

리액터 탭 설정값에 따른 유도발전기의 돌입전류와 전압강하 분석

Analysis for the Inrush Current and Voltage Drop of Induction Generator by the Reactor Tap Change

김 종 겸*
(Jong-Gyeum Kim)

Abstract - The induction generator has many advantages compared to the synchronous generator in terms of cost and maintenance. So squirrel cage induction generator has been recently supplied in small hydroelectric power station. 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 increase the supply of the induction generator, it is very important to find the method of reducing inrush current and voltage drop.

In this study, we found that it is possible to reduce voltage drop and inrush current when selecting the transfer time and the proper values of the reactor tap.

Key Words : Induction generator, Inrush current, Reactor tap, Small hydro, Voltage drop

1. 서 론

수력설비에서 발전용량이 높을수록 계통 연계시 전압 안정성을 고려하여 동기발전기가 많이 적용되었지만, 최근에는 천 kW 전후의 출력에도 투자비와 유지비용을 고려하여 유도발전기를 적용하고 있다[1-4].

유도발전기는 계통 연계시 유도전동기의 기동전류와 같은 돌입전류가 발생하여 계통에 전압강하를 일으키므로 적용에 앞서 전압강하가 허용범위 이내인지에 대해 사전 검토가 필요하다.

유도전동기의 기동시 높은 전류를 줄이기 위해 Y- Δ , 리액터, 소프트 기동방법 등이 사용되고 있으나, 용량이 클 경우 리액터 기동을 주로 사용한다[5]. 유도전동기의 기동시 높은 기동전류를 저감하기 위해 설치하는 리액터는 3부분의 탭(55%, 65%, 80%)을 갖추고 있다. 리액터는 유도전동기의 전압 및 용량별로 생산되고 있으므로 별도의 설계 제작 없이 같은 등급의 리액터를 유도발전기에 적용할 경우 돌입전류의 크기와 전압강하 저하를 파악할 수 있다. 그래서 본 논문에서는 1,500kW의 유도전동기의 기동전류를 줄이기 위해 사용되는 리액터를 같은 용량의 유도발전기에 적용하여 계통 연계시 발생하는 돌입전류와 전압강하에 대해 직입 기동과 비교하고, 탭의 설정값을 변경하여 기동할 경우 전압강하율이 분산전원 계통연계 기준 허용범위 안에 드는지에 대해서도 분석하였다.

2. 계통 구성

2.1 시스템 구성도

그림 1은 변전소로부터 수용가에 부하를 공급하는 배전선로를 나타낸 것으로서 유도발전기는 주로 배전선로의 말단에 설치한다.

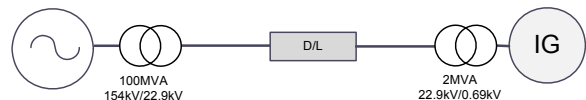


그림 1 배전선로, 부하 및 발전기 구성도

Fig. 1 System diagram of D/L, Load and Generator

그림 1의 변전소에서 발전용 변압기까지 배전선로의 중간에 수용가에 필요한 부하가 연결되어 있다. 유도발전기에 의해 생산된 전력을 계통으로 전달하기 위해 연결된 변압기의 용량은 발전기보다 약간 높은 것을 적용하였다.

그림 2는 수차에 의해 발생된 기계에너지가 유도발전기에 의해 전기적 에너지로 변환되어 변압기를 거쳐 계통에 전력을 공급하는 발전시스템의 구성도이다.

유도발전기의 출력전압은 저압이므로 계통 전압과 같도록 변압기를 사용해 특고압으로 변환하였다. 리액터는 변압기와 발전기 사이에 차단기(ACB)와 병렬로 부착되어 있다. 기동시 돌입전류를 제한하기 위해 리액터 탭의 한 곳에 연결하여 발전기를 기

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

E-mail : jgkim@gwnu.ac.kr

Received : June 2, 2015 ; Accepted : July 20, 2015

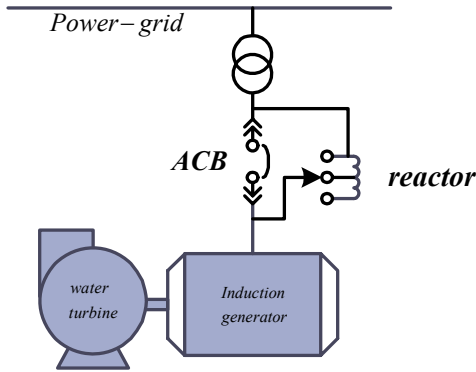


그림 2 유도발전기의 구성도
 Fig. 2 Schematic diagram of Induction generator

동하여 동기속도 근처에서 리액터와 병렬로 연결된 차단기를 투입하고, 리액터를 개방한 다음 수차에 의해 지속적으로 운전할 경우 안정된 전력을 계통에 공급할 수 있다[6]. 본 연구에 적용된 3상 유도발전기의 사양은 표 1과 같다.

