

# 철도차량 PWM Converter Zero Crossing 스위칭 기법 Zero Crossing Switching Method for PWM Converter in Rolling stock

김진용†                      김연충\*                      박성호\*\*  
Jin-Yong Kim              Yen-Chung Kim              Sung-Ho Park

---

## ABSTRACT

Last train of the vehicle for eht energy saving and improved performance PWM converters ares widely used. In the case of PWM converters by the zero detection system performance depends on whether it can be argued. Zero voltage detectio method of the hardware and software approach is to in this paper, the zero detection methods for hardware and software problems that have occured as a complemnetary technique was expained.

---

### 1. 서론

최근 가선 전압이 교류(AC)인 철도 차량에서 성능 향상 및 에너지 절감 등을 위해 교류(AC) 전력을 직류(DC) 전력으로 변경하는 전력 변환 장치로 단상 승압형 PWM 컨버터가 많이 이용 되고 있다.

철도 차량에서 교류 전력을 직류 전력의 전력 변환 장치로는 주로 정류기(Rectifier)나 싸이리스터 위상 제어를 사용하였다. PWM 컨버터를 기존에 주로 사용되었던 정류기나 싸이리스터 위상 제어기와 비교하면, PWM 컨버터 적용으로 가선 전원의 전류 제어가 가능하여, 전원의 역률을 향상 시킬 수 있으며, 철도 차량의 감속시 에너지를 가선으로 회생할 수 있는 등의 효과를 얻을 있다.

철도 차량의 에너지 회생 및 역률 개선 등의 이점이 있는 PWM 컨버터의 경우 가선 전압의 영점 검출 정확성 여부와 이에 의한 스위칭 기법에 의해 PWM 컨버터의 성능 좌우된다고 할 수 있다.

가선 전압의 영점을 검출하는 방법은 하드웨어적인 방법과 소프트웨어적인 방법이 있으며, 최근에는 하드웨어기법과 소프트웨어적인 기법을 조합하여 최성의 성능을 발휘하고 있다.

본 논문에서는 영점 검출시 발생하는 오차와 가선 전압의 주파수 변동시 추종이 어려웠던 기존 스위칭 기법에 대한 한계를 소프트웨어 기법을 추가함으로써 오차 범위의 보완과 가선 전압 주파수 변동에 대한 추종성 향상 기법에 대해서 고찰해 보았다.

### 2. 본론

#### 2.1 위상 검출의 필요성

전기 철도 차량의 가선 전원은 교류(AC) 전원과 직류(DC) 전원으로 나눌 수 있다.

가선 전원이 직류(DC)인 경우 그림 1과 같이 가선 전압의 주파수가 0 이고, 크기가 시간에 관계 없이 일정하므로 인버터 등의 전력변환 장치를 통해 전력을 변환하는 경우 스위칭 신호를 발생하는 시점에 관계없이 일정한 출력을 발생한다.

---

† 비회원, 현대로템 주식회사, 전장품개발팀, 주임연구원  
E-mail : kjong1007@hyundai-rottem.co.kr  
TEL : (031)596-9106 FAX : (031)596-9766

\* 비회원, 현대로템, 전장품개발팀, 선임연구원

\*\* 비회원, 현대로템, 전장품개발팀, 책임연구원

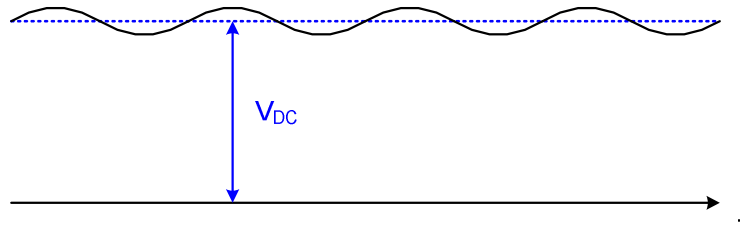


그림1. 직류 가선 전압

반면, 가선 전원이 교류(AC)인 경우 그림2와 같이 가선 전압은 크기와 주파수로 표현되며, 시스템에 인가되는 전압이 시간에 따라 가변하게 된다.

