

등가회로도를 이용한 유도전동기의 특성 비교 분석

Comparison Analysis of Induction Motor using the Equivalent Circuit

김 중 겹^{*}
 (Jong-Gyeum Kim)

Abstract - Induction motor is the most widely used to obtain the driving force in the industrial site. Induction motor is generally applied to the constant speed operation. Induction motor generates a high current at startup. So analysis for both steady state operation and start-up transient is required. In most cases, an equivalent circuit is used for the characteristics analysis of the induction motor. In this study, the two programs are applied to analyze for the rated speed as well as entire speed range. We confirmed that calculation results of the two programs are similar to each other.

Key Words : Efficiency, Equivalent circuit, Induction motor, Rated speed, Torque

1. 서 론

유도전동기는 튼튼하고 가격이 저렴하여 일정한 속도를 필요로 하는 부하의 운전에 가장 많이 사용되고 있다[1~3]. 또한 유도전동기는 부하가 변동할 경우 정격 속도 범위를 약간 벗어나서 운전하는 경우가 있다.

일반적으로 유도전동기의 특성 해석에는 T형 등가회로도를 가장 많이 사용하고 있다. 이 등가회로에서 고정자와 회전자의 저항 및 리액턴스 값을 이용하여 입력, 손실 그리고 출력 특성을 구할 수 있다. 유도전동기의 특성 해석을 위해 제시된 등가회로도의 파라미터는 구속 및 개방시험 등을 통해 구한다[4,5].

유도전동기의 특성은 대부분의 경우 정격속도로 운전하는 조건에서 입력, 손실, 출력 그리고 효율 등을 계산한다[1,4]. 그러나 정격속도의 범위를 벗어나 운전할 경우 전동기의 입력, 출력 및 효율 등에 대한 특성 파악이 필요하다.

그래서 본 논문에서는 등가회로도를 이용하여 유도전동기의 동작특성을 정격속도와 기동에서 동기속도에 이르기까지 회전속도의 변화에 따라 특성이 어떻게 변화하는지 수식적 전개를 이용하여 구한 것과 전용 프로그램을 사용하여 구한 결과를 비교 분석하였다.

2. 유도전동기 등가회로 및 입·출력

그림 1은 전동기의 입력에서 출력에 이르기까지의 에너지 변환관계를 설명하기 위한 유도전동기의 등가회로도이다.

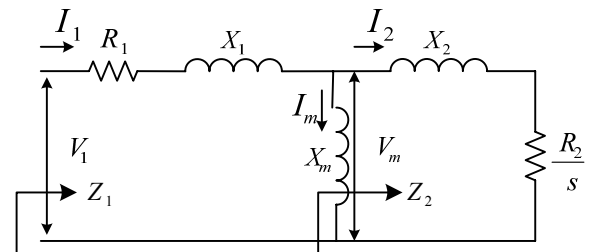


그림 1 등가회로
 Fig. 1 Equivalent circuit diagram

그림 1과 같은 유도전동기 등가회로에서 고정자에 유입되는 전류는 식 (1)과 같다.

$$I_1 = \frac{V_1}{Z_1} \quad (1)$$

식 (1)에 사용된 임피던스 Z_1 은 식 (2)와 같이 고정자 저항, 자화 리액턴스 그리고 회전자 임피던스의 합이다.

$$Z_1 = (R_1 + jX_1) + Z_2 \quad (2)$$

여기서 회전자 임피던스 Z_2 는 다음과 같다.

$$Z_2 = \frac{jX_m \left(\frac{R_2}{s} + jX_2 \right)}{\frac{R_2}{s} + j(X_2 + X_m)}$$

유도전동기에서 부하가 증가함에 따라 고정자 전류가 증가하기 때문에 전압강하가 일어난다. 즉 그림 1에서 단자전압에서 고정자 전압강하를 뺀 값이 유도전동기의 자화전압 V_m 은 식 (3)과 같다.

$$V_m = V_1 - I_1(R_1 + jX_1) \quad (3)$$

^{*} 교신저자, 종신회원 : 강릉원주대학교 전기공학과 교수

E-mail : jgkim@gwnu.ac.kr

접수일자 : 2013년 11월 23일

수정일자 : 2014년 2월 4일

최종완료 : 2014년 2월 18일

2차측에 유도된 전압은 공극자속을 결정하는 전압으로서 약간 감소하게 된다.

