

TBM 회생기동법에서의 속도리플 제거를 위한 실제적 문제 해결에 관한 연구⁺

(A Study on Practical Problem Solving for Speed Ripple Rejection
in TBM with Regenerative Startup)

김 태 규^{1)*}, 서 정 원²⁾
(TaeKue Kim and JeongWon Seo)

요 약 본 논문에서는 TBM(Tunnel boring machine) 시스템의 기동 특성향상을 위해 기존에 제안되었던 회생기동방법에 대한 실제적으로 발생하는 문제점을 분석하고, 이에 대한 해결방법을 제안한다. 기존의 연구결과에서 나타나는 속도리플 문제를 해결하기 위하여, 우선 시스템 상에서의 발생하고 있는 문제점을 분석하고, 이를 보완할 수 있는 방법을 제시하였다. 개선된 방법을 실제 시스템에 적용하여 기존의 시스템 결과와 비교함으로써 제안된 방법이 효과적임을 검증하였다.

핵심주제어: 터널 보링 머신, 회생기동, 속도리플, 신호처리 시스템, 벡터제어

Abstract In this paper, we analyze the practical problems of the regenerative start method proposed to improve the starting characteristics of the TBM(Tunnel boring machine)system and propose a solution. In order to solve the speed ripple problem in the previous research results, we first analyze the problems occurring in the system and propose a method to compensate for them. By applying the improved method to the actual system, we compared the results with the conventional system and verified the effect of the proposed method.

Keywords: Tunnel boring machine, Regenerative-starting, Speed ripple, Signal processing system, Vector control

1. 서 론

* Corresponding Author: teakueda@changwon.ac.kr

+ “본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음. (과제번호19SCIP-C129646-03)” (과제명 : TBM 커터헤드 설계자동화 및 운전·제어 시스템 개발, 과제고유번호 : 1615011051 세부과제번호 : 129646)

Manuscript received Novemverr 06, 2019 / revised December 03, 2019 / accepted December 06, 2019

1) 창원대학교 전기공학과, 제1저자, 교신저자

2) 이엠코리아(주) 기술연구소, 제2저자

TBM(Tunnel boring machine)은 국내 모기업에 의해서 최초로 국산화되었으며, 현재 중·대단면 (직경 8m급 이상) TBM에 대한 설계 기술 및 운전 제어 시스템 기술개발이 진행 중이다. TBM 관련 기술력 부족으로 인해, 세계적인 기술 추세를 따라가지 못하고 있고, 부적절한 장비 및 시공법 등으로 인해 문제가 발생하고 있다. 그 중 터널을 굴착하는데 필요한 Cutter head 설계 기술과 이를 구동하는 대용량 전동기 구동 기술이 가장 핵심이라고 볼 수 있다(Kim, 2019).

대용량 전동기를 구동하기 위해서는 우선적으로 전체적인 전기설비 설계 및 제작도 중요하지만, 전동기 기동시 전동기는 2차측이 단락된 변압기 상태와 같으므로 정격전압을 인가하면 5-8배 가량의 큰 기동전류가 발생하고, 이 기동전류 및 전압강하가 전기설비에 소손 및 고장을 발생시킬 수 있는 문제를 사전에 방지할 수 있는 기술을 적용하여야만 한다 (Daekyeong, 2018) 특히 TBM 장비는 지하에서 작업을 하며, 다른 장비들도 모두 전기설비 시스템에 통합되어 있으므로, 이러한 현장 작업 특성도 고려하여 수변전 전기설비에 영향을 최소화할 수 있는 기동방법이 반드시 필요하다. 이를 해결하기 위하여 이전 Le et al. (2018)의 연구에서는 Phase shift 컨버터를 이용하여 전류제어기법을 적용하여 전류제어 특성을 개선하는 것을 제안하였으며, Lee (2016)에서는 분야는 다소 다르지만, 임피던스 특성을 고려한 기동전류 개선방법을 제안하였다. 그리고 이전 Kim et al. (2019)의 연구에서는 TBM장비 기동시 발생하는 기동전류를 개선하는 방법으로 회생전력을 이용한 기동방법을 제안하였다. 그 결과 기존의 기동방식에 비해 기동전류가 50% 이상 줄어드는 효과를 확인하고 검증하였다. 그러나, 회생전력 발생을 위해 감속과 기동을 하는 구간에서 모터에서 발생하는 토크 리플로 인하여 속도변동이 심하게 발생하는 현상이 나타났다. 본 논문에서는 이 문제를 해결하기 위하여 기존에 제안하였던 시스템 구동 방식에서의 문제 원인을 규명하고, 이를 보완하여 시스템의 응답 특성을 개선하고자 하였다.

