

Characteristic Comparison Analysis for Standard and High-Efficiency Induction Motor

金宗謙[†]
(Jong-Gyeum Kim)

Abstract - This paper presents an analysis on the power characteristics of standard and high-efficiency induction motor. The parameter of induction motor play an important role in the expression of machine's performance characteristics. Induction motor can be differently found its characteristics parameters with the operation under the same capacity. So it is very difficult to detect correct parameter of induction motor. For the analysis, we discovered the motor parameters by the technical program with nameplate data.

In this paper, we analyzed that how power and torque characteristics of induction motor would be changed for two kinds of motor parameters.

Key Words : Induction Motor, P-Q theory, d-q transform

1. 서 론

전동기는 산업현장에서 사용되는 전력에너지의 2/3 정도를 차지하고 있다. 이 전동기의 대부분이 유도전동기이다. 유도전동기는 다른 전동기에 비해 합리적인 가격에 유지비용도 저렴하고 오랜 기간 동안 안정적인 운전이 가능하여 널리 사용되고 있다.

고효율 전동기는 일반전동기에 비해 고가이지만 지속적인 사용시 운영비가 충분하게 보전될 수 있고, 최근 고유가로 인해 부하의 운전시 전력공급량을 줄일 수 있는 대안으로 정부에서도 적극적으로 사용을 권고하고 있어 사용이 증가되고 있다.

일반적으로 부하에 적합한 최적의 전동기를 선택하는 것이 매우 중요하지만, 대부분의 경우 전동기 명판에 표시된 파라미터를 보고 선정하고 있다. 그래서 산업현장에서 가장 많이 사용되고 있는 유도전동기에 대한 전력 및 토크 특성 비교 해석은 고효율기기의 적용비율을 높이는데 도움이 될 것이다.

본 논문에서는 전동기 명판에 표시된 파라미터를 가지고서 운전시 일반 및 고효율 유도전동기의 전력 및 토크 특성에 어떤 차이가 존재하는지 p-q이론을 적용해서 비교분석하고자 한다.

2. 좌표변환 및 전력-토크 특성

2.1 좌표변환 및 전력

p-q 이론은 시간영역에 기초한 것으로서 전압, 전류의 정상 및 과도상태에 대한 것도 표현할 수도 있어 3상 전력 시스템의 동작의 이해를 쉽게 하는데 매우 편리하다[1].

그림 1은 전원과 부하측 전력의 흐름을 나타낸 것이다. p-q의 전력성분은 a-β-0 좌표에서 전압과 전류로부터 계산할 수 있다. 각 전력성분은 실질적인 의미를 나타내는 직류와 교류 값으로 분리할 수 있다.

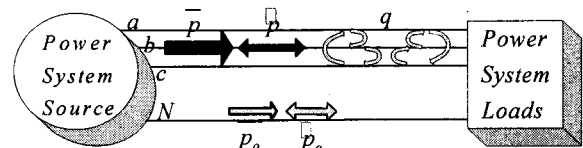


그림 1 p-q 이론 전력 성분
Fig. 1 p-q theory power components

p-q 이론은 a-b-c 좌표에서 정지 기준 시스템을 a-β-0 좌표를 가진 시스템으로 변환한 것으로서 a-β 좌표는 서로 직각이고, 좌표 0은 영상분 요소와 일치한다.

a-β-0 좌표에서의 전압과 전류는 식 (1)과 같다.

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서, $T = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$

[†] 교신저자, 正會員 : 江陵大 電氣情報通信工學部 教授 · 工博
E-mail : jgkim@kangnung.ac.kr
接受日字 : 2007年 11月 8日
最終完了 : 2007年 11月 19日

α - β 변환에서 d-q 축의 변환을 시행할 경우 식 (2)와 같다.

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos ut & \sin ut & 0 \\ -\sin ut & \cos ut & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \\ X_o \end{bmatrix} \quad (2)$$

그림 1의 유효전력(p)은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$p = v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta = \bar{p} + \tilde{p} \quad (3)$$

식 (3)에서 \bar{p} 는 유효전력의 평균값이다. 이 값은 전원측에서 부하로 a-b-c 좌표를 통해 전달되는 단위 시간당 에너지와 일치하는 것으로 전원측에서 공급되어져야 할 유일한 전력성분이다. 한편 \tilde{p} 는 유효전력의 교변 값으로 a-b-c 좌표를 통해 전원측과 부하측 사이를 교환하는 단위 시간당 에너지이다. \tilde{p} 는 전원에서 부하로 어떤 에너지 전달도 달성하지 못하는 전력성분이기 때문에 보상이 이루어져야 한다.

