

계통 연계시 유도발전기 출력에 따른 전압강하 분석

김종겸^{1)*}

Analysis of Voltage Drop due to Change in Induction Generator Output during Grid Connection

Jong-Gyeum Kim^{1)*}

Received 29 July 2015 Revised 18 September 2015 Accepted 9 December 2015

ABSTRACT Recently, there has been an increasing application of squirrel cage induction generators to small hydro power plants due to their simple and rugged structure, low construction cost and easy of maintenance. Induction generators receive a large inrush current at the time of grid connection, which causes a drop in the system voltage. The remaining voltage must be high enough to ensure the starting current of the motor. Induction machines have been designed with a variety of rotor shapes with the aim of reducing the current. In this paper, we analyzed the effects of induction generator capacity in order to ensure that the voltage drop does not exceed the allowable range during connection to the grid connection system.

Key words Grid connection(계통 연계), Induction generator(유도발전기), Inrush current(돌입전류), Small hydropower(소수력), Voltage drop(전압강하)

Nomenclature

S/S : sub-station
D/L : distribution line
TR : transformer
IG : induction generator
P,Q,S: active power, reactive power, apparent power

1. 서론

수력에너지는 청정에너지로서 에너지 변환효율이 다른

신재생에너지에 비해 매우 높은 편이다.^[1,2] 그래서 청정에너지를 이용하기 위해 용량이 작은 곳이라도 에너지를 얻고자 하는 연구가 많이 진행되고 있다.

물이 가지고 있는 위치에너지를 수차에 의해 기계에너지로 변환한 다음 이를 전기에너지로 변환하는데 사용하는 발전기에는 동기발전기와 유도발전기가 사용되고 있다. 동기발전기는 기동 및 운전시 안정성이 높아 주로 발전소 출력이 높을 경우에 많이 사용하고, 유도발전기는 동기발전기에 비해 튼튼하고, 제작비용이 저렴하며 유지 및 보수가 쉬워 최근에 적용하는 곳이 점차 높아지고 있다.^[3,4,5] 유도발전기를 소수력에 적용할 때 가장 문제가 되는 부분은 계통 연계시 돌입전류에 의한 전압강하이다.^[3,4,5,6] 그래서 출력 용량이 크지 않는 소수력 발전소에 유도발전기를 제한적으로 적용하여 왔다.^[3,5,6,7,8]

1) School of Electrical Engineering, Gangneung-Wonju National University E-mail: jgkim@gwnu.ac.kr
Tel: +82-33-760-8785 Fax: +82-33-760-8781

유도발전기는 유도전동기를 동기속도 이상으로 운전할 경우 전력을 발생시킬 수 있다. 유도전동기를 기동시 기동전류를 줄이는 방법으로 회전자의 구조를 변경할 경우 가능하다.^[4,5] 기동시 큰 전류를 줄이기 위해 회전자는 보통 농형보다는 이중농형 또는 심구형을 적용하고 있다.^[3,4] 같은 출력용량에서 심구형 회전자를 적용한 유도발전기를 계통에 투입할 경우 이중농형 회전자보다 전압강하가 조금 더 낮음을 확인한 바 있다.^[3,4,5] 소수력발전소는 대부분 배전선로의 말단에 연결하므로 배전선로의 조건에 맞추어 전압강하 허용범위 안에서 운전할 수 있는 유도발전기의 적합용량 선정이 필요하다.

그래서 본 논문에서는 심구형 회전자를 가진 유도발전기가 소수력 발전소에 적용될 때 돌입전류에 의해 발생하는 전압강하의 허용 범위에서 가능한 발전출력 용량에 대해 분석하였다.

2. 계통구성과 유도발전기

2.1 계통 구성

유도발전기가 설치된 수력 발전소는 대부분 변전소로부터 멀리 떨어진 곳에 설치하고 있다. 변전소는 배전선로에 연결된 수용가에 전력을 공급하고 있으며, 부하 말단에 설치된 유도발전기는 발전된 유효전력을 배전선로에 공급하고 있다. 소수력에 설치하는 유도발전기의 1차측 전압은 저압이지만, 변압기를 통해 특고압으로 변환시켜 배전계통에 연결하여 전원으로 부하에 필요한 전력의 일부를 분담하고 있다.

