

소수력에 적용한 동기발전기와 유도발전기의 운전 특성 비교

A comparison of the operating characteristics of the synchronous generator and induction generator applied to the small hydroelectric power plant

김 중 겹[†] · 김 영 국*
 (Jong-Gyeum Kim · Young-Kuk Kim)

Abstract - In general, A synchronous generator is higher than the voltage stability of the induction generator. However, induction generator has many advantages rather than a synchronous generator in terms of price and maintenance. So, coverage rate of the induction generator is gradually increasing in small hydroelectric power station rather than 1000kW recently. In order to increase the penetration of induction generator, pre-analysis of the operation of the generator is needed. In this study, we analyzed for the problems that occur when synchronous generator and induction generator of 1500kW is connected to the distribution system.

Key Words : Induction generator, Synchronous generator, Voltage dip, Voltage stability, Water turbine

1. 서 론

수력설비에서 발전설비 용량이 만 kW이상일 경우 대수력으로 그리고 천kW에서 만kW 이하의 설비용량은 소수력 설비로 분류하고 있다[1~4].

수력설비에서 발전설비 용량이 클수록 계통 연계시에 안정성을 고려하여 유도발전기 보다 동기발전기를 많이 적용하고 있다. 그래서 출력 용량이 1,000kW 이상인 발전소에는 동기발전기를, 출력용량이 1,000kW 이하인 곳에는 유도발전기를 주로 적용하여 왔다[2~4].

그러나 유도 발전기는 동기 발전기보다 형태가 간결하고, 브러시나 정류자가 필요 없으며 유지보수가 편리하여 최근 소수력에 많이 적용하고 있다[2~7].

소수력은 같은 용량의 다른 재생에너지 설비에 비해 초기 투자비가 많이 소요되기 때문에 발전기의 선정에 경제성의 예도 전기적으로 고려할 사항이 있다.

그래서 본 연구에서는 우리나라 4대강에 설치된 1,500kW 동기발전기의 적용 지역에 같은 용량의 유도발전기를 고려할 때 계통 연계 기준[8] 조건인 전압변동과 전압 강하율을 대상으로 동기발전기와 유도발전기의 동작특성을 비교 분석하였다.

2. 발전기 및 회로 구성

동기 발전기는 출력 주파수를 쉽게 일정한 값으로 조절이

가능하고, 용량이 클수록 유도발전기보다는 효율이 높으며, 부하의 역률 변화에도 쉽게 조절이 가능하다. 그러나 이와 같은 제어를 위해서는 전압 조정기와 조속기와 같은 복잡한 제어장치가 필요하다.

유도발전기는 동기 발전기보다 구조가 덜 복잡하고, 브러시가 없어 유지보수가 따로 필요하지 않다. 그러나 유도발전기는 별도의 여자전원이 없으면 계통으로부터 무효전력을 공급받아야 기동 및 운전이 가능하다.

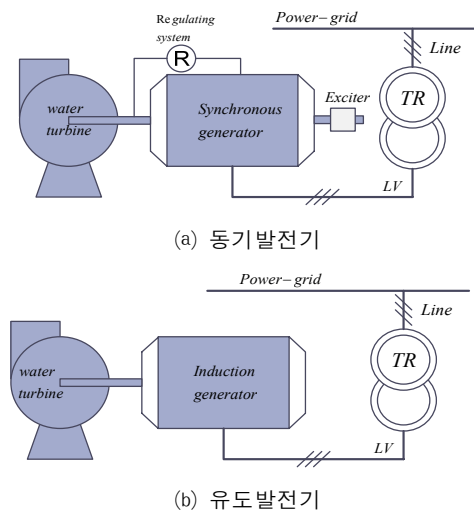


그림 1 동기발전기 및 유도발전기 구성도
 Fig. 1 Schematic diagram of synchronous and Induction generator

유도발전기가 전자제어 장치를 갖출 경우 속도제어가 쉬워 유량 및 낙차의 변화에도 출력 조절이 가능하다. 최근 이들 장비의 기술향상, 합리적인 비용 그리고 안정적인 동작특

[†] Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Gangneung-wonju National University, Korea
 E-mail : jgkim@gwnu.ac.kr

* Team manager of K-Water, Korea

접수일자 : 2014년 1월 1일

수정일자 : 2014년 4월 18일

최종완료 : 2014년 5월 2일

성으로 인해 유도발전기를 사용하는 것이 더 매력적이다.

