

전동차 조합시험을 위한 전기적 관성부하에 대한 연구

배본호, 설승기
서울대학교 전기공학부

Development of Electric Inertia Load for Traction System Combined Testing

Bon-Ho Bae, Seung-ki Sul
School of Electrical Engineering, Seoul National University

Abstract - 전동차의 구동시스템 및 보조 전원장치 등의 제어가 고성능화되고 복잡해지면서 각 기기의 개별 시험이 아닌 조합시험을 통한 신뢰성의 확보가 점점 중요해지고 있다. 특히 구동시스템의 시험을 위해서는 실제 차량부하와 유사한 부하 특성을 조합시험장치가 제공하는 것이 중요하다. 전동차의 부하특성에서 가장 지배적인 역할을 하는 특성은 관성이다. 국내에 운용중인 조합시험장치들은 전동차의 직선 운동에 해당하는 등가 회전관성을 가지는 플라이휠(flywheel)을 이용하여 관성부하를 구현하고 있다. 본 논문에서는 이러한 관성부하를 기계적 질량이 아닌 서보시스템을 이용하여 구현할 경우의 장단점과 특성에 대해 알아보고, 그 적절한 구현 방법을 제안하고자 한다. 또한 실험 및 실험 결과를 통해 그 타당성을 검증하고자 한다.

1. 서 론

전동차에서 구동시스템 및 보조전원장치 등이 고성능화되고 제어가 복잡해지면서 각 개별 시스템의 독자적인 시험 외에 전체 시스템을 연결하여 시험하는 기술의 중요성이 커지고 있다.

특히 초퍼(Chopper) 구동시스템을 시작으로 전력 반도체 소자가 채용되고 이를 제어하기 위한 마이크로프로세서가 이용되고, 기존의 개루프 제어(open-loop control)를 대신하여 다중의 폐루프 제어(closed-loop control)가 일반화되면서 기기간의 상호작용 및 전체 제어 루프의 동작에 문제가 발생하는 경우가 많아지고 있다(1).

마이크로프로세서의 적용은 작성된 프로그램의 검증을 필요로 하는데, 검증은 연관되는 개별 시스템들을 조합하여 실시간으로 작동을 시키면서 실제와 유사한 환경을 만들어 주고 다양한 가상 조건을 발생시켜 작동을 확인하는 것이 가장 효과적이다.

따라서 조합시험설비는 실제 전동차가 운용될 노선의 부하특성과 유사한 부하를 구동시스템에 부가해 주는 것이 중요하다. 전동차 구동시스템에서 가장 중요한 부하 특성은 관성으로서, 국내에 설치된 조합시험 설비에는 전동차의 직선운동시의 관성과 동일한 회전관성을 가지는 플라이휠(flywheel)이 부하로 이용되고 있다.

이러한 기존의 플라이휠을 이용한 기계적 관성의 경우, 관성을 가변할 수 없고, 노선의 구배에 따른 부하의 변화 및 실제와 유사한 주행저항의 구현은 불가능하다.

또한 일반적으로 회생시 발생된 에너지를 저항을 통해 소비시키므로 많은 전력을 소비하게 된다. 고속시험시 플라이휠에 매우 큰 운동 에너지가 축적되므로 사고시 어떠한 방법으로도 보호가 불가능한 문제가 있다.

본 연구에서는 이러한 기존 조합 설비의 문제점에 대한 대안으로 전기적 서보시스템을 이용하여 전동차의 부하를 구현하는 방법을 제안하고자 한다. 이 경우 피시험 체인 구동 시스템과 시험 부하인 서보시스템이 역행

(powering)과 회생(regeneration)으로 작동하므로 전체 에너지 손실은 매우 작다. 그리고 다양한 차중에 따른 관성의 가변이 용이하고, 운용될 노선의 구배 특성 및 주행저항의 구현이 가능하므로 주행시스템의 발열설계 등에서 실제 노선에서의 시험과 유사한 결과를 기대할 수 있으므로 최적의 경제적 설계를 유도할 수 있는 장점이 있다. 또한 사고시 고속 차단 장치(High Speed Circuit Braker)에 의해 보호가 용이하므로 안전성이 보장된다.

