

유도전동기를 발전기로 사용시 동작 특성 해석

김종겸*

Analysis for the Operating Characteristics when the Induction Motor is Used as a Generator

Jong-gyeum Kim*

Abstract

Squirrel cage induction motor is the main driving system of industrial field and familiar with its use in a large variety of applications. The structure and operating characteristics of induction generator is almost identical to induction motor, but the induction generator part is used restrictively from hydropower power and wind power development etc. Recently induction generator is commonly used for micro & small hydro power applications due to its simplicity, reliability, low cost and robustness. Input and output of induction motor has turned against at the induction generator operation. Rotation speed of induction generator is small faster than synchronous speed of induction motor. As output of induction machines increases with the increasement of speed, so loss is same. Actually, generator efficiency is lower than motor at this condition. If induction generator is connected with mechanical load such as increaser, total efficiency is decreased. Consequently the quality in compliance with an induction motor parameter applying like that in the generator is a possibility of having the error of some. In this paper, we analyzed that input, output, torque and efficiency of induction machine is different from each other above and below synchronous speed.

Key words

Induction generator(유도발전기), Induction motor(유도전동기), Efficiency(효율), Active & reactive power(유효 및 무효전력), Torque(토크)

(접수일 2014. 4. 4, 수정일 2014. 5. 27, 게재확정일 2014. 5. 27)

* 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
 Q : reactive power, Var
 S : apparent power, VA

1. 서론

신·재생에너지에 대한 관심의 제고에 따라 화석연료를 대체하기 위한 에너지 개발 및 보급에 많은 연구가 진행되고 있다.

수차에서 발생된 기계적인 에너지를 전기적인 에너지로 변

환시킴을 위해 동기발전기와 유도발전기가 주로 이용되고 있다. 소수력 발전에서는 용량이 클 경우에는 동기발전기를 이용하지만, 일정 용량이하에서는 유도발전기를 사용하는 경우가 많은 편이다. 유도발전기에도 회전자와 고정자 두 부분에 따라 농형과 권선형으로 나누어진다. 주로 수백 kW 이상 되는 경우 발전설비에서는 권선형이 사용되고, 수백 kW에서 수십 kW에서는 주로 농형 유도발전기가 많이 사용된다.⁽¹⁾

유도발전기는 전동기에 비해 사용이 많지 않기 때문에 주문제작에 의존하므로 가격이 높은 편이다. 그래서 유도전동기를 동기속도 이상으로 운전시켜 발전기로 사용하는 경우가 많은 편이다.

유도전동기는 동기속도 이하에서 운전하지만, 유도발전기는 동기속도를 약간 상회한 속도영역에서 운전하므로 전동기를 발전기로 사용할 경우 속도의 증가에 따라 특성 값이 변화되지만 전동기 값을 그대로 발전기에 적용할 경우 종합 효율 계산 등에 약간의 오차가 발생할 수 있다. 그래서 본 논문에서는 농형 유도전동기 파라미터를 가지고서 동기속도 전후에서 전동기와 발전기로 운전시의 특성변화를 해석하였다.

2. 유도전동기와 유도발전기

다른 회전기와 같이 마찬가지로 유도기는 회전자와 고정자 회로를 가지고 있다. 소용량의 유도기는 농형회전자로서 외부에서 전원을 공급받도록 연결되어 있지 않아 단락된 회로로 구성되어 있다. 이 유도전동기를 유도발전기로 사용할 경우 운전 특성을 분석하기 위해서는 등가회로를 사용하여 슬립의 변화에 따라 계산하였다.