그림 1은 동기발전기와 유도발전기의 구성도이다. 동기발전기의 경우 여자기와 전압조정기를 갖추고 있지만, 유도발전기의 경우 이와 같은 장비가 필요하지 않으므로 동기발전기에 비해 구조가 매우 간단하다.

소수력 발전소는 대개 변전소로부터 멀리 떨어진 곳에 설치되어 있다. 이때 변전소로부터 발전소까지 수용가에 필요한 전력을 공급하며, 대부분의 경우 부하 끝단에 발전기가 연결되어 있다. 배전선로는 대부분의 경우 가공선로이지만, 변전소는 대부분 도심지 근처에 있기 때문에 케이블로 설치된 경우가 많다.

그림 2는 본 연구에서 가정한 변전소(S/S), 배전선로(D/L), 부하, 변압기 그리고 발전기로 구성된 소수력 발전계통도이다.

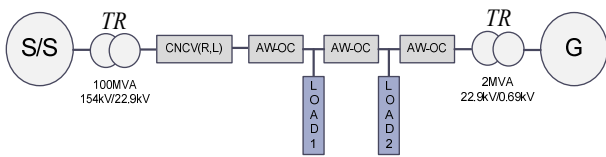


그림 2 배전선로, 부하 및 발전기 구성도
Fig. 2 System diagram of D/L, Load and Generator

그림 2에서 변전소에서 발전소까지의 거리는 10km이고, 배전선로는 22.9kV이며, 배전선로는 대부분 긴 거리에 걸쳐 부하가 불균일하게 분포되지만 간단하게 해석하기 위해 변전소에서 공급하는 부하를 4km 와 7km 지점에 각각 3,600kW 집중 분포된 것으로 보고, 역률은 0.9로 가정하였다. 이 상태에서 배전선로 말단에 1,500kW의 발전기를 사용하는 것으로 설정하였다. 그림 2에서 우측의 변압기는 발전기에 연결된 것으로서 690V의 발전기 전압에서 22.9kV로 변환되고, 좌측의 변압기는 변전소에서 22.9kV로 변환시켜 배전선로의 부하에 전력을 공급하고 있다.

변전소 변압기의 정상분 및 영상분 %임피던스는 기준 용량 100MVA를 기준으로 각각 다음과 같다.

- %Z1 = 0.225+j33.334(%)
- %Z0 = 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

구 분	단위 %Z		비 고	
	%R	%X		
CNCV 325mm ²	정상	1.4325	2.3741	km 당
	영상	4.4678	1.5617	
AW-OC 160mm ²	정상	3.47	7.46	“
	영상	11.99	29.26	

그림 2에 사용된 케이블, 전선 그리고 부하에 대해 가정한 파라미터는 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	3km	3km	3km
부하	-	3,600kW pf=0.9	3,600kW pf=0.9	-

3. 동작특성 분석

1,500kW 동기발전기와 유도발전기를 소수력 설비에 적용할 경우 발생하는 동작 특성을 해석하기 위한 계통도는 그림 2와 같이 전원, 배전선로, 변압기, 부하 그리고 발전기로 구성하였다. 이때 각각의 발전기에서 발생하는 동작특성은 다음과 같다.

3.1 동기발전기 동작 분석

그림 3은 동기발전기의 전압 및 전류 벡터도이다.

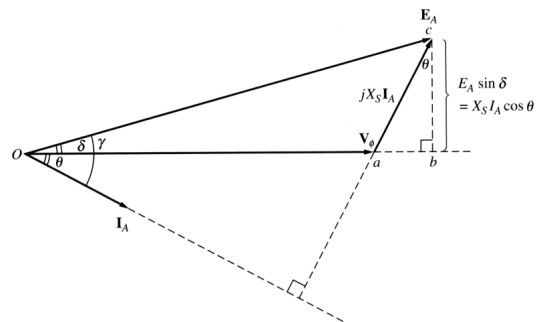


그림 3 동기발전기 전압 및 전류 벡터도
Fig. 3 Vector diagram for voltage and current of synchronous generator

동기발전기의 유효전력과 무효전력은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P = \sqrt{3} V_T I_T \cos\theta = 3 V_\phi I_A \cos\theta \quad (1)$$

$$Q = \sqrt{3} V_T I_T \sin\theta = 3 V_\phi I_A \sin\theta \quad (2)$$

여기서, 역률각 θ 는 상전압 V_ϕ 와 상전류 I_A 사이의 각으로 선간전압 V_T 와 선전류 I_T 사이의 각은 아니다.