표 1 유도발전기 사양
 Table 1 Specification of Induction generator

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

표 2는 본 연구에 적용된 3상 농형 유도발전기의 파라미터를 나타낸 것이다.

표 2 유도발전기 파라미터
 Table 2 Induction generator parameter

Parameters	Values
Stator resistance, R_s	0.00477[Ω]
Rotor resistance, R_r	0.00542[Ω]
Stator leakage inductance, L_s	0.055979[mH]
Rotor leakage inductance, L_r	0.055979[mH]
Mutual inductance, L_m	1.695[mH]
Inertia moment, J	594[kg·m ²]

2.2 리액터 탭 파라미터

유도발전기의 돌입전류 I_{st} 는 대개 정격전류의 수배가 되지만, 대개 제작사의 시험 성적서에 제시한 값을 사용하면 된다. 리액터의 탭 전류는 기동전류에 탭 비율($\alpha\%$)의 곱으로 표현할 수 있

다[6, 7]. 이때 유도발전기의 돌입전류를 줄이기 위한 3단계 탭의 전류는 다음과 같이 기동전류에 탭의 설정값을 곱하면 된다.

$$I_{tap} = \frac{\alpha}{100} \times I_{st} \tag{1}$$

리액터 탭의 전압과 전류로부터 리액터 탭의 임피던스가 다음과 같다.

$$Z_{tap} = \frac{V_{tap}}{I_{tap}} [\Omega] \tag{2}$$

리액터 탭의 인덕턴스는 탭에 걸리는 전압과 각주파수로 구해진다.

$$L_{tap} = \frac{Z_{tap}}{\omega} \tag{3}$$

직입 기동시 돌입전류에 의한 전압강하를 줄이기 위해 리액터 탭은 세 부분으로 제작하고 있다. 직입 기동시의 높은 돌입전류를 줄이기 위해 사용하는 표 1의 용량을 가지고서 식 (1)~(3)으로 계산한 리액터 탭의 계산 결과는 표 3과 같다. 리액터 탭의 설정값이 낮을수록 탭 전류는 낮지만, 탭에 걸리는 전압은 높으므로 탭의 리액턴스는 탭의 설정값이 낮을수록 높은 편이다.

표 3 리액터 탭 변경에 따른 파라미터 계산
 Table 3 Parameters calculation by reactor tap change

구분	50%탭	65%탭	80%탭
I_{tap} [A]	3259	4237	5214
V_{tap} [V]	199.186	139.43	79.674
Z_{tap} [Ω]	0.061	0.033	0.015
L_{tap} [mH]	0.1621	0.0873	0.04053

3. 계산 및 결과 분석

3.1 직입기동에 따른 동작 특성

유도발전기가 발생한 전력을 가장 빠르게 계통에 연계하는 방법은 직입기동(DOL:Direct On Line starting)이다. 이 직입기동에서 발생하는 돌입전류에 의해 전압강하가 일정범위를 초과할 경우 계통에 영향을 미치므로 최대한 줄일 수 있도록 계통연계에 앞서 면밀하게 검토해야 한다.

본 연구에서는 3상 1,500kW 유도발전기를 그림 1과 같은 조건에서 직입 및 리액터 기동으로 운전할 경우 발생하는 돌입전류와 전압강하를 계산하였다. 계산에는 전자계과도해석 프로그램을 적용하였다[8].

