

TBM용 대용량 전동기의 기동 특성 및 개선 관한 연구

A Study on Starting Characteristic and Improvement for High Power Motor with Tunnel Boring Machine

김 태 규* · 안 준 영*

(Tae-Kue Kim · Joon-Young An)

Abstract - Tunnel Boring Machine's Technology has depends mostly on imports, currently domestic technology development was proceeding. There are many technologies in this field, above all, the large-capacity motor drive technology required for excavation is one of the core technologies. In particular, when several large motors are simultaneously starting, there are many problems due to a large starting current at that time, and it is difficult to design and operate a power receiving facility.

In this paper, A method of reducing the starting current by using the regenerative power generated by the deceleration of the motor has been studied. To verify this proposal, we designed the induction motor controller using CAE based power simulation tool and verified the results of the proposed method by applying the reduced model. As a result, it is possible to reduce the maximum starting current and shorten the start-up time. Moreover, even if several motors are connected to one bank, it is proved that the method can be efficiently operated by using the sequential braking / starting sequence. In the case of a power system in which a large capacity electric motor such as a tunnel excavation system is driven, the results of this study are expected to be a stable and effective method for solving the start-up current problem and designing the power receiving facility.

Key Words : Tunnel boring machine, High power motor, Motor starting, Regeneration power

1. 서 론

TBM(Tunnel Boring Machine)은 대부분 해외장비 및 기술을 수입하여 국내 터널 굴착 현장에 적용되어져 왔다. 현재 국내 중견기업에서 이를 국산화 설계 및 제작을 위하여 기술 개발을 진행하고 있는 중이다. 그 중에서 터널을 굴착하는데 필요한 커터 헤드 설계 기술과 이를 구동하는 대용량 전동기 구동 기술이 가장 핵심이라고 볼 수 있다. 대용량 전동기를 구동하기 위해서는 우선적으로 전체적인 전기설비 설계 및 제작도 중요하지만, 전동기 기동시 전동기는 2차측이 단락된 변압기 상태와 같으므로 정격전압을 인가하면 5~8배가량의 큰 기동전류가 발생하고, 이 기동전류 및 전압강하가 전기설비에 소손 및 고장을 발생시킬 수 있는 문제를 해결하여야 한다[1]. 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. 따라서 본 논문에서는 이에 대한 특성을 파악하고, 기동시 발생할 수 있는 문제를 해결할 수 있는 방안을 연구하고자 한다. 이를 위하여

대용량 전동기에 대한 특성을 기반으로 모델링하여 CAE 기반의 해석 도구를 활용하여 특성을 파악하고, 실제 개선된 기동방안을 적용한 시스템에서의 특성을 도출하고자 한다.

2. 본 론

2.1 기동 방법에 대한 특성 분석

일반적으로 사용되는 유도전동기의 기동방식은 부하의 종류, 특성, 용량 등을 고려하여 선정하도록 한다. 기동방식은 크게 인가되는 전압에 따라 구분하게 되며, 전원전압을 최대로 인가하는 직입 기동 방식과 기동전류를 낮추기 위하여 다른 결선이나 전기소자를 이용하여 전압을 감압하여 인가하는 방법이 있다. 직입기동은 전압을 직접 인가하여 전동기를 구동하는 가장 간단한 방법으로 설치방법이 간단하고, 시스템 구성비가 저렴하다. 하지만 기동전류가 5~8배 정도 크게 발생하므로, 기동 전류의 절대크기가 작은 주로 소용량(일반적으로 10kW 미만) 전동기 구동에 이용된다.

기동전류를 줄이기 위하여 가장 쉽게 접근할 수 있는 방법이 바로 Y- Δ 기동이다. 5.5kW 이상 저압 전동기는 대부분 Y- Δ 기동이 가능하다. 기동시에는 1차 권선을 Y결선 접속으로 시동하고, 정격운전 후 Δ 결선 접속으로 전환하는 방식이다. 이는 Y결선 임피던스가 배이므로, 기동전류가 1/3로 줄어들게 된다. 그러나 별도의 MC(Magnetic Contactor), 계전기(Relay) 등이 추가적

* Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering,
Changwon National University, Korea.
E-mail: teakueda@changwon.ac.kr

* Daekyeong Engineering co.,LTD, Korea.

Received : November 7, 2018; Accepted : December 20, 2018

으로 필요하다는 점과 기동 후 절환시 돌입전류가 증가되는 단점이 존재한다. 절환 방법에 따라 차이는 있으나, 기동전류 못지않은 큰 돌입전류가 흐르게 된다. 주로 30kW 미만 전동기에 사용 가능하다.

리액터 기동은 직렬로 라인 리액터를 연결하여 전동기 단자전압을 감소시켜 기동 전류를 줄이는 방법이다. 보통 리액터 탭을 이용하여 50~90% 탭 비율로 이용한다. 이때 기동토크는 리액터에 걸리는 전압의 양만큼 줄어들게 되지만, 부족토크로 인하여 기동에 실패하는 경우도 발생한다. 전동기가 정상상태에 도달하게 되면 대부분의 전압이 전동기에 가해지게 되고, 리액터 내부 저항에 의한 직류성분의 작은 전압강하만 존재하게 되므로, 절환시 충격이 적다. 기동이나 정지가 빈번한 시스템에서는 비효율적인 방법이다.

