

전동기 시험을 위한 프로그램어블 다이내모메터 제어

김길동, 홍재성, 안태기, 이호용, 신정렬, 한석운
한국철도기술연구원

Programmable-Dynamometer Control For Traction Motor Testing

G.D Kim, J.S Hong, T.K Ahn, H.Y Lee, J.R Shin, S.Y Han
KRII

Abstract - The control method of programmable dynamometer for overall test of machine is to load the reference torque which is computed from torque transducer into motor under test. But the torque information detected from torque transducer have a lot of noise when the load torque of moter is a small quantity or changing. Thus, torque transducer must have a low pass filter to detect a definite torque information. But The torque delay generated by filter with torque transducer occur a torque trouble for moter torque of programmable dynamometer. The proposed system improved the problem of the torque measuring delay with torque transducer, and the load torque is estimated by the minimal order state observer based on the torque component of the vector control induction moter. Therefore, the torque controller is not affected by a load torque disturbance.

1. 서 론

전동기 조합시험을 위한 프로그램어블 다이내모메터(PDM)의 제어는 피시험체(MUT)의 구동 토크를 검출하여 이에 대한 부하토크를 걸어주는 방식이 있다. 그러나 토크 검출기로부터 얻어진 정보는 미량의 토크 및 순시 토크 변화에 대하여 많은 노이즈를 포함하고 있다. 그래서 안정된 토크를 얻기 위해서는 저역 통과 필터를 이용하는데, 이때 필터로 인해 발생하는 토크 신호 지연현상은 PDM의 토크 진동으로 이어지게 된다. 그러므로 정적인 부하시험은 가능하나, 동적 또는 비 선형적인 부하 구현에는 만족할만한 부하특성을 얻을 수 없었다.

본 논문에서는 기존의 토크 검출기 사용에 대한 문제점을 개선하기 위해서 MUT의 토크 검출 없이 부하토크 관측기에 의한 제어방식을 제안하였다. 제안된 시스템에서는 PDM의 부하토크를 관측한 값에 관성 토크를 더하여 MUT의 구동토크를 추정하는 방식으로 토크 검출기를 이용할 때 발생하는 토크 지연현상에 대한 문제점을 개선하였고, 속도관측기에 의해 추정되는 부하토크를 이용하여 피드포워드 제어를 함으로써, 속도 변화에 독립적으로 부하토크를 제어 할 수 있도록 하였다. 제시한 제어 알고리즘에 대하여 타당성을 검증하기 위해서 토크 검출기를 이용할 때 나타나는 필터의 차단 주파수에 대한 문제점을 근계적을 통해 입증하였고, 컴퓨터 시뮬레이션 및 실험을 통하여 제시한 방법이 우수함을 확인하였다. 따라서 확인된 PDM 장치는 토크검출 없이 시험이 가능하므로 산업용 가변속 구동장치의 여러 가지 부하를 시험하기 위한 시험장치로 활용이 확대 될 것이며, 빠른 설계를 원하는 모터구동장치 제작자에 의해 널리 사용 될 것으로 기대된다.

2. 본 론

2.1 PDM의 시스템 구성

본 논문에서는 22[kW] 유도전동기 2대를 이용하였다. 인버터는 35[kW] 인버터 2대를 이용하였다. 그리고, 인버터에 공급되는 DC 전원은 MUT 인버터와 PDM 인버터를 DC bus로 구성하여 회생시 발생된 전력이 순환하고 DC link 커패시터에 에너지를 저장함으로써 약간의 전압 상승이 나타날 수 있지만, 주 전력 공급장치는 드라이브의 손실분만을 공급할 수 있는 시스템으로 구성하였다. 제시된 그림 2.1은 PDM의 시험장치 시스템 구성도를 나타내고 있다.

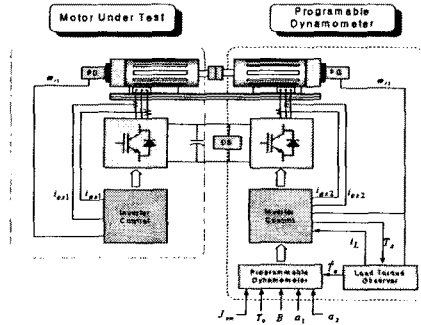


그림 1.1 전체 제어 블록도

2.2 부하토크 관측기에 의한 MUT 모터의 토크추정

2.2.1 피 시험체 구동토크 추종 알고리즘

VCIM의 토크 발생 메카니즘은 종래의 DC 모터의 토크 발생 메카니즘과 동일하기 때문에 기계적인 방정식은 VCIM의 토크 성분을 토대로 다음과 같이 얻어질 수 있다.

