단위역률동작을 위한 동기 발전기 여자 시스템용 2단 3상 PWM AC/DC 컨버터

(2-stage 3-phase PWM AC/DC Converter for Unity Power Factor Drive of Synchronous Generator)

이상훈 · 김태형 · 이동희 · 안진우
(Sang-Hun Lee · Tae-Hyoung Kim · Dong-Hee Lee · Jin-Woo Ahn)

Abstract

The terminal voltage of a synchronous generator is maintained by the field current control of excitation system. Generally AC/DC converter which is component of AVR(Automatic Voltage Regulator) system for excitation current control is connected to diode rectifier and DC/DC converter system. In the case of diode rectifier system of phase controlled converter, AC/DC converter has low power factor and some low order harmonics in the line current. In this paper, two-stage three-phase PWM AC/DC converter is studied to solve these problems. The proposed method is verified by the computer simulations and experimental results in prototype generation system.

1. 서 론

최근 전력산업의 발달과 더불어 전력 장비의 신뢰성에 대한 요구가 점점 높아지고 있다. 현재 발전기의 여자기를 제어하기 위한 발전기용 AVR (Automatic Voltage Regulator)의 다수는 여자기에 여자전원을 공급하기 위한 전력변환 회로로서 TCR (Thyristor Control Rectifier)방식을 사용하고 있다.

TCR 방식의 경우, 적용성과 신뢰성에 있어 다른 AVR 시스템에 비해 장점을 가지는 반면에 다음과 같은 문제점을 가지고 있다.

첫째, 비선형 부하, 특히 전력변환 부하장치에서 발생되는 고조파 전류는 전원계통의 전압왜곡을 일으키며 이로 인하여 다이리스터의 제어각을 정확하게 설정 할 수 없어 오동작의 원인이 되기도 하고 정밀한 출력 전압 제어를 할 수 없다. 또한 TCR 자체가 AC 전원 단에서 저차 고조파의 발생 및 역률 저하 등의 문제점을 가진다.[1]

둘째, 발전기 출력 전압을 빠르게 제어하려면 AVR의 속응성이 좋아야 한다. 그러나 일반적인 정지형 TCR 제어방식은 TCR 전력변환기의 빠른 응답 특성을 얻기가 어렵다.[1][3]

이와 같이 TCR을 이용한 AVR 시스템의 단점을 극복하기 위하여 다이오드 정류기기와 IGBT를 이용하여 AC/DC 컨버터를 구성한 DAVR(Digital Automatic Voltage Regulator)에 대한 관심이 고조되고 있다. 그러나 이와 같은 DAVR의 경우 AC/DC를 변환을 위해 출력전압을 제어 할 수 없는 다이오드 정류기를 주로 사용하므로 AC 전원단에서 저차 고조파의 발생 및 역률 저하 등의 문제점를 발생시킨다.

본 논문에서는 TCR을 이용한 AVR 시스템의 저차 고조파 발생 및 역률저하와 출력전압의 속응성을 개선하기 위하여 기존의 다이오드 정류기에서 단위역률제어와 Boost 기능을 알 수 있도록 1단 컨버터를 설계하고, 1단 컨버터에서 출력된 전압을 조절 할 수 있는 Buck 컨버터를 2단으로 설계하였다.[4][5][6] 제안된 3상 Boost형 컨버터는 큰 용량의 필터 없이 단위 역률제어가 가능하도록 DC-Link 단에 Boost 컨버터를 사용하였고, 컨버터 교류 측에 필터 커패시터와 부스트 인덕터를 추가 시킨 구조로 되어 있다. 3상 AC/DC 컨버터에 의해 출력된 DC전압은 부하변동에 의한 발전기 출력전압의 속응성 있는 제어와 계자전류 제어를 위해 전류 제어형 Buck 컨버터를 적용하고자 제안하였다.

이와 같은 제안된 발전기 여자 시스템 제어를 위한 AVR 시스템에 대한 타당성과 응답성을 검증하기 위하여 회로 해석 프로그램인 PSIM을 이용해 시뮬레이션 하였고, 소형 발전기 시스템에 적용된 실험을 통하여 그 성능을 검증하였다.

2. 동기 발전기 여자 시스템

2.1 동기발전기 여자 시스템의 종류

발전기의 여자시스템은 크게 정지형 여자시스템과 교류 여자시스템으로 구분될 수 있다.

