

냉동·냉장창고용 냉수펌프의 에너지절감 기법

(Energy saving technique of Refrigeration warehouse Cold Water Pump)

정춘병* · 전기영 · 이상집 · 김대균 · 이훈구 · 한경희

(Chung-Byeong Chung · Kee-Young Jeon · Sang-Chip Lee · Dae-Gyun Kim · Hoon-Goo Lee · Kyung-Hee Han)

Abstract

We are interaction refrigeration warehouse cold water pump system and photovoltaic generation system. At this time, a target pressure is able to control in spite of change of the pressure according to pump head and rate of flow of pump. Also, we carry out the vector control of BLDC motor with the maximum torque operation and a high reliability from territory of each operation speed. Therefore, in this paper, we conclude energy saving technique of refrigeration warehouse cold water pump system.

1. 서 론

최근 국민소득 증대 및 도시화의 진전에 따라 주거형태의 변화와 우리의 식생활 패턴을 변화시켜 농·수·축산물의 수요가 양적인 증가를 보임과 동시에 신선식품에 대한 질적인 욕구도 높아지고 있는 현실이다[1]. 이러한 산업이 발전함에 따라 냉동·냉장창고의 수요도 지속적으로 증가하게 되므로 에너지 절감의 필요성이 높아지고 있다. 또한, 환경공해의 문제로 인하여 대체에너지에 대한 문제도 대두되고 있다. 그러므로 본 논문에서는 냉동·냉장창고용 냉수 펌프 시스템을 태양광발전 시스템과 연계하여 펌프의 양정 및 유량의 변화에 따른 압력의 변화에도 불구하고 목표치 압력을 일정하게 제어할 수 있도록 BLDC 모터를 벡터제어함으로써 각 운전속도의 영역에서 최대토크 운전 및 높은 신뢰성을 가능하도록 하였다. 이를 위해 전류·속도·압력 PI 제어를 최적의 값으로 설계하였다. 또한 일반적인 구형과 형태의 전류로 여자 되는 BLDC 모터의 토크 맥동 발생을 저감시키기 위해 정현파 방식의 SVPWM(Space Vector PWM) 스위칭 패턴을 구현하고, 태양광 발전을 이용하여 냉동·냉장창고용 냉수 펌프 시스템의 에너지 절감을 향상시켰다[2]~[4].

2. 냉수펌프 시스템구성 및 제어기설계

그림 1은 태양광발전 냉수펌프 시스템의 전체 구성도로 태양전지와 펌프장치를 결합하기 위해

전체 시스템을 초퍼와 인버터, 그리고 BLDC 모터를 이용하여 구성하였다.

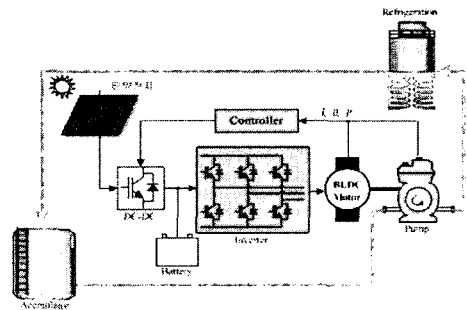


그림 1. 전체 시스템 구성
Fig. 1. Configuration of overall system

PV 어레이는 직접적으로 일사량을 DC 전원으로 변환한다. PV 어레이의 전류크기는 일사량의 크기에 의존한다. 이 전류는 DC-DC변환기(Chopper)를 거쳐 냉수펌프를 조절하기 위해 BLDC 모터에 전력을 공급하는 전압형 SVPWM 인버터가 BLDC 모터에 필요한 전력을 공급하고 여기에 흐르는 전류의 위상을 결정하는 자극 위치 검출기가 기본적으로 구성되고, 속도제어를 할 경우 이를 위한 제어기와 검출기가 부가되었으며 급수 시스템의 압력 제어를 위해 압력 검출기가 추가된 제어기로 구성된다. 그로인해 BLDC 모터에 직결된 펌프는 급수를 하게된다. 또 제어부는 고성능 DSP칩인 TMS320C31을 사용하여 구현하고자 하는 각부의 제어를 실현하였다.

2.1. 태양전지와 DC-DC변환부

태양전지는 광기전력 효과(photovoltaic effect)를 이용하여 태양에너지를 직접 전기에너지로 변환시키는 반도체 소자이다.

