

단일 인버터 기반 두 대의 영구자석 동기전동기 병렬운전에서 전력각을 이용한 속도제어기법

Parallel Sensorless Speed Control using Power Angle for Dual SPMSMs Fed by a Single Inverter

김 경 훈* · 윤 철* · 권 우 현†
(Kyung-Hoon Kim · Chul Yun · Woo-Hyen Kwon)

Abstract - This paper proposes a sensorless speed control algorithm for parallel-connected dual Surface-mounted Permanent Magnet Synchronous Motors fed by a single inverter. For stable parallel operation of synchronous motors with a single inverter, each motor has to be constantly kept in the synchronization state regardless of load torque. If the master motor with the larger load is controlled, the synchronous state will be maintained. Therefore, detection of the master motor is essential. Conventionally, the master motor is determined by comparing the rotor position error from the relation between the back-EMF for torque angle and the flux position. consequently, the position sensor is deemed essential for finding the rotor position. In this paper, we proposed a method that decides the magnitude of the load from the power angle of two motors due to the load variation and selects the motor to control through the sign function for the sensorless speed control without the position sensor. The results of simulation and experiment conducted verify the efficacy of the proposed method.

Key Words : Dual fan motors, SIMM, Select control, Power angle

1. 서 론

현대 사회의 필수품인 에어컨은 가정용 제품을 넘어 상업용, 대형 건물 및 대형 빌딩에 사용되는 큰 용량의 제품이 생산되고 있다. 가정용에 사용되는 에어컨과는 달리 대형 건물 및 대형 빌딩에 사용되는 에어컨 실외기에는 냉매의 순환을 위한 여러 개의 압축기가 사용되고 공기와 냉매의 열 교환을 위하여 여러 개의 팬 모터가 장착되어 구동되고 있다. 이러한 압축기 내부의 모터와 팬 모터는 1990년도 까지는 유도전동기(이하 IM) 등의 정속형 모터를 주로 사용하여 왔으나 이후 쾌적한 실내온도 제어 및 에너지 저감 등의 목적으로 모터 구동에 인버터를 사용하기 시작했으며 현재까지 그 수요가 급격히 증가하고 있다. 또한 모터의 효율향상을 통한 에너지 절감을 위하여 IM 대비 효율이 좋은 영구자석 동기전동기(이하 SPMSM)로의 전환이 빠르게 진행되고 있다. 이처럼 하나의 에어컨에 여러 대의 SPMSM이 사용되고 이를 구동하기 위해서는 같은 수의 인버터가 필요하며 이는 에어컨의 제조원가를 증가시키는 요인이 된다.

따라서 현재 산업체에서는 제조원가의 절감과 안정된 성능에 부합하기 위해 그림 1과 같이 인버터 하나로 다수의 모터(SIMM

: Single Inverter Multi Motor)를 운전하는 기술의 필요성이 대두되고 있다. SPMSM은 IM과 달리 슬립이 존재하지 않기 때문에 병렬운전에서 두 모터간 속도와 부하의 차이로 두 모터간 역기전력 오차가 발생한다. 이로 인해 제어성능이 떨어지고 심각한 경우 SIMM 시스템이 발산할 수도 있다. SIMM구조에서 안정적인 병렬운전을 위해서 여러 연구가 진행되어 왔다[1]-[10]. 현재까지 연구된 SIMM구조에서의 병렬운전 제어기법은 아래와 같이 크게 3가지로 분류할 수 있다.

1. 5-leg로 구성된 단일 인버터 기반의 병렬운전[3].
2. 평균화 기법을 이용한 병렬운전[4]-[7].
3. Master and Slave 제어를 이용한 병렬운전[8][9].

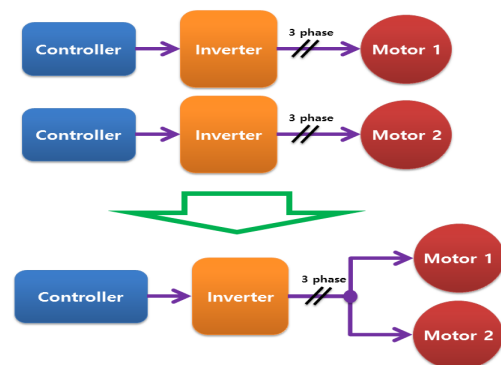


그림 1 SIMM 구조
Fig. 1 Structure of a SIMM

† Corresponding Author : School of Electronics Engineering, Kyung-pook National University, Korea.
E-mail: whkwon@ee.knu.ac.kr

* School of Electronics Engineering, Kyung-pook National University, Korea.

Received : June 13, 2017; Accepted : September 13, 2017

상기 3가지 방식 중 Master and Slave 제어를 이용한 병렬운전의 경우 두 모터 중 부하가 크거나 같은 모터를 Master motor(이하 주 모터), 작은 쪽을 Slave motor(이하 보조 모터)로 선정하여 주 모터만 제어하는 경우에도 안정적인 속도응답을 얻을 수 있다. Master and Slave 제어기법은 병렬운전 중 주 모터 선정을 위해 모터의 부하변화 검출이 필수적이다. 제어되지 않는 보조모터에 부하토크가 갑자기 인가되면 부하토크가 모터의 정격토크보다 작더라도 동기 상태를 벗어날 수 있다.