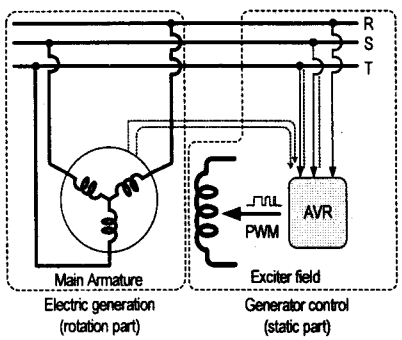


그림 1. 정지형 발전기 여자 시스템
Fig. 1. Static exciter type for AC generator

그림 1은 정지형 여자시스템의 한 형태를 나타내

고 있다. 이 방식은 구성 간단하며 여자기가 없어 시지연을 제거할 수 있다는 장점은 있으나, 발전기의 출력 전압을 여자기 전원으로 공급하기 때문에 출력단의 다양한 사고에 직접적인 영향을 받는다는 단점이 있다.

그림 2는 교류 여자 시스템의 한 형태인 브러쉬리스형 교류여자 방식을 나타내고 있다.

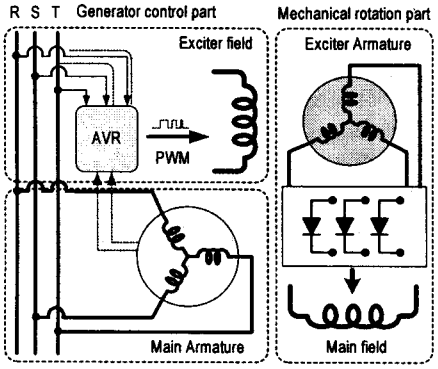


그림 2. 교류형 발전기 여자 시스템
Fig. 2. AC exciter type for AC generator

이 방식은 고장시 보수에 대한 어려움이 있고 동일한 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.[7][8][9]

2.2 여자기 제어를 위한 AVR 시스템

제안된 3상 AC/DC 컨버터의 효용성을 위해 기존의 다이오드 정류방식의 AVR 시스템과 단위역률 제어가 가능한 제안된 AVR 시스템에 대한 구성도를 그림 3과 그림 4에 나타내었다. 기존의 AVR 시스템의 경우 AC/DC 변환을 위해 제어가 없는 다이오드 정류기를 사용 하였고, 출력된 DC 전압 제어를 위해 강압형 전력변환기인 Buck 컨버터를 사용하였다. 이에 반해 제안된 컨버터는 2개의 전력변환부로 이루어져 있다. 즉 입력필터 L_{filter}, C, 부스트 인덕터 L_{boost}, 다이오드 정류기 그리고 Q_{boost} 를 이용하여 단위역률과 전원전압을 부스트 할 수 있는 1단 Boost 컨버터를 구성하였으며, 출력된 DC전압 크기를 조절 할 수 있도록 2단 Buck 컨버터로 구성되었다.

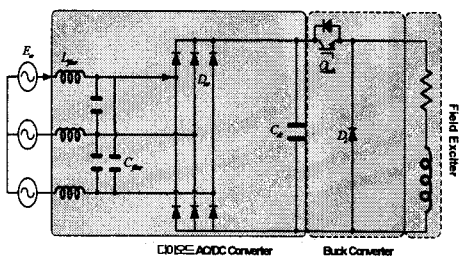


그림 3. 일반적인 다이오드 형 AVR 시스템
Fig. 3. Diode bridge type AVR system

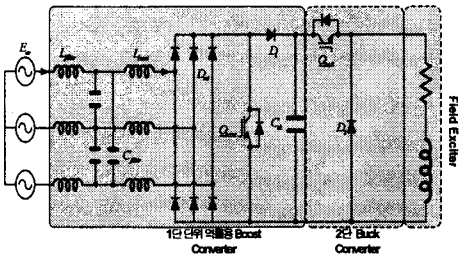


그림 4. 제안된 단위역률 형 AVR 시스템
Fig. 4. Proposed PFC type AVR system

그림 5와 그림 6은 AC/DC 변환에 대한 두 회로의 입력 전압 및 전류 파형을 나타낸 것이다. 일반적인 다이오드 브릿지 정류기의 경우 해석에 의해 큰 불연속 전류가 출력 측 커패시터로 입력됨을 알 수 있다. 이에 반해 제안된 방식은 입력 전압의 기본파 성분과 Q_{boost} 동작에 의해 발생하는 불연속 전류의 파형이 일치함을 알 수 있으며, 입력 측 필터 설계를 통해 입력 전압과 동일한 연속 전류를 출력측 콘덴서로 공급함으로서 역류 개선이 가능해 진다.

