

전류제어형 PWM컨버터를 이용한 동기발전기용 여자시스템에 관한 연구

(A Study on Excitation System for Synchronous Generator using Current Mode Controlled PWM Converter)

장수진* · 류동균 · 서민성 · 김준호 · 원충연 · 이진국

(Su - Jin Jang · Dong - Kyun Ryu · Min - Sung Seo · Jun - Ho Kim · Chung - Yuen Won · Jin - Kuk Lee)

요 약

동기발전기 출력전압은 여자시스템의 계자전류 제어에 의해 일정하게 유지된다. 고주파 PWM 컨버터(전류제어 모드 buck 컨버터) 형태의 여자시스템은 부하변동이 발생하였을 때 동기발전기의 계자전류를 제어하게 된다.

이 논문은 정상상태 및 과도상태에서의 안정화를 개선하기 위하여 여자시스템의 설계 및 실험에 대해 다루었다. 시뮬레이션 및 실험 결과는 제안된 여자시스템이 50[kW] 동기발전기의 DVR에 의해 응답시간이 개선되었음을 보여 주었다.

Abstract

The output voltage of synchronous generator is regulated constantly by field current control in excitation system. High frequency PWM converter (current control mode buck converter) type excitation system for synchronous generator is able to control exciter current when the load change happened.

This paper deals with the design and evaluation of the excitation system for a synchronous generator to improve the steady state and transient stability. The simulation and experimental results show that the proposed excitation system is able to improve the response time by the DVR(digital voltage regulator) of 50[kW] synchronous generator.

Key Words : (excitation system, buck converter, DVR)

1. 서 론

수 백[kW]급 건물의 비상용 전원, 군사용 전원 및 낙도용 전원으로 사용되는 비상용 발전기의 안정적인 전력의 공급은 엔진이나 동기발전기의 제어장치 성능에 의존한다.

선진 외국의 경우 전력수요의 증가로 피크부하에서 병렬 운전간 부하분담, 부하 추종성, 고품질의 전력공급에 따른 속응성 그리고 신뢰성 있는 제어시스

* 주저자 : 성균관대학교 정보통신공학부 석사과정
Tel : 031-290-7169, Fax : 031-290-7169
E-mail : 106832@hanmail.net
접수일자 : 2003년 1월27일
1차심사 : 2003년 2월 4일
심사완료 : 2003년 3월19일

템의 필요성에 따라 디지털방식으로 전환되고 있는 추세이다[1].

전력산업의 발달과 더불어 전력 장비의 신뢰성에 대한 요구가 점점 높아지고 있다. 하지만 기존에 적용되고 있는 발전기 AVR(automatic voltage regulator)은 여자전원이 TCR(thyristor control rectifier)방식으로 제어되어 실제 산업현장에 적용 시 다양한 문제를 야기할 수 있다[1],[2].

첫째, 최근의 산업 발달에 따라 건물자동화, 사무자동화, 정보통신용전원 등 전력변환소자 사용의 급증으로 배전계통에 연결된 비선형 부하에 의하여 파형의 일그러짐이 발생하여 다른 부하에 영향을 미치게 된다.

비선형 부하, 특히 전력변환 부하장치에서 발생하는 고조파 전류는 전원계통의 전압왜곡을 일으키며 이로 인하여 다이리스터의 제어각을 정확하게 설정할 수 없어 오동작의 원인이 되기도 하고 정밀한 출력 전압 제어를 할 수 없다.

둘째, 발전기 출력 전압을 빠르게 제어하려면 AVR의 속응성이 좋아야한다.

그러나 일반적인 정지형 TCR 제어방식의 전원으로 발전기 출력을 사용하기 때문에 입력전원이 3상일 경우 최대 180[Hz]의 제어주기를 가질 수 있어 빠른 응답 특성을 얻기가 어렵다.

셋째, 현재의 AVR의 발전 추세를 보면 발전기의 원격감시, 고속응답 제어 등을 요구하고 있는데 기존의 아날로그 AVR은 또 다른 데이터 획득 시스템을 추가해야 하는 문제점을 가지고 있다.

