



[2018-3-HP-005]

# 화력 발전소에 설치한 유도발전기의 계통 연계시 돌입전류에 의한 전압강하 저감

김일중<sup>1)</sup> · 김종겸<sup>2)\*</sup>

## Voltage Drop Reduction on Inrush Current during Grid Interconnection of Induction Generators installed in Thermal Power Plants

Il-Jung Kim<sup>1)</sup> · Jong-Gyeum Kim<sup>2)\*</sup>

Received 19 July 2017 Revised 3 January 2018 Accepted 8 January 2018

**ABSTRACT** Squirrel cage induction generators are frequently applied to small to medium-sized hydro power plants, because of their simple and rugged structure, low construction cost and easy maintenance. Therefore, it is expected that induction generators will be used more and more in hydroelectric power generation in the future. The biggest problem in the application of induction generators is the large inrush current at the grid connection. This inrush current is large enough to equal the current flowing at the start of the motor, causing a voltage drop in the connected distribution system. Therefore, the range of voltage fluctuation is specified differently according to the generator output. This paper is the result of a study on the capacity range of induction generators that does not exceed the allowable range of voltage drop in the distribution line.

**Key words** Grid connection(계통연계), Induction Generator(유도발전기), Inrush Current(돌입전류), Hydro Power System(수력발전 시스템), Voltage Drop(전압강하)

### Nomenclature

P : Active power, W

Q : Reactive power, VAR

S : Apparent power, VA

PCC : Point of Common Coupling

S/S : Sub-station

### subscript

IG : Induction Generator

1) Department of Mechanical Engineering, Hoseo University

2) Department of Electrical Engineering, Gangneung-Wonju National University

\*Corresponding author: jgkim@gwnu.ac.kr

Tel: +82-33-760-8785

Fax: +82-33-760-8781

### 1. 서론

수력에너지는 청정에너지로서 다른 신·재생에너지에 비해 에너지 변환효율이 매우 높은 전력발생 설비로 초기 투자비는 약간 높지만, 한번 설치할 경우 가동연한이 길고 에너지 발생용량이 매우 큰 편이다.<sup>[1,2]</sup> 그래서 출력이 낮아도 설치가 가능한 곳에서는 수력설비를 적극적으로 개발하고 있다.

수력발전은 물이 가지고 있는 위치에너지를 유동에너지로 변환한 다음 기계에너지에서 전기에너지로 변환하는데 동기발전기와 유도발전기가 주로 사용되고 있다.<sup>[3-7]</sup> 유도발전기는 동기발전기에 비해 제작비가 경제적이고, 튼튼하여 유지 및 보수가 쉬워 많은 수력발전소에 많이 적용되고 있다.<sup>[3-7]</sup> 이 유도발전기의 적용시 가장 문제가 되는 것은 계통 연계시의 돌입전류에 의한 전압강하이다.<sup>[3-6,8]</sup> 그래서 출력 용량이 크지 않는 곳에서는 주로 유도발전기를 많이 적용하여 왔다.<sup>[3,5-10]</sup>

최근 화력발전소와 같은 곳에서 발전소 냉각수로 사용된 물을 바다로 방류할 때 많은 유량을 가진 유동에너지를 이용하는 기술이 활발하게 전개되고 있다. 이와 같은 곳에서는 출력용량이 높아도 모선에 가깝기 때문에 유도발전기를 적용할 수 있다. 그러나 발전기의 용량이 클수록 계통 투입시 돌입전류에 의한 전압강하는 다른 구내설비에 더 큰 영향을 줄 수 있으므로 발전 출력에 따라 전압차이를 다르게 정하고 있는데 발전기의 출력이 1,500kW를 초과할 경우 전압차는 3% 이내가 되도록 요구하고 있다.<sup>[11]</sup>

그래서 본 논문에서는 화력발전소에서 출력용량이 큰 유도발전기를 적용하여 계통에 투입할 때 돌입전류에 의한 전압강하가 허용 범위안에 들어가도록 리액터 기동방법을 적용하고, 발전기의 속도를 조정하여 전압강하를 줄일 수 있는 방법을 제안하고자 한다.

