

농형 유도 발전기의 소프트 기동 특성 해석

Soft Start-up Characteristics Analysis of Squirrel Cage Induction Generator

김 종 겹[†] · 박 영 진^{*}
(Jong-Gyeum Kim · Young-Jeen Park)

Abstract - In general, the voltage stability of induction generator is lower than synchronous generator. Induction generator has a number of advantages over the synchronous generator on the side of price and maintenance. So Induction generator has been applied to the small hydroelectric power of low output. Induction generator usually generates a high current during grid connection. The high current that occurs during grid connection can cause a voltage drop in the system. In order to increase the supply of the induction generator, it is necessary to propose a method of reducing high current. This paper proposes some method of the soft start to reduce voltage drop caused by the large starting current. soft-start method has high voltage drop effect than direct start method, control of firing angle can be increased the voltage drop effect.

Key Words : Induction generator, Inrush current, Small hydro, Soft-start, Voltage drop

1. 서 론

수력에너지는 청정에너지로 다른 재생에너지에 비해 에너지 변환효율이 매우 높다. 수력발전은 발전설비 용량에 따라 만 kW 이상의 대수력과 천kW에서 만kW 이하의 소수력 설비로 분류하고 있다[1-5]. 수력설비에서는 발전설비 용량이 클수록 계통 연계시에 전압 안정성을 고려하여 동기발전기를 많이 적용하였다[2-5]. 농형 유도발전기는 동기발전기에 비해 비용 대비 효과, 견고성, 콤팩트함, 내구성, 낮은 관성, 유지보수의 편리성 등 여러 가지 측면에서 뛰어나 많이 사용하고 있다. 소수력 발전소의 경우 초기 투자비와 유지보수 및 비용을 고려하여 최근에는 동기발전기보다 유도발전기의 설치 비중이 높아지고 있다[4-8].

소수력 발전소에 농형 유도발전기의 보급 확대가 필요하지만, 전력 발생을 위해 계통으로부터의 무효전력 수수와 기동시 기동전류의 발생에 따른 전압강하가 가장 큰 문제로 지적되고 있으므로 발전기의 선택에 앞서 전압강하와 같은 문제를 사전에 검토해서 해결 방안을 제시하는 것이 매우 중요하다.

직접 기동은 유도발전기를 기동하여 가장 빠르게 전력을 생산하여 계통에 연계하지만, 높은 전류가 발생하여 토크 맥동으로 발전기에 기계적인 스트레스로 작용하고, 계통에 높은 전압강하가 발생하므로 이와 같은 높은 전류를 저감하기 위해 리액터 기동이나 전력반도체 소자를 이용한 소프트 기동 방법을 적용하고

있다[9-13]. 이에 따라 유도발전기 기동시 발생하는 높은 전류의 저감과 전압강하 문제를 해결하기 위해 발전기 용량에 따른 적합한 리액터의 용량 선정과 투입시간의 조정으로 전류를 저감하는 리액터 기동방법의 연구를 진행하였으며[4], 3상 회로에서 상별로 두 개의 반도체 소자를 병렬로 설치하여 점호각 조절에 의해 기동전류를 줄이는 방법에 대해 연구가 진행되었다[10-13].

유도발전기는 기동시 높은 무효전력의 필요로 인해 역률이 낮지만, 속도가 증가함에 따라 역률은 점차 증가하게 된다. 본 논문에서는 기동시의 높은 전류와 낮은 역률을 갖는 특성을 고려하여 소프트 기동시 점호각의 고정과 변화를 통해 높은 전류의 저감과 전압강하를 줄일 수 있는 효과적인 방법을 제시하고자 한다.

2. 계통 구성과 소프트 기동

2.1 계통 구성

댐이나 저수지에 저장된 물의 위치에너지는 펜스 톱 등에 의해 우선 운동에너지로 바뀌고, 수차에 의해 기계에너지로 변환된 다음 마지막으로 유도발전기에 의해 전기에너지로 변환되어 배전선로에 전력을 공급하게 된다. 그림 1은 유도발전기가 적용 가능

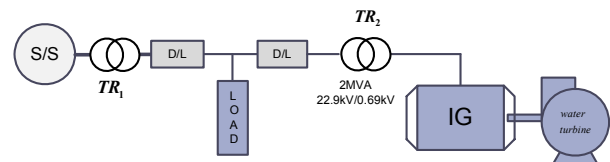


그림 1 배전선로, 부하 및 발전기의 구성도

Fig. 1 Schematic diagram of D/L, load and generator

[†] Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Gangneung-wonju National University, Korea

E-mail : jgkim@gwnu.ac.kr

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

Received : October 6, 2015; Accepted : December 14, 2015

한 변전소, 배전선 그리고 부하 계통도를 나타낸 것이다[3].