실제 동기발전기에서 전기자 저항은 리액턴스보다 매우 작으므로($R_A \ll X_s$) 전기자 저항을 무시할 경우 동기발전기의 출력은 다음과 같이 근사화시킬 수 있다.

$$P = \frac{3 V_\phi E_A}{X_s} \sin\delta \quad (3)$$

식 (3)에서와 같이 동기발전기의 출력은 전압 및 부하각(δ)의 크기에 좌우된다.

그림 2의 회로에 적용된 동기발전기 파라미터는 표 3과 같다.

표 3 동기발전기 파라미터

Table 3 Parameters of synchronous generator

Quantity	Value
rating of the machine	1,500kW
Number of poles	10
rated line-to-line voltage	0.69[kV]
Armature resistance, RA	0.011[pu]
Aramture leakage reactance, XL	0.143[pu]
D-axis synchronous reactance, Xd	3.352[pu]
Q-axis synchronous reactance, Xq	1.484[pu]
D-axis transient reactance, Xd'	0.443[pu]
Q-axis transient reactance, Xq'	1.484[pu]
D-axis subtransient reactance, Xd''	0.171[pu]
Q-axis subtransient reactance, Xq''	0.173[pu]
D-axis transient time constant, Tdo'	0.416[sec]
Q-axis transient time constant, Tqo'	0[sec]
D-axis subtransient time constant, Tdo''	0.011[sec]
Q-axis subtransient time constant, Tqo''	0.014[sec]
Moment of inertia of mass	209[kg·m ²]

동기발전기의 경우 동기투입장치와 자동전압조정장치 그리고 조속기 장치를 이용하여 전압, 주파수, 위상각을 계통과 일치하도록 하여 계통에 투입하므로 전압강하 등의 과도 현상이 생기지 않는다. 무부하 상태에서 계통에 투입 후 출력을 상승시키게 되어 기동순간에는 계통에 거의 영향을 미치지 않으므로 본 해석에서는 기동에서 계통투입, 정격출력 발전까지의 과정은 해석하지 않고 발전기가 정격출력으로 운전하는 상태만 분석하였다. 해석에는 전자계 과도해석 프로그램을 이용하였다[9].

그림 4는 동기발전기의 운전시 발전기 단자의 상전압을 나타낸 것으로 발전기 정격 상전압인 398.9V가 그대로 나타났다.

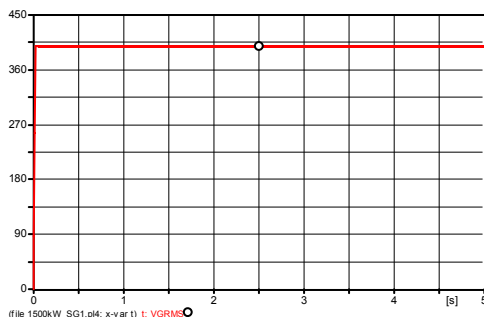
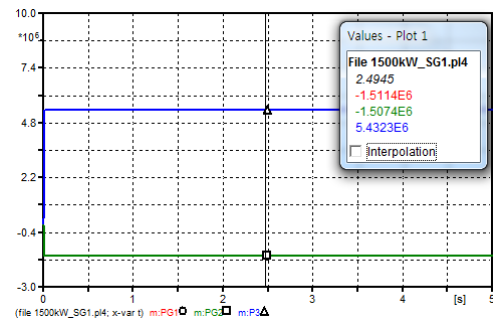


그림 4 동기 발전기 전압

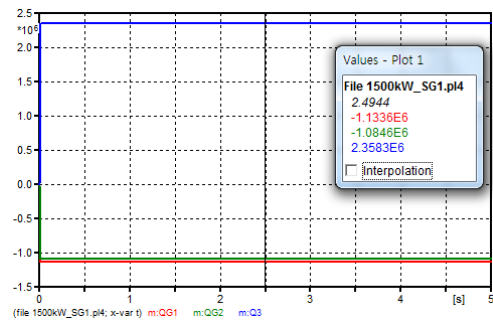
Fig. 4 Voltage of synchronous generator(SG)

그림 4에서와 같이 동기발전기를 운전할 경우 발전기 단자 전압은 크기가 일정하고 매우 안정적임을 알 수 있다.