## 2. 계통 구성과 유도발전기

### 2.1 계통 구성<sup>[4]</sup>

유도발전기는 대부분 경우 변전소로부터 멀리 떨어진 곳에 설치하는 경우도 많지만, 발전소 구내에서도 사용하는 경우도 있다. 유도발전기의 출력이 낮을 경우 발전소의 1차 전압은 저압으로 사용하지만, 출력이 커질 때는 발전기의 1차 단자전압을 고압으로 변압기를 통해 특고압으로 변환시켜 구내 배전계통에 연결하여 사용하고 있다.

Fig. 1은 발전소 구내에 설치된 발전시스템 구성도로 수차에 의해 발생된 기계적인 에너지를 전기적 에너지로 변환하기 위해 변압기와의 사이에 유도발전기를 연결하여 발전소 구내에 필요한 전력을 공급하도록 구성되어 있다.

Fig. 1에서 첫 번째 변압기는 발전소에서 송전선로에 관계된 것이고, 두 번째 변압기는 유도발전기에서 발전한 전압을 구내배전선로에 연결하기 위한 변압기이다. 이 두 변압기 사이에는 배전선로가 연결되어 있다.

Fig. 2는 발전소 구내에 설치된 유도발전기에서 구내 배전계통에 연결할 때 위치별 전압, 전류, 전력흐름을 나타낸 것이다. 유도발전기는 회전자계에 필요한 무효전력을 전원으로 부터 공급받기 때문에 역률은 낮은 편이다. Fig. 2에서 PCC는 발전기의 1차 전압지점으로 구내 다른 고압설비와 연결되어 있다.

Fig. 2에서  $P_g$ 와  $Q_g$ 는 각각 유도발전기의 유효전력과 무효전력을 나타내고, 첨자  $U_s$ 와  $U_g$ 는 각각 특고압 계통 및 발전기 단자의 전압이다.  $I_g$ 는 계통 연계시에 발생하는 돌입전류이다.

본 연구에서는 3,000kW 출력의 유도발전기 2대가 배전

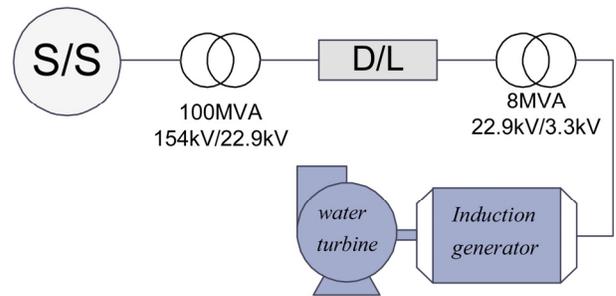


Fig. 1. Connection Schematic diagram of Induction generator

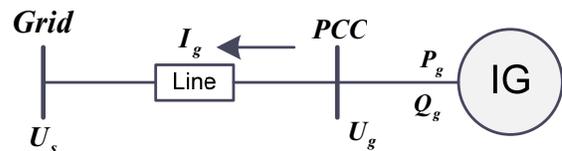


Fig. 2. Power flow diagram

Table 1. Parameters of generator transformer

Items	Values
Output	8,000 kVA
Voltage	22,9 kV / 3.3 kV
%Impedance	6.6%
Connection	Y-Δ
No-load loss	10 kW
Load loss	40 kW
Efficiency	99.37%

선로 연결되어 있다. 유도발전기를 운전하여 구내에 사용하기 위해 사용된 몰드 변압기의 정격은 발전기 출력보다 약간 높은 용량을 선정하였으며, 사용된 변압기의 파라미터는 Table 1과 같다.

