

## 대용량 전력변환용 사이리스터 디지털 점호제어

이영복\*, 김장목\*, 임익현\*\*, 류호선\*\*, 송승호\*\*\*

\*부산대학교, \*\*전력연구원, \*\*\*전북대학교

### Digital firing control for high power thyristor converter

Y.B. Lee\*, J.M. Kim\*, I.H. Lim\*\*, H.S. Ryu\*\*, and S.H. Song\*\*\*

\*Pusan University, \*\*KEPRI, \*\*\*Chonbuk University

#### ABSTRACT

The conventional analog-based firing circuit can be implemented by comparing a linearly decreasing periodic sawtooth waveform synchronized to the ac line, with a voltage corresponding to the desired converter delay angle. This circuit requires a large number of components (resistance and capacitor) and careful adjustment of the synchronization circuitry. In this paper a novel firing circuit is proposed for thyristor switch is elements. The proposed circuit is implemented on the basis of the analog cosine method using FPGA and microprocessor.

#### 1. 서 론

최근 재료산업의 발달로 전력용 반도체 소자는 그 종류와 용량에 있어서 비약적인 발전으로 전동기 구동 시스템에서는 빠른 응답특성을 갖는 FET, IGBT 등의 전력용 반도체 소자들이 주로 사용되고 있다.<sup>[1]</sup> 하지만 대용량 전력 변환 시스템(HVDC, 가스터빈 구동시스템, 대용량 풍력발전 시스템, 그리고 동기 발전기 여자시스템) 등에서는 여전히 사이리스터를 이용한 전력 변환 시스템이 이용되고 있다.<sup>[2],[3]</sup>

사이리스터 전력 변환 시스템에 관한 연구는 선진외국에서 70-80년대까지 활발히 연구가 있었지만 국내에서는 거의 연구가 없었다. 사이리스터를 이용한 대용량 전력 변환 시스템은 그 규모가 클 뿐만 아니라 높은 신뢰성을 요구한다. 그래서 사이리스터에 관한 국내의 연구는 거의 없었으며 대부분 수입에 의존하고 있다.

본 논문에서는 사이리스터 점호제어에서 지금까지 좋은 장점을 지니고 있는 아날로그 회로 코사인 점호방법을 기초로 하여 디지털 회로로 구현하는 것이다. 이로써 여러 개의 아날로그 소자에 의하여 구현되던 점호회로를 FPGA(Field-Programmable Gate Array) 소자로 대체하고,

고속연산 DSP(Digital Signal Processor)를 이용하여 사이리스터 제어정류기에 적용을 하여 제안된 디지털 점호제어회로의 유용성을 확인하였다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 디지털 점호제어 방법

사이리스터는 래칭 소자로서 애노드~캐소드간의 전압이 양(positive)인 상태에서 게이트 신호를 인가하면 턴-온되고, 애노드~캐소드간의 전압이 음(negative)일 때 자연적으로 턴-오프된다.<sup>[4]</sup> 따라서 사이리스터 게이트 신호를 디지털로 제어하기 위해선 점호각의 기준각을 설정하여 그 기준으로부터 각 사이리스터의 점호 위치를 검출 해 점호각을 제어할 수 있다. 이를 위해서 기준각을  $d-q$ 좌표변환에 의한 값으로 설정하였다.

##### 2.2 전압방정식

3상 전원전압이 각주파수  $\omega$ 를 가진 평형 3상 정현파 전압이라면,  $E_a$ 상 전압을 기준각으로 하여 3상 전원전압을 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} E_a &= -E \sin \omega t \\ E_b &= -E \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ E_c &= -E \sin(\omega t - 4\pi/3) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서  $E$ 는 상전압의 최고치이다.

그러므로 전원전압은  $d-q$ 정지 좌표계에서 식 (2)과 같이 표현되고,

$$\begin{aligned} e_d^s &= |E| \sin \omega t \\ e_q^s &= |E| \cos \omega t \end{aligned} \quad (2)$$

$d-q$ 동기 좌표계에서는 식 (3)과 같이 표현된다.