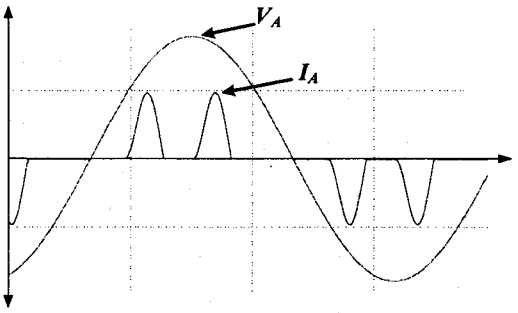


그림 5. 일반적인 AVR 시스템의 입력 전압 전류
Fig. 5. Input voltage and current of conventional AVR system

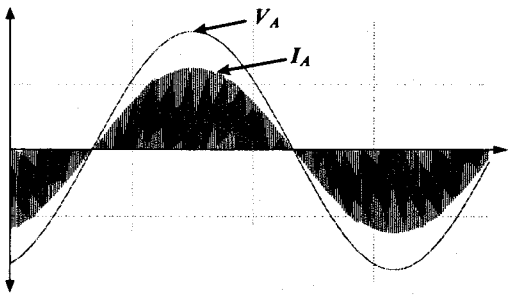
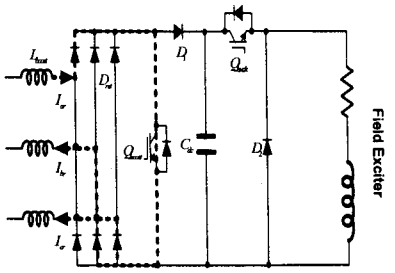


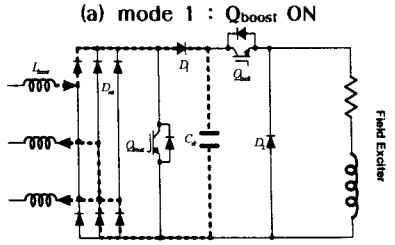
그림 6. 제안된 AVR 시스템의 입력 전압 전류
Fig. 6. Input voltage and current of proposed AVR system

2.3 제안된 AVR 시스템의 동작원리

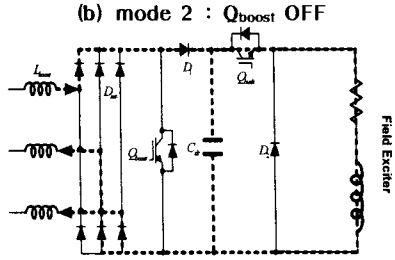
제안된 컨버터의 동작모드를 나타내면 그림 7과 같다. 이때 해석을 간단히 하기 위해 L_{filter}와 C_{filter}로 이루어진 필터부는 설명에서 제외하였다.



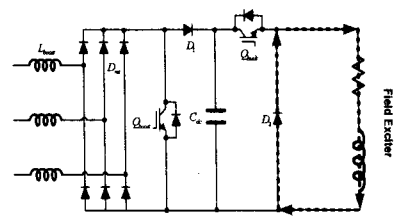
(a) mode 1 : Qboost ON



(b) mode 2 : Qboost OFF



(c) mode 3 : Qbuck ON



(e) mode 4 : Qbuck OFF

그림 7. 스위칭 상태에 따른 등가회로도
Fig. 7. Equivalent circuit according to switching state

▪ **Mode 1** : 컨버터 교류측의 각 상은 3개의 인덕터 L_{boost}와 다이오드 정류기 및 Q_{boost}을 통하여 단락되게 된다. 그리고 각 상의 교류전류 i_{ar1}, i_{br1}, i_{cr1} 은 각 상전압의 순시치에 비례하여 동시에 증가하기 시작한다.

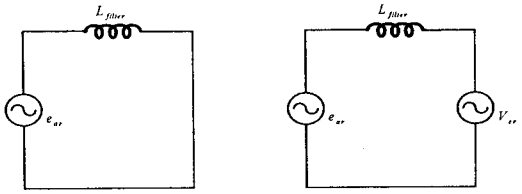
▪ **Mode 2** : Q_{boost}가 OFF되면 그림과 같이 정류다이오드 D_{ret}, 다이오드 D_1, 평활용 콘덴서 C_{dc}을 통해 동작하게 된다. 이 경우 부스트 인덕터는 ON 구간동안에 축적된 에너지를 평활용 콘덴서 C_{dc}와 벅 컨버터로 방출한다. 이 때 평활용 콘덴서 전압 C_{dc}는 증가하기 시작하고 각 상의 부스트 인덕터를 통해 흐르는 전류는 감소하여 영에 도달하게 된다. 컨버터 교류 측 전류의 파형은 승압쵸퍼의 3개의 요소인 부스트 인덕터L_{boost}, 평활용 콘덴서C_{dc}, 그리고 부스트 스위치 Q_{boost}를 제어하는 시비율D_f을 사용하여 능동적으로 제어 될 수 있으며 Q_{boost}은 일정한 주파수로 동작한다.

