

誘導電動機의 並列運轉 System에서의 벡터制御

Field Oriented Control in Parallel Operation System of Induction Motors

김 상 훈*

Kim, Sang-Hoon*

ABSTRACT

This paper describes a reference flux angle selection for a vector control in the parallel operation system that consists of a inverter and several induction motors. In particular, this paper suggests which flux angle of motors prefers for the vector control in the train drive system that diameters of wheels are different. Through simulation for a 210[kW] induction motor drive system, it is clear that the vector control by using of the flux angle of a motor having a minimum wheel diameter leads to a minimum torque difference. However, it requires too many current sensors. So, it is shown that the vector control by a average flux angle of motors is preferable.

KeyWord : induction motor, parallel operation, vector control, train drive system

1. 서 론

교류 전동기의 가변속 AC 구동시스템은 현재 많은 산업분야에서 생산성이나 품질의 향상을 목적으로 하여 그 필요성이 증대되어 왔다. 또한 대중 교통수단의 중요한 위치를 차지하고 있는 철도차량분야에서도 최근 AC 전동기 특히 농형 유도전동기를 이용한 가변속 구동시스템이 널리 적용되고 있다[1,2].

철도차량분야의 지하철이나 경전철 및 고속전철 등에서 사용되는 전동차의 추진 제어 시스템으로는 IGBT를 이용한 VVVF (Variable Voltage Variable Frequency) 인버터에 의한 유도전동기 구동 시스템

이 현재 그 성능의 우수성으로 채택되고 있다.

가변속 AC 구동시스템에서 전동기의 출력 토크는 인버터가 전동기에 공급할 수 있는 최대 전압과 전류에 의해 제한된다[3]. 따라서, 주어진 DC 전압에서 얼마나 큰 AC 전압을 얻을 수 있는가 하는 것은 전동기 출력 토크의 관점에서 볼 때 매우 중요하다. 전동차 구동이나 전기자동차 등과 같은 견인구동시스템에서 정격속도이상의 운전시에는 제한된 DC 링크 전압하에서 전압 이용률을 높이기 위해 인버터는 대개 6-스텝 모드로 운전된다.[4,5] 6-스텝 모드로 운전하는 경우 출력전압 벡터의 크기와 위상의 순서제어는 어렵기 때문에, 일반적으로 유도전동기 견인구동시스템에서는 슬립제어를 적용하여 토크제어를 한다. 그러나, 최근 재점착 특성을 향상하기 위해 순시토크제어가 가능한 벡터제어를 유도전동기 견인구동시스템에 적용하고 있다[6].

유도전동기의 벡터제어는 직류전동기와 같이 자속

* 강원대학교 전기공학과 전임강사, 공학박사

과 토크를 독립적으로 제어함으로써 빠른 토크 응답 특성을 얻을 수 있는 제어기법이다. 벡터제어에서는 고정자 전류를 자속 벡터에 기준하여 자속성분과 토크성분으로 분리하여 이를 독립적으로 제어하는데, 자속성분 전류는 항상 자속 벡터와 일치하도록 하며 토크성분 전류는 자속 벡터와 직교하도록 제어된다. 따라서 벡터제어를 실행하기 위해서는 자속 벡터의 위치 즉 자속각의 정보가 필수적으로 요구된다[7].

AC 전동기 구동시스템에 벡터제어 기법을 적용하기 위해서는 한 대의 인버터에 의해 한 대의 전동기를 제어하는 구조가 가장 바람직하다. 철도차량 전동차의 견인구동 시스템은 일반적으로 그림1과 같이 한 대의 인버터에 의해 4대의 견인전동기를 병렬로 연결(1C4M : 1 Converter 4 Motors)하여 제어하는 집중제어방식이 유지 보수, 경제성 측면에서 유리해 현재 널리 사용되고 있다[2]. 이와 같이 한 대의 인버터에 의해 다수대의 전동기를 병렬 제어하는 집중제어구조에서는 각각의 전동기들은 전동기 상수가 서로 정확히 일치하지 않으며, 특히 철도차량과 같이 각각의 전동기가 각기 다른 바퀴를 구동하는 경우 바퀴의 반경 차이에 의해 각 전동기의 동작점이 다르게 되므로 각 전동기의 자속 벡터의 위치가 서로 상이하게 된다. 그 결과 벡터제어를 실행하기 위해 요구되는 기준 자속 각을 정확하게 설정할 수 없다.