무효전력(q)은 부하에서 전원측으로 에너지가 이동하는 개념을 의미하는 것으로서 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$q = v_\beta i_\alpha - v_\alpha i_\beta = \bar{q} + \tilde{q} \quad (4)$$

식 (4)에서 무효전력 q는 시스템 상 서로 교환되는 전력 즉, 대응되는 바람직하지 못한 전류와 관련 있는 것으로서 전원측과 부하측 사이 에너지의 상호 이동을 나타낸 것으로서 실질적인 에너지의 전달은 없다.

식 (3) 및 (4)에서 구한 유효 및 무효전력에 대해 d-q축 좌표 변환한 경우 유효전력 및 무효전력은 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다[1,2].

$$p = v_d i_d + v_q i_q \quad (5)$$

$$q = v_d i_q - v_q i_d$$

식 (5)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.

부하에 사용되는 유효분과 사용되지 않고 전원측과 부하측 사이를 왕래하는 무효전력성분의 벡터합인 피상전력(s)은 식 (3)과 (4)의 벡터 합은 식 (6)과 같다.

$$s = p + jq = \sqrt{p^2 + q^2} \quad (6)$$

전원측에서 공급되는 전력에 대해 유도전동기에 제공되는 전력성분의 비율을 역률로 환산할 경우 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$pf = \frac{p}{s} \quad (7)$$

2.2 유도전동기의 토크 특성

식 (3) 및 (5)에서 유도전동기에 전달된 유효전력성분에 의해 전개된 토크 방정식은 식 (8)과 같다[3,4]. 식 (8)에서 자속 및 전류는 각각 좌표변화에 의해 구해야 한다.

$$T_{em} = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) \quad (8)$$

여기서 P는 극수, λ 는 자속, i는 전류이다.

부하를 연결하여 운전하는 유도전동기의 운동방정식은 식 (9)와 같다.

$$T_{em} = J \frac{dw_m}{dt} + Dw_m + T_c \quad (9)$$

여기서 T_{em} 및 T_c 는 각각 기계 및 전기적인 토크, J는 관성모멘트, D는 점성계수이다.

식 (9)는 전기계와 기계계로 결합된 방정식으로서 전자계 과도해석 프로그램(EMTP)으로 사용하기 위해서는 식 (10)과 같이 전기적인 회로로 변형해야 한다[2~4].

$$I_m = C \frac{dV_m}{dt} + \frac{V_m}{R} + I_c \quad (10)$$

3. 시뮬레이션 및 결과 분석

3.1 파라미터 산출

유도전동기 파라미터는 온도, 부하 등 여러 가지 조건에 따라 달라질 수 있다. 가장 고전적인 방법으로는 구속 및 무부하 시험을 통해 파라미터를 찾는 것이다. 그러나 일반적인 전동기 파라미터 산출은 명판에 나타난 값들을 이용하여 산출하는 것도 편리한 방법 중의 하나이다.

표 1은 일반 및 고효율 유도전동기의 명판에 표시된 파라미터이다. 여기서 사용된 전동기는 현재 국내에서 생산되고 있는 전동기의 파라미터로서 고효율 전동기는 일반 전동기에 비해 효율을 약간 높은 것을 의미한다. 향후에는 고효율보다 효율이 더욱 높은 프리미엄 전동기가 산업현장에 보급될 예정이다.

표 1 일반 및 고효율 전동기의 파라미터

Table 1 Parameters of standard & high-efficiency motor

Section	Standard model	High-eff model
Capacity	2.2kW	2.2kW
RPM	1720	1730
Slip	4.44%	3.89%
Voltage	220/380V	220/380V
Current	9.0/5.2A	7.9/4.6A
Efficiency	82.5%	87.5%
Insulation level	F	F
Service factor	1.15	1.15
Power factor	79.0%	79.0%

표 2는 표 1의 두 전동기 상세 파라미터를 나타낸 것이다.