식 (3)에서 철손 저항을 고려하지 않을 경우 회전자 전류는 식 (4)와 같다.

$$I_2 = \frac{V_m}{Z_2} \quad (4)$$

유도전동기 고정자에 유입되는 유효전력 및 무효전력은 식 (5)와 같다.

$$P = Re\left(\frac{3}{2} \times V_1 \times \bar{I}_1\right) \quad (5)$$

$$Q = Im\left(\frac{3}{2} \times V_1 \times \bar{I}_1\right)$$

유도전동기에 공급되는 입력에너지 중에서 고정자에 의해 소비되는 손실은 다음 식 (6)과 같다.

$$P_{loss-s} = 3I_1^2 R_1 \quad (6)$$

고정자를 거쳐 공극에 전달되는 전력 P_{gap} 는 다음 식(7)과 같이 구하면 된다.

$$P_{gap} = 3I_2^2 R_f \quad (7)$$

여기서 R_f 는 식 (2)의 임피던스 중에서 저항성분에 해당되는 것이다.

공극에 전달된 전력중에서 회전자에 의해 소비되는 손실은 다음 식 (8)과 같다.

$$P_{loss-r} = sP_{gap} \quad (8)$$

입력에너지 중에서 전기적인 손실을 제외한 변환된 전력 에너지는 식 (9)와 같다.

$$P_{conv} = (1-s)P_{gap} \quad (9)$$

변환된 출력에서 회전자 손실을 고려할 경우 최종 출력 식은 (10)과 같다.

$$P_{out} = P_{conv} - P_{rot-loss} \quad (10)$$

유도전동기의 토크는 변환된 전력과 회전속도로부터 다음과 식 (11)과 같이 구할 수 있다.

$$T = \frac{P_{conv}}{\omega_m} = \frac{(1-s)P_{gap}}{(1-s)\omega_s} = \frac{P_{gap}}{\omega_s} \quad (11)$$

고정자에 유입된 전기적인 입력에너지 중에서 기계적인 출력으로 변환되는 효율은 다음과 같다[1,3,4].

$$\eta = \frac{P_{out}}{P} \times 100[\%] \quad (12)$$

3. 계산 및 결과 분석

해석에 사용한 3상 4극 460V 유도전동기의 파라미터는 표 1과 같다.

표 1 유도기 사양

Table 1 Induction machine parameter

parameters	Values
stator resistance, R_1	0.095[Ω]
rotor resistance, R_2	0.075[Ω]
stator leakage impedance, X_s	0.189[Ω]
rotor leakage inductance, X_r	0.151[Ω]
mutual inductance, X_m	6.032[Ω]
rotation speed[RPM]	1,746

표 1은 그림 1에 적용되는 파라미터로서 정격속도로 운전할 경우 사용되는 것들이다. 이때 회전속도의 변화를 슬립의 조정으로 구하면 특성 변화를 알 수 있다.

식 (1)~(12)를 이용하여 정격속도 및 속도 변화에 따라 특성 변화를 Mathcad 프로그램[6]과 전자계과도해석 프로그램(EMTP)[7]를 이용하여 분석하였다.

3.1 Mathcad 프로그램을 이용한 해석[6]

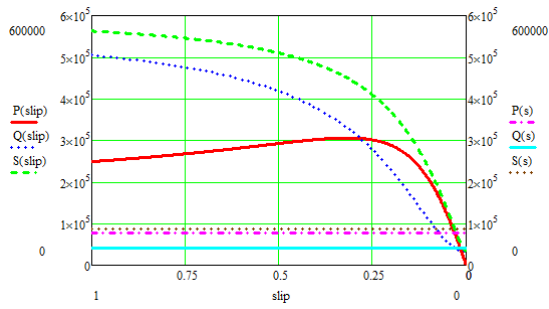
그림 2는 그림 1에 필요한 각 파라미터를 표 1에 제시된 값을 Mathcad 프로그램으로 분석한 전력, 전류, 출력 및 효율에 대한 계산결과이다.