2.1 유도전동기

Fig. 1은 3상 유도전동기의 입력에서 출력으로 전력의 흐름을 나타낸 것이다. 입력전력(P_{in})은 단자에서 전기적인 전력 흐름을 의미한다. 이때 입력 전력 중에서 고정자 회로에서 동손에 해당되는 만큼 손실을 제외한 전력(P_{gap})이 회전자에 전달된다. 공극을 거쳐 회전자 손실분을 제외한 전력(P_{conv})이 기계적인 시스템으로 변환된다.⁽¹⁻⁴⁾ 표류 부하손과 기계적인 손실을 제외한 남은 전력이 기계적인 부하에 이용 가능한

출력이 된다. 실제 동손을 회전자와 고정자 두 곳에서 발생하고, 표류 부하손은 대개 전동기 전체에 분포하는 전기적인 손실이다. 철손의 대부분이 발생하는 곳이 고정자이므로 고정자에 할당하고 기계적인 전력이 변환된 이후에 전기적인 모델에 포함시키는 방법이 없으므로 표류 부하손은 제거되어야 한다. 일부 경우에서 표류 부하손, 철손 및 마찰 그리고 풍손을 간단하게 처리하기 위해 회전형 손실로서 그룹화 하는 경우도 있으며 기계적인 시스템으로 전력 변환을 계산한 이후 모든 것을 제외하였다.

Fig. 2는 Fig. 1과 같이 전동기의 입력에서 출력에 이르기까지의 에너지 변환관계를 설명하기 위한 유도기의 등가회로를 나타낸 것이다.

Fig. 2와 같은 유도전동기 등가회로에서 고정자에 유입되는 전류는 식 (1)과 같다.

$$I_1 = \frac{V_1}{Z_1} \tag{1}$$

식 (1)에 사용된 상 임피던스 Z_1 은 고정자의 임피던스와 자화 리액턴스와 회전자 임피던스의 합 Z_f 과 같다.

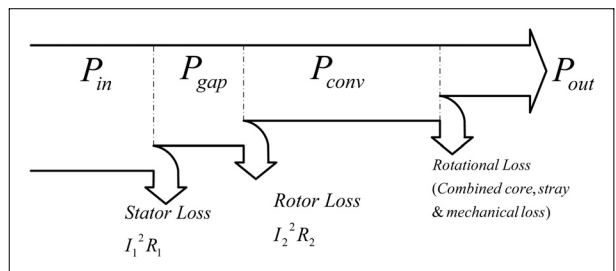


Fig. 1 Power flow at the motor operation

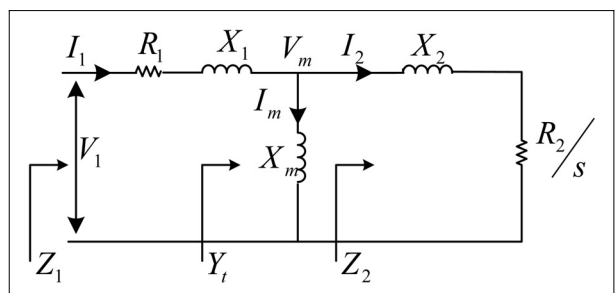


Fig. 2 Equivalent circuit diagram

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

여기서 Z_f 는 다음과 같다.

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

전동기에서 부하가 증가함에 따라 고정자 전류가 증가하기 때문에 전압강하가 일어난다. 즉 Fig. 2에서 단자전압에서 고정자 전압강하를 뺀 값이 전동기의 자화전압 V_m 이 된다.

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

2차측에 유도된 전압은 공극자속을 결정하는 전압으로서 약간 감소하므로 자화전류와 철손도 따라서 줄어든다. 그러나 발전기 영역에서는 고정자 전압 강하 때문에 공극전압은 오히려 역으로 증가한다. 이는 더 높은 자화전류를 요구하므로 결과적으로 철손은 증가하게 된다.

식 (3)에서 철손 저항을 고려하지 않을 경우 회전자전류는 다음과 같다.

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

전동기 고정자에 유입되는 입력에너지 P_{in} 는 다음과 같다.

$$P_{in} = \sqrt{3} V_{LL} I_L \cos \theta \quad (5)$$

고정자 단자에서의 입력에너지 중에서 고정자에 의해 소비되는 손실은 다음과 같다.

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

고정자를 거쳐 공극에 전달되는 전력 P_{gap} 는 다음과 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 전력 중에서 회전자에 의해 소비되는 손실은 다음과 같다.

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

풍손 및 마찰손과 철손은 전체 동작영역에서 일정한 것으로 고려하며 무부하 시험으로 가능하다. 그러나 여기서는 풍손과 마찰손은 제외하고 철손만 고려하였다.