소수력 발전소는 대부분 변전소로부터 멀리 떨어진 곳에 설치되어 있고, 변전소에서 수용가에 전력을 공급하고 있다. 배전선로는 주로 가공선로이지만, 변전소는 대부분 도심지 근처에는 케이블이 설치되어 있다. 수용가 부하는 다양하며, 대부분 선형 및 비선형 부하를 공유로 사용하고 있다. 배전선로의 용량은 대부분 10,000kW 전후이며 본 연구에서는 역률은 0.8, 배전선로의 길이는 10km, 유도 발전기의 출력용량은 1,500kW의 경우를 대상으로 하였다.

2.2 소프트 기동

배전선로에 유도발전기를 직입 기동으로 바로 연계하는 것은 높은 전류를 발생시키고, 심한 토크 맥동으로 기어박스 등에 손상을 일으킬 수 있다[9]. 따라서 기동전류의 저감을 통해 안정적인 운전을 위한 방법으로 리액터 및 소프트 기동방법이 최근 적용되고 있다. 유도발전기 소프트 기동에 대한 회로는 그림 2와 같이 3쌍의 병렬 스위칭 소자로 구성되며, 사용되는 스위칭 소자로서는 위상각 조절이 가능한 사이리스터 소자가 많이 이용되고 있다. 소프트 기동은 전압을 조정하여 기동하는 것으로서 발전기 각상에 전압을 줄여 기동하고 정격속도에 도달할 때 까지 전압을 서서히 상승시킨 다음 바이패스 스위치를 온 시켜 발전을 지속하는 방법이다.

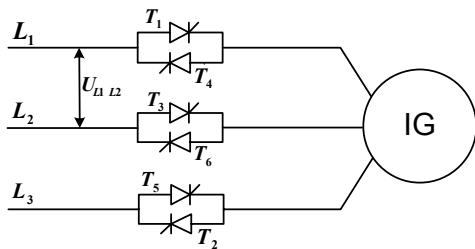


그림 2 소프트 스타터 기동 회로도
Fig. 2 Starting circuit diagram of soft starter

일반적으로 유도발전기의 직입 기동시 발생하는 전류는 정격 전류의 5배 이상이다. 또한 기동시 역률은 정상 운전에 비해 매우 낮은 편이므로 반도체 소자의 위상각 제어시 점호각에 이를 반영할 필요가 있다. 기동 초기 유도발전기의 출력전압은 그림 2의 3상에 설치한 각각의 스위칭 소자의 점호각 조정으로 가능하다. 발전기 출력전압 제어를 위해 그림 3(a)와 같이 SCR의 게이팅 신호를 기동하여 동기속도에 도달할 때(t)까지 점호각을 고정할 경우와 그림 3(b), (c)와 같이 점호각을 기동초기에 일정한 값에서 점차 줄여나가는 방법이 있다. SCR에 걸리는 전압의 변화 비율을 제한하기 위해 RC 스너브 회로를 상별로 연결하였다.

그림 3에서 첫 번째 신호(a)는 소프트 기동 동안 점호각 α 를 일정하게 고정해서 운전하는 것이고, 두 번째 신호(b)는 점호각을 90° 에서 0° 로 점차로 줄이는 것이며, 세 번째 신호(c)는 점호각을 180° 에서 0° 로 점차로 줄여나가는 방식이다.

소수력에 설치된 수차와 유도발전기의 운동방정식은 식 (1)과

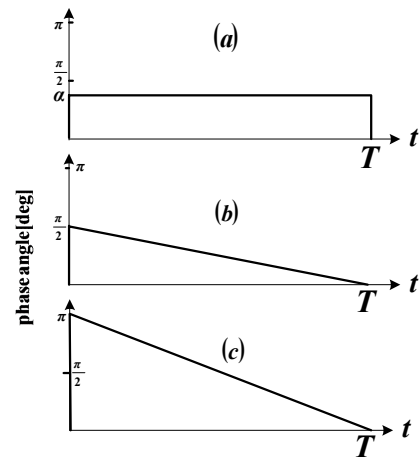


그림 3 게이팅 점호 패턴
Fig. 3 Gating firing pattern

같다.