전압이 시간에 따라 가변되므로 PWM 컨버터와 같은 전력변환 장치를 이용해 전력을 변환하는 경우 스위칭 신호를 발생하는 시점에 따라 출력이 변동하게 된다.

따라서, 가선 전원이 교류(AC)인 경우 입력의 변화에 따라 출력을 일정하게 만들어 주기 위해 가선 전압의 주파수와 스위칭 신호를 동기화해야 하며, 이를 위해 가선전원의 위상 검출이 필요하게 된다.

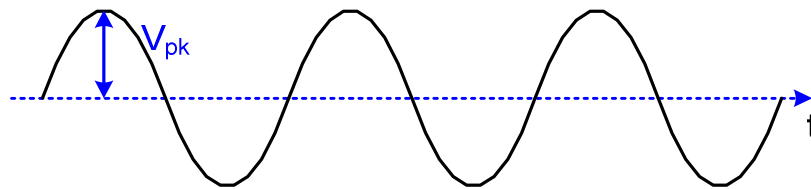


그림2. 교류 가선 전압

## 2.2 위상 검출 방법

교류 가선 전압의 위상을 검출하는 방법으로는 가선 전압의 주기가 바뀌는 시점에 펄스를 생성하여 동기화시키는 방법이 가장 일반적으로 통용된다.

이 방법은 하드웨어적인 방법으로 구현되며, 당사에서는 다음 2가지의 회로를 대표적으로 사용하고 있다.

### 2.2.1 위상 검출 회로(1)

그림 3은 당사에서 개발한 PWM 컨버터의 위상 검출 회로 중 하나이다.

그림 3에서 가선 25kV 전압을 고압 PT(Potential Transducer)를 이용해 AC 100V로 변환하고, 이렇게 변환된 AC 100V 전압을 변압기를 이용해 다시 AC 10V로 변환한다. 이렇게 변환된 AC 10V의 전압에는 가선 전압의 기본과외에 고조파를 포함하고 있으므로 이를 제거하기 위해 저역통과필터(Low Pass Filer)를 이용하였다.

그러나 이 과정에서 가선 전압과 위상 검출 회로 사이에 필터의 시정수 만큼의 지연이 발생하게 되며, 그 지연된 값만큼 소프트웨어에서 보상을 해주어야 한다.

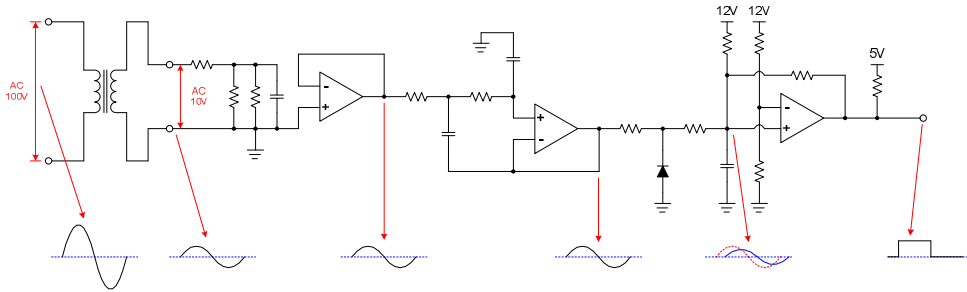


그림3. 위상 검출 회로(1)

### 2.2.2 위상 검출 회로(2)

그림 4는 당사의 PWM 컨버터에서 사용하고 있는 위상 검출 회로 중의 또 다른 하나이다.

