

플랜트 출력을 이용한 선형모델 추종기 설계

Design of Linear Model Following Controller using the Plant Output

조 내 수, 윤 경 섭, 최 연 호, 권 우 현*

(Nae-Soo Cho, Kyung-Sup Youn, Youn-Ho Choi, and Woo-Hyen Kwon)

Abstract: The linear model following controller (LMFC) scheme controls a plant based on the output of a reference model, thereby replacing a PI controller that has better time response characteristics, which are irrelevant to the structural perturbation of a plant. However, the main weakness of the LMFC scheme is a slow response time to load changes. Thus, to solve this problem, a robust linear model following controller (RMFC) was developed that is robust in load changes. However, when compared with the LMFC scheme, the RMFC scheme has a weaker performance in the case of system parameter changes. Therefore, this paper presents a new LMFC scheme, where the controller is designed based on the output of a plant rather than the output of a model, as in the case of the conventional LMFC scheme. As a result, in the case of load changes, the response characteristics of the proposed scheme are slower than those of the RMFC scheme, yet faster than those of the conventional LMFC scheme, however, for parameter changes, the proposed scheme has a superior performance over the RMFC scheme. The usefulness of the proposed LMFC scheme is verified through a comparison using MATLAB/SIMULINK.

Keywords: PI controller, LMFC, RMFC

I. 서론

산업의 발달과 기술 향상으로 제품의 품질과 산업 생산성 향상을 위해 정밀 속도제어 및 급 가감속 제어가 요구되는 고성능 전동기 구동 시스템의 응용분야가 넓어지고 있다. 이러한 고성능 전동기 구동시스템에 사용되는 속도 및 전류 제어기는 퍼지 제어, 신경망제어, PI 형태제어기 등 많은 제어 기법들이 연구되고 있다[1]. 그 중에서 현재까지도 구현이 쉽고 우수한 특성을 가지는 PI 제어기가 가장 많이 사용되고 있다[2]. 그러나 PI 제어기의 경우 초기에 제어기를 동조시키기 어렵고 시스템 변수들이 시간에 따라 변하거나 시스템의 비선형성이 강한 경우 시간응답특성이 변화되며, 또한 광범위한 부하조건하에서의 안정도를 보장하기 위해서는 제어기 매개변수들의 최적의 조건에서 약간 벗어나게 준동조시킬 필요가 있는데, 이로 인해 제어기 자체의 최적성을 상실하게 만든다[3]. PI 제어기의 이러한 단점을 보완하기 위해 시스템의 변화에 대한 시간응답 특성의 견실성을 확보하면서, 구현의 어려움을 해결하기 위하여 선형요소만으로 구성된 LMFC 방법이 제안되었다[4]. LMFC는 추종해야 할 기준모델 제어를 PI 제어에 의해 상승시간과 오버슈트등을 결정하고, 모델추종제어를 위한 제어기 역시 PI 제어기로 구성하여 사용한다. 그러나 LMFC의 경우 부하 외란에 대한 응답이 느린 단점이 있다[5]. 이 문제점을 해결하기 위해서 부하 외란에 대한 응답특성이 빠른 RMFC가 제안되었다[5]. 하지만 이 방법은 시스템의 파라미터 변화에 대해서 LMFC에 비해 더 큰 진동을 동반하는 문제점을 가진다. 따라서 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해서 기존 LMFC에서 모델의 출력을 제어기의 입력 오차에 사용하는 대신 플랜트의 출력을

제어기의 입력 오차로 사용하는 새로운 LMFC를 제안한다. 제안된 방법은 실제 시스템의 파라미터가 변했을 경우 고정된 모델의 오차가 아니라 변화된 플랜트 오차를 반영함으로써 파라미터 변화에 대해서 기존 LMFC방법 보다 우수한 성능을 보인다. 제안된 LMFC의 유용성을 확인하기 위해서 PI 제어기, 기존 LMFC, RMFC, 제안된 LMFC의 특성을 MATLAB/SIMULINK를 이용해서 주파수 영역 및 시간 영역에서 비교 하고, 그 유용성을 확인한다.