따라서 본 논문에서는 병렬 연결된 전동기의 집중제어시스템에서 벡터제어를 실행하기 위해 요구되는 기준 자속각의 선정에 대해 연구하였다. 특히, 철도차량의 구동시스템에서는 전동기 상수의 차이에 의한 전동기간의 자속 각의 불일치보다는 각각의 전동기가 구동하는 바퀴의 반경 차이에 의한 전동기간의 자속 각 불일치 정도가 더 심하므로 이를 고려한 기준 자속 각의 선정에 대해 연구하였다.

2. 병렬 운전시 벡터제어

2.1 시스템 구성

한 대의 인버터에 의해 다수대의 전동기를 병렬 제어하는 구조에서 각 전동기의 상수들은 서로 다르며, 각각의 전동기가 각기 다른 바퀴를 구동하는 경우 바퀴 반경에 차이가 발생하면 각 전동기의 동작점이 다르게 되어 이에 따라 각 전동기의 자속 벡터의 위치가 서로 상이하게 된다. 그 결과 어떠한 전동기의 자속각을 기준 자속각으로 설정하여 벡터제어를 실행할 것인가에 관한 문제가 발생한다. 이는 어

느 임의의 A라는 전동기의 자속 벡터를 기준으로 전체 전동기를 제어하는 경우 다른 전동기들의 자속 벡터 위치는 A 전동기의 자속 벡터의 위치와는 다르게 되므로 정확한 벡터제어를 수행할 수 없다.

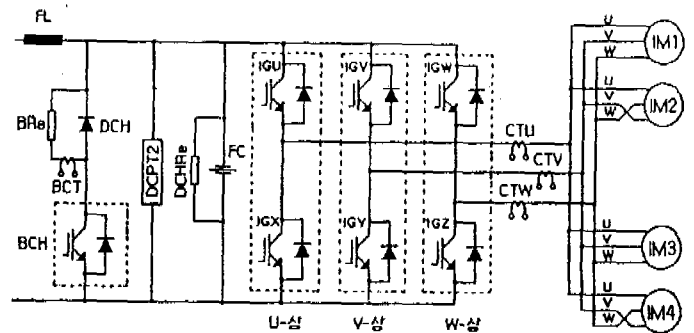


그림1 1C4M의 집중제어 시스템

본 장에서는 1대의 전동차는 4대의 바퀴가 구동하고, 각 바퀴는 각기 4대의 유도전동기가 구동하며 이 전동기들은 병렬 연결되어 1대의 인버터(1C4M 시스템)에 의해 제어되는 그림1과 같은 견인 구동시스템에 벡터제어를 적용하는 경우 특성을 살펴본다.

각각의 바퀴는 직경 82cm를 기준으로 최대 $\pm 0.5\%$ 차이가 있다고 가정한다.(이 값은 실제 관리하는 차륜경의 수치이다.) 즉,

- 전동기 A 구동 바퀴의 직경 = 82.41cm (0.5%)
- 전동기 B 구동 바퀴의 직경 = 82.2cm (0.25%)
- 전동기 C 구동 바퀴의 직경 = 81.8cm (-0.25%)
- 전동기 D 구동 바퀴의 직경 = 81.59cm (-0.5%)

위의 조건하에서 차량이 운전하는 경우 전동기 A의 속도는 가장 느리고 전동기의 D의 속도는 가장 빠르게 된다. 또한 전동기 A의 토크는 가장 크고 전동기의 D의 토크는 가장 작게 된다.

이 시스템에 A~D 전동기 중 어떤 전동기의 자속을 벡터 제어시 요구되는 기준 자속으로 선정하는가에 따라 구동시스템 특성이 달라질 수 있다.

이와 같은 철도차량의 1C4M 시스템에 벡터제어를 적용한 경우 시스템 특성을 고찰하기 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 실행하였다. 시뮬레이션은 MathWorks사의 Matlab 5.1에 포함된 Simulink를 이용하였다. 실제 전동차에서 사용하고있는 210[kW] 유도전동기를 사용하였는데 정격 및 상수는 다음과 같다.