그림 4의 회로를 살펴보면 가선 전압(AC 25kV)을 고압 PT를 통해 AC 100V로 변환하고, 이렇게 변환된 AC 100V 전압을 Auto Filter를 통해 고조파가 제거되고, 가선 전압과 1주기의 위상 지연까지 펄스가 만들어 지게 된다.

이 회로는 앞절의 위상 검출 회로에 비해 고조파의 유입이 적고, 위상 지연에 대한 보상이 불필요한 장점이 있다.

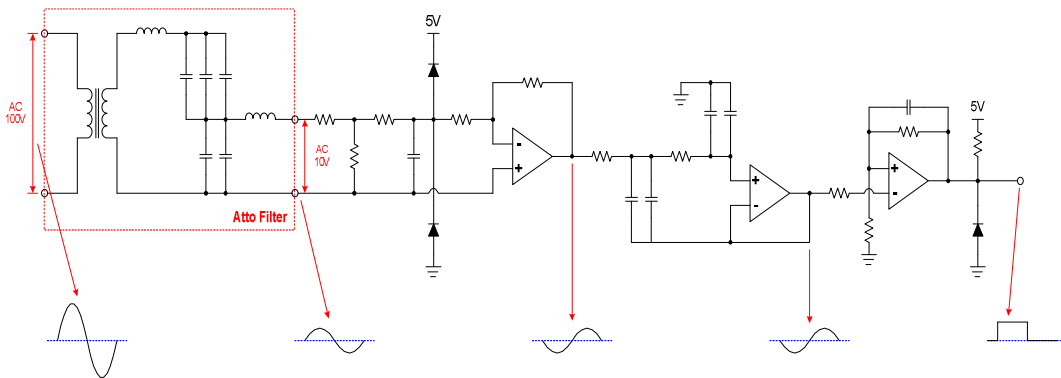


그림4. 위상 검출 회로(2)

### 2.3 위상과 제어 시간의 동기화

앞절에서 살펴본 것과 같이 하드웨어적인 위상 검출 방법에 의해 가선 전압의 위상을 검출하여 펄스를 발생하게 되고, 이렇게 검출된 위상을 소프트웨어적인 스위칭 기법으로 시간 동기화를 시켜야 한다.

그림 5는 기존의 시간 동기화 기법으로 하드웨어를 이용하여 가선 전압 위상을 검출 후 스위칭 기법을 통해 가선 위상과 스위칭 시간의 동기화에 대한 다이어그램을 나타낸 것이다.

그림 5에서 가선 전압의 주파수는 60Hz, PWM 컨버터의 스위칭 주파수는 1.8kHz, 마이크로 프로세서 제어 주기는 320[ns]로 하였다.

이 경우 가선 전압의 1주기(T)는  $T = 1/60 = 16.6667[\text{ms}]$ 이며, 스위칭 1주기당 프로세서 카운터 개수는 스위칭 주파수/프로세서 제어주기로 1736.111[개]가 된다.

1개의 스위칭 주기 동안 프로세서 카운터 시간은  $1736 \times 320[\text{ns}] = 555.52[\text{us}]$ 이고, 제어 주기는  $1/60/30 = 555.5[\text{us}]$ 가 된다.

여기서, 1개의 스위칭 주기 동안 프로세서 카운터 시간과 제어 주기 사이에  $1/60/30 - 555.52[\text{us}] = 0.355[\text{us}]$ 만큼의 오차가 발생하게 되며, 가선 전압 1주기 동안 오차가 누적되어 1.06[us]만큼의 오차가 발생하게 된다.

