

유도형 풍력발전기 계통 연계시 돌입전류 저감을 위한 소프트 스타터 점호각 제어

宋丞鎬[†], 權泰華^{*}

Firing Angle Control of Soft Starter for Reduction of Inrush Current during
Grid Connection of Induction-type Wind Generator

Seung-Ho Song and Tae-Hwa Kwon

요 약

유도기의 고정자를 직접 전력 계통에 연결하는 유도형 풍력발전기의 계통 연계시 과도 상태 돌입 전류의 크기를 줄이기 위한 새로운 소프트 스타터(Soft Starter) 제어 알고리즘을 제안하였다. 현재 국내에 가장 많이 설치되어 있는 정속 운전형 풍력발전시스템의 기본 구성을 살펴보고 특히 소프트 스타터의 계통 연계 알고리즘에 따라 발전 개시 순간 과도 상태 전류의 크기가 크게 달라짐을 확인하였다. 이를 위해 600kW급 유도 발전기를 포함한 정속형 풍력발전 시스템의 시뮬레이션 모델을 개발하였고 실험실 환경에서 제안된 알고리즘을 시험하기 위한 3.7kW급 모의 실험장치를 제작하였으며, 소프트 스타터의 제어 알고리즘 개선에 의해 돌입전류의 크기가 약 20% 감소됨을 확인하였다.

ABSTRACT

A new control algorithm of soft starter is proposed for the reduction of the inrush current during the grid connection of the induction-type wind power generator. Currently, the fixed speed wind turbine using induction generator is the most popular wind generation system in Korea. It is shown that the amount of inrush current mainly depends on the control algorithm of the soft starter, a thyristor-based grid connection device. For the simulation study, a 600kW wind turbine simulation model is developed and the transient waveforms are investigated with conventional and proposed methods. Also experimental results using 3.7kW experimental set-up show that the peak value of inrush current is reduced about 20% using proposed algorithm.

Key Words : Fixed Speed Wind Turbine, Induction Generator, Firing Control of Soft Starter

1. 서 론

대용량 풍력 발전기는 대부분 계통연계 방식으로 운용되며, 정속 운전방식과 가변속 운전방식으로 구분할

수 있다. 유도 발전기를 사용한 정속형은 구조가 간단하고 가격이 저렴하여 현대식 풍력발전기 개발 초기부터 널리 쓰여 왔다. 예를 들어 국내에서 운전중인 500kW급 이상 시스템은 2004년 10월 현재 약 16대로서 소프트 스타터를 사용한 유도발전기 계통 직결형 정속 운전 방식이 주종을 이루고 있다. 그러나 유도발전기의 고정자를 직접 계통전압에 연결하는 발전 방식은, 가변속방식에 비해, 계통 투입시 과도한 돌입 전류가 발생하고, 풍속변동시 출력 전력의 변동이 심한 단

[†]교신저자 : 정회원, 전북대 전자정보공학부 조교수
E-mail : songsh@chonbuk.ac.kr

^{*}정회원, (주)저스텍 연구원

접수일자 : 2005. 4. 15 1차 심사 : 2005. 6. 4

심사완료 : 2005. 7. 18

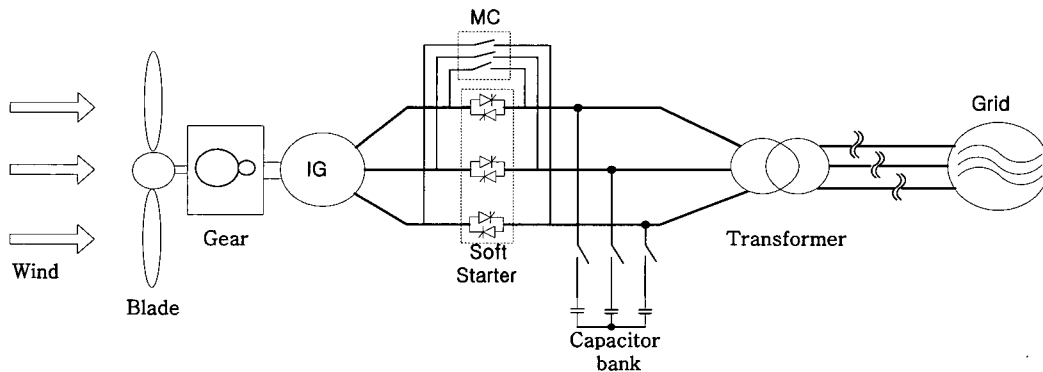


그림 1 소프트 스타터를 사용한 유도형 풍력 발전 시스템
 Fig. 1 Induction-type wind power generation system using soft starter