부하토크를 갑자기 인가해도 동기 상태를 벗어나지 않게 하는 부하토크의 최대치는 시간에 대한 영구자석 동기전동기의 전력각 변동에 따른 비선형 토크평형 방정식으로부터 구할 수 있으나 대부분의 경우는 외란이 발생한 다음 동기 상태의 유지여부가 중요하므로 도식적인 방법인 등면적법을 이용하면 이것을 알 수 있다 [11]. 하지만 병렬운전에서 등면적법을 이용한 부하변동에 따른 동특성 해석을 적용하기에는 여러 문제점으로 인해 한계가 있다.

따라서 본 논문에서는 이러한 단점을 개선하기 위해 먼저 전력각에 따른 SPMSM의 안정도를 해석하고 모의실험을 통해 SIMM 구조에서 병렬운전 중 보조 모터의 정격토크보다 작더라도 동기 상태를 벗어날 수 있는 동특성 안정도 한계를 보인다. 이를 바탕으로 SPMSM의 $d-q$ 축 입력 전력식으로부터 전력과 전력각의 관계를 도입하여 부하변동에 따른 두 전동기의 입력전력각으로 부하의 크기를 판단한 후 부호함수를 통해 제어할 전동기를 선택 제어하는 기법을 제안한다. 따라서 두 전동기의 입출력 전력관계에 따른 전력각을 이용하므로 두 전동기간 상이한 부하변하에도 안정적인 운전이 가능함을 모의실험과 실험을 통해 제안된 전력각을 이용한 선택제어기법의 유용성을 확인한다.

2. 본 론

2.1 전력각에 따른 안정도 해석

SPMSM의 벡터도를 그림 2와 같이 나타내면 자속 관계가 명확하여 힘의 발생원리를 물리적으로 쉽게 알 수 있다[11][12].

여기서 V_t 는 전기자 단자전압, I_a 는 전기자 전류, E_f 는 여자 전압, X_s 는 동기 리액턴스, ϕ_a 는 공극자속, ϕ_m 는 영구자석 자속, ϕ_s 는 전기자 반작용 자속, δ 은 V_t 와 E_f 사이의 전력각이다. 입

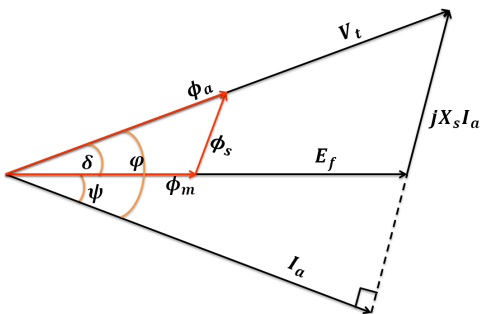


그림 2 SPMSM의 벡터도
Fig. 2 SPMSM vector diagram

력전력은 그림 2의 벡터도로부터 식 (1)과 같이 얻을 수 있다.

$$P = 3 V_t I_a \cos \varphi \tag{1}$$

여기서 φ 는 V_t 와 I_a 사이의 역율각이다. 토크축 전압은 식 (2)로 자속축 전압은 식 (3)과 같은 관계로 표현할 수 있다.

$$V_t \sin \delta = I_a X_s \cos(\varphi - \delta) \tag{2}$$

$$V_t \cos \delta = E_f + I_a X_s \sin(\varphi - \delta) \tag{3}$$

식 (2)와 식 (3)으로부터 전기자 전류의 관계는 식 (4)와 같다. 식 (4)를 식 (1)에 대입하여 출력전력에 대한 기계적 출력토크를 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$I_a \cos \varphi = \frac{E_f \sin \delta}{X_s} \tag{4}$$

$$T_e = \frac{P}{\omega_m} = 3 \frac{V_t E_f}{\omega_m X_s} \sin \delta = T_{e, \max} \sin \delta \tag{5}$$

식 (5)를 전압과 역기전력으로 표현했다. 그림 2와 비교해 볼 때 역기전력의 벡터방향은 영구자석 자속의 방향과 같고 전압의 벡터방향은 공극자속의 벡터방향과 같다.

따라서 전압을 일정하게 하면 최대토크는 역기전력에 의해 결정된다. 또한 식 (5)를 토크각에 따라 표현하면 그림 3과 같다. 그림 3과 같이 전압과 역기전력이 일정한 속도에서 출력토크는 δ 에 의해 결정된다.

이때 최대토크는 $\delta = 90^\circ$ 일 때 발생된다. 만약 운전 중 $\delta > 90^\circ$ 되면 토크는 더 이상 가속력을 갖지 못하여 동기 이탈 후 멈추게 되는 사고가 발생한다.