여기서 점선 부분이 없을 경우 모터의 구동 토크 및 부하 토크에 대한 속도식은 식 (2-1)과 같다.

$$\omega_{r2} = \frac{1}{J_2 S} [K_T i_{qs2} - T_L] \quad (2-1)$$

식 (2-1)로부터 모터의 속도 ω_{r2} 는 부하토크 T_L 에 의해 변하게 된다.

그림 2.2는 점선으로 표시된 부하토크 피드 포워드 루프가 있는 속도 제어 블록도를 보여준다. 여기서 T_L 은 알 수 없는 변수이기 때문에, 제어기에서 \hat{T}_L 으로 추정되어져야만 한다. 토크 \hat{T}_L 추정하였다고 가정하면,

$$\omega_{r2} = \frac{1}{J_2 S} \left[K_T (i_{qs2} + \frac{\hat{T}_L}{K_T}) - T_L \right] \quad (2-2) \text{ 으로부터}$$

$$\omega_{r2} = \frac{1}{J_2 s} [K_T i_{q2} + \hat{T}_L - T_L] \quad (2-3)$$

식 (2-3)으로 정리된다. 여기서 추정된 부하토크 \hat{T}_L 와 실제 부하 토크 T_L 가 일치한다면 전동기의 속도는 부하 토크 T_L 에 무관하게 된다. 따라서, 부하 외란 토크 \hat{T}_L 의 영향은 그림 2.2 점선 블록으로 표시된 피드포워드 제어기에 의해서 토크 전류 i_r 로 제거될 수 있다.

따라서, 속도 지령에 대한 속도 응답은 속도 제어기 $G(s)$ 에 의해 결정된 이상적인 제어기로 설정될 수 있다. 본 논문에서 부하토크 관측기는 T_L 를 추정하기 위해 도입되었다. 그래서, MUT의 구동토크 및 PDM의 지령속도는 식(2-4), 식(2-5)와 같다.

$$\hat{T}_e = J_1 d \frac{\omega_n}{dt} + \hat{T}_L \quad (2-4)$$

$$\omega_{em}^* = \frac{1}{J_{em}} \int [\hat{T}_e - T_L] dt \quad (2-5)$$

따라서, 식 (2-18), 식(2-19)으로부터 제어 블록을 구성하면 그림 2.3와 같이 표현된다.

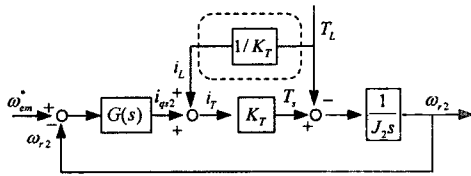


그림 2.1 부하토크 피드포워드 제어기를 갖는 제어블록

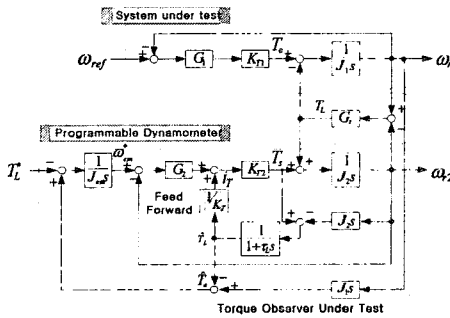


그림 2.2 제한된 PDM 제어블록도

2.2.2 부하토크 관측기에 의해 토크 추정에 의한 속도 응답특성

부하토크 관측기에 의해 토크 추정된 시스템의 제어특성을 알아보기 위해서, 속도지령에 대한 속도 응답과 토크 지령에 대한 부하응답을 전달함수를 나타내었다. 여기에서, 식 (2-6), (2-6)는 Mason 방정식에 따라 Closed-loop 로 구성하면 $L_1 \sim L_9$ 로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} L_1 &= -G_1 K_{n1} / J_1 s & L_2 &= -G_1 / J_1 s \\ L_3 &= -G_1 / J_2 s & L_4 &= -G_2 K_{r2} J_1 / J_2 J_{em} s \\ L_5 &= -G_2 K_{r2} / J_2 s \end{aligned}$$