점이 있다^[1]. 과도한 돌입전류는 발전기의 기계적, 전기적 수명 단축의 원인이 되며, 선로 임피던스에 의한 주변 전압 강하등의 문제를 일으킬 수 있다^[1-4]. 이러한 문제를 해결하기 위하여 대부분의 상업용 정속 운전 방식 풍력발전시스템은 초기 투입시에 싸이리스터를 역병렬연결하여 스위치로 사용하는 소프트 스타터를 사용하고 있다^[5]. 그러나 이러한 소프트스타터에 있어서 기존의 알고리즘은 발전기나 블레이드(blade)의 다이내믹스를 고려하지 않고 일정한 패턴으로 운전되어 과도 전류의 크기가 일정하지 않은 단점이 있었다. 본 논문에서는 기존 유도 발전기 계통 투입시 발생하는 돌입 전류 특성을 조사하고, 소프트 스타터의 게이팅 지연각을 조절함으로써 돌입 전류의 피크 값을 저감시킬 수 있는 방법을 제안하였다. 또한 이를 위해 600kW급 유도 발전기를 포함한 정속형 풍력발전 시스템의 시뮬레이션 모델을 개발하였고 3.7kW급 모의 실험장치를 제작하여 실험적으로 제안된 알고리즘의 유효성을 보였다.

2. 고정 속도형 풍력 발전 시스템 구성

2.1 시스템 구성도

고정 속도형 풍력 발전 시스템은 유도 발전기 고정자 권선을 직접 계통에 연결하여 바람의 속도에 관계없이 거의 일정한 속도로 회전하는 풍력 발전 시스템을 의미한다. 일반적으로 이러한 방식의 시스템 구성도는 그림1에 보인 것과 같다. 바람이 가진 운동에너지가 블레이드에서 토오크로 변환되어 기어박스를 거쳐 발전기 축에 전달되면 발전기가 가속하게 되고 일정한 속도 이상의 바람이 지속적으로 불게되면 발전기 출력

과 전력계통(실은 변압기 저압측)을 연결하는 컷인(Cut-in) 동작을 수행하게 된다. 이 때 소프트 스타터를 사용하여 발전기 출력을 계통에 연계하고 역률 보상을 위해 커패시터 뱅크를 설치하여 무효전력을 보상한다. 자기접촉기는 소프트 스타터의 조작이 끝나고 완전 턴온 상태로 간 후에 바이패스시키는 역할을 수행한다. 최종적으로 변압기는 발전기 출력전압을 배전 전압(일반적으로 22.9kV)으로 승압시켜 주는 역할을 한다.

2.2 블레이드 모델링

블레이드는 바람이 가진 운동에너지를 추력으로 변환하여 토크를 생성하는 부분으로서 일정 풍속에서도 날개 형상이나 바람의 입사각도에 따라 발생 토오크의 크기가 변하게 된다. 본 연구에서는 일정 패턴의 출력 계수 곡선을 가지는 스톨방식의 풍차 블레이드 형상을 대상으로 바람의 속도가 주어지면 발전기 회전 속도와 의 관계에 의해서 블레이드 입력 토오크를 결정하는 형태로 모델링 하였다. 기어박스는 이상적인 변환기로 가정하면 블레이드에서 발생된 토오크는 발전기 축에 전달되게 된다.

2.3 발전기 모델링

일부 정속형 풍력발전기에서 입력 풍속의 변동에 따라 슬립주파수를 조절하여 출력을 부드럽게 하는 기능을 가지고 있는 경우도 있으나 이 또한 유도기 2차측 저항값을 가변시키는 형태로 보고 일반적인 농형 유도기의 모델을 사용하였다. 유도기 등가회로는 그림 2와 같이 T형 등가회로로서 나타낼 수 있고 시뮬레이션을 위해 실제 600kW 풍력발전시스템에 사용되고 있는 발전기의 파라미터를 사용하였다^[6].