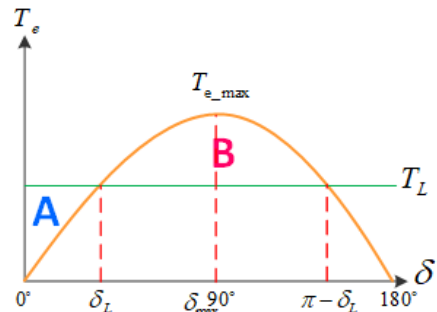


그림 3 전력각에 따른 토크특성
Fig. 3 The $T-\delta$ curve

2.2 병렬운전에서의 부하 변동에 따른 동특성

그림 4와 같이 하나의 인버터로 두 대의 영구자석 동기전동기를 병렬운전하는 시스템에서 M1(주 모터)만 제어하는 경우 제어되지 않는 M2(보조 모터)에 정격보다 낮은 부하토크가 갑자기 인가되어도 동기 상태에서 벗어날 수 있다. 이는 인버터에서 제어하

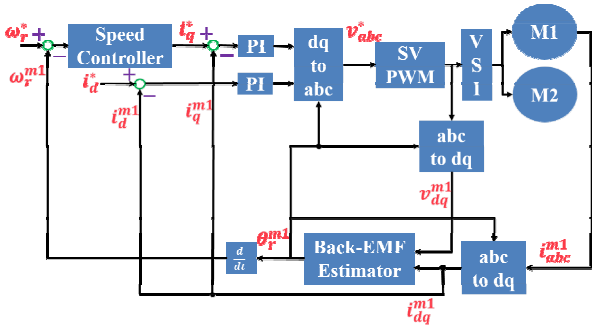


그림 4 전동기 하나만을 제어하는 SIMM 구조
 Fig. 4 The SIMM structure for controlling the one motor only

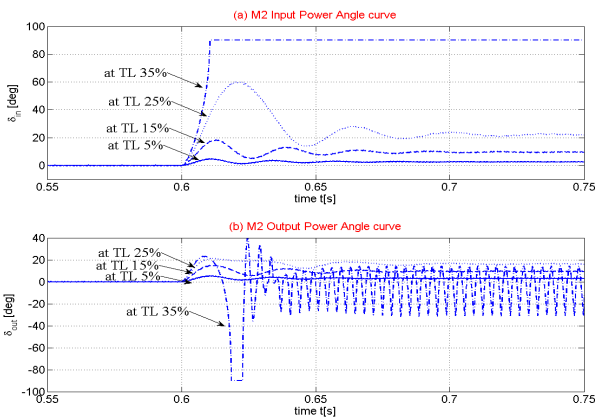


그림 5 부하토크에 따른 전력각 변화추이
 ((a) 입력 전력각, (b) 출력 전력각)
 Fig. 5 The power angle progress according to load torque
 ((a) Input power angle, (b) Output power angle)

는 M1의 물리적 양에 비례하는 에너지만을 출력하기 때문이다. 이에 따라 제어되지 않는 M2의 부하변동에 따른 전력각 응답 특성을 확인하기 위해 두 전동기가 무 부하 상태로 정격속도 (4000rpm)로 운전 중 0.6초에 정격부하의 5% 단위로 나눈 크기의 부하토크를 M2에만 인가하였다.

그림 5의 (a)는 부하 변동에 대한 M2의 입력 전력각 변화 추이이며, 그림 5의 (b)는 부하 변동에 대한 M2의 출력 전력각 변화 추이이다.

그림 5와 같이 보조모터의 부하토크에 따른 전력각 변화 추이에 대한 결과로 볼 때 M2의 부하토크 크기가 정격의 35%일 때 탈조한다. 그러므로 그림 4와 같은 구조에서는 인버터 출력이 M1에 대한 무 부하 에너지에 대해 제어되지 않는 M2는 25%~35% 사이의 정격 부하토크가 동태 안정도(Dynamic stability) 한계가 된다.

또한 그림 6의 (a)에서 나타나듯이 부하 변동에 대한 과도상태 기간에 M2의 역기전력은 M2의 d축 방향으로 발생하며, M2의 d축 전류는 부하토크의 크기에 따라 음의 방향으로 점점 증가하다가 전동기가 탈조 시 M2의 d축 전류는 진동하게 된다. 이때

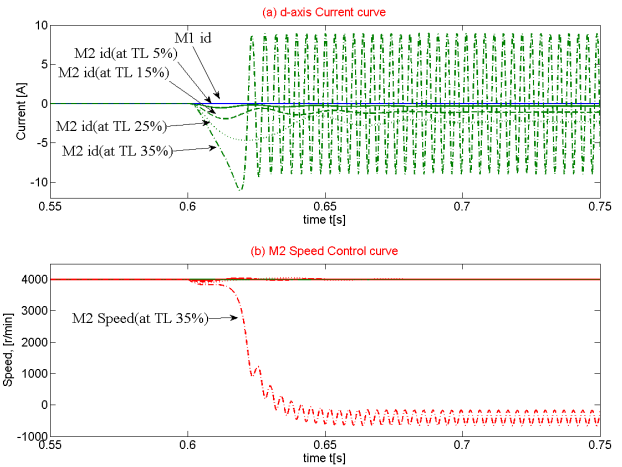


그림 6 부하변동에 따른 d축 전류와 속도
 ((a) d축 전류, (b) 속도)
 Fig. 6 The d-axis current and speed according to fluctuation of load
 ((a) d-axis current, (b) Speed)

