취수장 2500kVA 대용량 유도전동기의 기동특성 분석

정원욱, 김상준, 윤기갑, 서정출
한전 전력연구원, 충남대학교

Analysis on Pumped 2500kVA Induction Motor Starting Characteristics

Won-Wook Jung, Sang-Jun Kim, Ki-Gab Yoon, Jung-Chul Seo
KEPCO/KEPRI, Chungnam National Univ.

Abstract - 대용량 유도전동기가 정지상태에서 기동할 때 매우 큰 돌입전류에 의해 Voltage Sag를 유발하게 되며 유도전동기에 걸리는 기계적 토크보다 큰 전기적 토크가 가해지지 않으면 유도전동기는 기동에 실패하게 된다. 따라서 대용량 유도전동기의 기동을 위해서는 Voltage Sag를 줄이고 전동기의 가속에 필요한 기동토크를 인가할 수 있는 기동법이 필요하다. 본 논문에서는 유도전동기의 기동특성을 모의할 수 있는 모델링 기법을 제안하고 시뮬레이션에 의한 기동특성을 모의하여 적절한 기동법을 적용한다. 본 논문에서 사용한 대상 유도전동기는 한국수자원공사 취수장에서 운영하는 2500KVA 대용량 유도전동기를 사용하였으며 PSCAD/EMTDC 소프트웨어를 사용하여 시뮬레이션을 수행하였다.

1. 유도전동기

1.1 농형 유도전동기

농형유도전동기는 보수가 용이하고 장시간 연속운전에도 견디는 회전자 구조의 전동기이다. 이러한 이유로 펌프로 사용되는 대부분의 전동기는 농형 유도전동기를 사용한다. 그림 1은 유도전동기의 동작 특성을 보여준다.

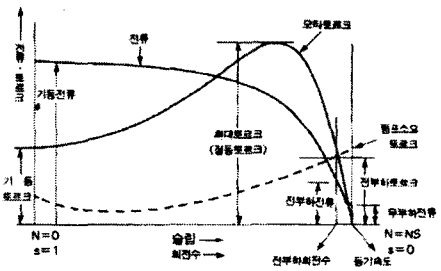


그림 1. 전동기 속도 토크 곡선

유도전동기가 정지상태에서 기동을 시작할 때 그림 1에서처럼 기동 토크를 만들기 위해 정격 전류의 5배정도의 돌입전류가 흐르게 되고 회전수가 증가함에 따라 돌입전류를 감소하게 된다. 이 과정에서 초기 매우 큰 돌입전류에 의한 전압강하로 저전압계전기가 트립되어 기동을 실패하게 되는 경우가 발생한다. 이러한 이유로 대용량 유도전동기의 기동을 위해서 돌입전류를 줄이고 전압강하를 줄이기 위한 목적으로 기동법이 필요하게 된다. 따라서 본 논문에서는 2500kVA 유도전동기의 기동특성을 모의할 수 있는 모델링 기법을 제안하고 가장 널리 사용되는 리액터 기동법을 채용하여 기동 특성을 분석한다.

1.2 유도전동기의 운동 방정식

유도전동기의 일정한 회전자 속도에 대한 유도기 내부의 전자기 토크는 식 1과 같이 전압의 제곱에 비례하여 형성된다.

$$T_e = Ks\,V^2 \qquad \text{식 (1)}$$

여기서, K는 유도기 사양에 따라 결정되는 상수이며 s는 스립을 나타낸다.

회전자의 동적 특성은 식 2와 같이 운동 방정식(Swing equation)에 의하여 결정되며 입출력의 불평형은 회전체의 감속 또는 가속의 결과로 나타난다.[1]

$$J\frac{dw}{dt} = T_e - T_m \qquad \text{식 (2)}$$

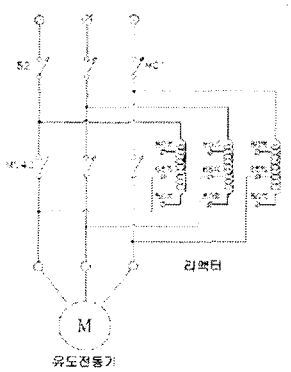
여기서 J는 회전자의 관성 모멘트이고 T_m은 기계적 토크, T_e는 전자기 토크, w는 회전자 속도를 의미한다. 유도전동기의 경우 일정한 전자기 토크에 비하여 기계적 토크가 증가하거나 혹은 일정한 기계적 토크에 비하여 계통의 전압강하로 인하여 전자기 토크가 감소하는 경우에는 회전자를 감속시키게 된다. 회전자의 가속은 식2에서와 같이 기계적 특성을 결정짓는 회전자 관성 모멘트에 많은 영향을 받는다.

