

기동시뮬레이션 방법에 의한 유도전동기 기동방식 선정

장중구***
서일대학*

서상진** 이민용**
상진기술엔지니어링(주)**

Selection of Motor Starting Method by Numeric Simulation

Chung-Koo Chang***
Seoil College*

Sang-Jin Suh** Min-Yong Lee**
Sangjin Engineering Co. Ltd.**

Abstract - Since a squirrel cage induction motor by NEMA Design types is designed to withstand full-voltage starting, direct starting method can be the most economical one. Starting a squirrel cage motor from standstill by connecting it directly across the line may allow inrush currents of approximately 500-600% of rated current at lagging power factor of 35-50%. For many of the large motors, the starting inrush current may be great enough to cause voltage dips, which may adversely affect the building's lighting system. Electric utilities also have restrictions on starting currents, so that voltage fluctuations can be held to prescribed limits.

Therefore the need for choosing the most appropriate method of motor starting is quite essential.

In this paper, we proposed a plan for the selection of the most appropriate motor starting method, first by way of numeric simulation using manufacturer's data and second by way of actual experience. So far, more often than not, the selection of motor starting method has been accomplished only as regards to the capacity of the motor and the frequency of starting and stopping. But nowadays such high-tech apparatus as soft starters are being developed, and we are on the position to give more attention to clarify the way of selection of the motor starting method.

1. 서 론

3상유도전동기는 전전압 직입기동에 적합하게 만들어지므로 기동이 확실하고 설비비가 적게 드는 방식이기는 하지만 기동전류가 크기 때문에 주변의 전동기나 기타부하의 단자전압을 떨어뜨리는 문제를 일으킬 수 있다. 그 밖에도 콘베이어, 인쇄기, 권상기동과 같은 정토크 부하의 경우 급격한 기동과 정지로 말미암아 연결된 설비 부품에 마모를 일으키거나 공정상 나쁜 영향을 미치는 경우도 있다. 때문에 전동기의 용량과 부하특성에 따라 적절한 기동방식을 선정할 필요가 있다. 나아가 전동기의 기동특성은 전력계통의 운전조건과도 긴밀한 관계가 있기 때문에 적절한 기동방식을 채택하기 위해서는 전력계통의 운전조건을 고려하여야 한다. 본 논문에서는 컴퓨터 기동시뮬레이션 방법을 통하여 각각의 기동방식별로 기동특성을 고찰하고 기동시뮬레이션을 이용한 동력설비 설계사례와 함께 바람직한 유도전동기 기동방식 선정조건 및 방법을 제시하였다. 현재까지는 대체적으로 전동기의 용량과 기동정지 빈도만을 기준으로하여 일괄적인 기동방식 선정이 이루어지고 있으나, 전동기 유연기동장치(soft starter)와 같은 고성능 고가의 기동장치들이 개발됨에 따라 명확한 선정기준을 가지고 적절한 기동방식을 선정할 필요가 있다.

2. 본 론

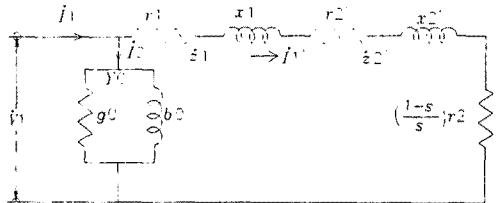
2.1 유도전동기의 토크 특성[1]

유도전동기의 토크 T는 2차입력 P₂에 정비례하고 동기속도에 역비례한다. 그런데 동기속도는 일정하므로 T와 P₂는 비례한다. 따라서 2차입력 P₂를 토크 T로 표시할 수도 있다. 이렇게 표시한 토크를 동기와트로 표시한 토크라 하는데 유도전동기의 토크는 동기와트(Synchronous Watt)로 표시하는 경우가 많다. 동기와트로 표시한 토크 τ_s와 회전자 입력 P₂는 그림 1의 유도전동기 등가회로에서 다음과 같이 계산된다

$$P_2 = m_1 I_1'^2 \cdot \frac{r_2'}{s} \quad (1)$$

$$I_1' = \frac{V_1}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r_2'}{s}\right)^2 + (x_1 + x_2')^2}} \quad (2)$$

$$\therefore \tau_s = P_2 = \frac{m_1 v_1^2 \frac{r_2'}{s}}{\left(r_1 + \frac{r_2'}{s}\right)^2 + (x_1 + x_2')^2} \quad (3)$$