$$L_6 = \frac{G_2 K_{r2}}{J_{em} s} \frac{1}{r s + 1} \quad L_7 = -\frac{G_2 K_{r2}}{J_{em} s} \frac{1}{r s + 1}$$

$$L_8 = \frac{1}{r s + 1} \quad L_9 = -\frac{1}{r s + 1}$$

$$\Delta_1 = L_1 + L_2 + L_3 + L_4$$

$$\Delta_2 = L_1 L_3 + L_1 L_4 + L_1 L_5 + L_2 L_5 + L_3 L_8 + L_3 L_7$$

$$\Delta_3 = L_1 L_3 L_8 + L_1 L_3 L_7$$

$$\begin{aligned} \frac{\omega_r}{\omega_r^*} &= \frac{G_1 K_{n1} (1 - (L_3 + L_4 + L_5)) / J_1 s}{1 - \Delta_1 + \Delta_2 - \Delta_3} \\ &+ \frac{G_1 K_{n1} (L_3 L_8 + L_3 L_7) / J_1 s}{1 - \Delta_1 + \Delta_2 - \Delta_3} \quad (2-6) \end{aligned}$$

$$\frac{T_L}{T_L^*} = \frac{G_2 K_{r2} G_1 (1 - L_1) / J_{em} J_2 s^2}{1 - \Delta_1 + \Delta_2 - \Delta_3} \quad (2-7)$$

식 (2-6)로 부터 제한된 PDM의 속도 전달함수에 대한 근궤적을 그림 2.4에서 나타내고 있다.

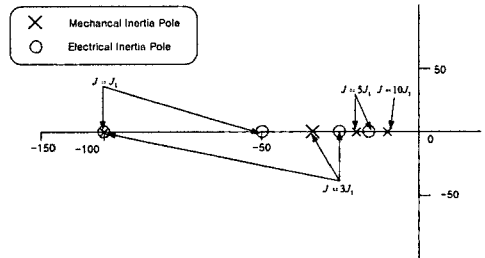
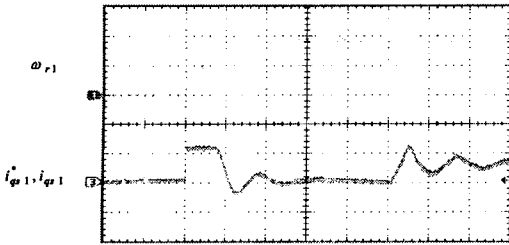


그림 2.3 속도 전달함수에 대한 모의 관성계수 변화시 근궤적 (부하토크 관측기를 이용한 제어방식)

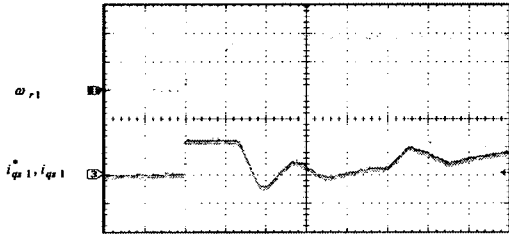
3. 실험 결과 및 고찰

본 논문에서는 제한된 제어방식을 검증하기 위하여 22[kW] 유도전동기 2대를 이용하였다. 인버터는 35[kW] 인버터 2대를 이용하였으며, 인버터에 사용된 주회로 IGBT 소자는 1200[V] 200[A]이다. 인버터에 공급되는 DC 전원은 MUT 인버터와 PDM가 DC bus 로 구성하여 회생시 발생된 전력이 순환하고 DC link 커패시터에 에너지를 저장함으로써 약간의 전압 상승이 나타날 수 있지만, 주전력 공급장치는 드라이브의 손실 분만을 공급할 수 있는 시스템으로 구성하였다. 그리고 제어 알고리즘을 구현하기 위해서 TMS320F240 DSP 를 이용하였다. 벡터제어방법은 회전자 자속기준 벡터제어를 이용하였으며 전류제어루프는 200[μs]마다 동작되며 속도제어루프는 5[ms]마다 제어되도록 하고, 실험에 사용된 encoder는 1024[ppr]로 4채배하여 사용하였다. 그림3.1은 기존의 제어방식에 의한 기동특성 및 부하외란토크에 대한 실험파형으로 관성 모멘트를 3/와 8/로 변화시켰다. 그림에서 볼 수 있듯이 기동특성에서는 속도 점프현상이 비교적 크게 나타나며, 정속도 운전시 부하 외란 토크를 구현하는데 있어서도 만족할만한 특성을 보여주지 못하고 있다.