따라서 입력에너지 중에서 전기적인 손실을 제외한 전력에너지는 다음과 같다.

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

변환된 출력에서 회전자 손실을 고려할 경우 최종 출력식은 다음과 같다.

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

토크는 변환된 전력과 회전속도로 구할 수 있다.

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

고정자에 유입된 전기적인 입력에너지 중에서 기계적인 출력으로 변환된 비율로 나타내는 효율은 다음과 같다.⁽²⁻⁴⁾

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

2.2 유도발전기

유도발전기는 다상 유도전동기와 기계적 및 전기적으로 유사한 매우 유사한 것으로서 회전축이 유도전동기의 동기 주파수 보다 빠르게 회전할 때 전력을 발생한다.

유도발전기는 회전자속을 발생시키기 위한 여자전원을 외부에서 공급받아야 한다. 외부 전원공급에는 계통연계하거나

콘덴서와 같은 설비를 이용할 경우 전력을 발생할 수 있다. 고정자로부터 회전하는 자속은 회전자에 전류를 유도하여 자계를 발생시킨다. 만일 회전자가 회전자속의 비율보다 늦게 회전한다면 기기는 유도전동기와 같이 동작한다. 만일 회전자가 빠르게 회전할 경우 발전기로서 동작하여 동기주파수에서 전력을 발생시킨다.^(1,5,6)

Fig. 3은 발전기 운전 영역에서의 전력 흐름도로서 전동기와 반대가 된다. 먼저 축의 회전운동으로 발생한 입력에너지 P_{in} 에서 회전손실을 제외한 전력이 변환된 전력성분 P_{conv} 이 된다. 이 성분에서 회전자 손실 P_{loss-r} 을 제외한 전력성분이 고정자에 전달된다. 고정자에 전달된 성분 중에서 고정자 자체 손실 P_{loss-s} 을 제외한 성분에 전력으로 변환되는 출력성분 P_{out} 가 된다. 실제 발전기의 전력발생은 출력성분에서 각종 손실을 제외한 유효전력성분이다. 유도전동기를 동기속도 이상으로 운전할 경우 발전기로 동작하며, 이때 슬립, 토크, 기계적인 출력 그리고 공극 전력이 전동기와 반대로 전개된다.^(2,5,6)

전동기와 발전기의 두 등가회로에서 유효전력이 같다고 할 경우 발전기 운전모드에서 고정자 손실은 자화전류의 증가로 더 많은 유도성분으로 인해 전동기 운전 모드보다 더욱 커진다. 회전자 손실은 높은 공극 전력으로 인해 증가하는 것으로 보이지만 슬립 또한 고려되어야만 한다.

동기속도 이상으로 회전할 경우 슬립은 마이너스가 되므로 식 (1)에서 고정자에 흐르는 전류의 부호가 전동기와 반대가 되므로 전력의 흐름을 알기 위해 전력을 구해야 한다. 동기속도 이상으로 운전하는 경우 발전기 단자에서의 피상전력은 다음과 같다.

$$S = 3VI^* \quad (13)$$

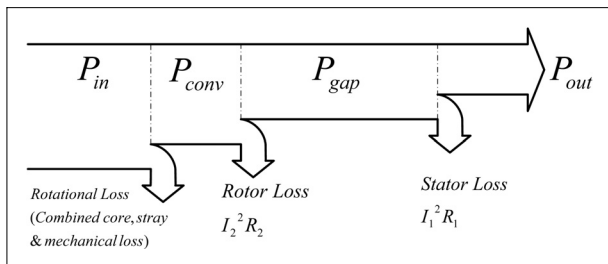


Fig. 3 Power flow at the generator operation

식 (13)에서 유효 및 무효 전력은 각각 다음과 같다.

$$P = Re(S) \quad (14)$$

$$Q = Im(S) \quad (15)$$

식 (14)에서의 유효전력의 부호는 (-)가 되는 것은 발전기 단자에서 전력이 전동기와 달리 유출되는 것을 의미하고, 식 (15)의 무효전력의 부호는 (+)가 되는 것은 고정자 단자로 전력이 공급되는 것을 의미한다. 식 (14)는 전동기에서는 고정자에 유입되는 전력성분에 대응되는 것으로 식 (5)와 같다. 전력의 흐름에 따라 경우 전동기에서 식 (9)는 발전기 운전영역에서 $s < 0$ 이 되므로 기계적인 출력 역시 부(-)가 된다.

