

영구자석형 동기전동기의 주기적인 외란 제거를 위한 반복제어기 제어

최동민, 조영훈
건국대학교 전력전자연구소

Repetitive Control for rejecting periodical disturbance of PMSM

Dong-Min Choi, Younghoon Cho
Power Electronics Lab. Konkuk Univ

ABSTRACT

This paper proposes a permanent magnet synchronous motor(PMSM) control using a repetitive controller. Repetitive controllers are often used to eliminate periodic disturbances. Based on this, it is possible to alleviate the torque disturbance occurring at a constant cycle to the load of the motor. This paper proposes a method of rejecting periodically generated disturbances by using a repetitive controller and verified by simulation.

1. 서 론

PMSM은 전기자동차나 발전기 등 많은 영역에서 사용되는 전동기 중 하나이다. 이를 효과적으로 구동시키기 위한 많은 제어방법들에 대한 연구들이 진행되어 왔는데, 그 중에서 전동기의 속도제어 또한 중요한 부분 중 하나이다. 이러한 제어를 진행할 경우, 부하나 외부의 요인에 의해 일정한 기계적인 각도마다 주기적인 토크의 외란이 존재하게 되면, PMSM은 계속해서 속도의 리플이 발생하게 된다. 이때, 발생하는 오차는 등속제어 시 일정한 주기를 가지고 발생하게 되고, 이를 해결하기 위해 반복제어기가 가장 많이 사용된다. 반복제어기는 Internal Model Principle을 기반으로 하는 제어기로 주기적인 입력이나 오차를 다루는데 효과적이다.^{[1] [3]}

본 논문은 위치 기반 반복제어기를 설계하여 일정한 기계각마다 발생하는 토크외란에 의한 속도의 리플을 완화하였고, 이를 모의실험을 통해 검증하였다.

2. 반복제어기 원리 및 설계

반복제어기의 원리는 Internal Model Principle을 기반으로 한다. 이 원리를 적용하기 위해서는 다음의 두 조건이 성립되어야 한다.

- 조건 1) 폐루프 시스템이 점진적으로 안정화된다.
- 조건 2) 시스템의 개루프 전달함수는 요구되는 지령 입력을 만드는 수학적 모델을 포함한다.

조건 2)에 대한 설명으로 정현파 형태의 지령 입력에 대해 오차를 0으로 만들기 위해서는 정현파 입력 모델 $\frac{As}{s^2 + \omega^2}$ 가 개루프 전달함수에 포함되어 있어야 한다.

$$G_O(s) = \frac{N_O(s)}{D_O(s)}, \quad R(s) = \frac{As}{s^2 + \omega_0^2} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} E(s) &= \frac{R(s)}{1 + G_O(s)} = \frac{D_O(s)R(s)}{D_O(s) + N_O(s)} \\ &= \frac{D_O(s)}{(s - \mu_1)(s - \mu_2) \cdots (s - \mu_m)} \frac{As}{(s^2 + \omega_0^2)} \\ &= \frac{a_1}{s - \mu_1} + \cdots + \frac{a_m}{s - \mu_m} + \frac{b_1}{s - j\omega_0} + \frac{b_2}{s + j\omega_0} \quad (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b_1, b_2 &= [s \mp j\omega_0 E(s)]_{s = \pm j\omega_0} \\ &= \frac{D_O(\pm j\omega_0)}{D_O(\pm j\omega_0) + N_O(\pm j\omega_0)} \frac{A}{2} \quad (3) \end{aligned}$$

$G_O(s), R(s)$ 가 각각 개루프 전달함수, 입력일 때, 정현파 입력에 대한 오차를 0으로 만들기 위해서는 (2)의 $b_1, b_2 = 0$ 으로 만들어야 한다. 이를 위해 $D_O(\pm j\omega_0) = 0$ 이어야 한다.