2. 본 론

2.1 전동차의 견인력

전동차 구동시스템의 전동기 출력 토오크를 T_m , 전동차의 가속에 이용되는 토오크를 T_n , 운행 선로의 구배(gradient)에 의한 토오크를 T_g , 운행선로의 주행저항에 의한 토오크를 T_r , 기계 브레이크에 의한 토오크를 T_b 라 하면 식 (1)과 같은 관계가 성립된다.

$$T_n = T_m - T_g - T_r - T_b \quad (1)$$

여기서 주행저항 T_r 은 사용자에 의해 제시되는 식으로 대체로 속도에 대한 다항식으로 표현된다.

또한 차량의 속도 w_m 과 차량가속에 이용되는 토오크 T_n 과의 관계는 식 (2) 및 (3)과 같다.

$$T_n = J_{eq} \frac{dw_m}{dt} \quad (2)$$

$$w_m = \frac{1}{J_{eq}} \int T_n dt \quad (3)$$

여기서 J_{eq} 는 차량의 관성에 해당하는 등가 회전관성이 다.

2.1 전기적 관성의 구현방법

전기적 서보시스템을 이용한 관성의 구현 방법으로 시스템 전달 함수의 역함수를 적용하여 구현하는 토오크 제어방식과, 기본적으로 식 (3)을 이용하여 구한 기준 속도를 구하고 이를 이용하여 속도제어를 구현하는 방식이 있다(2).

그림 1은 가장 기본적인 토오크 제어 방식의 제어 블록도이다. 여기서 $G(s)$ 는 시험 장치의 실제 전달함수이고 $G_{em}(s)$ 는 구현하고자 하는 전달함수이다. 이 블록도의 전체 전달함수를 정리하면 $G_{em}(s)$ 가 된다.

이 방식은 시뮬레이션으로는 문제가 없지만 실제 구현 과정에서 속도신호의 미분이 이용되므로 내 잡음성이 떨어지고, 특히 디지털 제어시 제어주기가 길 경우 불안정해지는 단점이 있다. 따라서 여러 가지 보상이 추가되

고 기본적인 기계 관성이 필요하므로 비교적 관성 용량이 작은 자동차 주행 시험 장치에 이용되고 있다.[3,4].

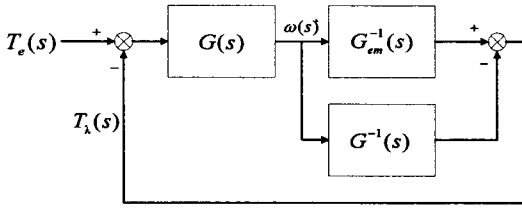


그림 1. 토오크 제어 방식의 블록도

그림 2는 기본적인 속도제어 방식의 제어 블록도이다. 여기서 $G_r(s)$ 는 속도제어기의 전달함수이다. 이 방식은 안정적인 반면 속도제어 대역폭에 한계가 있으므로 급격한 토오크 변화에 대한 응답성이 다소 부족하게 된다.

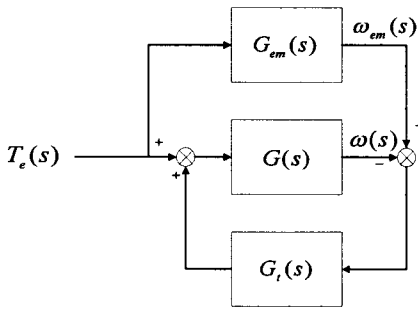


그림 2. 속도 제어 방식의 블록도

전동차 구동 시스템에는 승객의 승차감을 위해 저크(Jerk)제어가 내장되어 출력 토오크의 급변이 제한되어 있으므로 출력 토오크에 대한 응답성은 크게 요구되지 않은 특성이 있는 반면 대용량인 만큼 안정성이 더 중요시된다. 따라서 전동차 구동 시스템의 경우에는 토오크 적분을 통한 속도 제어 방식이 유리한 것으로 판단된다.