가장 먼저 제기되어진 문제점은 신호처리 시스템이다. 감속과 기동을 하는 부분은 짧은 시간에 많은 특성이 변하는 과도상태이기 때문에, 이때, 시스템의 상태를 감지하고 전달하는 부분에 있어, 감쇄 또는 신호의 위상지연이 발생하는 경우, 신호처리 제어 시스템의 부정확한 신호처리로 인하여 제어시스템 출력 오류가 나타날 수 있다. 다음 제기된 문제점으로는 전력변환 시스템에서 전원부족현상으로 인한 문제이다. 이는 TBM의 기동 또는 회생기동시 전원측의 보호 동작을 위해 전압 또는 전류 리미트에 의한 필요에너지 부족에 의한 오류가 나타날 수

있다. 본 논문에서는 이러한 부분에서 나타날 수 있는 문제점과 원인에 대해서 분석하고 이를 검증하고 보완하는 방법에 대하여 연구하였다.

2. 기존의 제안된 기동방법 및 특성

2.1 제안된 기동 방법

일반적으로 사용되는 유도전동기의 기동방식은 부하의 종류, 특성, 용량 등을 고려하여 선정하도록 한다. 기동방식은 크게 인가되는 전압에 따라 구분하게 되며, 전원전압을 최대 인가하는 직입기동 방식과 기동전류를 낮추기 위하여 다른 결선이나 전기소자를 이용하여 전압을 감압하여 인가하는 방법이 있다. 기동방식에 대한 종류 및 특성은 Kim et al. (2019) 연구에 수록되어 있다.

TBM 구동설비는 Cutter head를 구동하는 주 설비와 후방에서 주 설비를 보조하는 보조설비로 이루어진다 (Daekyeong, 2018) 개발사양에 따라 Cutter head는 여러 대로 구성되며 Cutter head를 구동하는 유도전동기는 모두 Cutter driver에 설치되어 운전된다. 만약 Cutter head가 8대로 구성이 된다면, 한 대당 약 200-300kW급으로 총 2MW 급에 달한다. 후단에 설치되는 후방 설비들(Compressor, water pump, 이송설비 등)을 포함하며, 총 전기설비의 용량은 5MW급에 달할 수 있다. 이에 대한 전기 설비의 산정과 변압기 선정도 매우 중요한 설계 요소 중 하나이다 (Daekyeong, 2018). 특히 대부분의 설비들이 전동기 방식으로 구동하기 때문에 기동시에 발생하는 큰 기동전류 문제를 해결하지 않으면, 설비용량 산정이나 보호설비 설계에 큰 어려움을 겪게 된다 (Son, 2016).

앞서 언급하였던 기동방식에 따라 용량별로 적절한 기동방식을 선정하는 것은 중요하다. 용량이 큰 전동기들의 구동은 직입기동, 리액터 기동, 와이-델타 기동, 소프트 스타터 기동 등의 방식으로는 기동시 발생하는 기동실패, 계통 전압 강하 등의 문제를 해결하기 어렵다. 따라서 인버터를 이용한 기동 방식이 가장 적합하다

(Kim et al., 2018). 그러나 여러 대의 구동기가 일시에 구동하거나, 다른 구동기가 기동상태에서 기동이 된다면 마찬가지로 문제를 일으킬 가능성이 크다. 따라서 이러한 기동시 발생할 수 있는 해결책으로서 기존 연구에서는 회생제동 전력을 이용한 전략적 기동방안에 대하여 제시하였다 (Kim et al., 2019). 하나의 전동기가 운전 중 제동을 하게 되고, 그 제동에 의한 에너지를 또 다른 전동기의 기동 전력을 사용하는 방법이다. 따라서 처음 운전되는 전동기는 기동 후 완전히 정지하는 것이 아니라, 부하토크의 최저점에서 동작하도록 하면 제동토크의 총량이 거의 최대에 달하게 된다 (Kim et al., 2019). 이후 2번 전동기 기동 후 다시 재가속시 기동토크가 빠지고 최저 부하점에서 운전을 할 수 있게 된다. 1번 전동기는 최저 부하점으로 제동시키고, 2번 전동기는 회생전력을 이용하여 기동하도록 하는 운전 전략으로 구동하는 것이다.