Fig. 1은 배전선로의 말단에 설치된 소수력 발전소의 구성도로 수차에 의해 발생된 기계적인 에너지가 유도발전기

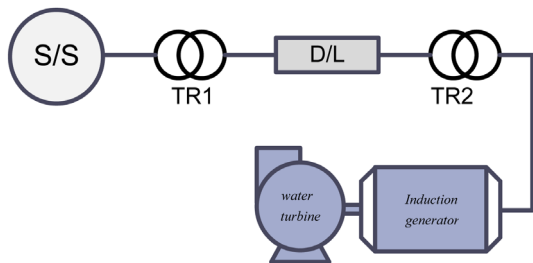


Fig. 1. Connection schematic diagram of Induction generator

에 의해 전기적 에너지를 변환되어 변압기를 통해 배전선로에 전력을 공급하도록 연결된다.

Fig. 1에서 TR1은 변전소의 변압기이고, TR2는 유도발전기에서 발전한 전압을 배전선로에 연결하기 위해 설치된 변압기이다. 이 두 변압기 사이에는 배전선로로 수용가에 필요한 전력을 공급하고 있다.

Fig. 2는 계통 말단에 설치된 유도발전기에서 계통에 연결될 때 위치별 전압, 전류, 전력을 나타낸 것이다. 부하에 필요한 전력은 변전소에서 주로 공급되지만, 발전기를 운전한 경우 전원이 부하의 유효전력을 일부 부담할 수 있다. 유도발전기는 동기속도보다 높은 속도로 회전하는 필요한 회전자계를 발생하기 위해 전압원에 연결되어야 한다. 즉, 회전자계를 발생하기 위한 자화전류에 해당되는 무효전력은 전원으로부터 공급받아야 하므로 계통에서의 역할은 떨어지게 된다.

Fig. 2에서 P_g 와 Q_g 는 각각 발전기의 유효전력과 무효전력을 의미하고, 점자 U_s 와 U_g 는 각각 계통 및 발전기 단자의 전압이다. I_g 는 계통 연계시 발생하는 돌입전류에 해당된다.

2.2 유도발전기

수차발전기의 회전자 가속도는 뉴턴의 제 2 법칙의 형태에 따른 회전축에서의 실제 토크에 의해 결정된다.

$$J \frac{dw_m}{dt} + Dw_m = T_m - T_g \quad (1)$$

여기서 J 는 회전자 관성 모멘트, w_m 은 회전자의 각속도, D 는 마찰계수이며, T_m 와 T_g 는 각각 수차 터빈에 작용하는 기계 토크와 발전기의 전기적 토크이다. 식 (1)에서 발전기의 전자계 토크는 다음과 같이 d, q축의 전류와 자속, 극수의 관계로부터 구할 수 있다.

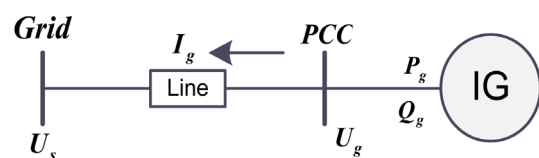


Fig. 2. Power flow diagram

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

식 (1)의 양쪽에 각속도를 곱할 경우 식 (3)과 같이 전력의 흐름을 알 수 있다.

$$Jw_m \frac{dw_m}{dt} + Dw_m^2 = P_m - P_g \quad (3)$$

식 (3)에서 오른쪽 항은 전력의 흐름이고, 왼쪽 항은 각운동량을 나타내고 있다. 여기서 발전기 회전자에 전달되는 기계적 에너지는 P_m 이고, 발전기의 전력 P_g 는 유효전력과 무효전력의 성분으로 구성된다.

식 (1)과 (3)에서의 발전기의 관성 모멘트는 출력과 회전수로부터 다음과 같이 구할 수 있다.^[9]

$$J = \frac{1000}{4} \times \frac{7 \times \left(\frac{MVA}{100}\right)^{0.25}}{2.74 \times \left(\frac{1}{MVA}\right) \times \left(\frac{N}{1000}\right)^2} [\text{kg} \cdot \text{m}^2] \quad (4)$$

발전기가 정격속도에 도달하기까지의 가속정수는 관성모멘트와 출력으로부터 다음과 같이 구할 수 있다. 이 가속정수는 발전기를 계통에 투입하는 시간으로 설정하면 된다.

$$T_j = \frac{Jw_n^2}{P_e} \times 10^{-3} [\text{sec}] \quad (5)$$

Fig. 3은 심구형 유도발전기 T형 등가회로도를 나타낸 것이다. Fig. 3에서 r_s 는 고정자 저항, l_s 는 고정자 누설인덕턴스, l_m 는 자화인덕턴스, r_1, r_2 은 위치에 따른 회전자 저항, l_1, l_2 도 위치에 따른 회전자 누설인덕턴스이다.

