

# 배전선로에 유도발전기 연결시 역률 변동에 관한 연구

## A Study on the Variation of Power Factor by Connection of the Induction Generator to the Distribution Line

김 종 겹<sup>†</sup>  
(Jong-Gyeum Kim)

**Abstract** - Recently squirrel cage induction generator has been steadily applied to many small hydro power plants. Induction generator needs a reactive power for magnetization. The reactive power of induction generator is being supplied from the supply side mostly. The use of induction generators in the power distribution grid can affect the power factor. The power factor of induction generator is fixed already during production. The power factor in the distribution system is due to the increase or decrease of the load rather than due to the induction generator. In this study, we analyzed that how the increase or decrease of D/L load impacts at the change of power factor and power flow.

**Key Words** : Active & reactive power, Induction generator, Magnetizing current, Power factor, Small hydro

### 1. 서 론

수력에너지는 청정에너지로서 에너지 변환효율이 다른 신·재생에너지에 비해 매우 높은 편이다[1-5]. 그래서 이 청정에너지를 더 많이 이용하기 위해 용량이 작은 곳이라도 수력설비를 더 설치할 수 있는 연구가 많이 진행되고 있다. 물이 가지고 있는 위치에너지를 수차에 의해 기계에너지로 변환한 다음 이를 전기에너지로 변환하는데 사용하는 발전기에는 동기발전기와 유도발전기가 주로 사용되고 있다.

유도발전기는 동기발전기에 비해 튼튼하고, 제작비용이 저렴하며 유지 보수가 쉬워 최근 많이 사용되고 있다[4-6]. 유도기는 자화를 위해 무효전력을 필요로 하는데 대부분 경우 전원에서 제공하고 있다[4,5,7-9]. 이 때문에 전원측에서 배전선로에 연결된 유도성 부하의 무효전력 외에 유도발전기에도 무효전력이 제공되어야 하므로 전원측의 역률은 낮아진다.

우리나라 배전선로의 역률은 도시 및 농어촌에서 장소별로 그리고 시간대별로 다르게 나타나고 있으며, 역률의 범위도 일정하지 않은 편이다[10]. 배전계통에서 양호한 역률을 유지하는 것은 선로손실과 전압강하를 줄여 경제적인 운영이 가능하므로 분산형 전원시스템의 배전선로 계통연계 기준에서 역률은 90% 이상이 되도록 요구하고 있다[11]. 일반적으로 유도발전기의 역률은 설계시 출력에 따라 정해지며, 90% 이하일 경우 발전기 단자에 커패시터를 설치하여 사용하고 있다.

배전선로에 연결된 부하는 수용가의 부하 사용시간과 생

활 패턴에 따라 그 사용량이 달라질 수 있다. 발전기의 정격 운전 조건하에서 배전선로에 연결된 부하가 변동할 경우 전원측의 역률이 달라져 발전기 설치자와 전력회사가 서로 역률의 변동에 대해 의문을 가지는 경우가 있다. 그래서 본 논문에서는 배전선로의 말단에 유도발전기를 설치하여 배전선로의 부하의 증감에 따라 계통에서의 전력 흐름과 역률의 변화를 분석하였다.

### 2. 계통과 유도발전기 구성

#### 2.1 계통 구성

유도발전기가 연결된 배전선로의 구성은 그림 1과 같다. 그림 1에서와 같이 수력 발전소는 대부분 변전소로부터 멀리 떨어진 곳에 있다. 변전소(S/S)는 배전선로(D/L)에 연결된 수용가에 전력을 공급하고 있고, 유도발전기는 부하 말단에 설치되어 발전된 유효전력을 배전선로에 공급하고 있다. 소수력에 설치되는 유도발전기의 1차측 전압은 저압이지만, 변압기를 통해 특고압으로 변환시켜 배전계통에 연결하여 전원에서 부하에 필요한 전력의 일부를 분담하고 있다.