II. 본론

1. PI 제어기 설계[2-5]

그림 1은 PI 제어기를 가지는 전동기 속도제어 시스템을 나타낸다. PI 제어기의 이득은 오버슈트와 상승시간 또는 정착시간 등의 특성을 고려해서 설계하게 된다. 식 (1), (2)에 표준 이차 시스템의 경우 오버슈트와 상승시간과의 관계를 나타내었다.

$$\%OS = e^{\left[\frac{-\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \right]} \quad (1)$$

$$T_r = \frac{1+1.1\zeta+1.4\zeta^2}{\omega_0} \quad (2)$$

여기서 ζ , ω_0 는 각각 감쇄상수와 시스템의 고유주파수 이다. 식 (1), (2)를 이용하여 PI 제어기의 이득을 설계하면 식

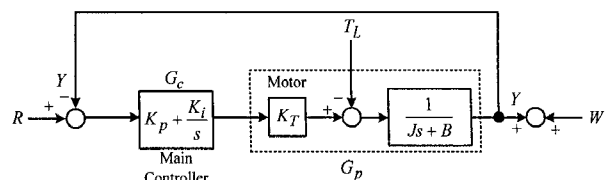


그림 1. PI제어기를 가지는 전동기 속도제어 시스템.

Fig. 1. Motor speed control system with PI controller.

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2009. 4. 7., 채택확정: 2009. 5. 15.

조내수, 권우현: 경북대학교 전자전기컴퓨터학부

(nscho0104@lycos.co.kr/whkwon@ee.knu.ac.kr)

윤경섭: 도립거창대학교 정보전자과(gsyoon@mail.kc.ac.kr)

최연호: 경일대학교 제어전기공학부(yhchoi@kiu.ac.kr)

(3), (4)로 나타낼 수 있다.

$$K_p = \alpha \frac{J\zeta\omega_{sc} - B}{K_T} \quad (3)$$

$$K_i = \beta K_p \omega_{sc} \quad (4)$$

식 (3), (4)로부터 감쇄 정수와 대역폭을 적절하게 선정하여 제어기의 이득을 설정할 수 있으며, ω_{sc} 는 속도제어기의 대역폭이며, α, β 는 시스템 상수의 불일치나 속도응답의 지연 및 전류 제어기와의 간섭 등을 포함한 모델이 고려되지 않은 요소들을 보상하기 위한 조정 계수이다. 따라서 PI 제어기의 경우 최적의 초기 동조가 어렵다. 위의 그림 1로부터 시스템의 입력과 출력 전달함수, 부하 토크를 입력으로 하는 전달함수 및 외란을 입력으로 하는 전달함수 그리고 플랜트 변화에 대한 감도함수를 구하면 식 (5)-(8)로 주어진다.

$$T = \frac{Y}{R} = \frac{G_c G_p}{1 + G_c G_p} \quad (5)$$

$$\frac{Y}{T_L} = \frac{G_p / K_T}{1 + G_c G_p} \quad (6)$$

$$\frac{Y}{W} = \frac{G_c G_p}{1 + G_c G_p} \quad (7)$$

$$S_{G_p}^T = \frac{1}{1 + G_c G_p} \quad (8)$$

2. 모델추종제어기 설계

모델 추종기는 설계 목적에 맞는 성능지수를 적절하게 선정하기 어렵거나, 정확하게 모델링 하기 어려운 시스템을 제어하기 위해 사용될 수 있는 방법이다[4]. 이 제어 방법은 시스템의 변수가 변하거나 외란이 존재하는 경우에도 시스템의 상태가 제어 목적인 모델의 상태를 따르도록 하는 것이다. 여기서 사용되는 모델은 실제 제어시스템의 플랜트와 함께 제어대상으로 간주 되어지며 모델의 상태와 시스템의 상태 사이의 오차를 제거하는 방향으로 제어기를 설계한다.

2.1 기존 LMFC 방법[4]

그림 2는 LMFC를 이용한 모터 속도제어 시스템의 블록도이다. 그림 2로부터 전체 시스템의 전달함수와 부하 전달함수 및 외란 및 플랜트 변화에 대한 감도함수를 구하면 식 (9)-(12)로 주어진다. 여기서 주제어기의 이득 값은 일반적인 PI 제어기의 이득 선정과 같은 방법으로 설정하고, 보조제어

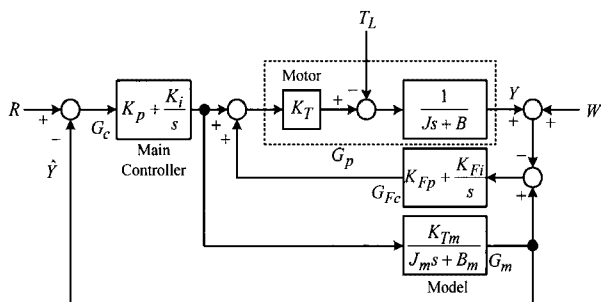


그림 2. 기존 LMFC방법.
Fig. 2. Conventional LMFC method.