2.2 기존 방법에서의 문제점

TBM 구동에 있어서 감속시 발생하는 회생전력을 새롭게 기동하는 전동기의 기동전류로 사용하는 방법은 기동전류의 크기를 낮추는 효과를 가져 오지만, Fig. 1에서 보는 바와 같이, 전환시점에서 진동이 심하게 나타나는 결과가 도출되었다.

실험결과, 회생 기동을 하는 전동기가 추가될 수록 점점 더 심해지는 것을 확인하였다. 여기서 과도 응답시 신호 처리 시스템 상에서 발생할 수 있는 문제점에 대하여 분석하였다. 특히, TBM과 같이 굴착용 전동기 시스템은 용량이 큰 유도전동기를 사용하고, 효율적인 인버터 제어를 위하여 좌표변환법과 벡터 제어 (Vector Control) 시스템을 이용하여 교류성분을 직류성분으로 변환하여 제어할 수 있도록 한다. 이러한 좌표변환에 의한 전동기의 벡터 제어시스템의 경우, FOC (Field oriented control) 또는 벡터 제어를 적용하기 위해서, Fig. 2와 같이 직류 입력전압 (V_{DC}), 상전류로부터 d-q 좌표변환을 통한 각 상전압 (V_{as}^* , V_{bs}^* , V_{cs}^*)과 전류센서로

부터 입력되는 상전류 (i_{as} , i_{bs} , i_{cs}), 회전자 위치 정보 ($\omega_{r,m}$)를 이용한다. 따라서 시스템 상의 전압, 전류 정보가 왜곡되거나, 신호처리 시스템 상에서 위상지연이 발생할 경우, 제어 시스템 상의 응답 특성에 영향을 미치게 된다.

유도전동기에서 벡터제어를 하기 위해서는 슬립과 전류정보를 파악하는 것이 중요하다 (Sul, 2016) 유도전동기의 슬립 각속도는 수식 (1)과 같다.

$$\omega_e - \omega_r = \omega_{sl} = -\frac{R_r i_{qr}^e}{\lambda_{dr}^e} \tag{1}$$

$$= \frac{R_r}{\lambda_{dr}^e} \frac{L_m}{L_r} i_{qs}^e = \left[\left(1 + p \frac{L_r}{R_r} \right) \frac{1}{i_{ds}^e} \right] \frac{R_r}{L_r} i_{qs}^e$$

수식 (1)로 부터 고정자측 전류가 벡터제어에 많은 영향을 미치는 성분임을 알 수 있다. 여기서 고정자측 d축, q축 전류는 각 상전류로 부터 좌표변환에 의해 계산되어지는 값으로, 실제 측정되는 전류가 고정자측 d축, q축 전류 신호에 영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다.

본 제어 시스템은 Fig. 2와 같이 구성되어 있으며, 좌표변환을 위해서는 회전자계의 위치정보가 중요하며, 이는 수식 (2)에 정의된 바와 같이, 회전자

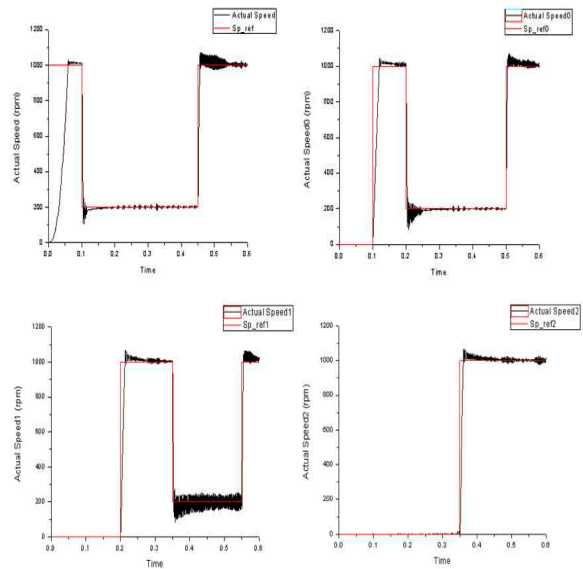


Fig. 1 Response to Speed Command of 4 Motors (Kim et al., 2019)