태양전지의 출력특성은 그림 2와 같이 일사량에 따라 크게 영향을 받기 때문에 태양전지에서 최대전력을 얻기 위한 동작 점은 태양전지 양단의 전압 E , 와 태양전지에서 흘러나오는 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[5]~[7]. 표 1은 본 시스템에 사용한 태양전지의 사양을 나타내며, 실험에서는 20개의 모듈을 직·병렬로 연결하여 실험을 행했다.

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]

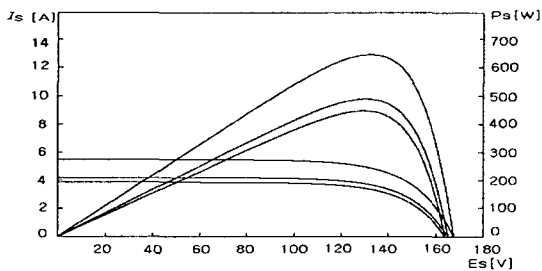


그림 2. 일사량 변화에 따른 태양전지의 출력특성
Fig. 2. Characteristics curves of solar cell as insolation

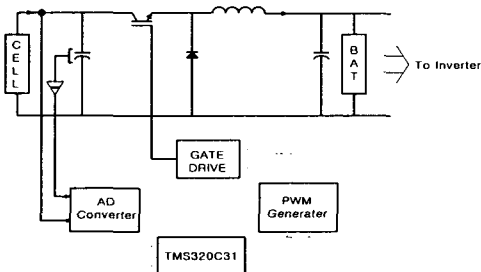


그림 3. DC-DC 변환부의 제어부와 하드웨어 개략도
Fig. 3. Controller of DC-DC converter & outline of hardware

그림 3은 태양전지를 이용하여 태양전지에서 발생된 전력을 인버터의 입력으로 사용하기 위해 DC-DC 변환부로 구성된 초퍼의 제어부와 하드웨어 개략도를 보여준다. 검출된 전류와 전압을 이용하여 태양전지의 출력을 계산하고 최대출력점 추적제어 방식을 이용하여 최대의 효율로 에너지를 이용할 수 있도록 고려하였다.

2.2. 펌프의 출력특성 및 제어

펌프는 용도에 따라서 필요수량이나 유입량, 수위등의 변동을 받고 이것에 따른 운전을 하기 위해서는 유량제어, 압력(수압)제어, 수위 제어등이 필요하지만, 결국은 같은 의미의 펌프제어로 귀착되게 되는데 여기엔 얼마나 적정하게끔 펌프를 제어할 수 있는지의 여부가 문제시 된다.

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

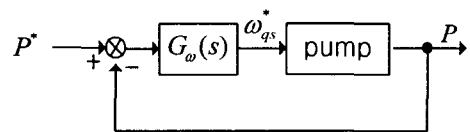


그림 4. 펌프 압력 제어기의 블록선도
Fig. 4. Block diagram of pump pressure controller

본 논문에서는 모터의 가변 속도 방식을 채택하여 수용유량의 변동에 따른 토출구의 유량변동이나 수압 변동에 펌프를 정압제어 함으로써 유연한 용수시스템의 운전을 가능케 하였다. 그림 4는 펌프 압력제어기의 블록선도를 나타낸다.

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

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

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 급수수두, Q_B 는 공급유량, Q_A 는 필요유량이다. 특히 Q_B 는 가변속도제어를 하지 않는 경우의 필요이상의 공급, 즉 과잉 공급분을 포함하게 된다.

이상과 같이 급수수두가 저하할 경우 펌프 속도를 저하시켜 펌프의 경제적인 운전을 가능케 한다. 또한, 가변속도 제어방식은 고가수조 방식에 대하여는 고도제한의 문제, 건축비의 상승, 장시간 급수 저장시의 적수현상이나 위생상의 문제점 등에 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, 일정관경의 경우 수압이나 급수량은 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.

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

여기에서, T_L 은 펌프의 부하토크[Nm]이다.

펌프의 기계적 출력 P_{pump} 는 식(3)으로 계산된다.

$$P_{\text{pump}} = \frac{\rho Q}{\eta_{\text{pump}}} = \frac{10^4(\rho_{\text{in}} - \rho_{\text{out}})Q}{100 \eta_{\text{pump}}} \text{ [kW]} \quad (3)$$

ρ : 압력 [kgf/cm²]

ρ_{in} : 입력측 수압, ρ_{out} : 출력측 수압

Q : 유량 [m³/s], η_{pump} : 펌프의 효율

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

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

η_{mot} : 모터의 효율

송수관의 길이와 지름 등에 따른 압력과 유량사

이의 관계는 다음과 같다.

