

# 영구자석 동기 전동기의 토크 리플 저감을 위한 고조파 토크 피드포워드의 실시간 추적

이준형, 이준, 하정익  
서울대학교

## On-line Tracking of Harmonic Torque Feedforward for Torque Ripple Reduction of PMSM

Junhyeong Lee, Jun Lee, and Jung-Ik Ha

Department of Electrical Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea

### ABSTRACT

영구자석 동기 전동기는 높은 효율과 전력 밀도 등의 장점 때문에 자동차나 엘리베이터 등 다양한 산업 분야에서 사용되고 있다. 영구자석 동기 전동기의 구동에는 여러가지 이유로 인해 고조파 토크 리플이 존재한다. 이러한 토크 리플은 속도 리플을 유발하여 소음이나 진동의 원인이 되며, 그 분포가 전동기의 구조나 운전점에 따라 변화하기 때문에 제어 성능에 매우 큰 영향을 준다. 본 연구에서는 영구자석 동기 전동기의 운전점에 따라 변화하는 토크 리플을 상쇄하기 위해 주입할 최적의 고조파 토크를 실시간으로 추적하는 방법을 제안한다. 제안된 방법에서는 속도 제어 중 토크 리플에 의해 발생하는 속도 리플을 적분하여 평가지표로 삼고, 속도 리플이 감소하는 방향으로 주입할 고조파 토크의 크기와 위상을 조정한다. 이 방법은 제정수 추출이나 회전자의 위치 별 토크 테이블 없이 운전 조건의 변화에 따라 토크 리플의 최적 보상점을 추적한다는 장점이 있다. 제안된 방법의 효과는 시뮬레이션을 통해 검증되었다.

### 1. 서 론

영구자석 동기 전동기는 높은 효율과 전력 밀도, 토크 밀도 등의 장점 때문에 자동차나 엘리베이터, 항공 등 다양한 산업 분야에서 사용되고 있다. 한편 영구자석 동기 전동기의 구동에는 필연적으로 고조파 토크 리플이 존재한다. 토크 리플의 원인으로는 회전자와 고정자 코어의 슬롯이 유발하는 인덕턴스나 역기전력의 고조파 성분으로 인한 코깅 토크의 발생, 자기 포화 현상으로 인한 인덕턴스 변화, 전류 제어기의 한계로 인한 고조파 전류 등이 있다. 토크 리플은 회전자의 전기각 회전 위치의 고조파로 나타나는데, 특히 6, 12, 18 고조파 성분의 크기가 지배적이다. 이러한 토크 리플은 속도 리플을 유발하여 소음이나 진동의 원인이 되며, 그 분포가 전동기의 구조나 운전점에 따라 변화하기 때문에 제어 성능에 매우 큰 영향을 준다.

토크 리플 저감을 위해서 진행된 연구는 크게 전동기 설계에 대한 연구와 전동기 제어 기법의 연구로 나뉜다. 전동기 설계 단계에서는 토크 리플을 최소화 하도록 하는 고정자, 회전자의 구조에 대한 연구들이 진행되어왔다<sup>[1]</sup>. 그러나 이러한 연구들은 전동기 제조 과정에서 추가적인 비용이 발생하거나, 전동기

자체의 효율이 감소한다는 단점이 있다. 한편 기존에 진행된 전동기 제어 기법의 연구로는 전동기를 모델링 및 운전 조건과 전동기의 구조를 고려한 제정수를 추출하여, 추출한 제정수를 기반으로 제어기를 설계하는 연구가 진행되어왔다<sup>[2]</sup>. 그러나 정밀한 제정수 추출은 어렵기도 하며, 많은 시간이 소요된다. 또, 시스템의 노후화나 부하 상황에 따른 제정수 변동에는 취약하다는 단점이 있다.