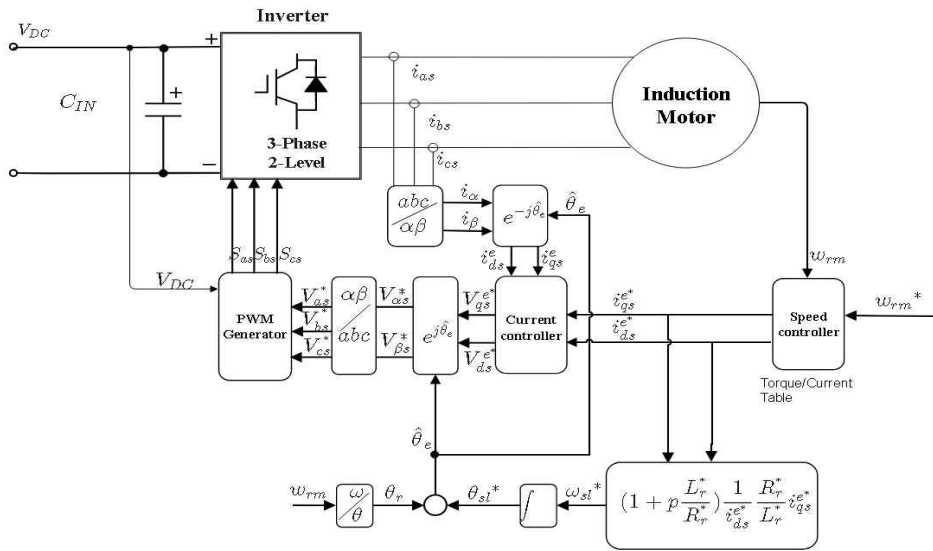


Fig. 2 Block Diagram of Motor Control System in TBM

의 회전속도와 슬립 각속도로부터 구할 수 있다.

$$\theta_e = \int_0^t \omega_e d\tau = \int_0^t (\omega_r + \omega_{sl}) d\tau \quad (2)$$

하지만 전류 및 속도정보가 불안정하거나 노이즈에 취약할 경우, 제어 시스템의 특성이 크게 나빠질 수 있는 가능성도 가지고 있다.

Table 1은 제안된 기동방법에 의해 4대의 유도전동기를 기동하였을 경우, 감속과 기동시 발생하는 속도리플에 대하여 분석한 것을 나타낸다. 속도리플은 곧 전동기의 진동현상으로 나타나기 때문에, 이를 감소시키는 것이 전동기 제어의 성능향상을 위해 바람직하다. I구간은 1번 전동기가 기동하여 목표치인 1000rpm으로 정상 운전하는 구간이다. II구간은 1번 전동기가 부하 토크가 최저점인 속도로 감속하며, 이때 회생전력을 이용하여 2번 전동기가 기동을 시작한다. 이때 1번과 2번 전동기 모두 속도리플이 증가하기 시작한다. III구간은 2번 전동기가 감속하고, 3번 전동기가 기동을 시작하며, IV구간은 3번 전동기가 감속하고, 4번 전동기가 기동을 한다.

V구간은 감속되어 있던, 1, 2, 3번 모터를 순차적으로 1000rpm 속도로 다시 가속하는 구간이다. 각 구간별 속도리플 발생량과 리플시간은 Table 1에 정리하였다. 여기서 회생기동에 의한

전동기의 수가 늘어날수록, 속도리플과 시간이 늘어나는 것을 볼 수 있다. 이 현상에 대해서 현재 구성되어 있는 신호처리시스템의 특성을 분석하기 위해 전류응답에 대한 처리 모듈별 입출력 응답 특성을 분석하였다.

3. 분석 및 실험 결과

3.1 신호 처리 시스템 분석

2.2절에서 언급한 바와 같이, 각 상의 전류정보는 유도전동기의 회전위치와 벡터제어를 위한

Table 1 Problems in Proposed Systems

State	Speed Ripple 1 [rpm]	Speed Ripple 2 [rpm]	Ripple Time [ms]
I	-	10	-
II	140	31	13
III	192	50	47
IV	193	71	Cont. Vibration
V	75	112	Cont. Vibration

d-q변환에 있어 중요한 성분이다. 그러나, 현재 TBM 시스템의 구동시스템의 다수의 전동기가 결합되어 있고, 회생기동을 적용하기 위해 각기 다른 시퀀스와 전류제어를 필요로 한다. 따라서 각 전동기 간의 회생과 기동을 하면서 전류 및 속도 신호에 영향을 미치는 것으로 분석된다.

