

Lock in Amplifier 기법을 이용한 주기적 외란을 갖는 DC 전동기의 적응제어

정상철\*, 조현철\*\*, 김준수\*, 안영주\*, 이형기\*

부경대학교 제어계측공학과\*, 동아대학교 전기공학과\*\*,

Adaptive control of DC motors with periodic disturbance using signal modulation approach

Sang Chul Jeong\*, Hyun Cheol Cho\*\*, Jun Su Kim\*, Young-Joo An\*, Hyung Ki Lee\*

Dept. of Control & Instrument Engineering, Pukyong National University\*  
Dept. of Electrical Engineering, Dong-A University\*\*

**Abstract** - 전동기나 발전기와 같은 회전기에 주로 발생하는 주기외란은 시스템 성능을 저하시키는 특성으로서 고급제어시스템 구현을 위하여 반드시 보상되어야 한다. 본 논문은 신호처리기법의 일종인 Lock In Amplifier(LIA) 알고리즘 기반 외란보상 제어기를 제안한다. 제안하는 제어규칙은 공칭제어기와 보조제어기로 구성되며 전자는 외란을 고려하지 않은 시스템 모델에 대하여 상태폐환 제어기법으로 산출되며 후자는 LIA 기법을 이용하여 외란특성을 실시간으로 추정하여 연산되어진다. 제안하는 제어시스템은 기존의 결정적 외란으로부터 발생되었던 실시간 제어오차를 월등히 개선하는 장점을 가지고 있다. 실시간 전동기 제어장치를 통해 제안하는 알고리즘의 성능의 우수성 및 타당성을 검증한다.

1. 서 론

주기적 외란은 발전기나 전동기와 같은 회전기에 주로 발생하는 기계적인 특성으로서 최상의 제어시스템 성능을 위하여 필수적으로 보상되어야 한다. 특히, 최근 정보기기의 발전으로 인하여 컴퓨터의 하드디스크나 DVD와 같은 데이터 저장기기의 성능을 개선하기 위하여 주기적 외란을 보상하는 고급제어에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 대부분의 연구는 주기적 외란으로 인한 시스템의 정상상태 오차를 억제하기 위한 적응 및 강인제어기법에 치중하고 있다[1]-[4]. 또한, 냉각기의 회전기와 같은 기계시스템의 주기적 진동외란을 억제하기 위하여 기계적 동특성을 기존의 선형시스템 및 제어이론에 적용하여 외란을 보상하는 제어시스템을 구성하였다[5][6]. 최근에는 기존의 소규모 회전기와는 달리 대전력 및 대규모의 회전기 시스템에서 발생하는 주기적 외란을 억제하기 위한 고급제어알고리즘이 발표되었다[7]-[11].

주기외란에 대한 회전기 제어에 대한 대부분의 연구는 주파수 해석기법을 적용하여 제어시스템을 설계한다. 이러한 기법들은 주기적 외란을 정현파 신호로 모델링하여 전달함수를 설정한 후 외란에 대한 보상을 설정한다. 주파수 기법을 통한 이러한 제어기 설계는 주기외란의 주파수 및 위상이 설계단계에서 주어지거나 가정되어지고 또한 시불변(time-invariant) 특성으로 간주되어진다. 하지만, 실제 시스템 구현에 있어 이러한 외란특성은 차이가 있으며 특히 천천히 변화는 시변특성도 함께 지니고 있다. 따라서 실시간에서 제어성능의 개선을 위하여 정확한 외란에 대한 모델이나 정보가 추정되어야 하며 이러한 추정된 외란을 바탕으로 제어기가 적응형으로 구성되어야 한다.

본 논문은 신호처리 기법중의 일종인 Lock In Amplifier(LIA) 기법을 이용하여 주기외란을 추정한 제어시스템을 구성한다. LIA은 일반적으로 노이즈가 포함된 신호에서 소신호를 검출 또는 필터링에 주로 사용되어진다. 본 논문에서 LIA는 시변특성의 외란을 추정하는데 사용되어지며 이러한 추정외란 정보는 외란억제 보상을 위한 제어시스템 구현에 적용된다. 제안하는 제어시스템은 공칭제어와 LIA 기반 보조제어로 구성되어진다. 공칭제어는 외란을 고려하지 않은 공칭시스템 모델을 이용하여 구성되어지며 보조제어는 외란을 보상하기 위한 목적으로 설계되어진다. LIA에서 외란에 대한 주기 및 위상은 실시간으로 추정되어 보조제어 입력의 연산에 이용된다. 제안한 제어알고리즘은 DC 전동기의 기계적 주기외란의 억제를 위하여 적용하였으며 그 제어성능을 분석하여 타당성을 검증하였다.