표 2 상세 파라미터

Table 2 The detailed parameters

Section	Standard model(○)	High-eff model(□)
stator d-q resistance	4.45672Ω	3.2144Ω
rotor d-q resistance	2.11403Ω	1.93637Ω
stator d-q inductance	0.007285H	0.010262H
rotor d-q inductance	0.007285H	0.010262H
d-axis magnetization	0.161889H	0.202874H
q-axis magnetization	0.161889H	0.202874H
Inertia moment J	0.0418[kgm ²]	0.0418[kgm ²]

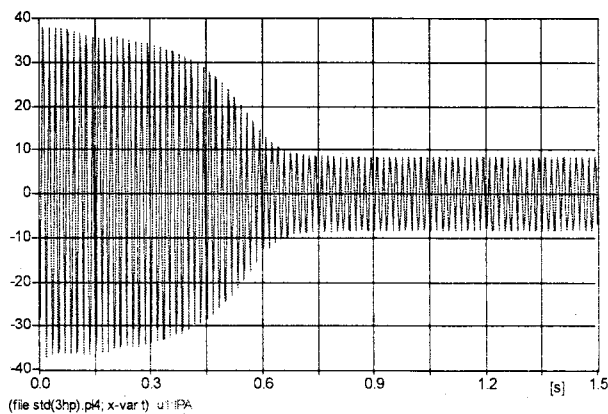
표 2에서와 같이 같은 용량이라도 일반유도전동기와 고효율 유도전동기의 파라미터는 서로 다르다. 고효율 유도전동기의 경우 저항 값은 일반 유도전동기에 비해 낮지만, 인덕턴스는 저항과는 달리 다소 높은 것을 확인할 수 있다.

3.2 시뮬레이션 및 분석

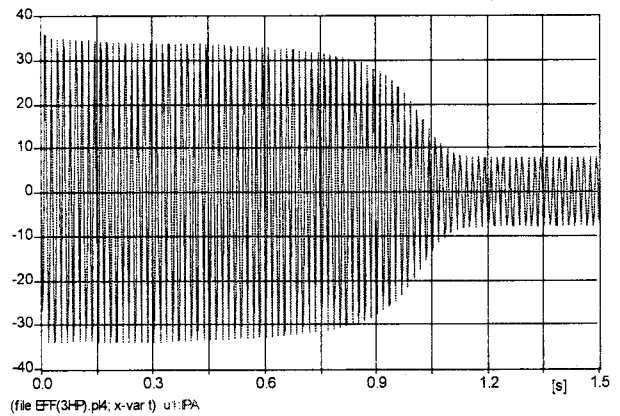
유도전동기는 정상상태뿐만 아니라 기동시도 높은 전류를 필요로 하기 때문에 다른 시스템에 미치는 영향 등을 파악하기 위해서는 동작 특성 해석이 필요하다. 따라서 위에 제시된 일반 및 고효율 전동기 모델의 파라미터를 이용하여 기동 및 정상상태 동작특성 변화를 확인하였다.

그림 1은 표 2에서 구하여진 파라미터를 가지고서 일반 및 고효율 유도전동기의 고정자에 흐르는 전류를 나타낸 것이다.

그림 1에서 일반 전동기 전류값은 고효율 전동기보다 기동분만 아니라 정상운전시에도 약간 높은 편이다. 단지 고효율 전동기의 전동기 전류가 정상상태에 이르기까지의 지속시간(1.15sec)이 일반 전동기의 기동시간(0.65sec)보다 길어 초기 전력은 약간 높게 나타남을 확인할 수 있다.