최근 DVR(digital voltage regulator)이 국산화 되어 발전기에 적용되고 있지만 대용량 발전기에 국한되고 있는 실정이다.

이와 함께 비상용 전원, 군사용 전원, 낙도용 전원 에 안정적인 전력 공급을 위한 저립하고 성능이 우수한 DVR의 국산화 연구에 대하여 관심이 높아지고 있다[2].

본 연구에서는 기존 아날로그 TCR 제어방식을 대신하여 부하 변동에 의한 발전기 출력 전압의 속응성 있는 제어와 제자전류 제어를 위해 고주파 PWM Buck 컨버터가 적용된 여자시스템을 제안하였다.

또한 시스템에 대한 타당성과 응답특성을 검증하기 위하여 회로해석 프로그램(PSIM)을 이용해 시뮬레이션 하였고 50[kW]급 비상용 동기발전기를 대상으로 제안한 전류제어모드 Buck 컨버터를 적용하여 실험에 의해 타당성을 검증하였다.

2. 동기발전기의 여자시스템

동기발전기 여자시스템의 제어 기능에는 전압 제어, 무효전력 제어, 계통 안정도 향상 등을 포함하고 있다.

또한 보호 기능에는 동기발전기와 여자시스템, 타설비들이 그들 자신의 능력 한계를 벗어나지 않도록 보호하는 기능을 포함하고 있다.

그림 1은 동기발전기 제어시스템의 전체 구성도를 나타내고 있다. 발전기 제어시스템 구성도에서 AVR은 다양한 제어기능과 보호기능을 포함하고 있다.

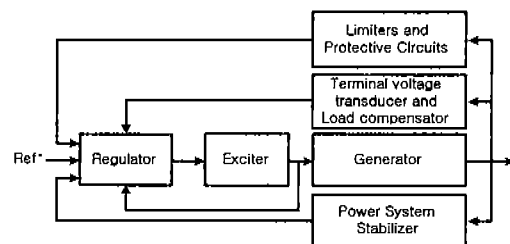


그림 1. 동기발전기 제어시스템 구성도
Fig. 1. Block diagram of synchronous generator control system

종래에는 발전기 여자시스템에 대한 전원 공급 장치로 직류발전기가 사용되었다.

하지만 정류 장치 및 브러쉬 장치를 사용함에 따라 마찰에 의한 불꽃 발생, 마모로 인한 보수 및 교체가 요구되는 문제점이 있다.

그 후 발전기의 여자시스템은 정지형 여자시스템과 교류 여자시스템으로 발전하였다[1].

정지형 여자시스템은 발전기의 출력 전압을 이용하여 여자전원으로 공급하는 방식으로 다이리스터 정류기의 점호각을 제어함으로써 제자권선에 직류 전류를 인가하는 방식이다.

그림 2는 정지형 여자시스템의 한 형태인 다이리스터 직접 여자시스템을 나타내고 있다.

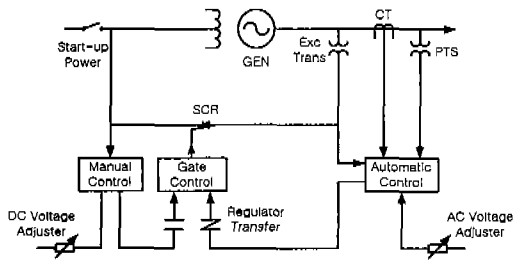


그림 2. 정지형 여자시스템
Fig. 2. Static excitation system

이 방식은 구성이 간단하다는 점과 여자가 없어도 지연을 제거할 수 있는 장점이 있지만 발전기의 출력 전압을 여자기 전원으로 공급하기 때문에 출력단의 다양한 사고에 직접적인 영향을 받는 단점이 있다[2].

교류 여자시스템은 여자기 출력 제어방법, 여자기 전원 공급 방법 그리고 정류기의 배치 위치 등에 따라 여러 가지 형태로 분류될 수 있다.