Fig. 3은 1번 전동기의 좌표변환된 q축 전류를 나타낸 것이다. 분석결과 1번 전동기의 감속시 (0.1[s]) 과도 상태 뿐만 아니라, 2번 전동기의 감속 및 3번 전동기 기동 구간 (0.3[s])에서도 q축 전류정보가 많은 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 또한, 0.45[s] 이후 0.5[s] 간격으로 순서 재기동을 하는 경우에도 1번 전동기의 q축 전류의 상태가 불안정하다. 이는 기존 제어 시스템에서 전동기의 속도리플을 발생시키는 원인으로 파악되었으며, 이를 해결하기 위하여 이 시스템의 전류 신호 처리 시스템과 더불어 속도 신호 처리 시스템에 대한 특성을 분석하고 개선하였다.

Fig. 4는 q축 전류에 대해 FFT를 적용하여 분석한 결과이다. 그 결과 스위칭 주파수 성분외에 제어에 불필요한 주파수 성분들이 많이 포함되어 있는 것을 알 수 있다. 따라서 각각 모터의 상전류 (Ia, Ib, Ic) 신호 처리부분에 LPF (Low pass filter)를 적용하여, 10[kHz]대역과 고주파 노이즈 성분을 제거할 수 있도록 하였다.

Fig. 5는 LPF의 차단주파수(f_c)에 따른 응답 곡선을 나타낸 것이다. LPF 성능목표치는 스위칭주파수 기준, -12[dB] 이상, 50[us]이하로 설

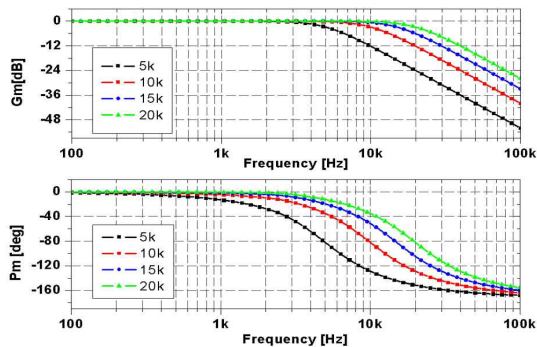


Fig. 5 Response Curve according to the Cutoff Frequency of LPF

계하였다. 분석결과 f_c 는 5[kHz], 댐핑계수는 0.7로 설계하였을 경우, 목표성능을 만족하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 6은 설계된 LPF를 적용하였을 경우, q축 전류의 FFT 결과를 나타낸 것이다. Fig. 3과 비교하여 보면, 스위칭 주파수 대역의 성분과 고주파 성분들이 현저히 줄어들

