

심구 또는 이중 농형 회전자를 가진 유도기의 전동 또는 발전 운전시 특성 해석

김종겸*

Characteristics Analysis for Motor or Generator Operating of Induction Machine with Deep or Double Cage Rotor

Jong-gyeum Kim*

Abstract

Both of induction generator and synchronous generator is available in the hydroelectric power plant. If the output of the power station is large, the synchronous generator is mainly used but when its output is low, the induction generator is often used. If the output capacity is small, there is a case in which induction motor is used as a generator. Torque at rated operation and start of the induction motor is different depending on the shape of the rotor. Small and medium-sized squirrel-cage induction motor is used primarily double cage rotor or deep bar. In this study, we attempt to interpret characteristics for double cage rotor or deep bar that occur when operating in the induction generator based on the parameters that have been designed and manufactured as an induction motor.

Key words

Induction generator(유도발전기), Induction motor(유도전동기), Efficiency(효율), Deep or double cage rotor(심구 또는 이중 농형 회전자), Torque(토크)

(접수일 2014. 9. 3, 수정일 2014. 9. 3, 게재확정일 2014. 12. 18)

* 강릉원주대학교 전기공학과 (Department of Electrical Engineering, Gangneung-Wonju National University, Korea)

■ E-mail : jgkim@gwnu.ac.kr ■ Tel : (033)760-8785 ■ Fax : (033)760-8781

Nomenclature

P : Active power, Watt

T : Torque, Nm

η : Efficiency, %

1. 서론

화석연료에 대한 사용을 줄이기 위한 여러 가지 에너지 개발과 보급이 지속적으로 이루어지고 있다. 지구상에서 존재하는 물이 가진 위치에너지를 에너지로 활용하는데 가장 널리 이용할 수 있는 것은 수력자원이다.

물이 가진 위치에너지를 이용하는데 수차가 적용되고, 수

차의 기계에너지를 전기에너지로 변환시키기 위해서는 발전기가 이용된다. 이때 사용되는 발전기는 동기발전기와 유도발전기이다. 소수력에서 발전용량이 클 경우에는 동기발전기를 주로 이용하지만, 발전용량이 낮을 경우에 유도발전기를 사용하는 경우가 많다.

유도발전기는 회전자 형상에 따라 농형과 권선형으로 나누어진다. 출력용량이 수백 kW 이상 되는 경우 권선형 유도발전기가 주로 사용되고, 수백 kW에서 수십 kW급에서는 주로 농형 유도발전기가 많이 사용된다^(1~5). 유도발전기는 유도전동기에 비해 주문이 많지 않아 주로 주문 제작하기 때문에 가격이 높은 편이다. 그래서 출력 용량이 낮은 곳에서는 유도전동기를 동기속도 이상으로 운전시켜 발전기로 사용하는 경우에 대한 동작 특성 해석을 실시하였다⁽⁴⁾.

유도기는 동기기에 비해 제작이 쉽고, 유지보수비용이 저렴하여 산업현장에서 많이 사용되고 있다. 유도전동기는 기동 초기에 높은 전류가 발생하지만, 유도발전기는 계통에 연계할 때 높은 돌입전류가 흐르기 때문에 계통에 전압강하를 발생시킬 수 있다^(2,4). 그래서 초기 및 정격속도에서 원하고자하는 특성을 얻기 위해 회전자 형상을 다양하게 설계하고 있다. 유도전동기의 용량이 커질수록 기동전류에 대한 영향을 줄이기 위해 회전자의 구조를 심구 또는 이중 농형 형식을 많이 적용하고 있다.

그래서 본 논문에서는 심구 또는 이중 농형 회전자를 가진 유도기가 전동기 또는 발전기로 운전할 경우 어떤 특성 변화가 발생하는지를 비교 분석하였다.

2. 회전자 형상에 따른 유도기의 특성

다른 회전기기와 같이 마찬가지로 유도기는 회전자와 고정자 회로를 가지고 있다. 유도기는 기동시에 큰 토크를 필요로 하는 것과 정격 운전점에서 높은 토크를 필요로 하는 것에 따라 회전자 형상을 다르게 설계하고 있다.

유도기 설계자는 권선, 회전자 슬롯 구조, 엔드링 사이즈, 회전자 바 그리고 엔드링 저항, 슬롯 수, 회전자 바의 수, 자성체의 양과 형식을 변화시켜 의도하는 특성을 얻고 있다^(6~9).

