

회전자 형상에 따른 유도발전기 전압강하에 대한 연구

A Study on the Voltage Drop of Induction Generator along the Rotor Shape

김 종 검^{*}
(Jong-Gyeum Kim)

Abstract - Induction generator is easy to durability and maintenance than the synchronous generator. So, recently Induction generator has been widely applied to small-scale hydroelectric power plant. When the rotor is operating faster than synchronous speed, induction machine can generate electric power. Induction generator has a large inrush currents, such as the starting current of the induction motor. Induction motor has been designed a variety of rotor shape in order to reduce starting current. Since the occurrence of high inrush current cause a voltage drop to the system, it will need to reduce possible. Because the starting current of the squirrel-cage induction motor varies in accordance with the rotor shape, it is necessary to analyze the magnitude of inrush current in order to apply to the generator. In this study, we analyzed the inrush current and the voltage drop caused in accordance with the rotor shape of 1500kW induction generator.

Key Words : Inrush current, Induction generator, Starting current, Squirrel cage, Voltage drop

1. 서 론

청정에너지 개발에 대한 관심의 증대로 물이 가지고 있는 위치 에너지를 전기에너지로 이용하기 위한 연구가 점차 증대되고 있다. 수력은 다른 신재생에너지에 비해 에너지 변환 효율이 높아 에너지 생산이 가능한 곳에서 꾸준히 개발되고 있다[1, 2].

위치에너지를 기계에너지로 변환하는 데에는 수차가 필요하고, 이 수차의 운동에너지를 전기에너지로 변환하기 위해서는 발전기가 필요하다. 발전기는 주로 동기발전기와 유도발전기가 이용되어 왔다. 동기발전기는 안정성이 높은 반면 가격이 높고, 유지보수가 어려운데 비해 유도발전기는 가격이 저렴하고, 유지보수가 쉬운 편이다[3-5]. 그래서 최근에는 1,000kW급의 발전소에 유도발전기를 사용하는 곳이 점차 증가하고 있다[4, 5].

유도기는 전동기로 동작할 경우 큰 기동전류가 흐르며, 발전기로 동작할 경우에도 돌입전류가 흘러 전압강하를 일으킨다[2-4, 6, 7]. 기동시 높은 전류 발생에 의한 전압강하는 시스템에서 연결된 다른 기기의 동작을 불안정하게 한다. 그래서 유도발전기를 소수력에 적용하고자 할 때 돌입전류에 의한 전압강하 등의 문제를 사전에 검토할 필요가 있다.

유도전동기는 회전자의 형상에 따라 기동전류와 토크 특성이 서로 다르게 나타난다. 따라서 본 연구에서는 같은 정격의 유도전동기를 발전기로 사용할 때 회전자 형상에 따라 발생하는 돌입전류의 크기와 전압강하의 정도를 비교 분석하였다.

^{*} Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Gangneung-wonju National University, Korea

E-mail : jgkim@gwnu.ac.kr

접수일자 : 2015년 4월 3일

수정일자 : 2015년 5월 4일

최종완료 : 2015년 5월 7일

2. 계통 구성 및 유도발전기

2.1 소수력 발전 시스템 구성

그림 1은 유도발전기가 연결된 소수력발전 시스템의 계통도를 나타낸 것으로서 발전기는 주로 배전선로 말단에 연결되어 있다. 배전선로의 중간에는 수용가에 공급되는 부하가 연결되어 있다.

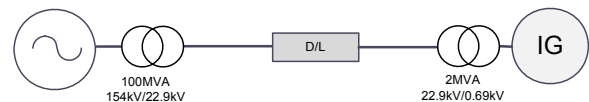


그림 1 소수력 발전 계통도
Fig. 1 Small hydro power schematic

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

$$J_m \frac{dw_r}{dt} + D_m w_r = T_m - T_e \quad (1)$$

여기서 기계적인 변수는 전기적인 변수로 나타낼 수 있다. 관성 모멘트 J_m [kg·m²] 은 커패시턴스 C [F], 마찰계수 D_m [Nm/(%)²] 은 콘덕턴스 $1/R$ [Ω], 기계적 토크 T_m [Nm] 은 전류 i [A], 각속도 w_r [%] 은 전압 u [V] 에 해당된다[8, 9].