▪ **Mode 3** : Q_{buck}이 ON되면 그림과 같이 정류다이오드 D_{ret}, 다이오드 D_1, 평활용 콘덴서C_{dc}을 통해 충전된 전압을 이용하여 발전기의 여자코일에 DC전압을 인가하게 된다. 발전기의 여자코일의 경우, 코일의 저항 R과 코일의 인덕턴스 성분인L로 등가가 가능하며, 인덕턴스 L은 자속을 발생시키는 여자코일의 경우 전기자 코일에 비해 크다. 따라서 Buck 컨버터 출력단의 필터를 제거하여도 무방하다.

▪ **Mode 4** : Q_{buck}가 OFF되면 그림과 같이 여자코일L에 축적된 에너지를 환류용 다이오드D_2을 통해 환류 하게 된다. 이때 여자코일에 축적된 에너지는 벅 컨버터용 스위치 Q_{buck} 의 시비율에 의해 결정되며 Q_{buck} 스위치의 시비율은 여자코일에 흐르는 전류에 의해 결정하게 된다. 실제 계자코일의 자속은 코일에 흐르는 전류에 의해 결정되므로 전류제어를 통해 동기 발전기 여자시스템에 대한 응답 특성을 개선시킬 수 있다.

2.4 단위역률 제어를 위한 교류 해석

그림 8는 Boost스위치의 ON-OFF 동작시 필터를 생략한 컨버터 교류 측의 단상등가회로를 나타낸다.



(a) Boost switch ON (b) Boost switch OFF

그림 8. Boost 컨버터의 교류측 상당 등가회로
Fig. 8. Phase equivalent circuit according to AC side of Boost converter

그림 8에서 스위치가 ON되는 구간동안 ($t_0 \le t \le t_1$ 이하)에 Boost 인덕터 전류 i_{ar1} 은 모선의 전압 e_{ar} 과 Boost 인덕터 L_{boost}에 의해서 정해진 비율로 증가한다. 이 구간동안에 i_{ar1} 은 다음과 같이 주어진다.

$$e_{ar} = E_{mr}\sin(w_r t) = L_{boost}\frac{di_{ar}}{dt} \qquad (1)$$

여기서 E_{mr}은 회전자 유기전압의 최대치이고 w_r은 전원 주파수이다. 식 (1)에서 $t = t_0$ 일 때이 초기 조건 $i_{ar}(w_r t_0) = 0$를 대입하여 풀면 식 (2)와 같다.

$$i_{ar} = \frac{E_{mr}}{w_r L_{boost}}[\cos(w_r t_0) - \cos(w_r t)] \qquad (2)$$

이때 t_0는 Boost 스위치가 ON 되기 시작하는 시간이고 t_1 은 ON 구간이 끝나는 시간이다. 그 이후 Boost 스위치가 OFF되는 구간 동안 $t_1 \le t \le t_2$에 인덕터를 흐르는 전류는 감소하며, 그 비율은 e_{ar}과 v_d 및 L_{boost} 의 크기에 의해 결정된다. Boost 컨버터 이론에 따르면 Boost 스위

치가 OFF되었을 때 등가적인 컨버터의 교류 측 상 전압은 다음과 같이 주어진다.

$$v_{er} = \frac{1}{1-D_F} e_{ar} \quad (3)$$

여기서 D_f 는 Boost 스위치의 듀티비(Duty ratio), v_{er}은 다이오드 정류기 교류측의 단자전압을 나타낸다. 이 구간 동안에 회로의 전압방정식은 다음과 같다.

$$E_{mr}\sin(w_r t) = L_{boost}\frac{di_{ar}}{dt} + v_{er} \quad (4)$$

$t = t_1$ 일 때의 초기조건 $i_{ar1}(w_r t) = i_{ar1}(w_r t_1)$을 대입하여 위식을 풀면 인덕터를 흐르는 전류 i_{ar1}은 다음과 같이 된다.