발전기로 운전할 경우 동작결과를 설명하기 위한 전류, 전력 그리고 토크는 전동기와 같은 수식을 전개하면 된다. 그러나 슬립이 마이너스가 되므로 회전자를 통해 고정자에 전달되는 기계적인 출력은 식 (10)에서 변환된 전력에 회전자 손실이 추가된다.

$$P_{out} = P_{em} - P_{rot-loss} \quad (16)$$

$$= -(1-s)P_{gap} - P_{rot-loss}$$

결국 부(-)인 슬립이 공극전력에 추가될 경우 출력은 전동기로 운전할 때보다 증가한다.

유도발전기의 효율은 기계적인 출력에서 유효전력으로 식 (17)와 같이 변환된다.^(1,5,6)

$$\eta = \frac{Re(S)}{P_{out}} \times 100 = \frac{P}{P_{out}} \times 100 [\%] \quad (17)$$

3. 해석 모델의 특성 분석

유도기의 슬립을 $0 < s < 1$ 의 범위에서 운전할 경우 전동기로 동작하지만, 유도기를 동기속도 이상에서 운전할 경우 즉 슬립을 $-1 < s < 0$ 영역에서 운전할 경우 전동기를 발전기로 사용이 가능하다. 즉 슬립이 $-1 < s < 1$ 사이 운전할 경우 회전기의 각속도가 달라지므로 각속도의 운전변화에 따

라 전력, 토크, 효율 및 자화전류의 변화를 해석하였다.

유도발전기는 전동기와 달리 손실과 기기 슬립을 줄이기 위해 회전자 저항이 낮도록 설계하고 있다. 전동기와 발전기로 운전하기 위해 사용된 유도기의 파라미터는 다음과 같다.

Fig. 4는 Table 1과 같은 사양의 유도전동기에 대해 슬립의 변화에 따른 입력 및 출력을 나타낸 것이다. 전동기 동작에서 입력은 출력보다 높고, 슬립이 제로 근처에서는 거의 같은 비율로 변화를 나타내지만, 슬립이 부가 되는 발전기로 운전하는 영역에서는 전동기와 달리 출력과 입력이 서로 상반된 크기 변화를 나타낸다. 이는 동기속도보다 낮은 전동기 동작 운전영역에서 입력에서 손실을 제외한 성분이 출력으로 전달되는 것을 의미하며, 동기 속도 이상의 발전기 운전영역에서는 출력이 입력보다 큰 것은 회전자운동에 의해 발생할 출력 성분 중에서 손실을 제외한 성분에서 부하에 공급 가능한 입력전력임을 의미한다.

Fig. 4에서 전동기로 운전하는 영역에서 입력 대 출력의 비율과 발전기로 운전하는 영역에서 출력 대 입력의 비율에 해당하는 효율은 발전기로 운전하는 경우가 출력에 비해 입력이

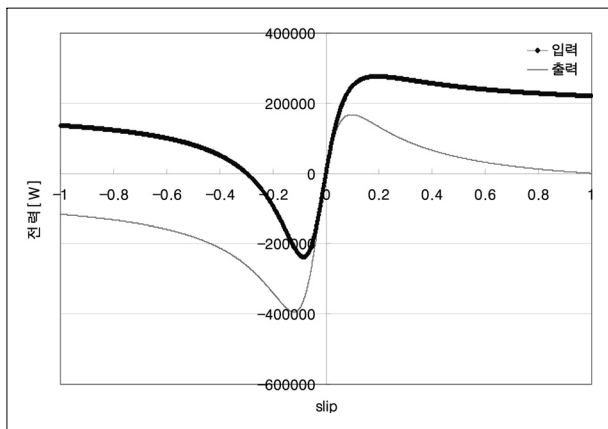


Fig. 4 Input and output by slip

Table 1. Induction Machine Parameter

parameter	380 [V], 4pole, 75 kW
stator resistance, r_s	0.09053 [Ω]
rotor resistance, r_r	0.029858 [Ω]
stator leakage inductance, L_{ls}	0.00034 1[H]
rotor leakage inductance, L_{lr}	0.000341 [H]
mutual inductance, L_m	0.006601 [H]
rotational speed [RPM]	1764