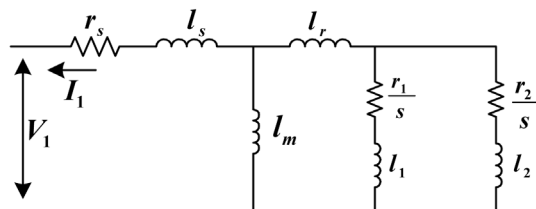


Fig. 3. Equivalent circuit diagram of deep bar induction generator

수차의 축에 의해 발생한 기계에너지가 회전자에 의해 공극을 거쳐 고정자에 나타나는 유효전력과 회전자계를 발생시키는데 필요한 무효전력은 각각 다음과 같다.

$$P_g = Re\left(\frac{3}{2} \times V_1 \times \bar{I}_1\right) \quad (6)$$

$$Q_g = Im\left(\frac{3}{2} \times V_1 \times \bar{I}_1\right) \quad (7)$$

계통 연계시 발전기의 고정자에 흐르는 전류 I_s 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.^[8]

$$I_s = \frac{2}{\sqrt{3}} Re(I_1) \quad (8)$$

유도발전기를 계통에 연결할 때 아주 짧은 기간 동안 발생하는 높은 값을 가지는 돌입전류는 배전선로에 전압강하와 발전기가 연결된 기계시스템에 토크 스파이크 등을 일으킬 수 있다. 이 돌입전류 I_g 는 발전기의 유효전력과 무효전력을 계통전압으로 나누거나 발전기의 피상전력을 발전기 단자전압으로 나누어 구할 수 있다.

$$I_g = \frac{P_g - jQ_g}{U_s} = \left(\frac{S_g}{U_g}\right)^* \quad (9)$$

본 연구에 적용된 3상 심구형 농형 유도발전기의 용량별 사양은 Table 1과 같다. 발전기 출력이 높을수록 효율도 조금씩 높아진다.

Table 2는 Table 1에 제시된 각 용량의 발전기에 대한 파라미터와 용량별 관성 모멘트를 나타낸 것이다. 이 발전기 파라미터를 Fig. 1에 제시된 회로에 적용하여 돌입전류와 전압강하를 분석하였다.

Table 1. Induction generator specification

Quantity	Value			
Voltage	0.69 kV	0.69 kV	0.69 kV	0.69 kV
Rated output	100 kW	500 kW	1,000 kW	1,500 kW
Pole	10	10	10	10
Power factor	0.84	0.84	0.84	0.84
Efficiency	90%	91%	92%	93%

Table 2. Generator parameters according to output

구분	100 kW	500 kW	1,000 kW	1,500 kW
r_s [Ω]	0,26951	0,04841	0,021392	0,012403
l_s [H]	0,00189	0,000132	7E-5	4,9E-5
l_m [H]	0,01959	0,003982	0,002083	0,001451
l_r [H]	0,00189	0,000132	7E-5	4,9E-5
r_1 [Ω]	0,13304	0,02689	0,013734	0,009192
r_2 [Ω]	0,05661	0,011624	0,005937	0,004102
l_2 [H]	0,00146	0,000302	0,000156	0,000108
J [kgm ²]	21,9	163	389	646

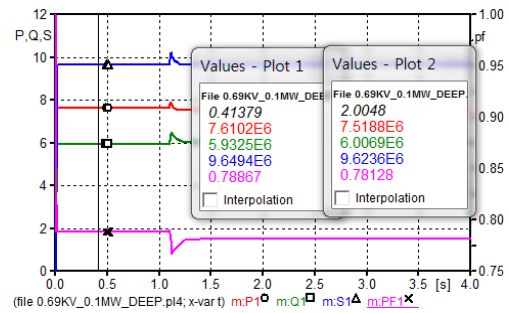
3. 계산 및 결과 분석

수력 발전소에 전압강하 허용범위를 초과하지 않은 범위에서 유도발전기를 적용할 수 있는 용량의 범위를 확인하기 위해 실제 배전선로의 현장 조건을 고려하여 발전기 출력용량에 따라 해석하였다. 발전기의 출력이 다르기 때문에 발전기에 연결된 변압기의 용량도 출력에 따라 조정하였다. 22.9kV 배전선로의 용량은 일반적으로 10,000kVA 전후이다. 그래서 본 연구에서는 배전선로의 부하용량은 10,000kVA에 역률 0.8, 선로 길이는 변전소로부터 발전기까지는 10km로 선정하였다. 본 연구에서는 유도 발전기의 출력 100, 500, 1000, 1500kW 4가지에 대해 전자계과도해석 프로그램(EMTP)을 이용하여 계통연계시의 특성을 분석하였다.^[10]

