

## 회전속도에 따른 유도기의 무효전력 변화 분석

(Analysis for the Reactive Power Changes of Induction Machines According to Rotation Speed)

김종겸\* · 박영진

(Jong-Gyeum Kim · Young-Jeen Park)

### Abstract

Induction machine requires a rotating magnetic field for energy conversion. The current to generate a rotating magnetic field is the magnetization current. This magnetization current corresponds to the reactive power. Reactive power is higher than active power at start-up of induction motor. As the rotation speed is increased, their magnitudes are reversed each other. The active power is higher than the reactive power at near the synchronous speed.

This paper is dealing with the analysis result for the changes of the magnetizing current and reactive power when the induction machine is operating as a motor or generator near synchronous speed.

Key Words : Exciting Current, Induction Machines, Magnetization Current, Reactive Power, Rotation Speed

### 1. 서 론

신·재생에너지 중에서 에너지 변환효율이 가장 높고, 청정에너지인 수력에 대한 관심이 점차 높아지고 있다. 물이 가진 위치에너지를 전기에너지로 변환하기 위해 최근에 수력은 대용량에서 소용량 그리고 미니급으로 개발이 변화하는 추세이다[1-3]. 수백 kW 이하의 수력발전소에는 유도발전기가 동기발전기보다 유지관리 및 경제성이 높아 많이 사용되고 있다[2-3].

이때 사용되는 유도발전기는 용량이 낮을 경우 대부분 농형유도전동기이며 동기속도 이상으로 회전시켜 전력을 얻고 있다[3].

유도전동기나 유도발전기의 경우 자화전류는 회전자계를 만드는데 필수한 요소로서 이 전류의 흐름에 필요한 전력이 바로 무효전력이다[4-6]. 자속을 발생시키기 위해 필요한 무효전력은 회전속도에 따라 그 값이 달라진다. 따라서 회전속도의 변동에 따라 역률도 함께 영향을 받게 된다. 유도기를 전동기로 운전할 경우 무효전력은 기동초기에 높게 나타나지만, 회전속도가 높아짐에 따라 그 값은 점차 낮아지고, 상대적으로 유효전력이 높아짐에 따라 역률은 점차 향상된다. 유도기가 동기속도 이상에서 발전기로 사용될 때에도 무효전력이 필요하다. 이때의 속도는 동기속도 근처

\* Main author : Dept of Electrical Engineering,  
Gangneung-wonju National Univ, Korea  
Tel : 033-760-8785, Fax : 033-760-8781  
E-mail : jgkim@gwnu.ac.kr  
Received : 2014. 12. 22  
Accepted : 2015. 1. 22

이므로 유도전동기의 기동 초기와는 다른 값의 설정이 필요하다. 유도기의 운전에 필요한 무효전력을 전원측으로부터 전부 공급받으면 역률이 낮아지므로 자체적으로 필요한 일부분을 공급하기 위해 커패시터를 사용하고 있다. 전동기의 경우 전력회사에서 요구하는 역률을 맞추기 위해 추가적으로 커패시터를 설치하지만, 발전기의 경우 추가적으로 역률을 향상시키기 위해 커패시터를 설치하는 것이 아니라 발전기의 무효전력에 해당되는 크기의 커패시터를 발전기에 병렬로 설치하는 경우가 대부분이다.

따라서 본 연구에서는 유도기를 전동기나 발전기로 운전할 때 자화에 필요한 무효전력의 공급시 커패시터의 적정용량 선정에 도움이 될 수 있는 파라미터를 찾기 위하여 회전속도의 변화에 따른 커패시터 크기를 비교 분석하였다.

## 2. 여자전류, 자화전류 및 무효전력

### 2.1 여자 및 자화전류

유도전동기에 흐르는 전류는 부하의 운전에 필요한 전류와 일을 하지는 않지만, 에너지 변환을 위해 자속을 만드는데 필요한 전류로 분류할 수 있다. 전자는 유효전류로서 부하의 크기에 따라 변화한다. 후자는 무효전류로서 자화전류와 누설리액턴스 전류가 있다.

유도기는 에너지 변환과정에서 여자전류가 필요하다. 여자전류는 자속을 발생시키는데 필요한 성분의 자화전류와 철심에 의해 발생하는 철손전류의 합이다. 이 자화전류의 크기가 철손전류에 비해 매우 높기 때문에 여자전류는 거의 자화전류라고 간주하고 해석하는 경우가 많다[8]. 자화전류는 인가 전압에 좌우되는 것으로 실제 거의 일정하며, 인가 전압에 직교성분으로 전동기의 손실에 기여하는 것을 제외하고는 출력과 관계를 가지지 않는다. 또한 자화전류는 전원측에서 볼 경우 역률 감소를 일으킨다.

