

대용량 유도전동기 기동 개선에 관한 연구

손석금*

A Study on Improving High-Power Induction Motor Starting

Seok-Geum Son*

요 약 본 논문에서는 전력에너지를 사용하는 산업체의 전동기용량이 점차 증가하고 있다. 전동기는 기동시 기동전류로 전압강하가 발생한다. 이 기동전류가 전력계통에서 대형 전동기 기동 시 전압강하로 기동이 어려워 인접한 전력계통에 나쁜 영향을 미치게 된다. 또한 전동기는 부하의 크기에 따라 토크를 내는 것으로 토크의 크기에 따라 속도가 변하고 속도는 전동기 기동에 중요하다. 일반적으로 변압기나 비상발전기로부터 전동기까지의 거리가 짧으며 전동기 용량이 작아 기동에 대한 어려움이 없으나 산업설비 등에 많이 이용되는 대용량 전동기의 기동특성에 대한 이론과 실제의 운전특성을 측정 분석하였다. 따라서 이번 연구는 전동기 기동 시 속도와 토크에 관계와 대용량 전동기 기동을 위한 분석과 전동기 기동 해석에 대해 연구하였다.

Abstract The motor power of the industry to use the electric energy is gradually increased. The electric motor generates a voltage drop in the starting current during startup. The starting current is started it is difficult to have an adverse effect on neighboring power systems with large motor starting when the voltage drop across the power grid. In addition to that the motor torque according to the load depending on the size of the rotation speed is changed to a motor start-up speed is important. However, the distance to the emergency generator transformers or motors from the motor capacity is smaller but short and difficult to maneuver the theory and practice of the operating characteristics of the starting characteristics of the motor used a lot of large industrial plants were measured and analyzed. Therefore, this study investigated the motor starting Analysis and interpretation for the relationship with the large motor starting torque and speed during motor starting.

Key Words : Induction motor, High-Power Induction Motor, Motor Starting, Torque and speed, Starting Current

1. 서론

전력에너지를 사용하는 산업체에는 많은 전동기들이 사용되고 있으며 오늘날 에너지 이용의 경제성 등으로 인하여 전동기들은 그 용량이 점차 증대되고 있는 추세이다. 전동기는 기동 시 기동전류로 인하여 전압강하가 발생한다. 전력계통에서 대형 전동기 기동 시 전압강하로 기동에 어려움은 물론 인접한 전력계통에 나쁜 영향을 미치게

된다. 이런 기동전류를 줄이기 위해서는 전동기 전압을 높이거나 기동 전류를 제한해야 한다. 하지만 기동전류는 단자전압에 비례, 기동토크는 전압의 제곱에 비례하므로 전동기 부하에 따라서 기동이 가능한지를 미리 점검해야 한다[1].

대용량 유도전동기에 사용하는 대부분이 농형 유도전동기로 보수가 용이하고 장시간 연속운전에도 견디는 회전자 구조의 전동기이다. 유도전동기가 정지 상태에서 기동을 시작할 때 기동토크를

This work was performed by the 2015 year, school funding Osan University.

*Corresponding Author : Department of Electrical, Osan University(skson@osan.ac.kr)

Received February 23, 2016

Revised March 10, 2016

Accepted March 20, 2016

만들기 위해 정격 전류의 5배 정도의 돌입전류가 흐르게 되고 회전수가 증가함에 따라 돌입전류를 감소하게 된다. 이 과정에서 초기 매우 큰 돌입전류에 의한 전압강하로 기동을 실패하게 되는 경우도 발생한다[2].

또한 전동기는 부하의 요구에 따라 토크를 내는 것인데, 토크의 크기에 따라 속도가 변하는 것이 보통이며 부하가 늘어나면서 토크는 증가하지만 점점 부하가 늘어나면서 최대 토크의 한계에 도달하여 그 이상에서는 전동기가 정지되므로 전동기의 속도-토크 곡선은 전동기의 특성을 결정하는데 중요한 요소로 작용한다.[3]

일반적으로 변압기나 비상발전기로부터 전동기까지의 거리가 길지 않고, 전동기 용량이 작아 기동에 대한 어려움이 없으나 상수도 취수장이나 산업설비 등에 많이 이용되는 대용량 전동기의 기동 특성에 대한 이론과 실제의 운전특성을 측정 분석하였다.