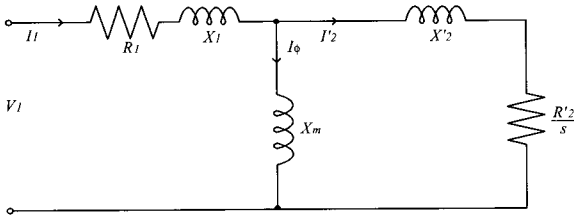


그림 2 유도기 등가 회로
Fig. 2 Equivalent circuit of induction machine

2.4 소프트 스타터 모델링

소프트 스타터는 역병렬로 연결된 싸이리스터가 각 상에 설치된 3상 스위치 회로의 형태를 가지며 점호각을 조절하기 위한 제어 회로가 필요하다^[6]. 일반적인 전동기 기동장치에서와 마찬가지로 소프트 스타터는 초기 과도상태의 돌입전류를 제한하기 위한 목적으로 사용되고 일단 기동이 완료되어 정상상태에 들어가게 되면 싸이리스터 스위치 부분을 바이패스하는 기계적 스위치를 동작시켜 도통손실을 최소화하게 된다. 제어 회로에 필수적인 것은 전원 전압의 위상각을 체크하여 원하는 지연각만큼 지연된 점호신호를 만들어 내는 일이다. 이러한 위상 검출 및 지연각 조절 기능은 기존 연구 결과들을 참조하여 구현하였다^[7]. 발전기용 소프트 스타터가 전동기용 소프트스타터와 다른 차이점은 투입 순간에 회전자의 회전 속도가 이미 동기속도 근처까지 도달해 있는 점과 발전기 축에서 입력되는 도오크(기계적 부하)의 크기가 일정하지 않다는 점이다.

3. 발전용 소프트 스타터 제어 알고리즘

3.1 기존 점호각 제어 알고리즘

기존의 정속운전형 풍력발전기의 소프트 스타터 제어 알고리즘은 그림 3에 표시된 것과 같다^[5]. 발전기를 계통에 투입하기 전에는 점호각을 최대값으로 유지하다가 투입이 결정된 시점에 초기 점호각에서 시작하여 선형적으로 점호각을 감소시켜 최종적으로 영이 되게 하는 것이다. 점호각이 영이 된 이후에 자기 접촉기가 동작하여 바이패스 회로가 구성되면 과도상태가 끝나게 된다. 이 때 초기 점호각값과 점호각 지연시간이 과도상태 특성을 결정짓는 중요한 파라미터가 된다. 즉, 점호각의 초기값과 점호 지연각 감소시간을 조절하는 것에 의해 과도상태 유지시간 및 그 때의 전류의 크기가 달라지게 된다. 예를 들어 그림 4(a)는 기존 알고리즘에서 점호각 지연시간을 0.1초로 했을 때 발전기 출력 한 상에 흐르는 과도상태 돌입전류의 형태를

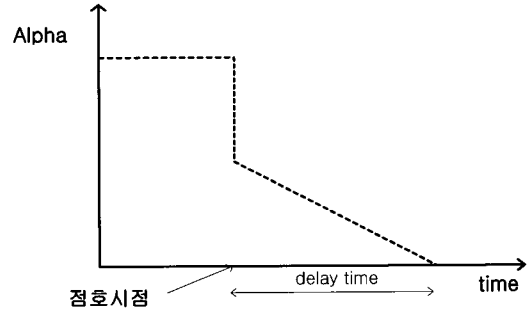
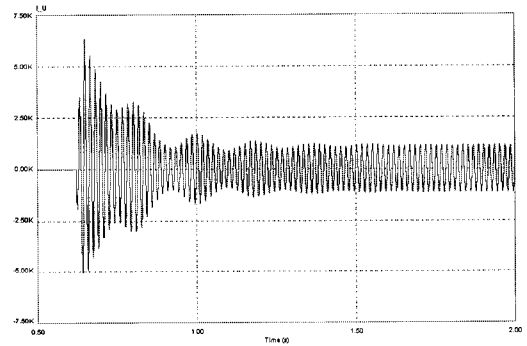
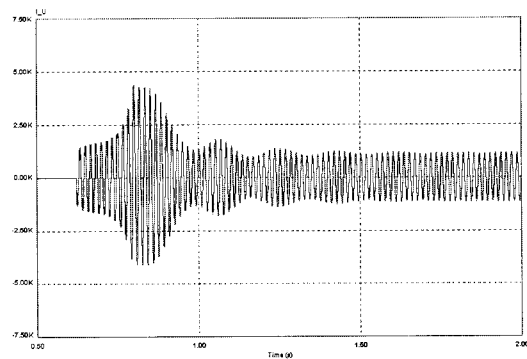