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

여기서 J 는 회전자 관성 모멘트, w_m 은 회전자의 각속도, D 는 마찰계수이며, T_m 와 T_g 는 각각 수차에 작용하는 기계 토크와 유도발전기의 전기적 토크이다.

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

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

식 (2)에서 오른쪽 항은 전력의 흐름이고, 왼쪽 항은 각 운동량을 나타내고 있다.

그림 4는 본 연구에 적용한 심구형 유도발전기 T형 등가회로를 나타낸 것이다. 그림 4에서 r_s 는 고정자 저항, l_s 는 고정자 누설인덕턴스, l_m 는 자화인덕턴스, r_1, r_2 는 위치에 따른 회전자 저항, l_1, l_2 도 위치에 따른 회전자 누설인덕턴스이다.

수차의 축에 의해 발생한 기계에너지가 유도발전기의 회전자에 의해 공극을 거쳐 고정자에 나타나는 유효전력(P_g)과 회전자

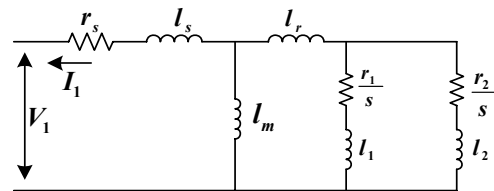


그림 4 심구형 유도발전기의 등가회로도
Fig. 4 Equivalent circuit diagram of deep bar induction generator

계를 발생시키는데 필요한 무효전력(Q_g)은 각각 다음과 같다.

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

$$Q_g = Im\left(\frac{3}{2} \times V_1 \times \bar{I}_1\right) \quad (4)$$

여기서 전압 V_1 과 전류 I_1 은 그림 4에서와 같이 고정자에서의 값이다.

계통연계시 유도발전기 고정자에 흐르는 전류 I_s 는 다음과 같다.

$$I_s = \frac{2}{\sqrt{3}} Re(I_1) \quad (5)$$

유도발전기를 계통에 연결할 때 아주 짧은 기간 동안 발생하는 높은 값을 가지는 기동전류는 배전선로에 전압강하와 발전기가 연결된 기계시스템에 토크 스파이크 등을 일으킬 수 있으며, 이때 발생하는 돌입전류 I_g 는 유도발전기의 유효전력과 무효전력을 계통전압(U_s)으로 나누거나 발전기의 피상전력을 발전기 단자전압(U_g)으로 나누어 구할 수 있다[13].

$$I_g = \frac{P_g - jQ_g}{U_s} = \left(\frac{S_g}{U_g}\right)^* \quad (6)$$

3. 해석 및 결과 분석

수차에 물이 유입되어 유도발전기가 여자된 다음 전력을 발생하여 계통에 공급하기 시작하는 순간부터 정격속도로 운전하기까지의 전체를 해석하였다. 본 연구에 적용된 3상 농형 유도발전기 사양은 표 1과 같다.

표 1 유도발전기 사양

Table 1 Induction generator specification

양	값
전압	0.69kV
정격출력	1,500kW
극수	10
역률	0.83
효율	92%

표 1에 적용된 농형 유도발전기를 가지고 소프트 기동 특성 분석을 위해 구한 파라미터는 표 2와 같다.

소수력 발전에 사용되는 유량과 낙차는 큰 변화가 없는 반면, 배전선로의 사용 부하는 대개 시간에 따라 변화가 많으므로 유도발전기로 전력생산 후 계통에 투입할 경우 전압강하가 높기 때문에 대안 제시를 위한 사전 해석이 필요하다. 해석에는 전자계과도해석 프로그램을 이용하였다[15]. 기동시의 동작 특성을 비교

표 2 유도발전기 파라미터

Table 2 Induction generator parameter

파라미터	값
고정자 저항, R_1	0.00477 [Ω]
회전자 저항, R_2	0.00542 [Ω]
고정자 누설 인덕턴스, L_s	0.055979 [mH]
회전자 누설 인덕턴스, L_r	0.055979 [mH]
상호 인덕턴스, L_m	1.695 [mH]
관성 모멘트, J	594 [$\text{kg} \cdot \text{m}^2$]
제동 상수, D	1/0.0017 [τ]

하기 위해 표 3과 같이 직입 기동(Case I)과 소프트 기동(Case II, III, IV)에 대해 4가지 방법을 사용하였다.

