

## Brushless DC Motor Control for Photovoltaic Water-Pumping System

金城南\* · 崔盛皓\*\* · 趙正珉\*\*\* · 全基英§ · 李丞桓§§ · 韓慶熙§§§  
(Sung-nam Kim · Seong-ho Choi · Jeong-min Jho · Gi-young Jeon · Seung-hwan Lee · Kyung-hee Han)

**Abstract** - In this paper, we adapted BLDC motor to PV water pumping systems to maintain high efficiency in the wide speed area. Also, to design confidence we adapted the vector control that drive the maximum torque at each speed limit. We designed optimal gain value of current, speed and pressure PI controller. Inverter gate pulse used Space Vector PWM to reduce torque pulsation of BLDC motor.

According to, it was improve general matters of high water storage tank method by direct water supply pumping method.

**Key Words** : PV Water Pumping, MPPT, BLDC motor Controller

### 1. 서 론

대체 에너지로 각광을 받고 있는 태양광 발전 시스템은 특히 산간, 낙도와 같은 오지에서 독립적으로 이용되는 소용량 형태로 제한되어 왔다. 또 국내에서는 현실적으로 아직까지 기존 전력 사업자들의 기피로 계통과의 연계가 불가능한 현실을 인식하면, 독립형의 실용화가 우선적으로 그 실현성을 갖게 된다. 이러한 면에서 독립형 태양광 발전이 대체 에너지원으로써 그 의미를 갖기 위해서는 발전시스템으로 직·교류 변환장치의 효율성 및 신뢰성이 보장되어야 한다.

독립형 태양광 발전이 이용되는 양수시스템은 도서지역이나 산간등 오지에서의 식수공급등에 이용되거나 분무식 관개용수, 무공해주택등의 급수등에 이용될 수 있어 친환경적인 대체에너지로 각광을 받고 있기 때문에 그에 대한 연구가 이미 선진국에서는 활발히 진행되어 왔다. 양수 및 급수 시스템에 대한 연구는 PV 어레이와 펌프 그리고 전기적인 모터와의 결합에 대한 부분이 중요한 사항으로 대두되어 왔다. 그간 여러 연구자들이 태양광 발전에서 PV 어레이(Photovoltaic-array)를 이용하여 동작하는 모터의 여러 종류에 따른 정상상태의 특성에 대하여 연구해 왔다[1]~[6].

그중 BLDC(Brush-less DC) 모터는 낮은 관성의 모터로 설계 되어 있기 때문에 높은 출력대 무게 비율, 높은 토크

대 전류비율, 고정밀 운전, 속응성 및 고효율등 다른 모터에 비해 우수한 특성을 가지고 있다. 이로 인해 PV 어레이에 의해 동작하는 양수시스템에서도 BLDC 모터의 요구가 증가되고 있다. 그러나 양수시스템에 관한 정보가 문헌에는 매우 적은 실정이다.

본 논문에서는 PV 양수시스템에 BLDC 모터를 채택하여 유도기에 비해 넓은 속도 범위에 대하여 고효율 운전이 되도록 하였다. 그리고 BLDC 모터를 벡터제어 함으로써 각 운전속도의 영역에서 최대토크 운전 및 높은 신뢰성을 가능하도록 하였다. 이를 위해 전류·속도·압력 PI 제어를 최적의 값으로 설계하고, 일반적인 구형과 형태의 전류로 여자되는 BLDC 모터의 토크 맥동 발생을 저감시키기 위해 정현파 방식의 SVPWM(Space Vector PWM) 스위칭 패턴을 구현하여 BLDC 모터를 이용한 펌프직송 방식의 PV 양수 시스템의 실효성을 확인한다.

### 2. 시스템구성 및 제어기 설계

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

PV 어레이는 직접적으로 일사량을 DC 전원으로 변환하며, PV 어레이의 전류크기는 일사량의 크기에 의존한다. 이 전류는 DC-DC변환기(Chopper)를 거쳐 급수펌프를 조절하기 위해 BLDC 모터에 전력을 공급하는 전압형 SVPWM 인버터가 BLDC 모터에 필요한 전력을 공급하며, 여기에 흐르는 전류의 위상을 결정하는 자속 위치 검출기가 기본적으로 구성되고, 속도제어를 할 경우 이를 위한 제어기와 검출기가 추가되었으며, 급수 시스템의 압력 제어를 위해 압력

\* 正 會 員 : 明知大學校 大學院 電氣工學科 博士課程 修了

\*\* 正 會 員 : 光星産業株式會社 主任研究員

\*\*\* 正 會 員 : 明知大學校 電氣·情報制御工學部 博士課程

§ 正 會 員 : 明知大學校 電氣·情報制御工學部 博士課程

§§ 正 會 員 : 大德大學 電氣·電子系列 副教授 · 工博

§§§ 正 會 員 : 明知大學校 電氣·情報制御工學部 教授 · 工博

接受日字 : 2001年 7月 3日

最終完了 : 2001年 8月 20日

검출기가 추가 된 제어기로 구성된다. 또 제어부는 고성능 DSP칩인 TMS320C31을 사용하므로 구현하고자 하는 각부의 제어를 가능하게 하였다.