Fig. 1은 유도전동기의 속도-토크 특성곡선으로서 NEMA (National Electrical Manufacturers Association) design A ~D의 종류에 따라 기동토크, Pull-up(최소) 토크, Breakdown

(최대) 토크가 각각 서로 다르다. 따라서 이와 같이 서로 다른 특성을 알아야 전동기를 발전기로 운전할 때 기동 및 운전 특성 파악에 도움이 된다^(7,8).

Fig. 1에서 기동 토크가 가장 큰 것은 D이고, Breakdown 토크가 가장 큰 것은 A이다. 기동 토크는 작지만 정격 운전점에서 높은 토크가 보장되어 널리 사용되고 있는 것은 B이다.

Fig. 2는 Fig. 1과 같은 속도-토크 특성을 회전자 구조에 따라 달라지는 것을 나타낸 것이다. Fig. 2에서 design D가 회전자가 보통 농형 회전자에 해당되고, design C는 이중 농형 회전자(double cage rotor)로 기동시 높은 토크가 보장되지만 정격 부하 운전 영역에서는 다소 낮은 토크를 나타내고 있다. design B는 회전자가 심구형(deep bar)으로서 기동시 가장 낮은 토크를 나타내지만, 정격 부하 운전 영역에서는 높은 토크를 보장한다⁽⁵⁾.

Fig. 2에서와 같이 회전자 형상에 따라 기동시의 토크, 최대 토크, 정격속도 근처에서의 토크가 서로 다르다는 것을 알 수 있다. 이와 같은 형상의 회전자를 가진 유도기를 동기속도 이

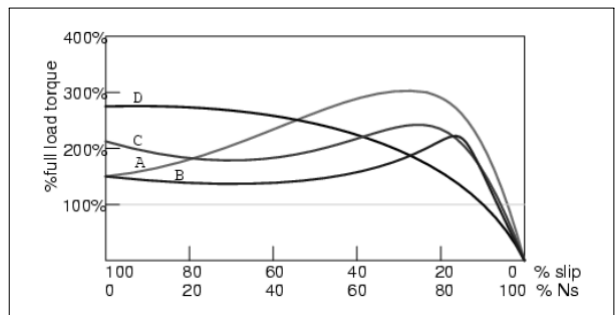


Fig. 1 Relative torque characteristics of NEMA Design A, B, C, D motors

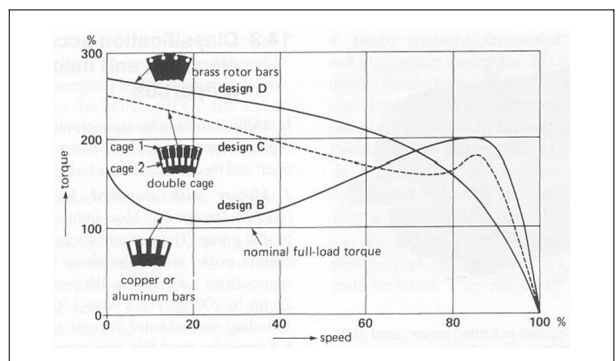


Fig. 2 Speed-torque characteristic curve of the induction motor according to the shape of the rotor

상으로 운전할 경우 전력, 토크와 효율의 변화를 알아야 한다.

본 연구에서는 이중 농형과 심구형 회전자를 대상으로 유도 전동기와 발전기로 운전하는 경우의 특성변화를 해석하였다.

Fig. 3은 이중 농형 유도기의 등가회로도를 나타낸 것으로서 회전자 표면에서 2개의 도체가 병렬로 구성되어 있으므로 회전자에 2개의 저항과 인덕턴스가 존재한다. 심구형에 대해서는 이중 농형과 같은 등가회로를 사용 가능하다.

실제 유도기에서 회전자 첫 번째 도체의 누설리액턴스 L_1 은 매우 작아서 이를 대개 무시할 경우 Fig. 3은 Fig. 4와 같이 간략화 된 등가회로로 나타낼 수 있다⁽⁵⁾. Fig. 4에서 회전자 저항 R_{2s} 와 리액턴스 X_{2s} 는 각각 다음과 같다.

$$R_{2s} = \frac{R_1 \{ R_2 (R_1 + R_2) + s (s X_2)^2 \}}{(R_1 + R_2)^2 + (s X_2)^2} \quad (1)$$

$$X_{2s} = \frac{X_2 R_2^2}{(R_1 + R_2)^2 + (s X_2)^2} \quad (2)$$

Fig. 4의 등가회로에서 기계적 출력으로 나타나는 토크 식은 다음과 같다.