이러한 점들을 고려할 때, 장기간 유효한 토크 리플 상쇄 성능 확보를 위해서는 제정수 변화에 영향을 받지 않는 토크 리플의 최적 보상점 추적 기법이 필요하다. 본 논문에서는 속도 제어 시스템에서 토크 리플 상쇄를 위해 주입할 최적 고조파 토크의 실시간 추적 기법을 제안한다. 속도 제어 중 제어기가 회전자의 전기각 회전 속도의 6, 12, 18 고조파에 해당하는 고조파 토크를 주입하고, 전동기 동작의 성능을 속도 관측기로 평가하여 그 성능이 개선되는 방향으로 계속해서 고조파 토크를 주입하는 기법이다. 토크 주입 알고리즘은 섭동-관찰 (Perturbation & Observation, P&O) 기법을 기반으로 하며, 성능 평가의 지표로 속도 오차의 적분 값을 활용한다. 이 방법은 제정수 추출이나 회전자의 위치 별 토크 테이블 없이 운전 조건의 변화에 따라 토크 리플의 최적 보상점을 추적한다는 장점이 있다. 제안된 방법의 효과는 시뮬레이션을 통해 검증되었다.

### 2. 본 론

#### 2.1 전동기 제어 시스템

그림1(a)는 속도 관측기를 동반한 기존의 영구 자석 동기 전동기의 구동 시스템을 나타낸다. 이 시스템에서는 속도 관측기가 엔코더 혹은 레졸버로부터 측정된 전동기 회전자의 위치로부터 외란 토크를 추정하고, 추정된 외란 토크를 그대로 속도 제어기의 출력 토크 지령에 보상한다. 그러나 속도 관측기의 외란 토크 추정은 측정된 회전자의 위치를 적분함으로써 이루어지기 때문에, 이러한 시스템에서는 전동기의 구동 속도가 빨라질수록 추정되는 외란 토크는 그 크기와 위상이 왜곡되어 이를 그대로 보상할 경우 제어 성능이 나빠진다<sup>[3]</sup>.

그림1(b)는 제안하는 영구 자석 동기 전동기의 구동 시스템을 나타낸다. 속도 관측기가 외란을 추정할 뿐만 아니라 전동기의 성능을 평가하고, 이 평가를 기반으로 토크 리플 보상기의 출력 값을 조정하여 속도 제어기의 출력 토크 지령에 보상하도록 한다. 속도 관측기의 전동기 성능 평가 지표로 사용하는 속도 오차의 적분값,  $\Omega$ 를 다음과 같이 정의한다.

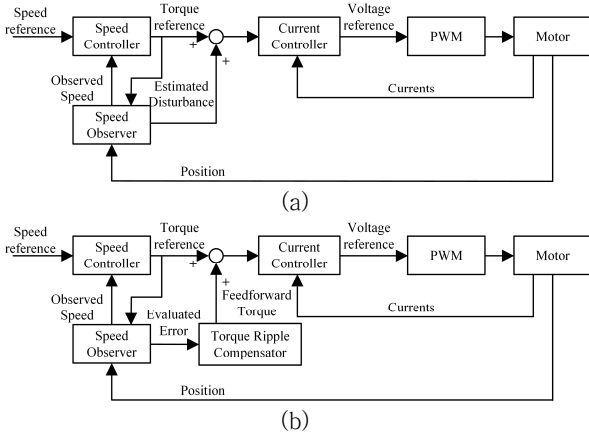


그림1. (a) 기존의 속도 제어 시스템. (b) 토크 리플 보상이 추가된 제안하는 시스템

Fig1. (a) Conventional speed control system (b) Proposed speed control system with additional torque ripple compensator

$$\Omega = \sqrt{\int \omega_{err}^2 dt} / T_{rev} \quad (1)$$

여기서  $\omega_{err}$ 은 속도 오차,  $T_{rev}$ 은 회전자의 1회전 동안 걸린 시간이다. 토크 리플이 회전자의 전기각 위치의 고조파임을 고려하여 적분 시간은 회전자의 1회전 시간으로 한다. 한편 토크 리플 보상의 출력  $T_{ripple,ff}$ 는 다음과 같다.

