

농형 유도발전기의 계통 연계시 전압 변동 및 전력 흐름 분석

(Analysis for Voltage Fluctuation and Power Flow at the Grid-Connected Time of Squirrel-Cage Induction Generator)

김중겸*

(Jong-Gyeum Kim)

Abstract

Synchronous generators and induction generators are mainly used in hydroelectric power generation. Synchronous generator is mainly applied to large hydroelectric plants but induction generator is applied to the small hydro power plants.

Stability of induction generator is slightly less than the synchronous generator. However, induction generator has many advantages rather than a synchronous generator in terms of price and maintenance. So Induction generator is used primarily in small hydroelectric power station less than 1,000kW recently.

Squirrel cage induction generator generates a high inrush current at the grid-connection. This high inrush current causes a voltage drop on the grid. In order to reduce the voltage drop and to analyze the power flow, the analysis for operating characteristics of the induction generator should be reviewed in advance.

In this study, we analyzed the voltage drop and power flow analysis when a 1500kW induction generator is connected to the grid. The voltage drop is slightly higher than the acceptable range of distributed power supply voltage and the power flow of the generator is performed well.

Key Words : Active Power, Distribution Line, Grid, Induction Generator, Power Flow

1. 서 론

수력설비에서 발전용량이 10,000kW에서 100,000kW까지는 중수력, 100,000kW를 초과할 경우 대수력 그리고 1,000kW에서 10,000kW까지는 소수력 설비로 분류하고 있다[1-2].

소수력은 주로 민가와 떨어진 곳에 설치하고 변전소와도 거리가 있어 소용량의 경우를 제외하고는 계통 연계시 전원 안정성을 고려하여 동기발전기를 많이

* 주저자 : 강릉원주대학교 전기공학과 교수
* Main author : Dept of Electrical Engineering,
Gangneung-wonju National Univ, Korea
Tel : 033-760-8785, Fax : 033-760-8780
E-mail : jgkim@gwnu.ac.kr
접수일자 : 2014년 2월 26일
1차심사 : 2014년 2월 28일
심사완료 : 2014년 4월 21일

적용하였지만[3], 유도 발전기는 기계적 및 전기적으로 동기 발전기보다 형태가 간결하고, 유지보수가 용이하여 최근 천 kW이하의 국내 일부 소수력 발전소에 적용하고 있다[3-7].

농형 유도발전기가 배전 계통에 연계될 때 돌입전류에 의한 전압강하는 시스템의 안정성에 가장 큰 문제가 될 수 있다[8-9]. 그래서 계통연계시 안정성을 높이기 위해서는 발전설비 용량과 계통과의 연계시 발생하는 전압변동 등에 대한 문제해결이 필요하다.

그래서 본 연구에서는 4대강에 설치된 41기 발전기 중에서 12기에 해당되는 1,500kW 동기발전기의 한 지점에 농형 유도발전기를 적용할 경우 발전기측과 배전계통에서의 전기적인 문제점에 대해 분석하여 대안을 제시함으로써 향후 천 kW급 이상의 소수력 발전소에 농형 유도발전기의 적용을 확대하는데 기여하고자 한다.

2. 소수력 발전 설비 구성 및 특성값

그림 1은 소수력에 적용되고 있는 수차발전기에 대한 구성도이다. 수차 터빈의 유량과 낙차에 의해 얻어진 기계적 에너지는 유도발전기를 통해 전기적 에너지로 변환할 수 있다. 발전기의 1차측은 저압이지만, 변압기를 통해 특고압으로 변환시켜 배전계통에 연결하여 부하와 전원측으로 전력을 공급할 수 있다.