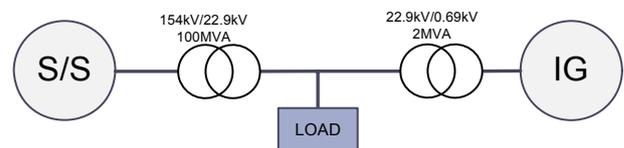


그림 1 배전선로, 부하 및 발전기 구성도

Fig. 1 Schematic diagram of D/L, Load & Generator

그림 2는 그림 1과 같은 계통도에서 부하의 말단에 설치되는 소수력 발전소의 구성도로 수차에 의해 발생된 기계적 에너지는 유도발전기에 의해 전기적 에너지를 변환되어 변압기를 통해 배전선로에 전력을 공급하고 있다.

<sup>†</sup> Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Gangneung-wonju National University, Korea

E-mail : jgkim@gwnu.ac.kr

접수일자 : 2015년 7월 29일

수정일자 : 2015년 8월 25일

최종완료 : 2015년 8월 28일

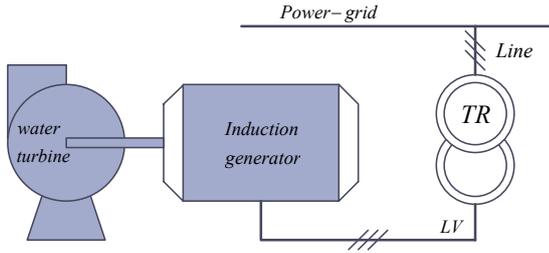


그림 2 유도발전기의 구성도  
Fig. 2 Schematic diagram of Induction generator

수차발전기의 회전자 가속도는 식 (1)과 같이 뉴턴의 제 2 법칙에 따른 회전축에서의 실제 토크에 의해 결정된다.

$$J \frac{dw_m}{dt} = T_m - T_e \quad (1)$$

여기서  $J$ 는 회전자 관성 모멘트이고,  $w_m$ 은 회전자의 각속도이며,  $T_m$ 와  $T_e$ 는 각각 수차 터빈에 작용하는 기계 토크와 발전기의 전기적 토크이다. 식 (1)의 양쪽에 각속도를 곱할 경우 식 (2)와 같이 전력의 흐름을 알 수 있다.

$$Jw_m \frac{dw_m}{dt} = P_m - P_e \quad (2)$$

식 (2)에서 오른쪽 항은 전력의 흐름이고, 왼쪽 항은 각운동량을 나타내고 있다. 발전기의 전력  $P_e$ 는 유효전력과 무효전력의 성분으로 구성된다.

그림 3은 유도발전기의 T형 등가회로도를 나타낸 것이다. 그림 3에서  $r_s$ 는 고정자 저항,  $l_s, l_r$ 은 각각 고정자와 회전자 누설인덕턴스,  $l_m$ 는 자화인덕턴스,  $r_1$ 회전자 저항이다.

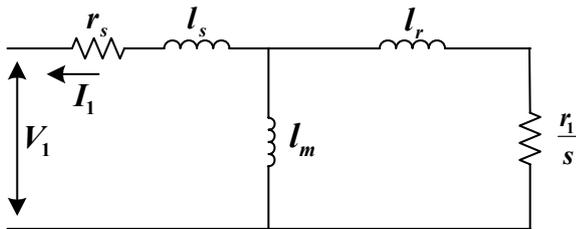


그림 3 유도발전기 T형 등가회로도  
Fig. 3 T-type Equivalent circuit diagram of Induction generator

수차의 축에 의해 발생한 기계에너지가 회전자에 의해 공극을 거쳐 고정자에 나타나는 유효전력과 회전자계를 발생시키는데 필요한 무효전력은 각각 다음과 같다[6,9].

$$P_g = Re\left(\frac{3}{2} \times V_1 \times \bar{I}_1\right) \quad (3)$$

$$Q_g = Im\left(\frac{3}{2} \times V_1 \times \bar{I}_1\right) \quad (4)$$

유도발전기의 회전자계를 발생시키는 필요한 무효전력은

발전기 정격출력과 역률로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$Q_g = P_g \times \tan \theta \quad (5)$$

### 2.2 전력 흐름도

본 연구에 적용된 3상 농형 유도발전기의 사양은 표 1과 같다.