우선 본 연구에 적용된 3상 유도기가 실제 발전기로 동작하는 지를 해석하였다. 그림 3은 표 2에 제시된 유도발전기를 직입 기동할 경우 토크와 각속도를 나타낸 것이다. 변전소에서 수용가에 전원을 공급하고 있는 상황에서 1초에 유도발전기를 계통에 투입

할 경우 그림 3에서와 같이 토크(○)는 동기속도에 도달하기 전까지는 전동기(+토크)로서 동작하고, 각속도(□)는 동기속도(75.398[‰])를 초과할 경우 발전기(-토크)가 되며, 이후의 각속도는 76.833[‰]로 동기속도 이상으로 회전하여 전력을 생산한다. 이때에 발생하는 돌입전류와 전압강하를 그림 4에 나타내었다.

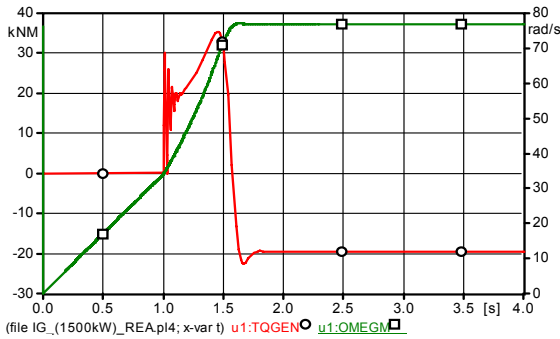


그림 3 직입 기동시의 토크와 각속도
Fig. 3 Torque & angular speed at DOL starting

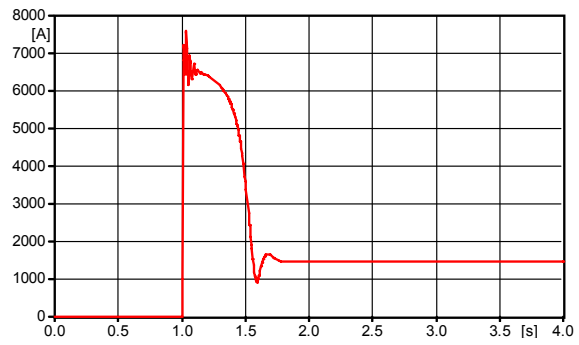
그림 4는 그림 1과 같은 수력설비에 1,500kW의 유도발전기를 직입기동으로 운전하여 계통에 연계한 경우 돌입전류의 크기와 전압강하를 분석한 것이다.

그림 4(a)에서와 같이 직입 기동시 돌입전류는 정상전류의 4.6배가 흐르는데 이는 일반적으로 유도전동기를 직입기동 할 때 발생하는 5~8배의 기동전류 보다는 약간 낮은 편이다. 그림 4(b)에서와 같이 돌입전류가 발생하는 약 0.6초 동안 7%의 전압강하가 발생하였다. 돌입전류와 전압강하가 발생하는 영역이 바로 유도기가 전동기로 운전하는 영역이다. 이 전압강하율은 분산형 전원 연계기준을 5%를 초과하고 있다[9]. 그래서 직입기동에 의해 발생한 전압강하가 높으므로 이를 줄일 수 있는 대책으로 가장 일반적인 것이 리액터를 사용하는 것이다.

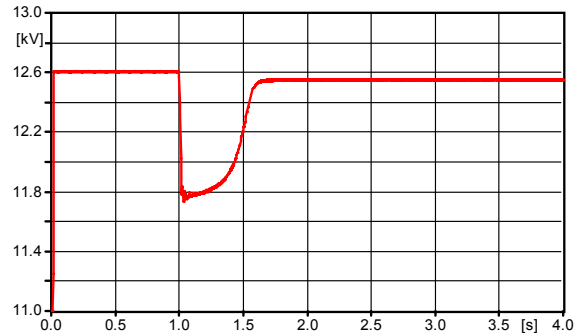
3.2 리액터 탭의 설정 변화에 따른 동작 특성

유도발전기를 직입기동으로 돌입전류에 의해 발생하는 전압강하가 분산형 전원 연계기준의 허용범위를 초과할 경우 가장 경제적으로 대처할 수 있는 것이 리액터를 적용하는 것이다. 유도발전기의 돌입전류를 줄이기 위한 리액터의 탭의 리액턴스는 표 3과 같이 세 부분으로 설정하였다. 리액터를 통해 기동하는 유도발전기는 동기속도에 가까운 상태에 이르게 한 다음 리액터와 병렬로 설치한 차단기를 투입하였다.

