

슬라이딩 모드 속도제어기 기반 단일-인버터 듀얼-PMSM 구동시스템의 병렬운전

염태일, 이동춘
영남대학교 전기공학과

Parallel Operation of Single-Inverter Dual-PMSM Drives Based on Sliding Mode Speed Controller

Tae-Il Yeam, Dong-Choon Lee
Dept. of Electrical Eng., Yeungnam University

ABSTRACT

본 논문에서는 한 대의 인버터로 두 대의 PMSM의 병렬 운전 제어를 위한 속도 제어를 제안한다. 제안한 제어기는 파라미터 변동에 강인한 슬라이딩 모드 제어 이론에 근거한다. 제안하는 기법은 실험을 통해 그 타당성이 검증되었다.

1. 서론

철도 추진, 컨베이어 벨트, 팬 분야에서 비용 절감을 위해 단일 인버터 듀얼 모터 (SIDM) 구동시스템이 이용된다. 유도전동기는 슬립으로 인해 안정된 동작이 보장되기 때문에 SIDM 시스템에 많이 적용되어 왔다. 그러나 높은 효율, 높은 전력 밀도 등의 장점이 있는 PMSM이 산업현장에 널리 이용됨에 따라 SIDM 구동시스템에 PMSM을 적용하는 연구가 진행되어 왔다.

하나의 인버터로 두 대의 PMSM을 병렬로 운전하기 위해 다양한 연구들이 수행되었다^{[1][2]}. 두 모터의 관성 모멘트가 다를 경우 정상상태에서 속도가 진동하는 문제가 존재한다.

본 연구에서는 이를 해결하기 위해 파라미터 변동에 강인한 슬라이딩 모드 제어이론에 기반한 속도 제어를 제안한다. 먼저, 두 모터가 병렬로 운전될 때 시스템을 모델링한다. 이 모델을 바탕으로 슬라이딩 모드 속도제어기를 설계한다. 실험을 통해 제안하는 제어기의 타당성을 검증한다.

2. 단일 인버터 듀얼 모터 시스템의 모델링

2.1 두 모터 사이의 전압과 전류 관계

본 연구에서는 [1]에 제안된 고정형 마스터/슬레이브 제어 전략에 기초한다. 두 모터의 파라미터가 동일하다고 가정하면 정상상태에서의 PMSM의 수학적 모델은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} V_{d1,2} \\ V_{q1,2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -w_{r1,2}L_s \\ w_{r1,2}L_s & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{d1,2} \\ i_{q1,2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ w_{r1,2}\phi_f \end{bmatrix}, \quad (1)$$

여기서, 1, 2는 각각 마스터, 슬레이브 모터를 나타낸다. V_d, V_q, i_d, i_q 는 각각 dq-축 전압, dq-축 전류이다. w_r 은 모터 속도, R_s 는 고정자 저항, L_s 고정자 인덕턴스, ϕ_f 는 회전자 자속이다.

만약 두 모터의 회전자 위치가 다를 때, 두 모터의 dq-축 전압 관계는 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} V_{d2} \\ V_{q2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\Delta\theta & \sin\Delta\theta \\ -\sin\Delta\theta & \cos\Delta\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{d1} \\ V_{q1} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

여기서 $\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1$ 는 두 모터의 회전자의 위치 차이이고, θ_1, θ_2 는 각각 마스터 모터의 회전자 위치, 슬레이브 모터의 회전자 위치이다. (1)과 (2)를 이용하여 두 모터의 dq-축 전류 관계를 유도하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} i_{d2} \\ i_{q2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{q1} & i_{d1} + \frac{\phi_f}{L_s} \\ -i_{d1} - \frac{\phi_f}{L_s} & i_{q1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin\Delta\theta \\ \cos\Delta\theta \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{\phi_f}{L_s} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

여기서, 모터 속도는 고정자 저항을 무시할 만큼 충분히 높다고 가정한다^[1].