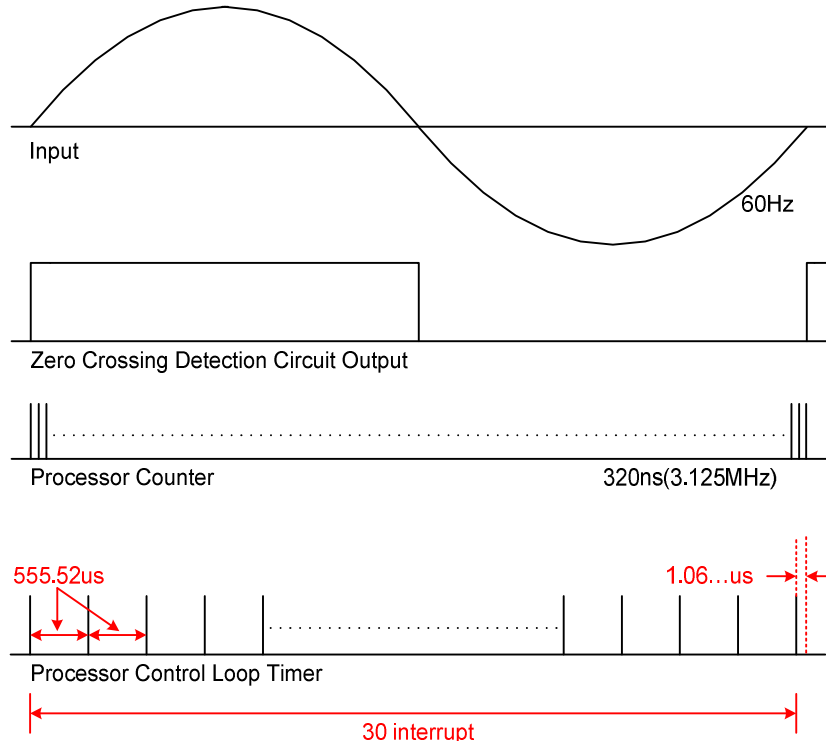


그림5. 위상 검출과 스위칭 시간 고정 기법 다이어그램

이 기법은 가선 전압의 위상과 스위칭 주파수 연산시간과의 오차를 무시 하는 기법으로 스위칭 주파수가 고정되어 있기 때문에 입력 전압의 주파수가 변동되지 않는 경우 그림 6과 같이 가선 전압의 위상 검출 및 추종이 원활하나 가선 전압의 주파수 변동되는 경우 변동 폭에 따라 Control loop의 수행 횟수가 가변되거나 추종이 불가능하게 된다.

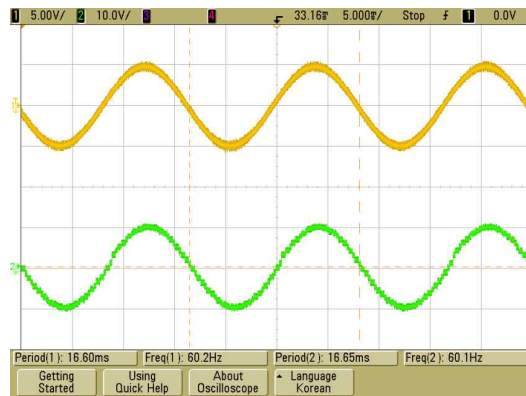


그림 6. 스위칭 주파수 고정 기법 시험 파형(입력 주파수 : 60Hz)

그림 7은 스위칭 주파수 고정 기법 적용한 PWM 컨버터에서 가선 전압의 주파수가 변동되는 경우 동기화에 문제가 발생하는 것을 측정한 파형이다.

실제로 당사의 철도 차량 중 고정된 스위칭 주파수에 의한 PWM 컨버터를 적용한 경우 가선 전압의 주파수가 변동될 경우 PWM 컨버터의 고장이 발생되고 있다.

