

효율 및 슬립 변화에 따른 유도전동기의 전력 및 토크 특성 분석

정종호^{*}, 이은웅^{*}, 김일중^{**}, 김종겸^{***}, 박영진^{***}
 충남대학^{*}, 호서대학^{**}, 강릉대학^{***}

Characteristics Analysis of Induction Motor Power and Torque under the Efficiency & Slip Variation

Jeong Jong-Ho^{*}, Lee Eun-Woong^{*}, Kim Il-Jung^{**}, Kim Jong-Gyeum^{***}, Park Young-Jeen^{***}
 Chungnam National Univ^{*}, Hoseo Univ^{**}, Kangnung National Univ^{***}

Abstract - This paper presents a analysis on the characteristics of induction motor under the efficiency & slip variance.

An induction motor changes its characteristics parameters under the operation condition with the same capacity.

In this paper, we analyzed that how the power and torque characteristics of induction motor would be changed according to the change of these parameters.

1. 서 론

산업현장에서 사용하는 부하의 회전력을 구하기 위해서 회전형 전동기를 주로 사용한다. 이들 전동기로서는 3상 유도전동기를 사용하는데 용량 및 극수 그리고 효율, 역률 등에 따라 운전시 발생하는 파라미터에 변화가 발생한다.

부하를 운전하기 위해 필요한 정격출력을 낼 수 있도록 설계시 고려한 전동기의 파라미터는 운전조건에 따라 변화가 발생한다. 이들 파라미터의 변화에 따라 전동기의 운전특성 변화를 찾아내는 것이 효율적인 부하의 운전을 파악하기 위해 매우 중요하다.

최근 에너지를 절감하기 위해 고효율 전동기를 사용하는데 이들 전동기의 특성이 일반 전동기에 비해 운전시 어떤 특성변화를 나타내는지 확인이 절실하다.

부하의 운전을 위해 적절한 전동기를 선택할 경우 주로 극수와 용량, 운전정격 등 전동기 명판에 표시된 파라미터를 보고 전동기를 선정하는 경우가 일반적이다. 이들 파라미터가 전동기의 운전조건에 따라 설계시의 파라미터가 달라지는 경우가 있다. 유도전동기는 설계시 정격 용량에 따라 설계하지만, 실제 운전시는 회전수와 효율 등이 달라지므로 운전상황에 따라 달라지는 변화된 특성 값을 찾아내는 것이 매우 중요하다.

본 논문에서는 일반적으로 사용되고 있는 유도전동기의 명판에 표시된 파라미터를 기본으로 하여 운전시 발생하는 특성을 파악하기 위해 전용 프로그램을 이용 세부 파라미터를 추출하여 이들 파라미터로 같은 전원조건하에서 전력 및 토크의 변화를 확인하고자 한다.

2. 좌표변환 및 전력-토크 특성

2.1 좌표변환 및 전력

p-q 이론은 시간영역에 기초한 것으로서 전압, 전류 파형에 대한 것뿐만 아니라 정상 및 과도상태에 대한 것도 표현할 수 있다[1,2]. p-q 전력성분은 $\alpha-\beta=0$ 좌표에서 전압과 전류로 계산할 수 있다.

유도전동기에 공급되는 전압 및 전류는 식 1과 같이 3상 abc 시스템에서 $\alpha-\beta$ 좌표축으로 변경할 수 있다. 식 1에서 X는 전압 또는 전류를 의미한다[1,2].

$$\begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \\ X_o \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

$\alpha-\beta$ 변환에서 d-q 축의 변환을 시행할 경우 식 2와 같다.

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\omega t & \sin\omega t & 0 \\ -\sin\omega t & \cos\omega t & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \\ X_o \end{bmatrix} \quad (2)$$

부하의 운전시 나타나는 순간적인 전력의 변화는 전기 시스템의 특성해석에 매우 중요하다. 식 2에 전압 및 전류성분을 대입할 경우 3상 평형시스템에 대한 유효(P) 및 무효전력(Q)은 식 3과 같이 d-q 축 좌표로 나타낼 수 있다[1,3].

$$\begin{aligned} P &= V_d I_d + V_q I_q \\ Q &= V_d I_q - V_q I_d \end{aligned} \quad (3)$$

식 (3)에서의 유효전력은 회로의 한 점에서 다른 곳으로 순수한 흐름으로 존재하는 것이라면, 무효전력은 앞뒤로 연속적인 에너지 흐름이므로 반주기동안 한 방향으로 흐르는 에너지의 양이 나머지 반주기에 반대방향으로 흐르는 에너지의 양과 같으므로 한 주기 동안 대해 실질적인 흐름은 없지만 유도전동기의 자화를 위해 필수적인 성분이다.

2.2 유도전동기 토크

식 3에서 유도전동기에 전달된 유효전력성분에 의해 전개된 토크 방정식은 식 4와 같다[2,3].

$$T_{em} = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) \quad (4)$$

유도전동기의 운동방정식은 식 (5)와 같다.

$$T_{em} = J \frac{dw_m}{dt} + Dw_m + T_e \quad (5)$$

3. 시뮬레이션 및 결과 분석

같은 정격용량의 전동기라도 설계와는 다른 특성을 나타내는 것은 확인하기 위해 전동기 명판에 표시된 값을 가지고서 운전 조건에 따라 달라질 수 있는 슬립, 효율 등의 파라미터 변화에 따른 특성변화를 모의하였다.