식 (1)에서 기계적인 토크 T_m 은 식 (2)와 같이 수차의 출력과 각속도로 그리고 전기적인 토크 T_e 는 식 (3)과 같이

발전기의 전류와 자속의 관계로부터 구할 수 있다.

$$T_m = \frac{P}{\omega_r} = \frac{9,549.3 \times P[\text{kW}]}{n} \quad (2)$$

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

식 (3)에서 p 는 극수이고, ψ, i 는 각각 d, q 축의 자속과 전류이다.

2.2 회전자 형상에 따른 토크와 전류

유도전동기는 기동시 큰 토크를 필요로 하는 경우가 있고, 정격속도 근처에서도 최대 토크를 필요로 하는 경우도 있다. 그래서 부하의 운전조건에 맞추어 기동 및 최대 토크가 발생하도록 회전자의 구조를 보통 농형(single bar), 심구형(deep bar), 이중 농형(double bar)으로 제작하고 있다.

그림 2는 NEMA(National Electrical Manufacturers Association)에서 정하고 있는 회전자 구조에 따른 속도-토크 특성을 나타낸 것이다. 그림 2에서와 같이 D(회전자 표면 근처에 작은 바를 가짐)가 기동 토크가 가장 높고, 그 다음으로 C(이중 농형 회전자) 그리고 A(회전자 표면 근처에 큰 바를 가짐)는 B(심구형 회전자)보다 토크가 약간 높거나 거의 같도록 설계 제작하고 있다. 최대 토크는 A가 가장 높고, D가 가장 낮은 편이다[10, 11].

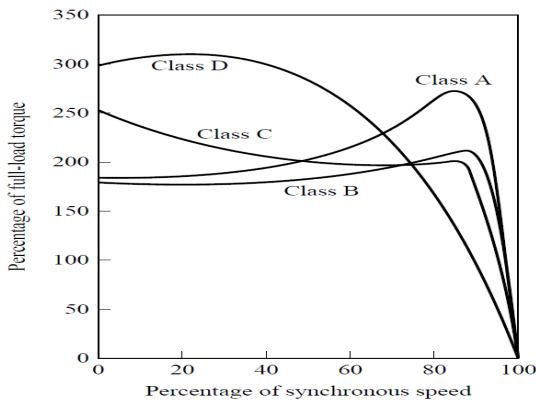


그림 2 회전자 형상에 따른 속도-토크 곡선
Fig. 2 Typical torque-speed curves for different rotor designs

회전자 형상에 따라 토크 크기도 다르지만, 기동전류의 크기도 조금씩 차이가 난다. 그림 2는 속도-전류 곡선을 나타낸 것이다. 제작사마다 기동 초기의 전류는 조금씩 차이가 나지만, 대부분의 경우 NEMA에서 정한 범위 이내를 준수하고 있다[10, 11]. 그림 3에서 기동전류가 가장 높게 나타나는 E형 회전자는 다른 것에 비해 효율이 가장 높지만 제한적으로 사용되고, 나머지 중에서 기동전류가 매우 높게 나타나는 것은 NEMA A형으로 보통 농형 회전자이다. 나머지 3가지는 기동전류가 거의 비슷하게 발생한다.

표 1은 일반적으로 분류하고 있는 대표적인 3가지 회전자 형상에 대해 유도전동기의 기동 토크와 기동 전류의 크기를

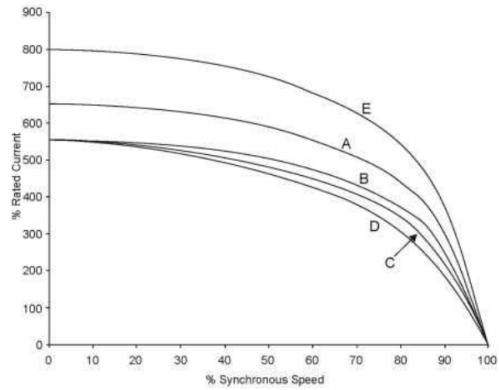


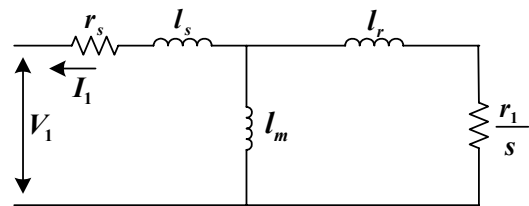
그림 3 회전속도에 따른 전류 곡선
Fig. 3 Current curve corresponding to the rotational speed

비교한 것이다. 기동 또는 돌입전류가 클 경우 전압강하 외 기기 부하의 연결부나 베어링에 기계적인 스트레스로도 작용할 수 있다.