따라서 대형전동기는 계획단계에서부터 기동 상태를 해석하여 대책을 수립하여야 한다. IEEE 399-1997 table 9-1에서 기술된 전동기 기동 검토 및 필요성, 문제점과 현상 등을 기준[4,5]으로 전동기 기동해석과 전동기의 기동에서부터 정상운전까지의 전압강하, 토크, 기동전류, 속도, 효율 및 슬립 등에 대한 동적인 변화 상태를 계산하고 변압기의 탭조정, 케이블 사이즈 조정 역률개선을 분석하여 최적 운영방안에 활용하고자 한다.

2. 전동기의 기동해석

2.1 전동기의 기동 시 전압강하의 허용한도

일반적으로 발전기가 없는 전력계통에서 변압기 KVA용량의 약 30% 이상 용량의 전동기가 설치되는 경우는 이의 기동상태를 검토하여야 하며, 전력회사와 연계 되지 않은 자가발전 단독 전력계통에서는 발전설비 kVA용량의 10~15%가 넘는 용량의 전동기가 설치 될 경우 반드시 이의 기동 상태를 사전에 검토하여야 한다[67]. 전동기 기동시는 기동전류로 인하여 전압강하가 발생하며, 전

동기 기동 시 허용 전압은 부하토크특성에 따라 다르다. 전동기 최소 기동전압은 정격전압의 80~90%범위로 매우 다양하다. 다음 [표 1]은 전동기 기동 시 전동기 및 인접한 전력설비의 최소허용전압을 나타낸 것이다.[3]

표 1. 전동기 기동 시 허용전압강하
Table 1. Allowable voltage drop levels when starting motors

전압강하 위치	최소허용 전압[%]
At terminals of starting motor	80
All terminals of other motors that must reaccelerate	71
AC contactor pick-up(by standard) (see 9.8, NEMA standards)	85
DC contactor pick-up(by standard) (see 9.8, NEMA standards)	80
Contactor hold-in(average of those in use)	60-70
Solid-state control devices	90
Noticeable light flicker	3% 변화

2.2 유도전동기의 속도-토크 특성

유도전동기의 속도-토크특성은 [그림 1]에서 보는 바와 같이 부하의 토크가 증가하여 부하토크가 전동기 최대토크 점을 초과하면 전동기는 그 속도가 급격히 저하하여 거의 정지 상태에 이르게 되는데 이와 같은 현상을 Stall 현상이라 한다.[3]

유도전동기의 안정운전을 위하여 [그림 2]와 같이 최대토크의 40% 전후에 해당하는 안정토크점과 동기속도 사이의 A점에서 운전하여야 한다. 즉 부하토크와 전동기 토크교점 A가 있어야 하며, 부하의 속도가 운전점 A의 운전속도 n 을 초과하면 부하

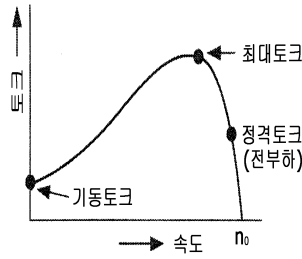


그림 1. 전동기의 속도-토크특성

Fig. 1. The motor speed-torque characteristics

부하 토크 T_L 은 전동기 토크 T_M 보다 크게 되어 전동기 속도가 저하하고, 부하의 속도가 n 에 미달하면 전동기 토크 T_M 이 부하토크 T_L 이 보다 크게 되어 전동기는 가속되어 n 에서 안정된다.