3상 유도전동기의 파라미터는 표 1과 같다. A 및 B 제품은 일반 유도전동기이지만, C 제품은 고효율 전동기 제품이다.

Table 1 제품별 유도전동기 특성값

	A model	B model	C model
capacity	2.2kW	2.2kW	2.2kW
RPM	1720rpm	1720rpm	1730rpm
slip	4.44%	4.44%	3.89%
voltage	220/380V	220/380V	220/380V
current	9.1/5.3A	9.0/5.2A	7.9/4.6A
efficiency	82%	82.5%	87.5%
insulation level	F	F	F
service factor	1.15	1.15	1.15
pf	77.5%	77.5%	79%

표 1의 파라미터를 가지고서 전동기의 해석을 위한 내부 파라미터는 motdatpr 프로그램을 이용하여 구하였다. 입력 파라미터로서 역률 값은 정확한 데이터가 없어 임률적으로 적용하였다.

표 2는 표 1의 각 제품에 대한 전동기 세부 파라미터를 나타낸 것이다. 표 2에서 C 제품의 경우 저항 값은 A, B에 비해 낮지만, 인덕턴스는 다소 높은 편이다.

Table 2 detail parameter of each model for Table 1

구분	A model	B model	C model
stator d-q resistance	4.59878Ω	4.45672Ω	3.2144Ω
rotor d-q resistance	2.10835Ω	2.11403Ω	1.93637Ω
stator d-q inductance	0.006341H	0.007285H	0.010262H
rotor d-q inductance	0.006341H	0.007285H	0.010262H
d-axis magnetization	0.153015H	0.161889H	0.202874H
q-axis magnetization	0.153015H	0.161889H	0.202874H
Inertia moment J	0.0418[kg·m ²]	0.0418[kg·m ²]	0.0418[kg·m ²]

일반적으로 고효율 전동기의 권선저항은 낮은 값을 유지하도록 설계하여 권선 절연의 수명을 연장하고 있고, 낮은 자화는 전기적인 소음을 줄이고 있다.

표 2에서 구하여진 파라미터를 가지고서 토크 및 전력은 전자계과도해석 프로그램(EMTP)을 이용하였다.

그림 1은 세 종류의 모델에 대한 토크특성곡선을 나타낸 것이다.

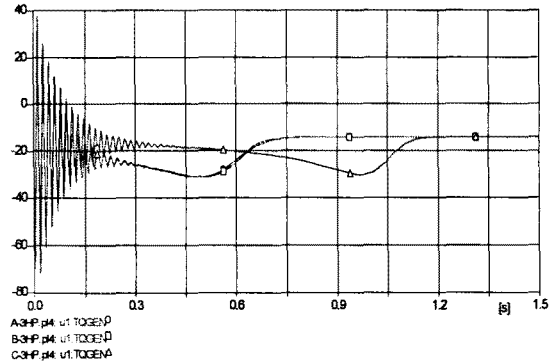
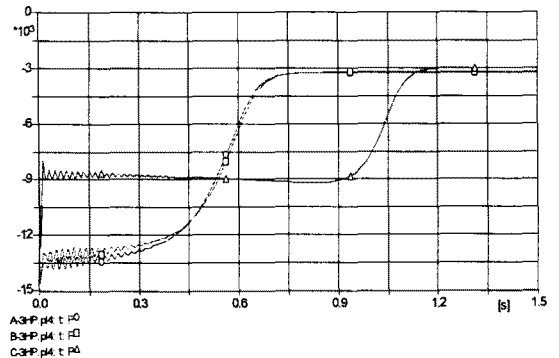


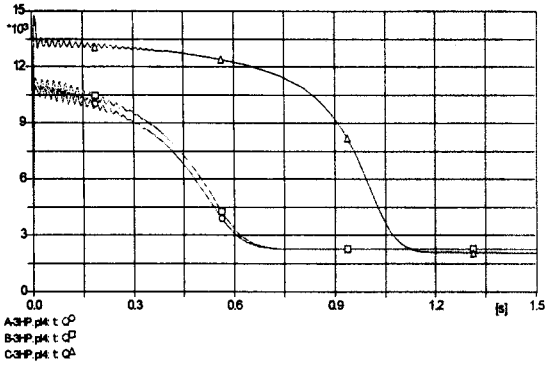
Fig 1 Torque characteristic curve

표 1에 제시된 각 제품별 전동기 특성값에서 용량과 회전수를 가지고서 구한 토크 수치는 각각 14.89, 14.80 및 13.878[Nm]이다. 표 2의 세부파라미터를 이용하여 식 (6)로 나타낸 토크 특성은 그림 1과 같으며, 정상운전시의 토크는 첫 번째가 14.51[Nm]이고, 두 번째는 14.51[Nm] 그리고 세 번째는 14.3[Nm]로 거의 일정한 값을 발생함을 알 수 있다. 그러나 일반 전동기에 비해 고효율인 C제품의 경우 기동 전류의 지속시간이 길어 최대 토크에 이르는 시간이 약간 길어짐을 확인할 수 있다. 결과적으로 정상운전시의 토크는 변화가 거의 없음을 알 수 있다.