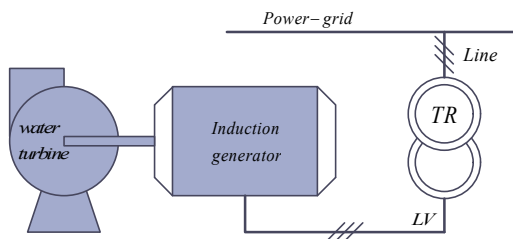


그림 1. 유도발전기의 구성도
Fig. 1. Schematic diagram of Induction generator

2.1 발전기, 배전선로, 부하의 특성값

그림 2는 변전소, 배전선로, 부하, 변압기 그리고 유도발전기로 구성된 소수력 발전 계통도이다.

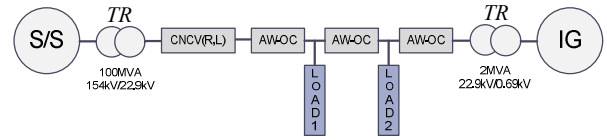


그림 2. 배전선로, 부하 및 발전기 구성도
Fig. 2. System diagram of D/L, Load and Generator

그림 2에서 수용가에 필요한 전력은 변전소(S/S)와 발전기로부터 공급할 수 있으며, 유도발전기는 주로 부하 말단에 설치되어 있다. 배전선로(D/L)의 경우가 공선로이지만, 변전소는 대부분 도심지 근처에 있기 때문에 케이블로 설치된 경우가 많다.

그림 2에서 변전소에서 발전기까지의 거리는 7km이고, 배전선로는 22.9kV이며, 변전소에서 공급하는 부하는 3km와 5km 지점에 각각 1,000kW로 역률은 0.8이며, 배전선로 말단에 1,500kW의 농형 유도발전기를 연결하였다. 그림 2의 우측 발전기에 연결된 변압기는 690V/22.9kV로 변환한 것이고, 좌측 변압기는 변전소에서 22.9kV로 변환시켜 배전선로의 부하에 전력을 공급하고 있다.

2.1.1 배전선로 구성(변전소~발전소 인입)

기준 용량 100MVA에 의한 %임피던스를 기준으로 변전소 변압기 정상분 및 영상분 %임피던스는 각각 다음과 같다.

- $\%Z_1 = 0.225 + j33.334(\%)$
- $\%Z_0 = 0 + j48.324(\%)$

그리고 변전소에서 발전소까지 케이블과 가공전선에 대한 정상분 및 영상분 %임피던스는 표 1과 같다.

표 1. 케이블 및 가공전선 %임피던스
Table 1. %Impedance of cable & overhead wire

구분		단위 %Z		비고
		%R	%X	
CNCV 325mm ²	정상	1.4325	2.3742	
	영상	4.4678	1.5617	
AW-OC 160mm ²	정상	3.47	7.46	
	영상	11.99	29.26	

2.1.2 부하 및 선로

그림 2에 사용된 케이블, 전선 그리고 부하에 대한 내용은 표 2와 같다.

표 2. 케이블/가공전선 및 부하
Table 2. Cable/overhead wire and Load

케이블 /전선	CNCV 325mm ²	AW-OC 160mm ²	AW-OC 160mm ²	AW-OC 160mm ²
From S/S	1km	2km	2km	2km
부하	-	1,000kW pf=0.8	1,000kW pf=0.8	-

2.1.3 유도발전기

본 연구에 적용된 농형 유도발전기의 사양은 표 3과 같고, 발전기의 파라미터는 표 4와 같다.

표 3. 유도발전기 사양
Table 3. Specification of Induction generator

Quantity	value
Voltage	0.69kV
rated output	1,500kW
pole	10
power factor	0.83
efficiency	92%

표 4. 유도발전기 파라미터
Table 4. Induction generator parameter

parameters	Values
stator resistance, R_1	0.00477Ω
rotor resistance, R_2	0.00542Ω
stator leakage inductance, L_s	0.055979mH
rotor leakage inductance, L_r	0.055979mH
mutual inductance, L_m	1.695mH
inertia moment, J	594kg · m ²
damping coefficient, D	1/0.0017Ω

2.2 유도발전기의 전력 및 토크 특성

계통 연계시의 동작 특성을 분석하기 위해서는 수차와 발전기에 해당되는 전기계 파라미터 산출이 중요하다.