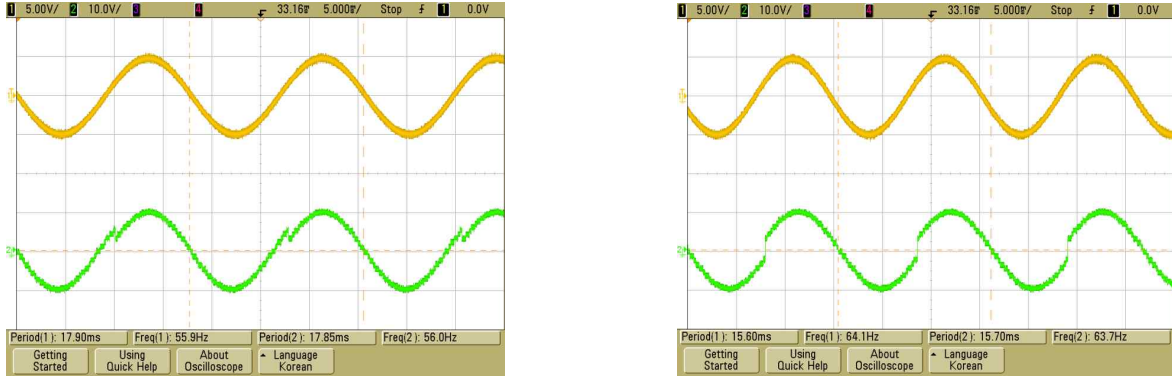


그림 7. 가선 전압 주파수별 고정 스위칭 주파수 기법 동기화 시험 파형(좌:56Hz, 우: 64Hz)

### 2.3.2 개선된 위상 검출에 따른 PWM 컨버터 스위칭 기법

앞절에서 살펴본 것과 같이 스위칭 주파수가 고정된 기법은 가선 전압의 주파수가 일정할 때에는 정상동작 하지만 가선 전압의 주파수가 변동되는 경우 추종이 안됨을 시험을 통해 확인하였다.

그림 8은 기존 기법의 문제점을 보완하기 위해 가선 전압 주파수의 변동량에 따라 스위칭 주파수의 주기가 가변되는 기법이다. 기존의 스위칭 주파수가 고정된 기법과 달리 가선 전압을 1주기 동안 카운트 하여, 가선 전압 주파수 변동량에 따른 증가분을 스위칭 주파수에 가감하여 스위칭 하는 기법이다.