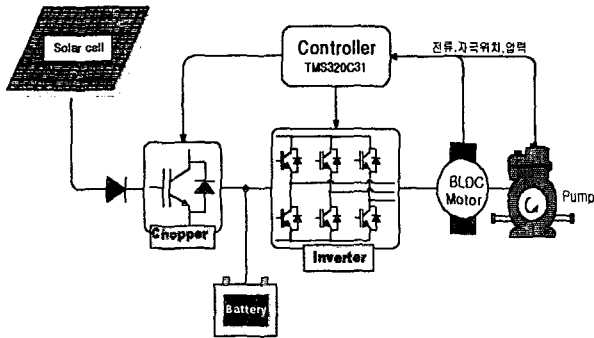


그림 1 전체 시스템 구성  
Fig. 1 Configuration of overall system

2.1 태양전지와 DC-DC변환부

태양전지는 광기전력 효과(photovoltaic effect)를 이용하여 태양 에너지를 직접 전기에너지로 변환시키는 반도체 소자이다. 태양전지의 출력특성은 그림 2와 같이 일사량에 따라 크게 영향을 받기 때문에 태양전지에서 최대 전력을 얻기 위한 동작점은 태양전지 양단의 전압  $E_s$  와 태양전지에서 흘러 나오는 전류  $I_s$ 의 곱이 최대가 되는 점이 최대 출력점이 된다. 또한 일사량 변화에 따라 태양전지의 단락전류  $I_{sc}$ 는 일사량에 따라 비례적으로 변화하며 개방전압  $E_{oc}$ 는 거의 변화가 적다. 표 1은 본 시스템에 사용한 태양전지의 사양을 나타내며, 실험에서는 20개의 모듈을 직·병렬로 연결하여 실험을 행했다.

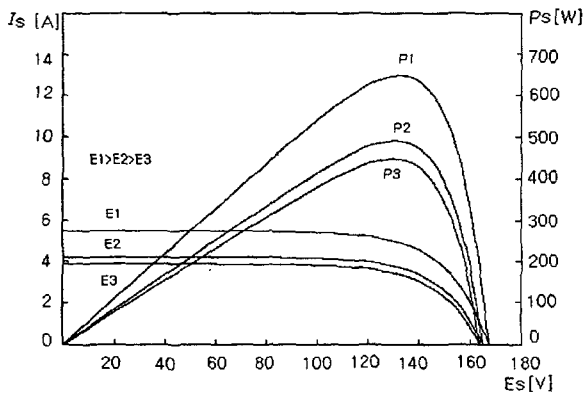


그림 2 일사량 변화에 따른 태양전지의 출력특성  
Fig. 2 Characteristics curves of solar cell as insolation

그림 3은 태양전지를 이용하여 태양전지에서 발생된 전력을 인버터의 입력으로 사용하기 위해 DC-DC 변환부로 구

성된 초퍼의 제어부와 하드웨어 개략도를 보여준다.

표 1 태양전지 사양

Table 1 Solar cell specification

모델명	M65 (SIEMENS)
최대출력전력	43 [Wp]
개방전압 ( $V_{oc}$ )	18.0 [V]
단락전류 ( $I_{sc}$ )	3.32 [A]
Voltage at Load	14.6 [V]
Amperage at Load	2.95 [A]
모델 - 길이	1083 [mm]
- 폭	330 [mm]
- 높이	36 [mm]
- 무게	4.8 [kg]

태양전지의 전류와 전압을 검출하여 전력을 계산하고 과전력과 현재전력을 비교하여 초퍼의 시비율을 제어하는 최대출력점 추적제어 방식을 이용하여 최대의 효율로 에너지를 이용할 수 있도록 고려하였다.

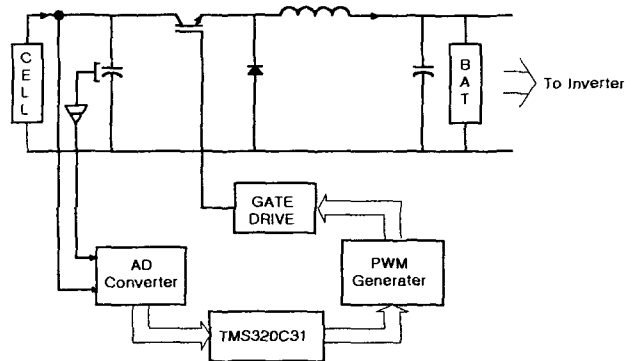


그림 3 DC-DC 변환부의 제어부와 하드웨어 개략도  
Fig. 3 Controller of DC-DC converter & outline of hardware

2.2 펌프의 출력특성 및 제어

펌프는 용도에 따라서 필요수량이나 유입량, 수위등의 변동을 받고 이것에 따른 운전을 하기 위해서는 유량제어, 압력(수압)제어, 수위제어등이 필요하지만, 결국은 같은 의미의 펌프제어로 귀착되게 되는데 여기에 얼마나 적정하도록 펌프를 제어 할 수 있는지의 여부가 문제시된다.

펌프의 출력 즉, 유량이나 수압(토출압)을 바꾸는 방법으로는 펌프의 운전회수 또는 용량을 바꾸는 간헐제어와 밸브의 개폐, 펌프의 회전수 조정에 의한 연속제어가 있다. 그러나 태양전지를 이용한 용수펌프 시스템에서는 운전 효율이 증시되기 때문에 관로 손실이 크거나 수용유량변동이 큰 경우는 밸브제어의 경우 손실이 크고 그로인해 효율이 불안정하므로 회전수 제어가 사용된다.

본 논문에서는 모터의 가변 속도 방식을 채택하여 수용유량의 변동에 따른 토출구의 유량변동이나 수압 변동에 펌프를 정압제어

함으로써 유연한 용수시스템의 운전이 되도록 하였다. 그림 4는 펌프 압력제어기의 블록선도를 나타낸다.