### 2.2 유도발전기

수차발전기의 회전자 가속도는 뉴턴의 제 2 법칙에 따라 회전축의 발생 토크에 의해 결정된다.<sup>[4]</sup>

$$J \frac{dw_m}{dt} + Dw_m = T_m - T_g \tag{1}$$

식 (1)에서  $J$ 는 수차 발전기의 관성 모멘트[ $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ ]이고,  $w_m$ 은 각속도[ $\text{rad/s}$ ],  $D$ 는 마찰계수[ $\text{rad/NMs}$ ]이며,  $T_m$ 와  $T_g$ 는 수차에 작용하는 기계적인 토크[Nm]와 발전기의 전기적 토크[Nm]를 의미한다.

전력의 흐름을 알기 위해서는 식 (1)의 양쪽에 각속도를 곱하면 식 (2)와 같다.

$$Jw_m \frac{dw_m}{dt} + Dw_m^2 = P_m - P_g \tag{2}$$

식 (2)에서 우측 항은 전력의 흐름을 의미이고, 좌측 항은 각 운동량을 의미한다. 여기서 유도발전기의 회전축에 전달되는 기계적인 에너지는  $P_m$ 이고, 유도발전기의 전력은  $P_g$ 이다.

수력발전소에 적용되고 있는 수차발전기의 관성 모멘트는 출력과 회전수로부터 다음과 같이 구할 수 있다.<sup>[4,10]</sup>

$$J = \frac{1000}{4} \times \frac{7 \times \left(\frac{MVA}{100}\right)^{0.25}}{2.74 \times \left(\frac{1}{MVA}\right) \times \left(\frac{N}{1000}\right)^2} [\text{kg}\cdot\text{m}^2] \tag{3}$$

식 (3)의 관성모멘트는 발전기가 정상적인 속도에 도달하는 시간 산출과 계통 투입시 돌입전류에 의해 전압강하가 발생하여 회복할 때 이용할 수 있다.

Fig. 3은 농형 유도발전기의 T형 등가회로도를 나타낸 것이다.<sup>[4,5,13]</sup> Fig. 3에서  $r_s$ 는 고정자 저항,  $l_s$ 는 고정자 누

설인덕턴스,  $l_m$ 는 자화인덕턴스,  $r_r$ 은 회전자 저항,  $l_r$ 은 회전자의 누설인덕턴스이다.

수차의 축에 의해 발생한 기계에너지가 회전자에 의해 공극을 거쳐 유도발전기의 고정자에 나타나는 유효전력과 회전자계를 발생시키는데 필요한 무효전력은 각각 다음과 같다.<sup>[4-6,8]</sup>

$$P_g = Re \left( \frac{3}{2} \times V_1 \times \bar{I}_1 \right) \tag{4}$$

$$Q_g = Im \left( \frac{3}{2} \times V_1 \times \bar{I}_1 \right) \tag{5}$$

계통 투입시 발생하는 돌입전류는 유도발전기의 유효전력과 무효전력을 계통전압으로 나누거나 피상전력을 단자전압으로 구할 수 있다.<sup>[12]</sup>

$$I_{inrush} = \frac{P_g - jQ_g}{U_s} = \left( \frac{S_g}{U_g} \right)^* \tag{6}$$

본 연구에 사용된 3상 유도발전기의 정격사양은 Table 2와 같다.

Table 3은 Table 2에 제시된 용량의 유도발전기에 대한 파라미터와 관성 모멘트를 나타낸 것이다. 이 유도발전기

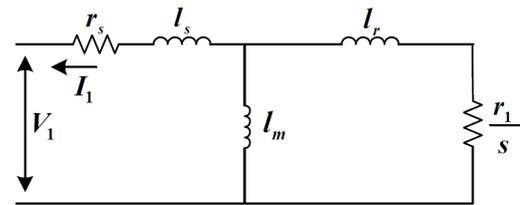


Fig. 3. Equivalent circuit diagram of Squirrel cage Induction generator

Table 2. Induction generator specification

Quantity	Value
Voltage	3.3 kV
Rated output	3,000 kW
Pole	8
Power factor	0.85
Efficiency	92%

Table 3. Parameters of Induction Generator

Items	Values
$r_s$ [ $\Omega$ ]	0.049247
$l_s$ [H]	0.0008211
$l_m$ [H]	0.016675
$l_r$ [H]	0.0008211
$r_1$ [ $\Omega$ ]	0.101596
$J$ [ $\text{kgm}^2$ ]	984

의 파라미터를 Fig. 1과 같은 조건에 적용하여 돌입전류에 의한 전압강하를 분석하였다.