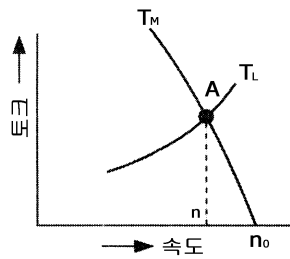


그림 2. 전동기의 안정운전

Fig. 2. Stable operation of the motor

2.3 유도전동기의 기동시간

유도전동기의 기동시간은 부하의 관성에 비례하고 전동기의 가속도에 반비례한다. 전동기가 정지 상태에서 속도 N_m 으로 가속하는데 필요한 시간은 GD^2 및 가속토크 T_a 에 의해 결정된다. 기동시간 t 는 식 (1)와 같다.

$$T_M - T_L = T_a = J \frac{dw}{dt} \tag{1}$$

여기서, $J = \frac{1}{4} GD^2$, $w = \frac{2\pi n}{60}$ 라고 하면, 전동기 정지상태에서 정격속도 N_m 까지 가속하는데 필요한 시간 t 는 식 (2)와 같다.

$$dt = J \frac{dw}{T_a} = \frac{1}{4} GD^2 \times \frac{(2\pi n)}{(60 \times 9.8 T_a)}$$

$$t = \frac{GD^2}{375} \int_0^{N_m} \frac{dn}{T_a} = \frac{GD^2 \cdot N_m}{375 \cdot T_a} \tag{2}$$

여기서, GD^2 : [전동기의 GD^2] + [전동기 축으로 환산한 부하의 GD^2] [kg·m²]

T_a : 가속 토크 [kg·m]

N_m : 회전속도 [rpm]

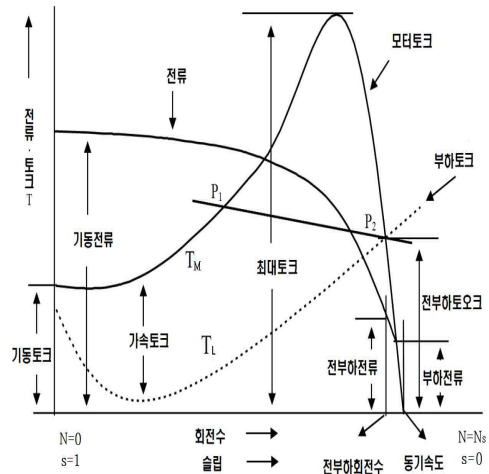


그림 3. 전동기 속도-토크특성 곡선

Fig. 3. Motor speed-torque characteristic curve

[그림 3] 전동기 속도-토크특성 곡선에서와 같이 가속토크는 전동기토크와 부하토크의 차이이며, 전동기 토크 T_M , 부하 토크 T_L 사이의 면적이 가속도 토크에 해당된다. 유도전동기의 기동전류는 정격전류의 5배 이상으로 전동기의 속도가 거의 운전 속도에 도달할 때까지 그 전류는 변함없이 유지하다가 운전속도에 가까워졌을 때 급격히 감소하여 정격전류가 된다.

3. 사례연구를 통한 전동기 기동해석

3.1 시험방법

[그림 4]는 사례연구에 사용한 고압유도전동기를 대상으로 시험을 실시 한 시뮬레이션[8,9] 계통도로서 전체부하 용량을 나타내고 있다. [그림 4] 시뮬레이션 계통을 구성한[9,10] 주요 데이터는 제조사에서 제공한 것으로 전동기의 일반적인 특성은 [표 2]와 같다.

또한 차단기는(ABC S/S) 3상 350[MVA]로 저항 $R=0.035438[PU]$, 리액턴스 $X=0.283508[PU]$ 로 $X/R=8$ 이며 변압기(TR-101)은 용량 3,000 [kVA], 정격전압 22.9/0.38[kV], %임피던스 7, $X/R=10.8$ 로 $\Delta-Y$ 결선이다. 케이블(CBL-0010)은 정격전압 380[V], F-CV 1C*3으로 185m² 병렬도체수 2, 길이 175[m] 케이블을 사용하였다.