단권변압기를 이용한 콘돌퍼 기동법은 변압기탭을 이용하여 기동전류와 기동토크를 조절하는 방식이다. 기동 후 절환하는 과정에서 과도돌입전류가 발생하므로 이를 보완하기 위하여 리액터로 전류를 흐르도록 하여 추후 절환하는 리액터 기동법을 활용한 복합 기동방식이다. 기동 시퀀스와 별도의 MC, Relay가 필요하므로 지금까지의 기동방법 중 가장 비용이 많이 든다.

인버터 기동방법은 인가되는 전원의 전압과 주파수를 가변하여 전류와 토크를 제어하는 방식이다. 인버터는 FET, IGBT, GTO, SCR과 같은 전력반도체 스위칭 소자를 이용하여 전압의 크기와 주파수를 제어하는 방식으로 부하에 맞는 에너지 전달을 손쉽게 할 수 있어 효율면에서 가장 우수하다.

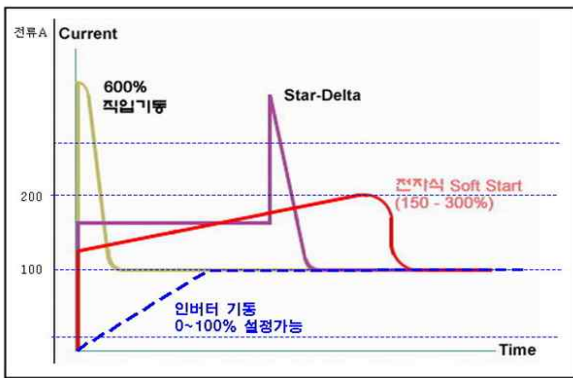


그림 1 기동방식별 전동기 기동전류 특성[2]

Fig. 1 Starting current characteristics of motor by starting method

2.2 제한하는 회생전력 활용 기동방법

TBM 구동설비는 Cutter head를 구동하는 주설비와 후방에서 주 설비를 보조하는 보조설비로 이루어진다. 개발사양에 따라 Cutter head는 여러 대로 구성되며 Cutter head를 구동하는 유도전동기는 모두 Cutter driver에 설치되어 운전 된다. 만약 Cutter head가 8대로 구성이 된다면, 한 대당 약 200~300kW급

표 1 TBM 시스템 전동기별 기동 특성

Table 1 Start-up characteristics of TBM system motor

구 분	기동특성	가속특성	적용부하
전전압 기동	· 전 전압 인가 · 기동전류는 정격전류의 6배	양호	· 30kW 이하 전동기
Y-Δ 기동	· 전 전압의 57.7 % 인가 · 기동전류는 정격전류의 2배	기동시간이 길다	· hydraulic oil 펌프 · ventilation system
리액터 기동	· 전전압의 70% 인가 · 기동전류는 정격전류의 3배	· 기동특성이 Y-Δ 방식보다 양호 · 제어반 크기가 크다	-
소프트스 타터 기동	· 기동전류를 정격전류의 3배로 제한	양호	· 배니 중계 펌프
인버터 기동	· 기동전류를 정격전류 범위 내에서 제어가능	· 저속에서 토크가 크다 · 속도제어 요구 되는 설비에 적용	· cutter driver · 송니 펌프 · 배니 펌프 · 순환 펌프 · 배니중계 펌프 · 수압유지 펌프

으로 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 선정과 변압기 선정도 매우 중요한 설계 요소 중 하나이다[2]. 특히 대부분의 설비들이 전동기 방식으로 구동하기 때문에 기동시에 발생하는 큰 기동전류 문제를 해결하지 않으면, 설비용량 산정이나 보조설비 설계에 큰 어려움을 겪게 된다. 2.1절에서 언급 하였던 기동방식에 따라 용량별로 적절한 기동방식을 선정하는 것은 중요하다. 용량이 큰 전동기들의 구동은 직입기동, 리액터 기동, 와이-델타 기동, 소프트 스타터 기동 등의 방식으로 기동시 발생하는 기동실패, 계통 전압 강하 등의 문제를 해결하기 어렵다. 따라서 인버터를 이용한 기동 방식이 가장 적합하다. 그러나 여러 대의 구동기가 일시에 구동하거나, 다른 구동기가 기동상태에서 기동이 된다면 마찬가지로 문제를 일으킬 가능성이 크다. 따라서 이러한 기동시 발생할 수 있는 해결책으로서 본 논문에서는 회생제동 전력을 이용한 전략적 기동방안에 대하여 제시하고자 한다.

그림 2는 유도 전동기 속도-토크 특성을 나타낸다. 기동시 전류는 기동토크와 부하토크가 합쳐져 최대 전류를 흘리게 되고, 이후 속도가 증가하면서 전류는 점점 감소하게 된다. 부하토크는 기동 후 일정속도가 증가함에 따라 줄어 들고, 이후 최저점을 지나 다시 속도에 따라 증가하게 된다[3]. 전동기의 토크는 동기속도와 회전자의 회전속도 차에 의한 슬립의 2차 함수 형태로 나타나고, 전류에 자속에 비례한다. 따라서 전동기의 최대토크점을 지나면 슬립스가 줄어들면서 급격하게 토크가 감소하게 된다. 전