자화전류는 전동기가 에너지 변환을 통해 일을 할 수 있도록 자속을 만드는데 필요한 성분으로서 부하에 관계없이 거의 일정하지만, 누설 리액턴스

성분의 전류는 그 크기가 매우 작아 전체적인 무효전류는 무부하에서 전부하까지 크기가 비교적 작다 [7-8].

유도기는 공극이 있어 자화전류가 크고, 마찰손이 있어 손실전류가 많이 흐르기 때문에 변압기에 비해 무부하 전류가 크다. 또한 자화전류의 위상이 90° 뒤진 전류이므로 회로의 역률이 나빠 항상 역률을 보상해야 한다. 전동기의 자화전류는 공극의 높은 자기저항 때문에 보통 전부하 전류의 25~50% 범위이다 [6-7].

### 2.2 무효전력 및 역률 보상

무효전력은 부하와 전원 사이를 왕복하는 것으로서 소비되지 않는 전력이다. 인덕턴스와 같은 유도성 부하나 정전용량과 같은 용량성 부하에서 발생하는 것으로 유도성 부하에서는 뒤진 무효전력, 용량성 부하에서는 앞선 전류로 부른다. 이 무효전력은 역률의 저하나 전압변동의 원인이 될 수 있다.

그림 1은 유도전동기의 T형 등가회로도 나타낸 것이다. 고정자에 인가된 전류( $I_1$ )에서 자속을 만들기 위해 필요한 전류( $I_c$ )를 제외한 성분의 전류( $I_2$ )가 기계적인 출력을 발생하기 위해 회전자에 흐르게 된다.

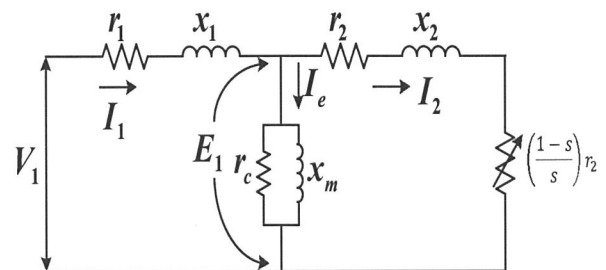


그림 1. 유도기 등가회로  
Fig. 1. Equivalent circuit of induction machine

그림 1에서 전동기 자화전압  $E_1$ 은 고정자 전압 강하를 제외할 경우 다음과 같다.

$$E_1 = V_1 - I_1(r_1 + jx_1) \tag{1}$$

따라서 자화전류  $I_m$ 는 철손을 무시할 경우 다음과 같다.

$$I_m = \frac{E_1}{j\omega L_m} \quad (2)$$

회전자계를 발생시키는데 필요한 자화전류는 무효전력에 해당된다. 이 전력은 식 (1)과 (2)의 곱으로 구하면 된다. 실제 전동기 자화에 필요한 전류성분이 전원측에서 전부 공급될 경우 역률이 낮아지므로 전동기 단자에 병렬로 커패시터를 설치하여 전원측으로부터 부족한 무효전력 성분을 공급할 경우 역률은 높아진다. 전동기에 공급되는 무효전력 성분의 전류와 커패시터에서 제공되는 전류의 합이 자화전류의 크기와 같을 경우 역률은 높아진다.

유도기에 공급되는 전압, 전류의 성분과 위상차로부터 무효전력은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$Q = \sqrt{3} V_1 I_1 \sin\theta_1 = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (3)$$

무효전력의 형성에 필요한 상전류는 다음과 같다.

$$I_{c1} = \frac{\left(\frac{Q}{3}\right)}{V_1} \quad (4)$$

유도전동기의 역률은 대개 0.8 전후로 전력회사에서는 이 역률을 0.9 이상 유지하도록 요구하기 때문에 사용자는 대부분 전동기의 단자에 역률 보상용 커패시터를 설치한다. 이때의 역률 보상을 위해 설치하는 커패시터의 무효전력은 다음과 같다.

$$Q_c = P \left( \frac{\sqrt{1 - \cos^2\theta_1}}{\cos\theta_1} - \frac{\sqrt{1 - \cos^2\theta_2}}{\cos\theta_2} \right) \quad (5)$$

여기서  $\cos\theta_1$ 은 보상 전 역률이고,  $\cos\theta_2$ 은 보상 후 역률이다.