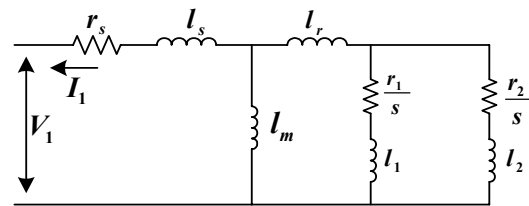
표 1 회전자 형상에 따른 기동전류 및 기동토크
Table 1 Starting current and starting torque according to the rotor-shape

구분	기동전류[pu]	기동토크[pu]	비고
single	6.5	1.5	NEMA A(Class A)
deep	5.5	1.25	NEMA B(Class B)
double	5.5	2.0	NEMA C(Class C)

유도전동기를 동기속도 이상으로 운전하여 발전기로 사용할 경우 특성 해석을 위해서는 등가회로도가 필요하다. 회전자 형상에 따른 유도기의 특성 해석을 위한 등가회로도는 그림 3과 같다. 그림 3(a)는 보통 농형의 회전자이고, 3(b)는



(a) 보통 농형



(b) 심구 및 이중 농형

그림 3 회전자 형상에 따른 등가회로도
Fig. 3 Equivalent circuit diagram for different rotor designs

심구 및 이중 농형 회전자를 사용할 경우 등가회로도를 나타낸 것이다[3, 9, 10].

여기서 r_s 는 고정자 저항, l_s, l_r 은 각각 고정자와 회전자 누설리액턴스, l_m 는 자화인덕턴스, r_1, r_2 은 위치에 따른 회전자 저항이다.

그림 3에서 수차의 기계적인 에너지가 축을 통해 회전자와 공극을 지날 때 손실을 제외하고 고정자에 나타나는 유효 및 무효전력은 각각 다음과 같다[4, 6].

$$P = \operatorname{Re} \left(\frac{3}{2} \times V \times \bar{I} \right) [W] \quad (4)$$

$$Q = \operatorname{Im} \left(\frac{3}{2} \times V \times \bar{I} \right) [VAr] \quad (5)$$

3. 계산 및 결과 분석

그림 1에 적용된 3상 10극 저압 유도발전기의 정격은 표 2와 같다.

표 2 유도발전기 사양

Table 2 Induction generator specification

구분	값
정격전압	0.69kV
정격출력	1,500kW
극수	10
역률	0.83
효율	92%

표 2에 제시된 유도발전기를 회전자 형상에 따라 구한 각각의 파라미터는 표 3과 같다.

표 3 회전자 형상에 따른 파라미터

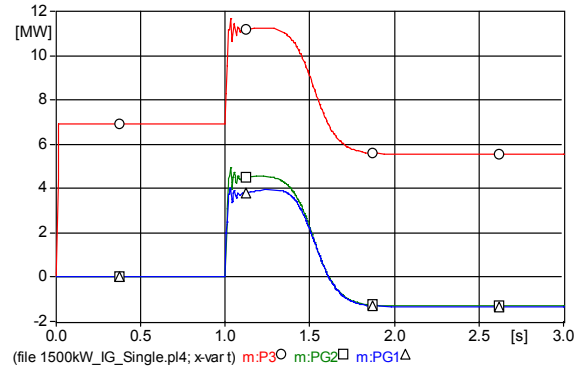
Table 3 Parameters according to the rotor shape

구분	single	deep	double
r_s [Ω]	0.009897	0.010766	0.010897
l_s [H]	3.36E-5	5.156E-5	3.665E-5
l_m [H]	0.001107	0.001226	0.001286
l_r [H]	3.36E-5	5.156E-5	3.665E-5
r_1 [Ω]	0.010773	0.010904	0.026369
r_2 [Ω]	-	0.040904	0.012954
l_2 [H]	-	2.263E-4	1.043E-4