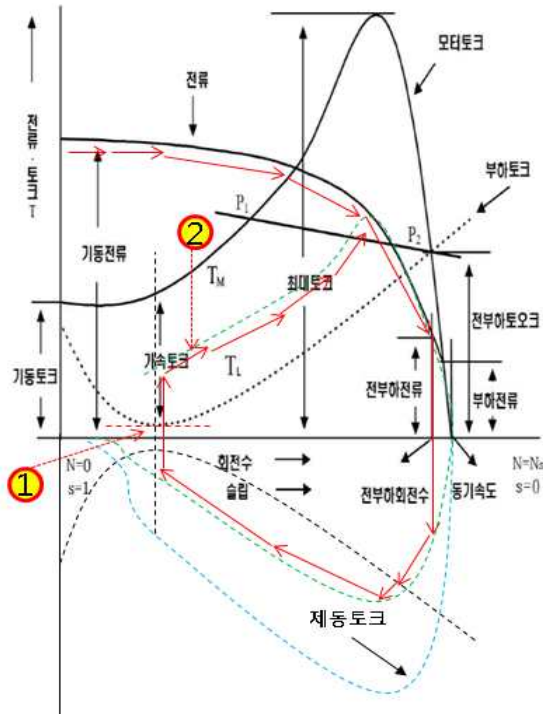


그림 2 유도 전동기 속도-토크 곡선 및 제안된 제동-기동 곡선
Fig. 2 Induction motor speed-torque curve and proposed braking-start curve

동기의 정상적인 구동은 부하토크와 전동기토크가 크로스 되는 P2지점에서 구동하는 것이 가장 효율적이다[4].

전동기 토크에 관한 기계적 방정식과 전기적 방정식을 나타내면 식 (1)과 같다.

$$T_e = J \frac{d\omega_r}{dt} + B\omega_r + T_L = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m}{L_r} \lambda_{dr}^e i_{qs}^e \quad (1)$$

식 (1)에서 알 수 있듯이, 전동기의 토크는 벡터제어시 자속분전류 d 축 전류도 영향을 미치지만, q 축 전류를 제어함에 따라 크게 좌우됨을 알 수 있다. 또한 기계적으로 보면 전동기의 토크는 마찰계수가 전동기 정지상태에서 움직이기 직전의 값이 가장 크기 때문에 이 때 전동기를 기동시키기 위한 힘이 가장 크게 필요하다.

$$T_M = T_e - B\omega_r \Rightarrow T_M - T_L = J \frac{d\omega_r}{dt} = T_a \quad (2)$$

따라서 식 (2)와 같이 전동기를 가속시키기 위한 토크는 그림 2의 곡선에서와 같이 전동기토크와 부하토크의 차에 의해 가속하는 힘을 얻게 된다. 반대로 제동시에는 식 (3)과 같이 제동토크에 관한 식을 유도할 수 있다.

$$-T_M = -T_e + B\omega_r \Rightarrow -T_M + T_L = -J \frac{d\omega_r}{dt} = -T_b \quad (3)$$

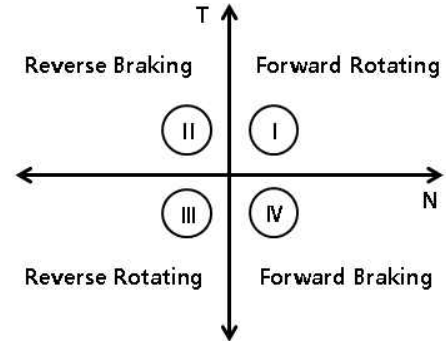


그림 3 유도전동기 구동 운전영역

Fig. 3 Operation area of Induction motor drive

제동을 어떻게 하느냐에 따라 인버터의 용량과 전동기의 용량과는 관계없이 속도의 변화량과 제동시간에 의해 결정된다. 유도전동기가 동작 중 제동을 하게 될 때 그림 2와 같이 4상한 운전을 하게 되고, 제동토크가 파란색 점선과 같은 양상으로 나타나게 된다. 제동에 의해 속도가 점점 줄어드는 것에 따라 저속영역에서는 제동토크가 현저히 줄어들게 된다.

본 논문에서 제안하는 방법은 하나의 전동기가 운전 중 제동을 하게 되고, 그 제동에 의한 에너지를 또 다른 전동기의 기동전력을 사용하고자 함이다. 따라서 처음 운전되는 전동기는 기동 후 완전히 정지하는 것이 아니라, 그림 2의 점1에서 가리키는 부하토크의 최저점에서 동작하도록 하면 제동토크의 총량이 거의 최대에 달하게 된다. 이후 전동기2의 기동 후 다시 재가속시 기동토크가 빠지고 최저 부하점에서 운전을 할 수 있게 된다. 전동기1은 최저 부하점으로 제동시키고, 전동기2는 회생전력을 이용하여 기동하도록 하는 것으로, 그림 2의 붉은색 화살표와 같은 운전 전략으로 구동하는 것이다.

유도전동기의 인버터 제어는 그림 3과 같이 운전 영역에 따라 정방향 구동 및 제동, 역방향 구동 및 제동을 할 수 있으며, 제동은 2, 4상한 운전영역에서 동작 시키는 방법이다. 제동방법을 기계적 제동과 전기적 제동으로 크게 나눌 수 있으며, 고속에서는 전기적 제동을 시행하는 것이 효율적이다. 제동시 전동기에는 역기전력 생성되며, 이 때 이 전류를 얼마나 빨리 소모하느냐에 따라 제동시간이 결정된다[5]. 이를 위하여 저항을 이용하여 감속시 발생하는 전력을 소모하는 저항 제동형 방법과 회생 에너지를 전원 측으로 보내는 전원 회생형 방식이 있다.