2.2 상태 방정식

두 모터의 기계 방정식 및 토크 식으로부터 단일 인버터 듀얼 모터 시스템의 상태 방정식을 유도할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{w}_{r1} \\ \Delta\dot{w}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{B}{J} & 0 \\ 0 & -\frac{B}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_{r1} \\ \Delta w_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{3P^2\phi_f}{8J} & 0 \\ -\frac{3P^2\phi_f}{8J} & \frac{3P^2\phi_f}{8J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{q1} \\ i_{q2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서, J 는 관성 모멘트, B 는 마찰 계수, P 는 극수, $\Delta w_r = w_{r2} - w_{r1}$ 은 두 모터의 속도 차이이다.

3. 슬라이딩 모드 제어를 이용한 속도제어기

슬라이딩 모드 제어기를 설계하기 위해서는 먼저 슬라이딩 평면을 설정해야 한다. 본 연구에서는 (5)와 같은 슬라이딩 평면을 사용한다.

$$\begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_1 + k_1 \int e_1 dt \\ e_2 + k_2 \int e_2 dt \end{bmatrix}, \quad (5)$$

여기서, $e_1 = w_{r1} - w_{r1}^*$ 은 마스터 모터의 속도 오차이며, $e_2 = \Delta w_r - \Delta w_r^*$ 두 모터의 속도 차의 편차이다.

한편, 시스템이 슬라이딩 평면으로 도달하기 위해서는 도달 법칙이 필요하다. 본 논문에서는 체터링을 최소화하기 위해 (6)과 같은 도달 법칙을 사용한다^[3].

$$\begin{bmatrix} \dot{s}_1 \\ \dot{s}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -eq(w_{r1}, s_1) \cdot \text{sgn}(s_1) \\ -eq(\Delta w_r, s_2) \cdot \text{sgn}(s_2) \end{bmatrix}, \quad (6)$$

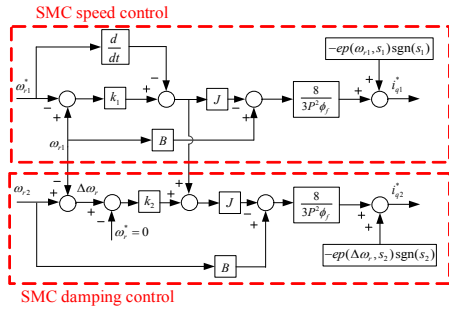


그림 1. 제안하는 슬라이딩 모드 제어기

표 1 모터 파라미터

정격 전력	450 [W]	고정자 저항	0.993 [Ω]
정격 토크	2.15 [N·m]	고정자 인덕턴스	6.71 [mH]
정격 속도	2000 [rpm]	관성 모멘트	1.092 [kg·m ² ×10 ⁻⁴]
극 수	8	역기전력 상수	61.13 [Vpk/krpm]

$$eq(x, s) = \frac{k}{[\epsilon + (1 + 1/|x| - \epsilon)e^{-\delta|x|}]} \quad (7)$$

sgn 함수 또한 채터링을 최소화하기 위해서 하이퍼볼릭 탄젠트로 변형하여 사용한다.

(5) - (7)을 이용하여 제어 입력을 유도하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} i_{q1}^* \\ i_{q2}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{8B}{3P^2\phi_f} & 0 \\ \frac{8B}{3P^2\phi_f} & \frac{8B}{3P^2\phi_f} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_{r1} \\ \Delta w_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{8J}{3P^2\phi_f}(k_1 e_1 - w_{r1}^*) \\ -\frac{8J}{3P^2\phi_f}(k_1 e_1 + k_2 e_2 - w_{r1}^*) \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$- \begin{bmatrix} eq(w_{r1}, s_1) \cdot \tanh(s_1) \\ eq(\Delta w_r, s_2) \cdot \tanh(s_2) \end{bmatrix}$$

제안한 슬라이딩 모드 제어기의 출력은 마스터 모터의 q-축 전류 지령, 슬레이브 모터의 q-축 전류 지령이다. 그러나 슬레이브 모터의 q-축 전류는 직접 제어가 불가능하기 때문에 (3)을 이용하여 마스터 모터의 d-축으로 변환하여 간접적으로 제어한다. 그림 1은 제안된 슬라이딩 모드 제어기의 블록도이다.