그림3.2는 부하토크 관측기 및 feedforward 제어에 의한 기동특성 및 부하외란토크에 대한 실험파형으로 시험 조건은 그림 3.3과 같다. 그림에서 볼 수 있듯이 기동특성에서는 속도 점프현상이 기존에 방식에 비하여 비교적 적게 나타나며, 정속도 운전시 부하 외란 토크를 구현하는데 있어서도 안정된 특성을 보여주고 있다. 이러한 결과는 부하토크에 대한 feedforward제어에 의하여 PDM의 빠른 부하토크제어가 가능하기 때문이다. 따라서, PDM의 제어특성을 향상시킬 수 있었다. 그림 3.4는 전기적 관성모멘트를 $J_{em} = 3J$, $J_{em} = 5J$ 그리고 $J_{em} = 8J$ 로



(a) $J_{em} = 3J$ 인 경우 (부하토크 100[Nm])

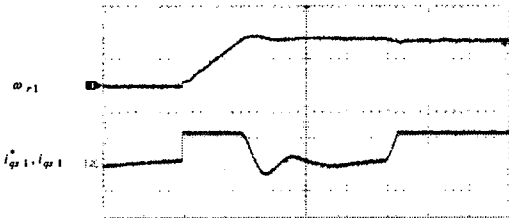


(b) $J_{em} = 8J$ 일 경우 속도 및 토크파형

그림 3.1 기존 제어방식에 의한 MUT의 속도제어



(a) $J_{em} = 3J$ 인 경우 (부하토크 100[Nm])



$J_{em} = 8J$ 일 경우 속도 및 토크파형

그림 3.2 feedforward제어에 의한 MUT의 속도제어

변화시 각각에 대한 속도응답특성 및 스텝 부하구현을 나타내고 있다. 그림에서 기동시에는 관성 모멘트의 증가에 의한 속도 기울기가 변화됨을 보여주고 있으며, 부하토크에 변화에 대해서는 같은 부하응답특성을 보여주고 있음을 볼 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 산업현장에서 가변속구동시스템의 조합 시험을 원활히 수행하기 위한 PDM의 제어 성능 향상에 관하여 연구하였다. 특히, MUT의 구동 토크를 관측하여 기존의 토크 검출기를 이용할 때 발생하는 문제점을 개선하였으며, 근계측을 통하여 PDM의 토크검출기 필터에 의한 영향을 분석하였다. 또한 관측기를 이용하여 부하토크에 해당하는 부하토크 전류를 피드포워드 제어함으로써 보다 우수한 PDM을 구현하였으며 연구결과를 요약하면

다음과 같다.

- (1) 기존의 토크 검출기 사용에 대한 문제점을 개선하기 위해서 부하토크 관측기에 의한 제어방식으로 MUT의 토크 검출 장치를 제거하였다.
- (2) 토크 검출기가 없기 때문에 모터 커플링이 줄게 됨으로써 기계적 강성을 높일 수 있어 토크 진동현상이 양호한 제어응답을 얻었다.
- (3) 선형 또는 비선형 부하에 대하여, 시험자가 원하는 크기의 부하를 구현할 수 있으며, 피드포워드 제어에 의하여 50% 이상의 스텝부하 인가시 토크지령에 대한 정착시간(settling time)을 개선할 수 있었다.

[참 고 문 헌]

- [1] 김길동 외 4명 "벡터제어 유도전동기를 이용한 축소형 관성 시뮬레이터", 2002. 2. pp74-80
- [2] Robert Wendel newton, " A dynamic dynamometer for testing variable speed drives ", IEEE, 1994, pp538-544.
- [3] P. Sandholdt, R.E. Betz., " A dynamometer performing dynamical emulation of loads with nonlinear friction ", IEEE, 1996, pp873-878
- [4] Rober Wendel Newton, Robert E.betz, " Robust speed control of IM with torque feedforward control ", IEEE, 1995, pp465-470.