$$e_d^e = 0, \quad e_q^e = E \quad (3)$$

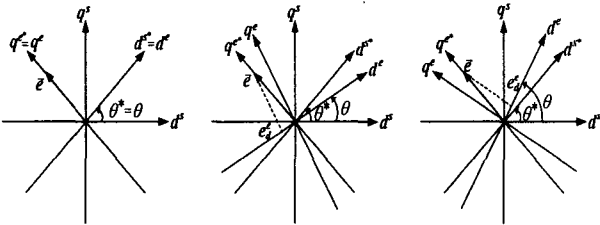
### 2.3 제어각의 연산

정지 좌표계의 물리량을 동기 좌표계로 변환하거나, 동기 좌표계의 물리량을 정지 좌표계로 변환하기 위해서는 제어각이 필요하다. 제어각은  $E_a$ 상 전원전압이 음에서 양으로 바뀌는 순간을 영으로 기준 하였다. 그러므로 전원전압의 상전압 혹은 선간전압이 영점을 통과하는 시점을 관찰함으로써 제어각을 구할 수 있다. 이 방법은 전원전압에 노이즈가 존재하는 경우에는 제어각이 급변하게 되어 시스템이 불안정하게 되므로 이에 대한 대책이 필요하다.

그림 1에서 제어각( $\theta$ )과 실제각( $\theta^*$ )의 상관관계를 보여주고 있으며, 제어각에서 측정된 동기 좌표계  $d$ 축 전원전압은 식 (5)이 되고 각 오차가 작은 경우에는 식 (6)과 같이 된다.

$$E_d^e = -E \sin(\theta^* - \theta) \quad (4)$$

$$E_d^e \approx -E(\theta^* - \theta) \quad (5)$$



(a)  $\theta = \theta^*$  (b)  $\theta < \theta^*$  (c)  $\theta > \theta^*$

그림 1 제어각 오차와 동기 좌표계 d축 전원전압

Fig. 1 Control angle error and d-axis input voltage

그러므로 동기 좌표계에서  $d$ 축 전원전압이 영이 되도록 제어각을 수정해나가면 실제각과 제어각을 일치시킬 수 있으며, PI 제어기로서 구현할 수 있다.

그림 2에서 LPF(Low Pass Filter)는 제어각의 리플을 방지하기 위하여 사용된다. 사이리스터 점호각( $\alpha$ )을 결정하기 위해서는 디지털적으로 코사인 방법을 구현하기 위해 식 (7)과 같이 구한다.

$$\alpha = \cos^{-1}\left(\frac{V_{ref}}{E_{max}}\right) \quad (7)$$

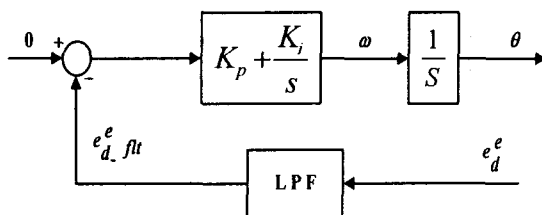


그림 2 제어각의 PI 연산

Fig. 2 PI control of control angle

그림 3에서 디지털 코사인 방법에 의한 점호각의 시점을 결정한다. 전원 전압의  $E_a$ 와  $E_c$ 를 비교해  $E_a$ 가 큰 부분에서  $-E_b$ 를 선택하면  $E_a$ 에 대해선 코사인 제어 방법의 비교 파형( $E_a \cos$ )이 된다. 이를 제어 전압( $E_{cc}$ )과 비교하여 점호 시점을 결정한다.

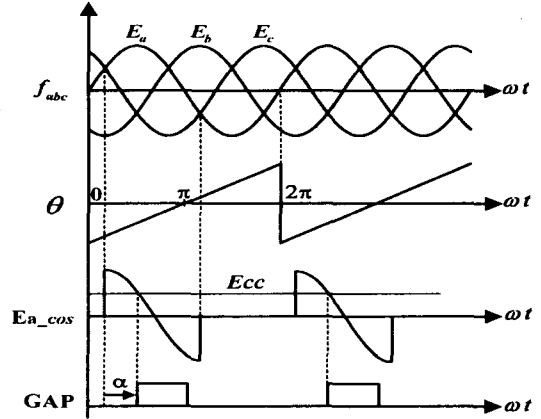


그림 3 디지털 코사인 점호제어 방법  
Fig. 3 Control angle and firing angle

그림 4에서는 디지털 점호제어 블록도이다. A/D 컨버터에서 전원전압  $E_{ab}$ ,  $E_{bc}$  선간 전압을 입력받아 전원전압의 위상정보를 계산하고, 이를  $d-q$  동기 좌표변환에 의해 제어각을 연산한다.  $E_{cc}$ 와 PI 제어를 거친 제어각과 비교하여 디지털 점호 시점을 결정하고, EPLD에서 게이트 신호로 발생된다.