낮아 전동기로 운전하는 경우가 약간 높다는 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 속도의 변화에 따른 유효전력 및 무효전력을 나타낸 것이다. 전동기로 운전하는 영역에서 유효전력은 토크로 전달되는 성분이지만, 발전기로 운전하는 영역에서 유효전력은 부하에 전달 가능한 전력으로 전동기와는 전력의 흐름은 반대가 된다. 회전자계를 발생시키는데 필요한 무효전력은 전동기나 발전기로 운전하는 경우 전원측 또는 콘덴서에 의해 자체적으로 공급되어야 할 성분으로 유효전력과 같이 동기속도 이상 또는 이하에서 운전하더라도 전력의 흐름 방향은 전환 되지 않는다. 회전자계를 발생시키는데 사용되는 무효전력은 전동기로 운전하는 경우 보다 발전기로 운전할 경우 약간 높다는 것을 알 수 있다. 각속도에 따라 전동기로 운전하는 경우보다 발전기로 운전하는 경우 유효전력과 무효전력의 편차가 높은 것은 전력이 각속도에 비례하는 특성을 가지고 있기 때문이다.

Fig. 5에서 발전기로 운전하는 영역에서 동기각속도가 244[rad/s] 이후에서는 유효전력의 공급이 반대방향으로 되어 발전기 역할을 하기보다는 부하로서 기능을 할 수도 있지만, 실제로 유도기를 발전기로 운전하는 각속도는 이 범위에 근접하지 않는 경우가 대부분이다.

Fig. 6은 슬립의 변화에 따른 전력과 토크의 크기를 나타낸 것이다.

Fig. 6에서 동기 각속도 이하에서 전동기로 운전할 경우 발생하는 최대 토크인 breakdown 토크보다 동기각속도 이상에서 발전기로 운전할 경우 발생하는 최대 토크에 해당되는 push-over 토크가 더 커지만, 실제 전동기나 발전기로 운

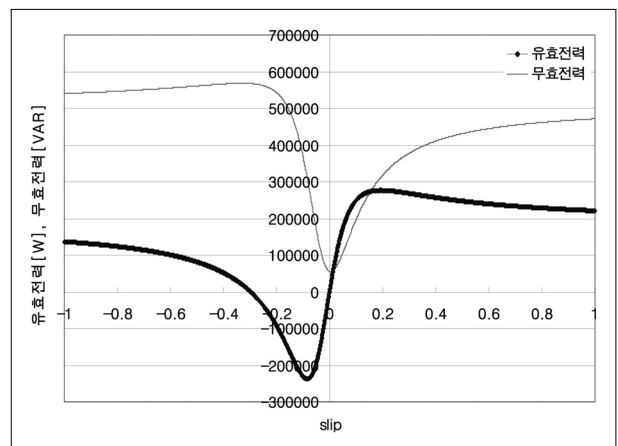


Fig. 5 Active power and reactive power by slip

전하는 영역은 이보다 작은 값을 가진 동기각속도 범위 근처에서 운전한다. 일반적으로 최대출력과 최대 토크는 발전기의 운전 영역이 전동기 운전영역보다는 높은 값을 나타낸다.

Fig. 7은 슬립변화에 따른 손실을 나타낸 것이다. 고정자 손실이 회전자 손실보다 약간 높은 편이고, 철손의 경우 매우 작은 값을 나타내며 같은 정격에서도 발전기로 운전하는 영역의 전체 손실이 전동기로 운전할 경우보다 약간 높은 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 무효전력 및 자화전류의 변화를 해석한 것이다. 회전자계를 발생시키는데 필요한 자화전류는 전동기로 운전하는 영역에서보다 발전기로 운전하는 영역에서 약간 높은 값을 가지며, 실제 전동기와 발전기로 운전하는 영역의 대칭이 이루어지지 않고 발전기 운전영역으로 약간 편중된 형태를 나타내고 있다. 유도발전기는 무효전력을 필요로 하지만 자체적으로 만들지는 못하므로 자화를 위해 외부에서 공급되

어야 한다. 회전자계를 발생시키는 무효전력은 전동기의 경우 전원측에서 공급해야 하지만, 발전기에서도 별도로 공급해야 하는 것으로서 방향은 전동기와 반대지만, 그 값은 훨씬 높다는 것을 알 수 있다.