2. 주기외란 시스템 모델

주기적 외란특성을 갖는 전동기 시스템의 수학적 모델을 다음과 같은 선형 상태방정식으로 표현한다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) + d(t) \end{aligned} \tag{1}$$

여기서  $x \in R^n$ 와  $u, d, y \in R$ 은 시스템 상태, 입력, 외란 그리고 출력 변수를 각각 나타내며  $A \in R^{n \times n}$ ,  $B \in R^{n \times 1}$ ,  $C \in R^{1 \times n}$ 은 상태행렬, 입력행렬 그리고 출력행렬이다. 시스템 제어입력  $u(t)$ 는 공칭입력과 보조입력의 선형조합으로 구성되며 다음과 같이 표현된다.

$$u(t) = u^*(t) + \Delta u(t) \tag{2}$$

여기서  $u^*(t)$ 는 공칭제어입력으로서 외란특성을 고려하지 않은 시스템 모델을 이용하여 산출되며,  $\Delta u(t)$ 는 외란특성을 보상하기 위하여 실시간으로 연산되어지는 보조제어기로서 구성된다. 외란을 고려하지 않은 상태에서 구해지는 공칭제어기는 기존의 상태폐환 제어기법을 적용하여 다음과 같이 쉽게 구할 수 있다.

$$u^*(t) = r - Kx(t) \tag{3}$$

여기서  $r \in R$ 은 설정치,  $K \in R^{1 \times n}$ 는 제어행렬을 나타낸다. 식 (3)의 공칭제어규칙을 식 (2)에 대입한 후 식 (1)에 적용하면 새로운 시스템 상태모델은 다음과 같다.

$$\dot{\tilde{x}}(t) = \tilde{A}\tilde{x}(t) + B\Delta u + \tilde{r} \tag{4}$$

여기서  $\tilde{A} = A - BK$ 은 새로운 상태행렬로서 제어행렬에 의해 결정되어지며,  $\tilde{r} = Br$ 은 상수로서 정의된다. 식 (4)에 선형시스템 이론을 적용하여 알맞은  $K$ 를 설정하여 안정한 상태행렬을 산출할 수 있으며  $\Delta u = 0$ 일 경우 이 때 시스템 상태  $x$ 는 설정치  $r$ 로 수렴하게 된다. 하지만 시스템 외란으로 인하여 시스템 상태는 정확하게 설정치로 수렴하지 않으며 정상상태에서 시스템 편차를 발생한다. 이러한 경우 보조제어입력  $\Delta u$ 를 적절하게 설정하여 외란에 대한 편차를 보상하여야 한다. 하지만, 최적의 외란보상을 위하여 외란에 대한 모델 또는 정보를 추정하여야 하며 특히 주기외란에 대하여 외란의 주기 또는 위상을 잘 알아야 고급 제어성능을 기대할 수 있다.

3. LIA 기반 외란보상 제어알고리즘

일반적으로 LIA는 노이즈가 검출되는 신호스펙트럼에서 소신호를 검출 또는 필터하기 위하여 사용되는 신호처리기법으로서 기존의 주파수 해석이 아닌 시간영역에서 신호를 변조할 수 있는 장점이 있다. 본 절은 이러한 LIA기법을 이용하여 주기외란을 모델하고 그 특성을 추정하는데 적용되며 이러한 정보는 2절에서 구성한 외란을 보상하기 위한 제어시스템 설계에 이용된다.

주기외란에 대한 정상상태 오차를 주파수  $\omega_X$ 와 위상  $\theta_X$ 를 갖는 다음의 정현파 함수로 표현할 수 있다.

$$e = X \sin(\omega_X t + \theta_X) \tag{5}$$

또한 LIA 신호를 생성하기 위하여 식 (5)와 유사한 정현파 신호를 다음과 같이 정의한다.

$$\zeta = \sin(\omega_\zeta t + \theta_\zeta) \tag{6}$$

식 (5)와 식 (6)의 두 신호를 서로 곱하면

$$\gamma = X \sin(\omega_X t + \theta_X) \sin(\omega_\zeta t + \theta_\zeta) \tag{7}$$

가 되며 식 (7)을 삼각함수 이론을 적용하여 전개하면 다음과 같다.

$$\gamma = 0.5X \cos((\omega_X - \omega_\zeta)t + \theta_X - \theta_\zeta) \tag{8}$$

$$- 0.5X \cos((\omega_X + \omega_\zeta)t + \theta_X + \theta_\zeta)$$

식 (8)에서 기준신호의 주파수와 위상을 가변하여  $\omega_\zeta = \omega_X$ 와  $\theta_\zeta = \theta_X$ 가 될 경우 LIA 신호는 다음과 같이 된다.

