

유도전동기 병렬 구동을 위한 벡터제어 제어성능분석

변운섭*, 배창한, 이병송, 김영철**
철도연

The vector control performance analysis
for driving the parallel connected induction motors

Yeun-Sub Byun, Chang-han Bae, Byung-Song Lee, Young-Chol Kim**
Korea Railroad Research Institute, Chungbuk Univ**

Abstract - In this paper, we show the vector control performances for the parallel-connected motor drive system using the indirect vector control and the proposed vector control. The suggested estimation scheme of the rotor flux position is presented to reduce the sensitivity due to the load difference between the motors. To confirm the validity of the proposed control method, we compare the simulation results of the proposed control method with those of the conventional indirect vector control method. The simulation results show that the proposed control method is more effective for a change in the load torque.

1. 서 론

다양한 산업영역에서 직류전동기가 폭넓게 사용되어 왔지만 유지보수면 등 구조적인 면에서 강인한 유도전동기로 대체 되고 있다. 전기철도차량의 경우에도 기존의 직류 전동기에서 신규 철도전기차량은 유도전동기를 구동 원으로 하는 차량으로 대체되어 가고 있다. 유도전동기의 제어에 있어서 순시토크제어가 가능한 벡터제어법이 폭넓게 활용되고 있다. 철도차량 및 산업영역에서 비용 공간상의 이유로 한 대의 인버터로 여러 대의 모터를 병렬로 구동하는 방법을 사용하고 있다. 벡터 제어 방식에 의해 제어할 경우 회전자 자속각 추정이나 측정이 필수적이다. 벡터제어방식 중 간접벡터제어방식이 여러 가지 이유로 많이 사용되고 있다. 간접벡터제어의 경우 회전자 자속각 추정시 슬립속도와 전동기의 속도를 필요로 하게되는데 일괄구동 방식에 의해 병렬 구동되는 경우 모터간 부하불균형, 미끄럼 현상 등에 의해 모터간의 속도차이 발생할 수 있다. 이 경우 기존 전동기의 속도를 계산하는 방식에 의해서 회전자 자속각 계산이 정확히 수행되지 않아 벡터제어가 적절히 수행되지 않고 이에 따라 전체 시스템이 불안정해질 수 있는 것이다. 이런 특성을 시뮬레이션을 통해 보이고 이를 개선하기 위한 벡터제어방식을 제안한다.

2. 본 론

2.1 유도전동기의 모델링

회전좌표축 $d_c - q_c$ 등가회로에서 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$v_{qrc} = R_r i_{qrc} + \frac{d\psi_{qrc}}{dt} + \omega_c \psi_{drc} \quad (1)$$

$$v_{drc} = R_r i_{drc} + \frac{d\psi_{drc}}{dt} - \omega_c \psi_{qrc} \quad (2)$$

$$v_{qsc} = R_s i_{qsc} + \frac{d\psi_{qsc}}{dt} + (\omega_c - \omega_r) \psi_{dsc} \quad (3)$$

$$v_{drc} = R_r i_{drc} + \frac{d\psi_{drc}}{dt} - (\omega_c - \omega_r) \psi_{qrc} \quad (4)$$

$$\psi_{qrc} = L_r i_{qrc} + L_m i_{qsc} \quad (5)$$

$$\psi_{drc} = L_r i_{drc} + L_m i_{dsc} \quad (6)$$

$$\psi_{qsc} = L_s i_{qsc} + L_m i_{qrc} \quad (7)$$

$$\psi_{dsc} = L_s i_{dsc} + L_m i_{drc} \quad (8)$$

$$T_{em} = \frac{3}{2} P L_m (i_{ds} i_{qr} - i_{dq} i_{ds}) \quad (9)$$

여기서, ω_c 는 동기 각속도, ω_r 은 회전자 각속도, T_{em} 는 토크

2.2 간접벡터제어에 의한 병렬구동

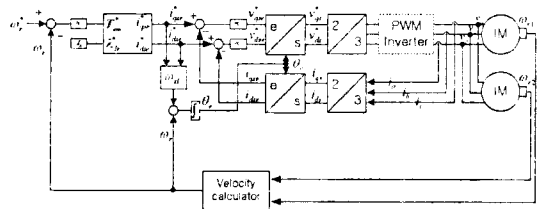


그림 1 간접벡터제어에 의한 병렬모터구동

2.2.1 간접벡터제어의 회전자 자속각 θ_c 추정

회전좌표축 $d_c - q_c$ 등가회로부터 슬립속도를 고정자 전류 관계식으로 정리하면

$$\omega_{sl} = \left(\frac{R_r}{L_r} \right) \frac{i_{qsc}}{i_{dsc}} \quad (10)$$

슬립속도에 모터 회전속도 더하여 동기 각속도를 구하고

$$\omega_c = \omega_{sl} + \omega_r \quad (11)$$

최종적으로 회전자 자속각을 식(12)와 같이 구한다.