- r₁ : 고정자 권선 각상의 저항
- x₁ : 고정자 권선 각상의 누설리액턴스
- r₂ : 회전자 권선 각상의 저항
- x₂ : 회전자 권선 각상의 누설리액턴스
- m₁ : 고정자 상수
- s : 슬립

[주] x₂, r₂, z₂ 은 각각 1차측에 환산한 2차 임피던스

그림 1 3상유도전동기의 간이 등가회로

식(3)에서 m₁, r₁, x₁ 및 x₂'은 일정하므로 v₁이 일정하다면 τ_s는 $\frac{r_2'}{s}$ 에 따라 변화한다.

즉 τ_s는 $\frac{r_2'}{s}$ 의 함수이다.

2.2 기동전류와 기동특성

유도전동기의 기동시에 $s=1$ 즉 회전자가 정지하고 있어 고정자에서 발생하는 회전자속은 동기속도로 회전자 권선을 끊게 되어 회전자 권선에 큰 기전력이 유기되므로 회전자에 흐르는 전류는 전부하전류의 5~6배이상 되는 것이 보통이다. 그러나 기동전류가 많이 흐르는데도 불구하고 기동시키는 순간에는 2차리액턴스가 커서 2차역률이 나빠지므로 기동토크는 적다. 따라서 기동 전류를 제한하고 원하는 기동토크를 얻기 위해서는 적절한 기동법이 필요하다.

농형전동기는 권선형과 같이 회전자에 저항은 넣을 수가 없으므로 기동전류를 제한하기 위하여 공급전압을 낮추어야 한다. 그런데 토크는 공급전압의 제곱에 비례하므로 기동토크가 작아진다. 이것이 농형 유도전동기의 결점이며 무부하 또는 경부하가 아니면 기동이 어렵다. 기동전류가 지나치게 클 경우에는 전동기코일의 열적 한계를 초과하여 전동기코일의 손상을 일으킬 수 있는가 하면 전동기 단자전압을 강하시켜 동일모선에 접속된 타 부하에 부정적영향을 미치게 된다. 따라서 일반적으로 전동기제작시 기동전류가 전부하전류의 650%[3]를 넘지 않도록 하고 있으며 그림 2와 같이 보호계전기를 이용하여 전동기를 보호한다

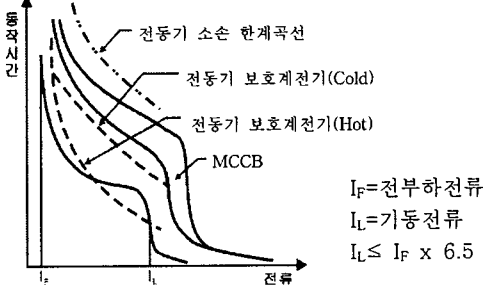


그림 2 전동기 보호용 보호계전기 동작특성 곡선

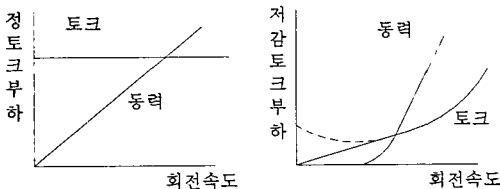
2.3 전동기 부하의 토크-속도 특성

전동기에 부과되는 부하의 종류에 따라 토크와 회전속도 그리고 입력간의 관계가 달라진다.

컨베이어, 인쇄기, 권상기 및 방직기 등과 같이 토크가 일정하고 동력이 속도에 정비례하는 특성을 가진 부하를 정토크부하라 한다.(그림3 a)

송풍기 및 원심펌프와 같이 토크가 속도의 2승에 비례하고 동력은 속도의 3승에 비례하는 특성을 가진 부하는 저감토크부하라고 칭한다(그림3 b)

그밖에 권취기, 정철삭 공작기계 및 정출력 발전기와 같이 특수한 부하로써 토크는 회전속도에 반비례하고 동력은 일정한 부하를 정출력 부하라고 한다.