$$i_{ar} = \frac{E_{mr}}{w_r L_{boost}}[\cos(w_r t_1) - \cos(w_r t)] - \frac{v_{er}}{L_{boost}}(t - t_1) \quad (5)$$

설계시 가장 중요하게 고려하여야 할 동작조건은 모선 전압의 최대치E_{mr}에서 Boost 스위치가 ON되는 경우이다. 이때 인덕터를 흐르는 전류 i_{ar1}은 최대비율로 증가하여 $t = t_1$에서 최대값이 되며, 이 값에서 다시 0으로 감소하는데 걸리는 시간 또한 최대가 되어 Boost 스위치의 주파수는 e_{ar} 과 v_d의 함수가 된다. 따라서 식 (2)에 $w_r t_0 = \frac{\pi}{2}$ 와 $w_r t$ 대신에 $(w_r t + \frac{\pi}{2})$를 대입하면 다음과 같이 된다.

$$i_{ar} = \frac{E_{mr}}{w_r L_{boost}}\sin(w_r t_1) \quad (6)$$

실제로 부스트 스위치의 스위칭 주파수 f_b는 수 [kHz] 이상이므로 입력전압의 시간주기에 비해 부스트 스위치의 ON 구간은 매우 작다. $w_r t$ 가 아주 작은 경우 $\sin(w_r t)$는 거의 $w_r t$와 같기 때문에 식(6)은 다음과 같이 된다.

$$i_{ar}(w_r t) = \frac{E_{mr}}{L_{boost}} t, \qquad 0 \le t \le t_1 \quad (7)$$

$t = t_1$에서 i_{ar1}은 최대값이 되며 Boost 스위치는 OFF된다. 마찬가지로 식()에 $w_r t_0 = \frac{\pi}{2}$와 $w_r t$ 대신에 $(w_r t + \frac{\pi}{2})$를 대입하면 식(8)과 같이 되며,

$$i_{ar1}(w_r t) = \frac{E_{mr}}{w_r L_{boost}}\sin(w_r t_1) - \frac{v_{er}}{L_{boost}}(t - t_1) \quad (8)$$

$\sin(w_r t)$ 대신에 $w_r t$를 대입하면 다음 관계식이 성립된다.

$$i_{ar1}(w_r t) = \frac{E_{mr}}{L_{boost}} t - \frac{v_{er}}{L_{boost}}(t - t_1), \; t_1 \le t \le t_2 \quad (9)$$

여기서 스위치가 OFF되었을 때, Boost 컨버터의 출력전압 v_b는 거의 변화하지 않으므로 v_{er}의 크기도 변화하지 않는다. 따라서 식()에 $t = t_2$에서의 값 $i_{ar1}(w_r t_2) = 0$를 대입하고 v_{er}을 일정한 크기를 나타내는 값 v_{er}로 나타내면 아래와 같다.

$$\frac{t_2}{t_1} = \frac{v_{er}}{v_{er} - E_{mr}} \quad (10)$$

한편 스위치 OFF시 정류기의 교류 입력전압 및 직류 출력전압 사이에는 다음과 같은 관계가 성립해야 한다.

$V_d \ge \sqrt{3}\, V_{er}$

여기서 V_{er} : 정류기 교류측 상전압의 실효치

V_d : 정류기 교류측 단자전압의 평균치

만약 V_d와 V_{er}사이에 위와 같은 관계식이 성립되지 않으면 인덕터 전류 i_{ar1}의 감소비율이 작아지게 되어 Boost 컨버터는 불연속모드로 동작하지 않게 된다. 따라서 이러한 경우에는 Boost 스위치 Q_{boost}가 다시 ON 되기 전에 i_{ar1}이 영으로 될 수 있도록 Q_{boost}의 스위칭 주파수를 감소시켜야 한다. 그러나 스위칭 주파수를 일정하게 하는 경우에는 Boost 스위치의 듀티비를 감소시켜야 한다. 따라서 Boost 스위치 Q_{boost}의 스위칭 주파수 f_b는 컨버터 직류 측 전압 V_d의 함수가 된다. 그리고 인덕터 전류 i_{ar1}의 피크값은 인덕터의 크기 L_{boost}, 스위칭 주파수 f_b, 듀티비 D_f 등의 함수가 된다.

3. 시뮬레이션 및 실험결과

제안된 2단 3상 PWM AC/DC 컨버터에 대한 타당성을 검증하기 위해 Psim을 이용하여 시뮬레이션을 실시하였다.