$$T_{ripple,ff} = \sum_{k=1}^3 [T_{6k} \cos(6k\theta_r) + T_{6kq} \sin(6k\theta_r)] \quad (2)$$

이 때  $\theta_r$ 은 회전자의 전기각 위치이고,  $T_{6k}$ ,  $T_{6kq}$ 는 각각 토크 리플 보상이 조정하는 값이다.  $T_{ripple,ff}$ 는  $\theta_r$ 에 대한 6, 12, 18 고조파 성분의 합이며  $T_{6kd}$ ,  $T_{6kq}$  값을 조정함으로써 그 크기와 위상이 결정된다. 토크 리플에는 다른 고조파 성분도 포함 되어 있지만, 전류제어기 동작의 한계를 고려하여 해당 고조파 성분들만 피드포워드 한다.

## 2.2 토크 리플 보상 알고리즘

그림2는 토크 리플 보상이 동작하는 알고리즘을 나타낸다. 속도 제어 시작 후 출력 토크가 일정해지면 먼저  $T_{6kd}, T_{6kq}$ 를 초기화한다. 토크 리플은 속도 관측기에서 외란 토크로 관측되므로, 이 때 초기화하는  $T_{6kd}, T_{6kq}$ 의 값은 속도 관측기가 추정한 외란 토크를 푸리에 변환하여 얻을 수 있다. 단, 앞서 언급 되었듯이 관측기가 추정한 외란 토크는 속도 관측기의 대역폭과 외란 토크의 주파수에 따라 그 크기와 위상이 왜곡되어 나타난다. 이를 상쇄하기 위해  $T_{6kd}, T_{6kq}$ 의 초기화 후 추가적으로  $T_{6kd}, T_{6kq}$ 를 P&O 알고리즘을 기반으로 하여 조정한다.

먼저 전기각 1회전 동안의 속도 오차를 적분하여  $\Omega$ 를 계산한 뒤  $T_{6d}$ 를  $\Delta T_{6d}$ 만큼 증가시킨다. 그 뒤 다시 전기각 1회전 동안의 속도 오차를 적분하여 새롭게 얻은  $\Omega$ 가 기존의  $\Omega$ 보다 감소했을 경우,  $T_{6d}$ 를 증가시키는 것이 성능을 개선시켰다고 판단하여 다시  $T_{6d}$ 를 증가시킨다. 이를 반복하다가  $\Omega$ 가 증가하면,  $T_{6d}$ 를 성능이 최대로 개선되었을 때의 값으로 되돌린 뒤  $\Delta T_{6d}$ 의 부호를 바꾸어 이후의  $T_{6d}$  조정 방향을 반대로 한다. 그리고  $T_{6q}$ 에 대해 이와 같은 동작을 수행하고,  $k$ 가 변화함에 따라  $T_{12d}, T_{12q}, T_{18d}, T_{18q}$ 에 대해 순차적으로 이를 반복한다. 결과적으로  $\Omega$ 가 최소가 되도록 하는  $T_{ripple,ff}$ 를 얻을 수 있다.