따라서 유도전동기의 기동을 위해서는 모터에 걸리는 부하인 기계적 토크보다 큰 전기적 토크가 지속적으로 가해질 때 회전자가 가속되어 정상상태에 이를 수 있다 또한 관성모멘트가 클수록 유도전동기의 기동시간은 길어지게 되는 특성이 있음을 알 수 있다.

1.3 리액터 기동법

리액터 기동은 펌프, 팬 등과 같은 유체기계에서 비교적 경부하로 시동하는 부하에 적용하여 전동기 전류를 저감시키며, 또 기동 토크의 저감에 의한 Cushion Sart의 목적으로 사용된다. 전동기의 기동 시에 이상돌입전류의 난점을 제거하고 동시에 전압강하를 줄이기 위한 목적으로 전동기의 기동시 사용된다.

1.3.1 리액터 기동법의 동작원리



리액터 기동기의 동작원리는 그림 2와 같이 전동기의 1차 측에서 리액터를 삽입하여 기동하고 기동 완료 후 이것을 단락하는 방법이다.

이 방법에 의해 기동하면 기동전류는 리액터의 전압탭(%)에 비례해서 감소하고 기동 토크는 전압탭(%)의 2승에 비례하여 감소한다.

그림 2. 리액터 기동의 동작원리

2. 유도전동기 기동특성 모델링

2.1 2500KVA 농형 유도전동기

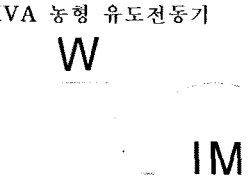
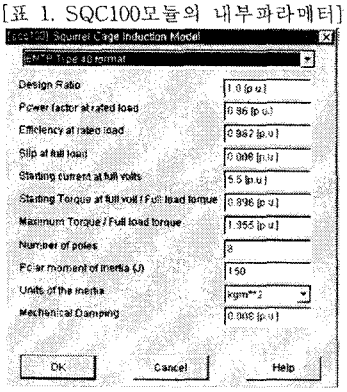


그림 3. EMTDC에서의 농형유도기 모듈(SQC100)

PSCAD/EMTDC에서는 동기전동기는 물론 유도기 형태의 전동기 등 다양한 종류의 전기기기들을 제시하고 있으며, SQC100 농형 유도전동기 모델을 이용하여 유도전동기의 모델링을 수행하였다. 그림에서 W는 유도전동기의 회전 속도를, S는 전동기 출력특성 제어 변수를, 그리고 T는 양의 값으로 유도전동기의 외부입력이 된다. SQC100 모듈은 입력 변수로써 회전자의 회전속도(W) 또는 입력 토크(T)를 사용할 수 있는데 이들 사이의 전환은 제어 변수 S에 의해 가능하다. S가 0이면 유도전동기는 토크제어 모드로 동작하여 T단자에 연결되어 있는 입력을 기준으로 동작하며, 1일 경우 스피드 제어 모드로 동작하여 W단자에 연결되어 있는 입력을 기준으로 동작하도록 구성되어 있다. SQC100모듈은 유도전동기의 정격용량이 주어지면 자동적으로 내부파라메터가 생성되고, 제어변수 W, S, T에 의해 동작된다. 그러나 과도상태에서 보다 정확한 특성을 얻기 위해 본 논문에서는 PSCAD/EMTDC에서 요구하는 EMTP Type 40 포멧의 내부 파라메터를 현장으로부터 취득하고 표 1과 같이 입력하여 모델링을 수행하였다.

[표 1. SQC100모듈의 내부파라메터]



2.2 기동특성 모델링

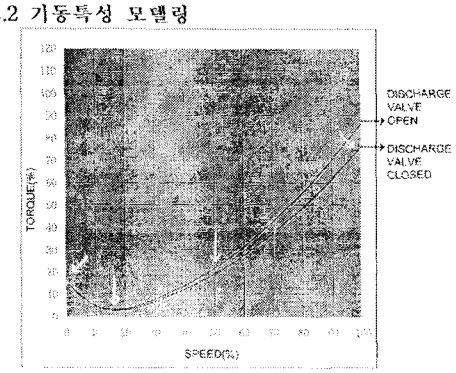


그림 4. STARTING TORQUE-SPEED CURVE

그림 4는 제작업체에서 제공한 펌프부하로 사용되는 유도전동기의 실제 속도-토크 곡선이다. 그림에서 확인할 수 있는 것처럼 유도전동기가 정지상태에서 정상상태까지의 속도 변화에 대해 유도전동기에 걸리는 펌프 부하는 변하게 된다. 따라서 유도전동기의 정확한 기동특성을 모의하기 위해서는 그림 1의 T단자에 속도에 대한 부하 특성을 입력해 줌으로써 구현할 수 있다.