그림 5는 우선 첫 번째로 리액터 탭을 50%에 설정하고서 유도발전기가 리액터를 거쳐 기동하여 계통에 연결할 때 돌입전류와 전압강하를 분석한 것이다. 발전기가 동기속도에 도달하지 않은 상태에서 리액터와 병렬로 연결한 차단기를 조기에 개방할 경우 직입기동과 같은 결과가 나타날 수 있으므로 개방시간 조절이 매우 중요하다. 여기서는 1.14초가 지난 다음 리액터와 병렬로 연결한 차단기를 투입한 후 돌입전류와 전압강하를 분석한 것이다. 정격속도에 도달하는 시점에서 리액터에 병렬로 연결된 바이



(a) 돌입전류



(b) 전압강하

그림 4 직입 기동시 돌입전류와 전압강하
Fig. 4 Inrush current & Voltage drop at DOL starting

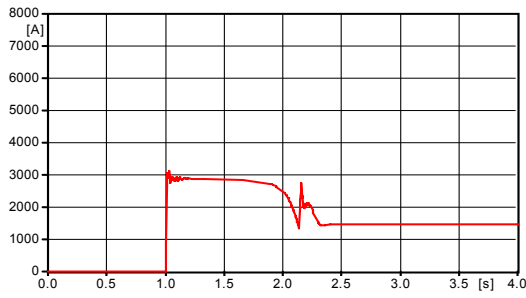
패스 스위치를 투입할 때 스위칭에 의한 순간적인 과도전류가 발생하였다.

그림 5(a)에서와 같이 리액터 탭을 50%로 조정된 조건에서 계통 연계시 돌입전류는 정격전류의 1.94배가 흐른다. 그림 5(b)에서와 같이 변압기 특고압측에서 돌입전류에 의해 발생하는 전압강하 지속시간은 약 1.14초로 직입기동에 비해 길지만 전압강하는 2.76%로 직입기동에 의한 경우보다는 조금 낮게 나타났다. 직입기동에 비교해서 돌입전류와 전압강하는 매우 줄었지만, 이들의 지속시간이 늘어났다는 것을 알 수 있다.

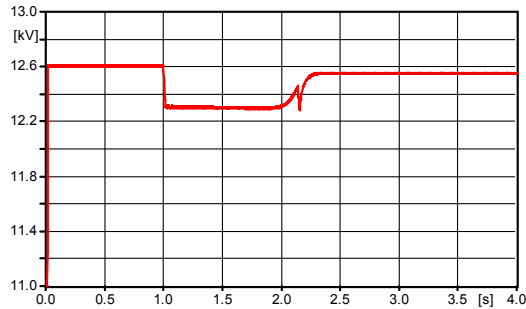
두 번째로 리액터의 탭을 65%에 설정하고서 유도발전기를 운전하여 0.8초 지난 다음 리액터와 병렬로 연결한 차단기를 투입한 경우 돌입전류와 전압강하를 분석한 것이다.

그림 6(a)에서와 같이 리액터 탭을 65%로 조정된 조건에서 계통연계시 돌입전류는 정상전류의 2.96배가 흐르는 것으로 직입기동에 의한 돌입전류의 크기보다는 약간 감소지만, 50%탭에 비해서는 약간 높다는 것을 알 수 있다. 이때 그림 6(b)에서와 같이 변압기 특고압측에서 돌입전류에 의해 발생하는 전압강하 지속시간은 약 0.8초로 직입기동에 비해 길지만 전압강하율은 4.5%로 직입기동에 의한 경우보다는 낮은 편이다. 이 결과는 돌입전류 및 전압강하 지속시간이 50%탭 설정에 비해 약간 줄어든 것이다.

세 번째로 리액터의 탭이 80%로 설정하고서 유도발전기를 운전하여 0.65초 지난 다음 리액터와 병렬로 연결한 차단기를 투입한 경우 돌입전류와 전압강하를 분석한 것이다.