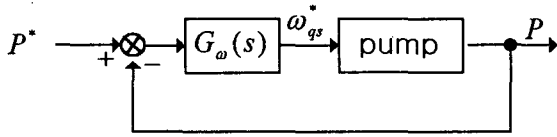


그림 4 펌프 압력 제어기의 블록선도  
Fig. 4 Block diagram of pump pressure controller

가변속도 제어 방식은 압력탱크에 의하여 급수하는 대신 펌프의 토출 압력에 의하여 제어하므로 급수 압력의 일정한 유지, 급수시설의 설치공간 최소화, 모터의 저용량화라는 이점이 있다. 가변속도 제어를 하지 않을 경우에 대한 소요전력의 차이는 다음 식 (1)과 같다.

$$P_V = P_B - P_C = KH_B(Q_B - Q_A) \quad (1)$$

여기서,  $P_V$ 는 소요전력차이고  $P_B$ 는 가변속도 제어를 하지 않는 경우의 필요 이론 동력,  $P_A$ 는 가변속도 제어시의 필요 이론 동력,  $K$ 는 상수,  $H_B$ 는 양수수두,  $Q_B$ 는 공급유량,  $Q_A$ 는 필요 유량이다. 특히  $Q_B$ 는 가변속도제어를 하지 않는 경우의 필요 이상의 공급, 즉 과잉공급분을 포함하게 된다.

이상과 같이 양수수두가 저하 할 경우 펌프 속도를 저하시켜 펌프의 경제적인 운전을 가능케 한다. 또한, 가변속도 제어 방식은 고가수조 방식에 대하여는 고도제한의 문제, 건축비의 상승, 장시간 급수 저장시의 적수현상이나 위생상의 문제점등에 대한 이점을 지닌다. 여기에서, 압력은 시간적 변화의 유무에 따른 분류로 정압, 변동압, 맥동압 등으로 나눌 수 있는데 정압이란 변화가 없는 압력 또는 1초당 압력계의 최대 압력의 1%를 넘지 않는 변화의 순시 속도를 가지는 압력이거나 1분당 최대 압력의 5%를 넘지 않는 압력을 말한다.

펌프는 회전자나 피스톤(또는 Plunger)과 같은 작동 요소가 움직이므로써 액체에 이동할 수 있는 에너지를 주게 된다. 따라서, 일정한경의 경우 수압이나 양수량은 양정의 대소에 관계없이 펌프의 회전속도에 비례하고, 양정이 일정하면 소요 토크도 거의 일정하며, 소요동력은 펌프의 회전속도에 비례한다. 이것은 구동용 전동기의 속도제어로는 정토크 특성의 제어가 바람직함을 뜻하는 것이다. BLDC 모터로부터의 출력은 펌프의 입력전력이 된다.

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

여기에서,  $\omega$ 는 각속도[rad/s],  $T_L$ 은 펌프의 부하토크[Nm]이다.

펌프의 기계적 출력  $P_{pump}$ 는 식(3)으로 계산된다.[2]

$$P_{pump} = \frac{pQ}{\eta_{pump}} = \frac{10^4(p_{in} - p_{out})Q}{102 \eta_{pump}} \text{ [kW]} \quad (3)$$

$$p : \text{압력 [kgf/cm}^2 \text{]} \\ = H(\text{양정 [m]} \times \rho(\text{물: 1000 [kg/m}^3 \text{)}) \times g(9.8 \text{ [m/s}^2 \text{)})$$

$p_{in}$  : 입력측 수압,  $p_{out}$  : 출력측 수압  
 $Q$  : 유량[  $\text{m}^3/\text{s}$  ],  $\eta_{pump}$  : 펌프의 효율

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

$$P_{mot} = \frac{P_{pump}}{\eta_{mot}} = \frac{pQ}{\eta_{pump} \eta_{mot}} \text{ [kW]} \quad (4)$$

$\eta_{mot}$  : 모터의 효율

송수관의 길이와 지름등에 따른 압력과 유량사이의 관계는 다음과 같다.

$$Q = \frac{\pi r_2^4 (p_{in} - p_{out})}{8 \mu l} \text{ [cm}^3/\text{s]} \quad (5)$$

$r_2$ : 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 운전하고 있다고 하면 유량과 수압은 모터의 속도에 상응하는 것을 알 수 있다.[3] 표 2는 펌프의 사양을 표시한다.

표 2 펌프의 사양

Table 2 Pump specification

펌프 구분	WESCO 펌프
축동력	1.5 kW
양정	80 m
양수량	0.03 m <sup>3</sup> /min
흡입/토출 관구경	25(in) / 25(out) mm

### 2.3 BLDC 모터의 모델링

BLDC 모터는 구조상으로 동기전동기와 동일하다. 직류전동기의 계자에 의한 자속을 BLDC 모터에서는 회전자인 영구자석으로 자속을 발생시킨다. 또한 회전자의 절대위치를 검출할 수 있도록 홀센서(Hall Sensor)가 120°의 간격으로 배치되어 있다. 3개의 홀센서의 스위칭 패턴에 의해 회전자의 현 위치를 6개의 구역으로 구분 지어 알아낼 수 있으며 3상 표현법에 의한 a-b-c축이 그려져 있고 2상 표현법에 의한 d-q축이 그려져 있다. 그림 5는 BLDC 모터의 전기적인 등가회로를 나타낸다.