시뮬레이션에 이용된 전체 시스템 제어방식은 다음과 같다. 벡터제어는 추정자속을 이용한 직접벡터

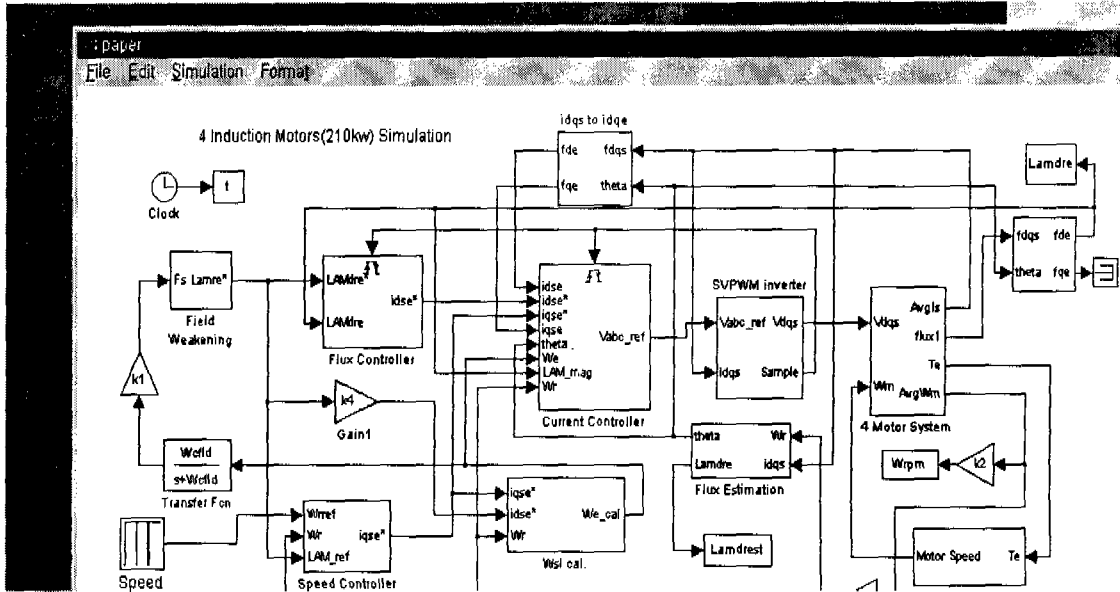


그림 2 전체 시스템 블록도

제어 방식을 사용하였으며, 전류제어는 전향보상(Feedforward)이 포함된 동기좌표계 PI 제어를 사용하였다. PWM(Pulse Width Modulation)방식은 공간전압벡터 PWM방식을 이용하였고, 고속운전을 위해 약계자 제어방법이 적용되었다. 시뮬레이션에 사용된 전체 시스템 블록도가 그림 2에 보인다. 그 구성은 크게 4대의 유도전동기 시스템(4 motor system), 철도 차량의 기계시스템(Mechanical system), 속도 제어기(Speed Controller), 자속 제어기(Flux Controller), 약계자 제어기(Field Weakening Controller), 전류제어기(Current Controller), 공간전압벡터 변조방식의 인버터(SVPWM Inverter), 동기 각속도 계산기(We Calculator) 및 자속 추정기(Flux Estimator) 블록으로 구성되어 있다.

210[kW], 1100[V], 4극, 75Hz, 2209[rpm], 133[A]
$R_s=0.107[\Omega]$, $R_r=0.086[\Omega]$
$L_m=36.075[mH]$, $L_{ls}=1.216[mH]$, $L_{lr}=1.233[mH]$

표 1. 유도전동기 정격 및 상수

그림 3과 4는 속도가 가장 느린 전동기 A의 자속을 기준 자속으로 선정하여 벡터제어를 수행한 경우 특성을 보인다. 여기서 자속은 전압, 전류 및 평균속도로부터 추정된 자속을 사용하였다. 그림 3에서 지령 토크($T_e\text{-ref}$)에 대한 전동기 전체 토크(T_e)의 추종특성을 볼 수 있는데 벡터제어가 잘 수행됨을 알 수 있다.