그림 9는 기존의 Buck 컨버터를 이용한 전류제어형 DC/DC 컨버터와 3상 브릿지 정류기를 이용한 3상 AC/DC 컨버터의 브릿지 정류기 입력 측 전류 및 전압과 Buck 컨버터의 입력전압 및 출력전류를 나타내고 있다. 그림과 같이 다이오드 정류기에서의 입력 상 전류와 전압파형은 전류 파형이 연속된 펄스 형태로 됨에 따라 5차, 7차와 같은 저차 고조파 성분을 가지고 있다. Buck 컨버터의 경우 입력 전압인 V_{dc}의 변동이 없으며, 출력 전류의 경우 기존에 전류제어형 벅-컨버터와 같이 100[ms]에서 정상상태로 도달됨을 알 수 있다.

그림 10은 제안된 2단 3상 PWM AC/DC 컨버터를 이용한 발전기 여자 시스템에서 3상 AC/DC 컨버터의 브릿지 정류기 입력 측 전류 및 전압과 Buck 컨버터의 입력전압 및 출력 전류를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 다이오드 정류기에서의 입력 상전류와 전압파형은 정현파에 가까우면서 저차 고조파는 찾아보기 어려우며 스위칭 주파수에 해당하는 부분에서만 확인이 가능하다. 출력 전류의 경우 60[ms]에서 정상상태로 도달됨으로서 기존에 전류제어 형 벅 컨버터에 비해 전류응답성을 40% 개선 시켰다.

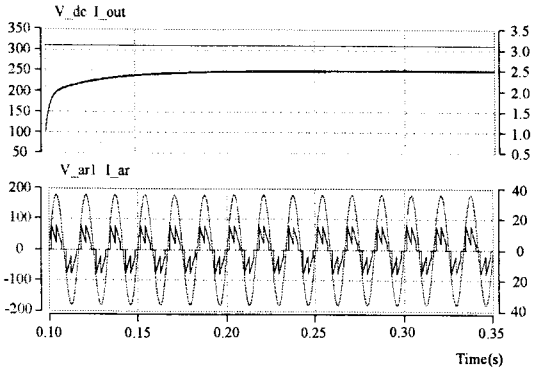


그림 9. 기존의 Buck 컨버터를 이용한 전류 제어형 발전기 여자 시스템
Fig. 9. The Exciter system of current control mode buck converter

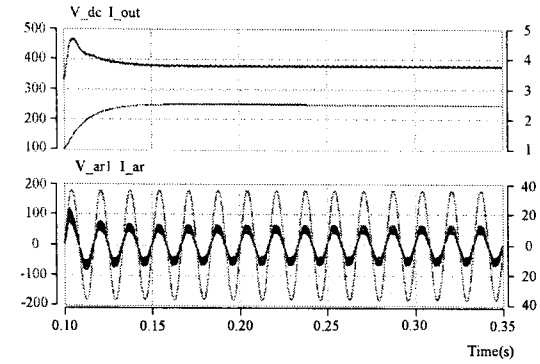


그림 10. 제안된 2단 3상 PWM AC/DC 컨버터를 이용한 발전기 여자 시스템
Fig. 10. The proposed exciter system using 2 stage 3 phase AC/DC converter

그림 11과 그림 12는 기존의 발전기 여자 시스템과 제안된 발전기 여자시스템의 입력 전압 및 출력 전압에 대한 파형이다. 시뮬레이션 결과를 토대로 그림 12에서 알 수 있듯이 제안된 발전기 여자 시스템의 Boost 스위치인 Q_{boost}를 통해 입력 전압 및 전류는 입력 전류의 고조파 성분을 줄이기 위해 사용된 입력 필터에 의해 약간의 위상차가 발생하나 동 위상에 가까운 단위역률이 잘 이루어짐을 알 수 있다.

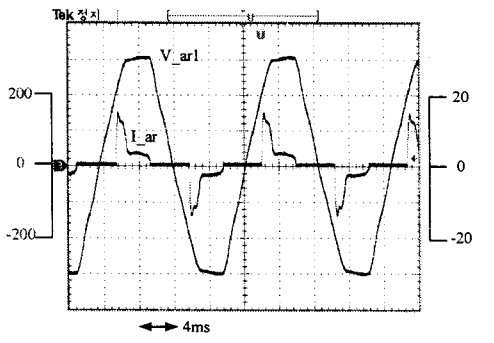


그림 11. 기존 발전기 여자 시스템의 입력 전압, 전류
Fig. 11. The Input voltage and current of conventional exciter system.