유도기를 전동기로 사용할 경우 역률 보상을 위해 설치하는 커패시터의 전류( $I_{cm}$ )와 발전기로 운전할 경우 자화에 필요한 무효전력을 공급하기 위한 커패시

터의 전류( $I_{cy}$ )는 각각 다음과 같다.

$$I_{cm} = \frac{\left(\frac{Q_c}{3}\right)}{V_1} \quad (6)$$

$$I_{cy} = \frac{\left(\frac{Q}{3}\right)}{V_1} \quad (7)$$

식 (2)에서 제시한 유도기의 자화전류는 전원측과 부하측 단자에 설치한 커패시터에서 흐르는 전류의 합과 거의 일치할 경우 역률이 높아지지만, 이보다 낮은 경우 역률은 낮아진다. 따라서 유도기의 자화에 필요한 무효전력을 역률 보상 커패시터와 같은 설비를 이용하여 적정 범위를 넘어 보상할 경우 자기여자와 같은 현상이 발생할 수 있다. 유도기는 기동 초기에 역률이 가장 낮지만, 동기속도 근처에서는 높은 편으로 회전속도에 따라 조금씩 달라진다. 유도기는 대개 일정부하 운전에서 주로 사용하지만, 약간의 부하변화나 동기속도 범위를 벗어나 발전기로 운전할 경우에 무효전력이 변하게 된다.

### 3. 계산 및 결과 분석

본 연구에 적용한 3상 유도기의 파라미터는 표 1과 같다.

표 1. 유도기 파라미터  
Table 1. Induction machine parameter

parameters	Values
voltage	460V
capacity	75kW
pole	4
stator resistance, $r_1$	0.095Ω
rotor resistance, $r_2$	0.075Ω
stator leakage reactance, $x_1$	0.189Ω
rotor leakage reactance, $x_2$	0.151Ω
magnetizing reactance, $x_m$	6.032Ω

그림 2는 표 1의 파라미터를 사용하여 회전속도를 변화시켰을 경우 유효전력, 무효전력 그리고 역률 변화를 나타낸 것이다. 동기속도를 기준으로 유효전력의 경우 전동기와 발전기로 운전할 때 서로 반전되어 전동기는 전원에서부터 전력을 공급받지만, 발전기는 전동기와 반대로 전력을 생산하여 전원측에 공급할 수 있으므로 서로 반대의 방향을 가지지만, 무효전력의 경우 전동기나 발전기 모두 회전자계를 형성하는데 필요한 전력을 모두 필요로 하여 전원측에서 공급받아야 함을 알 수 있다. 특히 유도전동기를 기동할 경우에는 무효전력이 유효전력보다 상대적으로 크기 때문에 역률이 떨어지지만, 동기속도에 가까운 회전속도로 운전할 경우에는 유효전력이 무효전력보다 높아 역률은 높아진다.

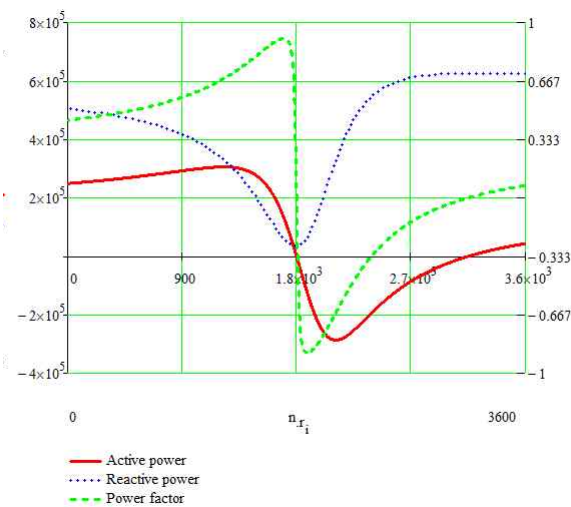


그림 2. 회전속도에 따른 유효 및 무효전력  
Fig. 2. Active & reactive power according to the rotation speed

표 1에서 제시한 전동기를 3%의 슬립에서 운전할 경우 역률은 88%가 되었다. 보통 이 역률은 전력회사의 요구치보다 낮기 때문에 90% 이상이 되도록 커패시터를 설치하여 필요한 무효전력을 일부 보상할 필요가 있다. 이때 설치하는 커패시터의 전류는 자화전류의 크기보다 낮은 값이 되도록 규정하고 있다[5].