그림 2(a)는 정격속도 및 속도의 변화에 따른 유효전력, 무효전력 및 피상전력의 크기를 나타낸 것이다. 그림 2(a)의 좌측은 전력의 크기로 회전속도의 변화에 대한 것이고, 그림 2(a)의 우측은 정격속도로 운전할 경우 전력의 크기를 나타낸 것이다. 3%의 슬립에서는 정격속도나 속도변화에서 계산한 값이 일치한다. 또한 그림 2(a)에서 정격속도에 가까이 도달하기 전에는 무효전력이 유효전력보다 높게 나타나지만, 정격속도에서는 역전되어 유효전력이 무효전력보다 높게 분포함을 알 수 있다. 즉, 이는 기동에서 정상 운전시까지의 역률이 매우 낮다는 것을 의미한다.

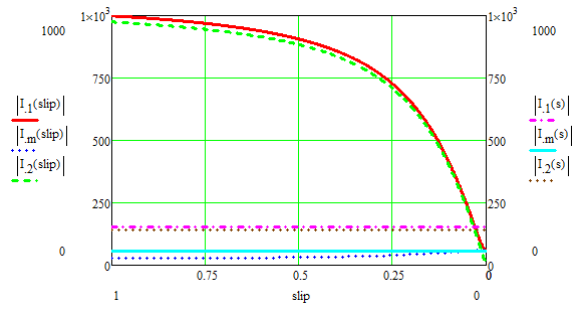
그림 2(b)는 정격속도 및 속도 변화에서의 고정자 전류, 자화전류 및 회전자 전류의 크기를 나타낸 것이다. 그림의 좌측은 속도변화 그리고 우측은 정격속도에서의 크기를 나타낸 것으로 둘 다 3%의 속도에서는 일치하는 결과를 얻을 수 있다. 기동시에는 정격전류의 6배가 높게 분포함을 알 수 있다.

그림 2(c)는 전동기 고정자에 인가되는 입력인 유효전력과 고정자와 회전자의 손실 그리고 출력에 대해 속도변화와 정격속도에서의 계산 결과를 나타낸 것이다. 기동초기인 정지 상태에서 속도가 점차 증가함에 따라 전력이 크게 변화하는 것을 알 수 있다. 즉, 기동이 시작되는 시점에서 유효전력과 손실은 매우 높고 출력은 제로이지만, 속도가 높아짐에 따라 손실을 줄고, 출력은 증가함을 알 수 있다.

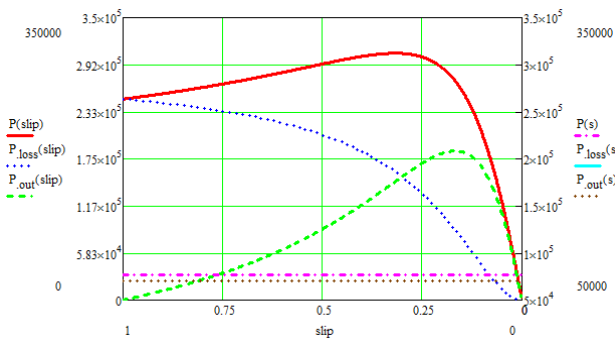
그림 2(d)는 입력, 출력 및 효율에 대한 계산 결과를 나타



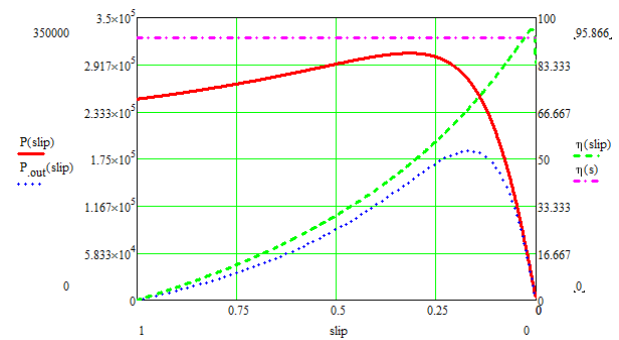
(a) 유효전력, 무효전력 및 피상전력



(b) 고정자 전류, 자화전류 및 회전자 전류



(c) 입력, 손실 및 출력



(d) 입력, 출력 및 효율

그림 2 입력, 출력 및 효율

Fig. 2 Input, output and efficiency

낸 것이다. 속도가 점차 정격속도에 가까워질수록 효율이 높아지는 것을 확인할 수 있다.