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

r_2 : 토출구의 지름

l : 관의 길이 (=양정)

μ : 물의 경우 1.02×10^{-8} [kgf · s/cm²]

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
급수량	0.03 m ³ /min
흡입/토출 관구경	25(in) / 25(out) mm

2.3. BLDC 모터의 모델링

BLDC 모터는 그 구조상으로 동기전동기와 동일하다. 직류전동기의 계자에 의한 자속을 BLDC 모터의 회전자인 영구자석으로 자속을 발생 시킨다. 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 구분지어 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 모터 내에서의 상전압과 쇄교자속의 관계식에서부터 시작된다.

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

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

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

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

e_{abc_s} 는 회전자가 회전함에 따라 각상의 코일에 유기되는 전압(역기전력)을 나타낸다.

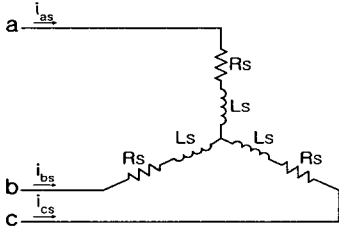


그림 5. BLDC 모터의 전기적인 등가회로
Fig. 5 Electrical equivalent circuit of BLDC

앞에서의 식을 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 다음과 같다.

$$T_e = p \lambda_m [i_{qs} \cos \theta - i_{ds} \sin \theta] = p \lambda_m i_{qs} \quad (12)$$

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

$$PJ \left(\frac{w_r}{p} \right) = PJ w_m = T_e - T_L \quad (13)$$

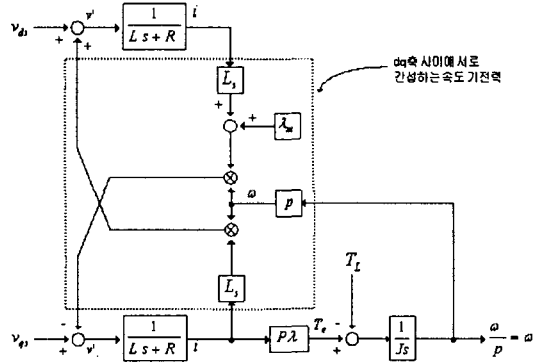


그림 6. BLDC 모터의 모델링과 블록선도
Fig. 6. Modeling & block diagram of BLDC motor

여기서, T_e 는 모터의 부하 토크, J 는 모터와 부하의 관성모멘트 ($J_L + J_M$), $P (= d/dt)$ 는 미분 연산자이다. 그림 6은 앞의 관계식들로부터 구할 수 있는 블록선도이다.

2.4. BLDC 모터의 제어

그림 6에서와 같이 $d-q$ 축 사이에는 서로 간섭하는 속도 기전력이 존재한다. 최대 토크를 발생하기 위하여 연구되어져 온 벡터 제어의 기본개념은 자속분 전류인 d 축 전류와 토크분 전류인 q 축 전류를 분리하여 독립적으로 제어하는 기법을 말한다. BLDC모터의 제어에서도 $d-q$ 축을 서로 비간섭화 하여 제어할 필요성이 있게 된다. 또한, 펌프용 모터를 제어함에 있어 펌프의 토출구의 유량 변동이나 수요처의 변동으로 인한 양정의 변화는 압력의 변화를 유발하게 된다. 또한, 관의 굴곡으로 인한 관로저항의 변화가 모터에는 부하토크로 작용하게 된다. 이 때문에 모터의 회전수를 가변하여 일정압력으로 펌프를 제어함으로써 목표치 압력을 유지하도록 제어할 수 있다. 그림 7은 전체 제어회로를 구성하여 나타낸 것이다. 압력 PI제어기를 부가하여 검출압력과 차로 전류·속도 PI제어기의 지령치를 결정하게 하여 펌프 부하에 따른 변동토크에도 강인한 제어가 될 수 있도록 하였다.