유도기가 기동에서 정격속도로 운전할 때 기동초

기의 역률은 매우 낮지만, 정격운전까지의 시간이 매우 짧으므로 역률 보상을 위해 설치하는 커패시터 용량산정은 정격속도 운전에서의 전력으로 역률을 계산한다.

그림 3은 실제 동기속도 근처에서 전동기 또는 발전기로 운전할 경우 회전속도의 변동에 따른 무효전력의 변화를 상세하게 나타낸 것이다. 동기속도 범위 이하 또는 이상에서 무효전력은 약간 증가함을 알 수 있다. 즉 동기속도에서는 34kVAr의 무효전력이 필요하지만, 3%의 슬립영역에서 전동기로 운전할 경우에는 41kVAr의 무효전력이 필요하고, -3%의 슬립에서 발전기로 운전할 경우 47kVAr의 무효전력이 요구됨을 알 수 있다.

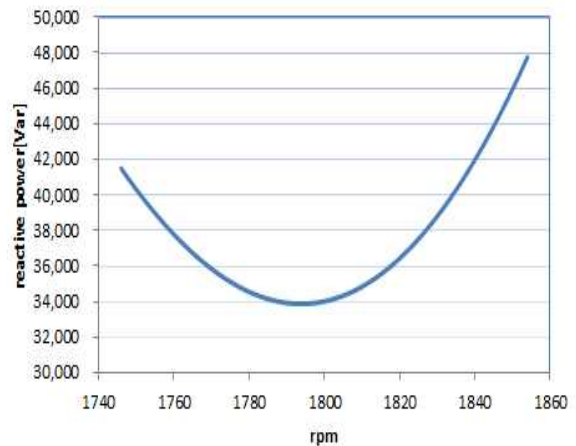


그림 3. 동기속도 부근에서의 무효전력  
Fig. 3. Reactive power in the near synchronous speed

그림 4는 표 1의 파라미터를 사용하여 회전속도의 변화에 따른 고정자 전류( $I_1$ ), 회전자 전류( $I_2$ ) 및 자화 전류( $I_m$ )의 크기를 분석한 것이다.

기동 초기에 고정자와 회전자 전류는 매우 높게 나타나지만, 회전속도가 증가함에 따라 그 값은 점차 낮아진다. 그러나 자화전류는 기동초기에 고정자와 회전자 전류에 비해 낮지만 회전속도가 높아짐에 따라 점차적으로 상승함을 알 수 있다. 동기속도 근처에서 고정자와 회전자 전류가 가장 낮게 나타나지만, 자화전류의 경우 동기속도를 약간 넘어 발전기로 운전하

는 포인트에서 더 크게 나타남을 확인할 수 있다. 즉 유도기가 전동기로 운전할 때보다 발전기로 운전할 때 자화전류 값이 더 높아야 함을 의미한다.

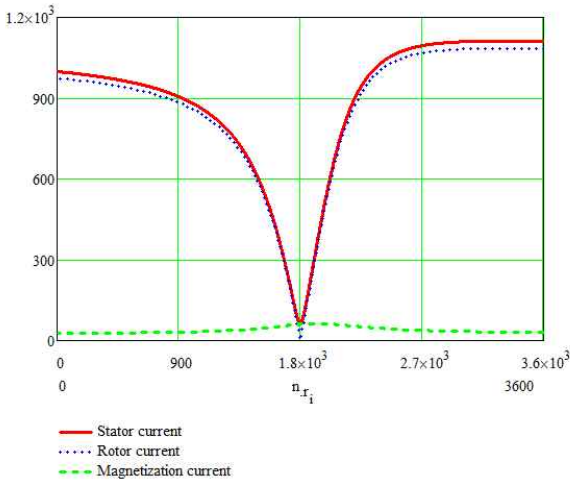


그림 4. 회전속도에 따른 고정자, 회전자 및 자화전류  
Fig. 4. Stator, rotor and magnetization current according to the rotation speed

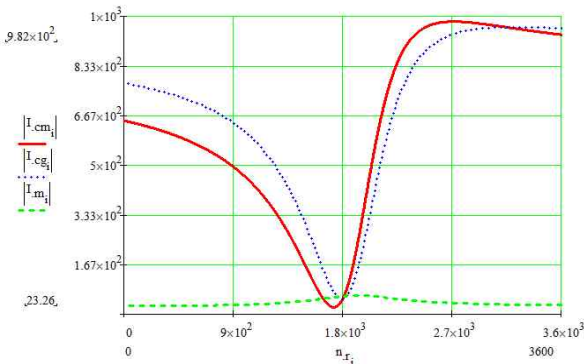


그림 5. 회전속도에 따른 커패시터 전류와 자화전류  
Fig. 5. Capacitor current and magnetization current according to the rotation speed