표 1 유도발전기 사양  
Table 1 Induction generator specification

Quantity	Value
Voltage	0.69kV
Rated output	1,500kW
Pole	10
Power factor	0.83
Efficiency	92%

표 1에서 정격출력은 실제 발전기가 정격운전 조건에서 운전할 경우 유효전력을 의미하고, 역률은 설계시의 값으로 이들 두 값으로부터 자화에 필요한 무효전력을 구할 수 있다.

변전소에서 수용가에 전력을 공급하는 계통도는 그림 4와 같다. 그림 4에서 유도발전기는 대개 계통의 말단에 부착한다. 부하에 필요한 전력은 변전소에서 주로 공급되지만, 발전기를 운전한 경우 전원이 부하의 유효전력을 일부 부담할 수 있다. 유도발전기의 회전자계 발생에 필요한 자화전류에 해당되는 무효전력은 전원으로부터 공급받아야 하므로 계통에서의 역률은 떨어지게 된다.

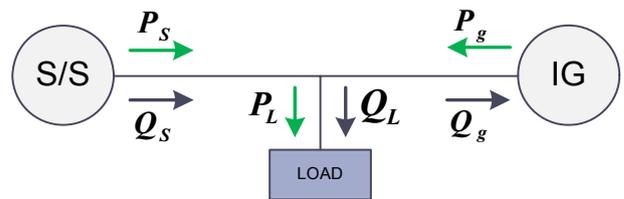


그림 4 전력 흐름도  
Fig. 4 Power flow diagram

그림 4에서  $P$ 와  $Q$ 는 각각 유효전력과 무효전력을 의미하고, 첨자  $s, L$  및  $g$ 는 각각 전원, 부하 그리고 발전기를 의미한다. 그림 4에서 화살표 방향은 전력의 흐름방향을 나타내고 있다. 변전소에서의 무효전력은 모두 부하와 발전기에 공급되고, 변전소에서의 유효전력과 발전기에서의 유효전력은 서로 반대방향으로 부하에 공급하고 있다.

### 3. 계산 및 결과 분석

변전소에서 부하에 전력을 공급할 경우 부하의 종류와 사용량에 따라 전원측의 역률은 달라질 수 있다. 그러나 유도

발전기의 역률은 설계 제작시 출력에 따라 미리 정해지며, 계통에 연결해도 배전선로에 연결된 부하의 증감에 따라 발전기 출력측에서의 역률은 거의 변하지 않는다. 기존 계통에 새로운 전력을 생산하여 연계할 경우 낮은 역률의 발생은 상호간에 문제가 될 수 있으므로 이에 대한 정확한 분석이 필요하다.

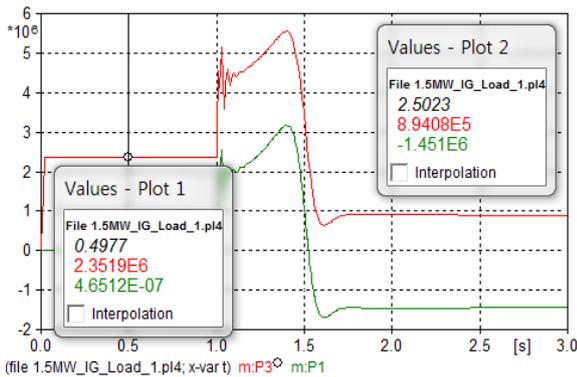
변전소에서 배전선로에 연결된 부하에 전력을 공급하고 있는 상황에서 부하 용량의 변화에 따라 유도발전기에서 발생한 전력을 전원에 공급할 때 발전소와 변전소의 역률 변화를 분석하였다. 표 1에서 제시한 유도발전기의 유효전력

및 역률로부터 무효전력을 먼저 구한다. 본 연구의 결과분석에는 전자계과도해석 프로그램(EMTP)을 적용하였다[12].