돌입전류에 의한 전압강하를 계산할 때 케이블의 파라미터와 길이가 중요하다. 본 연구에 적용된 케이블은 3.3kV 240mm<sup>2</sup>로서 유도발전기 단자에서 변압기까지의 거리는 150m이다.

### 2.3 돌입전류 저감용 리액터

유도발전기를 계통에 연결시 전동기의 기동시와 거의 유사한 큰 돌입전류가 흐르게 된다. 이와 같은 높은 돌입전류 저감을 위해 리액터를 통해 전원을 공급한 다음 일정속도 이상에서 병렬로 설치한 스위치로 절환하고 있다.<sup>[5,8]</sup> 이때 사용하는 리액터의 용량은 돌입전류( $I_{inrush}$ )의 크기를 기준으로 다음과 같이 탭을 설정하고 있다. 우선 리액터의 탭 전류는 다음과 같이 구하면 된다.

$$I_{tap} = \frac{\alpha}{100} \times I_{inrush} \quad (7)$$

식 (8)에서  $\alpha$ 는 리액터의 탭 설정비율이다.

리액터 탭 용량 설정시 중요한 부분 중에 하나는 탭의 전압이다. 탭의 전압은 상전압( $V_p$ )으로 탭의 설정 비율을 고려하여 다음과 같이 구한다.

$$V_{tap} = V_p \left( 1 - \frac{\alpha}{100} \right) \quad (8)$$

탭의 임피던스는 탭 전압과 탭의 전류로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

Table 4. Reactor parameters for reducing inrush current

Items	50%	65%	80%
Tap current [A]	1,488	2,007	2,470
Tap voltage [V]	952	666	381
Impedance [ $\Omega$ ]	0.617	0.332	0.154
Inductance [mH]	1.637	0.8814	0.4092

$$Z_{tap} = \frac{V_{tap}}{I_{tap}} \quad (9)$$

Table 4는 본 연구에서 적용된 유도발전기를 계통에 연결할 때 발생할 수 있는 돌입전류를 가지고서 탭의 설정값에 따른 전류, 전압, 임피던스와 인덕턴스를 구한 것이다.

### 2.4 전압강하

전원측에서 부하측에 이르기까지 전압에 차이가 나는 경우를 전압강하라고 한다. 전압강하는 전류의 크기에 의해 가장 영향을 많이 받는데, 유도전동기의 경우 직입 기동시 발생하는 큰 기동전류와 유도발전기의 경우 계통 투입시 발생하는 돌입전류가 해당된다.

유도발전기에서 발생하는 전압강하는 계통투입전의 전압( $V_1$ )값과 계통투입 후 돌입전류에 의해 일시적으로 전압이 가장 낮아지는 값( $V_2$ )에 대해 다음과 같이 그 비율을 구할 수 있다.

$$V_{drop} [\%] = \frac{V_1 - V_2}{V_1} \times 100 \quad (10)$$

## 3. 계산 및 결과 분석

본 연구에서는 발전소 구내에서 전압강하 허용범위를 초과하지 않은 범위 안에서 기동방법의 개선과 투입시 속도 조정을 통해 유도발전기를 적용할 수 있는 출력의 한계를 분석하였다. 본 연구에서는 농형 유도 발전기의 출력 3,000kW에 대해 전자계과도해석 프로그램(EMTP)을 사용하였다.<sup>[14]</sup>

우선 직입기동을 통해 발생한 전력을 계통에 투입할 때 발생하는 것의 해석결과는 다음과 같다. Fig. 4는 유도발전기를 직입 기동하여 구내 배전계통에 연계시 전력 및 역