기의 이득의 경우 시스템의 제약 조건을 고려하여 응답특성의 허용설계 범위를 만족하도록 설계한다.

$$T = \frac{Y}{R} = \frac{G_c G_p (1 + G_m G_{Fc})}{(1 + G_c G_m)(1 + G_{Fc} G_p)} \quad (9)$$

$$\frac{Y}{T_L} = \frac{G_p / K_T}{1 + G_{Fc} G_p} \quad (10)$$

$$\frac{Y}{W} = \frac{G_{Fc} G_p}{1 + G_{Fc} G_p} \quad (11)$$

$$S_{G_p}^T = \frac{1}{1 + G_{Fc} G_p} \quad (12)$$

2.2 RMFC 방법[5]

그림 3은 RMFC를 이용한 모터속도제어 시스템의 블록도이다. RMFC는 LMFC의 문제점인 부하변화에 대한 응답특성을 개선하기 위해서 모델의 출력과 플랜트 출력의 차이를 강인성 상수 K를 통해서 개선하는 방법이다[6]. 이 방법 역시도 주제어기의 이득 선정은 기존 PI 제어기의 이득 선정방법과 동일하게 선정하면 되고, 보조제어기의 이득 및 강인성 상수 값은 크게 할수록 강인한 설계를 할 수 있으나 시스템의 제약 조건의 범위 내에서 적절하게 선정하면 된다. 그림 3에 대해서도 입출력, 부하변화, 외란, 플랜트 변화에 대한 감도함수에 대해 각각 전달함수를 구하면 식 (13)-(16)으로 주어진다.

$$\frac{Y}{R} = \frac{G_c G_p (1 + K G_m)(1 + G_m G_{Fc})}{\{1 + G_{Fc} G_p + K(1 + G_m G_{Fc})G_p\}(1 + G_c G_m)} \quad (13)$$

$$\frac{Y}{T_L} = \frac{-G_p / K_T}{\{1 + G_{Fc} G_p + K(1 + G_m G_{Fc})G_p\}(1 + G_c G_m)} \quad (14)$$

$$\frac{Y}{W} = \frac{K G_p (1 + G_m G_{Fc}) + G_{Fc} G_p}{\{1 + K(1 + G_m G_{Fc})G_p + G_{Fc} G_p\}} \quad (15)$$

$$S_{G_p}^T = \frac{1 + G_{Fc} G_p}{\{(1 + G_{Fc} G_p) + K(1 + G_m G_{Fc})G_p\}} \quad (16)$$

2.3 제안한 LMFC 방법

그림 4는 기존의 LMFC에서 모델의 출력을 제어입력과 비교하여 오차를 구하고 그 오차를 이용해서 제어기를 설계하

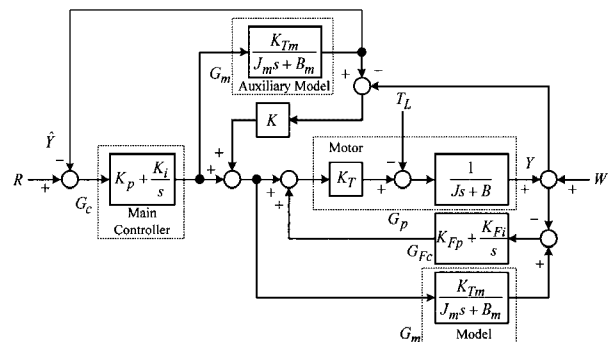


그림 3. RMFC방법.
Fig. 3. RMFC method.