그림 1과 같은 수차 발전기의 동작은 식 (1)과 같은 운동방정식으로 표현할 수 있고, 이를 다시 전기적인 변수로 나타낼 경우 식 (2)와 같다[9-10].

$$J \frac{dw_r}{dt} + Dw_r = T_m - T_e \tag{1}$$

$$C \frac{dV_m}{dt} + \frac{V_m}{R} = I_m - I_e \tag{2}$$

여기서 관성 모멘트 J 는 커패시턴스 C 로, D 는 마찰계수로 콘덕턴스 $1/R$ 에 해당되며, 기계적 토크 T_m 과 T_e 는 각각 기계적 및 전기적 토크로서 전류에 해당된다.

유량과 낙차에 의해 결정되는 수차의 토크(T_m)와 전기에너지(P) 관계는 식 (3)과 같이 구할 수 있다.

$$T_m = \frac{P}{w_r} = \frac{9,549.3 \times P[\text{kW}]}{n} \tag{3}$$

여기서 w_r 은 각속도이고, n 은 수차의 효율이다.

수차에 의해 발생된 기계에너지가 전기에너지로 전달될 경우 식 (1)에서 전기적 토크(T_e)는 전류와 자속의 관계로부터 식 (4)와 같이 구할 수 있다.

$$T_e = \frac{3}{2} p (\psi_d i_q - \psi_q i_d) \tag{4}$$

여기서 p 는 극수이고, ψ, i 는 각각 d, q 축의 자속과 전류이다.

식 (4)에서의 d, q 의 2상으로 부터 3상 역변환을 통해 전력 및 전류를 구할 수 있다.

3. 유도발전기 동작 및 계통 분석

본 연구에서는 그림 2와 같이 1,500kW의 농형 유도발전기를 22.9kV 배전선로 말단에 시설하는 것으로 설정하였다. 변전소에서 수용가에 전력을 공급하고 있는 상황에서 발전기를 기동하여 일정 시간이 지난 다음 계통에 연계하였을 때 전압변동과 전력 및 토크 특성을 분석하였다.

유도발전기는 기동시 발전기의 회전속도를 동기속도 가까운 속도에서 강제로 계통과 접속할 경우 과도 현상이 나타나므로 발전기 연계 전후의 발전기측과 배전선로 계통측에 대한 특성 분석이 필요하다.

본 연구에서의 동작특성은 전자계 과도해석 프로그램(EMTP)을 이용하였다[10].

3.1 유도발전기의 동작 특성

그림 3은 발전기 연계시의 전기적 토크 및 기동전류를 나타낸 것이다. 그림 3의 좌측은 토크(TQ : ○)를 의미하고, 우측은 전류(IS : □)를 나타내고 있다. 발전기를 운전하여 1초 지난다음 계통에 연계시 일시적으로 토크가 전동기 운전영역에서 동작하지만 약 0.6초가 지난 1.6초 시점에서 바로 발전기 운전 영역으로 전환되었다. 발전기가 정상운전하고 있는 2.0초에서의 토크는 19,297Nm이고, 전류는 1,469.1A이다. 계통 연계시의 돌입전류는 6,949A로서 정상 운전전류의 거의 4.73배로 일반 농형 유도전동기의 기동시 발생하는 5~8배 기동전류보다는 약간 낮은 편이다. 그러나 이와 같은 전류값에도 계통연계시 전압강하로 이어질 수 있다.

그림 4는 그림 2와 같은 회로에서 발전기 연계 전후 발전기측(VGRMS : ○)과 변압기측(VSRMS : □)의 단자 상전압을 비교한 것이다. 유도발전기는 기동한 후 1.0초 지난 다음 계통에 연계했다.

그림 4에서와 같이 계통 연계시의 발전기 단자에서의 상전압이 일시적으로 약 100V 정도 낮게 나타나는 것은 기동시 높은 돌입전류에 의한 것으로 판단된다.