모터의 특성을 결정짓는 방정식의 유도는 식(6), 식(7)과 같은 모터내에서의 상전압과 쇄교자속의 관계식에서부터 시작된다.[3]

$$V_{abcs} = R_s i_{abcs} + \frac{d}{dt} \lambda_{abcs} \quad (6)$$

$$\lambda_{abc s} = L_s i_{abc s} + \lambda_m \quad (7)$$

여기서  $V_{abc s}$ ,  $i_{abc s}$ ,  $\lambda_{abc s}$ 는 각각 고정자 전압, 전류, 자속을 나타내고  $R_s$ ,  $L_s$ ,  $\lambda_m$ 은 고정자저항, 고정자 인덕턴스, 쇄교자속의 크기를 각각 나타낸다. 식(6),식(7)의 방정식은 역기전력을 고려하여 식(8)과 같은 전압방정식으로 유도되어질 수 있다.

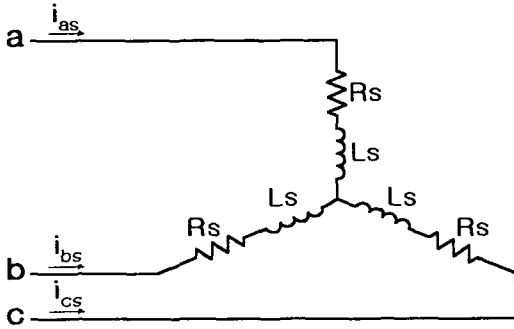


그림 5. BLDC 모터의 전기적인 등가회로  
Fig. 5 Electrical equivalent circuit of BLDC motor

$$V_{abc s} = R_s i_{abc s} + \frac{d}{dt}(L_s i_{abc s}) + e_{abc s} \quad (8)$$

$e_{abc s}$ 는 회전자가 회전에 따라 각상의 코일에 유기되는 전압(역기전력)을 나타낸다. 앞식들을 종합하여 BLDC 모터의 전압 방정식을 다음과 같이  $d-q$  2축 표현법에 의하여 나타내면 식(9),식(10)로 나타낼 수 있다.

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

$$v_{ds} = R_s i_{ds} + L_s \frac{d}{dt} i_{ds} - \omega_r L_s i_{qs} \quad (10)$$

전압방정식 식(9)과 식(10)를 이용하면 식(11)의 형태로 상태방정식으로 정리해볼 수 있다. 여기서  $e_{qa} = \omega_r \lambda_m$ 이다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_s} & \omega_r \\ -\omega_r & -\frac{R_s}{L_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_s} \begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \end{bmatrix} - \frac{1}{L_s} \begin{bmatrix} 0 \\ e_{qa} \end{bmatrix} \quad (11)$$

식(11)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. 토크오식을 나타내면 식(12)과 같다.

$$\begin{aligned} T_e &= \frac{d}{dt} \lambda_m [i_{qs} \cos \theta - i_{ds} \sin \theta] \\ &= \frac{d}{dt} \lambda_m i_{qs} \end{aligned} \quad (12)$$

운동방정식은 점성 마찰계수를 무시한 모터 출력축의 회전각속도(기계각)  $w_{re}$ 은 극수를  $P$ 로 하면  $w_{re}/P$  이므로 다음으로 표현될 수 있다.

$$\frac{d}{dt} J \left( \frac{w_{re}}{P} \right) = \frac{d}{dt} J w_m = T_e - T_L \quad (13)$$

여기서,  $T_e$ 는 모터의 부하 토크,  $J$ 는 모터와 부하의 관성모멘트( $J_L + J_M$ )이다.

그림 7은 앞의 관계식들로부터 구할 수 있는 블록 선도이다

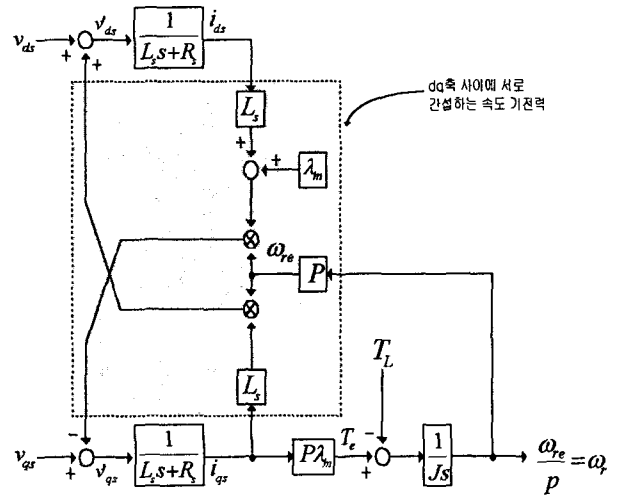


그림 7 BLDC 모터의 모델링과 블록선도  
Fig. 7 Modeling & block diagram of BLDC motor

### 2.4 BLDC 모터의 제어

그림 7에서와 같이  $d-q$ 축 사이에는 서로 간섭하는 속도 기전력이 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 제어 가능한 입력 변수가 되도록 하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} i_{ds} &= -\frac{R_s}{L_s} i_{ds} + \frac{1}{L_s} v'_{ds} \\ \frac{d}{dt} i_{qs} &= -\frac{R_s}{L_s} i_{qs} + \frac{1}{L_s} v'_{qs} \end{aligned} \quad (14)$$

비간섭화 제어된 BLDC 모터의 블록선도는 그림 8과 같다.