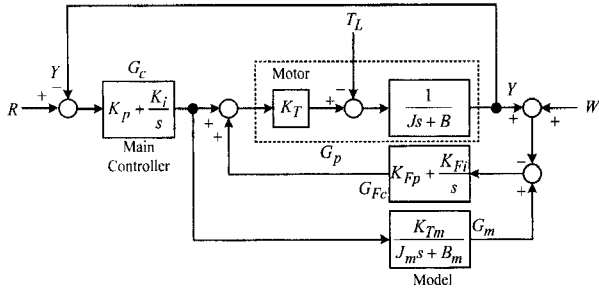


그림 4. 제안한 LMFC방법.
Fig. 4. Proposed LMFC method.

는 대신 플랜트의 출력을 제어입력과 비교하여 오차를 구하고 그 오차를 이용해서 제어기를 설계하는 방법인 제안한 LMFC의 블록도이며, 제안한 LMFC 방법에서 사용한 모델식은 제어 가능한 입력 모델(controlled input model)식이다. 제안한 방법 역시 주제어기 및 보조제어기의 이득 선정 방법은 기존 LMFC와 동일한 방법으로 선정하면 된다. 그림 4로부터 전달함수 및 부하 전달함수, 외란응답 및 플랜트 변화에 대한 감도함수를 구하면 식 (17)-(20)으로 주어진다. 제어기의 입력인 오차를 플랜트 출력을 이용하여 사용함으로써 시스템의 파라미터 변화에 대해서 빠르게 반응할 수 있다.

$$\frac{Y}{R} = \frac{G_c G_p (1 + G_m G_{Fc})}{\{1 + G_{Fc} G_p + G_c G_p + G_c G_p G_m G_{Fc}\}} \quad (17)$$

$$\frac{Y}{T_L} = \frac{-G_p / K_T}{\{1 + G_{Fc} G_p + G_c G_p + G_c G_p G_m G_{Fc}\}} \quad (18)$$

$$\frac{Y}{W} = \frac{G_{Fc} G_p + G_c G_p + G_c G_p G_m G_{Fc}}{\{1 + G_{Fc} G_p + G_c G_p + G_c G_p G_m G_{Fc}\}} \quad (19)$$

$$S_{G_p}^T = \frac{1}{\{1 + G_{Fc} G_p + G_c G_p + G_c G_p G_m G_{Fc}\}} \quad (20)$$

III. 모의실험

제안한 방법의 유용성을 확인하기 위하여 표 1과 같은 값을 갖는 직류 전동기를 이용하여 모의 실험을 수행 하였다.

모의실험의 순서는 먼저 주파수 영역, 다음으로 시간 영역에 대해 PI, 기존 LMFC, RMFC 그리고 제안한 LMFC 순으로 수행 하였다.

그림 5에는 부하 T_L 변화에 대한 속도 응답 특성을 각 방법에 대해 나타내었다. 고주파 영역에서는 네 가지 방법 모두 유사한 특성을 보이나, 저주파 영역에서는 RMFC, 제안한 LMFC, 기존 LMFC, PI 제어기 순으로 부하 변화에 강인한

표 1. 직류 전동기 사양.
Table 1. Specification of DC motor.

Rated	200[W], 40[V], 5[A]
J (Inertia)	0.0003[kg · m ²]
B (Viscous)	0.0003[Nm · sec]
K_T (Torque constant)	0.14785[Nm / A]

정도를 확인할 수 있다. 10Hz 근처에서 볼 수 있듯 제안한 LMFC의 경우 RMFC와 약 -25dB정도, 기존 LMFC와는 40dB정도의 차이를 보인다. 그림 6에는 외란 W 에 대한 속도 응답을 각 방법에 대해 나타내었다. 그림 6에서 알 수 있듯이 저주파 영역에서는 네 가지 방법 모두 유사한 특성을 가지며, 고주파 영역에서는 PI 제어기가 가장 견실한 특성을 보임을 알 수 있다. 그림 7은 플랜트 변화에 대한 감도함수의 응답특성을 나타낸다. 그림 7로부터 고주파 영역에서는 네 가지 방법 모두 유사한 특성을 보임을 알 수 있고, 저주파 영역에서는 제안한 LMFC가 가장 견실한 특성을 보이며, RMFC의 경우 PI 제어기나 기존 LMFC 방법 보다 나쁜 응답 특성을 보임을 알 수 있다.