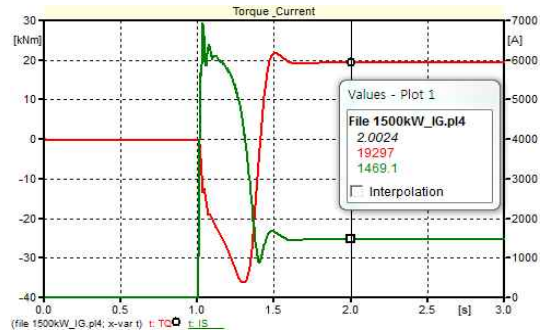


그림 3. 토크 및 전류
Fig. 3. Torque and current

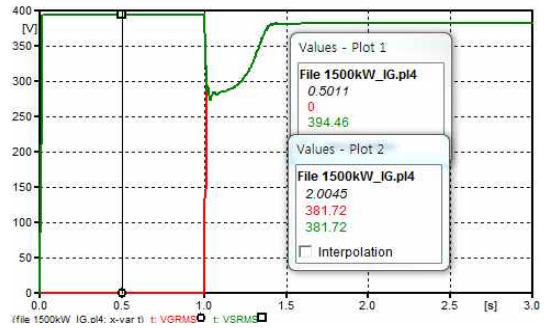


그림 4. 발전기 전압 변동
Fig. 4. Voltage variation of generator

그림 4에서 발전기를 계통에 연계전인 0.5초 지점에서의 상전압은 배전선로로부터 발생하는 전압강하로 인해 4V 낮은 394.46V가 나타났으며, 1초 시점에서 발전기를 계통에 연결할 경우 일시적으로 전압강하가 발생한 후 약 0.4초가 지난 1.4초 시점 이후에서 전압이 회복되지만, 연계 전의 전압보다는 약 13V가 낮은 381.72V가 나타나고 있다. 이와 같은 현상에 대해 동기발전기의 경우는 발전 후 계통에 연계할 경우 짧은 전압강하 이후 바로 초기전압으로 복귀되지만, 유도발전기의 경우에는 무효전력의 지원 부족으로 초기 전압으로 복귀되지 않기 때문이다.

그림 5는 식 (3)과 같이 수차에 의한 기계에너지가 전기에너지로 변환된 유도발전기의 출력을 나타낸 것이다. 발전기를 기동하여 계통에 연계한 초기(1.0초 지점)에서 약 0.5초 동안은 전동기로 동작하지만, 1.5초 이후에는 발전기로 역전되어 1,479kW의 유효전력을 계통측으로 공급하게 된다.

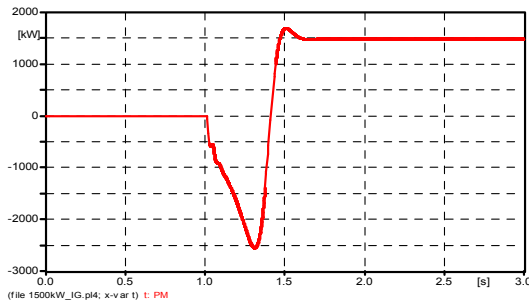


그림 5. 발전기 출력
Fig. 5. Generator output

3.2 계통 연계 전후의 전압, 전력 특성

그림 2와 같이 구성된 계통도에서 변전소로부터 부하에 전력을 공급하고 있는 상태에서 농형 유도발전기를 기동시켜 계통에 연결할 때 배전선로 계통에서의 전압변동 및 전력의 흐름 변화를 분석했다.

그림 6은 발전기 계통 연계 전후 그림 2의 각 지점에서 표 2의 조건에서 계산한 상전압이다.