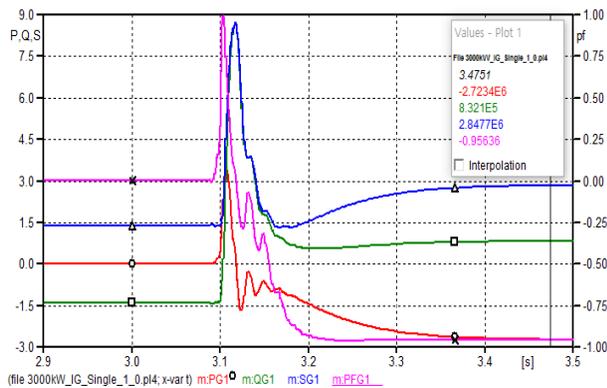


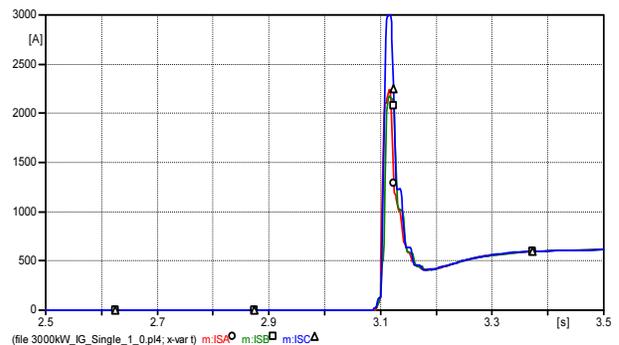
Fig. 4. Power and power factor before and after grid connection

률의 변화를 해석한 것이다. 계통연계시의 유도발전기는 동기속도에서 투입하는 것으로 설정하였다. Fig. 4의 각 그래프는 유효전력(PG1:○), 무효전력(QG1:□), 피상전력(SG1:△) 및 역률(PFG1:×)을 의미한다. 계통 투입 순간에는 일시적으로 전동기 동작을 하지만, 바로 발전기로 전환됨을 알 수 있다. 이때 발전기에서 생산된 유효전력은 2,723kW이고, 콘덴서에 의한 무효전력의 공급으로 유효전력에 대한 피상전력의 비율인 역률(pf)은 0.95가 되었다. 유도발전기에서 생산되는 전력이 계통 투입 후에 부(-)로 나타난 것은 전원측과 반대방향이므로 역률은 부(-)의 값으로 나타나게 된다.

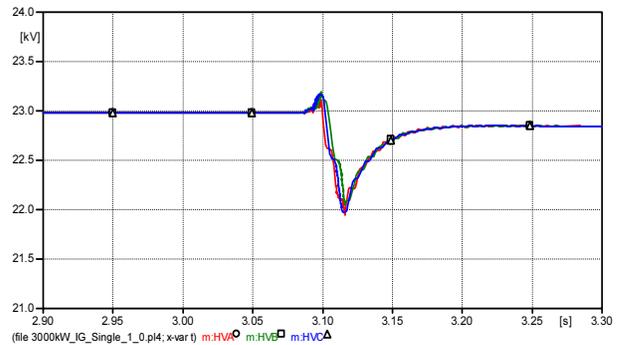
Fig. 5는 유도발전기를 직입 기동하여 계통 연계시의 발생한 돌입전류와 특고압의 실효치 전압을 나타낸 것이다.

Fig. 5(a)에서 계통 투입시 발생하는 어느 한상의 돌입전류는 정격전류의 4.6배가 되며, 이때 특고압측의 전압변동은 Fig. 5(b)와 같다. 전압강하가 일어나기 전에 전압이 약간 증가하는 이유는 전동기 동작이 일시적으로 일어나기 때문이다. 전압이 배전계통 연계 이후에도 연계 전에 비해 약간 낮은 이유는 무효전력의 지원 부족으로 초기 전압으로 복귀가 어렵기 때문이다. Fig. 5(b)에서와 같이 돌입전류에 의해 특고압측 전압강하는 상별로 4.51% 4.08% 및 4.40%가 되었다. 이 전압강하는 배전선로 계통에 연결되는 특고압측의 3% 범위를 약간 초과하므로 안전하게 운전할 수 있기 위해서는 별도의 대책이 요구된다.