Fig. 9는 동기 각속도에 가까이 운전하는 경우에 대해 전동기와 발전기의 효율을 나타낸 것이다. 동기 각속도에서는 효율이 제로가 되지만, 동기 각속도에서 약간의 범위를 벗어날 경우 토크 및 전력생산이 이루어지므로 효율을 알 수 있다. 유도기가 동기속도에서 운전할 때 효율은 제로로 떨어지지만, 동기속도 근처에서 운전할 때는 가장 높은 효율을 얻을 수 있고, 같은 정격에서도 전동기로 운전하는 경우가 발전기로 운전하는 경우에 비해 효율이 약간 높은 편이다.

유도전동기는 전기적인 입력성분에서 손실을 제외하고 회전자력으로 변환된 비율이 높아야 고효율 기기라고 판정하고 있다. 그래서 무부하손인 철손과 부하손인 동손을 최소화되

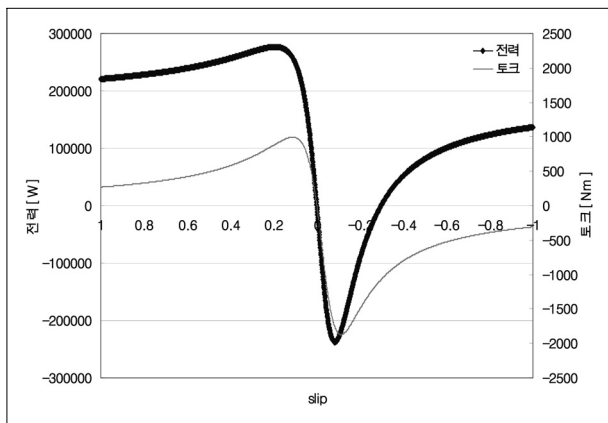


Fig. 6 Output and torque by slip

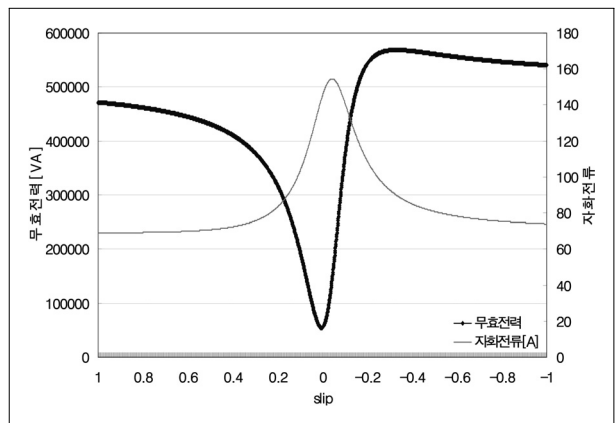


Fig. 8 Reactive power and magnetizing current by slip

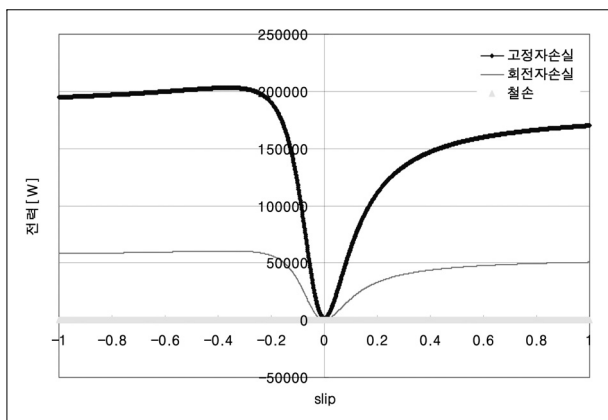


Fig. 7 Power-losses by slip

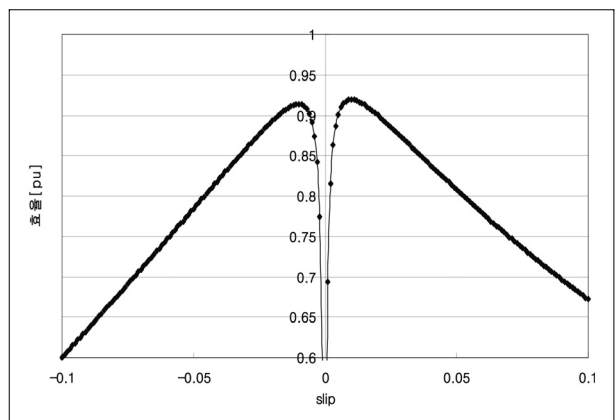


Fig. 9 Efficiency by slip

Table 2. Analysis result at the motor and generator operating condition

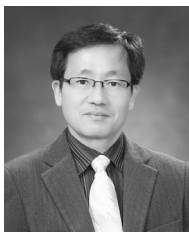
구분	전동기 운전 ($s=0.02$)	발전기 운전 ($s=-0.02$)
T [Nm]	414,293	-492,582
Q [kVAR]	62,5	77,35
P_{in} [kW]	83,33	-86,29
P_{gap} [kW]	76,53	-94,71
P_{out} [kW]	75,00	-96,60
고정자손실 [W]	6,803	8,419
회전자손실 [W]	1,531	1,894
철손 [W]	115,1	142,4
자화전류 [A]	158,195	176,31
eff [%]	90	89,3

도록 설계할 필요가 있으며 운전시에도 고효율 운전이 이루어지도록 할 필요가 있다.

Table 2는 Table 1에서 제시한 전동기 파라미터를 가지고서 슬립 $\pm 2\%$ 에서 각각 운전한 경우 각각의 특성 값을 나타낸 것이다. Table 2에서 토크 및 입력과 출력은 전동기와 발전기가 서로 반대 방향임을 알 수 있다.