2.2 전동차 조합시험을 위한 모의 관성

전동차 조합시험을 위한 관성의 구현을 위한 전체 블록도는 그림 3과 같다.

관성 시뮬레이션부에서는 속도제어를 위한 속도 기준을 계산하는 부분으로 식 (1)과 식 (3)으로부터 다음 식 (4)를 이용하여 기준속도를 계산한다.

$$w_m^* = \frac{1}{J_{eq}} \int [T_m - T_g - T_r - T_b] dt \quad (4)$$

여기서 구배저항분 토오크 T_g 은 운행 선로의 구배 형태(profile)에서 계산하고 주행저항성분 토오크 T_r 은 주어진 주행저항식에 의해 구한다. 공기 브레이크에 의한 토오크 T_b 는 BCU(Brake Control Unit)로부터 전달받으며, 실제 많은 경우에서 공기 브레이크는 조합시험에서 제외된다.

피시험체에서 발생하는 토오크 T_m 은 전동기 측에 토오크 센서를 설치하여 측정할 수 있으나 다른 정보들로부터 추정이 가능하다.

부하장치의 속도 제어 서보의 출력 토오크를 T_s , 전동기 속도를 w_m , 기계적인 회전관성을 J_{mech} 라 할 때 식 (5)가 성립한다.

$$T_m = T_s + T_{fr} + J_{mech} \frac{dw_m}{dt} \quad (5)$$

여기서 T_{fr} 은 기계적인 마찰성분의 토오크로서 미리

전체 시험 세트를 각 속도별로 정속 운전해 봄으로써 알 수 있다.

이 식을 식 (4)에 대입하여 식 (6), (7)을 얻을 수 있다.

$$w_m^* = \frac{1}{J_{eq}} \int [T_s + T_{fr} + J_{mech} \frac{dw_m}{dt} - T_g - T_r - T_b] dt \quad (6)$$

$$w_m^* = \frac{1}{J_{eq}} \int [T_s + T_{fr} - T_g - T_r - T_b] dt + \frac{J_{mech}}{J_{eq}} w_m \quad (7)$$

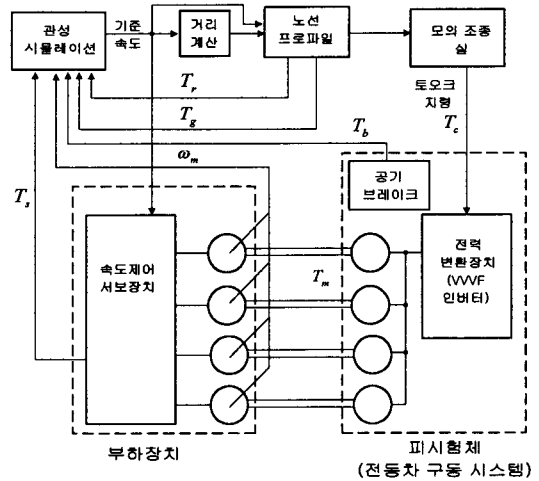


그림 3. 관성 시뮬레이션 블록도

여기서 출력 토오크 T_s 는 속도제어 서보장치가 직류 전동기를 사용할 경우 식 (8), 교류 전동기를 사용할 경우 식 (9)로부터 계산할 수 있다.

$$T_s = K_t \cdot I_a \quad (8)$$

$$T_s = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m}{L_r} [\lambda_{dr}^e I_{qs}^e - \lambda_{qr}^e I_{ds}^e] \quad (9)$$

따라서 식 (7)을 이용하면 토오크 센서 없이 시험 장치로부터 얻을 수 있는 정보들로부터 모의 관성의 구현을 위한 기준 속도를 계산해 낼 수가 있다.