$$T = \frac{3 \times I_r^2 \times \left(\frac{R_{2s}(s)}{s} \right)}{w} \quad (3)$$

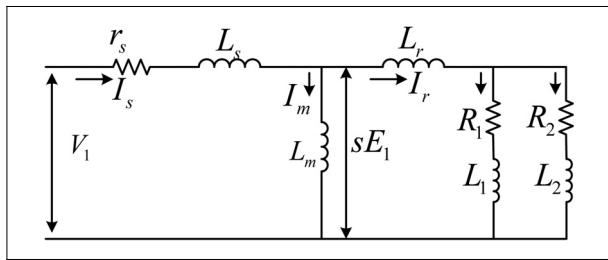


Fig. 3 Equivalent circuit of double cage bar

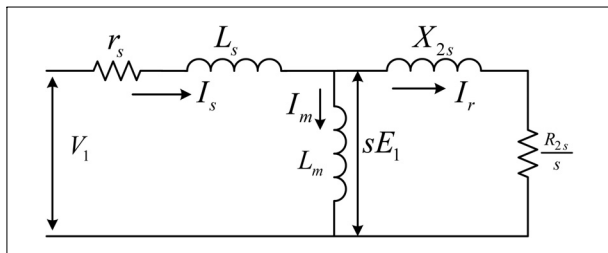


Fig. 4 A simplified equivalent circuit

유도기의 고정자에 유입되어 회전자에 전달되거나 회전자에 유입된 에너지가 고정자를 거쳐 계통에 전달되는 유효전력은 다음과 같이 구하면 된다^(3,4).

$$P = Re \left(\frac{3}{2} \times V_1 \times I_s \right) \quad (4)$$

회전수에 따라 유도기를 발전기(η_g)와 전동기(η_m)로 운전하는 경우의 효율은 유효전력 P, 토크 T 및 각속도 w 에 대해 각각 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta_g = \frac{P(s)}{T(s)w} \quad (5)$$

$$\eta_m = \frac{wT(s)}{P(s)} \quad (6)$$

3. 동작 특성 해석 및 분석

유도기의 특성 해석을 위해서는 고정자와 회전자 등에 대한 정확한 파라미터가 필요하지만, 실제 제작회사에서는 이들 파라미터에 대해 제시하지 않고 저항측정값, 무부하 및 구속시험의 결과만을 제공한다. 이럴 경우 이들 값을 가지고서 Fig. 4에 해당되는 파라미터를 구하면 되지만 변환고정이 다소 번거롭다. 그렇지만 제작회사에는 특성곡선을 제공하기 때문에 이를 가지고서 쉽게 분석이 가능하다. Table 1은 Fig. 1에 해당되는 파라미터를 나타낸 것으로서 전동기의 명판에

Table 1. Specification of Induction machine

Parameters	Values
Rated voltage	380 [V]
Power	75 [kW]
Synchronous speed	1,800 [rpm]
Starting current pu full load	6
Start torque	1.5 [pu]
Load torque	1 [pu]
Max torque	2.5 [pu]
power factor	0.8
efficiency	0.95
slip	2%

대개 표시되어 있다. 유도기를 전동기는 물론 발전기로 운전할 경우 특성 파악을 위해서는 Fig. 1과 같은 특성 곡선과 Table 1과 같은 파라미터를 가지고서 Fig. 3과 같은 파라미터를 구해야 한다. 실제 Table 1은 Fig. 1의 design B에 해당되는 것이다.

Table 1과 같은 조건하에서 심구형과 2중 농형에 대해 Fig. 3에 해당되는 파라미터는 Table 2와 같다.

이와 같이 구한 파라미터로 전동기 또는 발전기로 사용할 경우 각각의 운전 특성을 해석하기 위해서는 등가회로를 사용하여 각각의 특성을 슬립의 변화에 따라 계산하였다.

Fig. 5는 유도기의 슬립에 따른 전동기와 발전기 영역에서의 유효전력을 나타낸 것이다. 여기서 슬립(s)이 0~1 사이는 전동기로 운전하고, -1~0 사이는 동기속도 이상 운전하기 때문에 발전기로 운전하는 영역이 된다. 동기속도 근처에서는 심구형이나 이중농형 모두 거의 비슷한 전력을 필요로 하거나 발생하지만, 동기속도 영역을 벗어난 경우에는 이중 농형이 심구형보다 약간 높은 전력이 나타남을 알 수 있다.