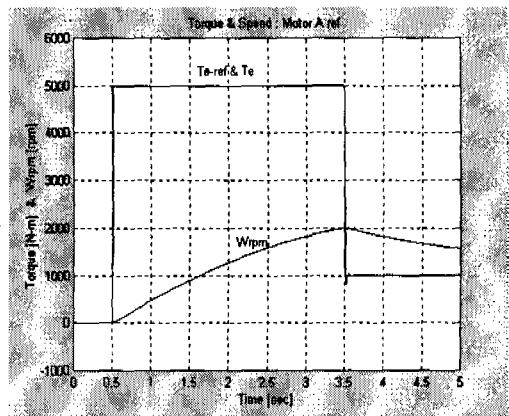


그림 3 최대 차륜경 기준 제어시 전체 토크 및 속도 특성

2.2 기준 자속각에 따른 벡터제어 특성

(1) 최대 차륜경 구동 전동기(전동기 A)의 자속을 기준자속으로 선정하는 경우

지령 토크를 추종하는데 필요한 전체 토크(T_e)를 형성하는 각 전동기의 토크들은 그림 4과 같이 서로 일치하지 않고 차륜경 차이에 따라 분배되는데 각 전동기의 운전점이 다르므로 슬립이 다르기 때문이다. 즉, 차륜경이 가장 작아 속도가 가장 빠른 전동

기인 D는 슬립이 가장 작고 이에 따라 전류 및 토크는 가장 작게되며, 반면 효율은 가장 좋다. 차륜경이 가장 커서 속도가 가장 느린 A 전동기는 슬립이 가장 크게되어 출력 토크 및 전류는 가장 크게 된다. 반면 효율은 가장 나쁘다. 이러한 각 전동기간의 출력 토크 차이는 속도 증가에 따라 차륜경 차이에 따른 전동기 속도차이가 커지므로 더욱 증가하게된다.

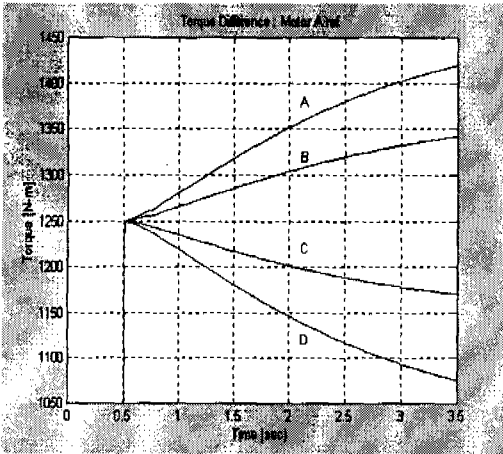


그림 4 최대 차륜경 기준 제어시 각 전동기간의 토크 분배

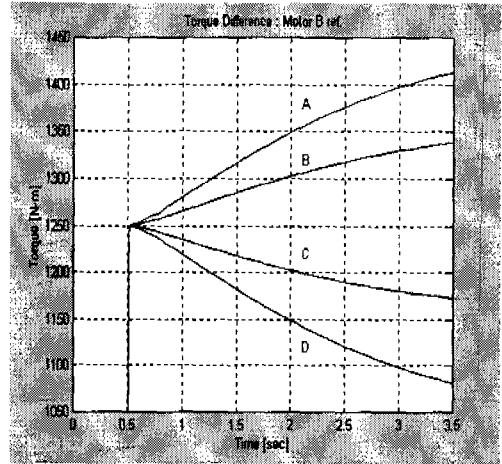


그림 6. 중간 차륜경 기준 제어시 각 전동기간의 토크 분배

각 전동기간의 토크 차이는 전동기 A의 자속을 기준 자속으로 선정하여 벡터제어를 하는 경우보다는 약간 적어짐을 그림 4과 그림 6을 비교함으로써 알 수 있다.

- (3) 최소 차륜경 구동 전동기(전동기 D)의 자속을 기준 자속으로 선정하는 경우

- (2) 중간 차륜경 구동 전동기(전동기 B or C)의 자속을 기준 자속으로 선정하는 경우

그림 5와 6은 중간 차륜경 구동하는 중간속도의 전동기 B(혹은 전동기 C)의 자속을 기준 자속으로 선정하여 벡터제어를 수행한 경우 특성을 보인다. 그림 5로부터 전체 토크(T_e)가 지령 토크(T_{e-ref})를 잘 추종함을 알 수 있다. 이로부터 앞 경우와 마찬가지로 벡터제어가 잘 수행됨을 알 수 있다.