그림 5는 동기발전기 운전시의 발전기(G1), 부하측(G2) 그리고 변전소 2차측(3)에서의 유효전력(P) 및 무효전력(Q)을 나타낸 것이다.



(a) 유효전력



(b) 무효전력

그림 5 동기발전기의 유효전력 및 무효전력
Fig. 5 Active power & reactive power of SG

그림 5(a)에서와 같이 부하에 필요한 총 유효전력중에서 전원측에서는 5,432kW가 부하에 공급되고, 동기발전기에서는 전원측과 역으로 정격과 비슷한 1,511kW가 공급됨을 알 수 있다.

그림 5(b)에서는 발전기측에서 전원측으로 1,134kVAR의 무효전력이 공급되고, 전원측에서는 부하측에 2,358kVAR에 해당되는 무효전력이 공급되고 있다. 따라서 전원측에서의 역률은 0.9로 선로의 부하 역률과 일치함을 알 수 있다.

수용가 부하에 필요한 전력을 변전소와 발전소에 공급하도록 설정한 조건에서 해석한 결과 동기발전기는 전압안정도가 매우 높고, 전력의 공급 및 수수가 정확하게 이루어짐을 알 수 있다.

3.2 유도발전기 동작 분석

수차로 유도 발전기를 구동할 경우 운동방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$J_m \frac{dw_r}{dt} + D_m w_r = T_m - T_e \quad (4)$$

여기서 기계적인 변수는 전기적인 변수로 나타낼 수 있다. 관성 모멘트 J_m [kg·m²]은 커패시턴스 C [F], 마찰계수 D_m [Nm/(%/s)]은 콘덕턴스 $1/R$ [Ω], 기계적 토크 T_m [Nm]은

전류 $i[A]$, 각속도 $w_r [rad/s]$ 은 전압 $u[V]$ 에 해당된다[9,10].

식 (4)에서 기계적인 토크 T_m 은 식 (5)와 같이 수차의 출력과 각속도로 그리고 전기적인 토크 T_e 는 식 (6)과 같이 발전기의 전류와 자속의 관계로부터 구할 수 있다.

$$T_m = \frac{P}{w_r} = \frac{9,549.3 \times P[kW]}{n} \quad (5)$$

$$T_e = \frac{3}{2} p (\psi_d i_q - \psi_q i_d) \quad (6)$$

식 (6)에서 p 는 극수이고, ψ, i 는 각각 d, q 축의 자속과 전류이다.

유도발전기는 기동시 회전속도를 동기속도 가까운 속도에서 강제로 계통과 접속되어 과도현상이 나타나므로 발전기 기동 전후 그리고 안정화 상태에서 전력흐름 해석이 필요하다.

유도발전기의 1차측은 저압이지만, 변압기를 통해 특고압으로 변환시켜 배전계통에 연결하여 부하와 전원측으로 전력을 공급하도록 되어 있다.

표 4는 본 연구에 적용된 농형 유도발전기에 대한 파라미터를 나타낸 것이다.

표 4 유도발전기 파라미터

Table 4 Parameters of induction generator

Quantity	Value
Voltage	0.69kV
rated output	1,500kW
pole	10
power factor	0.83
efficiency	92%
stator resistance, R_1	0.013666[Ω]
rotor resistance, R_2	0.001338[Ω]
stator leakage inductance, L_s	0.072[mH]
rotor leakage inductance, L_r	0.072[mH]
mutual inductance, L_m	1.441[mH]
inertia moment, J	658[kg·m ²]
damping coefficient, D	0.13[Ω]

표 4에 주어진 파라미터를 이용하여 그림 2에 제시한 유도발전기 위치에 적용할 경우 전압의 크기를 분석한 결과는 그림 6과 같다. 그림 6에서와 같이 유도발전기를 운전시킨 다음 약 1초에 계통에 투입하는 것으로 설정하였다. 투입 초기에는 전동기 모드로 운전하기 때문에 상전압은 낮지만, 3초가 되는 시점으로부터 동기속도 이상으로 진행된 이후에는 전압이 상승하여 부하측으로 전력을 공급하게 된다.