그림 3 기존 시스템의 점호각 제어 알고리즘
Fig. 3 Conventional strategy of firing angle (α) control



(a) 점호 지연각 감소시간이 0.1초 일때
(a) Firing angle change time = 0.1 sec



(b) 점호 지연각 감소시간이 1.5초 일때
(b) Firing angle change time = 1.5 sec

그림 4 기존 점호각 제어 알고리즘에 의해 계통 연계시 점호 지연각 감소시간 변화에 따른 상 전류 파형 비교

Fig. 4 Comparison of phase current waveform according to the difference of firing angle change time in the conventional firing angle control algorithm

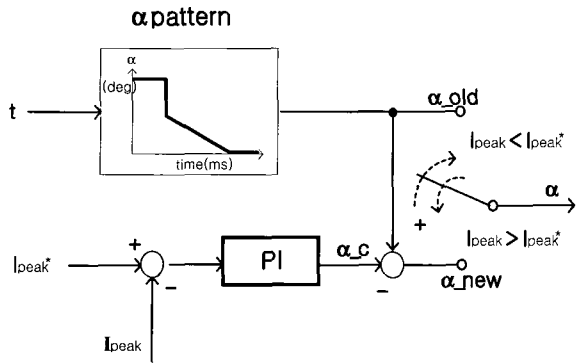


그림 5 제안된 점화각 제어 알고리즘
Fig. 5 Proposed firing angle control algorithm

보여주고 있으며, 그림 4(b)는 점호 지연각 감소시간을 1.5초로 한 경우의 과도상태 전류 파형이다. 두 전류의 파형을 비교해 보면 점호각 감소시간에 따라 상전류 피크값의 크기가 상당히 크게 변화하는 것을 알 수 있으며 (b)에 보인 1.5초가 기존 제어 알고리즘으로 가장 적은 피크전류를 보인 값이었다. 그러나 이러한 알고리즘은 게이팅 지연각의 크기와 인가 전압 및 선로 전류의 상관관계가 비선형인 유도기의 특성을 고려할 때 효과적으로 돌입전류의 크기를 제한하기 어려운 단점이 있다^[6].

3.2 제안된 점화각 제어 알고리즘

제안된 점화각 제어 알고리즘은 상전류의 크기를 효과적으로 제한하기 위하여 비례적분 보상기를 사용하여 점화각을 조절하는 방식으로서 그림 5에 그 블록도를 나타내었다. 초기 기동시에는 기존과 같은 패턴의 α_{old} 로 출력 하지만 현재 흐르고 있는 출력 피크전류가 기준 전류값 보다 높게 되면 PI 제어기의 출력과 α_c 를 더한 새로운 α_{new} 로 점호하는 방식을 제안하였다. 다시 출력 피크전류가 기준 전류 값 보다 낮아지게 되면 α 패턴을 이용한 α_{old} 로 점호하게 된다. 전류 피크값이 설정치를 넘어가면 비례적분 보상기의 출력을 기존 알파각 패턴값에서 더해줌으로 전류가 증가하는 구간에서 효과적으로 점호각을 지연시켜 전류의 상승을 방지할 수 있다. 이러한 전류 피드백 값을 고려한 알파각 제어방식의 장점은 풍속의 변동이나 발전기 투입 운전 조건의 변화에 따라 과도상태 전류의 크기가 달라지더라도 상전류의 크기를 효과적으로 제한된 범위로 제한할 수 있다는 점이다.