유도전동기와 같은 파라미터를 가진 발전기로 운전할 경우 손실은 전동기의 경우보다도 높고, 자화전류도 높아 무효전력이 높아졌으며, 공극에서 발생하는 전력 및 토크는 높지만, 부하에 전달하는 전력은 낮아 효율이 전동기에 비해 낮은 편이다. 따라서 전동기 명판에 표시된 효율보다는 작은 값을 가지므로 수차와 같은 설비를 포함한 발전기로서 운전할 때의 종합효율을 계산에서는 약간 작은 값을 고려해야 한다.

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)

4. 결론

본 논문에서는 동기속도 이하에서 운전하는 유도전동기를 사용하여 발전기로 운전할 경우 전력, 토크, 효율, 자화전류 등에 대한 특성을 속도 변화에 따라 해석하였다. 해석결과 발전기 영역에서 운전하는 경우가 전동기 영역에서 운전하는 경우보다 손실이 높아 효율이 떨어짐을 알 수 있었다. 그리고 회전자계를 발생시키는데 필요한 무효전력은 전동기에서보다 발전기에서 높은 값을 나타내므로 역률 보상용 콘덴서의 용량보다 높은 콘덴서를 전동기 단자에 설치하거나 계통으로부터 공급받아야 함을 알 수 있었다.

References

- [1] M. Godoy Simoes & Felix A. Farret, "Renewable Energy Systems—Design and Analysis with Induction Generators", CRC Press, 2004.
- [2] IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generator., IEEE Std 112–2004, 2004.
- [3] Paul L. Cochran, "Poly Induction Motors—Analysis, Design and Application", Marcel Dekker, 1989.
- [4] John R. Smith & Meng J. Chen, "Three-Phase Electrical Machine Systems—Computer Simulation", John Wiley & Sons, 1994.
- [5] 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.
- [6] Jong-Gyeum Kim, "Characteristics Analysis of 3-phase Induction Generator at the Unbalanced Load Operation", KIEE, Vol. 56P, No. 3, pp. 123–128, 2007. 9.