Table 2. Parameter of induction machine with deep bar or double cage bar

Parameters	Deep bar	Double cage bar
r_s [Ω]	0,035859	0,035962
L_s [H]	$2,722 \times 10^{-4}$	$2,589 \times 10^{-4}$
L_m [H]	0,006861	0,006813
L_r [H]	$2,722 \times 10^{-4}$	$2,589 \times 10^{-4}$
R_1 [Ω]	0,070071	0,088707
R_2 [Ω]	0,071315	0,058919
L_2 [H]	$6,251 \times 10^{-4}$	$3,916 \times 10^{-4}$

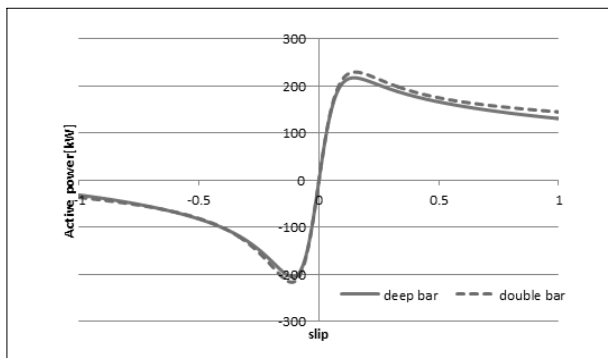


Fig. 5 Active power

Fig. 6은 Table 1과 같은 유도기를 가지고서 심구 농형의 회전자에 적용하여 파라미터를 구하여 전동기와 발전기로 운전할 경우 속도-토크 특성을 계산한 것이다.

Fig. 6에서 심구 농형 회전자인 경우 제시한 파라미터로 해석한 결과 전동기로 운전시의 기동 토크와 최대 토크는 Table 1에서 제시한 것보다는 약간 높게 나타났고, 발전기 운전영역에서 최대 토크는 전동기에 비해 높은 값을 보이지만, 실제 이 값을 나타내는 영역에서 발전기로 운전하지는 않는다. 이중 농형 회전자인 경우 전동기로 운전시의 기동 토크와 최대 토크는 Table 1에서 제시한 것보다는 약간 높게 나타났고, 발전기 운전영역에서 최대 토크는 전동기에 비해 높은 값을 보이지만, 앞서와 같이 실제 이 값을 나타내는 영역에서 발전기로 운전하지는 않는다. Fig. 6에서 계산한 결과 이중 농형 회전자를 가진 경우가 심구형 회전자를 가진 것보다는 기동 토크나 최대 토크는 약간 높은 것을 확인할 수 있었다.

Table 3은 심구형과 이중 농형 회전자에 대해 발전기와 전동기로 운전하는 경우 슬립의 변화에 따라 발생 토크를 비교한 것으로서 심구형이 이중 농형보다 약간 높은 값을 나타내고 있다.

Table 3. Torque comparison of motor-generator with deep bar or double cage bar

Parameters	Deep bar	Double cage bar
Generator operation	-1% slip	187,934
	-2% slip	374,265
	-3% slip	551,085
Motor operation	1% slip	181,546
	2% slip	349,755
	3% slip	499,541

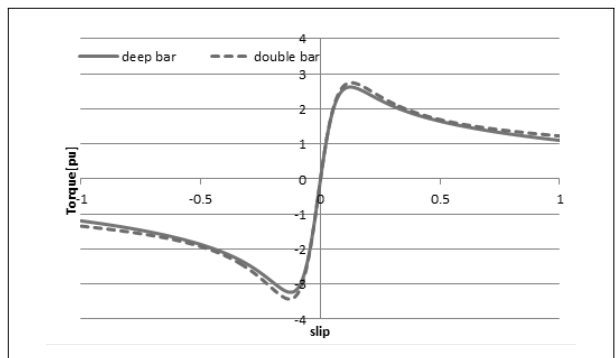


Fig. 6 Speed-torque curve

Table 4. Efficiency comparison of motor-generator with deep bar or double bar

Division		Deep bars	Double bars
Generator operation	-1% slip	97,0	97,0
	-2% slip	96,9	96,8
	-3% slip	96,1	96,1
Motor operation	1% slip	97,1	97,1
	2% slip	97,0	96,9
	3% slip	96,2	96,2