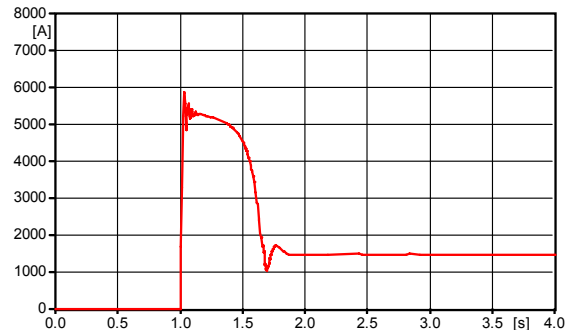
(a) 돌입전류



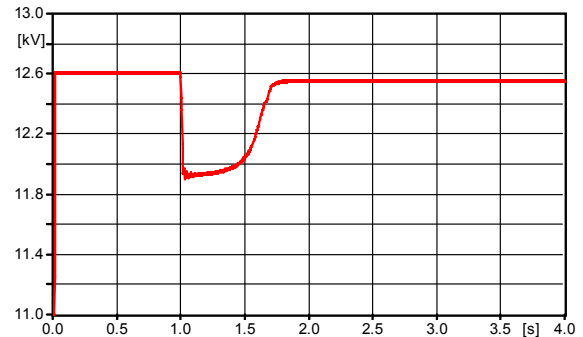
(b) 전압강하

그림 5 50% 탭에서 돌입전류와 전압강하

Fig. 5 Inrush current & Voltage drop at 50% Tap



(a) 돌입전류



(b) 전압강하

그림 7 80% 탭에서 돌입전류와 전압강하

Fig. 7 Inrush current & Voltage drop at 80% Tap

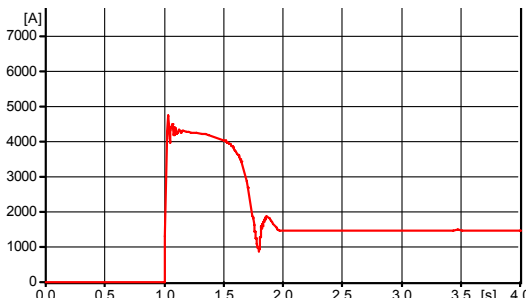
그림 7(a)에서와 같이 리액터 탭을 80%로 조정된 조건에서 계통 연계시 돌입전류는 정상전류의 3.67배가 흐르는 것으로 직입 기동에 의한 돌입전류의 크기보다는 약간 감소한 것을 알 수 있다. 이때 그림 7(b)에서와 같이 변압기 특고압측에서 돌입전류에 의해 발생하는 전압강하 지속시간은 약 0.8초 정도로 직입기동에 비해 길지만 전압강하율은 5.6%로 직입기동에 의한 경우보다는 낮은 편이지만, 순시전압 허용범위를 초과하는 값이다.

그림 8은 리액터 탭을 80%로 설정하고서 기동하여 계통에 연결할 때의 토크와 각속도를 나타낸 것이다. 기동하여 발전기로 운전하기 전까지 전동기로 운전하는 최대 토크의 크기는 직입기동에 비해 낮고, 지속하는 시간이 약간 긴 편이다. 이후 발전기로 정상 운전할 때 토크는 동일하다.

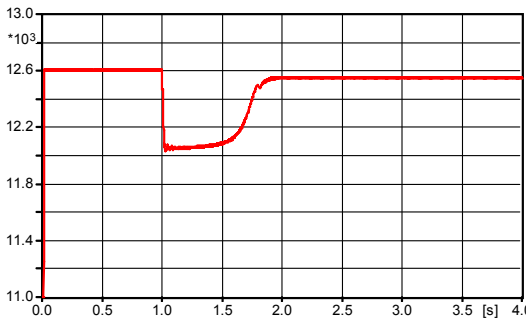
직입기동에 비교해서 리액터의 탭 설정값 변경시 차단기의 투입시간 조정에 따라 돌입전류의 크기와 전압 강하 그리고 지속시간이 서로 다르다는 것을 확인할 수 있다. 표 4는 직입기동과 리액터 탭의 설정값 조정시의 돌입전류, 전압강하 그리고 지속시간을 분석한 결과이다. 본 연구에 채택된 유도발전기의 경우 리액터 탭은 65%나 50%로 선택해야 전압강하 허용범위에서 운전이 가능함을 알 수 있다.

직입 기동할 경우 돌입전류와 전압강하가 가장 높지만, 지속시간이 가장 짧은 반면, 리액터의 탭 설정 값을 낮출수록 돌입전류와 전압강하는 낮출 수는 있지만, 지속시간 역시 길어진다.

여기서 계산을 통해 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.