그림 4는 DC Link로 연결된 전동기 구동용 인버터에서 전원 측 에너지를 전동기 측으로 전달하여 전동기가 회전하도록 하는 powering mode를 나타내고 있다. 유도 전동기 구동은 3상 평형 전류가 흐르도록 구동되어 시간에 따라 high side 와 low side 스위치가 (1:2), (2:1), (1:1) 또는 역으로 구동한다. 그 중 그림 4(a)는 한 상이 오픈이 되고, 나머지 두상이 상보동작을 하는 경우의 powering mode에서의 전류 흐름을 나타낸다. 그림 4(b)와 같이 전동기에 기계적 또는 전기적으로 제동이 걸리는 경우, 전동기에서 Lorentz force에 의한 역기전력이 발생하게 되고, 인버터의 스위치는 턴-오프 된다. 이 때 순간적인 역기전력에 의한 에너지를 소비하지 않게 되면, 스위치 양단에 큰 역전압이 걸리

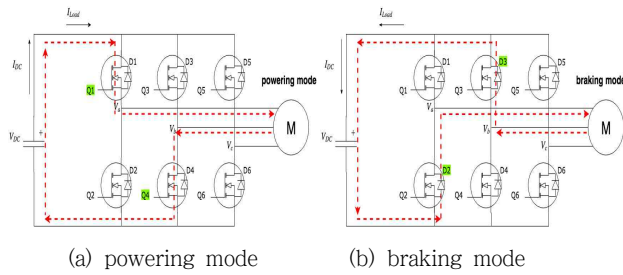


그림 4 3상 유도 전동기 구동 인버터 제어 모드

Fig. 4 3-phase induction motor drive inverter control mode

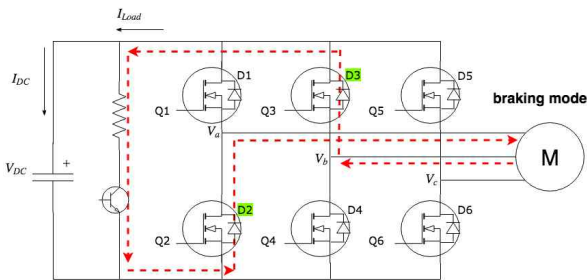


그림 5 저항형 제동 방식

Fig. 5 Resistive braking method

면서 스위치가 소손될 수 있다. 그러나 전력 반도체로 사용되고 있는 MOSFET 또는 IGBT 소자는 물리적인 구조상 기생 다이오드라 불리는 Body Diode가 형성되기 때문에 이를 통하여 역기전력에 의한 전류가 전원측으로 흐르게 된다. 이때 이 전류가 소모되는 량에 따라 전동기의 감속량이 결정되게 된다.

이를 위하여 그림 5와 같이 인버터 측에서는 제동저항 또는 회생저항이라 불리는 저항과 스위치 조합을 병렬로 삽입하여 저항에서 이 전류를 소모하도록 하는 저항 제동형 방법을 보편적으로 시행하고 있다. 그러나 이 방식은 저항을 통해 열에너지를 소모하기 때문에 별도의 냉각 장치가 필요하고 부피가 커진다는 점과 제동의 응답성이 늦다는 문제점을 가지고 있다.

그러나 최근에는 전력 소자와 제어 기법 등의 발전과 더불어 이 에너지를 저항에서 소모하지 않고, 전원측으로 회생하도록 하여 에너지 효율을 높이는 회생전력 방식이 연구와 상용화가 진행되고 있다. 회생 전력에 대한 연구는 철도와 승강기 구동시스템, 하이브리드, HEV와 같은 분야에서 많이 연구되고 있다. 본 연구에서는 이 회생에너지를 이용하여 TBM 시스템과 같은 전동기 구동 용량이 큰 시스템에 기동시 응용하는 방법이다.

2-1절에서 언급한 바와 같이 큰 용량의 전동기가 기동전력 없이 기동이 된다면, 기동시 실패와 계통 전압강하, 수변전 설비의 소손 등으로 이어질 가능성이 상당히 크다. 따라서 본 연구에서 제안하는 바와 같이 회생전력을 이용한 전락적 기동방법을 이용하면 기동시의 문제를 상당히 해결할 수 있다.