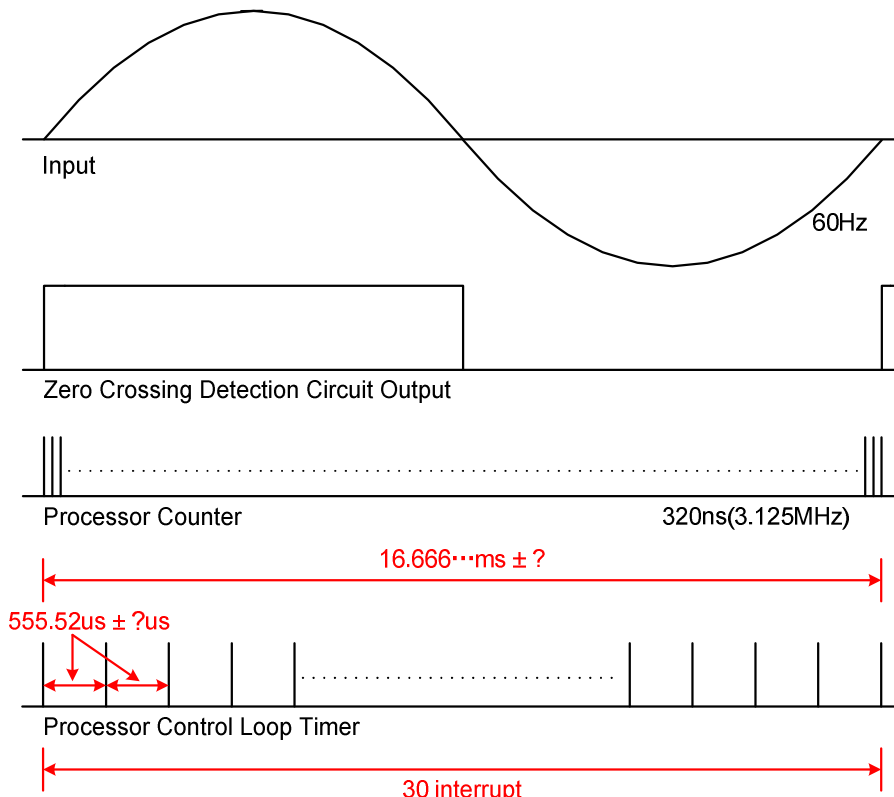


그림 8. 개선된 위상 검출에 따른 PWM 컨버터 스위칭 기법 다이어그램

이 기법을 적용하면, 스위칭 주파수는 고정이 아닌 가변하게 되고, 입력 전압의 주파수 변동에 따라 추종이 가능하며, 입력 전압 주파수의 변동에 관계 없이 Control loop 수행 횟수는 고정되게 된다.

이 기법에 대한 제어 블록도는 그림 9와 같다.

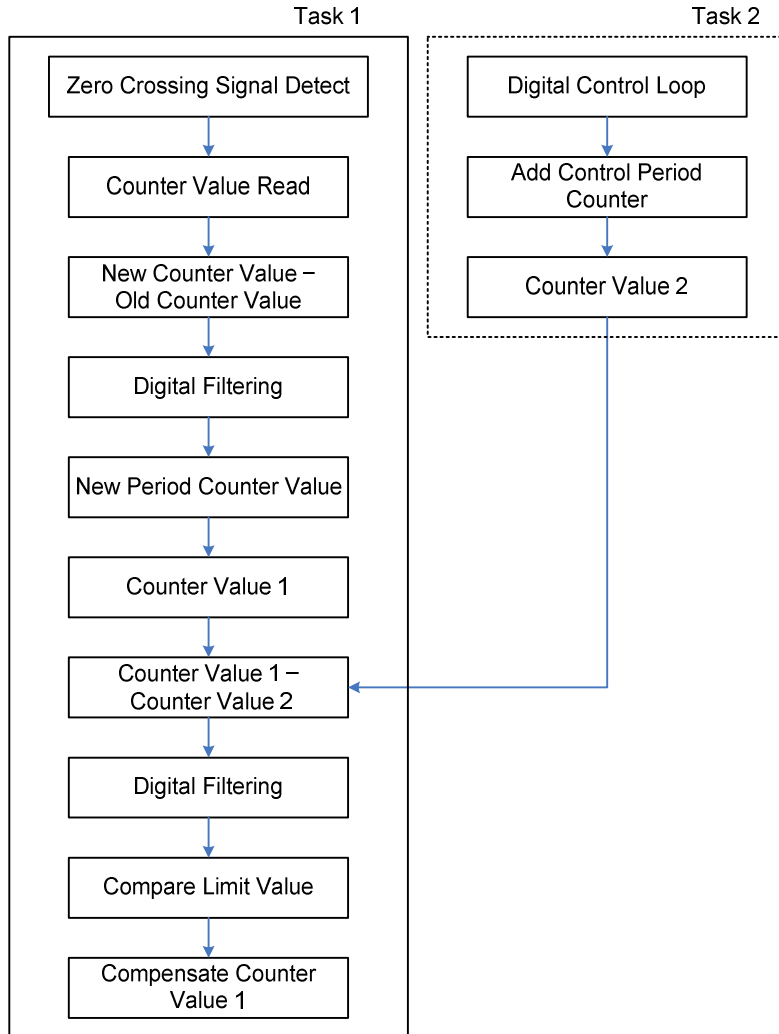


그림 9. 개선된 위상 검출에 따른 PWM 컨버터 스위칭 기법 제어 블록도

그림 9에서 Task1은 영점 검출시 동작하게 되고, 입력 전압의 위상과 프로세서 내에서 연산한 위상과의 차이를 연산하여 보상한다.

Task2는 매 제어 주기에서 동작하고 프로세서 내의 위상 연산을 수행하게 된다.