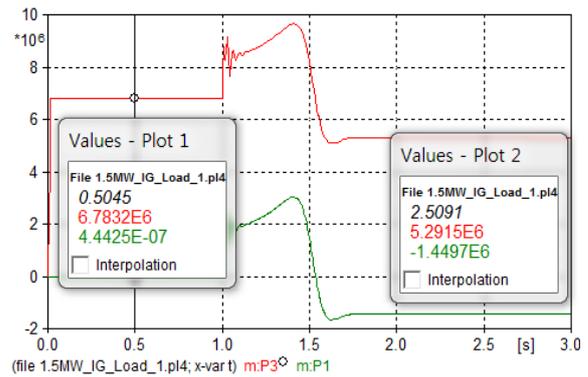
본 연구에서 배전선로의 부하 역률은 0.8로 일정하게 하고, 부하용량을 3,000kVA, 9,000kVA 그리고 20,000kVA로 변화하는 조건에서 유도발전기는 정격용량으로 발전하여 계통에 전력을 공급하는 상황에서 전원측 및 발전기의 전력과 역률 변화를 분석하였다.

그림 5, 6 및 7은 부하 변동에 따라 배전선로에 발전기 연결 전후 전력 및 역률의 변화를 분석한 결과이다.

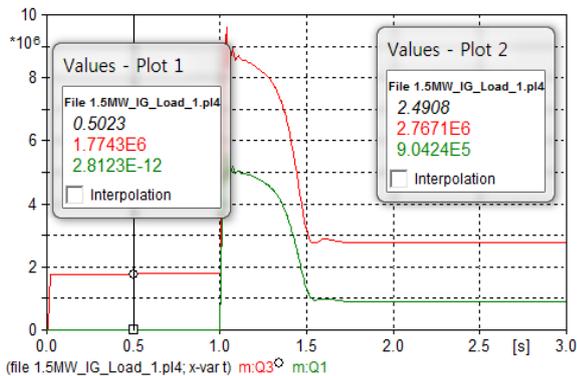
우선 첫 번째로 수용가의 부하 용량이 3,000kVA에 역률



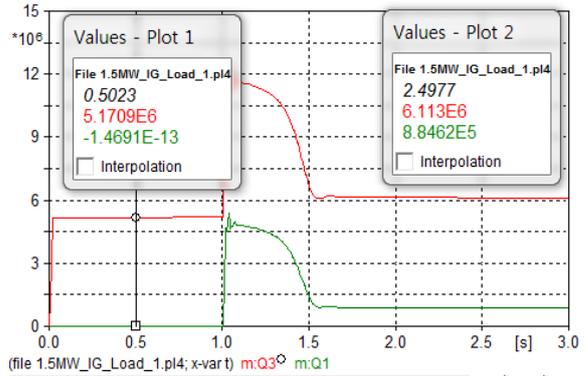
(a) 유효전력



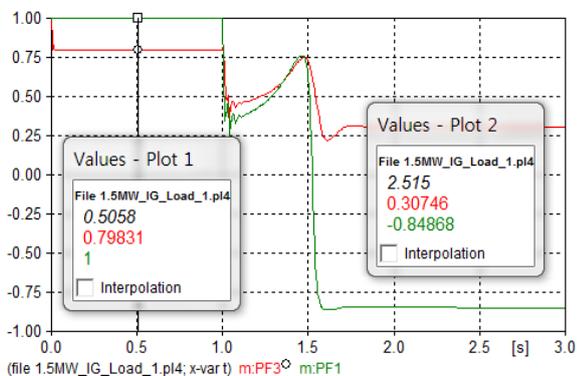
(a) 유효전력



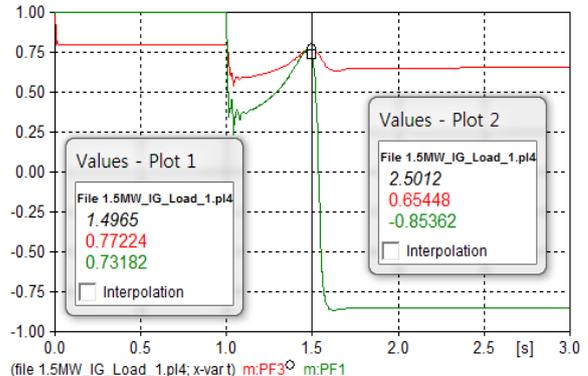
(b) 무효전력



(b) 무효전력



(c) 역률



(c) 역률

그림 5 3,000kVA 부하 운전시 전력 및 역률  
Fig. 5 Power and power factor during 3,000kVA load operation