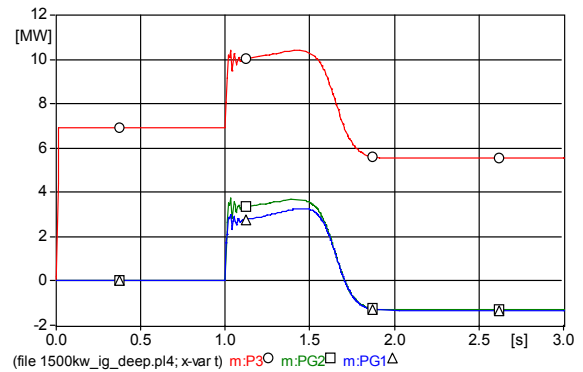
표 3에 제시된 값을 이용하여 그림 1과 같은 설비에 유도발전기를 기동할 경우 발생하는 특성 해석은 다음과 같다. 동작해석에는 전자계과도해석 프로그램을 사용하였다[9].

그림 4는 유도발전기를 운전하여 계통에 연계할 때 회전자 형상에 따라 발생하는 유효전력의 변화를 나타낸 것이다. 그림 4에서 P3는 변전소에서의 유효전력이고, PG2는 배전선로 말단 즉 변압기 고압측에서의 유효전력이며, PG1은 발전기 단자에서의 유효전력이다. 발전기를 투입하기 전에 배전

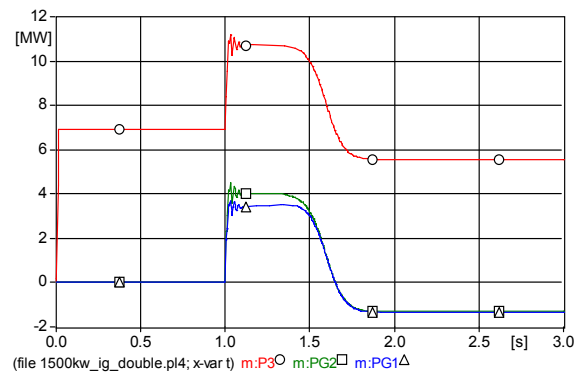
선로에 필요한 유효전력(P3)을 모두 변전소를 공급하는데 그 값은 6,900[kW]이지만, 발전기가 정상적으로 운전하는 시간 이후 부터는 발전기가 약 1,300[kW]를 공급하기 때문에 변전소로 부터는 5,500[kW]만 공급하고 있음을 알 수 있다.



(a) single bar



(b) deep bar



(c) double bar

그림 4 회전자 형상에 따른 유효전력

Fig. 4 Active power for different rotor designs

그림 4에서와 같이 발전기를 운전하기 전에는 부하에 필요한 모든 전력을 변전소로부터 공급하지만, 발전기가 투입되고서 약 1초 이전에 전력이 배전선로에 공급되기 때문에 변전소로 부터의 공급전력은 약간 줄어들게 된다. 발전기가 투입되는 순간(1초 지점)부터 아주 짧은 동안에 발전기가 전동기로 동작하기 때문에 변전소로부터 공급되는 전력이

일시적으로 높아지게 된다. 유도기가 발전기 영역으로 전환된 이후에는 발전소에서 공급되는 전력은 변전소로부터 공급되는 전력과 방향이 역전됨을 볼 수 있다. 3가지 회전자 형상에서 볼 수 있듯이 유도기가 발전기 영역으로 전환되기 이전이 전동기 영역에서 운전하는 동안 전력의 크기와 지속 시간에 조금씩 차이가 남을 알 수 있다. 3가지 중에서 보통 농형 회전자를 가진 경우가 전력변화 폭은 크지만, 지속시간이 조금 짧은 것을 알 수 있다.

그림 5는 3가지 회전자 형상에 대해 유도발전기 토크의 변화를 해석하였다. 그림 5에서와 같이 보통 농형 회전자(○)를 가진 경우 토크의 크기가 가장 높게 발생하고, 이중 농형(△)이 다음으로 높으며, 가장 낮은 값을 나타낸 것은 심구형(□) 회전자를 가진 것이다.