(a) 정토크 부하 (b) 저감토크 부하
그림 3 전동기 부하의 토크-속도 특성

이상과 같은 부하의 토크-속도 특성은 유도전동기의 기동방식을 선정하는데 있어 매우 중요한 요소이다

2.4 기동방식에 따른 기동특성

2.4.1 전전압 기동

소용량 전동기는 기동장치 없이 직접 전전압을 공급하여 기동시킨다. 이때의 기동전류는 전부하전류의 6배정도가 되지만 전부하 전류 자체가 적으므로 자장이 없다

통상적으로 5kW또는 11kW이하 전동기에 전전압 기동방식을 적용하는 것이 적당한 것으로 알려져 있으나 [1,3,4,6] 전동기 용량 못지 않게 중요한 것이 전동기 부하의 토크-속도 특성이다. 즉 기동시에 큰 토크를 요하는 정토크 부하 혹은 정출력부하의 경우에는 기동 토크가 큰 전전압 기동방식을 적용할 필요가 있을 수 있다. 다만, 그러한 경우에는 전동기 기동시 전원계통의 전압강하가 허용범위내에 있는지도 함께 검토되어야 한다

그림 4는 380V, 3 ϕ , 11kW전동기를 전전압 기동방식으로 기동할 경우의 기동특성 곡선이고 그림 6은 동일 전동기를 Y- Δ 기동방식으로 기동할 때의 기동특성 곡선이다. 전동기 기동특성 시뮬레이션은 Power Tools[5]를 이용하였으며 전동기 특성데이터는 전동기 제작자[6]데이터와 Power Tools에 내장된 NEMA MG1 TYPE 전동기 특성데이터를 이용하였다.

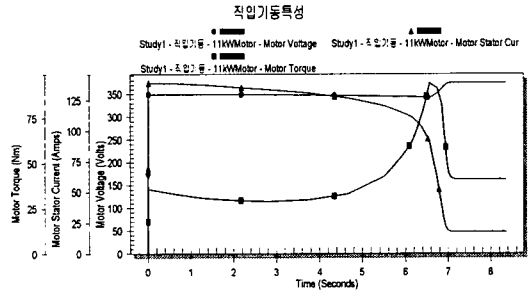


그림 4 3상유도 전동기(380V,11kW) 전전압 기동 특성 곡선

케이블 사이즈는 8mm²이고 배선거리는 100m를 적용하였다. 전전압 직접기동시 기동시간은 7초 정도이고 최대 기동전류는 138.9A로 정상운전전류의 약 5.9배가 된다.

2.4.2 Y- Δ 기동

고정자 3상 권선을 운전시에는 Δ 로 연결되게 하고 기동시에만 Y로 연결하면 (그림5) 1상 권선에 가해지는 전압은 기동시 전전압의 $\frac{1}{\sqrt{3}}$ 즉 60%정도가 된다. 이

러한 경우 기동토크는 $(\frac{1}{\sqrt{3}})^2 = \frac{1}{3}$ 이 되고 기동전류 역시 전전압 기동전류의 $\frac{1}{3}$ 로 감소가 된다. Y- Δ 기동방식은 기동전류를 줄임으로써 계통의 전압강하를 방지할 수 있는 반면에 기동토크가 작고 기동후에 정상운전으로 전환시 전전압이 인가되어서 전기적, 기계적쇼크를 받게 되는 단점이 있다