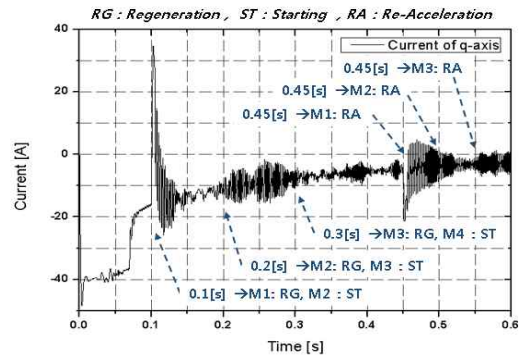


Fig. 3 q-axis Current of a Conventional System

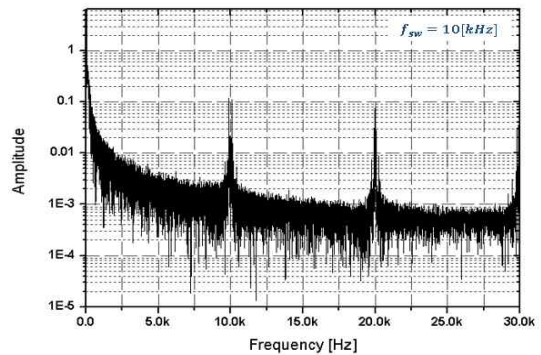


Fig. 4 Result of FFT Analysis of q-axis Current

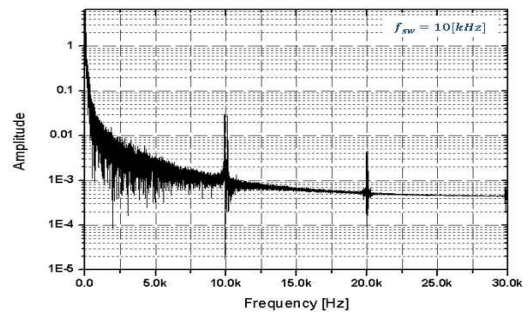


Fig. 6 Result of FFT Analysis of q-axis Current after Applying LPF

는 것을 확인할 수 있다.

3.2 실험결과 비교

먼저, q축 전류에 대한 LPF 적용 전·후의 신호 특성을 분석하였다. Fig. 7은 개선 전·후의 전동기 1번의 q축 전류를 나타낸 것이다.

개선된 시스템의 성능비교를 위하여 두 시스템의 토크를 측정하여 비교하였다. 속도의 리플 성분은 전류리플, 곧 토크 리플과 직접적인 관련이 있으므로, 토크리플의 감소는 곧 전동기의 속도리플 감소로 이어진다. 따라서 토크리플 성분을 비교분석하여 두 시스템간의 응답특성을 비교하였다.

Fig. 8 - 11은 4대 전동기 각각의 개선전(a) · 후(b)의 토크리플을 비교한 결과이다. Fig. 8은 전동기 1에서의 토크리플을 나타낸다. 첫 구간에

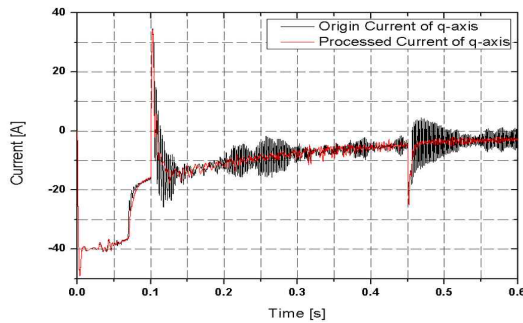
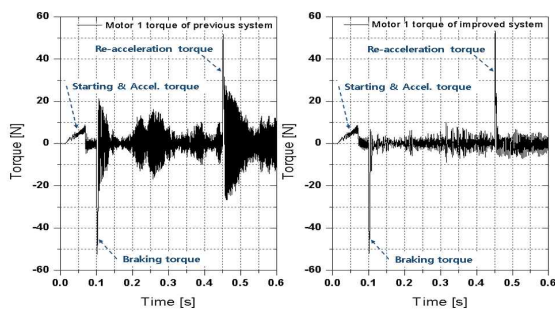