위의 경우를 반복제어기에 적용하면, 반복적인 오차 입력의 전달함수를 개루프 전달함수가 포함하고 있다면, 주기적인 에러 신호를 효과적으로 제거할 수 있다.

2.1 반복제어기 설계를 위한 모델링

PMSM이 회전할 때, 전동기의 일정 각마다 부하에서 주기적으로 발생하는 토크에 의한 속도의 리플을 줄이기 위해서는 시간에 따른 토크의 변화가 아닌 회전자의 위치에 따른 토크의 변화에 따라 제어가 응답하여야 한다. 이를 위해서 시간에 관계없이 일정한 위치를 나타낼 수 있는 변수가 필요하게 된다. 이때, 변수를 k_1 이라 하고, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$k_1 = \text{floor}\left(\frac{N\theta_m(t_k)}{2\pi}\right), \quad k_1 \in [0, N-1] \quad (4)$$

이때, N 은 기계각의 선택된 분해능으로 정의되고, $\theta_m(t_k)$ 은 시간에 따른 위치, floor함수는 소수점 자리를 내림한 정수를 나타낸다. 이를 기준으로 시간에 따른 토크의 에러를 계산한 뒤 위치에 따른 토크의 에러값으로 환산한다. 이때, 토크의 추정값은 관성모멘트와 마찰계수를 이용하여 구할 수 있다.

$$T_e^{est}(t_k) = \frac{J^{est}(\omega_r(t_k) - \omega_r(t_{k-1}))}{T_s} + B^{est}\omega_r(t_k) + T_e^{ref}(t_k) \quad (5)$$

$$T_e^{err}(t_k) = T_e^{ref}(t_k) - T_e^{est}(t_k) \quad (6)$$

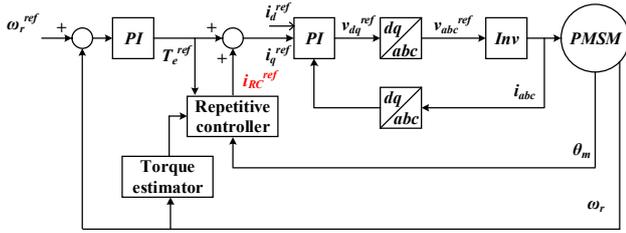


그림 1 제어기의 블록다이아그램
Fig. 1 Block diagram including repetitive controller

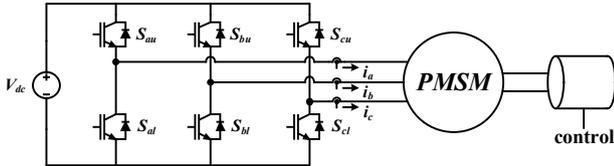


그림 2 전동기 구동 회로
Fig. 2 Circuit of motor driving

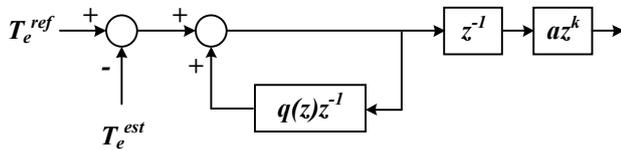


그림 3 반복제어기의 블록다이아그램
Fig. 3 Block diagram of repetitive controller

$$T_{err}(k_1) \quad (7)$$

$$= T_e^{err}(t_{k-1}) + \frac{T_e^{err}(t_k) - T_e^{err}(t_{k-1})}{\theta_m(t_k) - \theta_m(t_{k-1})} [\theta_m(k_1) - \theta_m(t_{k-1})]$$

식(7)과 같이 전개된 값을 그림 3의 입력으로 사용하여 회전자의 위치에 따른 반복제어기를 구현 할 수 있다. 구현된 반복 제어기의 출력은 다시 시간에 따른 값으로 환산하여 q축의 전류 지령과 합산되어 전류제어가 진행된다.