개선된 시간 동기화 기법은가선 전원 주파수에 따라 스위칭 발생 폭이 결정되게 되고, 가선 전원의 위상과 프로세서에 의한 디지털 연산에서 발생하는 오차를 보완하게 된다.

그림 10은 본 논문에서 제안된 PWM 컨버터 스위칭 기법을 적용한 후 입력 전압의 주파수 변동에 대한 제어 패턴 시험 파형이다.

기존 스위칭 주파수 고정 기법의 경우 가선 전압의 주파수 변동에 대해 추정하지 못했던 것과는 달리 가선 전압의 주파수가 변동되어도 정확하게 추종하고 있는 것을 확인 할 수 있다.

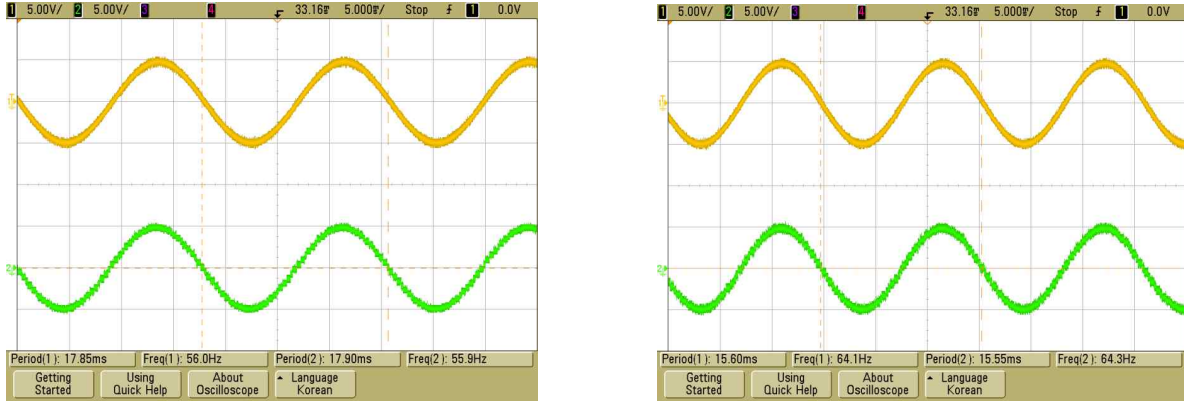


그림 10. 가선 전압 주파수별 변동 스위칭 기법 동기화 시험 파형(좌:56Hz, 우: 64Hz)

### 3. 결론

지금까지 전기 철도 차량에 적용된 가선 전압의 위상 검출 방법과 PWM 컨버터의 스위칭 기법의 시간 동기화에 대해서 살펴보았다.

기존 PWM 컨버터 스위칭 기법의 경우 스위칭 주파수가 고정되어 있어, 가선 전압의 위상에 대한 카운터 주기와 스위칭 주파수 주기의 오차가 누적되며, 가선 전압의 주파수가 변동되는 경우 고정된 스위칭 주파수로 인해 동기화에 문제가 발생하였다.

본 논문에서 제시한 PWM 컨버터 스위칭 기법은 가선 전압의 위상을 카운터하여 카운터의 증감분에 대해서 스위칭 주파수의 시간에 가감함으로써 일정한 control loop가 가능하고, 시험을 통해 증명된 것과 같이 가선 전압의 주파수 변동에 대해서도 원활하게 추종됨을 확인하였다.

### 참고문헌

1. 노의철, 정규범, 최남섭 공저, “전력전자공학,” 문운당, 2008
2. J Shen, BSC MSc and D Mansell, "The simplified Analysis and Design of a PWM Converter System for a Three-Phase Traction Drive" C478/6/043
3. 이우철, 현동석, “관측기 파라미터 변동을 고려한 단상 PWM 컨버터의 강인한 제어”, 전기학회 논문집 47권 9호, 1998.9