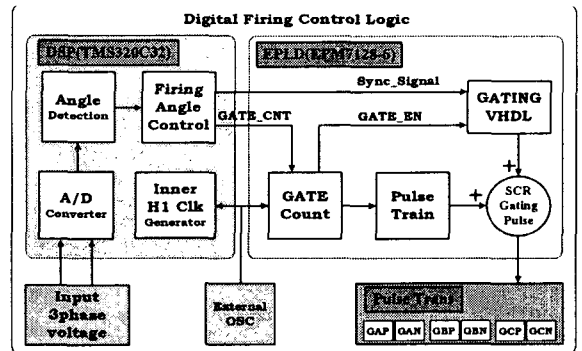


그림 4 디지털 점호 제어 블록도

Fig. 4 Block diagram digital firing control

또한 전원전압이 불평형 및 1선 지락의 경우에도 연속적인 직류 출력전압을 제어하기 위해 그림 5과 같이 P 제어기를 사용하여 보상해 주었다. 입력되는 전원전압 각상의 최고치를  $E_{peak}$ 와 비교해서 전원전압의 불평형을 감지하게 된다. 전원전압의 불평형이 생기면, 먼저 불평형이 생긴 위상을 검출하게 되고, 이를 P제어기로 불평형 위상에 대해 보상을 해주어 출력전압을 일정하게 제어하도록 한 것이다.

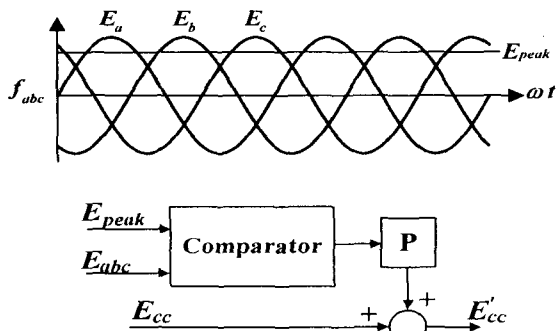


그림 5 전원전압 불평형시 디지털 점호제어  
Fig. 5 Digital firing control of unstable input voltage

### 3. 실험 장치의 구성 및 실험 결과 검토

#### 3.1 실험 장치의 구성

그림 6에서와 같이 전체하드웨어 블록도를 보면, 3상 전원을 입력받아 사이리스터 풀브릿지 컨버터에 연결하고, 전압센서에 의해 입력 전원을 측정하였다. 측정된 전압정보는 BNC 케이블을 통해 주제어기인 DSP 보드에 입력되어 A/D(Analog to Digital conversion, AD7864, Analogdevice 社)에서 디지털 신호로 DSP(TMS320C32, TI 社)에 보내진다. DSP에서는 입력된 전압정보로 제어각을 d-q변환에 의해 연산하고, 이를 디지털 점호제어를 위해 점호각을 제어하게 된다. 제어된 점호각 신호는 EPLD(Erasable Programmable Logic Devices)에서 게이트 점호 로직의 연산에 의해 각각의 사이리스터 게이트를 점호하기 위한 신호를 생성한다. EPLD에서 생성된 사이리스터 게이트 점호 신호는 Pulse trans 보드에서 절연 및 증폭을 통하여 각각의 사이리스터 게이트에 입력된다.

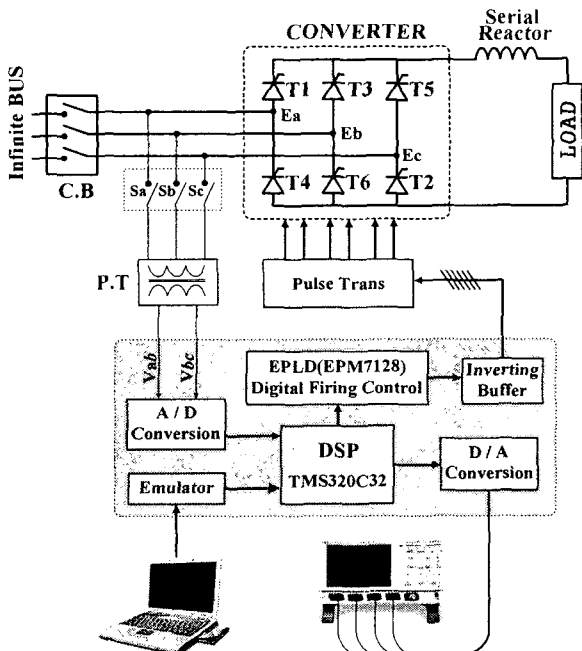
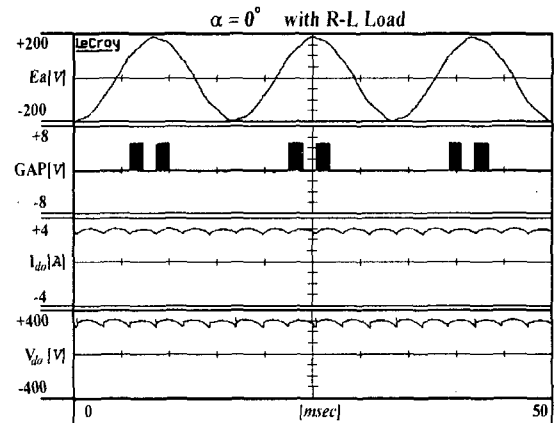