그림 5는 회전속도의 변화에 따라 자화전류( $I_m$ ), 전동기 역률 보상시의 커패시터 전류( $I_{cm}$ )와 발전기로 운전시의 자화에 필요한 전류( $I_{cg}$ )의 크기를 비교한 것이다. 그림 5에서 알 수 있듯이 회전자계를 형성하는데 필요한 자화전류와 무효전력을 발생하는데 필요한 커패시터의 전류는 동기속도 이외의 범위에서는 자화전류에 비해 매우 높은 값을 가지지만, 동기속도

근처에서 서로 최대와 최소가 되는 공통점을 가지고 있다.

유도기를 자화시키는데 필요한 전류에 해당되는 무효전력은 동기속도에 근접할 경우 감소하지만, 자화전류는 회전속도가 증가함에 따라 오히려 증가하는 것을 볼 수 있다.

유도전동기가 동기속도로 회전할 때 전류가 무부하 정격전류로 자화전류의 값에 해당된다. 그래서 무효전력 보상을 위해 설치하는 커패시터의 경우 이 값을 대상으로 회전속도의 변동에 따라 적절한 값을 선정하면 된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 유도기의 회전자계에 필요한 자화전류와 무효전력의 크기를 회전속도 변화에 따라 분석하였다. 유도전동기의 기동 초기에 무효전력이 유효전력보다 높으므로 역률이 낮지만, 짧은 시간에 정격속도에 도달하기 때문에 정격속도로 운전하는 조건에서 필요한 무효전력을 대상으로 역률을 높이기 위해 커패시터를 선정하고 있다. 그러나 정격속도의 범위를 벗어나 전동기나 발전기로 운전할 경우 무효전력의 크기가 약간 변화하므로 이에 따라 무효전력의 조정이 필요함을 확인하였다.

이 논문은 한국조명·전기설비학회 2014년도 추계학술대회에서 발표하고 우수추천논문으로 선정된 논문임.

#### References

- [1] Jong-Gyeum Kim et al., "Activation Strategy of Hydropower Development as New & Renewable energy", KIEE Summer Conference, pp. 1231-1232, 2010.7.
- [2] M. Godoy Simoes & Felix A. Farret, "Renewable Energy Systems-Design and Analysis with Induction Generators", CRC Press, 2004.
- [3] Young-Kuk Kim, Jong-Gyeum Kim, "A Study on the Operation Characteristic of Induction Generator in the small Hydropower Plant", KIEE, Vol.62, pp.632-638, No.5, 2013.
- [4] Jong-Gyeum Kim, Young-Jeen Park, Il-Jung Kim, Young-Kuk Kim, "Characteristics Analysis of Induction

Generator with a Change in Rotor Speed”, KIEE, Vol.60, No.12, pp.2225-2229, 2011, Dec.

- [5] Jong-Gyeum Kim, “Characteristics for Current and Power of Induction Motor by Load Variation”, KIEE, Vol.25, No.8, pp.82-87, 2011, Aug.
- [6] Jong-Gyeum Kim, “A Research on Self-excitation and Power Factor Compensation of Induction Motor”, KIEE, Vol.63P, pp.236-240, No.4, 2014.
- [7] 朴旻鎬, 誘導機器, 東明社, pp.315, 1990.
- [8] 日本 電氣學會 電氣專門用語集 No.22, 回轉機, 1990.

◇ 저자소개 ◇



**김종겸 (金宗謙)**

1961년 10월 3일생. 1996년 충남대 공대 전기공학과 졸업(박사). 1987~1988년 한국통신공사 근무. 1988~1996년 한국수자원공사(K-Water) 근무. 2013~2014년 미국 Wisconsin-Madison Univ 방문교수. 1996년~현재 국립 강릉원주대학교 전기공학과 교수. 조명전기설비학회 학술이사.

Tel : (033)760-8785

E-mail : jgkim@gwnu.ac.kr



**박영진 (朴永鎭)**

1959년 11월 19일생. 1982년 단국대학교 전기공학과 졸업. 1996년 단국대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1996년~현재 강릉원주대학교 전기공학과 교수.

Tel : (033)760-8784

E-mail : popspark@gwnu.ac.kr