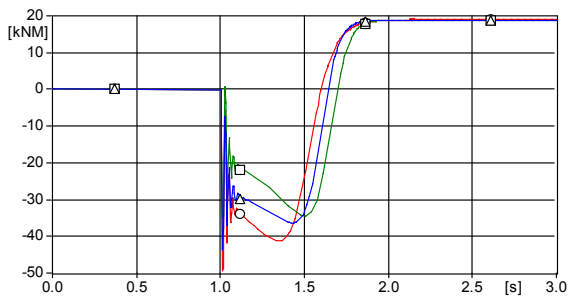


그림 5 토크 특성 곡선
Fig. 5 Torque characteristic curve

그림 6은 3가지 형상의 회전자를 가진 유도발전기를 기동할 경우 발생하는 돌입전류에 대한 해석 결과이다. 보통 농형 회전자(○)가 기동시 가장 높은 전류값을 나타내고, 다음으로 높은 전류가 발생하는 것이 이중 농형(△)이며, 가장 낮은 전류가 발생하는 것이 심구형(□)이다. 돌입전류의 크기가 높은 반면 지속시간은 반대로 짧아짐을 알 수 있다.

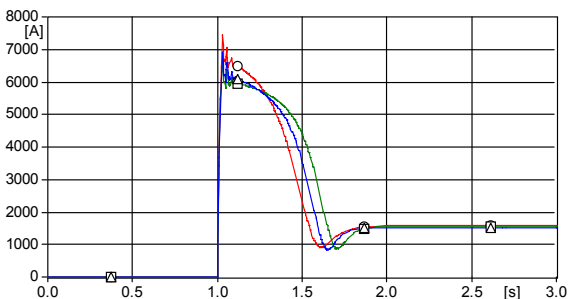


그림 6 돌입전류
Fig. 6 Inrush current

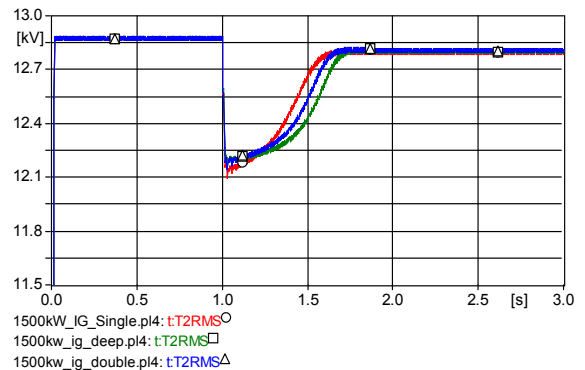
표 3는 회전자 형상에 따른 최대 돌입전류와 운전전류를 비교한 것이다. 표 1에서 제시한 회전자 형상별 기동전류에 비해 운전전류와 최대 전류는 조금 낮게 나타났다. 이는 발전기로 운전할 때가 전동기로 운전할 때에 비해 약간 낮은 것을 알 수 있다. 3가지 중에서 보통 농형회전자를 가진 경우가 기동 초기에 가장 전류가 높았으며, 심구형이 가장 낮게 나타났다.

표 3 회전자 형상에 따른 최대전류 및 운전전류

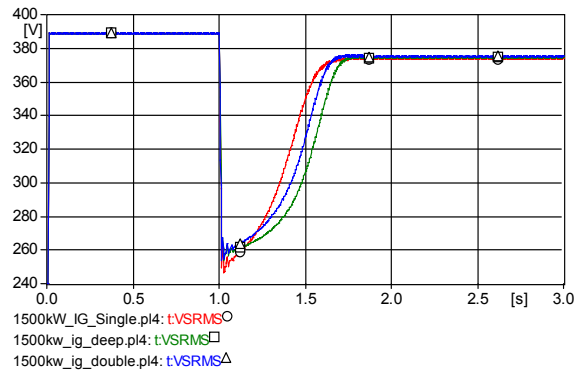
Table 3 Maximum current and running current according to the rotor-shape

구분	최대전류[A]	운전전류[A]	비고
single	7,452.9	1,519	4.9배
deep	6,668.9	1,550.2	4.3배
double	6,908.6	1,523.3	4.5배

발전기로 운전하기 전에 큰 기동토크에 의한 돌입전류에 의해 발생하는 전압강하에 대해서는 유도발전기가 연결된 배전선로 말단의 변압기 1차측과 2차측 전압을 분석하였다.