유도발전기를 기동하여 계통에 연결할 때 전력의 흐름방향이 매우 중요하다. 그림 7은 변전소에서 부하에 전력을 공급하고 있는 상황에서 유도발전기를 기동 투입할 때 전력의 흐름을 나타낸 것이다. 그림 7에서 G1은 발전기측, G2는 부하 말단 그리고 3은 변전소 2차측 포인트에서의 전력을 의미한다.

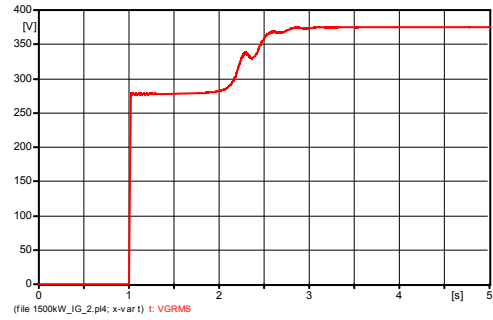
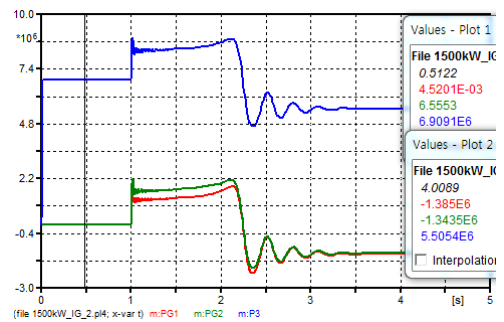
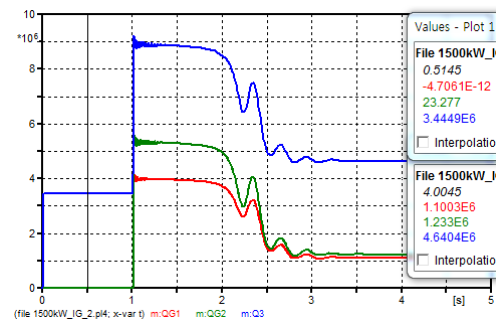


그림 6 유도발전기 전압

Fig. 6 Voltage of induction generator(IG)



(a) 유효전력



(b) 무효전력

그림 7 유도발전기의 유효전력 및 무효전력

Fig. 7 Active power & reactive power of IG

그림 7(a)에서와 같이 유도발전기를 투입하지 않은 기간 (0.5초)에는 발전기에서 전력이 생산되지 않으므로 전원측에서 6,909kW에 해당전력이 부하에 공급되고, 발전기를 계통에 투입한 후 약 2.5초 까지는 전동기 모드로서 계통으로부터 전력을 공급받게 되지만, 안정화된 시간(4초)에는 발전기로부터 부하에 1,385kW에 해당되는 전력이 전원측에 역으로 공급되기 때문에 전원측에서 부하측으로 그만큼 줄어든 유효전력(6,909kW→5,505kW)이 공급됨을 알 수 있다.

그림 7(b)에서는 발전기 투입 전후의 무효전력의 흐름을 나타낸 것으로서 발전기 투입전에 전원측에서 3,445kVAR에 해당되는 무효전력이 부하측으로 공급되지만, 발전기를 투입한 이후에는 발전기 여자에 필요한 무효전력(1,100kVAR)을 추가한 무효전력이 전원측에서 공급(4,640kVAR)되고 있음을 알 수 있다. 따라서 유도발전기를 사용할 경우 역률은 동기발

전기를 적용할 경우보다 조금 낮아지는 것을 알 수 있다.

본 연구에서 채택된 유도발전기를 구동하여 배전선로 계통에 연결할 경우 허용기준 선간전압(20,800~23,800V:상전압:12,010~13,740V)의 허용범위에 대해 검토하였다[8].