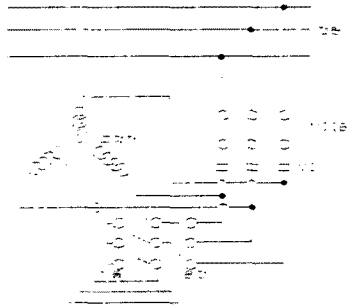


그림 5 Y-Δ기동 전동기 결선도

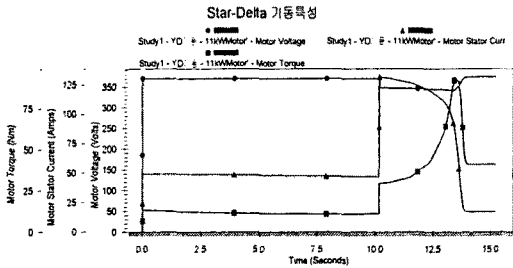


그림 6 3상 유도전동기(380V,11kW) Y-Δ기동특성곡선

그림 4와 동일한 전동기를 Y-Δ방식으로 기동시키고, Y-Δ전환을 동기속도의 약 45%에서 이루어지도록 한 결과 기동시간은 약 14초 정도가 걸렸으며 기동전류는 초기에는 50A이하이나 Y-Δ전환 순간 130A에 이른다. Y-Δ기동방식 적용시에는 기동전류를 제한할 수 있어서 전동기 모선의 전압강하가 적은 장점이 있는 반면에 기동토크가 적고 기동시간이 전전압 방식에 비하여 길어지므로 저감 토크보다 이외의 부하에는 적용하기가 곤란하다. 일반적으로 5.5~37kW 용량의 전동기에 Y-Δ기동방식을 적용하는 것이 적합하다고 알려져 있다[3]

2.4.3 리액터 기동

3상 유도 전동기의 기동방식 가운데 전전압 기동과 Y-Δ기동방식 다음으로 많이 사용되는 방식은 리액터 기동방식이다. 리액터 기동은 전원과 전동기 사이에 직렬리액터(공극이 있는 리액터)를 삽입하여 전동기 단자에 가해지는 전압을 떨어 뜨리는 방법이다. 전동기의 등가회로가 그림 7과 같다고 가정하여, 전동기에의 인가전압이 a배(a<1)가 되도록 리액터를 선정하여 이 리액터를 X [Ω]이라 하면

$$\frac{X}{X_m} = \frac{1-a}{a} \quad (4)$$

가 된다. 전동기를 전전압기동한 경우의 기동전류를 I_s 라고 하면 $I_s = \frac{V}{X_m}$ (V는 전원전압)리액터 기동의 경우 기동전류를 I' 이라 하면

$$I' = \frac{V}{X + X_m} = \frac{V}{X_m \left(\frac{1-a}{a} + 1 \right)} = \frac{V}{X_m \frac{1}{a}} = a \cdot \frac{V}{X_m} = a I_s \quad (5)$$

따라서 기동전류는 전전압기동의 a배, 토크는 a^2 배가 된다 리액터 기동방법 사용시, 가속하면 전동기의 임피던스가 증대하면서 전동기의 분담전압이 증가하므로 부하토크의 증대에 어느 정도 대응할 수 있다. 리액터

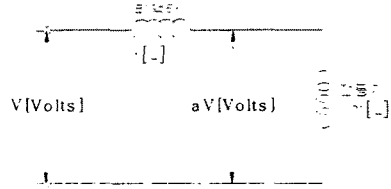


그림 7 리액터 기동 전동기 등가회로

법은 50-60-70-80-90[%]이며 기동토크는 25-36-49-64-81[%]이다. 그림 8은 380V, 3Φ, 37kW전동기를 리액터 기동방식으로 기동할 경우의 기동특성 시뮬레이션 결과이다. 그림 8에서 보는 바와 같이 기동전류는 전압강하 비율로 감소하고 토크는 전압강하 제공비율로 감소하므로 토크 부족에 의한 기동불능에 유의해야 한다 리액터 기동방식은 기동토크를 줄이는 완충기(쿠션스타터)로 사용할 수 있으며, 기동 및 정지가 잦은 용도에서는 사용하지 못한다[4]

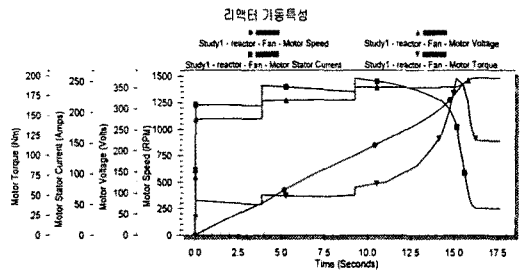


그림 8 3상 유도전동기(380V,22kW) 리액터 기동특성곡선

2.4.4 유연기동장치(Soft Starter) 기동

일명 VVCF(Variable Voltage Constant Frequency) 기동장치라고도 하며, SCR소자를 이용한 전압조절방식으로 Y-Δ기동방식과 달리 기동시 전동기의 부하와 속도 상승에 따라 전압을 적절히 상승시켜 유연한 기동을 할 수 있으며, 기동전류를 제한하여 기동토크를 일정하게 유지하면서 기동을 원활하게 할 수 있는 전류제한 기동방식을 제공한다[7]