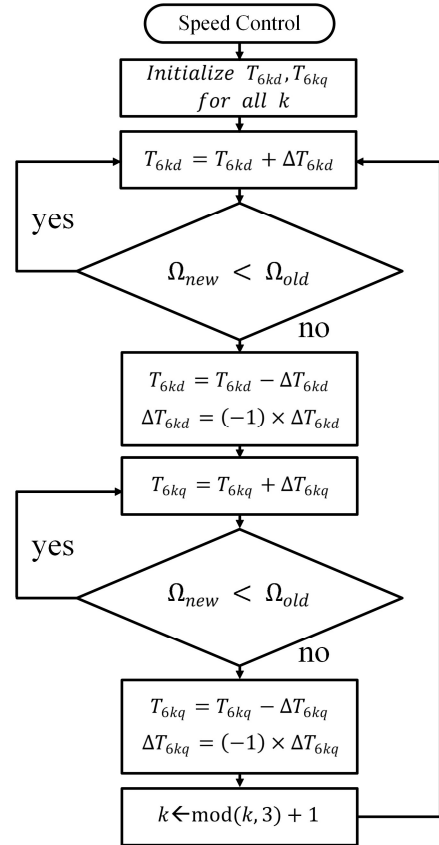


그림2. 제안하는 토크 리플 보상의 P&O 알고리즘

Fig2. P&O Algorithm of proposed torque ripple compensator

## 2.3 시뮬레이션

제안한 토크 리플 보상 알고리즘의 성능 검증을 위해 PLECS를 이용해 영구자석 동기 전동기의 속도 제어 모의 실험을 수행하였다. 임의의 토크 리플을 모의하기 위해 전동기에는  $\theta_r$ 의 6, 12, 18 고조파에 해당하는 임의의 외란 토크를 주입하였다.

그림3은 이러한 시뮬레이션 환경에서의 속도 제어 결과를 나타낸다. 속도 지령은 20rpm으로 선정하였는데, 이는 전동기가 관성 부하이므로 고속 운전시에는 토크 리플이 잘 나타나지 않는다는 점과 속도 관측기가  $\theta_r$ 의 18 고조파를 관측할 수 있어야 한다는 점을 고려한 것이다. 한편 그림3의  $\omega_{rm}$ ,  $\omega_{rm,est}$ ,  $T_{ripple}$ ,  $T_{ripple,ff}$ ,  $T_{est}$ 는 각각 실제 전동기 회전자의 회전 속도, 속도 관측기로 추정한 회전자의 회전 속도, 임의로 모의한 토크 리플, 토크 리플 보상이 주입하고 있는 고조파 토크, 속도 관측기가 추정한 외란 토크이다.

그림3(a)에서 앞서 언급된 바와 같이  $T_{est}$ 는  $T_{ripple}$ 과 그 크기와 위상이 약간의 차이가 있음을 확인할 수 있다. 그 결과  $T_{est}$ 를 푸리에 변환하여 얻은  $T_{6kd}, T_{6kq}$ 를 적용한  $T_{ripple,ff}$  주입시 속도 리플이 기존의 50% 이하로 감소하지만 한계가 있다. 이후 P&O 알고리즘을 진행하면서  $T_{6kd}, T_{6kq}$  값을 조정함에 따라  $T_{ripple,ff}$ 가  $T_{ripple}$ 을 추적한다.