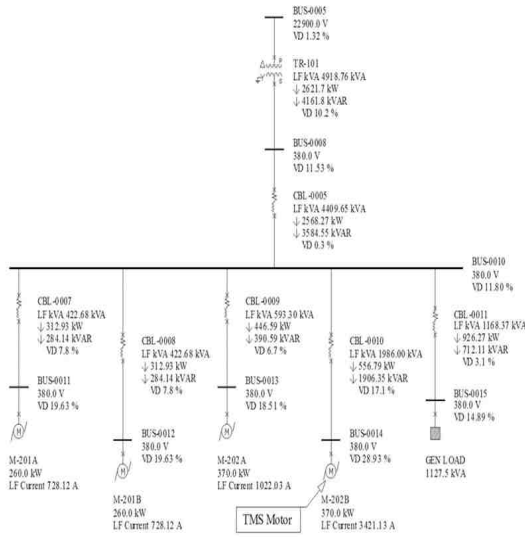


그림 4. 시뮬레이션 계통도
Fig. 4. Simulation system diagram

표 2. 전동기의 일반 특성

Table 2. General characteristics of the motor

구분	정격
정격전압	380[V]
정격전류	832.8[A]
정격출력	370[kW]
최대부하 역률	75.0[%]
기동시 역률	25[%]
전부하 효율	90.0[%]
회전수	514.29[rpm]
극수	14
기동전류	4,817[A](5.784PU)

3.2 전동기 기동해석 및 분석

[표 2] 전동기의 일반 특성에서 선정된 전동기 용량을 기준으로 380[kW] 전동기 전전압 기동 중 각 모션에서 나타내는 전압은 POWER TOOL 프로그램으로 시뮬레이션 한 결과로서 아래의 [그림 5] 전동기 부하 토크 특성곡선과 [그림 6] 전동기 속도 모션 전압 특성으로 나타내었고 [표 3]에 결과를 정리 하였다.

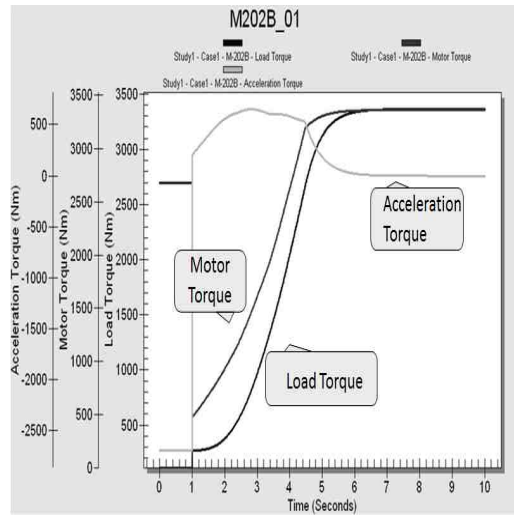


그림 5. 전동기 부하 토크 특성 곡선
Fig. 5. Motor load torque characteristic curve

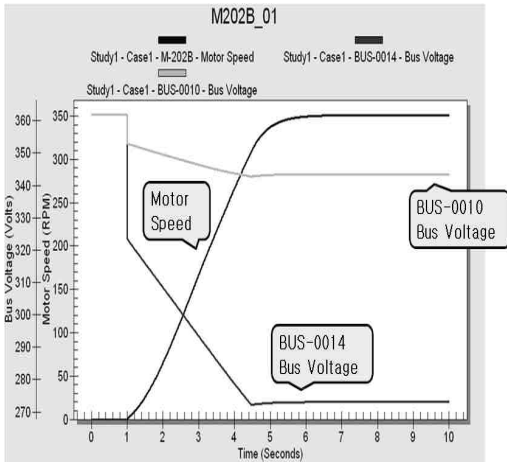


그림 6. 전동기 속도 모션 전압 특성

Fig. 6. Speed motor bus voltage characteristics

전동기 기동시 전압강하가 28.93[%]로 대단히 크며, 전동기 운전시 변압기에서의 전력조류는 3,378[kVA]로 변압기 용량 3,000[kVA]를 초과하여 전압강하가 5.8[%] 발생하여 변압기에서의 전압강하도 크게 나타났다.

[그림 5] 전동기 부하 토크 특성 곡선에서 전동기 토크와 부하 토크의 크기가 거의 같으며, 가속 토크가 적어 기동을 실패하였다.