그림 6의 (b)와 같이 M2의 속도 또한 진동하게 된다. 결과적으로 식 5는 여자전압 E_f 로 인한 영구자석 토크를 나타내며, 제어하지 않는 전동기 M2에 부하변동 시 여자전압은 감소하고 M2의 d축 전류는 증가하여 요구 토크보다 전동기에서 발생하는 토크가 더 줄어들어 동기 상태를 유지하지 못하고 탈조하게 된다.

2.3 전력각을 이용한 선택제어기법

병렬운전에서 등면적법을 이용한 부하변동에 따른 동특성 해석을 적용하기에는 다음과 같은 문제점으로 인해 한계가 있다.

- (1) 실시간 영구자석 동기 전동기의 전력각을 구하기 위해 과도상태 토크의 크기와 전력각의 크기를 구해야 한다.
- (2) 전력각을 구하기 위해서는 과도상태 d축 리액턴스의 크기를 구해야 하나, 전기자 전류의 증가에 따른 쇄교자속의 자기포화 현상으로 인해 과도상태 기간에 d축 리액턴스의 크기를 구하기가 쉽지 않다.
- (3) A면적과 B면적을 실시간 연산해야 하므로 제어기의 계산양이 증가된다.

따라서 본 논문에서는 영구자석 동기전동기의 d-q축 입력 전력식으로부터 전력과 전력각의 관계를 도입하여 해석하는 방법을 제안한다. 영구자석 동기전동기의 입력전력은 식 (6)과 같다.

$$\begin{aligned}
 P_{in} &= \frac{3}{2} (v_{ds}^r i_{ds}^r + v_{qs}^r i_{qs}^r) \\
 &= \frac{3}{2} \left\{ \left(R_s i_{ds}^r + \frac{d\lambda_{ds}^r}{dt} - \omega_r \lambda_{qs}^r \right) i_{ds}^r \right. \\
 &\quad \left. + \left(R_s i_{qs}^r + \frac{d\lambda_{qs}^r}{dt} + \omega_r \lambda_{ds}^r \right) i_{qs}^r \right\}
 \end{aligned}$$

$$= \frac{3}{2} \left\{ \begin{aligned} &R_s(i_{ds}^{r2} + i_{qs}^{r2}) \\ &+ i_{ds}^r \frac{d\lambda_{ds}^r}{dt} + i_{qs}^r \frac{d\lambda_{qs}^r}{dt} \\ &+ \omega_r \phi_a i_{qs}^r \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

식 (6)에서 마지막 항이 기계적인 출력을 나타내므로 출력 전력을 다시 정리하면 식 (7)과 같다.

$$P_{out} = \frac{3}{2} \omega_r \phi_a i_{qs}^r \quad (7)$$

또 식 (7)을 바탕으로 입/출력 전력각을 나타내면 식 (8)과 같다.

$$P_{in} = P_{in_max} \sin \delta_{in} \quad (8)$$

$$P_{out} = P_{out_max} \sin \delta_{out}$$

여기서 δ_{in} 는 입력 전력각이고, δ_{out} 는 출력 전력각이다. P_{in_max} , P_{out_max} 는 정격으로 주어지는 상수이다. 식 (6)의 저항 성분을 무시하면 정상상태에서는 입력 전력과 출력 전력이 같다. 따라서 급격한 부하 변동 시에도 현재의 입/출력 전력을 구하면 식 (9)와 같이 실시간으로 입력 전력각을 구할 수 있다.

$$\delta_{in} = \sin^{-1} \left(\frac{P_{in}}{P_{in_max}} \right) \quad (9)$$

본 논문은 식 (9)와 같이 전압과 전류정보를 이용하여 제어하지 않는 전동기에 대한 입력 전력각을 실시간 연산하고, 그 크기가 미리 설정된 제한치보다 크면, 제어 중인 전동기 보다 부하가 크다고 판단하고 제어권을 부하 큰 전동기로 전환한다. 그림 7은 이를 구현한 제어블록도 이다.