$$\theta_c = \int \omega_c dt \quad (12)$$

2.3 제안된 벡터제어에 의한 유도전동기 병렬구동

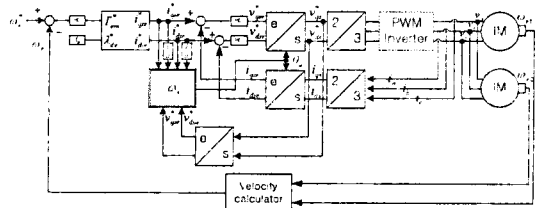


그림 2 제안된 벡터제어에 의한 유도전동기 병렬구동

2.3.1 제안된 회전자 자속각 θ_c 추정

회전좌표축 $d_e - q_e$ 등가회로에서 고정자측 전압관계식은

$$v_{qse} = R_s i_{qse} + \frac{d\psi_{qse}}{dt} + \omega_e \psi_{dse} \quad (13)$$

$$v_{dse} = R_s i_{dse} + \frac{d\psi_{dse}}{dt} - \omega_e \psi_{qse} \quad (14)$$

식(13), 식(14)에 i_{dse} 와 i_{qse} 를 각기 곱하면

$$v_{qse} i_{dse} = R_s i_{qse} i_{dse} + \frac{d\psi_{qse}}{dt} i_{dse} + \omega_e \psi_{dse} i_{dse} \quad (15)$$

$$v_{dse} i_{qse} = R_s i_{dse} i_{qse} + \frac{d\psi_{dse}}{dt} i_{qse} - \omega_e \psi_{qse} i_{qse} \quad (16)$$

고정자측 저항 R_s 이 포함된 항을 제거하기 위해 식(15)식에서 식(16)식을 빼고 동기각속도 ω_e 에 대해 정리하면 식(17)식이 된다.

$$\omega_e = \frac{v_{qse} i_{dse} - v_{dse} i_{qse} - \frac{d\psi_{qse}}{dt} i_{dse} + \frac{d\psi_{dse}}{dt} i_{qse}}{\psi_{dse} i_{dse} + \psi_{qse} i_{qse}} \quad (17)$$

식(17)에서 고정자측 자속을 고정자 전류에 관한 식으로 변환을 위해 정상상태에서 비간섭제어 조건식(18)을 고려하면 고정자측 자속은 다음과 같이 정리된다.

$$\psi_{qse} = \frac{d\psi_{qse}}{dt} = 0, \psi_{dse} = \hat{\psi}_r = I_m i_{dse}, \frac{d\psi_{dse}}{dt} = 0 \quad (18)$$

$$\psi_{qse} = L_s i_{qse} + L_m i_{qre} = \left(L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right) i_{qse} \quad (19)$$

$$\psi_{dse} = L_s i_{dse} + L_m i_{dre} = L_s i_{dse} \quad (20)$$

따라서 식(17)에 식(19), (20)을 대입함으로써 동기각 속도는 식(21)과 같이 표현된다.

$$\omega_e = \frac{v_{qse} i_{dse} - v_{dse} i_{qse} - \left(L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right) \frac{di_{qse}}{dt} i_{dse} + L_s \frac{di_{dse}}{dt} i_{qse}}{\left(L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right) i_{qse}^2 + L_s i_{dse}^2} \quad (21)$$

결국 회전자 자속각 θ_e 는 $\theta_e = \int \omega_e dt$ 로 구할 수 있다. 식(21)에서 볼 수 있듯이 식 자체에 고정자 저항이나 회전자 저항을 볼 수 없다. 따라서 이들 저항 변화의 영향력을 배제시킬 수 있다. 또한 회전자 각속도를 구하는데 간접벡터제어에서 처럼 속도를 필요로 하지 않음으로 구동 모터들 간의 부하나 미끄럼 발생에 의한 속도 차이 등의 발생으로 유발되는 회전자 자속각 계산에 있어서의 부정확성을 개선할 수 있다.

2.4 회전자 자속각 정규화

시뮬레이션 상에서 전동기의 실제 회전자 자속각과 제어방식에 따른 회전자 자속각 추정 성능을 비교 확인하기 위해 전동기 측과 제어기 측의 회전자 자속각 값을 정규화 할 필요가 있다.