그림 3은 교류 여자시스템의 한 형태인 브러쉬리스형 교류여자 방식을 나타내고 있다.

회전 전기자형 교류발전기를 주발전기 회전축에 직결하고 교류발전기의 출력을 동일한 회전축에 부착된 정류기를 통해 주발전기의 계자권선에 직류전류를 공급하는 방식이다.

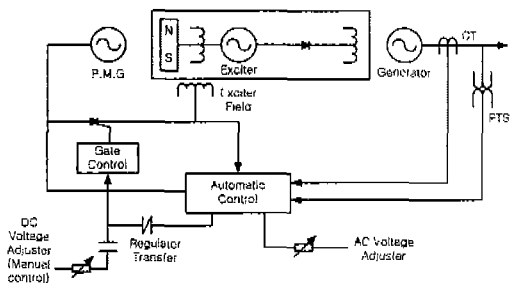


그림 3. 브러쉬리스형 교류 여자시스템
Fig. 3. AC excitation system of brushless type

이 방식은 고장 시 보수에 대한 어려움이 있고 동

일한 축 상에 직결되어 있기 때문에 축이 길어지는 단점이 있다.

그러나 정지형 여자시스템과 달리 독립된 전원 확보로 안정된 여자전원을 공급할 수 있는 장점이 있어 비상용 동기발전기 여자시스템에 널리 적용되고 있다[3],[4],[5].

그림 4는 본 논문에서 제안한 전압/전류 제어 모드 Buck 컨버터 여자시스템을 적용한 비상용 동기발전기의 구성도 이다.

기계 계통은 토크를 발생시키는 엔진부분, 주파수를 측정하는 주파수 측정 장치, 그리고 엔진의 정속도를 유지하기 위한 Governor로 구성되어 있다.

전기계통부분은 유기기전력이 발생하는 회전기 부분과 출력 전압을 제어신호로 바꾸어주는 전압/전류 측정 장치, 정전압 및 무효전력 부분을 제어하기 위한 DVR로 구성되어 있다.

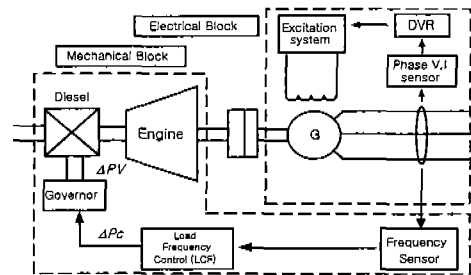


그림 4. 동기발전기 구성도
Fig. 4. Block diagram of synchronous generator

각각의 기계 계통과 전기 계통에서 제어와 보호기능을 담당하고 있지만 발전기 여자시스템의 기본 기능은 계자권선에 직류 전류를 안정적으로 공급하는 것이다.

이와 같이 계자전류를 제어함으로써 전력계통의 안정적인 성능 구현에 필수적인 보호 기능과 제어기능을 수행한다[6].

하지만 기존 여자시스템인 정지형 여자시스템과 교류 여자시스템 제어방식에서는 TCR제어 방식을 적용하였기 때문에 서론에서 제시하였던 발전기 출력 전압의 왜곡으로 인한 접호각 설정에 어려운 점이 있으며 180[Hz]의 제어주기로 인한 속응성이 늦

게 되는 단점이 있다[2].

이러한 TCR제어 방식의 대안으로 본 연구에서는 Buck 컨버터를 적용한 여자시스템을 제안하였다.

여자시스템 DVR의 주 전력소자는 MOSFET를 사용하였고, PWM 제어에 의하여 발전기의 출력 전압을 조정한다.

제안된 PWM 컨버터는 전압제어형과 전류제어형 두 형태의 컨버터를 적용하였으며 또한 기존 아날로그 TCR 방식을 발전기에 적용하여 제어 특성 및 응답 특성을 비교하였다.

안정적인 발전기 출력 전압과 PWM 신호를 디지털 제어하기 위하여 마이크로프로세서를 사용하였다.