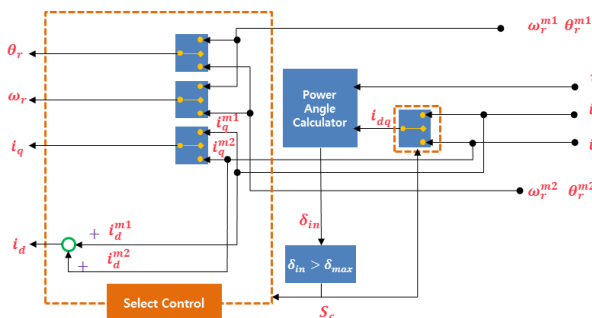


그림 7 Select control 블록도

Fig. 7 The block diagram of select control

부하 변동 시 설정된 제한치 전력각에 따른 Select control 신호에 대한 두 전동기의 과도응답을 확인하기 위해 그림 4와 같은 제어구조에서 두 전동기 모두 무 부하 상태에서 정격속도 (4000rpm)로 운전 중 0.6초에 정격부하를 M2에만 인가하였다.

이때 그림 7의 전력각 연산 블록도에 따라 선택제어기법의 기준인 제한치 전력각 δ_{lim} 값을 표 1과 같이 적용하여 M2로 제어를 전환하는 경우, 두 전동기에 대한 과도상태 특성을 확인할 수 있었다. 그림 8과 같이 부하변동 시 설정된 제한치 전력각 변화에 따른 Select control 신호에 대한 두 전동기의 전력각 과도응답에서 제한치가 낮을수록 전력각도 작아짐을 알 수 있다.

표 1 제한치 전력각 변화에 대한 두 모터의 과도응답

Table 1 The power angle transient response of dual motor for limit power angle value

δ_{lim}	M2		M1	
	δ_{in}	δ_{out}	δ_{in}	δ_{out}
5°	90°	90°	53.14°	40.84°
15°	90°	90°	53.71°	41.48°
25°	90°	90°	54.85°	43.02°

따라서 무 부하에서는 전동기 하나만을 제어하며 두 전동기간 상이한 부하에 따른 제어되지 않는 전동기의 전력각이 5°이상이면 제어권을 전환한다.

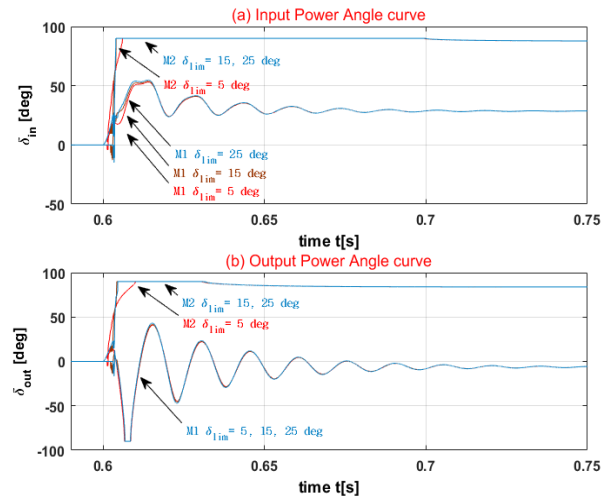


그림 8 제한치 전력각 변화에 대한 두 모터의 전력각 과도응답 ((a) 입력 전력각, (b) 출력 전력각)

Fig. 8 The power angle transient response of dual motor for limit power angle value ((a) Input power angle, (b) Output power angle)

3. 실험

3.1 모의실험구성

제한한 단일 인버터 기반의 병렬로 연결된 영구자석 동기전동기의 센서리스 속도제어 시스템의 타당성을 확인하기 위해 모의

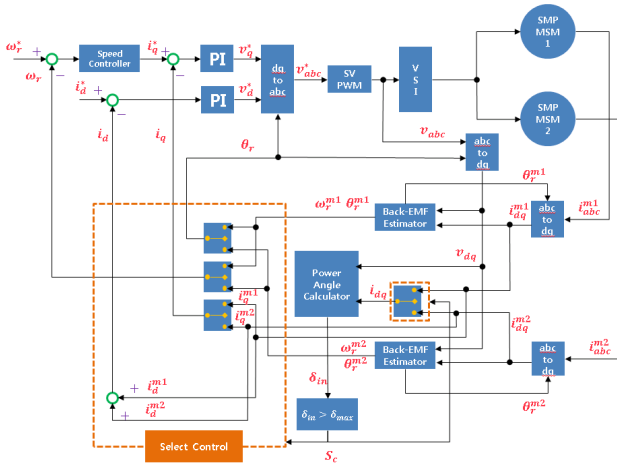


그림 9 제안하는 SIMM 제어 블록도
 Fig. 9 The block diagram of proposed SIMM control

표 2 팬 모터 제정수

Table 2 Nominal parameters for fan motor

Parameter	Values
rated power	26 [W]
rated velocity	4000 [rpm]
phase resistance	2.0 [Ω]
phase inductance	0.51 [mH]
number of pole	8

실험을 수행하였다.

그림 9는 모의실험에서 구성할 제안된 시스템의 제어블록을 나타낸다. 그림 9와 같이 PI제어기를 사용하여 속도 및 전류제어기를 구현하였고, 10kHz 스위칭 주파수를 가지는 육상전압변조기법으로 인버터에서의 전력변환을 하였으며, 역기전력 추정기[13]와 전력각 연산기 그리고 Select control을 구현하였다. 또한 모의실험에서 사용된 26W급 영구자석 동기전동기의 제정수는 표 2와 같고 속도제어기의 대역폭은 209.4[rad/sec] 역기전력 추정기의 대역폭은 2094[rad/sec]이다.