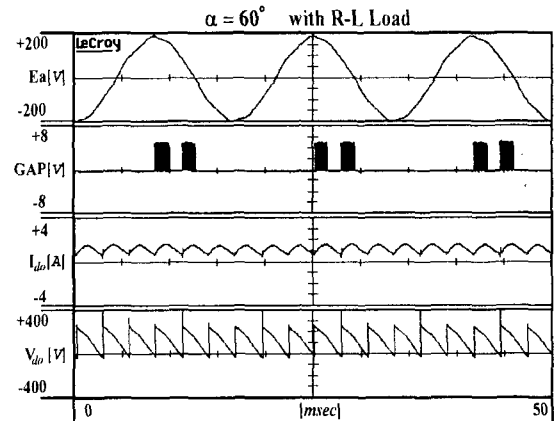
그림 6 전체 하드웨어 블록도  
Fig. 6 Overall structure of test-bed

#### 3.2 실험 결과 및 검토

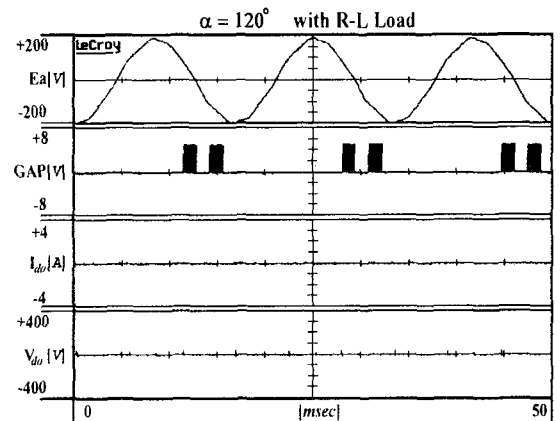
그림 8은 사이리스터 컨버터의 제안하는 디지털 점호 제어에 의한 실험 파형이다. 여기서  $E_a$ 는 입력 상전압이며,  $GAP$ 는  $E_a$ 상전압 양(positive)의 사이리스터 게이트 신호이며,  $I_{do}$ 와  $V_{do}$ 는 각각 사이리스터 컨버터 직류 출력 전류와 전압 파형이다.



(a)  $\alpha = 0^\circ$



(b)  $\alpha = 60^\circ$



(c)  $\alpha = 120^\circ$

그림 8 R-L 부하시 실험 파형

Fig. 8 Waveform of R-L load experimentation

디지털 코사인 방법을 사용하면 기존의 아날로그 코사인 방법과 동일하게 출력전압이 점호각에 따라 선형적으로 제어되는데, 그림 9를 보면 점호각의 증가에 따라 출력전압이 선형적으로 감소하는 것을 알 수 있다.

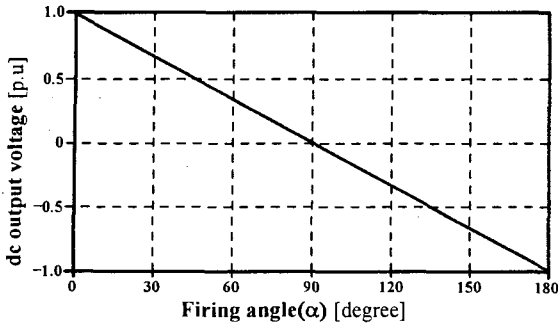
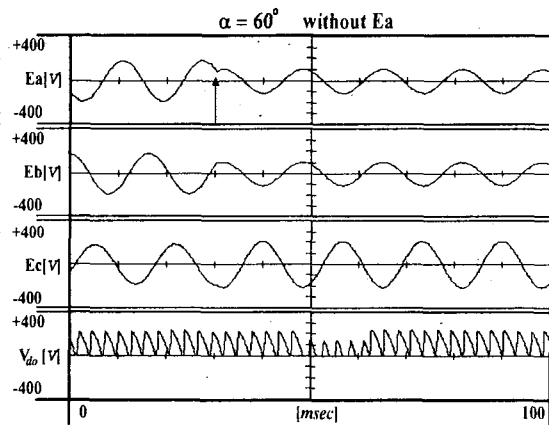
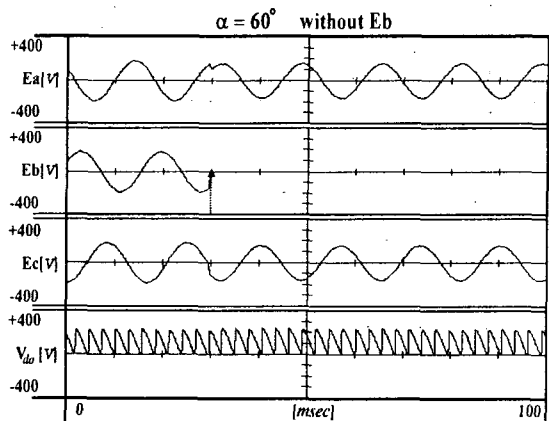