그림 5는 여자시스템에 적용된 전압제어형 Buck 컨버터와 발전기구조를 나타내고 있다. DVR은 Buck 컨버터와 마이크로프로세서, 게이트 드라이브 및 센서 등으로 구성한다.

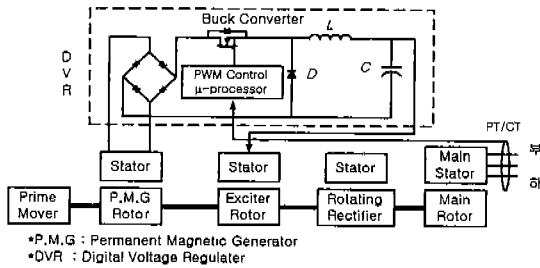


그림 5. Buck 컨버터 여자시스템
Fig. 5. Buck converter excitation system

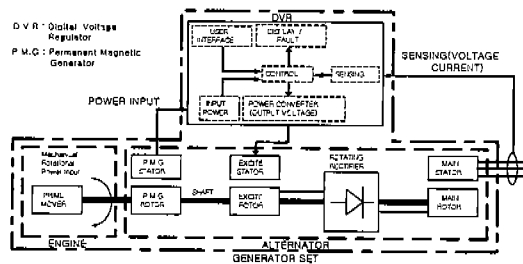


그림 6. 브러쉬리스형 동기발전기 여자시스템 구성도
Fig. 6. Diagram of brushless synchronous generator excitation system

그림 6은 동기발전기 내부 및 여자기 구조를 나타내고 있으며, DVR 내부의 제어 블록도를 보여주고

있다.

논문에 적용된 비상용 동기발전기는 그림 6과 같은 타여자식 브러쉬리스형 동기발전기이다.

여자시스템 전원은 P.M.G에서 공급받기 때문에 안정되고 독립적인 여자전원을 확보할 수 있고 출력 전압 변동에 따른 영향을 받지 않기 때문에 정지형 여자시스템보다 안정적인 제어특성을 얻을 수 있다.

3. 시뮬레이션 및 실험 결과

3.1 시뮬레이션

본 논문에서는 TCR 제어 방식의 문제점을 보완하고 계자강화능력을 향상시키기 위한 전압/전류 제어 방식의 Buck컨버터를 시뮬레이션을 통해 TCR 제어 방식과 비교하였다.

기존 TCR 여자시스템, 전압제어형과 전류제어형 Buck 컨버터 여자시스템의 파라미터는 표 1과 같다.

시뮬레이션에서 발전기 출력 전압의 변동은 I_{ref} , V_{ref} 변동으로 가정하였고, 안정적인 출력 전압을 위한 계자전류 제어는 응답 시간을 기준으로 각각 비교하였다.

표 1. 여자시스템 정격 파라미터
Table 1. Design parameters of excitation system

파라미터	정격
전압제어형 Buck컨버터 인덕턴스	3.1[mH]
전압제어형 Buck컨버터 커패시턴스	940[μF]
TCR 제어방식 주파수	60[Hz]
스위칭 주파수(전압제어형)	100[kHz]
스위칭 주파수(전류제어형)	2.5[kHz]

표 2는 논문에서 제안한 여자시스템이 적용된 50[kW]급 비상용 동기발전기 파라미터를 나타내고 있다.

그림 7은 TCR 제어방식 여자시스템 시뮬레이션 회로도이다. 기존 TCR 제어방식은 발전기 출력을 여자전원으로 사용하는 정지형 여자시스템이고 다 이리스터의 점호각제어에 의해 계자권선에 직류 전류를 공급하는 코사인 점호각 제어방식이다.

하지만 기존 제어방식인 코사인 점호각 제어방식은 전원에서부터 계자전류를 구하게 되는 방식으로, 전원 측에 고조파가 존재할 경우 오점호가 될 수 있으며, 이러한 문제점을 해결하기 위해 필터를 설치할 경우 위상 지연에 따른 점호지연을 피할 수 없게 된다.