표 3 해석 방법

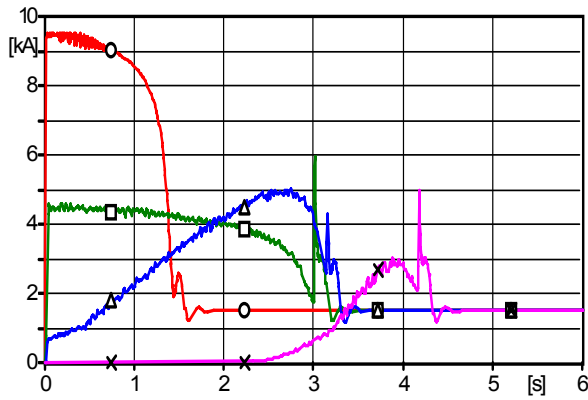
Table 3 Analysis method

분류	기동방법
Case I	직입 기동
Case II	점호각 고정
Case III	점호각 변화 : $\alpha = \frac{\pi}{2} \rightarrow 0$
Case IV	점호각 변화 : $\alpha = \pi \rightarrow 0$

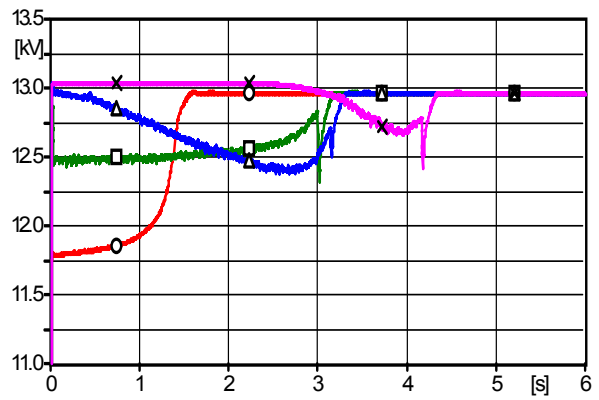
그림 5는 표 3에서와 같이 직입 기동(Case I [○]) 및 소프트 기동(Case II [□], III [△], IV [×])에 의해 유도 발전기를 배전선로에 연결할 때 기동전류, 전압강하, 유효 및 무효 전력의 변화를 해석한 결과이다.

그림 5(a)에서 직입 기동시의 전류(○)는 정격전류의 6.37배로 다른 기동방법에 비해 높지만, 가장 빠르게 정상상태에 이를 수 있다. 이때 기동초기의 전압강하는 그림 5(b)에서와 같이 9%이다. 이는 분산전원 전압변동의 5% 범위를 초과하게 된다. 따라서 전압강하 허용범위 이내로 기동할 수 있는 방법이 제시되어야 한다. 그림 5(c)와 (d)는 각각 유효전력 및 무효전력의 변화를 나타낸 것으로서 기동 초기에는 전동기로 운전하다가 동기속도 이상에서 발전기로 운전하는데, 전동기로 운전시 유효전력은 정(+)영역이지만, 발전기로 운전시 부(-)영역으로 전환되나, 무효전력은 전동기 운전시나 발전기 운전시 모두 정(+)영역을 나타내는데 이는 전원측으로부터 지속적으로 공급되어야 함을 의미한다. 따라서 기동초기에는 높은 무효전력 때문에 유도발전기의 역률은 정격전에 비해 낮다. 따라서 기전류의 저감에 이를 반영해야 한다.

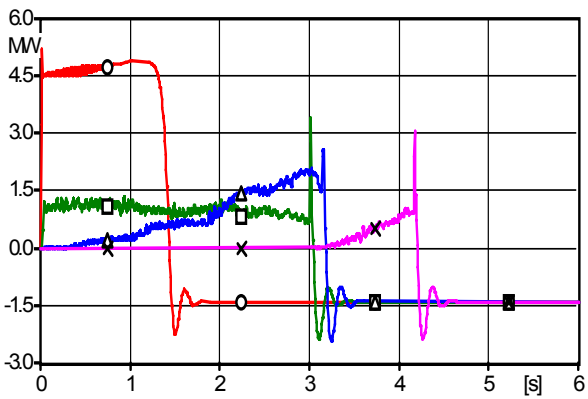
직입 기동시의 높은 전류를 줄이기 위한 방법으로 사이리스터의 점호각을 조정하면 된다. 기동시의 역률을 고려하여 점호각을 고정하고서 운전하는 두 번째(Case II : □) 경우의 기동전류(○)는 그림 5(a)에서와 같이 직입 기동시에 비해 거의 절반으로 줄어들지만, 정상상태에 도달하는 시간을 직입기동에 비해 길어진다. 본 연구에 적용된 유도발전기의 직입 기동시 초기 역률은