그림 9 직류 출력 전압 선형 제어 특성  
Fig. 9 Linear control output voltage

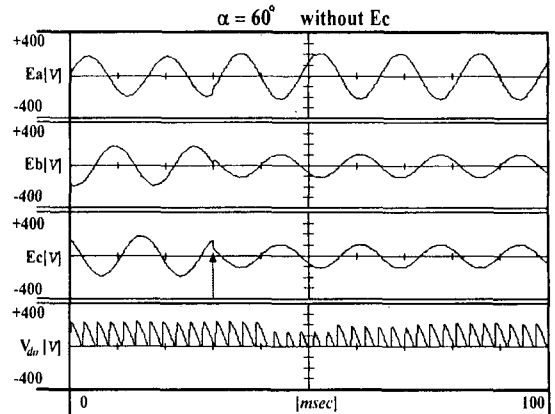
마지막으로 그림 10은 전원전압 불평형이 생긴 경우를 실험하였다. 정상전압→불평형 전압이 생기는 순간 파형을 측정해 본 결과 30[ms]이내에 직류 출력 전압이 제어된 전압으로 회복하는 것을 알 수 있다.



(a) Waveforms of unstable( $E_a$ )



(b) Waveforms of unstable( $E_b$ )



(c) Waveforms of unstable( $E_c$ )

그림 10 전원전압 불평형시 실험 파형( $\alpha = 60^\circ$ )  
Fig. 10 Waveform of unstable input voltage experimentation

#### 4. 결론

대용량의 전동기 제어 및 발전기에서는 여전히 제어 소자로 사이리스터를 주로 사용하고 있다. 기존의 아날로그 소자에 의한 코사인 방법이 산업현장에 널리 사용되고 있다. 하지만 본 논문에서는 디지털 점호제어 방법을 제안하는데 다음과 같은 특징이 있다.

- 1) 디지털화된 코사인 점호제어방법을 사용하였다. 아날로그 소자를 사용하지 않으면서 FPGA 소자에 의한 점호로직을 설계하여, 전원전압의 노이즈에 강하며, 아날로그 소자가 안고 있는 온도변화와 격년에 따른 파라메타 변동의 거의 없다.
- 2) 동기변압기 없이 d-q 좌표변환에 의한 제어각을 사용하여 기준각을 설정하고, 제어각을 PI제어로서 전원전압의 노이즈에 강하게 설계하였다.
- 3) 마지막으로 전원전압이 불평형 및 1선 지락의 경우에도 연속적인 위상 측정이 가능하여 고장 신호가 입력되기 전까지는 직류 출력 전압이 지속적으로 제어되는 알고리즘을 사용하였다.

따라서 제안하는 디지털 점호제어방법은 기존의 아날로그 점호제어 방법과 동일한 성능을 가지며, 전원전압의 급변, 노이즈가 포함된 전원 그리고 불평형 발생시에도 직류 출력 전압을 일정하게 제어가 가능하다.

#### 참고 문헌

- [1] N. Mohan, T.M. Undeland and W.P. Robbins, "Power Electronics, Converters, Applications, and Design", John Wiley & Son, Inc., pp. 2~32, 1995.
- [2] David Finney, "The Power Thyristor and its Applications", McGRAW-HILL Book Company(UK), pp. 151~167, 1999.
- [3] 임익현, "同期發電機 디지털勵磁·시스템 개발에 관한 연구", 홍익대학교 공학 박사 논문, pp. 107~126, 2001.
- [4] P.C Sen, "Thyristor DC Drives", John Wiley & Sons, N.Y., pp. 290~300, 1981.