2.3 유도 전동기 제어

유도 전동기는 속도 제어를 통해서 제동에 의한 회생 전력을

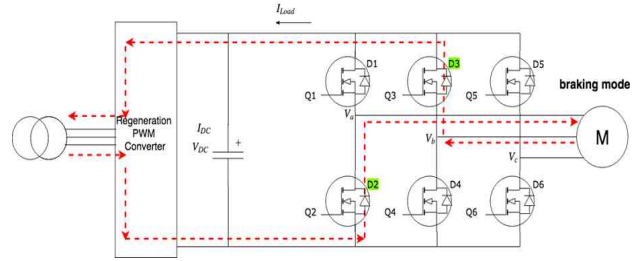


그림 6 전원 회생형 제동 방식

Fig. 6 Power regenerative braking method

발생시키기 위하여, 속응성을 가지는 제어기가 필요하다. 유도전동기의 토크는 자속과 자속에 직각으로 쇄교하는 전류에 의해서 결정되므로, 3상 평형 전력의 경우 벡터 제어를 통하여 이를 순시적으로 제어할 수 있다. 유도 전동기의 경우 동기 전동기와 달리 자속분과 전류분을 각각 제어해야 함으로 동기 전동기에 비해 다소 어렵다. 크게 직접 벡터 제어 방식과 간접 벡터 제어 방식으로 나눌 수 있으며, 두 방식 모두 장단점이 있다. 본 논문에서는 유도 전동기의 회전자 속도 정보에 의해 슬립 각속도를 제어하여 기동에서부터 광범위한 속도 범위에서 제어가 가능한 간접 벡터 제어 방식을 구현한다. 우선 유도 전동기를 제어하기 위하여 모델링을 통해 식을 유도할 수 있다. 속도 제어기보다 전류 제어기의 응답성이 우수하므로 전류제어기를 구성하기 위하여 임의의 속도 ω^e 로 회전하는 농형 유도 전동기를 고정자와 회전자의 동기좌표계 d-q축 전압 방정식으로 다음과 같이 유도할 수 있다. 농형 유도 전동기는 중성점이 외부에 연결되지 않고 각 상 전압의 순시합이 0 이라고 가정하면, 영상분 성분은 고려할 필요가 없다.[6,7] 따라서 레퍼런스 자료를 참조하여 전동기의 회전속도와 슬립각 속도 ω_{sl} 를 적분하여 회전자속의 위치를 확인하여 $\lambda_{qr}^e = 0$ 가 되도록 제어하고 d축과 q축 전류를 제어하여 유도 전동기의 토크를 제어하는 간접 제어 방식 제어기를 그림 7과 같이 PSIM 시뮬레이션 프로그램을 통하여 구현하였다.

2.4 시뮬레이션 및 실험결과

본 연구를 통해서 해결하고자 하는 TBM 구동 시스템에 있어 실제 예상되는 용량의 1/10 모델(약 20kW급)로 축소하여 구성하고, 총 2개가 1개의 변압기 탭에 연결되어 구동하는 것으로 모의하였다. 전동기의 제동은 부하토크가 최소가 되는 회전속도를 추정하여 200rpm으로 제동하고 이때 발생하는 회생에너지를 기동에너지를 사용하도록 하였고, 기동되는 전동기는 발생시간이 짧은 제동 시간을 고려하여 짧은 기동시간을 가지도록 운전하였다. 본 연구에서는 DC-Link에서 연결된 2~4개의 유도 전동기 구동 인버터를 구성하여, 제안된 기동방법을 검증하였다. 우선 기존의 인버터 기동 방법들과 비교하기 위하여 해석을 진행하였다. 전통적인 기동방법인 순차적 기동방법에 의한 기동전류에 대한 해석과 본 논문에서 제안하는 회생전력을 이용하여 기동하는 방법에 대한 비교 연구를 수행하였다.

표 2는 해석에 사용된 농형 유도 전동기의 제정수를 나타낸

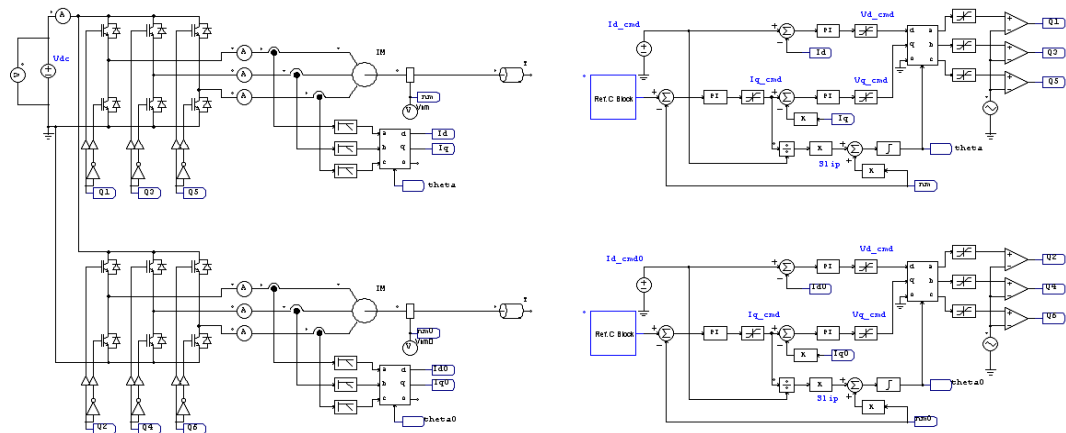


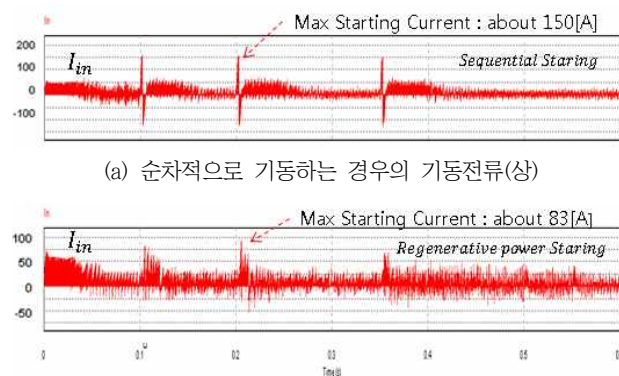
그림 7 간접 제어 방식 유도기 2대 구동시스템 설계

Fig. 7 Indirect control type induction machine 2 units drive system design

표 2 농형 유도전동기 제정수

Table 2 Parameters of Squirrel Cage Induction Motor

Items	Values
Stator winding Resistance	290[m Ω]
Stator winding leakage inductance	1.3 [mH]
Rotor resistance referred to the stator side	150 [m Ω]
Rotor leakage inductance referred to the stator side	0.7 [mH]
Magnetizing inductance	0.04[mH]
No. of poles	6
Moment of inertia	0.02
Rating Power	20[kW]