2.2 반복제어기의 모의실험 및 분석

그림 1은 모의실험에 사용한 반복제어기가 포함된 제어기의 구조를 나타낸 것이다. 속도제어기의 출력으로부터 토크의 지령값을 얻고, 전동기의 속도로부터 토크의 추정값을 얻어 오차를 구한 뒤 각도를 기반으로 하는 반복제어기의 출력이 q축 전류지령에 더해지는 것을 볼 수 있다. 그림 2는 전동기 구동 회로를 나타낸 것이다. 일정 기계각마다 발생하는 토크의 외란은 외부에서 제어 토크제어가 가능한 부하를 이용하여 구현하였다.

표 1은 모의실험에 사용되는 전동기의 제정수의 값을 정리한 표로 N의 값은 전동기의 정격 속도와 스위칭 주파수를 통하여 결정하였다

표 1 전동기 및 반복제어기의 제정수
Table 1 Parameters of motor and repetitive controller

관성모멘트(J)	0.02021[kg·m ²]
마찰계수(B)	0.001
극수(P)	20
전동기의 정격속도(w_r)	1000 [rpm]=16.666 [Hz]
N	600=10k/16.666
샘플링 주파수(f_s)	10 [kHz]
샘플링 주기(T_s)	16.666 [s]

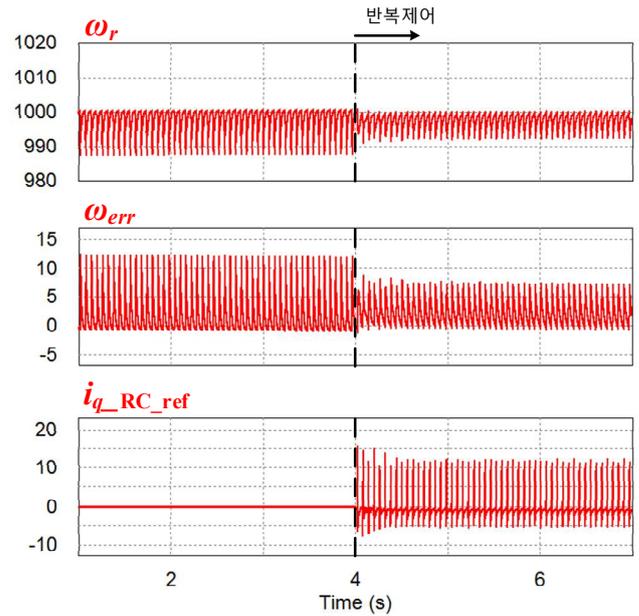


그림 4 모의실험 실험파형
Fig. 4 Simulation results

그림 4는 PMSM을 등속으로 제어할 때, 주기적인 토크의 외란으로 12.83[rpm]의 속도의 리플이 발생하다가 4s부터 반복제어기를 동작시켰을 때, q축 전류가 추가됨으로서 속도의 리플이 7.74[rpm]으로 감소하고 오차 또한 감소하는 것을 볼 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 외부의 주기적인 토크 외란으로 인한 속도의 리플을 완화하기 위하여 반복제어기를 원리부터 설계까지 유도하였고, 이를 PSIM을 이용하여 모의실험을 진행하였다. PMSM의 정격속도로 제어시 반복제어기를 적용했을 경우와 하지 않았을 경우에 대한 속도 리플을 각각 확인 하였다.

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20174030201660) 이 성과는 2017년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.2017R1C1B2009425).

참 고 문 헌

- [1] Fukuda, Shoji, and Takehito Yoda. "A novel current tracking method for active filters based on a sinusoidal internal model [for PWM invertors]." IEEE Transactions on Industry Applications 37.3 (2001): 888-895.
- [2] Tang, Mi, et al. "A variable frequency angle based repetitive control for torque ripple reduction in PMSMs." (2016): 6-6.
- [3] 김재한, 목형수, 최규하, 이진우, 정교범, 이정민, & 조영훈. (2007). 반복제어기를 적용한 단상 계통연계형 인버터의 전력품질 개선. 전력전자학회논문집, 11-14.