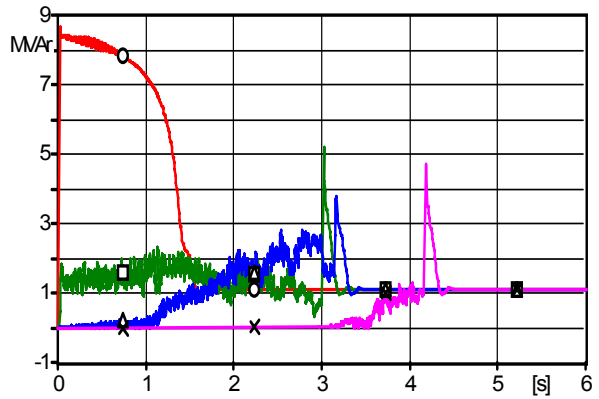
(a) 기동전류



(b) 전압강하



(c) 유효전력



(d) 무효전력

그림 5 기동방법에 따른 전류, 전압강하, 전력

Fig. 5 Current, voltage drop and power according to the starting method

0.48이다. 이를 소프트 기동에 점호각으로 환산하면 점호각은 61° 이다. 점호각을 이용하여 소프트 기동시의 기동전류는 정격전류의 3배가 되었으며, 발전기가 동기속도에서 사이리스터와 병렬로 연결된 바이패스 스위치를 투입할 때 순간적으로 피크 전류가 발생하는 것을 볼 수 있다. 이때 기동전류에 의해 전압(□)의 변화는 그림 5(b)와 같다. 그림 5(b)에서 기동시의 전압강하는 3.8%로 분산전원 전압강하 허용범위 이내가 됨을 알 수 있다. 점호각 고정된 경우에서 유효 및 무효전력은 직입기동에 비해 발전기로 운전하기 전에 크기가 매우 감소한 것을 알 수 있다. 특히 무효전력은 전동기로 운전하는 영역과 발전기로 운전하는 영역에서 크기가 거의 비슷하게 작용함을 알 수 있다. 점호각을 고정하여 운전한 경우 직입 기동에 비해 전력 공급까지 시간이 더 길어짐을 알 수 있다.

기동시 높은 전류를 줄이는 소프트 기동에서 사이리스터의 점호각을 90° 에서 0° 까지로 조정할 경우(Case III: Δ) 기동 초기의 전류(Δ)는 그림 5(a)에서와 같이 직입과 점호각 고정된 경우보다 더 낮아졌지만, 점호각이 낮을수록 전류는 기동시에 비해 조금씩 상승하여 최대 토크가 발생하는 시간에 가장 큰 전류가 흐름을

알 수 있다. 이와 같은 상황에서 전압은 그림 5(b)와 같이 기동 초기는 정격전압과 거의 변화가 없지만, 최대 토크 발생점에서 약 4.3%의 전압강하가 발생하는 것을 알 수 있다. 그림 5(c)와 (d)에서 전동기 영역 운전시의 유효 및 무효전력은 서서히 증가하여 최대 토크가 발생하는 시점에서 최대가 된 다음 발전기로 운전되는 경우 유효전력은 반전되고, 무효전력은 조금 감소하여 정상운전에 필요한 만큼 전원측으로부터 지속적으로 공급받는 것을 알 수 있다. 이 방법은 점호각을 고정하고 운전할 때와 달리 정격속도에서 바이패스 스위치를 온한 경우 순간적인 전류 피크가 크게 나타나지 않음을 알 수 있다.