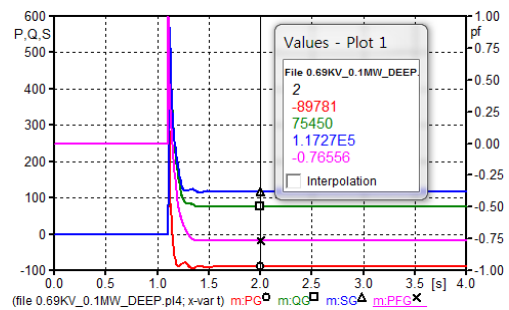
우선 100kW 출력의 유도발전기를 기동하여 계통에 연결한 경우 전력의 흐름 및 역률의 변화는 Fig. 4와 같다. 발전기를 계통에 연결할 때 투입시간은 동기속도 이상이 되는 순간에 시행하였다.

Fig. 4(a)에서와 같이 계통에서 공급되는 유효전력(P1:○)은 발전기 투입 후 약간 줄어들지만(7,610 → 7,518kW), 무효전력(Q1:□)은 발전기에 필요한 무효전력을 계통에서 공급해야 하므로 약간 증가(5,932.6 → 6,006.9kVAr)한 것을 알 수 있다. Fig. 4(b)는 발전기측에서 전력 및 역률(PFG:×)을 나타낸 것으로서 유효전력을 배전선로에 공급하므로 부호가 반대로 되기 때문에 역률도 따라서 부(-)가 된다.

100kW 유도발전기를 계통에 연계할 때 발생하는 돌입 전류의 크기와 전압변동은 Fig. 5와 같다. 여기서 중요한

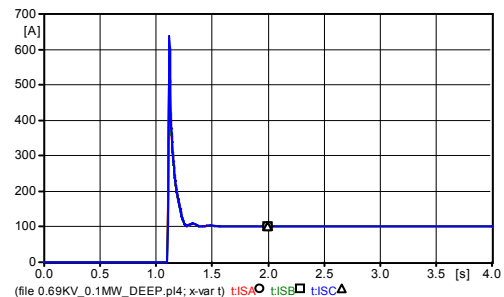


(a) Power side

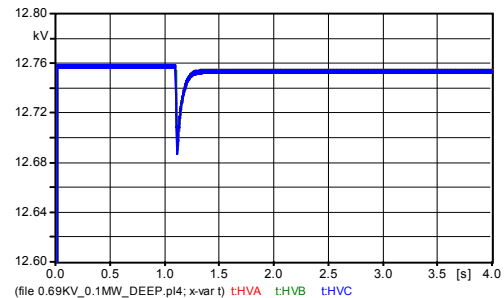


(b) Generator

Fig. 4. Power and power factor at the power & generator side



(a) Inrush current



(b) Voltage drop

Fig. 5. Inrush current & voltage drop of the 100 kW generator

부분은 발전기의 회전속도가 동기속도 근처에서 계통에 투입하는 것이다. 계통에 발전기를 투입하는 시간은 1.1초로 이때 발생하는 돌입전류는 운전전류의 6배를 약간 상회하

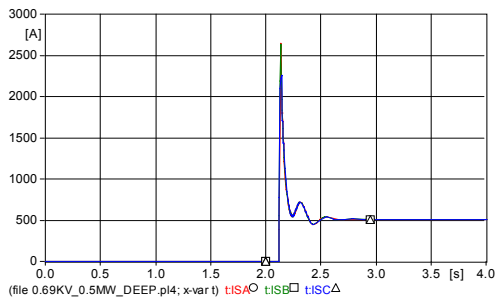
고 있지만, 지속시간은 아주 짧은 편이다. 이는 발전기의 동기속도 근처에서 시행하기 때문이다.