표 2. 50[kW] 발전기 파라미터
Table 2. Parameters of 50[kW] synchronous generator

파라미터	정격
출력 전압	3 ϕ 380[V]
주파수	60[Hz]
회전수	1800[rpm]
계자 저항	18~20[Ω]
계자 인덕턴스	800[mH]
PMG 출력 주파수	250~300[Hz]
PMG 출력 전압	180~240[V]

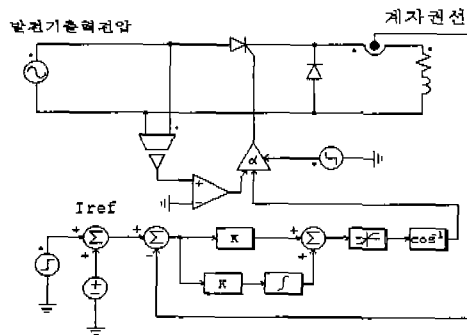


그림 7. TCR 방식 여자시스템
Fig. 7. Excitation system of TCR type

시뮬레이션 회로도에서 여자의 계자권선은 R-L회로로 등가화 하였다.

그림 8에서 Iref 변동시 TCR 제어방식의 계자전류는 0.2[A]에서 0.5[A]로 증가하는데 응답 시간이 약 0.25[s] 걸림을 확인할 수 있었다.

그리고 계자전류의 리플이 최대 0.2[A]임을 확인할 수 있다.

그림 9는 TCR 제어 방식의 문제점을 개선하고자

고주파 PWM 컨버터인 Buck 컨버터를 적용한 여자 시스템 시뮬레이션 회로도를 나타내고 있다. 전압 제어형 Buck 컨버터의 발전기 출력전압의 변동은 Vref 변동으로 가정하였다.

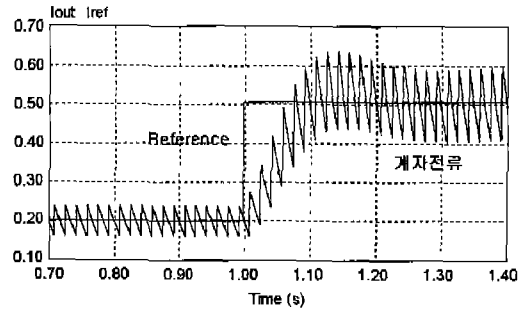


그림 8. TCR 제어방식 계자전류 파형
Fig. 8. Field current waveform of TCR control type(0.1A/div , 0.1s/div)

그림 9의 시뮬레이션 회로에서 계자권선을 R-L 회로로 등가화 하였으며, 그림 10의 파형은 그림 9의 Vref 변동 시 계자전류 파형을 나타내고 있다.

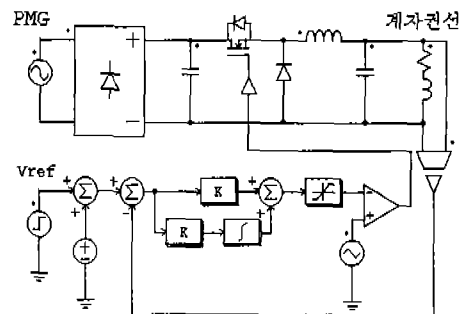


그림 9. Buck 컨버터(전압제어형) 여자시스템
Fig. 9. Excitation system of voltage mode control buck converter

Vref 변동시 발전기의 출력 전압 제어를 위한 계자전류 응답파형은 TCR 제어 방식보다 빠른 약 0.18[s]의 응답시간을 가짐을 확인할 수 있었다.

또한 TCR 방식과 비교해서 리플성분이 현저히 감소되는 것을 알 수 있다.

본 논문에서는 동기발전기 여자시스템에 LC필터를 제거한 전류제어형 Buck 컨버터를 적용하고자

한다. 전류제어형의 특징은 다음과 같다.