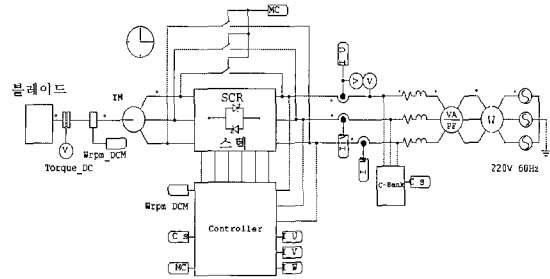


그림 6 정속형 풍력발전 시스템 시뮬레이션 회로도
Fig. 6 Simulation circuit diagram for fixed speed wind power generation system

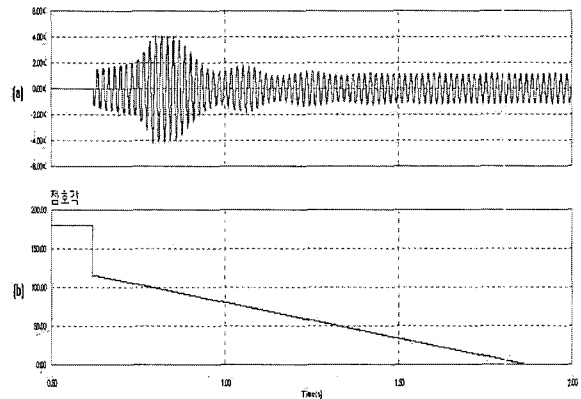


그림 7 기존 점호 알고리즘을 사용한 발전기 투입시 과도상태 (a) 출력 상전류 (b)점호각
Fig. 7 Cut-in transients of induction generator using conventional firing algorithm (a) output phase current (b) firing angle

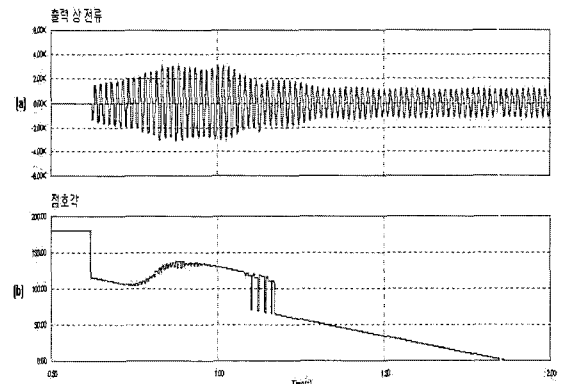


그림 8 제안된 점호 알고리즘을 사용한 발전기 투입시 과도상태 (a) 출력 상전류 (b)점호각
Fig. 8 Cut-in transients of induction generator using proposed firing algorithm (a) output phase current (b) firing angle

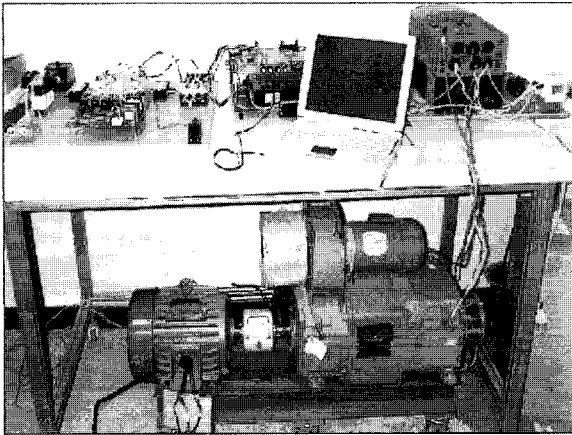


그림 9 3.7kW급 유도발전기 계통연계 실험 장치
 Fig. 9 Experimental set-up for grid connection of 3.7kW induction generator

제안된 점호각 제어 알고리즘을 실험적으로 검증하기 위하여 그림 9에 보인것과 같은 3.7kW급 유도발전기 계통연계 실험장치를 제작하였다. 사진 하단에 있는 직류전동기와 유도발전기로 구성된 M-G세트는 풍력터빈의 특성을 모의하기 위한 것으로서 풍속변동에 따라 직류전동기의 출력 토크(유도 발전기의 입력 토크)를 임의로 조절할 수 있도록 상용 직류