2. 시뮬레이션 및 실험 결과

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

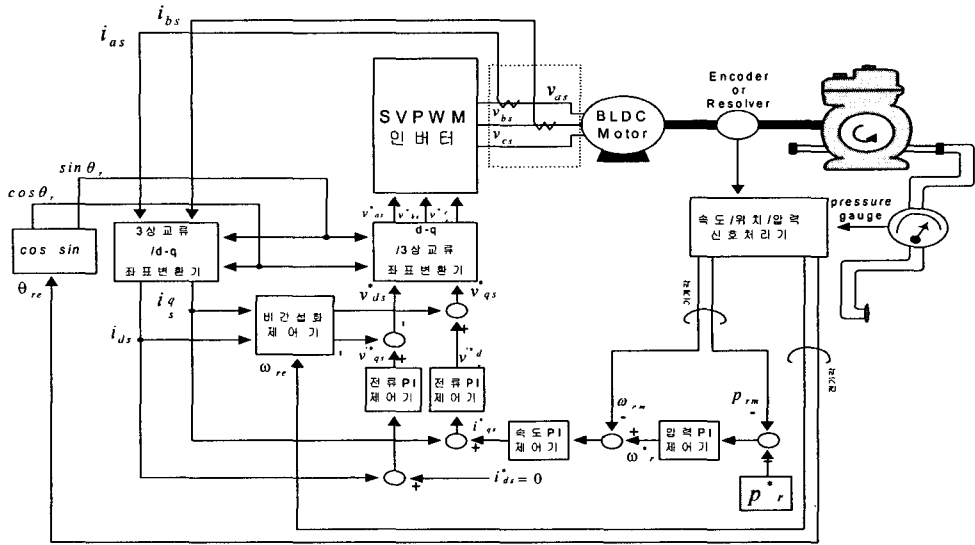


그림 7. 전체 제어기 구성
Fig. 7. Configuration of overall controller

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 Ω
J (관성)	0.32 Kg $m^2 \times 10^{-3}$
I_{cs} (최대 연속 정격 전류)	3.4 A

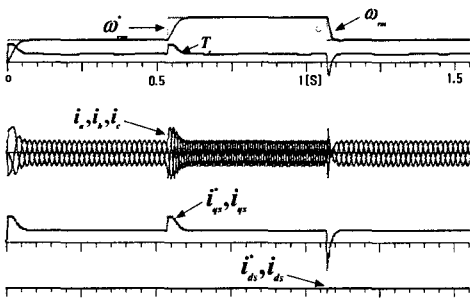


그림 8. 속도지령시의 응답파형
(400rpm → 650rpm → 400rpm)
Fig. 8. Response in variable speed reference at constant load at (400rpm → 650rpm → 400rpm)

그림8은 일정부하의 경우 속도 지령치를 400rpm에서 650rpm으로 증가시키고 다시 650rpm에서 400rpm으로 감소시켰을 때 속도 지령치에 대한 속도 응답과 i_{abc} , i_{dqs} 전류를 함께 비교한 파형이다. 속도 응답의 경우 무부하시의 경우보단 느리지만 속도지령 가변 시 약 80ms정도 이내에서

추종함으로 보아 부하 시에도 속도 응답이 우수함을 확인할 수 있다.

실험을 통해 시뮬레이션의 결과를 확인해 보고 펌프부하 가변 시 (압력 가변 시) 압력제어기의 성능을 비교·확인해 보고자 하였다. 그림 9는 시뮬레이션과 같은 조건에서 무부하시의 BLDC 모터의 시뮬레이션 파형을 보여주고 있다.

그림 9는 일정부하의 경우 속도 지령치를 400rpm에서 650rpm으로 증가시키고 다시 650rpm에서 400rpm으로 감소시켰을 때 속도 지령치에 대한 속도 응답과 q 축 전류응답을 함께 비교한 실험 파형이다. 실제 펌프부하의 투입 시에도 BLDC 모터가 우수하게 추종할 수 있음을 예측해 볼 수 있다.

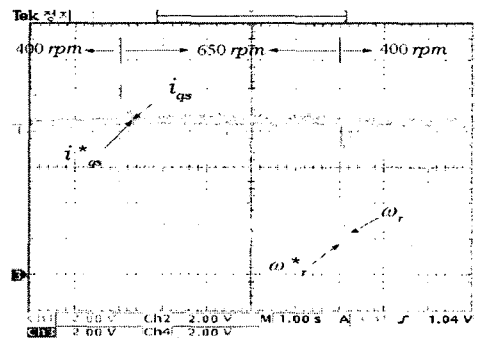


그림 9. 속도지령시의 응답파형(일정부하시)
(400rpm → 650rpm → 400rpm)
Fig. 9. Response in variable speed reference at (400rpm → 650rpm → 400rpm)

그림 10은 압력(0.7~1.4kgf/cm²)의 변화에 따른 압력 추종과 압력제어기에 결정되는 속도의 지령치와 그 응답을 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 확인할 수 있다.