3.2 모의실험결과

상이한 부하변화에 대한 두 전동기의 속도응답특성을 확인하기 위해 두 전동기 모두 무 부하 상태로 4000rpm으로 운전 중 0.6초에 M2에만 정격부하토크를 인가하였다.

그림 10은 상이한 부하 변동에 대한 두 전동기의 속도응답을 나타낸다. 그림 10의 (a)의 A영역(0.6초 부근)을 확대하여 그림 10의 (b)에 나타내었다. 그림 10의 (b)로부터 상이한 부하 변동 시 과도상태에서 무 부하 상태인 M1의 속도가 M2의 속도 부근에서 진동하다가 0.7초 이후 두 전동기 모두 동기상태를 유지하면서 지령속도로 안정적인 제어가 된다.

그림 11은 상이한 부하변동에 대한 전력각을 나타낸다.

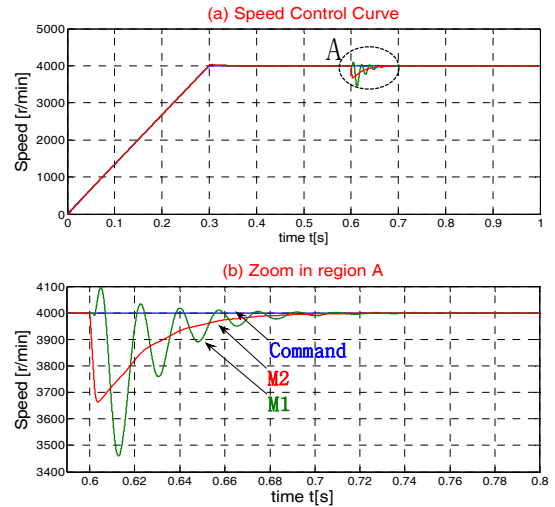


그림 10 부하변동에 대한 속도응답
 (a) 속도응답, (b) A영역 확대
 Fig. 10 Response of the speed for unbalance load.
 (a) Speed response, (b) Zoom in A region

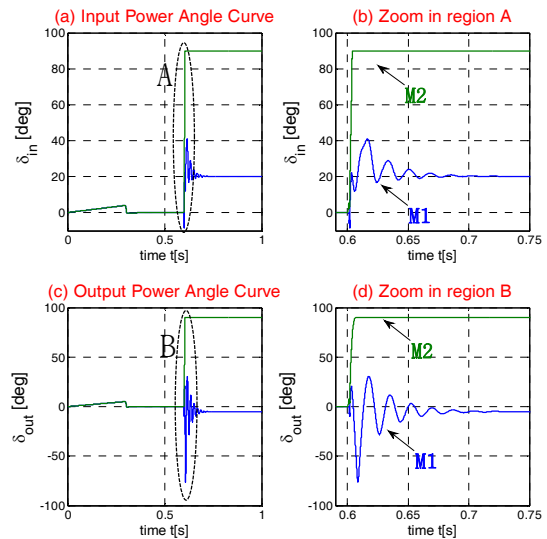


그림 11 부하변동에 대한 전력각 응답 ((a) 입력 전력각, (b) A영역 확대, (c) 출력 전력각, (d) B영역 확대)
 Fig. 11 Response of the power angle for unbalance load.
 ((a) Input power angle, (b) Zoom in A region, (c) Output power angle, (d) Zoom in B region)

그림 11의 (a)의 A영역(0.6초 부근)을 확대하여 그림 11의 (b)에 나타내었으며, 그림 11의(c)의 B영역(0.6초 부근)을 확대하여 그림 11의 (d)에 나타내었다. 그림 11의 (b)와 (d)로부터 입/출력 전력각 모두 M2의 전력각은 90°를 M1의 전력각은 -5°를 나타낸다. 따라서 전력각 연산값에 따라 Select control을 수행 시 두 전동기가 상이한 부하변동에도 안정적인 속도제어가 이루어짐을

모의실험을 통해서 확인할 수 있었다.

3.3 실험구성

제안한 방법의 타당성을 확인하기 위해서 그림 12와 같이 제안된 시스템을 구성 하였다. 실험 시스템에서는 표 2에서 제시된 26W 영구자석 동기전동기, 인버터 보드, 제어보드, 데이터 분석을 위한 DAC 보드로 구성되어 있다.