$$\gamma = 0.5X(1 - X\cos(2\omega_c t + 2\theta_c)) \quad (9)$$

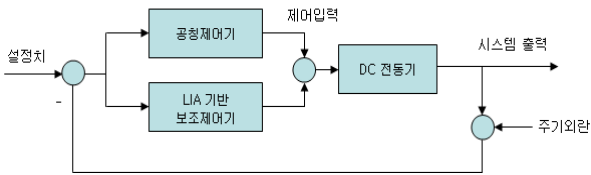
식 (9)에서  $2\omega_c$ 의 차단주파수를 갖는 저역통과필터(LPF)를 적용하면 다음과 같은 DC성분만 남게 된다.

$$\gamma = 0.5X \quad (10)$$

식 (10)은 원 신호의 주기성분을 제거한 순수한 DC성분 신호로서 이러한 필터링 과정을 3장에서 언급한 주기 외란을 억제하는 제어시스템에 적용할 수 있다. 즉, 식 (4)의 보조제어규칙은 LIA 알고리즘을 통해 추정된  $\hat{\omega}_c$ 와  $\hat{\theta}_c$ 의 정현파 함수로 정의되며 다음과 같다.

$$\Delta u(t) = \alpha \sin(\hat{\omega}_c t + \hat{\theta}_c) \quad (11)$$

여기서  $\alpha$ 는 상수이다. 결론적으로, 주기성분을 지니고 있는 오차신호에 대하여 이에 대응되는 보조제어입력을 인가하여 출력의 주기외란을 억제하는 방식이다. 그림 1은 이러한 제어방식에 대한 블록선도를 보여준다.



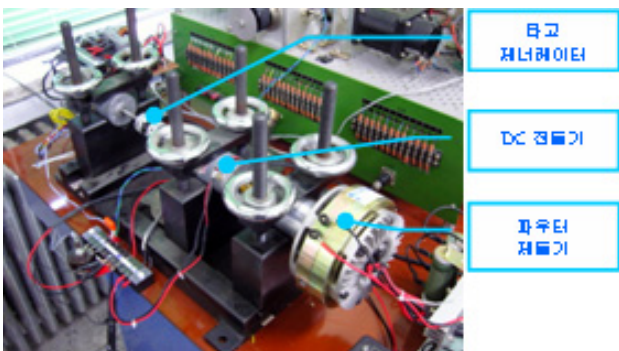
<그림 1> LIA 기반 제어알고리즘

#### 4. 실시간 실험 및 결과 고찰

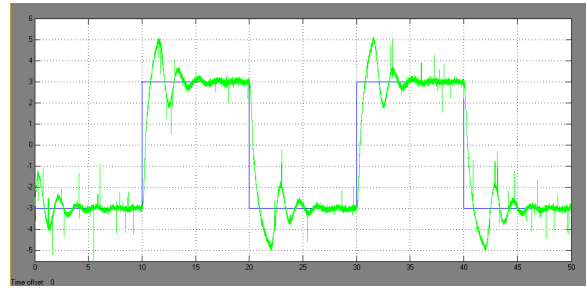
본 논문에서 구성한 주기외란을 갖는 DC 전동기 실험장치는 그림 2와 같다. 구성한 실험장치의 주요구성은 PC, DC 전동기, 속도 검출을 위한 타코 제너레이터(tach generator), 비틀림 스프링, 전동기 구동용 전력증폭기와 실시간 데이터 취득보드로 이루어져 있다. DC 전동기는 회전판을 통해 주기적 외란을 발생하는 기계적 장치인 파우더 제동기와 연결되어 있다. 제어신호처리를 위한 하드웨어 보드는 고속연산을 위한 DSP 프로세서와 A/D 및 D/A 컨버터를 내장하고 있다. PC에서 Matlab/Simulink 프로그램을 통해 DSP 프로세서를 통해 외부 디바이스들의 신호들을 PC의 PCI 버스를 통해 데이터가 인터페이스가 이루어진다. 전동기 구동회로는 임베디드용 하드웨어 구성이 가능한 PSoc 기술을 이용하여 제작하였으며 PC의 전동기 제어신호를 PSoc 회로에 설계된 신호변환기에 의하여 PWM 형태로 변환된 후 전력증폭기를 통해 전동기 구동신호를 산출한다. 한편, 기계적 주기외란은 파우더 제동기에 의해 발생되며, 적절한 크기와 주기를 갖는 정현파 신호가 신호증폭기에 의해 생성되어 제동기의 구동입력으로 적용된다. DC 전동기는 [1]에서 구성한 동일한 사양으로 하였으며 따라서 식 (1)의 시스템 모델에서 상태 및 제어행렬은 다음과 같다.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 50 \\ -200 & -200 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 200 \end{bmatrix} \quad (12)$$