(a) 순차적으로 기동하는 경우의 기동전류(상)

(b) 회생전력을 이용하여 제동-기동을 하는 경우(하)

그림 8 순차기동방식과 회생전력을 이용한 기동방식 해석결과 비교
Fig. 8 Comparison of starting analysis results using sequential start and regenerative power

표이다.

그림 8은 4개의 전동기가 순차적으로 기동 운전하는 경우

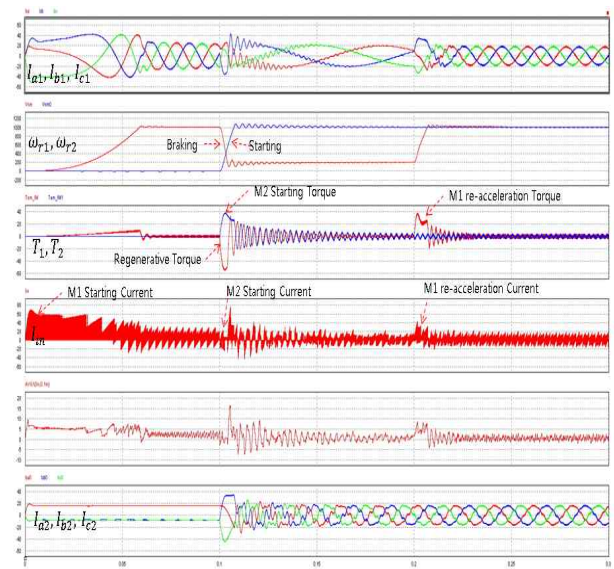


그림 9 제안하는 방법에 의한 회생전력 이용 기동시 토크 및 전류 특성

Fig. 9 Torque and current characteristics at startup using regenerative power by proposed method

와 본 논문에서 제안하는 회생전력을 이용하여 기동하는 경우의 기동전류의 모의실험 결과를 나타내었다. 순차 기동방법에 의한 기동전류의 최대값이 약 150[A]로 측정되었고, 회생전력을 이용하는 경우 55% 정도 감소된 약 83[A]로 분석되었다. 이 결과로 보아 회생제동으로 인한 전력이 다른 모터의 기동전류로 이용됨으로써 전체 전류가 작아짐을 확인할 수 있다.

그림 9는 본 논문에서 제안하는 제동시 발생하는 회생전력을 이용한 기동방법에 대한 해석 결과이다. 전동기 1은 정상적으로 인버터에 의해 기동을 하고 정상상태에 도달 후, 0.1[s]에서 제동과 동시에 전동기2의 기동을 시행하였다. 이때 전동기1의 회생토

크는 전동기2의 기동토크를 발생하는 전류로 사용되어 전동기2의 기동시 기동전류가 현저히 떨어지는 것을 볼 수 있다. 물론 회생 전력을 이용하여 기동을 하더라도, 회생전력이 발생하는 시간이 길지 않기 때문에(약 20ms), 빠르게 기동하는 방법이 필요하며, 또한 회생에 의해 에너지가 발생하지 않게 되면, 기동중인 모터의 전류가 초기 1대의 전동기를 기동하는 전류의 크기와 비슷하게 발생이 되지만, 순차 기동법에 의해서 발생하는 최대 전류보다는 현저하게 낮은 것을 확인할 수 있다. 이는 기동시 필요한 전류를 회생전력을 이용하여 사용하여, 초기 기동전류의 상승을 억제하는 것으로 판단되고, 이후 속도상승중이 전동기의 구동전류와 제동을 한 전동기의 운전전류의 합이 되는 것으로 판단된다. 또한 초기 기동 전류도 2대를 동시에 기동하는 것보다 약 40% 이상 낮고, 제동을 시행 후 저속에서 구동하던 전동기1을 재가속 하여도, 기동토크가 빠지게 되어 재가속 하는데 많은 전류가 소모되지 않는 것을 볼 수 있다. 제안된 방법에 의하여 기동 후 재가속하는 경우 토크가 진동하는 것을 볼 수 있으나, 0.1[s]안에 안정되는 것을 볼 수 있다. 이는 계인 튜닝을 통하여 개선이 가능할 것으로 판단된다.