2.4.1 전동기 모델로 부터의 회전자 자속각 θ_e

고정좌표축 $d_s - q_s$ 등가회로 구성된 전동기 모델의 회전자 자속식으로 부터,

$$\psi_{qrs} = L_r i_{qrs} + L_m i_{qss} \quad (22)$$

$$\psi_{drs} = L_r i_{drs} + L_m i_{dss} \quad (23)$$

회전자 자속으로부터 식(24)와 같이 회전자 자속각을 구한다.

$$\langle \theta_e \rangle = \tan^{-1}(\psi_{qrs} / \psi_{drs}) \quad (24)$$

2.4.2 제어기에서의 회전자 자속각 $\hat{\theta}_e$

각 제어 방식에서 구한 동기각속도 $\hat{\omega}_e$ 적분하여 구한 회전자 자속각 $\hat{\theta}_e$ 를 전동기에서 구한 회전자 자속각 $\langle \theta_e \rangle$ 와 같은 스케일로 정규화하기 위해 식 (26)을 이용한다.

$$\hat{\theta}_e = \int \hat{\omega}_e dt \quad (25)$$

$$\langle \hat{\theta}_e \rangle = \tan^{-1}(\sin(\hat{\theta}_e) / \cos(\hat{\theta}_e)) \quad (26)$$

이렇게 정규화된 전동기에서의 실제 회전자 자속각 $\langle \theta_e \rangle$ 와 제어기에서의 추정 회전자 자속각 $\langle \hat{\theta}_e \rangle$ 를 비교하여 추정 성능을 비교 확인한다.

3. 시뮬레이션

각 제어방식의 제어특성을 확인하기 위해 표 1과 같은 유도전동기 정격모델을 대상으로 Matlab/Simulink를 이용하여 시뮬레이션을 수행하고 그 제어특성을 비교 검토하였다.

표 1 유도전동기 사양 및 상수

정격출력	200[kW]
정격전압(V_{rne})	1100[V]
정격전류	130[A]
정격주파수(f_{rne})	66.5[Hz]
정격속도	1945[rpm]
정격토크	1150[N·m]
고정자저항(R_s)	0.0855[Ω]
회전자저항(R_r)	0.1514[Ω]
고정자인덕턴스(L_s)	44.716[mH]
회전자인덕턴스(L_r)	43.86[mH]
상호인덕턴스(L_m)	42.76[mH]
극수(P)	4극
모터관성(J_m)	0.3[kg·m ²]

표 1은 도시철도용 유도전동기 사양과 상수이다. 시뮬레이션 조건은 동일한 정격을 갖는 두 대의 유도전동기를 하나의 제어기에 의해 병렬 구동하는 조건으로 그 구성도는 그림 1, 2와 같다. 기준속도는 1500[rpm]을 유지하면서, 한대의 유도전동기에는 정격토크 1150[Nm]의 부하를 일정하게 가하고 다른 한대의 3~4초, 5~6초, 7~8초에서 정격부하에서 20% 감한 920[Nm]를 구형파 형태로 가하였다. 이에 대한 파형은 그림 3과 같다.

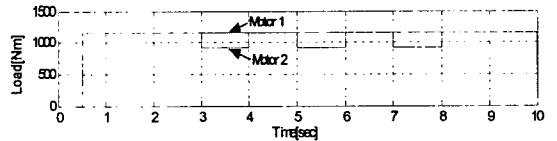


그림 3 병렬구동시 적용부하

그림 4에서 그림 7은 간접벡터제어기법과 제한하는 벡터제어 기법을 이용하여 병렬로 접속된 유도전동기 제어 특성이다. 회전자 자속각을 추정하는 방법 이외에는 모두 동일한 조건에서 구동시켰다.

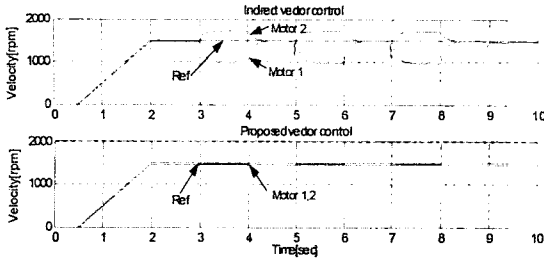


그림 4 병렬구동시 속도제어특성

그림 4는 속도제어 특성이다. 상단의 간접벡터 속도제어 특성에서 부하가 구형파로 감소되는 구간에서 전동기들 간의 부하 불균형이 전동기간 속도 편차를 심하게 발생시키고 있다. 부하가 감소한 Motor 2의 속도는 그 구간에서 증가하고 Motor 1의 속도는 감소하는 파형을 보이고 있다. 하단은 제안하는 방식으로 동일 조건에서 구동한 속도제어특성이다. Motor 1, 2의 속도가 부하 변동구간에서 큰 변동 없이 기준 속도를 추종하고 있다.