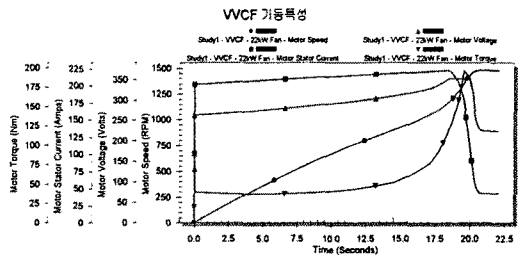


그림 9 3상 유도전동기(380V 22kW) 유연기동장치 기동특성(Current Ramp방식)

유연기동장치를 사용하는 목적은 기동전류 제한에 의한 모션전압강하 방지와 무부하 혹은 경부하 운전시에 전동기 단자전압을 낮추어 전동기 손실(철손)을 줄여줌으로써 에너지 효율을 높이는 것이다. 그리고 기동, 정지가 빈번한 전동기의 경우에도 유연기동장치를 사용함으로써 전동기의 축이나 부하기계에 미치는 기계적충격을 완화시키는 효과를 거둘 수 있다. 그림 9는 380V, 3Φ, 22kW전동기를 유연기동장치를 사

용하여 전류제한 방법으로 기동시킨 경우를 시뮬레이션한 것이다.

2.5 기동시뮬레이션을 이용한 동력설비 설계사례

장대(長大)터널의 경우 배전거리가 1km이상 되는 경우가 빈번하게 발생된다. 따라서 저압(380V)전동기를 사용함에 있어 기동방식과 전동기 정격전압의 검토가 필수적으로 요구된다. 그림 10은 380V, 37kW제트팬의 설계조건과 기동특성 시뮬레이션 결과이다.

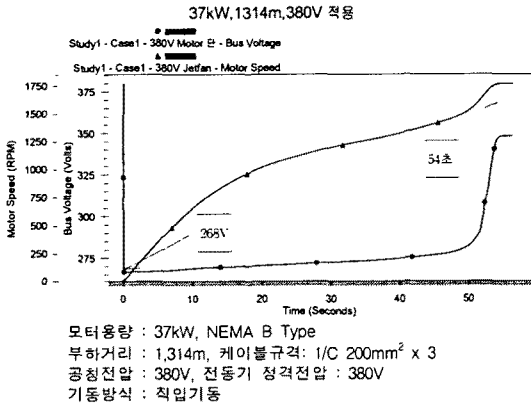


그림 10 380V 37kW전동기 기동시뮬레이션 그래프

시뮬레이션 결과 나타난 문제점은 기동시 과도한 전압강하(정격전압의 70.5%까지 저하)로 인하여 기동시간이 지체(50초)됨으로써 전동기가 과부하상태가 되고 동일모선의 여타부하에도 지장을 초래할 우려가 있다. 따라서 전동기를 380V정격전압 대신 460V계통 440V 정격전압 전동기로 교체하고 배전전압을 바꿔서 시뮬레이션 한 결과 그림 11과 같은 정상적인 기동특성곡선을 얻을 수 있었다.

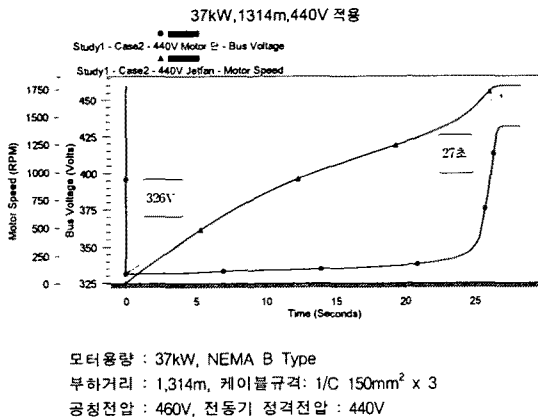


그림 11 440V 37kW전동기 기동시뮬레이션 그래프

본 사례에서는 배전효율을 기하기 위하여 배전전압을 380V에서 460V로 승압을 채택하였으나, 저압배전전압의 변경이 곤란한 경우에는 유연기동장치(Soft Starter)를 사용하여 기동시 과도한 전압강하와 기동지연상태가 발생하는 것을 예방할 수 있다