그림 7과 8은 차륜경이 가장 작아 속도가 가장 빠른 전동기 D의 자속을 기준 자속으로 선정하여 벡터제어를 수행한 경우 특성을 보인다. 그림 7로부터 앞 경우와 마찬가지로 벡터제어가 잘 수행됨을 알 수 있다. 각 전동기간의 토크 차이는 전동기 A나 B의 자속을 기준자속으로 선정하여 벡터제어를 하는 경우보다는 적어짐을 그림 8으로부터 알 수 있다.

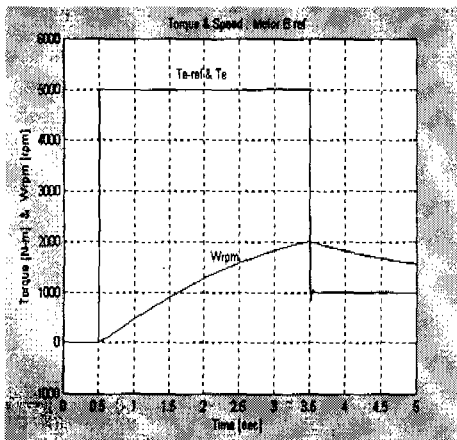


그림 5. 중간 차륜경 기준 제어시 전체 토크 및 속도 특성

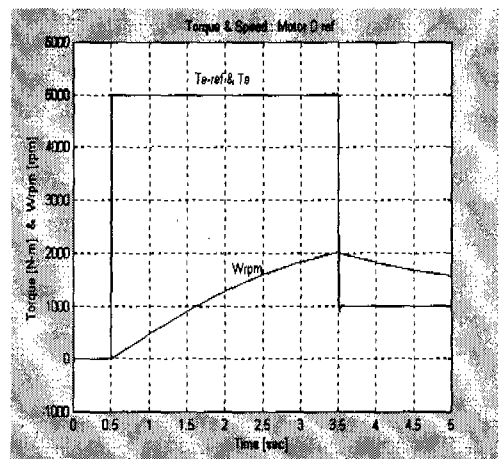


그림 7. 최소 차륜경 기준 제어시 전체 토크 및 속도 특성

행 가능하며, 그 특성 역시 전체적으로는 거의 동일

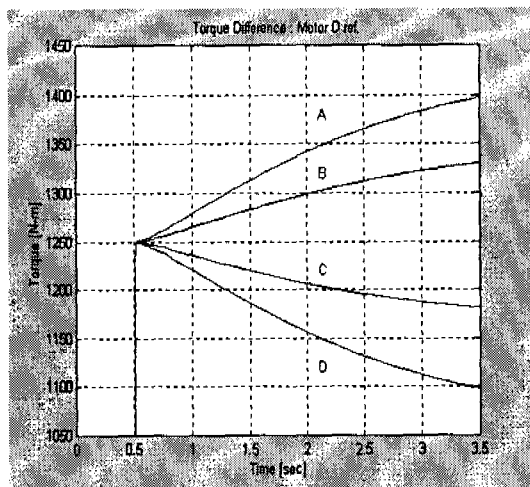


그림 8. 최소 차륜경 기준 제어시 각 전동기간의 토크 분배

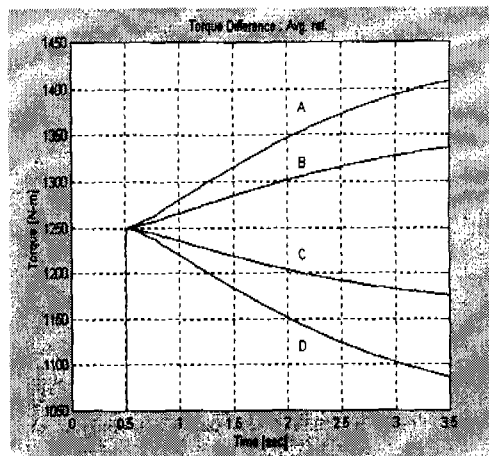


그림 10. 평균자속으로 제어시 각 전동기간의 토크 분배

(4) 전동기들의 평균 자속을 기준자속으로 선정하는 경우

그림 9와 10은 4대 전동기의 평균자속을 기준자속으로 선정하여 벡터제어를 수행한 경우 특성을 보인다. 여기서 자속은 각 전동기의 평균 전류로부터 추정된 자속을 사용하였다. 그림 9의 토크(T_e)의 추종 특성으로부터 벡터제어가 잘 수행됨을 알 수 있다. 각 전동기간의 토크 차이는 전동기 A나 B의 자속을 기준자속으로 선정하여 벡터제어를 하는 경우보다는 적어지나 전동기 D를 기준으로 벡터제어를 하는 경우보다는 커짐을 그림 10으로부터 알 수 있다.