(a) 일반 전동기

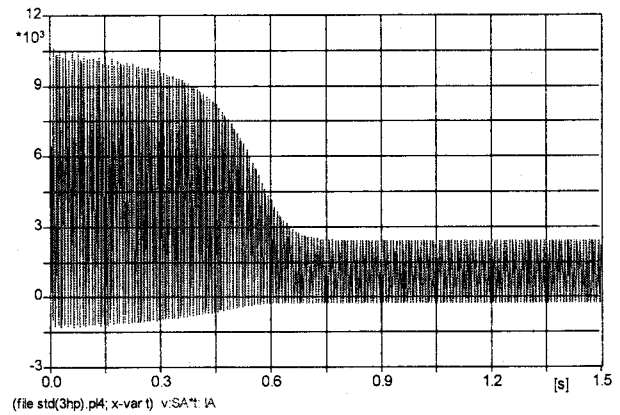


(b) 고효율 전동기

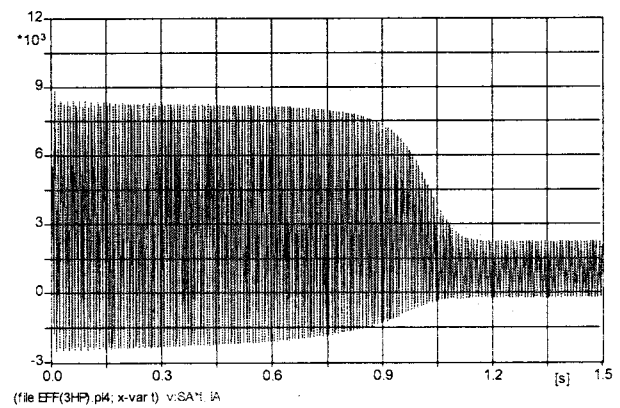
그림 1 일반 및 고효율 전동기의 고정자 전류

Fig. 1 Stator current of standard & high-efficiency motor

그림 2는 일반 및 고효율 전동기에 인가되는 순시전력을 나타낸 것이다. 그림 1에서 알 수 있듯이 일반 전동기에 비해 고효율 전동기는 기동시에 상대적으로 전력의 지속시간이 많이 소요됨을 알 수 있다.



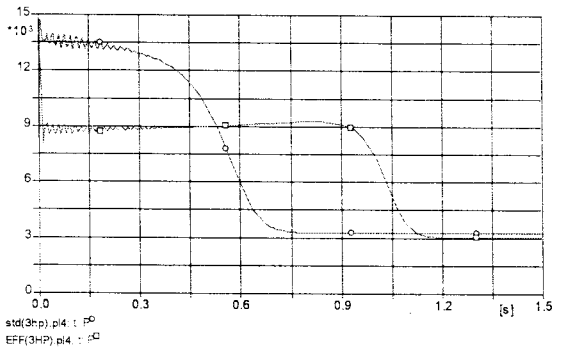
(a) 일반 전동기



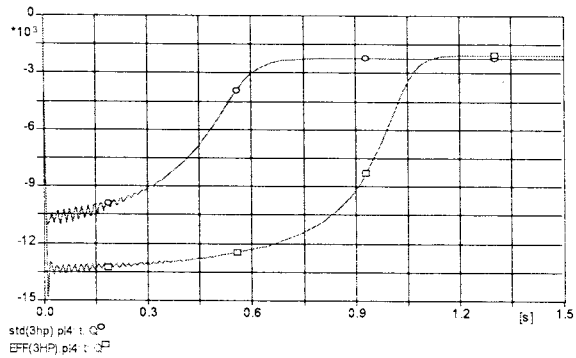
(b) 고효율 전동기

그림 2 일반 및 고효율 전동기의 순시전력

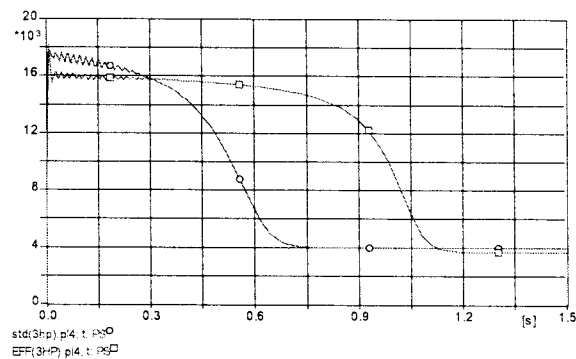
Fig. 2 Instantaneous power of standard & high-efficiency motor



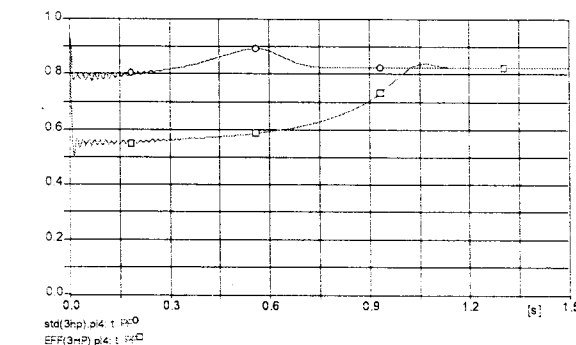
(a) Active Power[W]