3. 결 론

3상유도 전동기는 원칙적으로 전전압기동을 하는 것이

경제적으로나 기술적으로 바람직하지만 전동기 용량과 부하의 특성에 따라 종종 다른 기동방식을 택하는 것이 불가피하다. 그러나 문제점은 기동방식 선정에 있어서 뚜렷한 기준이 없다는 점이다. 현재까지 제시된 바로는 [1,3,4,6]전동기의 용량과 부하의 종류에 따른 개략적인 선정지침만이 주어져 있을 뿐이다.

전동기의 기동방식은 전력계통에 미치는 영향, 전동기 부하의 운전효율, 전동기 수명등에 미치는 영향이 크므로 다음사항을 종합적으로 고려하여야 한다.

- ① 정격전압 및 전압강하
전동기의 정격전압은 모선의 공칭전압보다 5%정도 낮은 전압으로 택하고 전동기 운전시 단자전압은 정격전압의 90%이상이어야 한다[8]
- ② 전동기 기동특성
전동기 부하의 토크특성을 고려하여 전동기가 원활하게 기동이 되는지를 시뮬레이션을 통해서 검토한다
- ③ 전동기 운전특성
전동기의 기동정지가 빈번한 경우에는 기동충격을 줄이기 위해 유연기동장치(Soft starter)의 적용이 고려되어야 한다
- ④ 전동기 보호방식
전동기 기동시뮬레이션을 통해서 전동기 기동전류 곡선을 정확히 알 수 있다. 이를 토대로 보호계전기의 형식과 정정값을 결정한다
- ⑤ 에너지 절감
유도전동기는 일반적으로 속도조정이 용이하지 아니하므로 경부하 혹은 무부하시에도 정속운전을 하게 된다. 무부하 또는 경부하 운전이 잦은 전동기는 에너지 손실을 줄이기 위해서는 무부하 운전시에는 자동적으로 전압을 줄여주는 유연기동장치를 사용할 필요가 있다.
- ⑥ 고조파 및 서지 대책
유연기동장치(VVCF), 인버터(VVVF)등과 같은 전력용반도체 소자를 사용하는 기기로 말미암아 발생하는 고조파 혹은 서지전압이 전동기 코일의 절연파괴를 일으키는 경우가 종종있다. 따라서 이와 같은 경우에는 고조파 필터설치 혹은 절연강도 상향조정등과 같은 조치가 필요하다

따라서 이상과 같은 종합적인 검토를 위해서는 컴퓨터 기동시뮬레이션이 반드시 필요하며, 그렇게 함으로써 전동기의 기동과 운전중에 전력계통에 끼치는 영향까지도 사전에 파악하여 전력계통을 안정적이고 효율적으로 운영할 수 있다.[끝]

-끝-

(참 고 문 헌)

- [1] 이윤중, "신편 전기기계", 동명사, 1981, pp.302~340
- [2] NEMA Standards Publication No. MG1-1998, Motors and Generators, Part 12
- [3] 지철근, 정용기 공저, "최신기계설비", 문운당, 1998.7.30 pp62~73
- [4] 건설교통부, (사)한국조명, 전기설비학회, "건축전기설비 설계기준, 도서출판 의재, 2000.5, pp.148~152
- [5] Power tools, SKM Co, Ltd. Version 3.8
- [6] 주식회사 효성, "효성 3상저압모터", www.hyosung.co.kr, 2000.04
- [7] Recommended Practice for Electric Power Systems in Commercial Buildings, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., September 8, 1991, pp265~292
- [8] IEEE Recommended Practice for Electrical Power Distribution for Industrial Plants, The Institute of Electrical and Electronic Engineers, Inc., May 1996, pp81~82