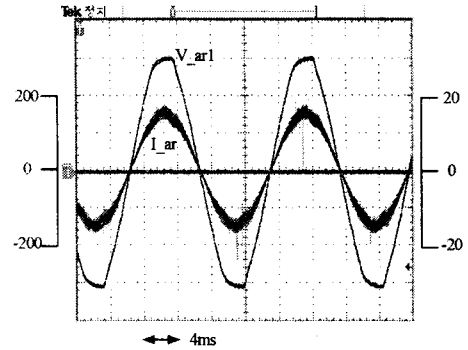


그림 12. 제안된 발전기 여자 시스템의 입력 전압, 전류
Fig. 12. The Input voltage and current of proposed exciter system.

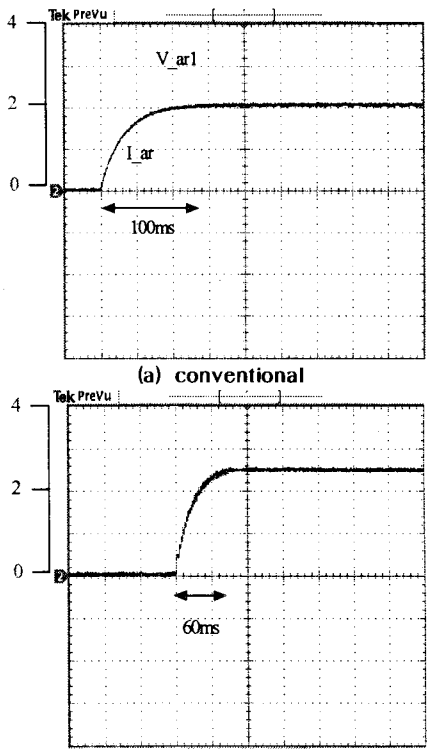


그림 13. 초기 기동 시 두 컨버터의 전류 응답 특성
Fig. 13. Current response of each converter (starting mode)

그림 13은 기존의 발전기 여자시스템의 사용된 전류 제어 형 Buck 컨버터와 본 논문에서 제안된 2단 3상 PWM AC/DC 컨버터의 전류 응답 특성을 나타낸다. 그림 13(a)에서 초기 기동 시 기존의 전류제어 형 Buck 컨버터의 경우 정상 상태 응답시간이 100[ms] 정도임을 확인 할 수 있다. 그림 13(b)의 제안된 컨버터의 경우 초기 기동 시 정상 상태 응답시간은 60[ms] 정도가 된다. 이는 별도의 속응성이 우수한 제어기 없이 1단 Boost 컨버터의 전압 제어를 통해 초기 기동 시 기존의 전류

제어 형 Buck 컨버터에 비해 응답 시간을 40%정도 개선시킬 수 있음을 알 수 있다. 그림 14는 기존의 Buck 컨버터와 제안된 2단 컨버터의 전류 지령치를 1[A]에서 2.5[A]로 변화를 주었을 때의 두 인버터의 응답 특성을 나타낸다. 그림 14에서 알 수 있듯이 부하변동에 의해 전류 지령치 변화에 따른 속응성에 대해 기존의 전류제어형 Buck 컨버터와 제안된 2단 컨버터 방식과 비교 했을 때 기존의 전류제어형 Buck 컨버터에 비해 제안된 2단 컨버터가 속응성이 우수한 응답특성을 보여주고 있다.

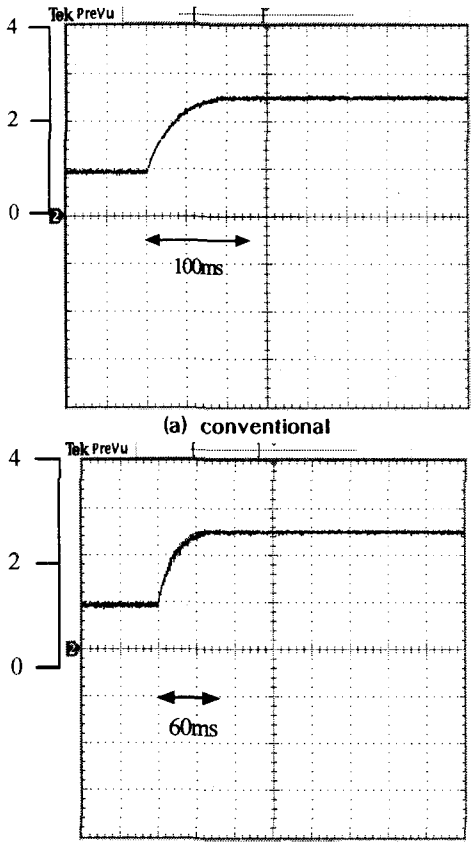


그림 14. 부하 변동 시 두 컨버터의 전류 응답 특성 (1 [A] →2.5 [A])