3.2 EMTP 프로그램을 이용한 해석

EMTP는 전력시스템의 정상 및 과도상태를 분석하는데 널리 적용하고 있다[2,3,7]. 여기서는 등가회로도를 이용하여 정격속도로 운전하는 경우와 정지 상태에서 정격속도까지 속도변화에 대해 따로 계산하였다.

그림 3은 그림 1에 나타난 등가회로에서 각 부분의 전압, 전류 및 전력을 분석하기 위해 변환한 등가회로도이다.

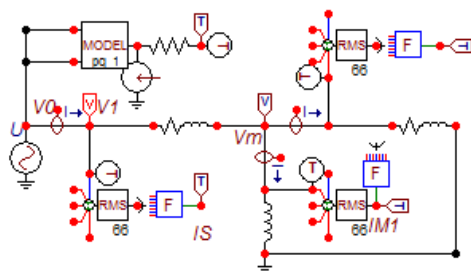


그림 3 EMTP로 구성된 등가회로도

Fig. 3 Equivalent circuit diagram using EMTP

그림 3의 계산으로 그림 2에서와 같이 정상 상태(그림 2의 우측 부분) 즉, 정격속도에서의 전력, 전류 및 손실 그리고 효율을 분석하면 그림 4와 같다.

그림 4(a)는 정격속도로 운전할 경우의 유효전력(P1:○), 무효전력(Q1:□) 및 피상전력(S1:△) 값으로 그림 2(a)의 우측에 나타낸 것과 같은 계산결과로 거의 동일한 결과를 나타내고 있다. 그림 4(b)는 고정자 전류(IS:○), 자화전류(IM:□) 및 회전자 전류(IR:△)로서 그림 2(b)의 우측과 동일한 결과를 나타내고 있다. 그림 4(c)는 단자에 인가되는 유효전력인 입력(P1:○)과 고정자와 회전자에서의 손실(PROSS:□) 그리고 기계적인 에너지(POUT:△)로 변환된 출력에 대한 것으로서 그림 2(c)의 우측과 같은 값을 나타내고 있다. 그림 4(d)는 입력(P1:○), 출력(POUT:□) 및 효율(EFF:△)을 비교한 것으로서 그림 2(d)의 우측과 같은 값을 나타내고 있다.

유도전동기가 부하의 변동에 따라 특성이 달라지는 것을 확인하기 위해서는 과도상태의 해석이 필요하다.

그림 5는 표 1에 제시된 파라미터를 이용하여 정지 상태에서 동기속도까지의 동작을 해석하기 위한 EMTP의 해석 회로도로서 관성 모멘트와 회전체의 손실에 해당되는 계동 정수를 커패시턴스와 저항성분으로 변환시켜 적용하고 있다 [2,3,7].

그림 6은 그림 5의 등가회로도를 사용하여 정지 상태에서 정격속도까지의 전력, 손실, 출력 그리고 효율을 EMTP로 분석한 결과이다.