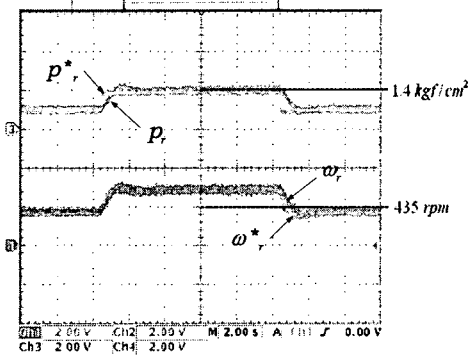


그림 10. 압력지령시의 속도응답파형
(0.7 kgf/cm² → 1.4 kgf/cm² → 0.7 kgf/cm²)
Fig. 10. Speed response in pressure reference
(0.7 kgf/cm² → 1.4 kgf/cm² → 0.7 kgf/cm²)

그림 11은 압력(0.7~1.4kgf/cm²) 지령치의 변화에 따른 BLDC 모터의 압력지령치에 대한 압력응답과 q축 전류의 응답파형을 보여준다.

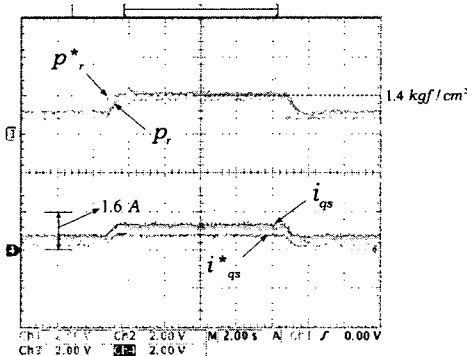


그림 11. 압력지령시의 속도응답파형
(0.7 kgf/cm² → 1.4 kgf/cm² → 0.7 kgf/cm²)
Fig. 11. Speed response in pressure reference
(0.7 kgf/cm² → 1.4kgf/cm² → 0.7kgf/cm²)

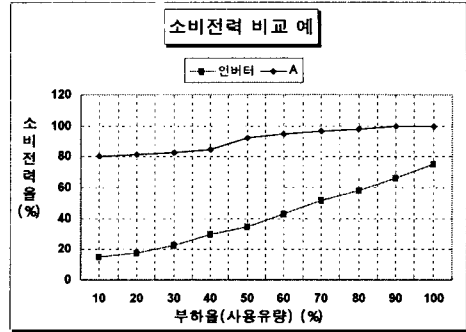
표 4는 밸브 방식(A)으로 펌프제어를 한 경우와 본 논문에서 제시한 방식(인버터)으로 펌프를 제어한 경우의 부하율에 대한 소비 전력율을 나타내고 있다.

표에서와 같이 본 논문이 제시한 방식이 밸브

방식으로 한 경우 비교하면 에너지 절감효과가 나타남을 확인할 수 있다.

표 4. 소비전력 비교

Table 4. Compare of Power consumption



4. 결론

본 논문에서는 냉동·냉장창고용 냉수 펌프 시스템을 태양광 발전 시스템과 연계하여 펌프를 BLDC 모터로 제어하여 다음과 같은 결과를 시뮬레이션 및 실험을 통하여 확인하였다.

- 1) 태양광발전 냉수펌프 시스템에 BLDC 모터 벡터제어 기법을 적용, 전력 소비율이 감소하여 에너지 절감 효과를 실험을 통하여 확인하였다.
- 2) 양정변화와 압력변화에 따른 펌프 각 운전 영역에서 압력 지령치에 대한 양호한 응답을 확인하였다.
- 3) BLDC 모터의 회전수 가변을 통하여 정압제어를 하는 펌프직송 방식의 태양광발전 냉수펌프의 실효성을 확인하였다.

참고 문헌

- (1) Seok-do Kwon .“(New technique) Electric equipment plan ”,2003.3. doyangsa pp49
- (2) 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.
- (3) A. Braunstien and A. Kornfield, “Analysis of Solared Powered Electric Water Pumps”, Solar Energy,Vol.27, No.3, 1981,pp.235-240.
- (4) Michael G. Thomas, “Water Pumping-The Solar Alternative”,Sandia National Laboratories, SAND 87-0804, pp.18-22
- (5) J.Appelbaum, “Performance Characteristics of Permanent Magnet DC Motor Powered by SolarCell”, SolarCells, 17 ,1986, pp.343-362.
- (6) 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.
- (7) F. Lasnier & T. G. Ang, “Photovoltaic Engineering Handbook”, pp297-328, 1990