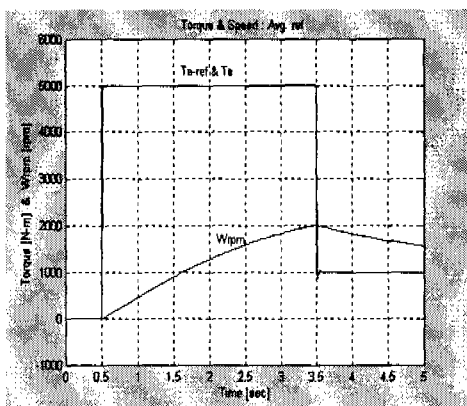


그림 9. 평균자속으로 제어시 전체 토크 및 속도 특성

앞의 지령 토크(T_{e-ref})에 대한 전동기 전체 토크(T_e)의 추종 특성으로부터 어떠한 임의의 전동기의 자속을 기준 자속으로 선정하더라도 벡터제어는 수

함을 그림 3, 5, 7과 9로부터 알 수 있다. 그러나 지령 토크를 추종하는데 필요한 전체 토크(T_e)를 형성하는 각 전동기의 토크는 차륜경 차이에 따라 분배되어 서로 일치하지 않는데, 이러한 전동기간의 토크 차이는 선정된 기준 자속에 따라 크게 달라짐을 그림 4, 6, 8과 10으로부터 알 수 있다.

전체 시스템 성능 면에서는 각 전동기간의 토크 차이는 작을수록 유리하다. 전동기간의 속도차이로 인해 운전슬립에 차이가 발생하면 전동기간의 전류 분배가 달라지게 되어, 그 결과 출력 토크가 서로 달라지게 된다. 따라서 속도가 낮은 전동기는 계속해서 과부하상태로 운전하게 되어 효율이 저하되며 발열의 문제가 발생할 수 있으며, 반면에 속도가 빠른 전동기는 계속해서 경부하로 운전하게 되는데 전체 시스템의 효율이 저하될 수 있다. 또한, 경부하시에는 어느 한 전동기는 모터링(Motoring) 상태로 또 다른 전동기는 발전기(Generating) 상태로 운전하게되는 등 시스템 성능이 나빠진다.

앞의 시뮬레이션 결과로부터 최대 차륜경 구동의 가장 속도가 느린 전동기(전동기 A)의 자속을 기준하여 벡터제어를 실행한 경우가 가장 전동기간의 토크 차이가 커짐을 알 수 있다. 반면 최소 차륜경 구동의 가장 속도가 빠른 전동기(전동기 D)의 자속을 기준자속으로 선정하여 벡터제어를 실행한 경우 가장 전동기간의 토크 차이가 적음을 알 수 있다. 따라서, 한 대의 인버터에 의해 4대의 전동기를 제어하는 구조인 철도차량의 1C4M 시스템에서 벡터제어를 적용하는 경우 각각의 전동기가 구동하는 바퀴의 반경 차이에 의한 전동기간의 토크 차이를 줄이기 위해서

는 최소 차륜경의 바퀴를 구동하는 전동기의 자속을 기준자속으로 선정하여 벡터제어를 실행하는 것이 전체 구동시스템의 성능을 고려해볼 때 가장 바람직하다.

2.3 기준 자속각의 선정

벡터제어를 실행하기 위해서는 전동기 자속각의 정보가 필수적으로 요구되는데, 일반적으로 전동기의 전류와 전압 또는 속도의 정보로 이를 추정한다.