100kW 심구형 농형 유도발전기의 계통 투입시 변압기의 특고압측 상전압 변화는 Fig. 5(b)와 같다. 발전기를 계통에 연계한 이후 전압이 연계전에 비해 낮게 나타나는 것은 무효전력의 지원 부족으로 초기전압으로 복귀하지 않기 때문이다. 발전기를 저압측 변압기에 연결한 경우 특고압측 전압강하율은 0.5%밖에 되지 않지만, 저압측 전압강하율은 11%로 높게 나타났다. 100kW 출력용량의 유도발전기를 배전선로에 연계시 전압강하율이 10% 이하이므로 안정적인 운전이 가능하다고 판단된다.

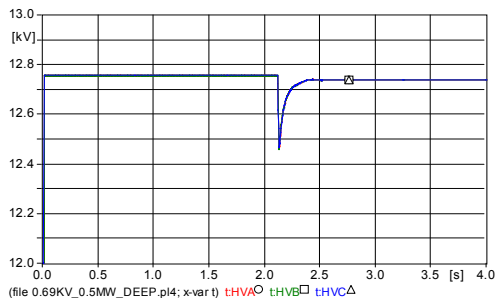
Fig. 6은 500kW 심구형 농형 유도발전기의 계통 투입시 기동전류와 전압변동에 대한 해석 결과이다. 계통에 투입하는 시간은 2.12초로 100kW보다는 약간 늦다는 것을 알 수 있다.

계통 연계시 돌입전류는 정상운전전류의 5.2배가 흐르고, 계통에서 발생은 전압강하는 2.2%로 허용범위 안에 들어감을 확인할 수 있다. 따라서 본 해석의 배전선로 계통에서는 유도발전기의 운전이 가능함을 알 수 있다.

Fig. 7은 1,000kW 심구형 농형 유도발전기의 계통 투



(a) Inrush current



(b) Voltage drop

Fig. 6. Inrush current & voltage drop of the 500 kW generator

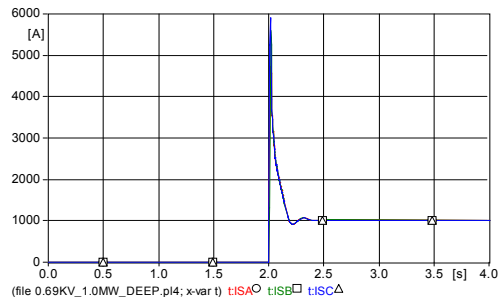
입시 기동전류와 전압변동에 대한 해석 결과이다. 계통에 투입하는 시간은 2.0초로 100kW보다 약간 늦지만, 500kW보다 조금 빠르다는 것을 알 수 있다.

Fig. 7에서 계통연계시 돌입전류는 운전전류의 5.26배로서 이때 발생하는 전압강하율은 4.78%로서 배전선로의 연계 허용범위 이내임을 알 수 있다.

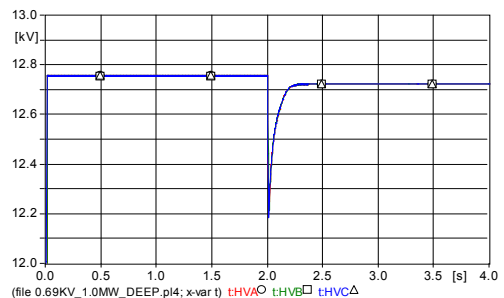
Fig. 8은 1500kW 심구형 농형 유도발전기의 계통 투입시간을 2.13초로 한 경우 돌입전류와 전압변동에 대한 해석 결과이다.

Fig. 8의 돌입전류에 의한 전압강하율은 7.2%로서 배전선로의 연계 허용범위를 초과함을 알 수 있다. 따라서 본 해석 조건의 선로와 부하 용량이 사용되는 곳에서는 1,500kW의 유도발전기를 적용하면 돌입전류에 의한 전압강하로 계통에 미치는 영향이 커질 수 있다. 따라서 돌입전류를 줄일 수 있는 보완이 필요하다고 판단할 수 있다. 또한 유도발전기의 출력용량이 증가할수록 전압강하율은 증가하며, 돌입전류의 크기도 용량에 비례함을 알 수 있다. 발전기를 계통에 투입할 때 용량에 따라 투입시간을 정확하게 설정해야 전압강하의 시간을 최소화할 수 있다.