Fig. 14. Current response of each converters (Load changed) (1 [A] →2.5 [A])

4. 결 론

본 논문에서는 기존의 동기 발전기의 출력 전압 제어를 위한 AVR 시스템 적용에 있어, 고주파 PWM 방식 DC/DC 컨버터인 Buck 컨버터에 대해 DC/DC 컨버터의 입력이 단위 역률로 동작하며, 단위 역률을 위해 사용한 스위치 소자와 인덕터를 이용하여 DC_Link단의 전압을 가변 할 수 있는 Boost 컨버터의 기능을 할 수 있도록 시스템을 설계하였다. 제안된 컨버터 시스템의 경우 모선의 역률개선 및 고조파 감소와 속응성 있는 발전기 여자 전류제어가 가능하다. 제안된 인버터의 성능을 확인하기 위해 시뮬레이션을 통해 입력단의 필터의 회로정수인 캐패시터와 인덕터의 용량을 산정하여 실제 단위역률이 가능함을 검증 하였으며, 제안된 컨버터의 전류응답특성 개선을 위해 실제 전류와 지령전류의 차를 Boost 컨버터 스위치의 시비율에 보상함으로서 부하 변동 시 별도의 속응성 있는 제어기 없이 DC_Link 전압으로 전류응답 특성을 개선하였다. 제안된 2단 3상 PWM AC/DC 컨버터에 대한 타당성을 위해 인버터 시작기를 제작하여 실험하였으며, 실험결과 기존의 컨버터에 비해 단위 역률이 이루어짐을 알 수 있었다. 또한 전류 응답특성의 경우 기존에 비해 40% 정도 개선됨을 알 수 있었다.

본 연구는 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업의 연구 결과로 수행되었음.

[참 고 문 헌]

[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 illumination and electrical installation engineers, 00.51-57, 2002.

[2] D.D.Shipp, " Harmonic Analysis and supression for Electrical Systems Supplying Power Conerters and Other Nonlinear Loads", IEEE, IA-15, No, 5,pp,1~6, 1979.

[3] Chang-yong, Jung, "Digital avr of chopper type", Korea electrotechnology research institute, 1999.

[4] W. Tang, F. C. Lee and R. B. Ridley, " Small signal modeling of average current mod control", Applied Power Electronics Conf. Proc, pp. 747-755, 1992.

[5] R. W. U, S. B. Dewan, and G. R. Slemon, " Analysis of an AC-DC voltage source converter using PWM with phase and amplitude control", IEEE, IA-27, NO. 2, pp 355-364, 1991.

[6] L. Malessani, L. Rossetto, P. Tenti, and P. Tomasin, "AC/DC PWM converter with reduced energy storage in the DC Link", IEEE Trans. on Industry Applications Vol. 31 NO. 2 pp 287-292, 1995.

[7] Hong-Woo Lyu, " A boost-buck chopper type static excitation system for synchronous generator", Seoul National University, Ph.D Thesis, 1996.

[8] Ahmad Darabi, Colin Tindall, "Finite-Element time-step coupled Generator, Load, AVR, and Burshless Exciter Modeling" IEEE Transactions on energy conversion, Vol. 19, NO. 2, pp 258-264, 2004

[9] 장수진, 류동균, 서민성, 김준호, 원충연, 이진국, " 전류제어형 PWM컨버터를 이용한 동기발전기용 여자 시스템에 관한 연구", 조명 전기설비학회논문지 제 17권 제3호, PP 32~39, 2003.

[10] Electric Power Research Institute, AP-3351 Photovoltaic Power System Research Evaluation, "A Report of the EPRI ad hoc Photovoltaic Advisory committee Unlimited EPRI", Poro Alto, CA,1983

[11] 천창근, 김철우, "전류센서리스 단위 역률 3상 PWM AC/DC Boost 컨버터", 조명 전기설비학회논문지 제 17권, 제 6호, PP. 105-111, 2003년 11월.

[12] 정영석," 전력변환회로의 디지털 전류모드제어기 설계", 전력전자학회 논문지 제10권, 제 2호,PP162-168, 2005년 4월