표 3. 시뮬레이션 결과

Table 3. Recreation simulated results

구분		결과
기동시	BUS-0014 VD[%]	28.93
	BUS-0010 VD[%]	11.8
	Cable VD[%]	17.1
운전시	TR 전력조류[kVA]	3,378
	TR 전압강하[%]	5.8
	Cable VD[%]	6.3
	BUS-0014 VD[%]	13.07
	전동기 운전전류[PU]	1.15
운전여부		기동실패

[그림 6] 전동기 속도 모션 전압 특성 곡선과 [표 3] 시뮬레이션 결과 전동기 운전시 모션에서의 전압강하가 13.07[%]로 인하여 저주파전류가 958.03[A]로 전부하전류 832.8[A]의 1.15배가 되어

전동기가 과열되는 원인이 된다. 또한 전동기 전원공급 케이블의 전압강하가 6.3[%]로 상당히 높게 나타나는 것으로 분석이 전동기 기동에 실패의 원인이 되었다.

전동기 기동 해석 결과 변압기 용량 증대 또는 케이블의 굵기를 크게 하는 것과 같은 회로 변경을 실시하거나 또는 별도의 기동방안을 결정하여야 한다.

4. 전동기 기동 개선

4.1 변압기 탭 조정

변압기 1차측 탭을 -5[%]로 조정하여 시뮬레이션 한 결과로 전동기 기동 시 전압강하를 28.93[%]에서 24.77[%]로 개선되었으며, 변압기의 전압강하는 5.8[%]에서 급격히 강하되어 0.2[%] 개선이 되었다. 또한 전동기 운전 시 단자에서의 전압강하가 13.07[%]에서 7.02[%]로 개선이 되었으며, 케이블 전압강하로 6.3[%]에서 5.9[%]로 개선이 되었으나 변압기 탭 조정만으로는 전동기 기동을 실패하였다.

4.2 케이블 굵기 조정

케이블(CBL-0010)은 정격전압 380[V], F-CV 1C*3으로 185m² 병렬도체수 2, 길이 175[m] 케이블을 병렬도체수 3으로 조정을 하여 시뮬레이션 한 결과로서 아래의 [그림 7] 개선 후 전동기 부하 토크 특성곡선과 [그림 8] 개선 후 전동기 속도 모션 전압 특성으로 나타내었고 [표 4]에 결과를 정리 하였다.

표 4. 개선 후 시뮬레이션 결과

Table 4. After the simulated results improved recreation

구분		결과	
		개선 전	개선 후
기동시	BUS-0014 VD[%]	28.93	19.6
	BUS-0010 VD[%]	11.8	7.01
	Cable VD[%]	17.1	12.6
운전시	TR 전력조류[kVA]	3,378	3,266
	TR 전압강하[%]	5.8	0.1

시	Cable VD[%]	6.3	3.8
	BUS-0014 VD[%]	13.07	4.83
	전동기 운전전류[PU]	1.15	1.05
운전여부		기동성 패	기동성 공

[그림 6] 전동기 속도 모션 전압 특성 곡선과 [표 4] 시뮬레이션 결과 전동기 운전 시 모션에서의 전압강하가 13.07[%]로 인하여 저주파전류가 958.03[A]로 전부하전류 832.8[A]의 1.15배가 되어 전동기가 과열되는 원인이 된다. 또한 전동기 전원공급 케이블의 전압강하가 6.3[%]로 상당히 높게 나타나는 것으로 분석이 전동기 기동에 실패의 원인이 되었다.

[그림 7] 개선 후 전동기 부하 토크 특성 곡선에서 전동기 토크와 부하 토크의 크기가 확연히 차이가 나서 가속 토크가 크게 작용하여 전동기 기동을 성공하였다.

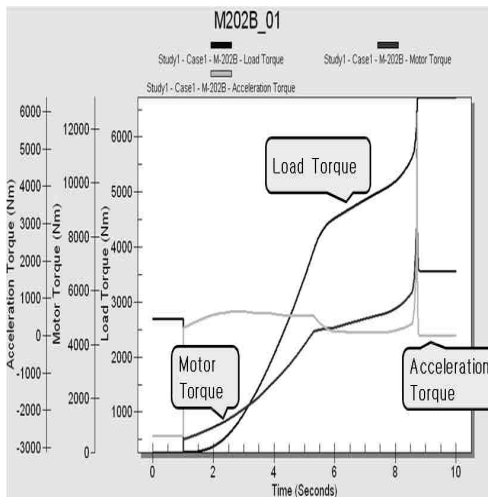


그림 7. 개선 후 전동기 부하 토크 특성 곡선
Fig 7. Improved after the motor load torque characteristic curve