본 논문에서는 펌프부하의 속도-토크 곡선을 속도(w)에 대한 토크(T_m)의 3차 함수로 구현하여 유도전동기(SQC100) 모듈의 입력으로 사용함으로써 유도전동기의 기동 특성을 모의하였다.

그림 4.의 화살표로 표시된 다음과 같은 4개의 포인트를 이용하여 식 (3)과 같이 속도에 대한 토크의 함수를 얻어냈다.

(0, 0.15), (0.15, 0.04), (1, 0.75), (0.5,0.2)

$$T_m = -1.6w^3 + 3.4w^2 - 1.2w + 0.15 \qquad \text{식 (3)}$$

2.2.1 펌프 부하 모델링

식(3)을 PSCAD 상에서 그림 5와 같이 구현하여 그림 6의 속도-토크 곡선을 구현하였다.

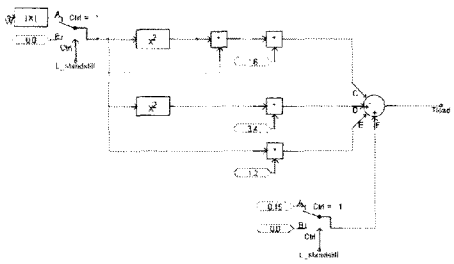


그림 5. 부하모델링 블록

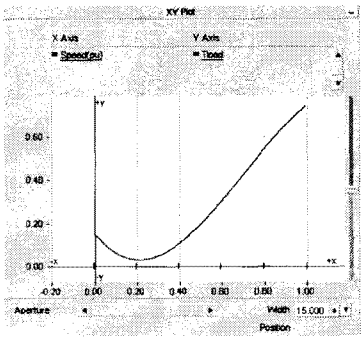


그림 6. 펌프부하의 속도-토크 곡선

3. 시뮬레이션 결과

펌프부하의 속도-토크 곡선을 그림1의 T단자에 입력하여 모터 속도의 증가에 따른 기동 특성을 모의하여 실측 데이터와의 비교를 통해 모델링의 신뢰도를 검증한다.

그 다음 80%, 65% 리액터 탭에 대한 각각의 기동특성을 모의하여 기동시간, 기동전류, 전압강하 등의 기동특성을 확인한다.

[표 2. 측정 변수]

측정 변수	측정 값	단위
Speed(pu)	유도전동기 로터 속도	pu
Te_electric torque(pu)	유도전동기 출력 토크	pu
Tm(pu)	펌프 부하 토크	pu
I_motor	전동기 쪽으로 흐르는 전류	kA
Mtr_HV	Mtr. 1차측 전압	kV
Mtr_LV	Mtr. 2차측 전압	kV
TERMINAL VOLTAGE	유도전동기 단자 전압	kV

3.1 전전압 기동

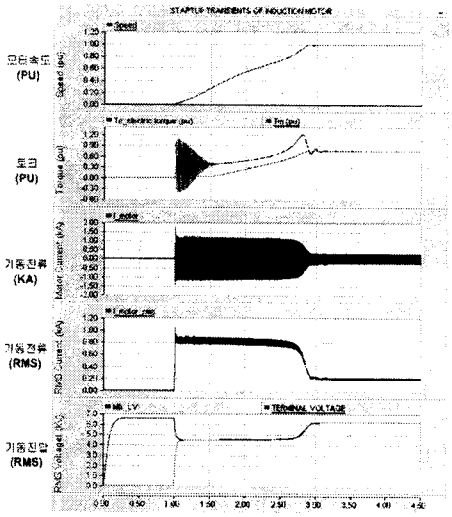


그림 7. 전전압 기동시 기동특성

그림 7은 기동기 없이 전전압으로 기동되는 유도전동기의 기동특성을 모의한 것이다. 전전압 기동시 실측 데이터는 아래와 같다.

DATA SHEET	
기동 시간	1.9초
Starting Current	1276.4A
Full Load Current	232.6A

모의 실험 결과인 그림 7에서 확인할 수 있는 것처럼 실측 데이터의 값과 모의 실험값이 거의 일치하는 것을 확인할 수 있다. 이 결과로부터 본 논문에서 제안한 모델링 기법의 신뢰성을 확인할 수 있다.

기동기의 채용없이 전전압 기동했을 때 기동시간 1.9초로 빠르게 기동되었으나 30%이상의 전압강하가 일어나 저전압계전기(UVR)가 트립되어 전전압 기동시 심한 전압강하와 함께 기동에 실패하는 것으로 분석되었다.