유도발전기를 기동하여 계통에 투입할 경우 발생하는 전압강하가 허용 범위 이내가 되도록 제시된 리액터의 탭 80%와 65% 설정은 모두 허용 전압범위를 초과하였다. 그래서



(a) Inrush current



(b) Voltage at the EHV side

Fig. 5. Inrush current and voltage before and after grid connection by direct starting

리액터의 탭을 50%에 설정하고서 동기속도보다 약간 낮은 회전수에서 탭을 먼저 투입하고서 동기속도에서 리액터와 병렬로 설치한 스위치를 투입하여 전원을 공급할 때 전력 및 역률의 변화와 돌입전류와 특고압 전압은 각각 Fig. 6 및 7과 같다.

Fig. 6은 리액터 탭의 조정을 통해 계통에 연계한 경우 전력과 역률의 변화를 해석한 결과이다. 직입 기동에 의해 해석한 것과 리액터 탭을 통한 전동기로 운전하는 일시적인 순간지속 외에는 같은 결과를 얻을 수 있다.

Fig. 7은 리액터를 통해 계통 연계한 경우 돌입전류와 특고압 실효치 전압을 나타낸 것이다.

Fig. 7(a)에서 50%의 리액터 탭을 사용할 경우 계통 투입시 돌입전류는 2.98배로 매우 저감되었고, 이에 따른 특고압측 전압강하는 Fig. 7(b)와 같이 상별로 2.57%, 2.86% 및 2.71%로 허용범위 안에 들어감을 알 수 있다. 또한 직입 기동시와 다르게 계통 투입시 일시적으로 순간적인 전압강상이 일어나지 않는다는 것을 확인할 수 있다.

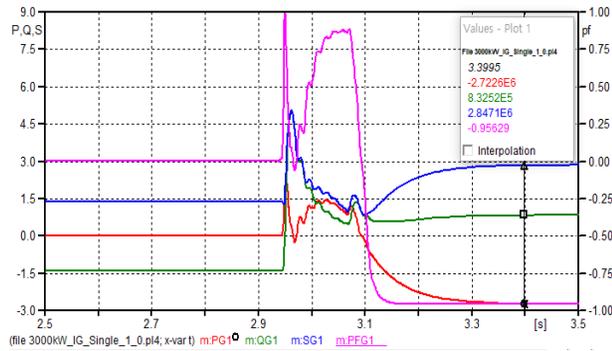
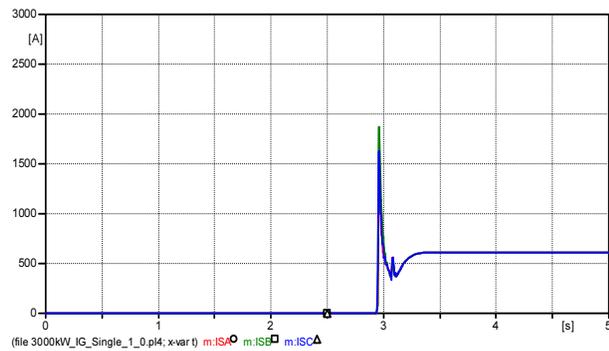
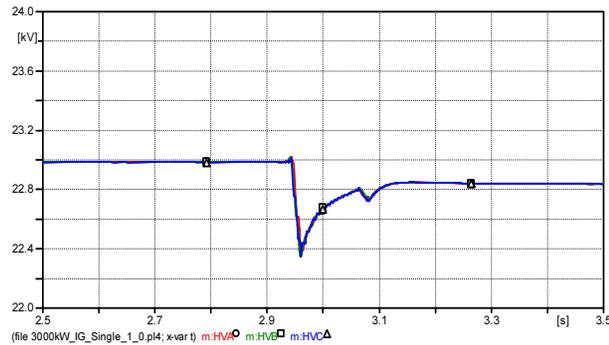


Fig. 6. Power and power factor before and after grid connection by 50% reactor setting



(a) Inrush current



(b) 특고압측 전압

Fig. 7. Inrush current and voltage at 50% reactor setting

#### 4. 결론

본 연구는 발전소 구내에서 냉각수로 이용하고서 바다로 방류하는 물을 수력발전기를 적용하여 구내에 필요한 전력 에너지로 활용하기 위해 유도발전기를 적용할 때 발생하는 돌입전류에 의한 전압강하의 문제점을 해결하기 위한 연구 내용이다.