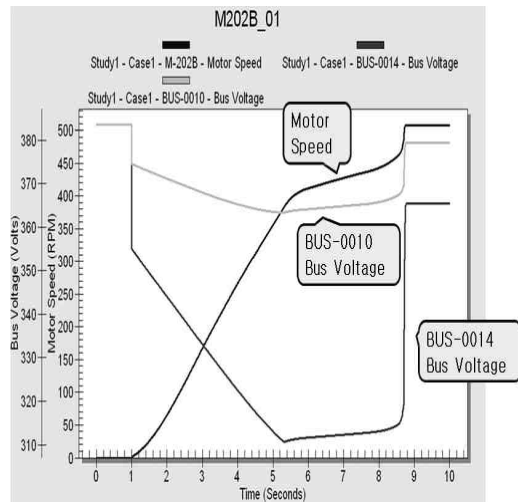


그림 8. 개선 후 전동기 속도 모션 전압 특성
Fig. 8. Improve motor speed after the bus voltage characteristics

전동기 기동 해석 결과 변압기 용량 증대 또는 케이블의 굵기를 크게 하는 것과 같은 회로 변경을 실시하거나 또는 별도의 기동방안을 결정하여야 한다.

5. 결론

이 실험을 통해 대용량 전동기를 전전압으로 기동 시 큰 기동전류로 인하여 전압강하가 발생하고 기동을 할 수 없게 됨을 알 수 있었다. 이런 기동전류를 줄이기 위해서 전동기 공급 전압을 높이거나 또는 기동전류를 제한해야 하는데 기동전류는 전압에 비례하고 기동토크에 반비례 하므로 전동기 부하에 따라서 기동 토크가 부족한 경우가 자주 일어날 수도 있으므로 전동기 공급 전압을 높이거나 또는 기동전류를 제한하여 전동기를 기동시키고자 할 경우 전동기 기동이 가능한지를 사전에 검토하는 것이 중요하다는 것을 알 수 있었다.

따라서 대용량 유도전동기 기동해석으로 분석한 결과 기동시간 및 기동전류, 전압강하를 모두 고려고 변압기 탭, 전원공급 케이블을 고려한 전동기 기동법이 최적의 조건임을 확인하였다.

REFERENCES

- [1] K-water “Large motor starting characteristic analysis report”, 2012
- [2]. “IEEE Recommended Practice for Industrial and Commercial Power System Analysis” 9.2.2, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, IEEE Std 399-1997
- [3] IEEE recommended practice for electric power distribution for industrial plants, ANSI/IEEE Std. 141,1986
- [4] Lee Eun-Chun, Kim Jae-Cheol, “Analysis on Induction Motor Starting Characteristics”, KIEEME Vol. 26, No. 5, 2013
- [5] Yi Jo Son, “Power System Analysis and Optimization Technology”, Munundang, 2014
- [6] Seung-Jae Lee 외6, “ Study on Emergency Generator Capacity Selection(PG3) in the Chemical Plant” KIEE Vol.29, No.12, 2015
- [7] Yi Jo Son, “IEC 60606 Short Circuit Study”, SAEHONG ENGINEERING & CONSULTANT CO., LTD. 2013
- [8] Yi Jo Son, “power Tools for Windows, Fault Current Calculation and Coordination ”, SAEHONG ENGINEERING & CONSULTANT CO., LTD. 2008
- [9] Power Tools Manual, SKM, 2006
- [10] Yi Jo Son, “IEC 60606 Short Circuit Study”, SAEHONG ENGINEERING & CONSULTANT CO. LTD. 2013

저자약력

손 석 금 (Seok-Geum Son)

[정회원]



- 1969년 8월 10일 생
- 2012년 2월 숭실대학교 전기공학과 졸업 (공학박사)
- 발송배전 기술사
- 2014년 2월 ~ 현재 : 오산대학교 전기과 교수

<관심분야>