그림 6 9,000kVA 부하 운전시 전력 및 역률  
Fig. 6 Power and power factor during 9,000kVA load operation

은 0.8로 운전되고 있는 경우 유도 발전기의 투입 전후 전원 및 발전기 측에서의 전력과 역률은 그림 5와 같다. 그림 5에서 Plot 1은 발전기 투입 전(0.5초 지점)의 계산결과이고, Plot 2는 발전기 투입 후(2.5초 지점)의 계산 결과이다. 해석 포인트는 각각 변전소 출력단(유효전력 P3, 무효전력 Q3, 역률 PF3)과 발전기 출력단(유효전력 P1, 무효전력 Q1, 역률 PF1)이다.

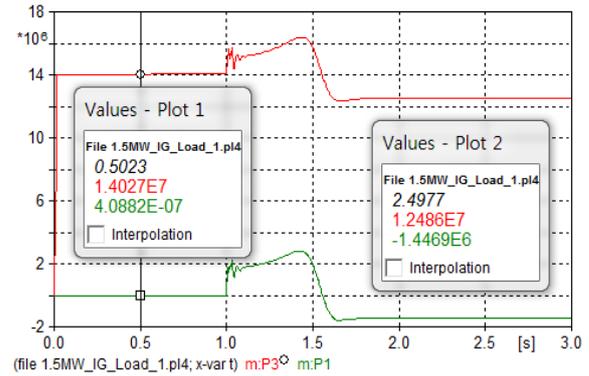
그림 5(a)에서 발전기가 투입되기 전에 전원에서 부하로 2,352kW의 유효전력이 부하 측으로 공급되지만, 발전기가 운전한 다음에는 발전기가 전원에서 -1,451kW의 전력을 역으로 공급되기 때문에 894kW의 전력만 전원에서 부하로 공급되고 있다. 그림 5(b)에서는 발전기 운전 전에 전원 측에서 1,774kVAr의 무효전력이 부하에 공급하지만, 발전이 이루어진 다음에는 2,767kVAr로 무효전력이 증가(+993kVA)한 것을 알 수 있다. 이는 발전기 여자에 필요한 무효전력을 전원에서 공급해야하기 때문이다. 그림 5(c)는 발전기 투입 전후 역률을 비교한 것으로서 부하의 역률이 당초 0.8에서 발전기 투입 이후에는 0.3으로 떨어진 것을 알 수 있다. 이는 작은 용량의 배전선로 부하에 필요한 무효전력과 발전기의 여자에 필요한 무효전력을 전원측에서 모두 공급해야하기 때문이다.

두 번째로 수용가의 부하용량이 9,000kVA에 역률을 0.8로 운전하고 있는 조건하에서 유도발전기의 투입 전후 전력 및 역률 변화는 다음과 같다.

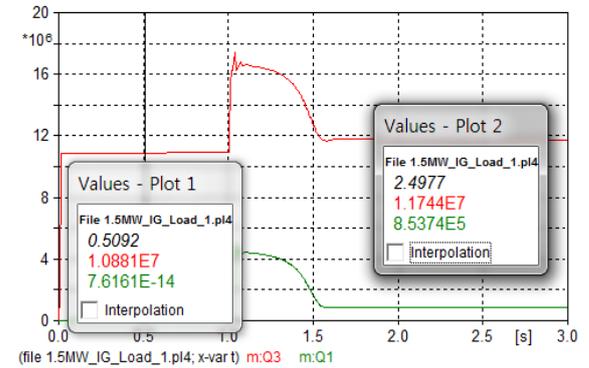
그림 6(a)에서 발전기가 투입되기 전에 전원에서 부하로 6,783kW의 유효전력이 부하로 공급되지만, 발전기가 운전한 다음에는 발전기가 전원으로 -1,450kW의 전력을 공급하기 때문에 5,291kW의 전력만 전원에서 부하로 공급되고 있다. 그림 6(b)에서는 발전기 운전 전에 전원에서 5,171kVAr의 무효전력이 부하로 공급하지만, 발전이 이루어진 다음에는 6,113kVAr로 무효전력이 약간 증가(+942kVA)한 것을 알 수 있다. 이는 발전기 여자에 필요한 무효전력을 전원에서 공급해야하기 때문이다. 그림 6(c)는 발전기 투입 전후 역률을 비교한 것으로서 부하의 역률 0.8에서 발전기 투입 이후에는 0.65로 그림 5에 비해 부하가 약간 증가한 경우 역률이 조금 올라간 것을 알 수 있다. 발전기 여자에 필요한 무효전력의 공급은 항상 일정하므로 부하의 증가에 따른 결과이다.

