양광 전원시스템과 펌프 부하에 BLDC 모터가 우수하게 접목될수 있음을 확인하였다.

향후에는 이러한 결과를 이용하여 태양전지의 전압전류 특성과 모터·펌프부의 특성을 매칭시키기 위한 시스템 선정에 대한 연구가 진행되어야 한다고 본다.

#### (참 고 문 헌)

- (1) D.Langridge, W.Lawrance and B.Wichert, "Development of a Photo-voltaic Pumping System using a Brushless D.C.Motor and Helical Rotor Pump", Solar energy, pp151-160, 1996
- (2) Michael G. Thomas., "Water Pumping : The Solar Alternative", Sandia National Lab, 1996
- (3) F. Lasnier & T. G. Ang, "Photovoltaic Engineering Handbook", pp297-328, 1990

[4] 小山正人, 玉井伸三, 杉本英彦, "산업용 서보모터의 제어 시스템 설계", pp 73-181 1999



그림 6. 속도 변화에 따른 응답과 전류 변화

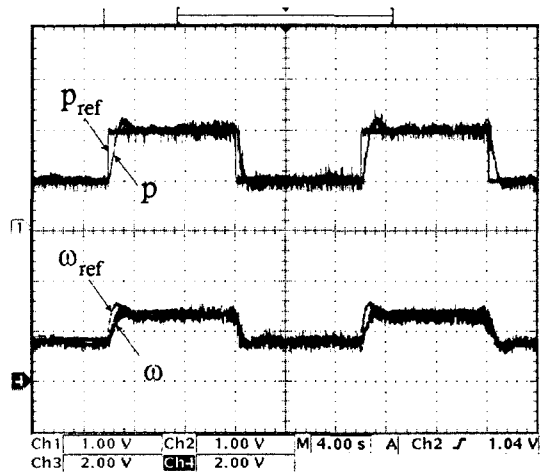


그림 7. 압력 변화에 따른 응답과 속도의 변화

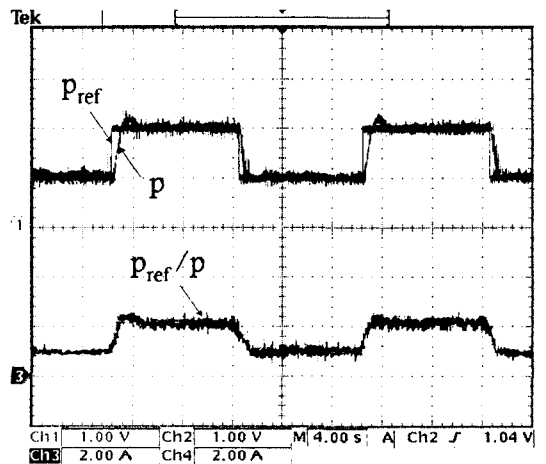


그림 8. 압력 변화에 따른 응답과 전류의 변화