- i) 계자권선의 인덕턴스가 약 800[mH] 이므로 Buck 컨버터의 LC 필터를 제거 하여도 계자 권선 자체가 필터 역할을 수행할 수 있다.
- ii) 전류 제어형 Buck 컨버터를 설계함에 있어서 인덕터를 사용하지 않기 때문에 스위칭 주파수를 100[kHz]에서 2.5[kHz]로 낮추었다. 이로 인해 스위칭 소자의 스트레스를 줄일 수 있다.
- iii) 계자 권선의 잔류 자속으로 인한 역기전력 발생시 LC필터의 커패시터 파괴를 방지하기 위해 다이오드를 설치하여야 하지만 전류제어형은 설치할 필요가 없다.

위와 같은 이유로 전체적인 부품의 감소가 가능하여 제작비를 줄일 수 있고, 소형화를 가능 하게 한다.

그림 11은 본 논문에서 제안한 전류제어형 여자시스템의 시뮬레이션 회로도를 나타내고 있다.

전체적인 시뮬레이션 조건은 전압제어형 여자시스템과 동일하지만 전류제어형 여자시스템의 시뮬레이션 회로도에서는 LC필터를 제거 하였다는 차이점을 가진다.

그림 12는 전류제어형 Buck 컨버터의 계자 전류 파형을 나타내고 있다.

전류제어형 Buck 컨버터의 응답특성은 TCR 제어방식 및 전압제어형 Buck 컨버터 방식과 비교했을 때 가장 속응성이 우수한 응답특성을 보여 주고 있다.

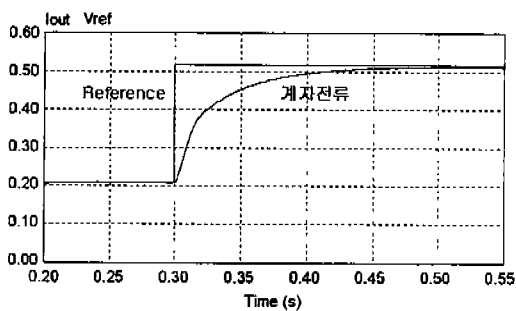


그림 10. 전압제어 Buck 컨버터 계자전류 파형
Fig 10. Field current waveform of voltage mode control buck converter (0.1A/div , 50ms/div)

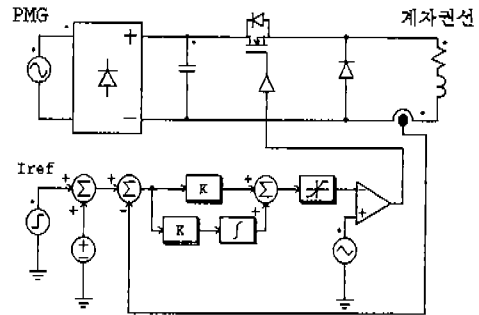


그림 11. Buck 컨버터(전류제어형)여자시스템
Fig. 11. Excitation system of current mode control buck converter

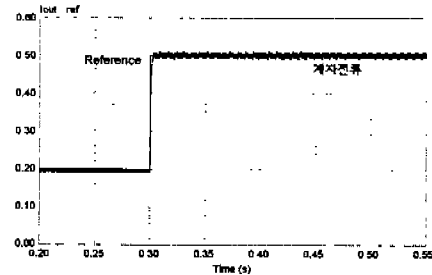


그림 12. 전류제어 Buck 컨버터 계자전류 파형
Fig. 12. Field current waveform of current mode control buck converter (0.1A/div , 50ms/div)

전체적인 시뮬레이션 결과에서 Buck 컨버터를 여자시스템에 적용하여 계자전류를 제어함으로써 동기발전기 여자시스템에 대한 응답 특성을 크게 개선할 수 있다.

3.2 실험 결과

그림 13의 두 파형은 50[kW]급 비상용 동기발전기에 기존 아날로그 TCR 제어방식의 AVR과 PWM 컨버터인 Buck 컨버터를 적용하였을 때 무부하에서 6[kW] 부하 변동시 제어되는 계자전류 파형을 나타내고 있다.

전압제어형 Buck 컨버터의 경우 약 0.2[s], TCR 제어방식인 경우 약 0.5[s] 이상의 응답 시간을 확인할 수 있다.