세 번째로 배전선로에 연결된 부하용량이 20,000kVA에 역률을 0.8로 조정된 경우 전력 및 역률 변화는 다음과 같다.

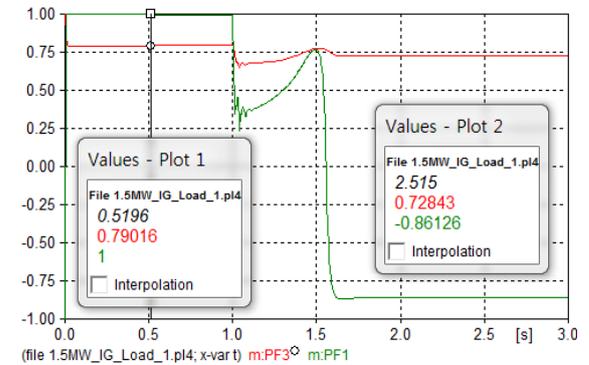
그림 7(a)에서 발전기가 투입되기 전에 전원에서 부하로 14,027kW의 유효전력이 부하로 공급되지만, 발전기가 운전한 다음에는 발전기가 전원으로 -1,447kW의 전력을 공급하기 때문에 12,486kW의 전력만 전원에서 부하로 공급되고 있다. 그림 7(b)에서는 발전기 운전 전에 전원에서 10,881kVAr의 무효전력이 부하로 공급하지만, 발전이 된 다음에는 11,744kVAr로 무효전력이 약간 증가(+863kVA)한 것을 알 수 있다. 이는 발전기 여자에 필요한 무효전력을 전원에서 공급해야하기 때문이다. 그림 7(c)는 발전기 투입 전후 역률을 비교한 것으로서 부하의 역률 0.8에서 발전기 투입 이후에는 0.728로 그림 5 및 6에 비해 부하가 증가한 경우 약간 상승한 것을 알 수 있다. 이는 발전기 여자에 필요한 무효전력은 항상 일정하지만, 부하의 용량 증가에 따라 역률이 상승하기 때문이다.



(a) 유효전력



(b) 무효전력



(c) 역률

그림 7 20,000kVA 부하 운전시 전력 및 역률

Fig. 7 Power and power factor during 20,000kVA load operation

표 2는 배전선로의 부하 변화에 따라 발전기 자체와 발전기 투입전후의 전력 및 역률의 변화를 정리한 것이다. 각 부하의 용량에 대해 유도발전기를 사용하기 전과 사용한 이후의 차이는 바로 발전기에서 배전선로에 공급한 전력차이에 해당된다. 부하에 공급되는 무효전력은 발전기를 연계하기 전에 비해 연계한 이후 증가한 것은 발전기 자화에 필요한 전력을 계통에서 공급받아야 하기 때문이다. 따라서 발전기를 계통에 연계한 경우 발전기의 역률은 변화가 없지만, 계통측에서는 무효전력이 증가하여 역률이 낮아지는 원인이 된다.