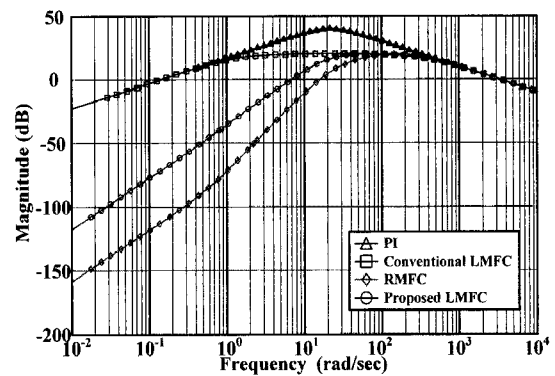


그림 5. 부하 전달함수.
Fig. 5. Load Transfer function.

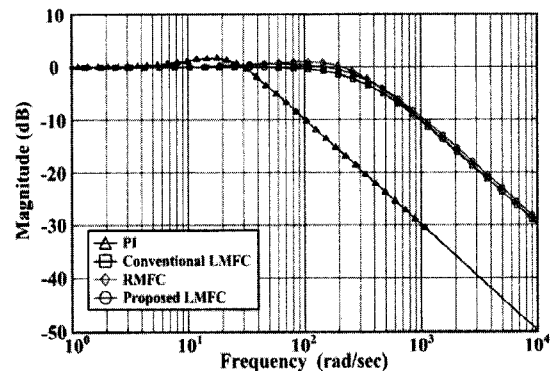


그림 6. 외란 전달 함수.
Fig. 6. Disturbance transfer function.

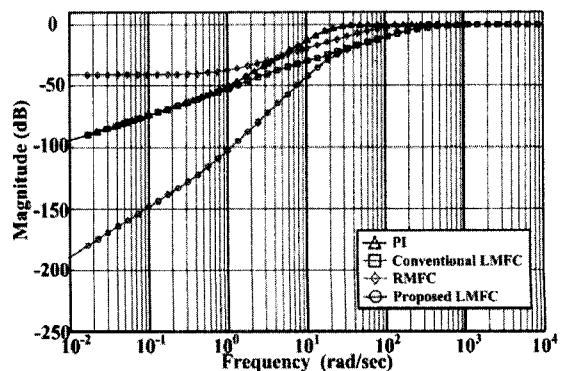


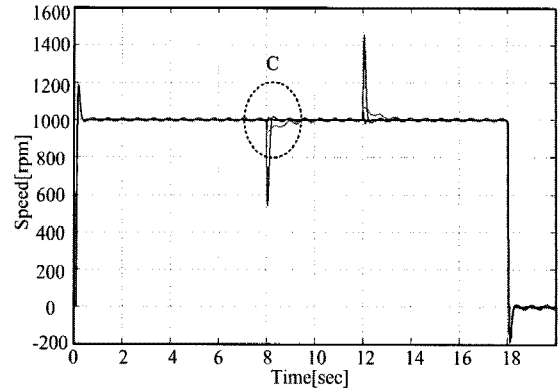
그림 7. 감도함수 응답.
Fig. 7. Response of sensitivity function.

다음은 주파수 영역과 같은 순서로 시간 영역에 대해 네 가지 방법을 비교하였다. 속도 명령은 1000rpm으로 하였으며 부하의 변화는 정격부하를 8초에 인가한 후 12초에 제거하였다. 그림 8-11에는 응답 특성 조사 항목에 대하여 전체 시간에 대한 응답 특성을 나타내고, 관심 영역을 확대하여 나타내었다.

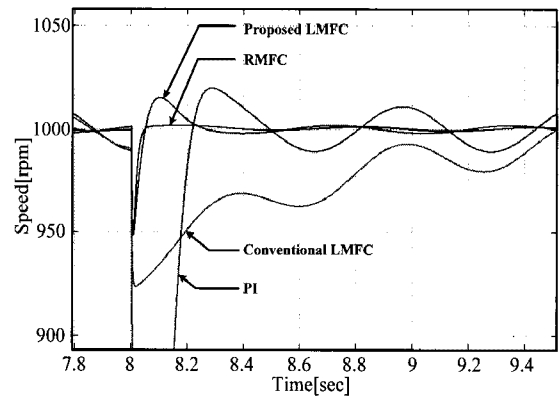
그림 8은 스텝 입력에 따른 응답 특성과 부하변화에 대한 응답 특성을 나타낸다. 스텝 입력에 따른 응답 특성은 그림 8(a)의 A부분에서 알 수 있듯이 네 가지 방법 모두 거의 같은 특성을 가진다. 그러나 부하 변화에 대한 응답 특성은 그림 8(b)에 볼 수 있듯 오버슈트는 RMFC와 제안한 LMFC가 거의 유사하게 나타났으며, 속응성에서는 RMFC, 제안한 LMFC, 기존 LMFC, PI 제어기 순으로 나타남을 확인할 수 있다. 이것은 그림 5의 주파수 영역 특성과 일치한다.