철도차량의 1C4M 시스템에서 4대의 전동기 중 차륜경의 상태에 따라 가장 우수한 토크 분배특성을 갖도록 최소 차륜경의 바퀴를 구동하는 전동기의 자속을 기준자속으로 선정하여 벡터제어를 실행하기 위해서는 모든 전동기의 자속을 알아야 한다. 따라서 모든 전동기의 전류를 알아야 한다. 이를 위해서는 각각의 전동기마다 전류센서가 필요한데, 1C4M 시스템의 4대 전동기에 대해 3상 전류 중에 2상의 전류만을 측정하는 경우라도 최소 8개의 전류센서가 요구된다. 이것은 가격 면에서도 불리하고 센서를 부착하는 데에도 문제가 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위해서는 기존의 슬립 제어 및 일정 전압/주파수제어(V/F control)시와 같이 인버터 출력 측에 3개의 전류센서를 부착하여 4대 전동기의 전체 전류를 측정하고 이로부터 각 전동기의 전류를 추정하는 방법이 요구된다. 각각의 전동기 전류는 전체 전동기의 전류와 각 전동기의 속도정보로부터 슬립과 전류의 비례관계를 이용하면 추정이 가능하다.

그림 11은 이와 같이 토크 분배 특성이 가장 좋은 최소 차륜경 구동 전동기 D의 전류를 전체 전동기의 전류와 속도정보로부터 추정하여, 이로부터 자속각을 알아내어 벡터 제어를 실행한 경우 특성을 보인다. 실제전류로 제어한 특성을 보이는 그림 7의 경우와 비교하여 볼 때 거의 유사한 특성을 보인다.

슬립과 전류의 비례관계를 이용한 전류추정은 전동기 속도와 토크 크기, 즉 전동기의 운전점에 따라 그 추정의 정확도가 달라진다. 그림 12은 추정전류로 제어시 실제 및 추정 d-축 동기좌표계 회전자 자속을 보이는데 전류추정의 오차로 인하여 실제 자속과 추정 자속과의 오차가 발생한다. 따라서 추정전류를 이용하여 자속을 추정하여 이를 벡터제어에 적용하는 경우 정확한 벡터제어를 실현하기 어렵다. 이로 인해 각 전동기간의 토크 분배 역시 실제 전류를 이

용한 경우보다 나빠지는데 추정전류를 사용한 경우

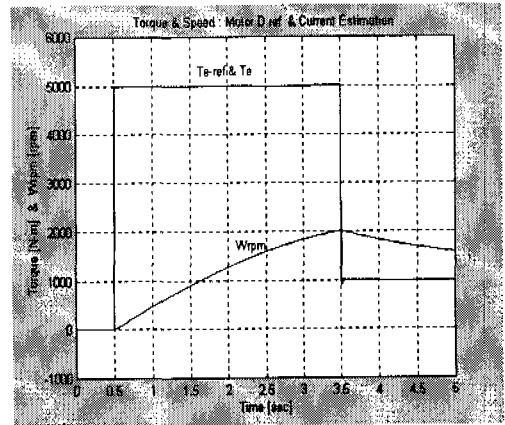


그림 11. 추정전류로 제어시 전체 토크 및 속도 특성

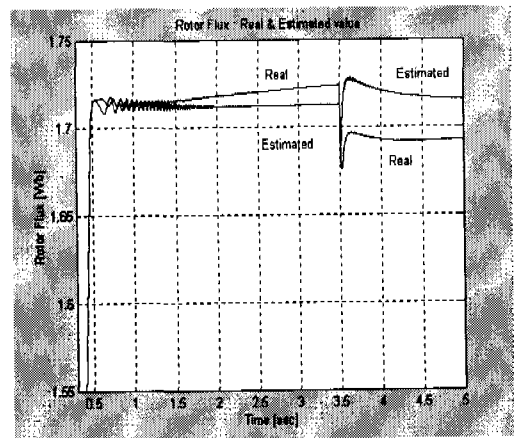


그림 12. 추정전류로 제어시 실제 및 추정 d-축 회전자 자속

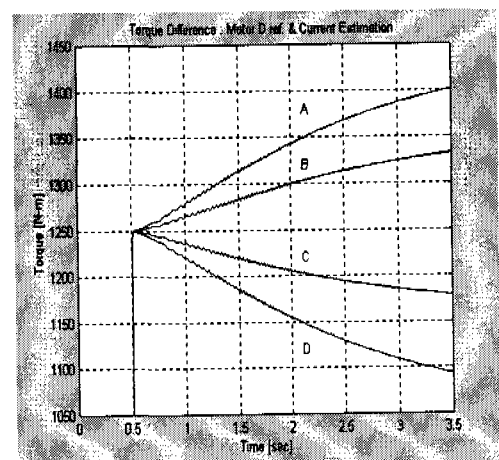


그림 13. 추정전류로 제어시 각 전동기간의 토크 분배

각 전동기간의 토크를 그림 13에 보인다.