**표 2** 부하증감에 따라 전력 및 역률의 변화**Table 2** Change of power and the power factor according to the increase or decrease of load

Load	S/S side		IG side
	Before IG	After IG	
3,000 kVA	$P_3 = 2,352\text{kW}$ $Q_3 = 1,774\text{kVAr}$ $pf_3 = 0.798$	$P_3 = 894\text{kW}$ $Q_3 = 2,767\text{kVAr}$ $pf_3 = 0.31$	$P_1 = -1,451\text{kW}$ $Q_1 = 904\text{kVAr}$ $pf_1 = -0.848$
9,000 kVA	$P_3 = 6,783\text{kW}$ $Q_3 = 5,171\text{kVAr}$ $pf_3 = 0.77$	$P_3 = 5,291\text{kW}$ $Q_3 = 6,113\text{kVAr}$ $pf_3 = 0.654$	$P_1 = -1,449\text{kW}$ $Q_1 = 884\text{kVAr}$ $pf_1 = -0.853$
20,000 kVA	$P_3 = 14,027\text{kW}$ $Q_3 = 10,881\text{kVAr}$ $pf_3 = 0.79$	$P_3 = 12,486\text{kW}$ $Q_3 = 11,744\text{kVAr}$ $pf_3 = 0.728$	$P_1 = -1,447\text{kW}$ $Q_1 = 853\text{kVAr}$ $pf_1 = -0.861$

**4. 결 론**

유도발전기의 역률은 설계할 때 특별하게 주문자가 요구하는 경우도 있지만, 대개 80% 이상이 되도록 정한다. 이 유도발전기를 계통에 연결하여 사용할 때 부하의 용량에 따라 종합역률이 달라지는 경우가 발생한다.

본 연구에서는 배전선로 말단에 유도발전기를 설치 운영할 때 배전선로의 부하 용량에 따라 종합역률이 어떻게 달라지는지에 대해 분석하였다. 유도발전기가 정격 운전하는 조건에서 배전선로에 연결된 부하의 용량이 낮은 경우 변전소에서의 역률은 떨어지지만 배전선로에 연결된 부하의 용량이 높은 경우 계통의 역률은 증가함을 확인하였다.

본 연구결과는 수력발전소에서 유도발전기의 적용시 부하의 변동에 따른 역률 변동에 대한 상호 이해에 도움이 될 것으로 판단된다.

**References**

- [1] New & Renewable Energy Report, MOKE & KEMCO, 2012
- [2] Research Report of KRC(Korea Rural Community Corporation), "A Study for Characteristics Analysis and High Efficiency Operation of Small Hydro Power Plants", 2012. 12
- [3] Jack J. Fritz, "Small and Mini Hydropower Systems", McGraw-Hill Book Company, USA, 1984.
- [4] N. Smith, "Motors as generators for micro-hydro power, Russell press, UK, 1999
- [5] M. Godoy Simoes & Felix A. Farret, "Renewable Energy Systems-Design & Analysis with Induction Generators", CRC Press, 2004
- [6] Jong-Gyeum Kim, "Output Characterization Analysis of Induction Generator Using Test Data", KIEE, Vol.62, No.7, pp.1027-1032, July.2013
- [7] Theodore Wildi, "Electrical Machines, Drives and Power Systems", Prentice Hall, 2002
- [8] IEEE Std 112-2004, "IEEE Standard Test Procedure

for Polyphase Induction Motors and Generators"

- [9] Jong-Gyeum Kim, Youn-Jeen Park, "A Characteristic Study on the Power Factor Correction Application for the Induction Motor", KIEE, Vol.22, No.9, pp.25-31, Sep.2008
- [10] Jeong-Tae Jang, Young-Soo Jeon, "The Optimal Condenser Position & Capacity for Power Factor Compensation in Distribution System", KIEE, Vol.48A, No.10, pp.1190-1197, Oct.1999
- [11] KEPCO, "Power Distribution System Interconnection Technical Standards for Distributed Power". 2010. 7
- [12] H.W. Dommel, "Electromagnetic Transients Program. Reference Manual (EMTP Theory Book)", BPA 1986.

**저 자 소 개****김 종 겸 (金宗謙)**

1996년 충남대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1996년~현재 강릉원주대학교 전기공학과 교수.

2013년~2014년 위스콘신 매디슨 대학교 방문교수, 현재 당학회 평의원 및 B부문화 총무이사

E-mail : jgkim@gwnu.ac.kr