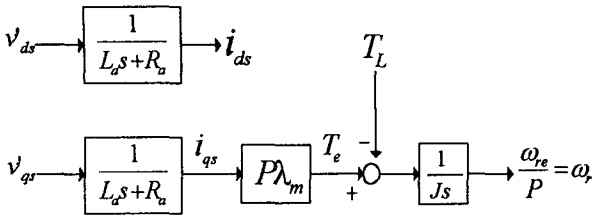


그림 8 비간섭화 제어된 BLDC 모터의 블록선도  
Fig. 8 Block diagram of non-interference controlled BLDC motor

서보모터 수준의 동작을 위해서는 토크에 대한 고속응답이 필요하기 때문에 전류 피드백 제어가 되어야 한다. 그림 8에 전류 제어기를 부가하면 그림 9와 같이 된다.

그림 9에서  $i_{ds}^*$ ,  $i_{qs}^*$  제어계의 폐루프 전달함수  $G_{id}^c(s)$ ,  $G_{iq}^c(s)$ 는 식(15)이 된다.  $v_{ds}^*$ ,  $v_{qs}^*$ 는 전달계수  $G_{id}(s)$ ,  $G_{iq}(s)$ 로 표현된  $i_{ds}^*$ ,  $i_{qs}^*$  전류 제어기의 출력으로 구할 수 있다.

$$G_{id}^c(s) = \frac{1}{\frac{L_s}{K_{id}}s + 1} \tag{15}$$

$$G_{iq}^c(s) = \frac{1}{\frac{L_s}{K_{iq}}s + 1}$$

여기에서,  $G_{id}(s) = K_{id}(1 + \frac{1}{T_{id}s})$ ,  $T_{id} = \frac{L_s}{R_s}$ ,  
 $G_{iq}(s) = K_{iq}(1 + \frac{1}{T_{iq}s})$ ,  $T_{iq} = \frac{L_s}{R_s}$  이다.

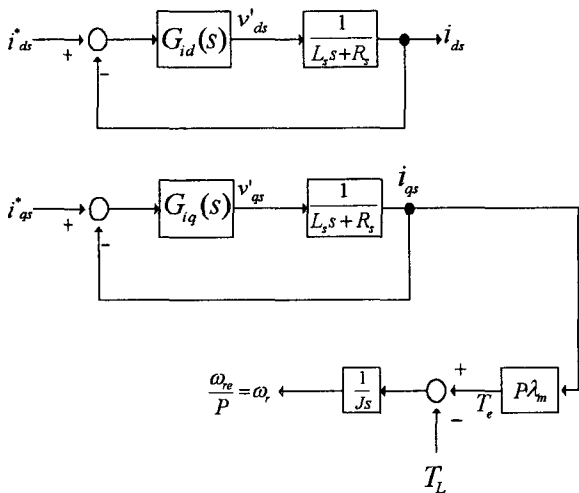


그림 9 전류제어기가 첨가된 BLDC 모터의 블록선도  
Fig. 9 Block diagram of BLDC motor with Current controller

펌프용 모터를 제어함에 있어 펌프의 토출구의 유량 변동이나 수요처의 변동으로 인한 양정의 변화는 압력의 변화를 유발하게 된다. 또한, 판의 굴곡으로 인한 판로저항의 변화

가 모터에는 부하토크로 작용하게 된다. 이로 인하여 모터의 회전수를 가변하여 일정압력으로 펌프를 제어함으로써 목표치 압력을 유지하도록 제어할 수 있다.

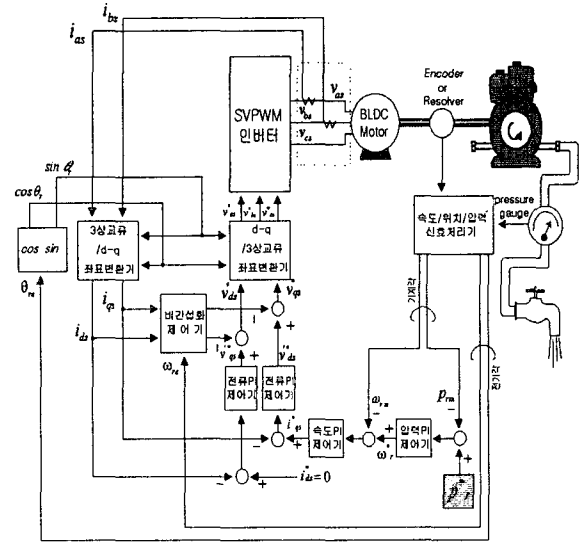


그림 10 전체 제어기 구성

Fig. 10 Configuration of overall controller

그림 10은 전체 제어회로를 구성하여 나타내며 전류, 속도 그리고 압력 PI제어기를 부가하여 압력 지령치  $p^*$ 와 검출압력  $p_m$ 과의 차로 속도 PI제어기와 전류PI제어기의 지령치  $i_{qs}^*$ ,  $\omega^*$ 를 결정하게 하여 펌프 부하에 따른 변동토크에도 강인한 제어가 될 수 있도록 하였다.

### 3. 시뮬레이션 및 실험 결과

시뮬레이션은 C언어를 이용하여 펌프 부하시 압력제어기에 의해 결정되는 속도 지령치에 대한 BLDC 모터의 응답을 비교·예측해 보았다. 표 3은 시뮬레이션에 이용된 파라미터를 표시한다.