평균자속을 이용하여 벡터제어를 수행하는 경우가 최소 차륜경의 바퀴를 구동하는 전동기의 자속을

사용한 경우보다는 각 전동기간의 토크 분배 특성은 약간 저하되지만 모든 전동기에 전류센서를 부착하여 사용하기에는 경제적인 면에서나 구조적인 면에서 문제가 있어 추정전류를 사용해야 한다면 실제 전류를 이용한 경우보다 각 전동기간의 토크 분배가 나빠지는 문제를 고려해 볼 때, 4대 전동기의 평균 전류로부터 추정된 평균자속을 이용하여 벡터제어를 실행하는 경우가 여러 조건을 고려해 볼 때 바람직하다.

3. 결론

본 논문에서는 한 대의 인버터에 병렬 연결된 전동기의 집중제어시스템에서 벡터제어를 실행하기 위해 요구되는 기준 자속각의 선정에 대해 연구하였다. 특히, 각각의 전동기가 구동하는 바퀴의 직경에 차이가 발생하는 철도차량 구동시스템에서 전동기간의 자속 각 불일치 정도를 고려한 기준 자속 각의 선정에 대해 연구하였다.

시뮬레이션의 결과를 통해 각 전동기간의 토크 차이를 줄이기 위해서는 최소 차륜경의 바퀴를 구동하는 전동기의 자속을 기준자속으로 선정하여 벡터제어를 실행하는 것이 바람직함을 알 수 있었으나, 이를 구현하기 위해서는 모든 전동기의 전류를 알아야 하는데, 이것은 가격 면에서도 불리하고 센서를 부착하는 데에도 문제가 있다.

따라서, 평균자속을 이용하여 벡터제어를 수행하는 경우가 최소 차륜경의 바퀴를 구동하는 전동기의 자속을 사용한 경우보다는 각 전동기간의 토크 분배 특성은 약간 저하되지만 모든 전동기에 전류센서를 사용할 수 없어 추정전류를 사용해야하는 문제를 고려하고 또한 추정전류를 사용할 때 실제 전류를 이용한 경우보다 각 전동기간의 토크 분배가 나빠지는 문제를 고려해 볼 때 각 전동기의 평균 전류에 의한 추정자속을 이용하여 벡터제어를 수행하는 경우가 바람직함을 알 수 있었다.

참고 문헌

[1] K. Kenzo, O. Tsutomu and S. Takashi, "Application Trends in AC Motor Drives," *IEEE IECON'92*, pp.31 ~36, 1992.

[2] 油谷浩助, "인버터 제어차의 技術動向," *電氣車의*

科學, pp. 15~19, 1990년 2월.

[3] S. H. Kim, S. K. Sul, "Maximum Torque Control of an Induction Machine in the Field Weakening Region," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 31, No. 4, Aug./Jul., pp. 787~794, 1995.

[4] Kouji Yasuda, Kiyoshi Nakada, Yoshio Tsutsui and Kiyoshi Kakamura, "PWM Control Method of a High Frequency Two-level Inverter for Trains", in *proc. IPEC- Yokohama*, pp.1066-1070, 1995.

[5] Takamasa Kanzaki, Ikuo Yasuoka and Gorge Yamamoto, "Direct Digital Controlled PWM GTO Inverter for DC1500V Electric Cars", in *proc. IPEC-Tokyo*, pp.1587-1598, 1983.

[6] Ikuo Yasuoka, Takuma Henmi, Yooske Nakazawa and Ikuya Aoyama, "Improvement of Re-adhesion for Commuter Trains with Vector Control Traction Inverter", in *Proc. Power Conversion Conference*, pp.51-55, 1997.

[7] D. W. Novotny and R. D. Lorentz, "Principle of Vector control and Field Orientation," in Tutorial Course Record, "Introduction to Field Orientation and High Performance AC Drives," as part of *IEEE-IAS Ann. Mtg. Conf. Rec.* 1985.