4. 실험 결과

제안한 제어기를 검증하기 위해 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 모터의 파라미터는 표 1과 같다. 그림 2는 마스터 모터에 1[N·m]의 부하가 걸린 상태에서 슬레이브 모터에 1.5[N·m]의 부하를 인가했다가 제거한 경우의 속도 응답이다. 반대로 그림 3은 슬레이브 모터에 1.5[N·m]의 부하가 걸린 상태에서 마스터 모터에 1[N·m]의 부하를 인가했다가 제거한 경우의 속도 응답이다. 그림 (a)는 두 모터의 속도, 그림 (b)는 두 모터의 속도 편차이다. 두 경우 모두 잘 동작된다. 그림 4는 마스터 모터의 관성 모멘트가 30% 증가했을 때의 속도 응답이다. 그림 4(a)는 기존의 고정형 마스터/슬레이브 제어기의 속도 응답이다^[2]. 그림 4(b)는 제안한 슬라이딩 모드 제어기의 속도 응답이다. 기존 기법에서는 정상상태에서 속도가 진동하는 모습을 보이지만 제안한 기법에서는 진동 성분 없이 잘 동작된다.

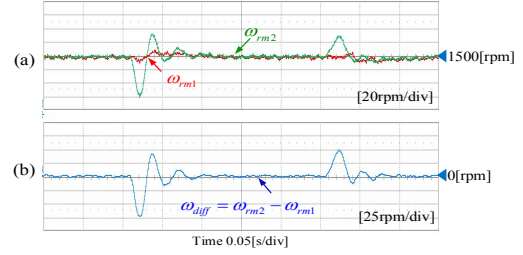


그림 2. 슬레이브 모터 부하 인가 시 속도 응답

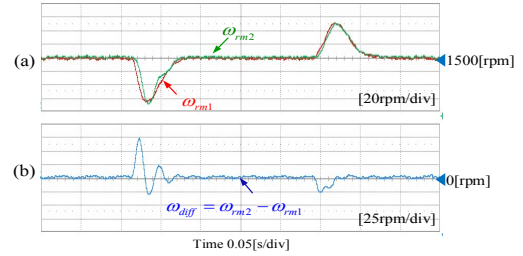


그림 3. 마스터 모터 부하 인가 시 속도 응답

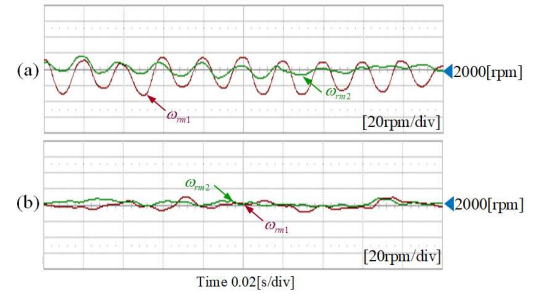


그림 4. 파라미터 변동에 따른 속도 응답 ($J_1 > J_2$ (30%))

5. 결론

본 논문에서는 단일 인버터를 이용한 두 대의 PMSM 병렬 운전을 위해 슬라이딩 모드에 기반한 속도제어기를 제안하였다. 두 모터의 관성 모멘트가 다를 경우에도 제안한 제어기를 적용하면 속도응답의 진동 없이 잘 동작하는 것을 실험을 통해 확인하였다.

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20194030202310)

참고 문헌

- [1] Y. Lee and J.-I. Ha, "Control method for mono inverter dual parallel surface mounted permanent magnet synchronous machine drive system", IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 62, No. 10, pp. 6096-6107, Oct. 2015.
- [2] T.-I. Yeom and D.-C. Lee, "Speed control of single inverter dual PMSM drives using sliding mode control", in proc. IEEE VPPC, 2019.
- [3] X. Zhang, L. Sun, K. Zhao, and L. Sun, "Nonlinear speed control for PMSM system using sliding-mode control and disturbance compensation techniques", IEEE Trans. Power Electron., Vol. 28, No. 3, pp. 1358-1365, Mar. 2013.