(b) Reactive Power[VAR]



(c) Apparent power[VA]



(d) Power factor

그림 3 전력특성곡선

Fig. 3 Power characteristic curve

그림 3은 표준 및 고효율 두 종류의 유도전동기에 대한 유효전력, 무효전력, 피상전력 그리고 역률 변화를 나타낸 것이다. 기동 및 정상상태의 전력특성에서 변화를 유효 및 무효전력 성분으로 분리하여 계산하였다. 그림 3에서 무효전력의 부(-)의 값으로 나타내었다.

계산결과 기동시 일반 유도전동기와 고효율 유도전동기의 유효 및 무효전력에 차이가 존재함을 확인할 수 있었다.

그림 3(a)에서 고효율 전동기(□)의 경우 기동에서 정상 운전까지 기동 전류의 운전속이 긴 편이지만 유효전력은 일반 전동기(○)에 비해 기동초기뿐만 아니라 정상 운전시 도 작은 값을 나타내고 있다.

그림 3(b)의 경우에서 고효율 전동기(□)가 일반 전동기(○)에 비해 리액턴스 값의 영향으로 기동시 무효전력성분이 높은 값을 가지지만 정상운전이후에서는 약간 낮은 값을 나타내고 있다.

그림 3의 (c)에서와 같이 피상전력은 고효율 전동기가 일반 전동기에 비해 기동 초기에는 다소 작은 값이지만, 정상 운전까지 일정시간동안 지속되어 짐을 확인할 수 있고, 정상운전에 도달하고서는 일반 전동기에 비해 약간 작은 값을 나타낸다.

그림 3(d)는 역률 변화를 나타낸 곡선으로서 고효율 전동기(□)인 경우가 일반 전동기(○)에 비해 기동시 역률이 낮게 나타나는 이유는 파라미터에서 리액턴스 값이 크기 때문으로 정상 운전까지는 낮지만, 정상속도에 도달하고 나서는 거의 일정하게 유지함을 알 수 있다.

그림 3에서와 같이 정상운전에서는 고효율 유도전동기가 일반전동기에 비해 유효, 무효 및 피상전력의 크기에서 약간 낮은 값을 나타내지만, 기동에서 정상운전까지의 전력분포에는 크기나 지속시간 등에서 고효율 전동기가 일반 전동기에 비해 높은 값의 유지와 지속시간이 약간 길어지는 것이 불리한 요소에 해당된다. 그러나 기동시간을 매우 짧기 때문에 지속적인 부하의 운전측면에서 보면 무시할 정도이다.

그림 4는 일반(○) 및 고효율(□) 유도전동기의 모델에 대한 토크특성곡선을 나타낸 것으로서 토크 값은 표 2의 파라미터를 가지고서 식 (8)을 이용하여 구한 결과이다.

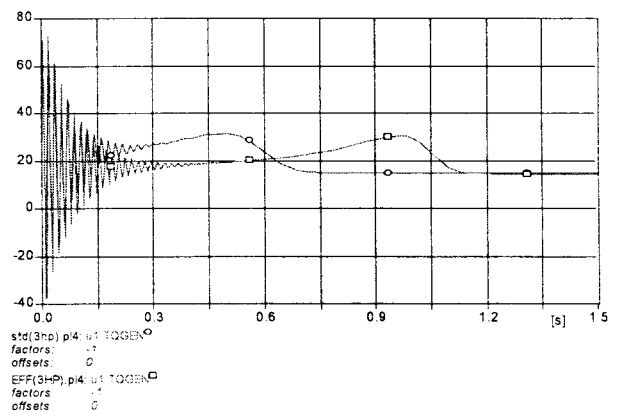


그림 4 토크특성곡선

Fig. 4 Torque characteristic curve

표 1에 제시된 각 제품별 전동기 특성값에서 용량과 회

전수를 가지고서 구한 토크 수치는 각각 14.89와 13.878[Nm]이다. 표 2의 세부파라미터를 이용하여 식 (8)로 나타낸 토크 특성은 그림 4와 같으며, 정상운전시의 토크는 첫 번째가 14.6[Nm]이고, 두 번째는 14.4[Nm]로 거의 일치되는 값을 나타내고 있다. 그러나 일반 전동기에 비해 고효율 전동기의 기동 전류의 지속시간이 길어 최대 토크에 이르는 시간이 약간 길어짐을 확인할 수 있다. 결과적으로 정상운전시의 토크는 차이가 거의 없음을 알 수 있다.