유도전동기를 직입 기동할 경우 큰 기동전류에 의해 전

압강하가 발생하는 문제점을 해결하기 위해 리액터 기동방법을 사용하고 있다. 이 리액터는 보통 50%, 65%, 80%의 3 탭을 선정할 수 있도록 제작하고 있다. 이를 유도발전기에 적용하여 돌입전류에 의한 전압강하의 문제를 해결할 수 있다.

유도발전기 용량이 낮을 경우 돌입전류에 의한 전압강하는 큰 문제가 되지 않지만, 발전기 출력이 증가할 경우 전압강하가 문제가 되므로 출력에 따라 정해진 전압강하의 허용가능 범위에서 이용 가능한 출력의 크기를 발전소 구내에 적용하여 분석하였다.

본 연구에서는 유도발전기의 출력이 3,000kW로서 매우 높지만, 리액터를 통해 동기속도 이전에 계통에 투입하고서 동기속도 보다 약간 높은 속도에서 리액터와 병렬로 설치한 스위치를 계통에 투입할 경우 전압 허용범위를 3% 이내로 유지할 수 있다는 것을 확인하였다.

본 연구결과는 수력발전소 구내에서 유도발전기의 적용시에 출력용량에 따른 돌입전류에 의한 전압강하를 허용범위 안에서 운전할 수 있는 방법을 찾는 데 도움이 될 것으로 판단된다.

#### 사 사

이 논문은 2016년도 호서대학교 연구년 결과물로 제출됨.

#### References

- [1] New & Renewable Energy, 2016, MOKE & KEMCO.
- [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, “Analysis of Voltage Drop due to Change in Induction Generator Output during Grid Connection”, New & Renewable Energy, Vol. 11, No. 4, pp. 40-45.
- [5] 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.
- [6] 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, No. 4, pp. 3-8.
- [7] Jong-Gyeum Kim, 2014, “Analysis for the Operating Characteristics when the Induction Motor is Used as a Generator”, *New & Renewable Energy*, Vol. 10, No. 2, pp. 5-11.
- [8] Jong-Gyeum Kim, 2015, “Analysis for the Inrush Current and Voltage Drop of Induction Generator by the Reactor Tap Change”, *KIEE*, Vol. 64, No. 8, pp. 1202-1206.
- [9] K. S. Pankaj, J. P. Nelson, 1997, “Application Guidelines for Induction Generators”, in *Proc. International Conference on Electrical Machines and Drives*, Milwaukee, Wisconsin, Paper WC1/5.1-WC1/5.3.
- [10] K-Water Report, 2006, “Design Criteria of Hydroelectric Power Equipment” .
- [11] KEPCO, 2015, “The Guideline for Distribution System Connection Technical of Distributed Resources”.
- [12] Gurkan Zenginobus, Isik Cardici, Muammer Ermis, Cuneyt Barlak, 2001, “Soft Starting of Large Induction Motors at Constant Current With Minimized Starting Torque Pulsations”, *IEEE Trans on IA*, Vol. 37, No. 5, pp. 1334-1346.
- [13] Jong-Gyeum Kim, Young-Jeen Park, 2016, “Soft Start-up Characteristics Analysis of Squirrel Cage Induction Generator”, *KIEE*, Vol. 65, No. 1, pp. 103-107.
- [14] H.W. Dommel, “Electromagnetic Transients Program. Reference Manual (EMTP Theory Book)”, BPA 1986.