그림 9에는 저주파 외란 특성을 알아보기 위해서 외란의 주파수를 10rad/sec, 크기를 1로 설정한 사인파를 주입 한 후 그 응답 특성을 나타내었다. 그림 9(b)의 응답 특성을 보면 RMFC와 제안한 LMFC의 경우 진동 특성이 유사하게 나타나고, 기존 LMFC와 PI 제어기의 경우 서로 유사한 진동 특성을 가진다.

그림 10은 고주파 외란 특성을 확인 위해 주파수를 1000 rad/sec, 크기 1인 사인파를 외란으로 인가한 응답 특성을 나타낸다. 그림 10(b)에서 알 수 있듯이 PI 제어기가 가장 작은 진동을 가지며 나머지 방법들은 유사한 특성을 가짐을 알 수 있다.



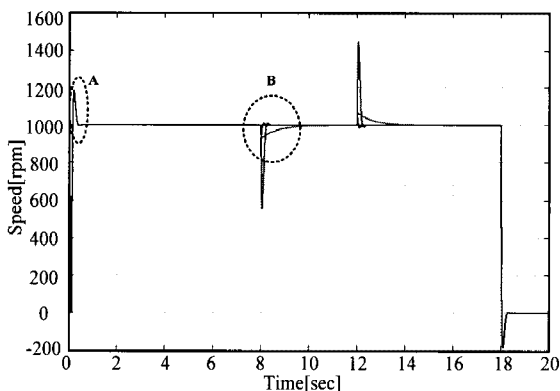
(a) Speed response



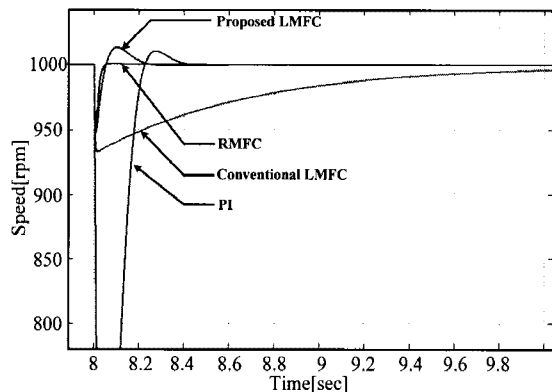
(b) Enlargement of region C

그림 9. 저주파 외란 응답.

Fig. 9. Disturbance response at low frequency.



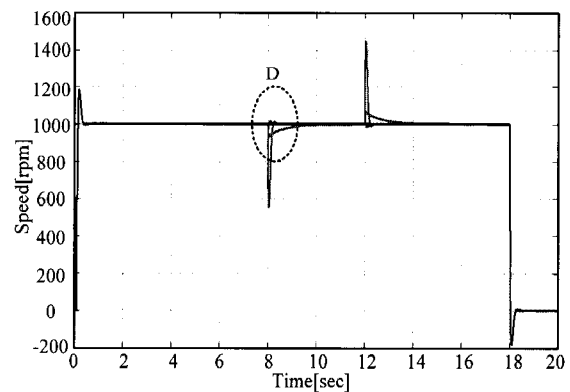
(a) Speed response



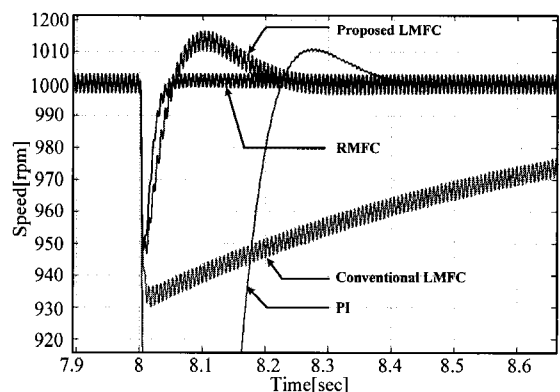
(b) Enlargement of region B

그림 8. 부하변화에 따른 응답.