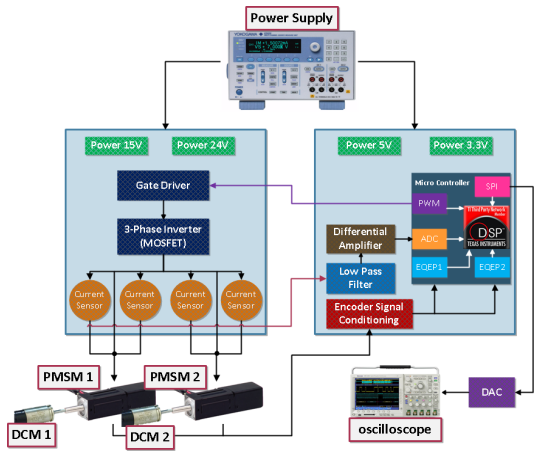


그림 12 SIMM 실험 시스템 블록도
Fig. 12 The block diagram of SIMM system

3.4 실험결과

두 전동기 간 상이한 부하에 대한 속도 응답특성을 확인하기 위해 두 전동기 모두 무 부하 상태로 정격속도 4000rpm 지령을 인가하였다. 일정시간이 지난 후 속도가 정상상태에 도달했을 때 M2(주 모터)에만 정격부하토크의 50%를 인가하였고, 2초 후 해제하였다. 다시 2초 후 M1(보조 모터)에만 정격부하토크의 50%를 인가하였다.

그림 13은 두 전동기간 상이한 부하변동에 대한 속도응답특성을 나타낸다. 그림 13의 A영역을 확대하여 그림 14의 (a)에 나타내었고, 그림 13의 B영역을 확대하여 그림 14의 (b)에 나타내었다.

그림 14로부터 Select signal이 정격속도에 도달한 초기에는 2를 출력하며 이는 M2가 주 모터로 동작하는 것을 나타내고 있다. 따라서 제어 중인 전동기에만 정격 부하토크의 50%를 인가 하더라도 과도상태에 대한 속도의 변화가 급격하게 발생하지 않는다.

또한 그림 13의 B영역에서 보조모터인 M1에만 정격부하토크 50% 크기를 인가 시 Select signal이 2에서 1이 되어 M1으로 주 모터가 변경된 것을 나타내고 있다.

이때 부하변화에 대한 과도상태 속도응답은 그림 14의 (b)와 같이 주 모터에서 보조 모터로 변경된 M2의 속도는 주 모터인 M1의 속도 부근에서 60ms 동안 진동 후 정상상태로 도달하게 된다.

두 전동기 모두 부하변동에 대한 모의실험 결과와 같이 안정적인 속도로 제어됨을 알 수 있다.

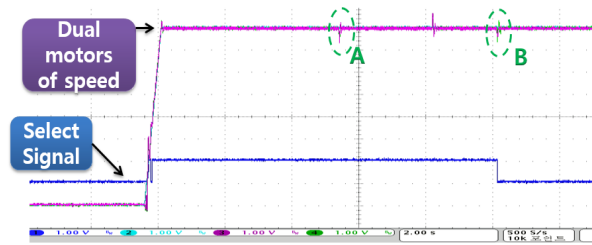
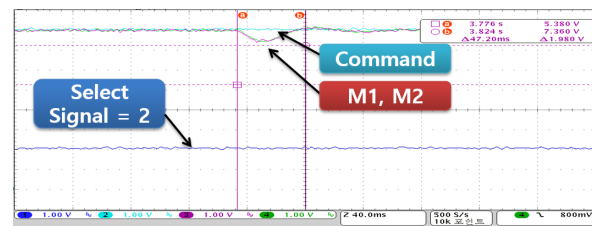
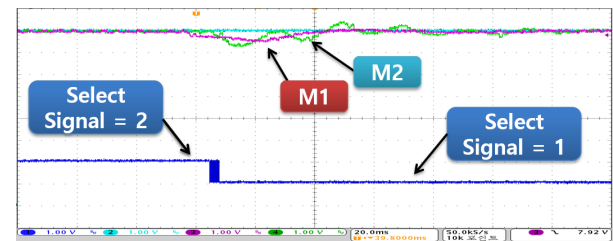


그림 13 부하변동에 대한 속도응답
Fig. 13 Response of the speed for unbalance load



(a)



(b)

그림 14 부하변동에 대한 속도응답 확대
(a) A영역 확대, (b) B영역 확대)

Fig. 14 Response of the speed for unbalance load
(a) Speed response, (b) Zoom in A region)

이상의 살펴본 실험 결과로부터 본 논문에서 제안한 전력각을 이용한 Select control 방법으로 단일 인버터 기반 병렬로 연결된 두 개의 SMPMSM의 센서리스 속도제어에서 상이한 부하변동에도 강인한 속도응답특성을 가지는 것을 확인하였다.