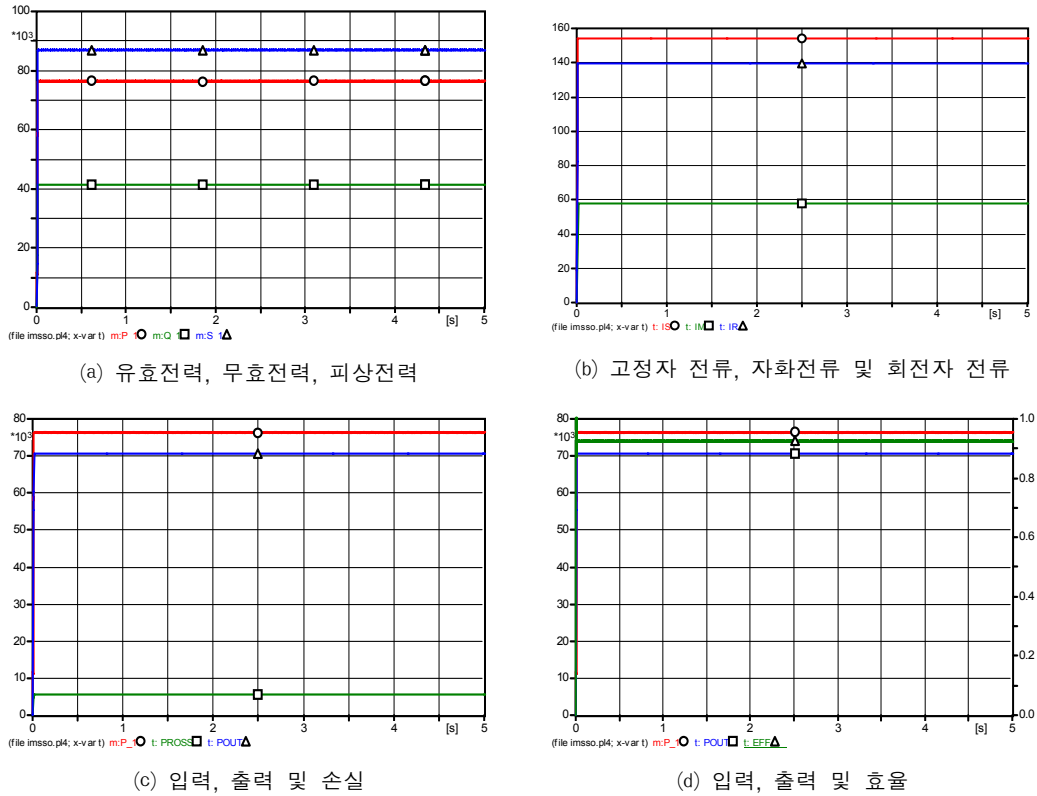


그림 4 유도전동기 입출력 계산 결과

Fig. 4 Input, output calculation results of Induction motor

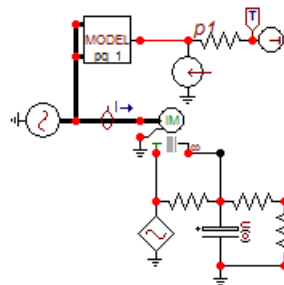


그림 5 과도 상태 분석을 위한 등가회로도

Fig. 5 Equivalent circuit for transient state analysis

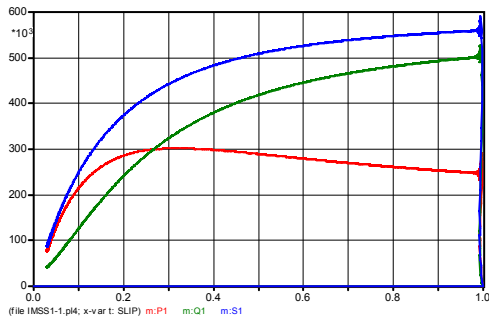
그림 6(a)는 기동에서부터 정격속도까지 유효전력(P1), 무효전력(Q1) 및 피상전력(S1)의 변화를 나타낸 것으로서 그림 2(a)의 좌측 계산값에 해당된다. 그림 6(b)도 그림 2(b)와 같이 기동에서 정격속도까지의 고정자 전류(IS), 자화전류(IM) 그리고 회전자 전류(IR)의 크기를 나타낸 것이다. 그림 6(c)와 (d)는 입력(P), 손실(PLOSS), 출력(PO) 및 효율의 크기를 기동초기부터 정격속도까지 계산한 것으로서 그림 2의 (c) 및 (d)와 같은 결과를 나타내고 있다.

표 1에 제시된 결과를 이용하여 정격속도 및 회전속도 변화에 따라 해석을 실시하였다. 표 2는 정격속도로 운전하는 조건에서 두 가지 해석 프로그램을 각 그림별로 특성값을 분석한 결과이다. 계산결과 각 항목별로 서로 매우 근사한 값을 나타내고 있다.