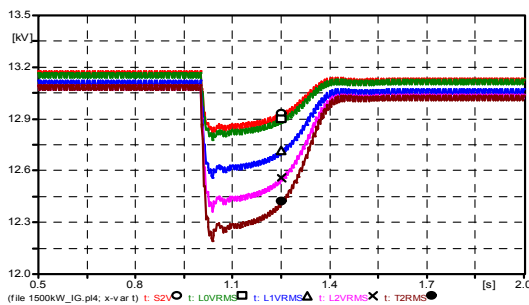


그림 6. 발전기 연계 전후 전압 변화
Fig. 6. Voltage variation before/after connection

그림 6의 전압 계산점은 그림 2의 변전소 변압기 2차측(S2V : ○)/케이블과 가공선로 연결지점(L0VRMS : □)/부하 1(L1VRMS : △)/부하 2(L2VRMS : ×)/발전기측 변압기 특고압측 단자(T2RMS : ●)이다.

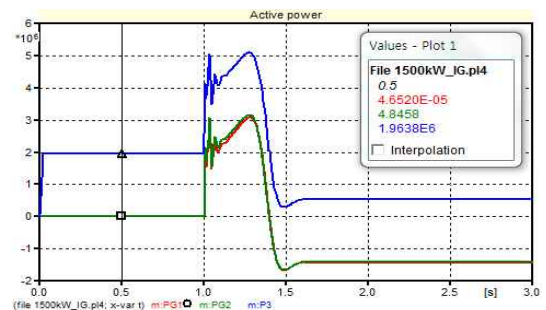
유도발전기 기동 후 계통 연계전 각 지점에서의 상전압은 13,151/13,143/13,095/13,072/13,072V를 나타내지만, 계통 연계후 정상적인 동작에서 측정된 각 지점별 전압은 13,111/13,102/13,048/13,018/13,011V로 변전소에서 발전소까지 전압강하는 100V(0.76%)이고,

발전소 전단에서 발전기 가동 전에 비해 61V(0.47%) 감소하였으나 배전선로 선간전압 20,800~23,800V의 유지범위는 충분하게 만족한다[11].

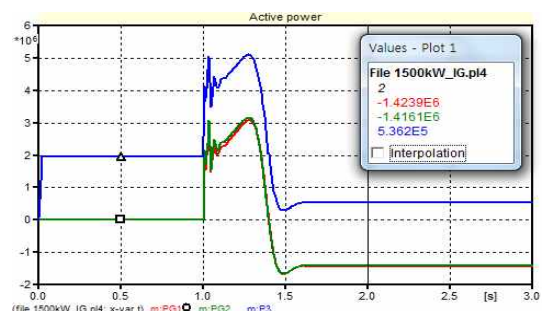
발전기 기동시 계통측 단자전압이 12,271V까지 감소하여 발전기 가동전에 비해 6.1%의 전압강하가 발생하므로 분산형 전원 연계 기준의 순시전압 변동 적용범위(3~5%)를 약간 벗어난다[11]. 실제 배전선로에 공급하는 전력이 높아질수록 같은 용량의 유도발전기를 사용할 경우 계통연계에 의해 발생하는 전압강하는 이보다 약간 더 커질 수 있다.

다음은 유도발전기의 계통 연계전과 연계후의 전력의 흐름 및 역률의 변화를 분석하였다.

첫 번째로 유효전력의 변동은 그림 7과 같다. 그림 8에서 PG1, PG2, P3는 각각 발전기측, 부하말단, 변전소 2차측에서의 유효전력이다.



(a) 연계전(0.5초)



(b) 연계후(2.0초)

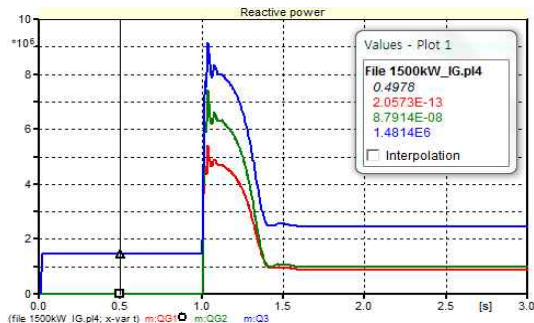
그림 7. 연계 전후 유효전력
Fig. 7. Active power before/after connection