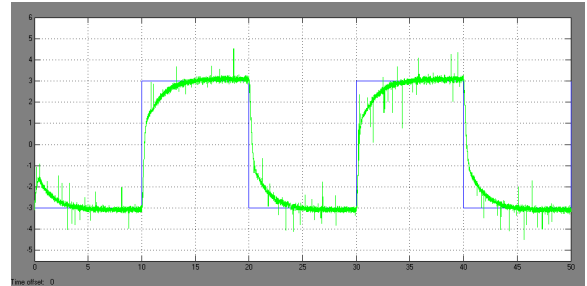
또한 선형시스템 이론을 적용하여 식 (3)의 제어행렬을  $K = [1.5 \ 0.7]$ 로 선정하였다. 그림 3은 제안한 제어시스템 응답과 PI 제어기에 대한 응답파형을 비교하였다. PI 제어의 경우 주어진 제어시간 동안 감소하는 진동을 보이고 있으며 제안하는 제어시스템의 경우 오버슈트 현상을 전혀 발생하지 않으며 주어진 설정치에 바람직하게 도달함을 알 수 있다.



<그림 2> 구성한 실제 DC 전동기의 실험장치



(a) PI 제어시스템 응답파형



(b) 제안한 제어시스템 응답파형

<그림 3> 시스템 응답파형

#### 5. 결 론

본 논문은 주기외란을 갖는 DC 전동기의 적응제어시스템을 제안하였다. 구성된 제어기는 공칭제어와 보조제어기로 구성되며 공칭제어기는 외란을 고려하지 않은 공칭 시스템 모델로부터 해석적으로 구해진다. 주기외란을 보상하기 위하여 부가적으로 적용되는 보조제어기는 LIA 기법을 이용하여 구성된다. LIA 기법은 주기외란을 모델링하는데 사용되어지며 추정된 정보는 보조제어입력을 산출하는데 사용되어진다. 제안한 제어알고리즘의 타당성을 검증하기 위하여 실시간 전동기 실험을 실시하였다. 주기외란은 파우더 제동기를 이용하여 기계적 외란을 발생하였다. 실험결과로부터 기존의 제어기법보다 우수함을 알 수 있었다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] A. Sacks, M. Bodson, and P. Khosla, "Experimental results of adaptive periodic disturbance cancellation in a high performance magnetic disk drive," *American Control Conference*, pp. 686-690, 1993.
- [2] J.-J. Liu, and Y.-P. Yang, "Comparison of AFC and FACT method for periodic disturbance suppression in optical disk drives," *IECON*, pp. 1987-1992, 2004.
- [3] M. R. Graham, and R. A. de Callafon, "An iterative learning design for repeatable runout cancellation in disk drives," *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, vol. 14, no. 3, pp. 474-482, 2006.
- [4] M. Nagashima, K. Usui, and M. Kobayashi, "Rejection of unknown periodic disturbances in magnetic hard disk drives," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 43, no. 9, pp. 3774-3778, 2007.
- [5] A. P. Rijpmma, J. F. C. Verberne, E. H. R. Witbreuk, P. C. Bruins, and H. J. M. ter Brake, "Adaptive periodic disturbance cancellation in a set-up of two cryocoolers," *J. of Sound & Vibration*, vol. 217, no. 3, pp. 419-434, 1998.
- [6] Y. L. Xu, "Adaptive algorithm for cancellation of quasi-periodic perturbation in web winding system," *Int. Conf. on Machine Learning & Cybernetics*, pp. 721-725, 2005.
- [7] L. J. Brown and Q. Zhang, "Periodic disturbance cancellation with uncertain frequency," *Automatica*, vol. 40, no. 4, pp. 631-637, 2004.
- [8] B. Wu and M. Bodson, "Direct adaptive cancellation of periodic disturbances for multivariable plants," *Proc. of the IEEE Conf. on Decision & Control*, vol. 3, pp. 3079-3084, 2002.
- [9] M. Bodson, "Rejection of periodic disturbances of unknown and time-varying frequency," *Int. J. of Adaptive Control & Signal Processing*, vol. 19, no. 2-3, pp. 67-88, 2005.
- [10] Z. Ding, "Asymptotic rejection of general periodic disturbances in output-feedback nonlinear systems," *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 51, no. 2, pp. 303-308, 2006.
- [11] C. Duan, G. Gu, C. Du, and T. Chong, "Robust compensation of periodic disturbances by multirate control," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 44, no. 3, pp. 413-418, 2008.