그림 8은 유도발전기를 운전하여 계통에 투입할 때 각 포인트(S2:변전소 2차, L0:케이블과 가공전선로 접속지점, L1:부하 1지점, L2:부하 2지점, T2:발전소 변압기 특고압측)별로 전압 변동을 나타낸 것이다. 그림 8에서와 같이 유도발전기를 계통에 연결할 때 일시적으로 돌입전류에 의해 전압이 떨어진다라는 것을 알 수 있으며, 발전기로 전력을 발생할 때 전압은 당초 투입 전에 비해 약간 낮게 나타나고 있다. 이와 같은 현상에 대해 동기발전기는 짧은 전압강하에도 복구 능력이 있어 회복 가능하지만, 유도발전기의 경우 무효전력의 부족으로 투입전과 같은 크기의 전압 유지는 어렵다.

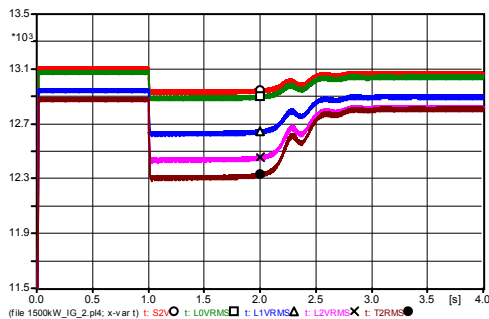


그림 8 전압변동
Fig. 8 Voltage variance

표 5 전압변동 및 전압강하율
Table 5 Voltage variance and voltage drop rate

포인트	투입전[V]	투입시[V]	강하율[%]
S2	13,084	12,917	1.28
L0	13,064	12,872	1.47
L1	12,928	12,612	2.44
L2	12,862	12,417	3.46
T2	12,862	12,284	4.49

표 5는 그림 8에 각 포인트별로 발전기 투입 전후 전압의 크기와 전압 강하율을 계산한 것이다. 전압의 크기는 포인트별로 상전압은 허용범위 안에 모두 들어가고, 부하 말단과 발전기가 연결되는 포인트에서 전압강하율도 허용범위 안에 들어가는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 소수력에 1,500kW 동기발전기와 유도발전기를 적용할 경우 전압의 크기와 전압강하율 및 전력의 흐름을 분석하였다.

동기발전기의 경우 계통에 연결할 경우 주파수, 전압, 위상각 등을 고려하기 때문에 안정적인 전력생산과 수수가 이루어짐을 확인하였다. 유도발전기의 경우 계통 투입시 돌입전류에 의한 전압강하가 발생하였지만, 포인트별로 확인한 결과 전압변동 및 전압강하율이 허용범위에 들어가는 것을 확인할 수 있었다.

유도발전기가 동기발전기에 비해 가격, 구조 및 유지 보수 등을 고려할 경우 경제성이 있으므로 유도발전기의 적용에 큰 어려움이 없을 것으로 판단된다.

References

- [1] 2012 New & Renewable Energy, MOKE & KEMCO
- [2] 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
- [3] Yong-kuk Kim, Seung Hyun Lim, Young-Kwan Choi, "Study for selection of generator type in the small hydropower plant by analyzing the power flow of the distribution line the plant is connected", KIEE, EMECS Autumn Conference, 2012, 11
- [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.18, pp.2225-2229, 2011. 12
- [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] M. Godoy Simoes & Felix A. Farret, "Renewable Energy Systems-Design and Analysis with Induction Generators", CRC Press, 2004
- [7] D. S. Henderson, "Synchronous or induction Generators?-The choice for small scale generation", IEE Conf, Pub, pp.146-149, 1996
- [8] KEPCO, "Power distribution system interconnection technical standards for distributed power". 2010. 7
- [9] H. W. Dommel, "Electromagnetic Transients Program. Reference Manual (EMTP Theory Book)", BPA 1986.
- [10] Jong-Gyeum Kim, Eun-Woong Lee, "The Characteristic Analysis of Adjustable Speed Driving Systems using EMTP", KIEE, Vol.47, No.8, pp.25-31, 1998. 08

저 자 소 개



김 종 겸 (金宗謙)

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

2013년~2014년 위스콘신 매드슨 방문교수, 현재 당학회 평의원



김 영 국 (金榮國)

1966년 1월 18일 생. 1990년 인하대학교 전기공학과 졸업. 2013년 강릉원주대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 1월 8일~현재 한국수자원공사 팀장.