그림 7 (a)와 같이 발전기가 계통에 연결되지 않을 때(0.5초 시점) 부하에 공급하는 유효전력은 전원측

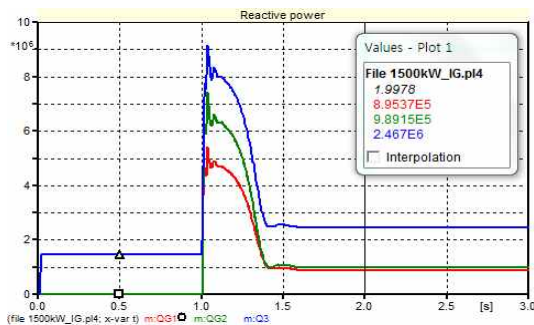
(P3)에서만 1,963.8kW로 나타나지만, 그림 7 (b)와 같이 발전기를 계통에 연계하여 운전할 때(2.0초 시점) 발전기(PG1)로부터 1,423.9kW의 전력이 역으로 공급되므로 전원측에서는 부하에 필요한 전력을 공급하고 부족한 부분인 563.2kW의 전력이 전원측(P3)에서 부하측으로 이동하는 것을 알 수 있다.

그림 8은 발전기 사용전후의 무효전력에 대한 내용이다. 그림 8에서 QG1, QG2, Q3는 각각 발전기측, 부하말단, 변전소 2차측에서의 무효전력이다.

그림 8 (a)에서와 같이 발전기를 연계하기 전(0.5초 시점에 전원측(Q3)에서 약 1,481.4kVAr이 공급되지만, 그림 8 (b)와 같이 발전기를 계통에 연계한 경우(2.0초 시점)에는 발전기 자체에 필요한 무효전력의 공급 때문에 전원측(Q3)에서는 2,467kVAr가 공급되어야 함을 알 수 있다. 즉 유도발전기의 운전시 전원측에서 공급되는 무효전력이 증가하므로 계통측의 역률은 낮아지는 것을 알 수 있다.



(a) 연계전(0.5초)

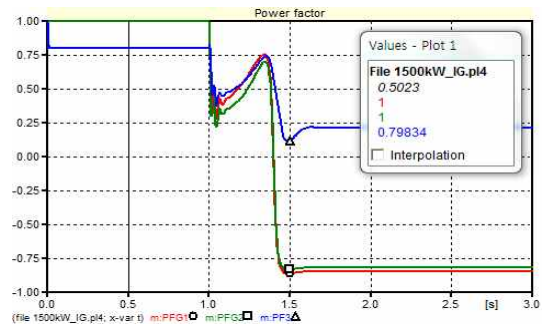


(b) 연계후(2.0초)

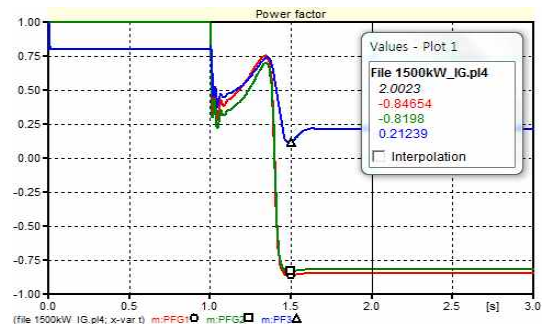
그림 8. 연계 전후 무효전력
Fig. 8. Reactive power before/after connection

그림 9는 발전기 연계 전후 역률 변화를 나타낸 것이다. 그림 9에서 PFG1(○), PFG2(□), PFG3(△)는 각각 발전기측, 부하말단, 변전소 2차측에서의 역률이다.