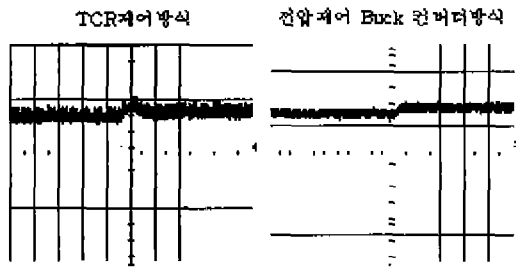


그림 13. 무부하 → 6[kW] 부하변동시 계자전류
 Fig. 13. Field current waveform at No load to 6[kW] load changes
 (0.2A/div , 0.5s/div)

그림 14의 파형은 12[kW]에서 18[kW] 부하 변동시 계자전류 파형을 나타내고 있다.

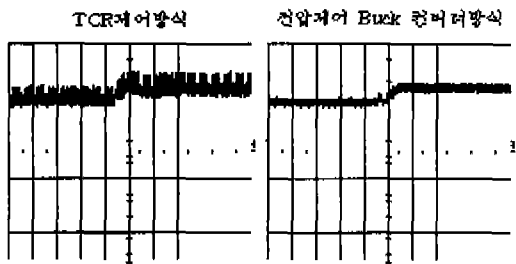


그림 14. 12[kW] → 18[kW] 부하 변동시 계자전류 파형
 Fig. 14. Field current waveform at 12[kW] to 18[kW] load changes
 (0.2A/div , 0.5s/div)

그림 15의 파형은 본 논문에서 제안한 전류제어형 Buck 컨버터에 의해 제어되는 계자전류 파형을 나타내고 있다. 파형 (a)는 약 0.1[s], (b)의 파형은 전압제어형 보다 빠른 0.2[s]의 응답 시간을 가짐을 확인할 수 있다.

표 3과 같이 Buck 컨버터 제어방식이 TCR 제어 방식 보다 응답속도가 빠르고, 계자전류 자체의 리플성분도 감소했음을 실험을 통해 확인할 수 있다.

또한 3가지 제어방식 중 전류제어형 여자시스템이 응답시간과 전체적인 회로 구성 면에서 가장 좋은 특성을 가짐을 확인할 수 있다.

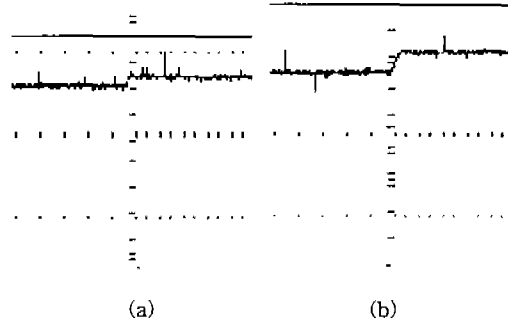


그림 15. 전류제어 Buck 컨버터 계자전류 파형
 Fig. 15. Field current waveform of current mode control buck converter
 (0.2A/div , 0.5s/div)
 (a)No load→6[kW] (b)12[kW]→18[kW]

표 3. 여자시스템 실험 결과
 Table 3. Experimental result of excitation system

	T C R 위상제어AVR	전압제어형 Buck컨버터	전류제어형 Buck컨버터
계자전류 응답시간 (12kW→18kW)	0.5[s]이상	0.4[s]	0.2[s]
전류리플	180[mA]	80[mA]	30[mA]
스위칭 주파수	60[Hz]	100[kHz]	2.5[kHz]
인터페이스	외부장치 필요	외부장치 불필요	외부장치 불필요
비용	저렴	L,C 필터 아날로그 제어회로	전압제어형 보다 저렴

그림 16은 본 연구에 적용된 디젤 엔진으로 구동되는 50[kW]급 비상용 동기발전기 모습이다.



그림 16. 50[kW] 동기 발전기
 Fig. 16. 50[kW] synchronous generator

그림 17은 50[kW] 동기발전기의 주발전기와 보조 발전기를 나타내고 있다.