Fig. 7 Comparison of Before and After Current for Motor 1

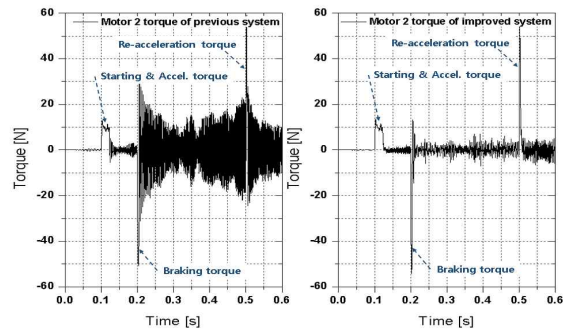


(a) Conventional system (b) Improvement system

Fig. 8 Torque Comparison Before and After Improvement for Motor 1

서는 기동과 가속을 하는 구간이며, 0.1[s]에서 감속을 통해 제동토크를 생성한다. 이때 회생전력이 발생하게 되고, 이를 이용하여 2번 전동기를 기동한다. 하지만, 그 이후 간섭현상으로 인해 토크리플이 발생하게 되는 것을 볼 수 있다. 0.45[s]에는 모든 전동기가 기동을 마치고, 저속 운행중인 1번 전동기가 재가속하는 구간으로, 순간적인 토크가 증가하는 것을 볼 수 있다. 따라서, 실제 필요한 토크는 처음 기동하는 구간과, 제동토크, 재가속 토크이며, 그 외 토크의 리플들은 다른 전동기 구동에 따른 간섭으로 볼 수 있다. Fig. 9, 10, 11은 각각 2번, 3번, 4번 전동기의 토크리플을 분석한 결과이다. 마찬가지로 기동, 감속, 재가속 외에 발생하는 토크리플은 서로간의 신호간섭에 의한 결과로 볼 수 있다. 결과에서 볼 수 있듯이, 기존의 시스템들은 각 전동기의 토크리플이 크게 발생하였고, 이것은 본 논문에서 분석한 결과에서와 같이, 각 전동기 시스템들 간의 전류간섭에 의한 결과임이 입증되었다.

간섭을 최소화하기 위해, 시스템의 특성을 고려하여 필터를 설계하여, 추가한 결과, 전류 신호에 대한 간섭을 최소화함으로써 시스템의 토크리플을 크게 줄일 수 있었다. Fig. 12(a)는 기존 시스템의 속도응답에 대한 실험결과를 나타내고, Fig. 12(b)는 개선된 시스템의 속도응답 특성을 나타낸 실험결과이다. 실험결과에서 볼 수 있듯이, 회생기동방법이 적용된 TBM 시스템에서, 전류간의 간섭이 발생하는 시스템에 개선된 신호

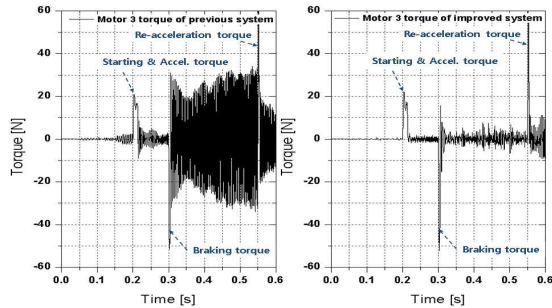


(a) Conventional system (b) Improvement system

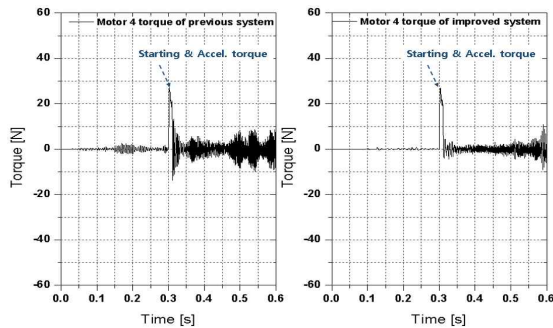
Fig. 9 Torque Comparison Before and After Improvement for Motor 2

처리 시스템을 적용한 결과, 속도리플의 크기가 최대 192[rpm]에서 30[rpm]이하로 줄어드는 것을 확인할 수 있고, 리플 시간 또한 2대의 전동기가

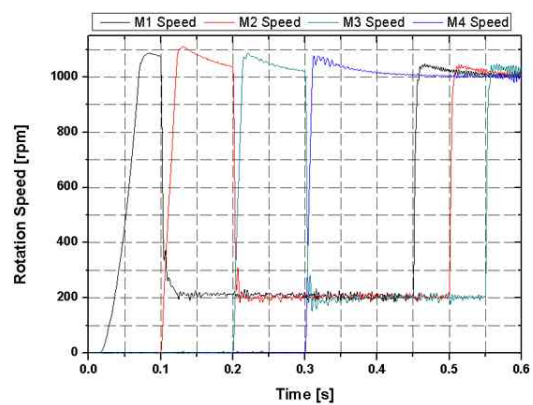
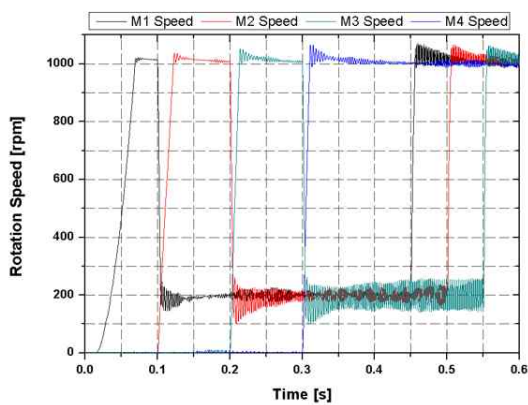
기동될 때 최소50[ms]이상에서 4대의 전동기가 동시에 구동되더라도 최대 25[ms] 이내로 현저히 줄어드는 것을 확인할 수 있다.