전압강하 지속시간을 최소한으로 줄이기 위해서는 발전

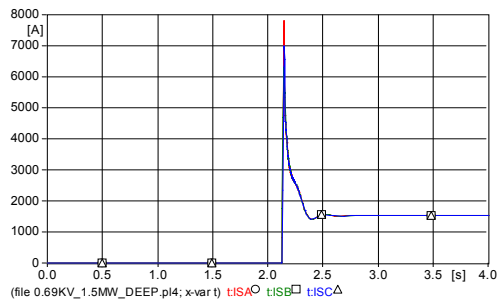


(a) Inrush current

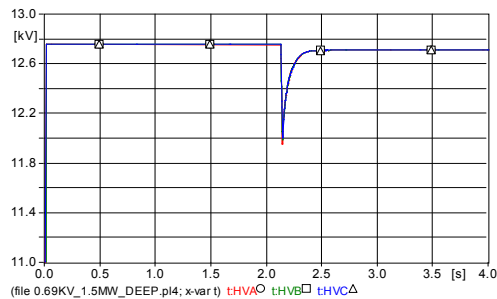


(b) Voltage drop

Fig. 7. Inrush current & voltage drop of the 1,000 kW generator



(a) Inrush current



(b) Voltage drop

Fig. 8. Inrush current & voltage drop of the 1,500 kW generator

기의 회전속도가 동기속도에 도달하는 시점에 계통에 연계하면 된다. 돌입전류의 최대 크기는 매우 짧은 시간에 감소함을 알 수 있다.

4. 결론

청정에너지 생산을 위한 다양한 연구가 진행되면서 물의 위치에너지를 전기에너지로 이용하기 위한 소수력에 대한 관심이 높아지고 있다. 그래서 소수력발전소에 동기발전기에 비해 경쟁력이 높은 유도발전기를 적용하는 연구와 설치 실적이 높아지고 있다. 농형 유도발전기 중에서 계통 투입시 큰 돌입전류가 발생하는 것을 줄이는데 심구형 회전자가 효과적이기 때문에 본 연구에서 이를 적용하였다.

본 연구에서는 배전선로에 유도발전기를 설치 운영할 때 가장 문제가 되는 돌입전류에 의한 전압강하의 허용범위 안에서 적용 가능한 용량을 산정하기 위해 1,000kW 전후의 정격용량을 적용하였다. 해석결과 주어진 배전선로의 조건하에서 발전기 출력용량이 1,000kW까지는 가능하지만,

1,000kW를 초과할 경우 전압강하의 허용범위를 초과한다는 것을 확인하였다. 따라서 이 범위를 초과하는 용량은 리액터 기동이나 소프트 기동방법을 적용해야 할 것으로 판단된다.

본 연구결과는 소수력 발전소에 유도발전기의 적용시 배전선로의 전압강하를 허용범위 안에서 운전할 수 있는 발전기 출력용량을 산정하는데 도움이 될 것으로 판단된다.

References

- [1] MOKE & KEMCO, 2012, "New & Renewable Energy".
- [2] Research Report of Korea Rural Community Corporation, 2012, "A Study for Characteristics Analysis and High Efficiency Operation of Small Hydro Power Plants".
- [3] M. Godoy Simoes & Felix A. Farret, 2004, "Renewable Energy Systems-Design and Analysis with Induction Generators", CRC Press.
- [4] Jong-Gyeum Kim, 2015, "A Study on the Voltage Drop of Induction Generator Along the Rotor Shape", KIEE, Vol.64P, pp.62-66.
- [5] Jong-Gyeum Kim, 2014, "Characteristics Analysis for Motor or Generator Operating of Induction Machine with Deep or Double Cage Rotor", New & Renewable Energy, Vol.10, pp.3-8.
- [6] Jong-Gyeum Kim, 2014, "Analysis for Voltage Fluctuation and Power Flow at the Grid-Connected Time of Squirrel-Cage Induction Generator", KIIEE, Vol.28, No.6, pp.45-51.
- [7] K. S. Pankaj, J. P. Nelson, 1997, "Application Guidelines for Induction Generators", in Proc. International Conference on Electrical Machines and Drives, Milwaukee, Wisconsin, May 18-21, Paper WC1/5.1 - WC1/5.3.
- [8] Masaki Sato et al., 1991, "Study on the Inrush Currents of Induction Generator due to Abrupt Connection Utility Power Networks", TIEE Japan, Vol.111-D, No.8, pp. 689-697
- [9] K-Water Report, 2006, "Design Criteria of Hydroelectric Power Equipment".
- [10] H.W. Dommel, 1986, "Electromagnetic Transients Program. Reference Manual (EMTP Theory Book)", BPA.