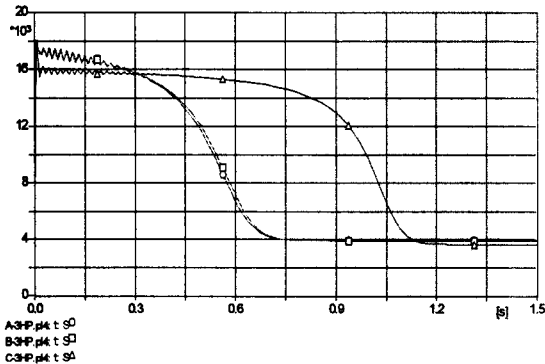
그림 2는 세 종류의 제품에 대한 전력 및 역률 특성변화를 나타낸 것이다.



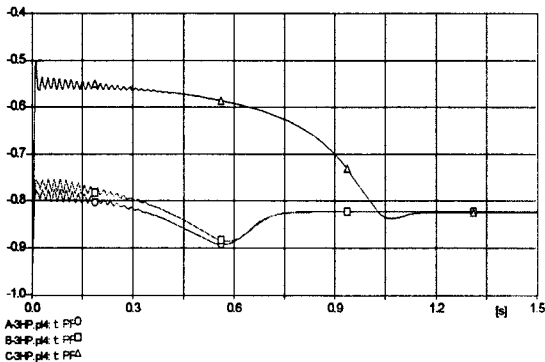
(a) Active power curve



(b) Reactive power curve



(c) Apparent power curve



Power factor curve

Fig 2. Power characteristic curve

그림 2 (a)에서 고효율제품인 C의 경우 기동에서 정상운전까지 기동전류의 운전지속이 긴 편이지만 유효전력은 A, B에 비해 낮은 값을 나타내고 있다. 그러나 그림 2(b)의 경우에는 C제품의 경우가 일반 전동기인 A, B에 비해 리액턴스 값의 영향으로 무효 전력이 높게 나타나고 있다. 그러나 그림 2의 (c) 피상전력은 3종류의 전동기 중에서 고효율인 제품 C의 경우가 A, B 제품에 비해 기동 초기에는 다소 낮은 값이지만, 정상 운전까지 일정시간동안 지속되어 짐을 확인할 수 있고, 정상운전에 도달하고서는 A, B에 비해 약간 낮은 값을 나타낸다. 그림 2(d)는 역률 변화를 나타낸 곡선으로서 고효율제품인 C

의 경우가 A, B 제품에 비해 기동시 역률이 낮게 나타나는 것은 전동기 파라미터에서 리액턴스 값이 높기 때문에 정상운전까지 높지만, 정상속도에 도달하고 나서는 역률은 거의 일정함을 확인할 수 있다.

위 그림 2에서와 같이 정상운전에서는 유효 및 무효전력의 크기는 거의 일정하지만, 기동에서 정상운전까지의 전력분포에는 상당한 차이가 발생함을 확인할 수 있다.

표 3은 3종류의 전동기에 대하여 정상운전의 전력 및 역률 값을 비교한 것이다.

Table 3 Comparison of power & power factor

구분	유효전력 [W]	무효전력 [VAR]	피상전력 [VA]	역률
A model	3230	2225	3922	0.82
B model	3209	2221	3902	0.82
C model	3001	2062	3641	0.82

표 3에서 나타낸 바와 같이 파라미터 설정정보보다 역률은 약간 높게 나타났으며, 전력은 C모델이 약간 낮은 값을 유지하므로 고효율 제품의 특성을 그대로 반영함을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

산업현장에서 동력 부하운용으로 사용되는 유도전동기의 효율, 슬립 및 역률의 차이를 파라미터의 산출용 프로그램을 이용하여 토크 및 전력특성 변화를 확인하였다.

일반 전동기에 비해 고효율 전동기는 기동 전류의 지속 시간이 길어 최대 토크 값에 이르는 시간이 상대적으로 높게 나타났다. 또한 고효율 전동기의 경우 기동시 일반 전동기에 비해 유효전력은 낮은 값을 나타내지만, 상대적으로 인덕턴스 값의 증가로 인해 무효전력이 높아 역률변화가 높게 나타나므로 기동시에 높은 무효전력을 보상할 필요가 있음을 확인할 수 있었다.

[참 고 문 헌]

- [1] Akagi, H et al., "Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components", IEEE Trans on IA, Vol.20, no.3, pp.625-630, 1984
- [2] H.W. Dommel, "Electromagnetic Transients Program. Reference Manual (EMTP Theory Book)", BPA 1986.
- [3] 김종겸 외 3인, "불평형 전압 운전시 유도전동기의 동작특성 해석", 대한전기학회 논문지(B), 제 53권, 제 6호, pp.372-379, 2004. 6