Fig. 8. Response according to load changes.



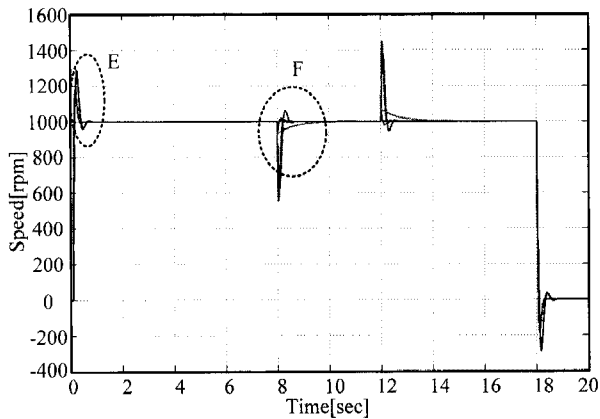
(a) Speed response



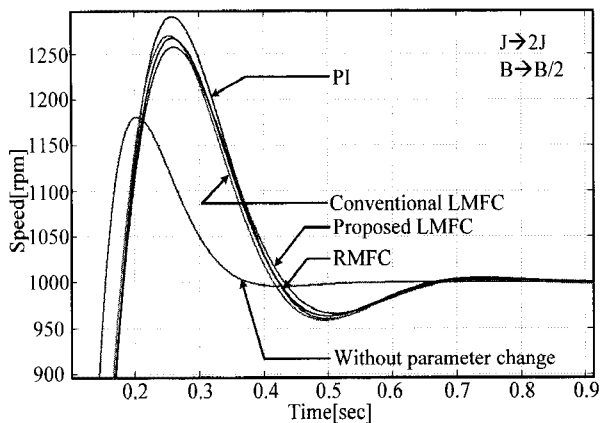
(b) Enlargement of region D

그림 10. 고주파 외란응답.

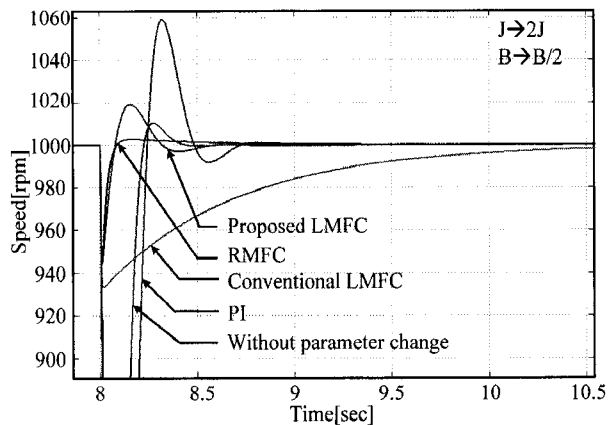
Fig. 10. Disturbance response at high frequency.



(a) Speed response



(b) Enlargement of region E



(c) Enlargement of region F

그림 11. 파라미터 변화에 따른 응답.
Fig. 11. Response according to parameter changes.

그림 11은 시스템 상수 변화에 대한 응답특성을 알아보기 위해 관성계수 J 는 100% 증가 시키고, 마찰계수 B 는 50% 감소 시킨 후의 응답 특성을 나타내었다. 그림 11(b)로부터 알 수 있듯 네 가지 방법 모두 유사한 특성을 가지나, 제안된 LMFC가 가장 작은 오버슈트와 빠른 정착시간을 가진다. 또 부하 변화 부분인 그림 11(c) 부분에서는 제안한 LMFC와 RMFC에 있어서는 파라미터가 변하기 전과 거의 응답 특성의 차이를 볼 수 없다.

모의 실험 결과를 표 2에 정리하여 나타내었다. 여기서 \odot , \circ , \triangle , \times 는 각 항목에 따른 응답 성능의 우수순이다. 표

표 2. 응답특성비교

Table 2. Comparison of response characteristics.