표 3 BLDC 모터의 파라미터  
Table 3 Parameter of BLDC motor

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

그림 11은 무부하시의 BLDC 모터의 시뮬레이션 파형을 보여주고 있다. 실험조건으로 전류제어기의 Bandwidth는 1000[rad/sec], 속도제어기의 Bandwidth는 300[rad/sec]으로

설정하였고 d축 전류기의 지령치는 최대토크에서의 운전 을 위해 0으로 주었다. 여기에서 속도지령치는 400rpm에서 800rpm으로 변화시키고 속도지령치에 대한 속도 응답과  $i_{abc}$ ,  $i_{dqs}$  전류를 함께 비교하였다. 파형에서 알 수 있듯이 BLDC 모터의 속도 응답은 50ms정도로 우수하다.

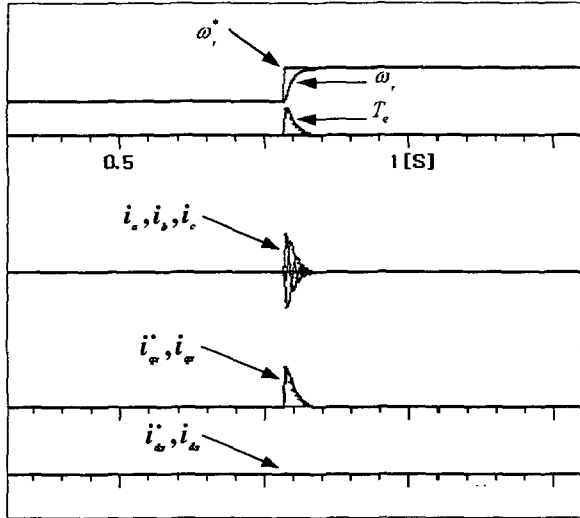


그림 11 속도지령시의 응답파형 (400rpm → 800rpm)

Fig. 11 Response in variable speed reference at 400rpm → 800rpm

그림 12는 무부하시 속도지령치를 반대로 800rpm에서 400rpm으로 감소시켰을때 속도지령치에 대한 속도 응답과  $i_{abc}$ ,  $i_{dqs}$  전류를 비교한 결과이다.

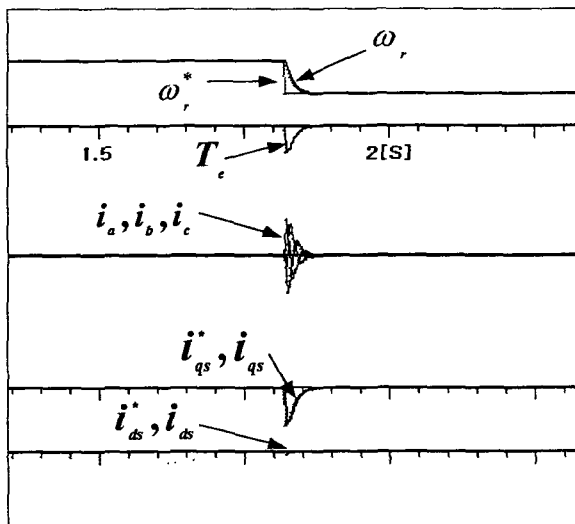


그림 12 속도지령시의 응답파형(800rpm→400rpm)

Fig. 12 Response in variable speed reference at 800rpm → 400rpm

그림13은 일정부하의 경우 속도지령치를 400rpm에서 650rpm으로 증가시키고 다시 650rpm에서 400rpm으로 감소 시켰을때 속도 지령치에 대한 속도 응답과  $i_{abc}$ ,  $i_{dqs}$  전류를

함께 비교한 파형이다. 속도 응답의 경우 무부하시의 경우 보단 느리지만 속도지령 가변시 약 80ms정도 이내에서 추 종합으로 보아 부하시에도 속도 응답이 우수함을 확인할 수 있다.

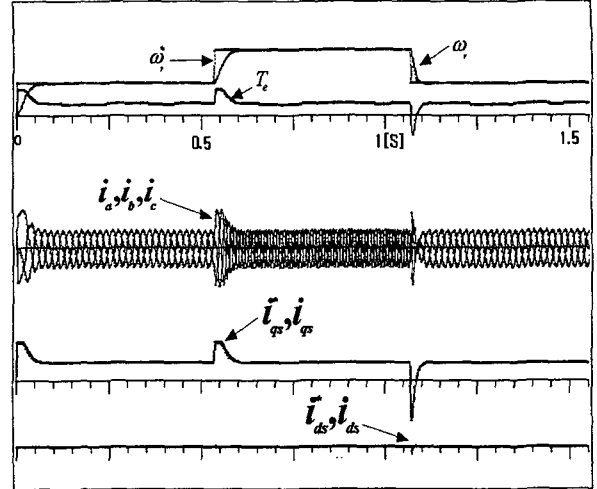


그림 13 속도지령시의 응답파형(일정부하시)

(400rpm → 650rpm → 400rpm)

Fig. 13 Response in variable speed reference at constant load at 400rpm → 650rpm → 400rpm

실험을 통해 시뮬레이션의 결과를 확인하고 펌프부하 가 변시 (압력 가변시) 압력제어기의 성능을 비교·확인하였다. 그림 14는 시뮬레이션과 같은 조건에서 무부하시의 BLDC 모터의 시뮬레이션 파형을 보여주고 있다. 속도지령치를 400rpm에서 800rpm으로 증가시켰을 때 속도지령치에 대한 속도 응답과 q축 전류응답 파형으로 시뮬레이션에서의 경우와 마찬가지로 우수한 응답특성을 확인할 수 있었다. 그림 15는 무부하시 속도지령치를 800rpm에서 400 rpm으로 감소시켰을때의 실험결과이다.