(a) 고압측



(b) 저압측

그림 7 전압강하

Fig. 7 Voltage drop

그림 7은 회전자 형상에 따라 유도발전기를 배전선로에 연결한 경우 발전기의 변압기 특고압측과 저압측의 상전압을 나타낸 것이다. 발전기가 기동할 경우 돌입전류에 의해 일시적으로 전압이 떨어지지만, 약 0.7초 정도에서 전압이 회복됨을 알 수 있다. 발전기 투입 전에 비해 투입 후 정상적인 운전에서도 전압이 약간 낮게 나타나는 것은 무효전력의 부족 때문이다.

그림 7에서 회전자 형상에 따라 전압의 강하와 회복 정도가 다르게 나타남을 알 수 있다. 3가지 형상에 대한 투입전후의 전압변동을 표 4에 나타내었다. 3가지 형상을 가지고서 해석한 결과 전압강하는 배전선로 전압 허용범위 5%를 약간 초과함을 알 수 있다.

그림 7에서와 같이 발전기를 기동할 경우 높은 돌입전류에 의해 전압강하가 나타난다.

표 4 회전자 형상에 따른 전압강하

Table 4 Voltage drop according to the rotor-shape

구분	투입전	과도상태	정상상태	전압강하율
single	12,880V	12,100V	12,800V	6.05%
deep	12,880V	12,152V	12,800V	5.65%
double	12,880V	12,143V	12,810	5.72%

4. 결 론

농형 유도발전기를 소수력에 사용할 경우 기동시 높은 돌입전류가 흘러 계통에 전압강하를 발생시킨다. 전압강하를 줄이는 방법에 앞서 유도발전기 회전자 형상에 따라 돌입전류의 크기와 이에 따른 전압강하 분석이 필요하다. 그래서 본 연구에서는 회전자 형상에 따른 유도발전기의 종류별 특성 해석을 실시하였다. 3가지 회전자 형상에 대해 돌입전류와 전압강하를 분석한 결과 보통 농형 회전자가 심구 및 2중 농형 회전자에 가장 높은 돌입전류를 발생하지만, 가장 빠르게 발전영역에 도달함을 알 수 있었다. 전압강하에 대해서는 돌입전류가 크게 나타내는 회전자 형상이 전압강하가 높게 발생하고 안정화 상태에 이르는 것을 알 수 있다.

본 연구의 분석결과 유도발전기를 적용할 경우 돌입전류와 전압강하의 크기가 높아도 빠르게 발전영역으로 운전이 필요한 경우 보통농형을 적용하고, 돌입전류와 전압강하를 줄여 계통의 안정성을 높이는 것이 필요한 경우에는 심구형 회전자를 가진 유도발전기를 적용하는 것이 유리한 것으로 판단되었다. 본 연구를 토대로 향후 중형급 용량의 유도발전기의 현장적용에 대해 연구를 더 진행할 예정이다.

References

[1] 2012 New & Renewable Energy, MOKE & KEMCO
 [2] M. Godoy Simoes & Felix A. Farret, "Renewable Energy Systems-Design and Analysis with Induction Generators", CRC Press, 2004
 [3] Theodore Wildi, "Electrical Machines, Drives and Power Systems", Prentice Hall, 2002
 [4] Jong-Gyeum Kim, Young-Kuk Kim "A Study on the Operation Characteristic of the Induction Generator in the Small Hydropower Plant", KIEE, Vol.62, No.5, pp.632-638, 2013. 05
 [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, Young-Kuk Kim "A comparison of the operating characteristics of the synchronous generator and induction generator applied to the small hydroelectric power plant", KIEE, Vol.63P,

No.2, pp.55-60, 2014. 06

[7] Min-ho Park, "Induction machines", Dongmyungsa, pp.315, 1990
 [8] 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
 [9] H.W. Dommel, "Electromagnetic Transients Program. Reference Manual(EMTP Theory Book)", BPA 1986.
 [10] NEMA-MG-1, "Motor and Generators", 2011
 [11] IEEE Standards Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators, ANSI/IEEE Standards 112-2004.

저 자 소 개



김 종 겸 (金宗謙)

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

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

E-mail : jgkim@gwnu.ac.kr