표 3은 기동방법에 따른 특성을 비교분석한 결과표이다. 우선 2대의 전동기가 동시에 기동하는 경우와 한 대씩 순차적으로 기동하는 경우, 그리고 본 논문에서 제안하는 제동 회생 전력을 이용하여 기동하는 경우를 분석하였다. 1/10 축소모델의 결과를 토대로 예상되는 실제 모델의 기동 전류를 예측하였고, 제안된 방법에 비해 동시 기동하는 경우 2.48배 가량, 순차적인 기동을 하는 경우도 약 2.14배 가량 높게 나타날 것으로 예상된다. 특히 N개의 전동기가 하나의뱅크에 연결된 경우, 동시 기동과 순차 기동은 표 3에 나타나 있는 것과 같이, 높은 기동 전류를 요구하게 되는 반면, 본 논문에서 제안하는 방법은 2개 이상의 전동기가 같이 기동되는 경우, 선 운전 중인 전동기는 최저 부하점에서 동작을 하고, 다른 전동기는 하나의 전동기 제동에 의한 회생전력을 이용하여 기동을 하기 때문에, 전동기가 수가 늘어나더라도 기동 전류의 증가가 크지 않을 것으로 분석되었다. 따라서 여러대의 전동기가 하나의 변압기뱅크에 연결되어 운전되더라도, 회생 전력을 이용한 기동 방법을 통해 운전하게 되면, 기동 전류가

표 3 기동방법에 따른 결과 분석

Table 3 Comparison analysis of results by starting method

	Simultaneously Starting	Independently Starting	Proposed Method Starting
Starting Time	58.99 [ms]	58.99 [ms]	7.73 [ms]
Starting Current (0.1[pu])	102.8 [A]	88.47 [A]	41.31 [A]
Starting Current (1[pu])	1028 [A]	884.7 [A]	413.1 [A]
Relative Ratio	248 [%]	214 [%]	100 [%]
n-motor Starting Current[A]	n×1028	693.7 + (n × rating current)	413.1[A] + (n×141)[A]

* rating current ≒ 400[A]

크게 증가하지 않고, 그에 따라 수변전 설비도 최대용량을 최소화하여 설계할 수 있을 것으로 예상된다.

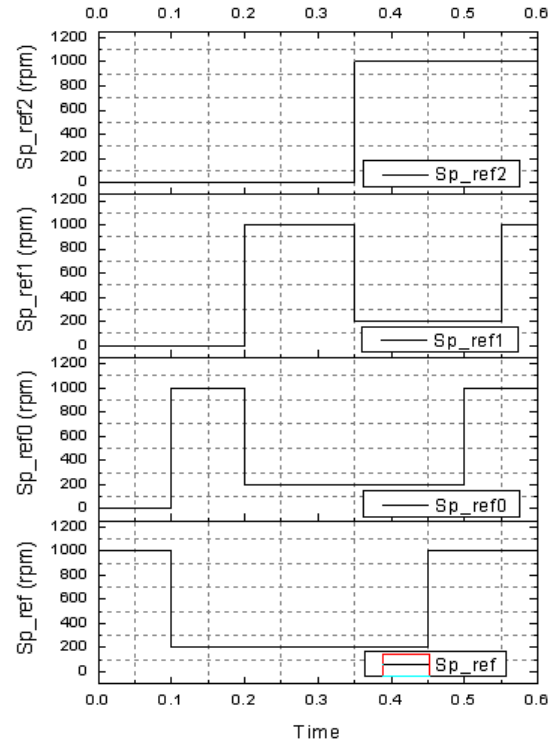
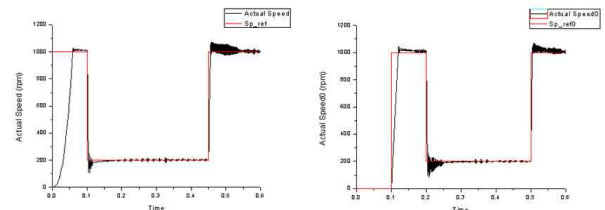
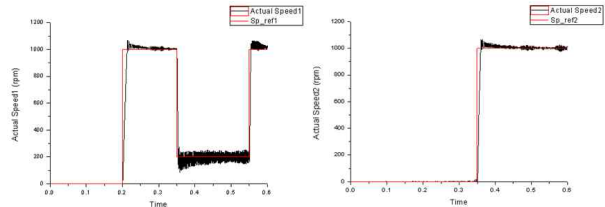


그림 10 제안하는 회생전력을 이용한 기동 방법 4개 모터 제어 시퀀스

Fig. 10 Starting control sequences using the proposed regenerative power for 4-motor



(a) 1번 모터 운전동작 결과 (b) 2번 모터 운전동작 결과



(c) 3번 모터 운전동작 결과 (d) 4번 모터 운전동작 결과

그림 11 4개 모터의 속도지령에 대한 응답

Fig. 11 Response to speed command of 4 motors

실제 실험은 4개의 모터로 구성된 TBM용 축소 구동모터 세트를 이용하여 그림 10과 같이 기동전략 시퀀스를 적용하였다. 1번 모터는 시작과 동시에 기동을 하고, 0.1초에서 브레이킹을 하여 200[rpm]으로 감속시키고 동시에 2번 모터를 기동한다. 마찬가지로, 0.2초 구간에서는 다시 2번 모터를 200[rpm]으로 감속하고, 3번모터를 기동한다. 0.35[s]에서는 3번 모터를 200[rpm]으로 감속시키고, 이 회생전력을 이용하여 4번 모터를 기동시킨다. 이후 4번 모터는 그대로 정격속도를 유지하면서, 0.05[s]간격으로 1~3번 모터를 재가동하여 정격속도로 운전한다.