3.2 80% 탭 리액터 기동

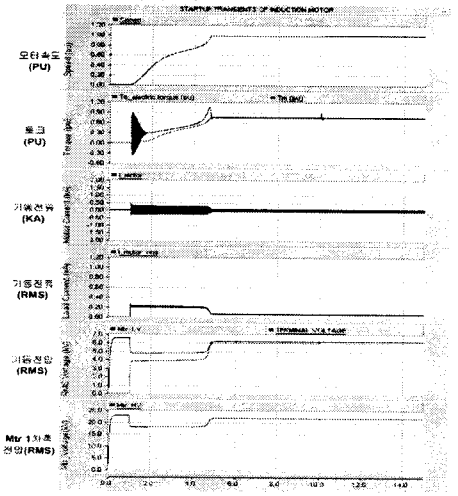


그림 8. 80%탭 리액터 기동기 사용시 기동특성

그림 8은 80%탭 리액터 기동기를 채용한 경우의 유도전동기의 기동특성을 보인다. 실험 결과에서 확인할 수 있는 것처럼 기동시간이 3.9초로 길어지면서 전전압으로 기동했을 때와 비교하여 기동전류가 크게 줄어들고 동시에 전압강하율도 적어지면서 기동에 성공하는 것을 확인할 수 있다.

3.3 65% 탭 리액터 기동

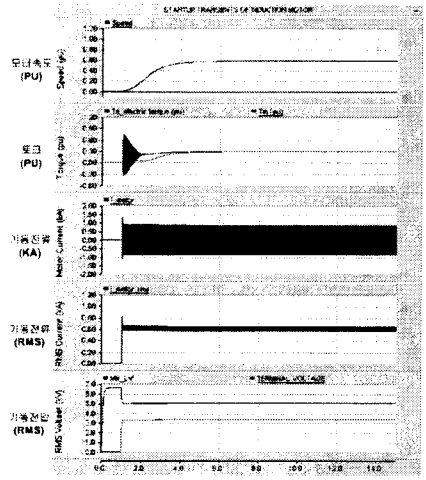


그림 9. 65%탭 리액터 기동기 사용시 기동특성

이번에는 기동전류를 더 낮추어 전압강하율을 더 적게 할 목적으로 리액터 기동기의 탭을 65%로 재설정하여 기동특성을 모의 실험하였다.

실험 결과 그림 9에서 확인할 수 있는 것처럼 전압강하율은 낮아졌지만 계속해서 기동상태에 머물고 있는 것을 확인할 수 있다.

리액터 탭을 65%로 설정했을 경우 유도전동기에 인가되는 전압이 낮아 부하토크를 가속시킬 수 있는 토크를 발생시키지 못하게 된다. 이 경우 식(2)에서와 같이 모터가 계속해서 가속되지 못하여 정상상태에 이르지 못하고 기동상태에 머물게 된다.

이렇게 리액터 기동기를 65%로 설정할 경우 정상상태에 도달하지 못하고 계속해서 기동상태에 머물게 되어 기동에 실패할 뿐만 아니라 기동시간이 길어지면 전동기가 소손될 위험도 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 펌프로 사용되는 2500kVA 대용량 유도전동기의 기동특성을 분석하기 위한 유도전동기의 기동시 속도-토크 특성을 3차 함수로 구현하여 모델링하는 기법을 제안하였고, 제안한 모델링 기법을 이용하여 전전압 기동 및 리액터 기동기에 의한 기동 특성을 분석하였다. 모의 실험 결과 전전압 기동 시 1.9초로 빠르게 기동되었으나 전압강하가 심하게 나타났고 65% 탭의 리액터 기동기를 채용한 결과 유도전동기에 인가되는 전압이 너무 낮아 기동에 실패함을 확인하였다. 따라서 기동시간 및 기동전류, 전압강하율을 모두 고려할 때 80%탭의 리액터 기동기를 사용한 기동 방법이 최적의 조건임을 확인하였다.

[참 고 문 헌]

[1] J Nevelsteen "STARTING OF LARGE MOTORS-METHOD AND ECONOMICS" IEEE Trans, Vol. 25, NO. 6, P. 1012-1018, 1989

[2] Finley, W.R. "Troubleshooting induction motors" IEEE Conference, Oct. 2000, Vol. 5, P3491 3498

[3] FRANK A. DEWINTER "The Application of a 3500-hp Variable Frequency Drive for Pipeline Pump Contril" IEEE Trans, Vol. 25, No. 6, P.1019-1023, 1989

[4] 이봉용. "전력계통공학" 문운당, 1991