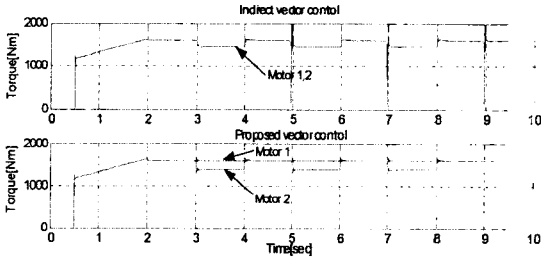


그림 5 병렬구동시 발생토크특성

그림 5는 부하변동시 전동기 발생토크 특성이다. 상단은 간접벡터제어에서 Motor 1, 2의 발생토크 특성이다. Motor 2에만 부하가 변동했음에도 불구하고 Motor 1, 2가 동일한 토크의 감소특성을 보이고 있다. 하단은 제안하는 방식에서의 Motor 1, 2의 토크제어 특성으로 부하가 감소한 Motor 2에서의 토크는 그만큼 감소하고 Motor 1에서는 일정부하토크를 유지하고 있다.

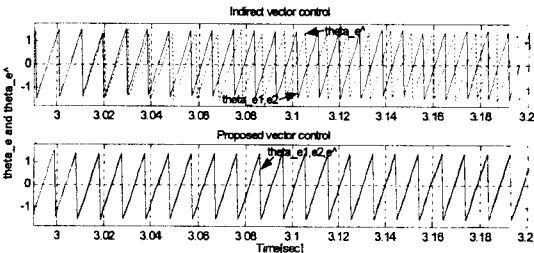


그림 6 병렬구동시 회전자 자속각 추정특성

그림 6은 회전자 자속각 추정 특성이다. 상단의 간접벡터제어에서는 부하 변동이 발생한 3초 이후 전동기의 실제 회전자 자속위치, 그림에서 Motor 1, 2의 실제 회전자 자속각 θ_{e1} 과 θ_{e2} 는 부하변동에서 같은 위치를 유지하고 있으며 간접벡터에서 추정한 회전자 자속각 θ_{e^*} 와 점차 차이를 발생하고 있다. 이는 간접벡터제어의 회전자 자속각 추정시 회전자의 속도 정보를 이용하게 되는데 일괄 구동조건에서 Motor 1과

Motor 2에 각기 다른 부하가 적용될 경우 속도편차가 회전자 자속각 추정정보를 부정확하게 하고 있다. 이렇게 계산된 부정확한 회전자 자속각 정보는 각 제어 특성 전반에 악영향을 끼치고 있다. 하단은 제안하는 방식에 의한 회전자 자속각 추정 특성이다. 전동기간 부하 불균형이 발생함에도 불구하고 실제 회전자 자속각 그림에서 Motor 1, 2의 실 회전자 자속각 θ_{e1} , θ_{e2} 와 추정한 회전자 자속각 θ_{e^*} 가 일치하고 있다.

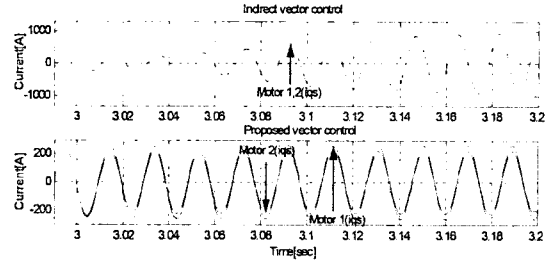


그림 7 병렬구동시 전류제어특성

그림 7은 Motor 1과 Motor 2의 고정자 q축 전류 특성이다. 상단의 간접벡터제어에서는 3초 부하불균형이 발생한 시점으로부터 Motor 1과 Motor 2의 전류가 동일한 크기로 증가하고 있다. 하단은 제안한 방식에서 전류 특성으로 부하가 감소한 3초 이후 Motor 2의 전류가 부하 감소에 대응하여 감소하는 반면 부하변동이 없는 Motor 1은 일정전류를 유지하고 있다.

4. 결론

본 논문에서는 유도전동기 병렬 구동에서 간접벡터제어에서의 각 제어특성 및 문제점을 시뮬레이션은 통해 보였다. 병렬구동시 간접벡터 제어의 회전자 자속각 추정문제를 보완하기 위한 다른 방식의 회전자 자속각 추정기법을 제시하고 그 제어 특성을 기존의 간접벡터제어 방법과 비교하였다. 회전자 자속각 추정시 전동기 회전 속도를 필요로 하지 않음으로 전동기간 회전속도 차에 의한 회전자 자속각 오차 및 이에 따른 속도 및 토크 응답의 불안정성을 크게 감소시킬 수 있었다.

[참고문헌]

- [1] Chee-Mun Ong, "Dynamic Simulation of Electric Machinery" Prentice Hall PTR, pp.433-440
- [2] T.Fushimi, H.Natsume and K.Matsuse : "A Method of Speed Sensorless Vector Control of Parallel Connected Dual Induction Motors", EPE'99
- [3] Scott Wade, "Modeling and Simulation of Induction Machine Vector Control with Rotor Resistance Identification", IEEE Transactions on Power Electronics, VOL 12, NO. 3, MAY 1997, pp.495-505