(a) 돌입전류



(b) 전압강하

그림 6 65% 탭에서 돌입전류와 전압강하

Fig. 6 Inrush current & Voltage drop at 65% Tap

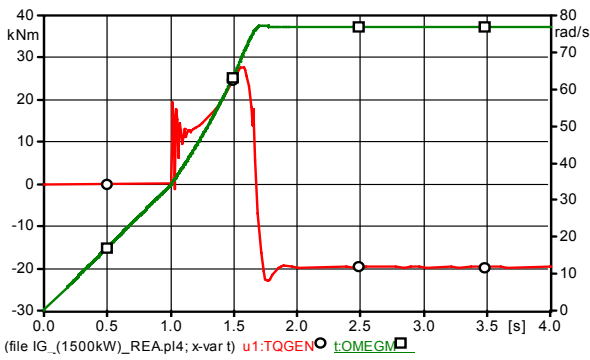


그림 8 80% 탭에서의 토크와 각속도

Fig. 8 Torque & angular speed at 80% Tap

표 4 직입 및 리액터 기동시의 돌입전류, 전압강하 및 지속시간의 비교

Table 4 Comparison of voltage drop, inrush current, duration at DOL and reactor starting

구분	직입기동	80%tap	65%tap	50%tap
돌입전류[pu]	4.6	3.67	2.96	1.94
전압강하율[%]	7	5.6	4.5	2.76
지속시간[s]	0.6	0.65	0.8	1.14

1) 리액터 탭의 설정에 따라 전압강하와 돌입전류의 크기 그리고 지속시간이 서로 다르게 나타난다는 것을 알 수 있다.

2) 돌입전류를 줄이기 위해 리액터를 적용하여도 탭의 설정이 발전기의 기동특성과 맞지 않을 경우 전압강하율 허용범위를 초과할 수 있다.

3) 차단기의 개방시간이 돌입전류의 크기와 전압강하 지속시간에 영향을 줄 수 있다.

4. 결 론

유도발전기를 계통에 투입할 때 가장 크게 문제가 되는 것은 돌입전류에 의해 전압강하이다. 이 돌입전류의 저감과 전압강하를 줄이기 위해 리액터 기동방식을 적용할 경우 전압강하율이 분산전원기준 허용범위 안에 들어가는 리액터의 최적 파라미터를 찾는 것이 중요하다.

그래서 본 논문에서는 천 kW 이상 되는 농형 유도발전기를 사용할 경우 돌입전류와 전압 강하율을 계산하여 적절한 리액터 파라미터를 찾아 발전기에 적용시켜 해석한 결과 리액터 탭의 설정에 따라 분산전원 순시전압 강하 허용 범위 안에 들어갈 수 있는 것과 초과하는 경우도 있다는 것을 확인할 수 있었다.

본 연구결과는 수력 설비에 일정 용량의 유도발전기를 적용여부의 사전 검토에 도움이 될 것으로 판단된다.

References

[1] 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

[2] Yong-kuk Kim et al, "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

[3] 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.

[4] M. Godoy Simoes & Felix A. Farret, Renewable Energy Systems-Design and Analysis with Induction Generators, CRC Press, 2004

[5] Frank M. Bruce et al., "Reduced-Voltage Starting of Squirrel-Cage Induction Motors", IEEE Trans on I.A, Vol.20, No.1, pp.46-55, Jan/Feb, 1984

[6] Jong-Gyeum Kim, "Operating Characteristic Analysis of Induction Generator by the Reactor Starting", KIEE, Vol.63P, No.3, pp. 138-142, 2014.6

[7] Jong-Gyeum Kim, "Starting Characterization of Induction Motor using Reactor Tap Change", KIEE, Vol.63P, No.1, pp. 24-28, 2014.3

[8] H. W. Dommel, Electromagnetic Transients Program. Reference Manual(EMTP Theory Book), BPA 1986.

[9] KEPCO, "Power Distribution System Interconnection Technical Standards for Distributed Power". 2010. 7

저 자 소 개



김 종 겸 (Jong-Gyeum Kim)

1996년 충남대학교 대학원 전기공학과 졸업 (공학). 1996년~현재 강릉원주대학교 전기공학과 교수. 2013년~2014년 위스콘신 매디슨 대학교 방문교수, 현재 당학회 평의원 및 B부문화 총무이사
Tel : 033) 760-8785
E-mail : jgkim@gwnu.ac.kr