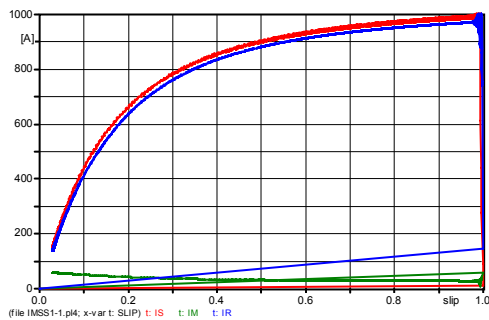
표 2 정격속도에서의 특성 비교

Table 2 Characteristics comparison at the rated speed

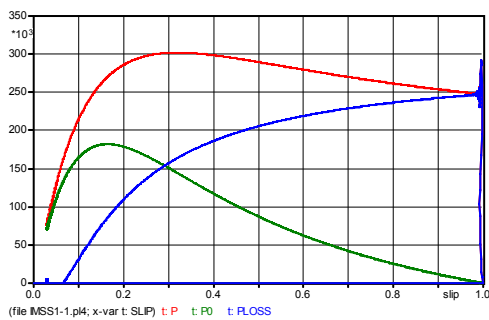
구분	계산결과		
	그림 2	그림 4	그림 6
유효전력[W]	76,327	76,203	76,088
무효전력[Var]	41,487	41,485	41,371
피상전력[VA]	86,873	86,763	86,648
출력[W]	70,750	70,701	70,905
손실[W]	5,576	5,570	5,439
토크[Nm]	386.95	386.18	386.96
효율[%]	92.69	92.80	92.96



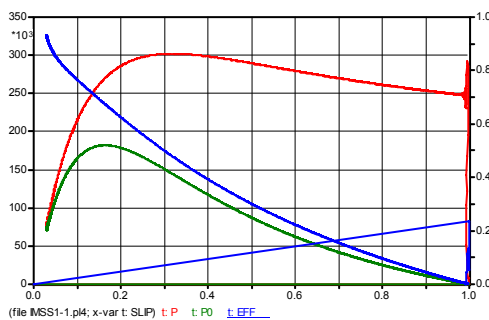
(a) 유효전력, 무효전력 및 피상전력



(b) 고정자 전류, 자화전류 및 회전자 전류



(c) 입력, 출력 및 손실



(d) 입력, 출력 및 효율

그림 6 전력, 출력 및 효율

Fig. 6 Power, Output and efficiency

4. 결론

본 연구에서는 정격속도 및 부하의 변동에 따른 회전속도 변화시의 입력, 손실, 출력, 토크 및 효율의 변화를 수치해석

프로그램을 적용하여 비교 분석하였다.

유도전동기의 등가회로도에서 전개한 수식을 Mathcad 프로그램을 적용할 경우 쉽게 정격속도와 속도 변화에 따른 특성 변화를 확인할 수 있지만, 유도전동기의 관성 모멘트 등 과도상태를 포함할 수 없는 단점이 있다. 그러나 EMTP 프로그램을 적용할 경우 정상 상태 및 과도상태를 운동방정식을 포함시켜 해석이 가능하였다. 정격속도로 운전할 경우 계산결과 각 결과는 매우 근사함을 확인할 수 있었다.

참고 문헌

- [1] Theodore Wildi, "Electrical Machines, Drives and Power Systems", Prentice Hall, 2002
- [2] Jong-Gyeum Kim, Eun-Woong Lee, "The Characteristic Analysis of Adjustable Speed Driving Systems using EMTP", KIEE, Vol.47, No.8, pp.25-31, 1998. 08
- [3] Jong-Gyeum Kim, Youn-Jeen Park, Jong-Ho Jeong, Eun-Woong Lee, "Analysis on the Operation Characteristics of Induction motor operated by Unbalanced Voltage", KIEE, Vol.53, No.3, pp.372-379, 2004.06
- [4] Jong-Gyeum Kim, "Output characterization analysis of Induction generator using test data", KIEE, Vol.62, No.07, pp.1027-1032, 2013.07
- [5] IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generator, IEEE Std, 112-2004, 2004.
- [6] Mathcad User's Guide Manual, 2011
- [7] H.W. Dommel, "Electromagnetic Transients Program. Reference Manual (EMTP Theory Book)", BPA 1986.

저 자 소 개



김종겸 (金宗謙)

1996년 충남대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1996년~현재 강릉원주대학교 전기공학과 교수. 현재 당학회 평의원
Tel : 033) 760-8785

E-mail : jgkim@gwnu.ac.kr