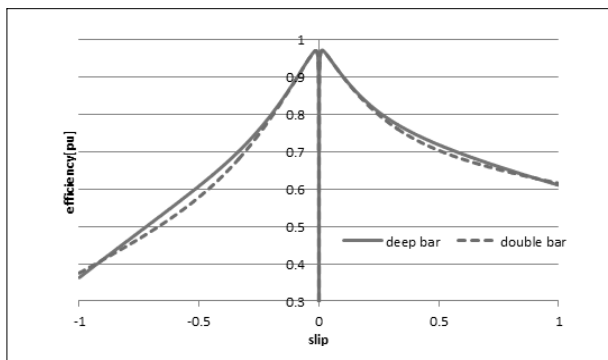


Fig. 7 Efficiency of induction machine

다음은 전동기와 발전기로 운전할 경우 효율에 분석하였다. Fig. 7은 이중 및 심구형 회전자에 대한 효율을 나타낸 것이다. 두 가지 회전자 형상에 대해 전동기로 운전하는 경우가 발전기로 운전하는 경우보다 효율이 약간 높은 편이고, 심구형이 이중 농형보다 동기 속도 이상의 운전영역에서 효율이 조금 높게 나타남을 알 수 있다.

Table 4는 발전기와 전동기의 정격속도 운전범위 가깝게 운전하는 조건하에서 슬립의 변화에 따라 효율을 비교한 것이다. 계산결과 심구와 이중농형 회전자에 대해 거의 같은 값을 유지하고 있을 확인할 수 있다. 실제 Table 1에서 제시한 슬립의 범위에서 효율이 약 2% 정도 높게 나타난 것은 마찰 및 풍손 등을 고려하지 않은 결과 때문이다.

4. 결론

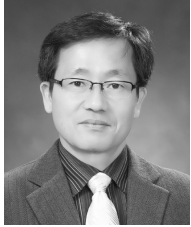
본 논문에서는 유도전동기를 유도발전기로 운전하는 경우

에 대해 NEMA B에 해당되는 회전자 형상을 가지고서 제작 회사에서 제시한 운전조건의 파라미터를 사용하여 이중 농형과 심구형 회전자의 조건을 가지고서 해석하였다. 해석결과 발전기로 운전하는 경우가 전동기로 회전하는 경우에 비해 토크는 높은 값을 나타내고, 이중농형이 심구형 회전자보다 높은 토크를 나타내었다. 실제 운전영역에서 심구형 회전자와 이중농형 회전자에 대해서는 전동기와 발전기의 효율 비교에서는 거의 차이가 없음을 확인할 수 있었다.

References

- [1] K. S. Pankaj, J. P. Nelson, Application Guidelines for Induction Generators, in Proc. International Conference on Electrical Machines and Drives, Milwaukee, Wisconsin, May 18–21, 1997, Paper WC1/5.1 – WC1/5.3.
- [2] Jong-Gyeum Kim, Young-Kuk Kim, “A comparison of the operating characteristics of the synchronous generator and induction generator applied to the small hydroelectric power plant”, KIEE, Vol. 63P, No. 2, pp. 55–60. 2014. 6.
- [3] Jong-Gyeum Kim, “Efficiency Analysis for Water Turbine Generator of Agricultural Reservoir”, KIEE, Vol.62, No.9, pp.1223~1227. 2013. 9.
- [4] Jong-Gyeum Kim, “Analysis for the Operating Characteristics When the Induction Motor is Used as a Generator”, KSNRE, Vol. 10, No. 2, pp. 5–11, 2014. 6.
- [5] Jong-Gyeum Kim et al, “Operating characteristic analysis of the induction motor as a generator”, Electrical Machinery & Energy Conversion Systems Society Annual Spring Conference, KIEE pp. 165–167, 2012, 4.
- [6] M. Godoy Simoes & Felix A. Farret, Renewable Energy Systems–Design and Analysis with Induction Generators, CRC Press, 2004.
- [7] IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generator., IEEE Std 112–2004, 2004.
- [8] Paul L. Cochran, Poly Induction Motors–Analysis, Design and Application, Marcel Dekker, 1989.
- [9] John R. Smith & Meng J. Chen, Three-Phase Electrical Machine Systems–Computer Simulation, John Wiley & Sons, 1994.

김 종 검



1984년 동아대학교 전기공학과 공학사
1991년 충남대학교 전기공학과 공학석사
1996년 충남대학교 전기공학과 공학박사

현재 강릉원주대학교 전기공학과 교수
(E-mail : jgkim@gwnu.ac.kr)