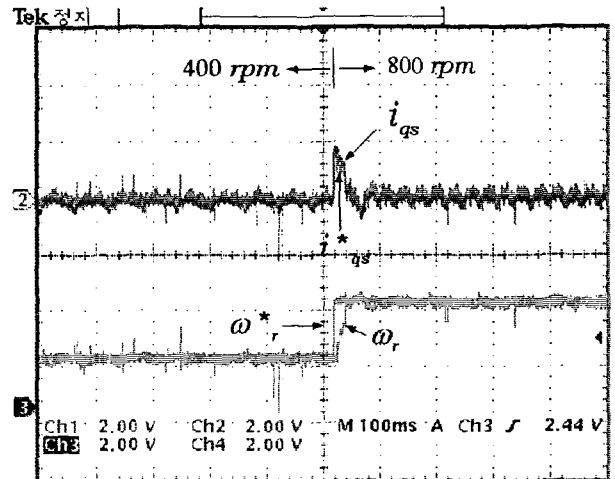


그림 14 속도지령시의 응답파형 (400rpm→800rpm)

Fig. 14 Response in variable speed reference at 400rpm → 800rpm

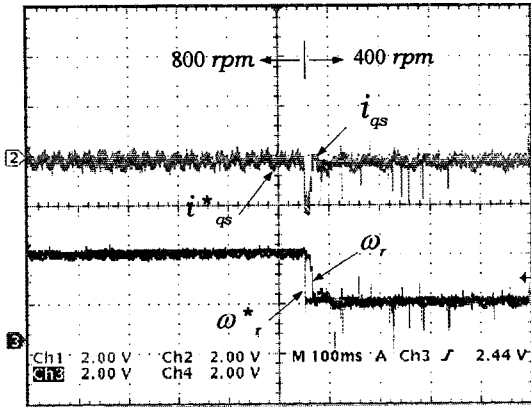


그림 15 속도지령시의 응답파형 (800rpm→400rpm)  
 Fig. 15 Response in variable speed reference at 800rpm → 400rpm

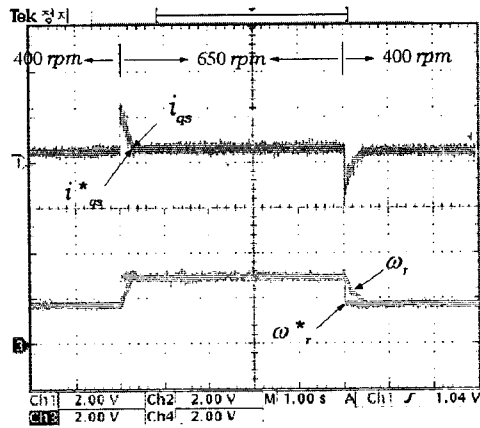


그림 16 속도지령시의 응답파형(일정부하시)  
 (400rpm → 650rpm → 400rpm)  
 Fig. 16 Response in variable speed reference at 400rpm → 650rpm → 400rpm

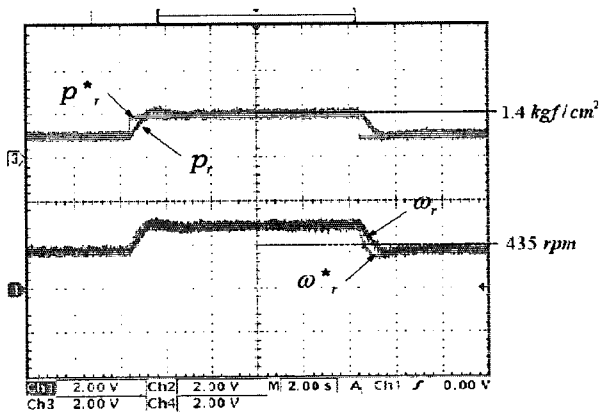


그림 17 압력지령시의 속도응답파형  
 (0.7 kgf/cm² → 1.4 kgf/cm² → 0.7 kgf/cm²)  
 Fig. 17 Speed response in variable pressure reference at 0.7 kgf/cm² → 1.4 kgf/cm² → 0.7 kgf/cm²

그림 16은 일정부하의 경우 속도지령치를 400rpm에서 650rpm으로 증가시키고 다시 650rpm에서 400rpm으로 감소시켰을 때 속도지령치에 대한 속도 응답과 q축 전류응답을 함께 비교한 실험 파형이다. 실제 펌프부하의 투입시에도 BLDC 모터가 우수하게 추종할 수 있음을 알 수 있다. 그림 17은 압력(0.7~1.4kgf/cm<sup>2</sup>)의 변화에 따른 압력 추종과 압력제어기에 결정되는 속도의 지령치와 그응답을 보여주는 파형이다. 압력·전류·속도 PI제어기를 사용하여 BLDC 모터의 속도를 제어함으로써 일정압력이 되도록 제어할 수 있고 유량 및 양정의 변화에 따른 압력의 변화에도 불구하고 목표치 압력을 우수하게 추종함을 확인하였다.

그림 18은 압력(0.7~1.4kgf/cm<sup>2</sup>) 지령치의 변화에 따른 BLDC 모터의 압력지령치에 대한 압력응답과 q축 전류의 응답파형을 보여준다.