기동시 전류를 더 저감하여 전압강하를 줄이기 위해 사이리스터 점호각을 180° 에서 0° 까지로 조정된 경우(Case IV : \times)에 기동 초기의 전류는 소프트 3가지 기동방법 중에서 가장 낮고, 최대 토크에 도달하는 시간은 다른 방법에 비해 좀 길지만 전류(\times)가 크지 않아 전압강하 역시 낮은 편이다. 이때의 그림 5(b)에서와 같이 전압 강하율은 2%로 매우 낮다. 동기속도에서 바이패스 스위치를 온 시키는 순간에 전류 피크가 발생하나 다른 방법에 비해 크기가 낮은 편이다. 기동에서부터 발전기로 운전하기 까지

유효 및 전력의 변화는 그림 5(c) 및 (d)와 같다. 기동 초기 전류의 변화가 거의 없기 때문에 전력의 변화가 나타나지 않으며 발전기로 전환되기 전 전동기로 운전하는 짧은 시간동안의 전력의 크기도 다른 방법에 비해 낮은 편이다.

4. 결 론

최근 발전용량이 천 kW를 초과하는 소수력 발전소에서 동기발전기 대신 가격 및 유지관리 측면에서 유리한 유도발전기에 대한 수요가 점차 많아지고 있다. 소수력 발전소에서 농형 유도발전기를 계통에 투입할 때 가장 크게 문제가 되는 것은 기동전류에 의해 전압강하이다. 기동전류의 저감과 전압강하를 줄이기 위해 리액터 기동이나 소프트 기동을 적용하여 전압 강하율이 분산전원 기준 허용범위 안에 들어가도록 최적의 운전방법을 결정하는 것이 중요하다. 그래서 본 논문에서는 천 kW 이상 되는 농형 유도발전기를 사이리스터의 점호각의 고정과 가변을 통해 소프트 기동하여 배전선로에 연결할 경우 순시전압 강하 허용 범위 안에서 가장 낮은 값을 얻을 수 있는 방법을 제시하였다.

본 연구 결과는 앞으로 소수력 발전소에 천 kW 이상의 유도발전기 적용을 위한 기동방법의 선정에 도움이 될 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] 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
- [4] Jong-Gyeum Kim, "Analysis for the Inrush Current and Voltage Drop of Induction Generator by the Reactor Tap Change", KIEE, Vol. 64, No. 8, pp. 1202-1206, 2015. 08
- [5] Jong-Gyeum Kim, "A Study on the Voltage Drop of Induction Generator along the Rotor Shape", KIEE, Vol. 64P, No. 2, pp. 62-66, 2015. 06
- [6] 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.
- [7] M. Godoy Simoes & Felix A. Farret, Renewable Energy Systems-Design and Analysis with Induction Generators, CRC Press, 2004
- [8] D. S. Henderson, Synchronous or induction Generators?-The choice for small scale generation, IEE Conf, Pub, pp. 146-149, 1996
- [9] G. Zenginobuz, I. Cadirci, M. Ermis and C. barlak,

"Soft starting of large induction motors at constant current with minimized starting torque pulsations", IEEE Trans. Ind. 2001, Apr, 37(5), pp. 137-144

- [10] F. Iov, Hansen, F. Blaabjerg, Remus Teodorescu, "Modelling of soft-starters for wind turbine applications", Power quality 3rd ed., proceedings, pp. 179-182, 2003. May
- [11] A. Gastli and M.M. Ahmed, "ANN-based soft starting of voltage controlled fed IM drive system", IEEE Trans on EC, vol. 20, no. 3, pp. 497-503, 2005, Sep
- [12] Gurkan Zenginobuz, et al., "Performance Optimization of Induction Motors During Voltage Controlled Soft Starting", IEEE Trans on EC, vol. 19, pp. 278-288, 2004, Jun
- [13] Gurkan Zenginobuz, Isik Cardici, Muammer Ermis, Cuneyt Barlak, "Soft Starting of Large Induction Motors at Constant Current With Minimized Starting Torque Pulsations", IEEE Trans on IA, Vol. 37, No. 5, Sep/Oct 2001.
- [14] 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
- [15] H. W. Dommel, Electromagnetic Transients Program. Reference Manual (EMTP Theory Book), BPA 1986.

저 자 소 개



김 종겸 (Jong-Gyeum Kim)

1961년 10월 3일생. 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



박영진 (Young-Jeen Park)

1959년 11월 19일생. 1982년 단국대학교 전기공학과 졸업. 1996년 단국대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1996년~현재 강릉원주대학교 전기공학과 교수
Tel : 033) 760-8784
E-mail : popspark@gwnu.ac.kr