그림3(b)는 P&O 알고리즘이 수렴한 이후의 시점을 확대한

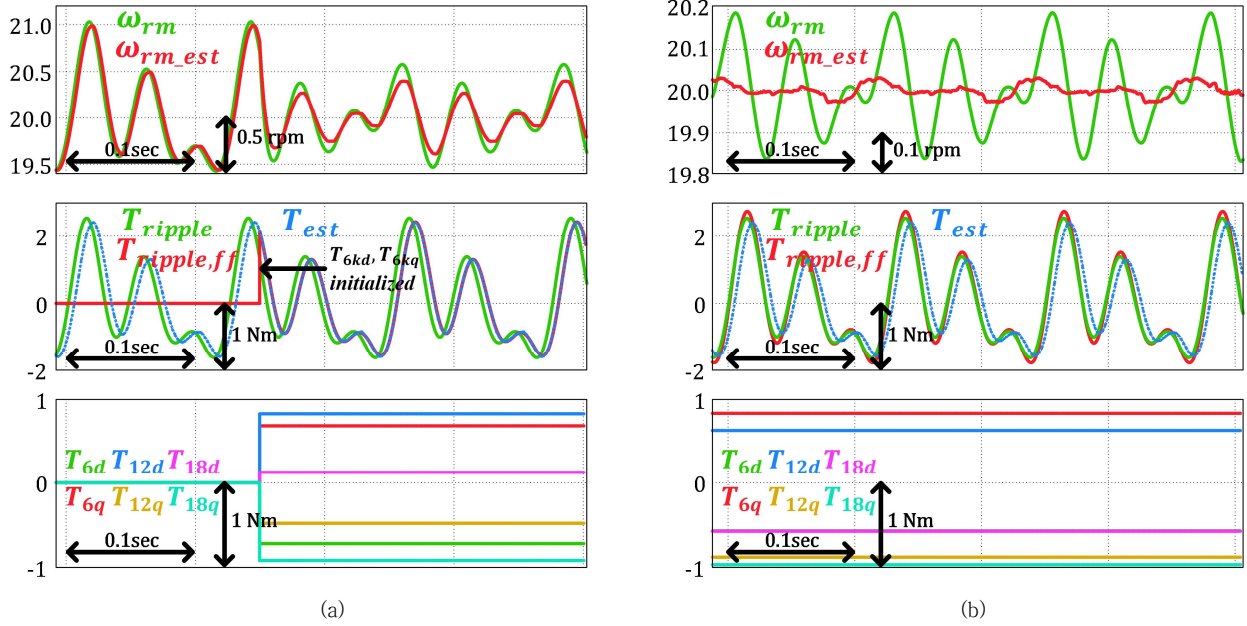


그림3. 시뮬레이션 결과 (a) 고조파 토크 피드포워드 직후 (b) P&O 알고리즘 수렴 후  
 Fig3. Simulation result (a) Immediately after harmonic torque feedforward (b) After P&O algorithm converged

것으로,  $T_{ripple,ff}$ 의 위상과 크기가  $T_{ripple}$ 에 거의 수렴하였으며 속도 관측기로 추정된 속도 리플은 토크 리플 보상을 하기 전의 10% 이하로 감소하였음을 확인할 수 있다. 수렴 후에도 나타나는  $T_{ripple,ff}$ 와  $T_{ripple}$ 의 근소한 차이는  $\Delta T_{6d}$ ,  $\Delta T_{6q}$ 가 연속적이지 않기 때문에 발생한 것이다.

한편, 토크 리플 보상기의 수렴 후 회전자의 실제 속도인  $\omega_{rm}$ 의 리플은 속도 관측기가 추정된 속도  $\omega_{rm,est}$ 의 속도 리플보다 크게 나타난다. 이는 속도 관측기의 대역폭에 따라 속도 리플의 고주파수 성분을 속도 관측기가 관측하지 못함 때문으로 보인다.

### 3. 결론

본 논문에서는 영구자석 동기 전동기의 구동시 토크 리플을 상쇄하기 위해 주입할 최적의 고조파 토크를 실시간으로 추적하는 방법을 제안하였다. 제어 중 토크 리플에 의해 발생하는 속도 리플의 적분 값을 평가지표로 하여 이것이 감소하는 방향으로 주입할 고조파 토크의 크기와 위상을 조정하는 알고리즘을 제시하였고, 시뮬레이션을 통해 토크 리플을 상쇄하는 것을 확인하였다.

이 논문은 2019년도 BK21플러스 사업에 의하여 지원되었음

### 참고 문헌

- [1] X.Zhu and W.Hua, "An Improved Configuration for Cogging Torque Reduction in Flux-Reversal Permanent Magnet Machines", IEEE Trans. Magn., vol. 53, No.6, pp.1-4, 2017, Jun.
- [2] M.J.Nam, J.H.Kim, K.Y. Cho, and H. W. Kim, "Torque Ripple Reduction of an Interior PM Synchronous Motor

by Compensating Harmonic Currents Based on Flux Linkage Harmonics", J. Power Electron, vol. 17, No.5, pp.1223-1230, 2017.

- [3] J. Lee and J. Ha, "Harmonic torque reduction using adaptive sector-based torque feedforward method for PMSM", in Proc. IEEE Energy Convers. Congr. And Expo. (ECCE), Portland, OR, USA, pp.5473-5478, 2018.