	PI	Conventional LMFC	RMFC	Proposed LMFC
부하 변화	\times	\triangle	\odot	\circ
저주파 외란	\times	\times	\circ	\odot
고주파 외란	\odot	\circ	\circ	\circ
감도 함수	\circ	\circ	\triangle	\odot
파라미터 변화	\triangle	\triangle	\triangle	\circ
구현의 복잡도	\odot	\circ	\times	\circ

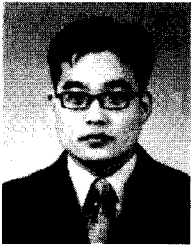
2에서 알 수 있듯이 시스템의 제약 조건에 따라 여러 가지 제어 방법 중 가장 좋은 방법을 선택해서 사용하면 좋은 응답 성능을 기대 할 수 있다.

IV. 결론

본 논문은 PI 형 제어기의 문제점을 해결하기 위해서 등장한 기존 LMFC와 RMFC 및 제안한 LMFC를 비교 하였다. 부하 변화에 대해서는 RMFC가 가장 우수한 특성을 가지며, 저주파 외란과 시스템 파라미터 변화에 대해서는 제안한 LMFC가 가장 좋은 성능을 보임을 모의 실험을 통해서 확인 하였다. 일반적으로 전동기를 이용하는 제어시스템에서는 시스템의 제약조건에 따라 다양한 방법의 제어기법을 선택해서 사용하여야 하며, 여러 가지 제약조건을 모두 고려해야 하는 경우 본 논문에서의 실험 결과 제안된 LMFC를 사용하는 것이 가장 좋은 성능을 유지 할 수 있다. 또 제안한 LMFC는 RMFC에 비해 구현이 간단하며, 제어 시스템의 특별한 변형 없이 기존 LMFC를 그대로 사용할 수 있는 장점을 가진다.

참고문헌

- [1] J. S. Yu, S. H. Kim, B. B. Lee, C. Y. Won, and J. Hur, "Fuzzy-logic-based vector control scheme for permanent-magnet synchronous motors in elevator drive applications," *IEEE transactions on Industrial Electronics*, vol. 54 Issue 4, Aug. pp. 2190-2200, 2007.
- [2] G. Franklin and J. D. Powell, Abbas Emami-Naeini, *Feedback Control of Dynamic Systems*, 5th Ed., Prentice hall, 2006.
- [3] K. J. Astrom and T. Hagglund, "Automatic tuning of PID controllers," *Instrument Society of America*, 1988.
- [4] K. Furuta and K. Komiya, "Design of model following controller," *IEEE Transactions on AC-27*, no. 3, pp. 725-727, June, 1982.
- [5] 윤경섭, 이치환, 권우현, "직류전동기에서 저주파 부하 외란에 강인한 선형 모델추종제어기 설계," *전자공학회 논문지* 35권 T편, 1호, pp. 82-89, June 1998.
- [6] H. J. Wu and Y. Y. Tzou, "LGG/LTR robust control of an AC Induction servo drive," *IEEE PESC conference*, pp. 613-619, 1991.
- [7] K. C. Hong and K. H. Nam, "A load torque compensation scheme under the speed measurement delay," *IEEE Transactions on industrial electronics*, vol. 45, no. 2, April 1998.



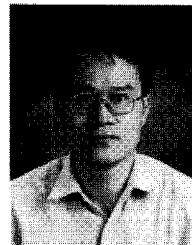
조 내 수

2001년 경일대학교 제어계측공학과졸업(공학사). 2003년 경북대학교 대학원 전자과 졸업(공학석사). 2005년 경북대학교 대학원 전자과(박사수료). 2005년~2008년 경일대학교 제어 전기 공학부 초빙교수. 2008년~2009년 경북대학교 공과대학 전자전기컴퓨터학부 초빙교수. 2009년~현재 경북대학교 전자과 시간강사. 관심분야는 전력전자, DSP 응용제어, 임베디드시스템.



최 연 호

1992년 경북대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1995년 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사). 2002년 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학박사). 1996년~1998년 한국통신 근무. 2003년~2004년 (주)비주얼텍 근무. 2006년~현재 경일대학교 제어전기공학부 전임강사. 관심분야 전력전자, 전동기 제어, 영상응용제어. 마이크로프로세서응용제어.



윤 경 섭

1991년 경북대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1993년 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사). 1998년 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학박사). 1997년~현재 경남도립거창대학 부교수. 관심분야는 전력전자, 센서 응용제어.

권 우 현

제어 · 로봇 · 시스템학회 논문지 제15권 제3호 참조.