여기서 운행할 노선의 구배 및 주행저항으로부터 T_g , 및 T_r 를 계산하여 입력할 수가 있으므로 실제 운행조건과 유사한 부하 조건에서 조합시험을 수행할 수가 있다.

또 전기적으로 피시험체인 구동시스템의 전력변환회로와 부하 장치인 서보 장치의 전력변환회로 사이의 에너지의 순환을 가능하게 설계하면 전기 에너지의 손실을 최소화할 수 있다.

2.2 실험

2.2.1 실험 장치

실험 장치로는 22kW 유도전동기와 19.9kW 직류 전동기로 구성된 모터-발전기 세트가 사용되었으며 주회로 구성은 그림 4와 같다. 직류단을 공유하고 있으므로 두 전력변환부 간의 전기에너지의 순환이 자유롭게 이루어진다.

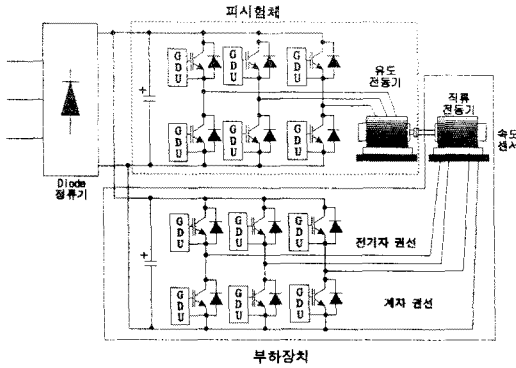


그림 4. 시험 장치의 주회로도

피시험체인 유도전동기 구동용 인버터의 제어를 위해서 TMS320C31(50MHz) DSP를 이용한 제어를 사용하여 회전자 자속 기준 제어를 수행하였으며, 부하장치인 직류전동기 구동용 쇼퍼의 제어를 위하여 TMS320C31 (40MHz) DSP를 이용한 제어를 사용하였다.

2.2.2 실험 결과

그림 5는 유도전동기를 토크제어 모드로 운전하면서 출력 토크를 $-30 [Nm]$ 에서 $30 [Nm]$ 로 변화시키고, 직류전동기를 제안된 알고리즘에 따라 전기적 관성부하로 작동시켰을 때 모의관성의 크기에 따른 속도의 변화를 나타낸 것이다. 동일한 토크에 대해 모의관성의 크기에 반비례하는 속도 변화율을 나타내면서 식 (3)과

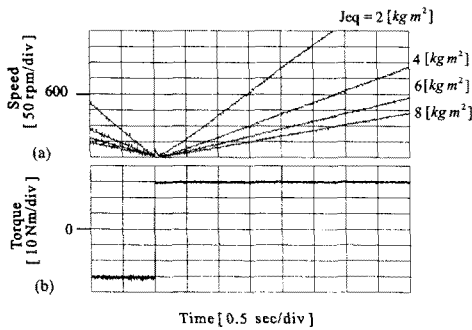


그림 5. 모의관성의 크기에 따른 속도의 변화

같은 관성의 특성을 잘 나타내고 있음을 알 수 있다.

그림 6은 직류전동기가 전기적 모의관성으로 작동하고 있으면서 토크 센서의 출력이나 피시험체로부터 정보를 사용하지 않고 식 (5)를 이용하여 유도전동기가 출력하고 있는 토크를 계산한 결과를 보여준다. 이 때 직류 전동기의 $2 [kg m^2]$ 의 모의관성으로 작동하고 있다. 그림 6에서 (a)는 유도전동기가 출력하고 있는 실제 토크 T_m 을, (b)는 전동기의 속도를 나타내고 있다. (c)는 측정을 통해 입력된 마찰저항성분 T_{fr} 을 보여주고 있다. (d)는 식 (5)에서 속도 미분항을 제외한 나머지, 즉 속도제어 서보의 출력 토크와 마찰저항성분의 합인 $T_s + T_{fr}$ 을 나타내기도 있다. 결과적으로 (d)는 (a)의 실제 토크를 잘 계산해 내고 있지만 속도가 변화하는 부분에서 약간의 오차를 보이고 있는데 이것은 자체의 기계적인 관성 J_{mech} 에 대한 가속성분 토크가 무시되었기 때문이다. 그러나 실제 기준속도를 계산하는 식 (7)에서는 이에 대한 보상이 이루어지므로 오차