그림 11은 각 모터의 제어전략에 따른 속도지령에 대한 모터의 운전동작 결과를 나타낸다. 각 제어전략에 따른 기동시퀀스에 따라 각 모터가 원하는 속도에서 운전하는 것을 확인할 수 있다. 그림 12는 순차제어 방식을 적용한 기동방법과 본 논문에서 제안하는 회생전력을 이용한 기동방법에 따른 기동전류의 비교결과를 나타내었다. 제안하는 방법을 적용한 기동결과 3번모터 기동시 최대 약 45[A]가량 출력되었고, 순차기동의 경우 4번 모터 기동시 최대 약 108[A]가량 출력되는 것을 확인할 수 있다. 이는 시뮬레이션으로 분석하였던 결과와 유사하게 약 58%가량 기동전류가 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

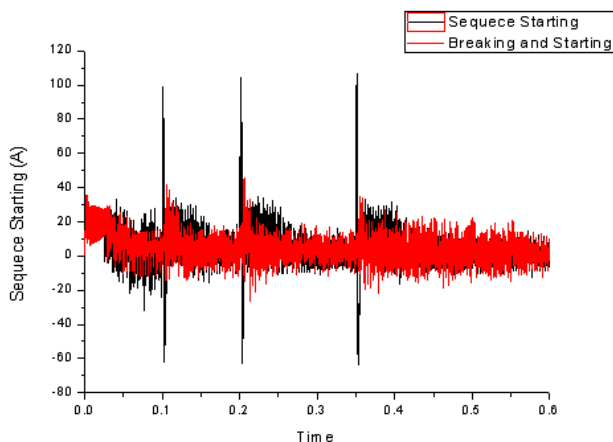


그림 12 순차기동방법과 회생전력을 이용한 기동방법에 의한 기동전류 비교

Fig. 12 Start-up current comparison by using sequential start and regenerative power

3. 결 론

본 논문에서는 TBM 시스템과 같이 여러 대의 대용량 전동기가 운전되는 단독 수전 설비에 있어, 기동 전류에 의한 문제를 해결하기 위하여 새로운 기동 방안에 대하여 제안하였다. 기존의 기동방식들 보다 인버터를 이용한 전동기의 기동이 상당히 기동전류를 줄일 수 있음에도 불구하고, 여러 대가 단일 뱅크에 접속

된 경우, 정지된 전동기를 기동할 때 상당히 많은 전류가 필요하기 때문에, 이 또한 문제를 발생 시킬 수 있다. 따라서 이를 최소화하기 위하여 본 논문에서 제안하는 전동기의 제동시 발생하는 회생 전력을 이용하여 다른 정지된 전동기를 기동하는 방법을 통해서 기동하는 경우 기존의 기동 방법들 보다 기동전류를 상당히 줄일 수 있음을 검증하였다. 1/10 축소모델에 대하여 제안된 방법을 적용한 최적의 제동-기동 운전점을 제시하였으며, 이는 본 논문에서 제안하는 방법을 적용하는 데 있어, 제동과 기동의 최소 부하점이 될 수 있음을 확인하였다. 본 논문에서는 DC-Link로 연결된 시스템을 토대로 회생전류의 활용법을 검증하였으나, 실제로는 회생 전력을 계통으로 연결되는 AC-Link로 back-to-back 컨버터 구조를 구성하여 양방향 전력제어를 구성하여야 하므로, 이는 계통 상태를 모니터링 하여 적절한 제어가 되도록 구성하여야 하기 때문에 제어적 측면에서 추가 연구가 필요할 것으로 판단되고, 이는 차후에 추가적인 연구를 통해 수행해 나갈 계획이다.

감사의 글

“본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음. (과제번호18SCIP-B129646- 02)” (과제명 : TBM 구동부 및 후방설비의 시스템 엔지니어링 기술 개발, 과제고유번호 : 161500981 5 세부과제번호 : 129647)

References

- [1] K-water “Large motor starting characteristic analysis report”, 2012.
- [2] Daekyeong Engineering co.,ltd, “8m Class TBM Electrical system technical report”, 2018.
- [3] Seok-Geum Son, “A Study on Improving High-Power Induction Motor Starting”, JKIIET, Vol. 9, No.2, 2016.
- [4] Lee Eun-Chun, Kim Jae-Cheol, “Analysis on Induction Motor Starting Characteristics”, KIEEME, Vol. 26, No. 5, 2013.
- [5] Ho-Seon Ryu, Jang-Mok Kim, “A Study on Starting Algorithm of Large Synchronous Motor for Gas Turbine in Field-Weakening Region using SFC”, KIPE, Vol. 13, No. 6, 2008.
- [6] Seung-Ki Sul, “Control of electric machine drive systems”, 2016.
- [7] D.W Novotny and etc, “Vector Control and Dynamics of AC Drives, Chapter 2,” Oxford, 1996.

저 자 소 개



김 태 규 (Tae-Kue Kim)

1980년 8월 8일생. 2006년 창원대학교 전기공학과 졸업. 2008년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 2015년 동 대학원 전기공학 졸업(박사), 2015년~현재 창원대학교 초빙교수.

Tel. 055.213.3895, Fax. 055.213.2878

E-mail : teakueda@changwon.ac.kr



안 준 영 (Joon-Young An)

1956년 10월 26일생. 1984년 조선대학교 전기공학과 졸업. 1985~2001년 한국전력공사. 2001~2014년 한국수력원자력. 2017.10~현재 대경기술주식회사 플랜트사업팀 이사.

Tel. 051.722.0855, Fax. 051.722.1330

E-mail : ajy@dkenc.kr