4. 결 론

본 논문에서는 단일 인버터 기반에 병렬로 연결된 두 개의 영구자석 동기전동기의 전력각을 이용한 안정적인 센서리스 속도제어의 성능을 향상시킬 수 있는 새로운 Select Control 알고리즘을 제안하였다. 기존 연구들의 여러 장단점 중 하드웨어 구성의 용의성과 제어시스템의 단순함을 비교해 볼 때, master and slave 제어 기법이 산업 현장 적용에 있어서 가장 적합하다고 판단된다. 하지만 master and slave 제어 기법은 두 전동기 간 부하 변화의 판단에 있어서 상기 내용과 같이 히스테리시스 제어 문제점과 속도 센서사용의 문제점을 가지므로, 본 논문에서는 이

러한 단점을 개선하기 위해 부하 변동에 따른 두 전동기의 전력각에 따라 부하의 변화를 판단한 후 부호 함수를 통해 제어할 전동기를 선택 제어하는 기법을 제안하였다. 병렬로 연결된 두 전동기의 입출력 전력관계로부터 전력각을 이용하여 두 전동기간 상이한 부하변화에도 안정적인 운전이 가능하도록 하였다.

모의실험과 실제실험을 통해 제안된 전력각을 이용한 선택제어 기법의 유용성을 확인 하였다. 제안된 방법이 단일 인버터 기반에 병렬로 연결된 영구자석 동기전동기의 병렬운전 시스템의 성능을 크게 향상시킬 수 있는 것을 알 수 있었다.

References

[1] Y.J. Lee and J.I. Ha, "Analysis and Control of Mono Inverter Dual Parallel SPMSM Drive System," Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2014 IEEE., pp. 4843-4849, Sep. 2014.

[2] Y.J. Lee and J.I. Ha, "Sensorless Drive for Mono Inverter Dual Parallel Surface Mounted Permanent Magnet Synchronous Motor Drive System," The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics, vol. 20, no.1, pp.38-44, Feb. 2015.

[3] M. Jones, S. N. Vukosavic, D. Dujic, E. Levi and P. Wright, "Five-leg inverter PWM technique for reduced switch count two-motor constant power applications" IET Electr. Power Appl., Vol. 2, No. 5, pp. 257-287, Sep. 2008.

[4] A.I. Iqbal, and M. Kamarol, "A speed-sensorless field oriented control of parallel-connected dual PMSM," ICCSCE 2011. IEEE International Conference on Control System, pp. 567-570, Nov. 2011.

[5] A.A.A. Samat, D. Ishak, P. Saedin, and S. Iqbal, "Speed-sensorless control of parallel-connected PMSM fed by a single inverter using MRAS," 2012 IEEE International Power Engineering and Optimization Conference, pp. 35-39, June. 2012.

[6] J. Matlagi, Z. Ibrahim, and M. Sulaiman, "Mean and differential torque control using hysteresis current controller for dual PMSM drives," Journal of Theoretical and Applied information Technology., Vol. 33, No. 1, pp. 76-82, Nov. 2011.

[7] J.M. Lazi, Z. Ibrahim, M.H.N. Talib, and R. Mustafa "Dual motor drives for PMSM using average phase current technique," IEEE International Conference on Power and Energy(PECon2010)'2010, pp. 786-790, Nov. 2010.

[8] D. Bidart, M. Pietrzak-David, P. Maussion, and M. Fadel, "Mono inverter dual parallel PMSM-Structure and Control strategy," 34th Annual Conference of IEEE.IECON2008, pp. 268-273, Nov. 2008.

[9] D. Bidart, M. Pietrzak-David, P. Maussion, and M. Fadel,

"Mono inverter multi-parallel permanent magnet synchronous motor: structure and control strategy," IET, Electric Power Applications., Vol. 5, No. 3, pp. 288-294, Mar. 2011.

[10] C.B. Kim, C. Yun, B.K. Yoon, N.S. Cho, and W.H. Kwon, "Parallel sensorless speed control using flux-axis current for dual SPMSMs fed by a single inverter," Journal of Electrical Engineering & Technology., Vol. 10, No. 3, pp. 1048-1057, May. 2015.

[11] Paresh C. Sen, "principles of electric machines and power electronics, 2nd ed," John Wiley & Sons, pp.479-492, 1998.

[12] C. Yun, and W.H. Kwon, "The Resonance Characteristic Analysis for Speed Control of Parallel Connected Dual SPMSMs fed by a single Inverter," The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers., Vol. 66, No. 4, pp. 643-650, Apr. 2017.

[13] N. Matsui, T. Takeshita and K. Yasuda, "A new sensorless drive of brushless DC motor," in Proc. IECON'92., pp. 430-435, 1992.

저 자 소 개



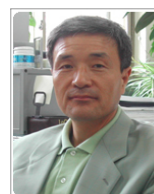
김 경 훈 (Kyung-Hoon Kim)

2000년 : 경북대학교 전자공학부(공학석사)
 2012년~현재 : 경북대학교 전자공학부(박사 수료)
 관심분야 : 모터제어, 제어알고리즘



윤 철 (Chul Yun)

2014년 : 경북대학교 전자공학부(공학석사)
 2014년~현재 : 경북대학교 전자공학부(박사 수료)
 관심분야 : 모터제어, 전력전자



권 우 현 (Woo-Hyen Kwon)

1993년 : 한국과학기술원 전자공학부 (공학박사)
 1979년~현재 : 경북대학교 전자공학부 교수
 관심분야 : 전력변환기 및 드라이버, 컴퓨터 응용제어