표 3은 일반 및 고효율 전동기에 대하여 그림 3 및 4에서와 같이 정상운전시의 전력, 토크, 역률 및 효율을 비교한 것이다.

표 3 전력, 토크, 역률 및 효율의 비교
Table 3 Comparison of power, torque, power factor & efficiency

구분	유효전력 [W]	무효전력 [VAR]	피상전력 [VA]	역률	토크 [Nm]	효율 [%]
Standard model	2284	1573	2773	0.82	14.6	81.3
High-eff model	2122	1458	2574	0.82	14.4	86.9

표 3은 전동기 자체의 손실이 고려되지 않은 상태에서의 전력 및 역률값을 나타낸 것이다. 표 3에서 나타낸 바와 같이 역률은 표 1의 파라미터 설정시보다 약간 낮게 나타났으며, 전력은 고효율 전동기가 일반 전동기에 비해 약간 낮은 값을 유지하므로 같은 정격에서 에너지 이용율이 유리한 고효율 제품의 특성을 그대로 반영하고 있음을 확인할 수 있다. 유효전력에 대해 발생하는 토크를 환산할 경우 효율은 명판에 제시된 값보다는 약간 낮게 나타났지만, 일반과 고효율 전동기의 효율은 5% 차이가 남을 확인하였다.

표 1의 파라미터에서 용량과 표 2에서의 파라미터로 구한 용량 계산결과가 일치하므로 전동기 데이터에 주어진 값을 가지고서 파라미터를 구한다음 토크 특성변화를 찾는 것은 적합하다고 판단할 수 있다.

4. 결 론

산업현장에서 동력 부하 운전용으로 유도전동기가 가장 많이 사용되고 있다. 전동기의 운전시 전력특성 변화를 해석하기 위해서는 전동기 파라미터의 산출이 필요하다. 하지만 유도전동기는 운전조건에 따라 파라미터가 달라질 수 있기 때문에 조건에 따른 정확한 파라미터의 산출이 거의 불가능하다. 일반적으로 알 수 있는 파라미터는 제작회사에서 구하거나 명판에 표시한 간단한 것이 대부분이다.

본 연구에서는 명판에 제시한 파라미터를 가지고서 전력, 효율 그리고 토크 특성 변화를 해석하였다.

기동 및 정상상태에서 일반 및 고효율 전동기의 유효 및 무효전력은 서로 다르게 나타난다. 기동 시 고효율 전동기의 유효전력은 일반 전동기보다 낮다. 그러나 무효전력은 반대가 되는 것을 확인할 수 있었다.

일반 전동기에 비해 고효율 전동기는 기동 전류의 지속시

간이 길어 최대 토크 값에 이르는 시간이 상대적으로 높게 나타났다. 또한 고효율 전동기의 경우 기동시 일반 전동기에 비해 유효전력은 작은 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] 김종겸, "불평형 부하 운전시 3상 유도발전기의 특성해석", 대한전기학회 논문지, 56(P), No.3, pp. 123-128, 2007. 09
- [3] H.W. Dommel, "Electromagnetic Transients Program. Reference Manual (EMTP Theory Book)", BPA 1986.
- [4] 김종겸 외 3인, "불평형 전압 운전시 유도전동기의 동작특성 해석", 대한전기학회 논문지, 53(B), No.6, pp. 372-379, 2004.06

저 자 소 개



김 종 겸 (金宗謙)

1961년 10월 3일생. 1984년 동아대학교 전기공학과 졸업. 1991년 충남대학교 대학원 전기공학과 졸업. 1996년 동대학원 졸업 공학박사. 1996년~현재 국립 강릉대학교 전기정보통신공학부 교수. 현재 당학회 B부문

편집위원 및 재무이사, P부문 편집위원장

Tel : 033-760-8474

E-mail : jgkim@kangnung.ac.kr