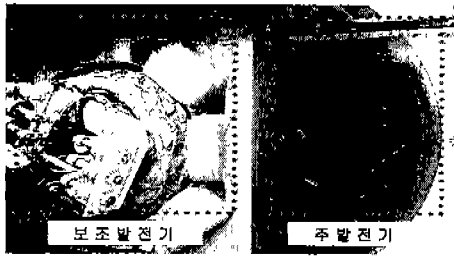


그림 17. 보조발전기와 주발전기
Fig. 17. Pilot generator and main generator

4. 결론

기존의 아날로그 TCR 제어 방식은 발전기 전압을 왜곡시키는 부하가 연결될 때 다이리스터의 제어각을 정확하게 설정할 수 없어 발전기 출력전압을 신속하게 제어할 수 없다.

본 논문에서는 TCR 방식에 대한 문제점을 개선하기 위하여 DC-DC 컨버터인 고주파 PWM Buck 컨버터를 발전기의 여자시스템에 적용하여 빠른 응답특성을 가지도록 설계하였다.

디지털 제어와 속응성이 우수한 발전기 출력 전압 제어가 가능함을 시뮬레이션과 실험을 통해 검증하였다.

본 연구에서는 고주파 PWM 컨버터로 디지털 DVR을 구현하여 부하변동에 속응성 있는 계자전류 제어와 정교한 발전기 제어가 가능함을 확인하였다.

본 기술 내용은 과학기술부 연구성과 지원사업의 지원에 의하여 연구되었음. (2001.01~2002.11)

References

[1] Chung-Yuen Won, Jung-ho Ahn, "A trend of excitation system for synchronous generator and digital voltage control", The proceedings of the Korean institute of illuminating and electrical installation engineers,

pp.51-57, 2002.
 [2] Chang-Yong Jung, "Digital avr of chopper type", Korea electrotechnology research institute, 1999.
 [3] Hong-Woo Lyu, "A boost-buck chopper type static excitation system for synchronous generator", Seoul national university, Ph.D thesis, 1996.
 [4] Idk-Hun Lim, "A study on the development of digital excitation control system of synchronous generator", Hong ik university, 2001.
 [5] "An american national standard IEEE standard definitions excitation systems for synchronous machines", pp.8-14, 1986.
 [6] Min-Sung Seo, "High performance control of digital excitation system for synchronous generator", 2002 Power electronics annual conference, pp.763, 2002.

◇ 著者紹介 ◇

장수진(張水珍)

1976년 12월 6일생. 2002년 서울산업대 공대 전기공학과 졸업. 현재 성균관대 대학원 에너지시스템공학과 석사과정.

류동균(柳東均)

1972년 11월 28일생. 1999년 우석대 정보통신 및 컴퓨터공학부 졸업. 2003년 성균관대 대학원 전기전자 및 컴퓨터공학과 졸업(석사). 현재 삼성전기 정보기기사 업무.

서민성(徐旻成)

1974년 5월 20일생. 2001년 서울산업대 공대 전기공학과 졸업, 2003년 성균관대 대학원 메카트로닉스공학과 졸업(석사). 현재 LG전자 DDM 사업부.

김준호(金俊浩)

1971년 3월 11일생. 1999년 성균관대 공대 전기공학과 졸업, 2001년 성균관대 대학원 대체에너지공학과 졸업(석사). 2001년~현재 동 대학원 전기전자 및 컴퓨터공학과 박사 과정. 산업자원부 기술표준원 전기응용과.

원충연(元忠淵)

1955년 5월 10일생. 1978년 성균관대 공대 전기공학과 졸업. 1980년 서울대 공대 대학원 전기공학과(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1991년 12월~1992년 12월 미국 테네시 주립대학 전기공학과 방문교수. 현재 성균관대 전기전자 및 컴퓨터 공학과 교수. 당 학회 편수위원.

이진국(李鎭國)

1964년 7월 11일생. 1990년 인하대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1993년 11월~2000년 8월 대우중공업 철차사업부 근무. 2000년 9월~현재 (주)케이투파워 연구원.