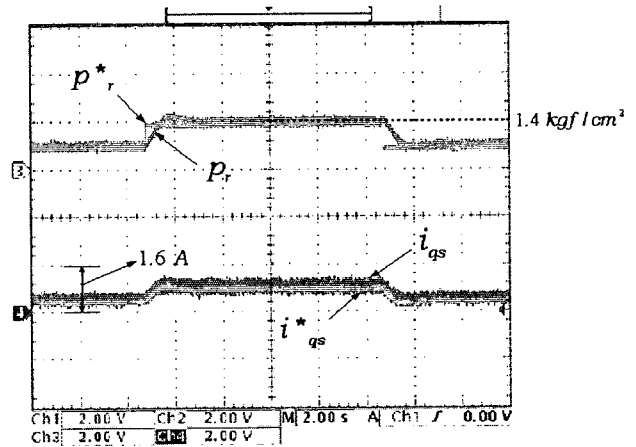


그림 18 압력지령시의 전류응답파형  
 (0.7 kgf/cm² → 1.4 kgf/cm² → 0.7 kgf/cm²)  
 Fig. 18 Current response in variable pressure reference at 0.7 kgf/cm² → 1.4 kgf/cm² → 0.7 kgf/cm²

#### 4. 결 론

본 논문에서는 PV 양수 시스템에 BLDC 모터를 사용하여 다음과 같은 결과를 시뮬레이션 및 실험을 통하여 확인하였다.

- 1) PV 양수시스템의 BLDC 모터에 벡터제어 기법을 이용, 최대효율로의 제어가 가능하였다.
- 2) 부하변화 즉 압력변화에 따른 각각의 펌프운전 영역에서 압력지령치에 대한 양호한 응답을 확인하였다.
- 3) BLDC 모터의 회전수 가변을 통하여 정압제어를 하는 펌프직송 방식의 PV 양수펌프의 실효성을 확인하여 기존의 고가 저장수조 방식의 일반적인 문제점을 개선하였다.
- 4) 유도기 대신 BLDC 모터를 대체함으로써 무부하시에 무효전력의 상승을 저감시켜 배터리의 충방전횟수를 적게 하여 배터리의 수명을 연장할 수 있었다.

이상과 같은 결론을 통하여 PV 양수 펌프 시스템에 BLDC 모터를 적용한 결과 그 특성이 우수함을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] Eduard Muljadi, "PV Water Pumping with a Peak-Power Tracker Using a Simple Six-Step Square-Wave Inverter".IEEE Transaction on Industry Application, Vol.33, No.3, May/June, 1997, pp.714-721.
- [2] J. Appelbaum, "Performance Characteristics of Permanent Magnet DC Motor Powered by Solar Cell", SolarCells, 17, 1986, pp.343-362.
- [3] W.Z. Fam and M.K.Balachander, "Dynamic Performance of a DC shunt Motor Connected to a Photovoltaic Array", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.3, No.3, Sept.1988, pp.613-617.
- [4] A. Braunstien and A. Kornfield, "Analysis of Solared Powered Electric Water Pumps", Solar Energy, Vol.27, No.3, 1981, pp.235-240.
- [5] Y.R. Hsiao and B.A. Blevins, "Direct Coupling of Photovoltaic Power Source to Water Pumping System", Solar Energy, Vol.32, No.4, 1984, pp. 489-498.
- [6] Michael G. Thomas, "Water Pumping-The Solar Alternative", Sandia National Laboratories, SAND 87-0804, pp.18-22
- [7] F. Lasnier & T. G. Ang, "Photovoltaic Engineering Handbook", pp.297-328, 1990

저 자 소 개



**김성남 (金城南)**  
 1953년 9월 17일생. 1980년 명지대학교 공대 전기공학과 졸업 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 2000년 동 대학원 전기공학과 박사과정 수료. 현재 (주)두이전기통신 부사장  
 Tel : 031-330-6359



**최성호 (崔盛皓)**  
 1971년 12월 29일생. 1999년 한밭대학교 공대 전기공학과 졸업, 2001년 명지대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 광성산업주식회사 기술연구소 주임 연구원  
 Tel : 031-431-3255  
 E-mail : foohaha@korea.com



**조정민 (趙正珉)**  
 1972년 1월 10일생. 1997년 충주대 공대 전기공학과 졸업, 1999년 명지대 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 2001년 동 대학원 전기공학과 박사과정  
 Tel : 031-330-6359  
 E-mail : pioneer@wh.myongji.ac.kr



**전기영 (全基英)**  
 1971년 8월 15일생. 1994년 대전산업대 전기공학과 졸업. 1998년 명지대 전기공학과 졸업(공학석사). 현재 명지대 전기공학과 박사과정.  
 Tel: 031-330-6359  
 E-mail : jky@wh.myongji.ac.kr



**이승환 (李丞桓)**  
 1960년 2월 18일생. 1984년 명지대 전기공학과 졸업, 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1995년 명지대 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 현재 대덕대학 컴퓨터전기전자계열 부교수  
 Tel : 042-866-0331 Fax :042-866-0339  
 E-mail : leesh@mail.ddc.ac.kr



**한경희 (韓慶熙)**  
 1943년 4월 9일생. 1967년 명지대 공대 전기공학과 졸업, 1983년 일본 나고야대 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 현재 명지대 전기·제어정보공학부 교수  
 Tel : 031-330-6359  
 E-mail : hkh@wh.myongji.ac.kr