기 드라이브를 사용하였다^[8]. 따라서 바람에 의해 직류기 토크가 발생되고 시스템이 가속되어 일정 회전속도에 도달하면 발전기 투입 알고리즘이 동작하기 시작한다. 그림 9의 사진 상단에는 소프트 스타터와 제어보드, 그리고 직류전동기 구동장치가 보이며 실험장치의 상세한 구성도를 그림 10에 보였다. 유도발전기의 고정자 출력은 소프트 스타터를 거쳐 계통에 연결되며 커패시터 뱅크는 출력단 역률을 보상하는 기능을 가진다. 점호 보드는 DSP보드에서 계산된 점호각과 전원 위상을 바탕으로 소프트 스타터의 사이리스터 구동 신호를 만들어 내는 역할을 수행한다. 한편 직류전동기 구동장치는 DSP보드에서 전달된 지령에 따라 직류전동기의 토크를 조절하는 역할을 수행한다. 따라서 DSP보드는 풍속에 따라 직류전동기를 구동시키는 한편 시스템이 일정 조건에 도달하면 점호각 제어를 통해 유도발전기 출력을 계통에 연계시키는 점호각 제어를 수행하고 있다.

그림 11은 기존의 제어 알고리즘을 사용한 경우 유도발전기 계통연계 과도상태의 점호각과 상전류 파형을 나타낸다. 또한 그림 12는 제안된 점호각 제어 알고리즘을 사용한 경우의 점호각과 상전류 파형이다. 기존의 점호 알고리즘을 사용한 경우는 직선적으로 변화하는 점호각에 의해 과도 상태가 짧고 상전류 최대값이 약 31[A]에 이르며, 제안된 점호 알고리즘을 사용한 경우에는 과도상태 점호각 조절에 의해 상전류 피크값이 약 25[A]로 감소하는 것을 볼 수 있다.

5. 결 론

유도발전기와 소프트 스타터를 사용하는 정속운전형 풍력발전기의 계통 연계시 과도 상태 돌입 전류의 크기를 줄이기 위한 새로운 점호각 제어 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘의 특성을 살펴보기 위해 600kW급 유도 발전기를 포함한 정속형 풍력발전 시스템의 시뮬레이션 모델을 개발하였다. 또한 실험실 환경에서 제안된 알고리즘을 시험하기 위한 3.7kW급 모의 실험장치를 제작하였으며, 제안된 알고리즘을 사용하여 과도상태 돌입전류의 크기가 약 20% 감소됨을 확인하였다. 그러나 이러한 개선효과는 블레이드로부터 발전기에 입력되는 토크의 크기에 따라 달라지므로 향후 연구 방향으로서는 비례적분 제어기의 응답성 개선 또는 예측 전류 기법에 의해 계산된 순시 전류값을 바탕으로 과도상태 특성을 개선하는 연구가 필요하다고 생각