가 더 줄어들게 된다. 따라서 부하시험장치에서의 계산을 통해 토크 센서의 출력이나 피시험체로부터의 토크 정보 없이도 피시험체인 유도전동기의 출력 토크의 계산이 잘 이루어지고 있음을 알 수 있다.

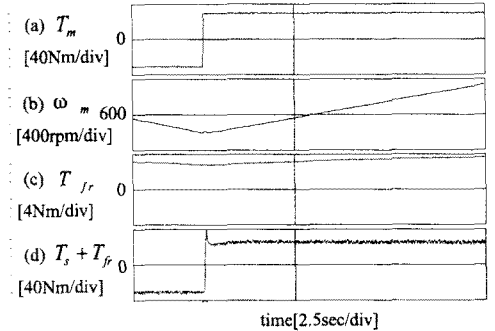


그림 6. 직류전동기에서 계산된 토크

3. 결 론

전동차용 전력전자 시스템이 고성능화되고 복잡해지면 서 효과적인 조합시험에 대한 필요성이 커지고 있다. 기존의 기계적 플라이휠을 이용한 관성부하설비는 관성의 가변이 불가능하고, 노선의 특성에 따른 구배 저항 및 주행 저항의 입력이 불가능하여 실제 주행 특성과 동일한 부하를 입력할 수 없는 단점이 있다. 또한 사고시 대처가 힘들고 에너지의 손실이 많고 제작비가 매우 고가이다.

본 논문에서는 기계적 관성 부하를 기계적 플라이휠이 아닌 전기적 서보시스템을 이용하여 구현하는 방법을 제시하였다. 이러한 전기적 부하 설비는 관성, 주행저항 및 구배저항 등 모든 부하조건을 실시간으로 가변할 수 있으므로 다양한 차종에 대해 실제 노선의 운행 조건과 동일한 부하특성을 기대할 수 있다. 또한 이상발생시 전기적인 차단으로 안전을 보장할 수 있으며, 에너지의 순환을 통해 전기에너지의 소모가 매우 작아서 경제적인 장점이 있다.

제안된 알고리즘의 검증을 위해 20kW 전동기-발전기 세트를 이용한 실험이 수행되었다. 실험 결과 속도제어를 이용한 관성의 추정이 효과적으로 구현가능하며, 또한 속도제어 서보에서의 토크 계산을 통해 피시험체로부터 정보나 토크 센서의 정보없이 제안된 알고리즘의 구현이 가능함을 확인하였다.

[참 고 문 헌]

- [1]D.R. Geering, "Traction System Combined Testing", GEC ALSTHOM traction Ltd.
- [2]Z. Haken Akpolat and Greg M. Ashere, "Dynamic Emulation of Mechanical Loads Using a Vector-Controlled Induction Motor-Generator Set", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.46, No.2, 1999.
- [3]Severino,D'Angelo, William G.Meares, and Charles L.Brownell,"Large-Roll Chassis Dynamometer with AC Flux-Vector PEU and Friction-Compensated Bearings", Horiba Instruments, Inc, SAE 930391
- [4]Severino,D'Angelo and R.D. Gafford, "Feed-Forward Dynamometer Controller for High Speed Inertia Simulation", Horiba Instruments, Inc, SAE 810749
- [5]SIEMENS, "Test Facility for Rail Vehicle Electric Propulsion Systems".
- [6]FINMECCANICA IRI GROUP, ANSALDO, "The Railway Vehicle Test Facility".