(a) Conventional system (b) Improvement system
Fig. 10 Torque Comparison Before and After Improvement for Motor 3



(a) Conventional system (b) Improvement system
Fig. 11 Torque Comparison Before and After Improvement for Motor 4



(a) Speed ripple results in the conventional system (b) Speed ripple results in the improvement system.
Fig. 12 Experimental Results for Motor Control Speed Ripple by Regenerative Start using 4 Motors in TBM

4. 결론

본 논문에서는 TBM 시스템에서 기동전류를 감소시킬 수 있는 방법 중에 하나로, 기존에 제안하였던 회생기동 방법에서 나타나는 문제점을 해결하고자, 기존 시스템의 문제점을 분석하고 이를 해결할 수 있는 방법을 제안하였다. 먼저, 기존 시스템에서의 속도 리플에 의한 진동현상을 제거하기 위해서, 문제점을 분석하였으며, 분석결과 다른 전동기에서 구동시 전류의 간섭으로 인해 신호처리 시스템에서 신호가 왜곡되는 것을 확인하였다. 이를 해결하기 위해서, 우선 LPF를 적용하여 해결가능성을 검증하였고, 적용 결과, 신호의 간섭을 효과적으로 제거함으로써 기존에 시스템에서 나타나는 문제를 해결할 수 있었다. 다만, 현재 중대형급 TBM시스템을 실제 현장에서 실험할 수 없어, 부하에 대한 부분이 고려가 되어 있지 않은 상황이며, 향후 관련업계의 개발과 현장 적용 실험 가능성을 검토하여, 실제 TBM 현장 시스템에 적용한다면, 향후 관련 분야 기술 개발에 큰 도움이 되는 결과를 도출할 수 있을 것으로 판단된다.

References

- Daekyeong Engineering Co. Ltd. (2018). 8m Class TBM Electrical System, *Technical Report*.
- Kim, T. K., and An, J. Y. (2019). A Study on Starting Characteristic and Improvement for High Power Motor with Tunnel Boring Machine, *The Transactions of The Korean Institute of Electrical Engineering*, 68(1), 44-51.
<http://doi.org/10.5370/KIEE.2019.68.1.44>
- Kim, T. S., Kang, H. D., and Hwang, S. H. (2018). Soft Start-up Algorithm of Single-Phase Induction Motor based on Full-bridge Inverter, *Journal of IEEE Korea Council*. 22(2), 258-265.
- Le, T. T., Park, M. W., and Yu, I. K. (2018). Current Controller Design of a Phase Shift Full Bridge Converter for High Current Applications with Inductive Load, *Journal of the Korea Industrial Information Systems*. 23(1), 43-52.
<http://dx.doi.org/10.9723/jksiis.2018.23.1.043>
- Lee, J. H. (2016). A Study on the Characteristics of the Vertical PNP transistor that Improves the Starting Current, *Journal of the Korea Industrial Information Systems*, 21(1), 1-6.
<http://dx.doi.org/10.9723/jksiis.2016.21.1.001>
- Son, S. G. (2016). A Study on Improving High-Power Induction Motor Starting, *The Journal of Korea Institute of Information, Electronics and Communication Technology*, 9(2), 178-184.
<https://doi.org/10.17661/jkiiect.2016.9.2.178>
- Sul, S. K. (2016). *Control of Electric Machine Drive Systems*, Seoul, Hongneung Press.



김 태 규 (TaeKue Kim)

- 정회원
- 창원대학교 전기공학과 공학사
- 창원대학교 전기공학과 공학석사
- 창원대학교 전기공학과 공학박사
- (현재) 창원대학교 메카트로닉스대학 전기공학과 연구교수
- 관심분야: 신호처리시스템, 전력제어시스템, 전동기 제어, BMS, 차세대반도체, 스마트팩토리.



서 정 원 (JeongWon Seo)

- 준회원
- 창원폴리텍대학교 메카트로닉스공학과 학사
- (현재) 이엠코리아(주) 기술연구소 전기제어팀 팀장(차장)
- 관심분야: 전기제어, TBM운전 전기제어시스템.