그림 9 (a)와 같이 발전기를 사용하지 않고 부하에 전력을 공급할 때(0.5초 시점)는 당초 설정한 부하의 역률(PFG3)이 약 0.8 가까이 나타나지만, 그림 9 (b)와 같이 발전기를 계통에 연계한 경우(2.0초 시점) 발전기 자체에 대한 역률(PFG1)은 설정한 값이 나오지만, 계통에서 볼 때 발전기에 필요한 무효전력을 계통으로부터 공급해야 하므로 전원측에서의 역률(PFG3)은 0.2 정도로 매우 낮게 나타났다.



(a) 연계전(0.5초)



(b) 연계후(2.0초)

그림 9. 연계 전후 역률
Fig. 9. Power factor before/after connection

본 해석에서는 발전을 통해 생산된 전력값이 당초 제시한 전력을 만족할 만큼 생산되고 있음을 확인할 수 있다. 또한 유도발전기 기동시에 발생하는 전압강하를 발전기 측과 계통측을 비교하여 강하정도를 계산한 결과 계통연계 기준보다는 약간 높게 나타남을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 논문에서는 소수력에 1,500kW의 농형유도발전기를 적용할 경우 발전기와 배전선로 계통에서의 전압강하 및 전력 흐름을 해석했다. 해석 결과 당초 유도발전기 제원에서 제시된 값은 발전을 통해 만들어진 전력과 거의 일치했고, 기동시 발생하는 전압강하에 대해서는 분산전원 계통에서 제시된 허용범위와 비교했다.

비교결과 연구에서 제시된 계통도에서 농형유도발전기의 직입 기동시 발생한 돌입전류는 4.73배로서 유도전동기의 기동전류보다 약간 낮은 편이고, 이 돌입전류에 의해 발생된 전압강하는 6.1%로서 순시전압 적용범위를 1.1% 정도 벗어났다.

그렇지만 돌입전류를 줄일 수 있는 리액터 기동이나 소프트 기동방법에 대한 연구를 진행할 경우 가격 및 유지보수 측면에서 유리한 농형 유도발전기 보급은 점차 높아질 수 있으므로 향후 소수력 개발 및 운영에 많은 도움이 될 것으로 판단된다.

References

[1] 2012 New & Renewable Energy, MOKE & KEMCO.
 [2] Jack J. Fritz, "Small and Mini Hydropower Systems", McGraw-Hill Book Company, USA, 1984.
 [3] D. S. Henderson, "Synchronous or induction Generators? -The choice for small scale generation", IEE Conf, Pub, pp.146-149, 1996.
 [4] K-water, "Detailed design report for Daechong Small Hydro Power Plant", 2005.

[5] Jong-Gyeum Kim, "Output characterization analysis of Induction generator using test data", KIEE, Vol.62, No.07, pp.1027-1032, 2013.07.
 [6] M. Godoy Simoes & Felix A. Farret, "Renewable Energy Systems-Design and Analysis with Induction Generators", CRC Press, 2004.
 [7] 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.
 [8] K-water, "Detailed design report for Yong Dam Small Hydro Power Plant", 2001.
 [9] Yong-kuk Kim, Jong-Gyeum Kim, "A Study on the Operation Characteristic of Induction Generator in the Small Hydropower Plant", KIEE, Vol. 62, No.5, pp.632-638, 2013. 05.
 [10] H.W. Dommel, "Electromagnetic Transients Program. Reference Manual (EMTP Theory Book)", BPA 1986.
 [11] KEPCO, "Power distribution system interconnection technical standards for distributed power". 2010. 7.

◇ 저자소개 ◇



김종겸(金宗謙)

1961년 10월 3일생. 1984년 동아대학교 전기공학과 졸업. 1996년 충남대 공대 전기공학과 졸업(박사). 1987~1988년 한국통신공사(KT) 근무. 1988~1996년 한국수자원공사(K-Water) 근무. 2013~2014년 미국 Wisconsin-Madison Univ 방문교수. 1996년~현재 국립 강릉원주대학교 전기공학과 교수. 대한전기학회 평의원. 한국조명·전기설비학회 학술이사.
 Tel : (033)760-8785
 E-mail : jgkim@gwnu.ac.kr