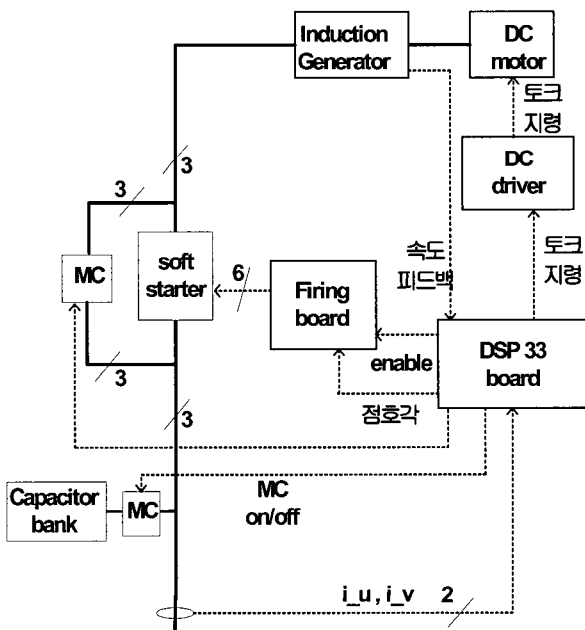


그림 10 실험장치 구성도
 Fig. 10 Configuration of experimental set-up

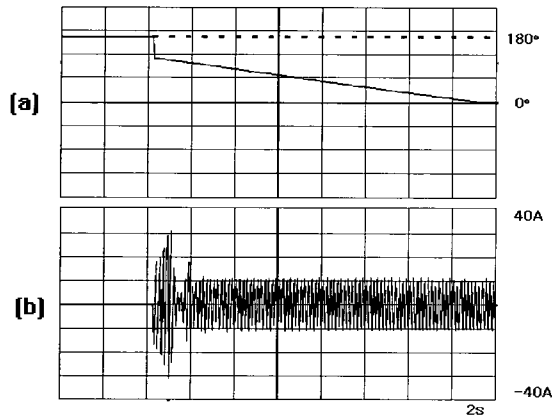


그림 11 기존의 점호각 제어 알고리즘을 사용한 경우 계통투입시 (a)점호각 (b)출력 상전류
 Fig. 11 Cut-in transients using conventional firing algorithm (a)firing angle (b)output phase current

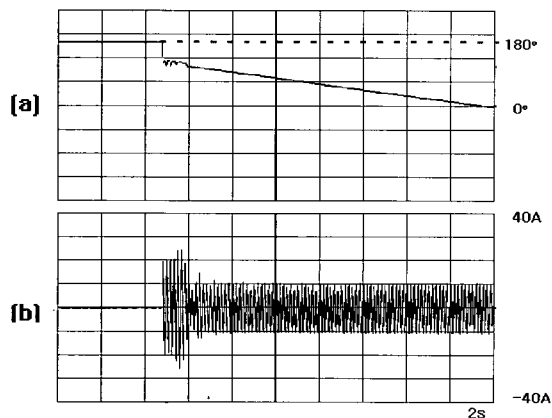


그림 12 제안된 점호각 제어 알고리즘을 사용한 경우 계통투입시 (a)점호각 (b)출력 상전류
 Fig. 12 Cut-in transients using proposed firing algorithm (a)firing angle (b)output phase current

된다. 아울러 역률보상용 커패시터의 스위칭, 부하변동 등 기타 계통의 과도 상태를 고려한 유도형 풍력발전기의 종합적인 전력 품질에 관한 연구가 필요하다고 생각된다.

이 논문은 한국과학재단의 해외 Post-doc. 연구 지원에 의하여 연구되었음.

This work was supported by the Post-doctoral Fellowship Program of Korea Science & Engineering Foundation (KOSEF).

참 고 문 헌

- [1] 윤기갑, 이완수, 김병환, 이상길, "울릉도 풍력발전 계통 연계 문제점 및 대책", 대한전기학회 EMECS 학회 추계 학술대회, pp. 305-307, 2001.
- [2] 전영진, 김일환, "제주 행원 풍력발전 시스템의 모델링 및 해석", 전력전자 하계학술대회, pp. 563-566, 2002.
- [3] 김용현, 김일환, "풍력발전을 위한 이중여자 유도기의 센서리스 제어", 전력전자학회 논문지, Vol. 5, No.5, pp. 451-458, 2000.
- [4] 장성일, 정중찬, 최정환, 박제영, 김광호, "농형 풍력 발전기의 운전 특성에 관한 연구", 대한전기학회 하계학술대회 B권, pp. 1309-1312, 2002.
- [5] V44 System Manual, Vestas, 1999.
- [6] Paresh C. Sen, "Principles of Electric Machines and Power Electronics", p.231. 1998.
- [7] G. Zenginobuz, I. Cadirci, M. Ermis, C. Barlak, "Soft Starting of Large Induction Motors at Constant Current With Minimized Starting Torque Pulsations" IEEE Trans. on Industry Applications Vol37. No5, pp 1334-1347, 2001.
- [8] 정병창, 정세중, 송승호, "가변관성 모의 기능을 가진 풍력터빈 시뮬레이터의 제어 알고리즘", 전력전자학회 논문지, Vol. 8, No. 3, pp. 266-273, 2003.

저 자 소 개



송승호(宋丞鎬)

1968년 8월 27일생. 1991년 서울대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 동 대학원 전기공학부 졸업(공학박). 1992~1995년 포스콘 기술연구소 연구원. 2004~2005년 미국 위스콘신대 방문교수. 2000년~현재 전북대 전자정보공학부 조교수.



권태화(權泰華)

1976년 12월 02일생. 2002년 서남대 전기공학과 졸업. 2004년 전북대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 (주)저스텍 연구원.