

# 전력용 반도체 소자의 직렬연결시 밀러효과를 이용한 소호시점 동기화 알고리즘

## Synchronization on the Points of Turn-off Time of Series-Connected Power Semiconductor Devices Using the Miller Effect

沈 銀 用\* · 徐 範 錫\*\* · 李 宅 基\*\* · 玄 東 石\*\*\*  
(Eun-Yong Shim · Beom-Seok Seo · Taeck-Kie Lee · Dong-Seok Hyun)

*Abstract* - The large value of the snubber capacitor is needed to protect the devices in high voltage converters using series connected power semiconductors. But that results in more losses and longer commutation time. So, new technique of series connection is required, which can minimize the value of snubber capacitor and also promote the reliability of high voltage converters. We study on the switching characteristics of series connected power semiconductors and then propose a novel switching algorithm for series-connection which is able to implement not only the dynamic voltage balancing in spite of the difference of switching characteristics, but the minimization of the value of snubber capacitor, through the change of the value of snubber capacitor by Miller effect. Finally, we illustrate the validity of this synchronization by computer simulation and experimental results.

**Key Words** : Snubber Capacitor(스너버 커패시터), High Voltage Converters(고압전력변환장치), Series-Connection(직렬연결), Miller Effect(밀러효과)

### 1. 서 론

대형 펌프, 팬등에 사용되는 수 MVA 용량을 갖는 교류전동기 구동시스템의 효율운전 및 고속전철, 지하철등의 고성능 제어를 위해서는 그 용량과 용도에 부합되는 전력변환장치가 필요하다.

---

\*正 會 員 : 大宇重工業 勤務  
 \*\*正 會 員 : 漢陽大 大學院 電氣工學科 博士課程  
 \*\*\*正 會 員 : 漢陽大 工大 電氣工學科 教授 · 工博  
 接受日字 : 1991年 9月 17日  
 1次修正 : 1991年 12月 3日

따라서, 이러한 대용량 전력변환장치에 대한 요구가 전력전자 공학의 발달로 인해 실현되게 되었고 지금은 성능향상을 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히, 고압 대용량 전력변환장치의 구현을 위해서는 사용되는 소자정격의 대용량화가 선결조건이다. 그러나 소자정격의 제한과 대용량화에 따르는 소자의 성능 저하 및 제어의 어려움등을 감안할 때 소자의 고유성능을 저하시키지 않으면서도 신뢰성을 보장할 수 있는 직렬연결 기술이 필요하다. 직렬연결시 가장 중요하게 고려해야 하는 것은 점호 및 소호시 소자들간에 나타나는 스위칭 특성의 차에 관계없이 전압분배의 균형을 이루는 것이다. 이를 위해서는 다음과 같은 방법들을 생각할 수 있다. [1]

- 차단시간을 보다 짧게 한다.
- 차단시간이 일치하도록 제어한다. [2]
- 소자에 용량이 큰 스너버 커패시터를 병렬로 연결하여 차단시간 차이로 인한 문제를 최소화한다. [3]

위의 방법들 중 용량이 큰 스너버 커패시터를 사용하는 방법이 현재 실용화 되고 있으나 커패시터용량의 증가로 스너버 손실이 증가하기 때문에 효율을 향상시킬 수 있는 또 다른 직렬연결 기술이 절실히 요구되고 있는 실정이다.

따라서, 본 논문에서는 신뢰성 및 효율을 고려하여 직렬연결된 각 소자들의 스위칭특성 차이에도 불구하고 항상 전압분배의 균형을 이룰수 있을 뿐만 아니라 스너버커패시터 용량 또한 최소화시킬 수 있는 새로운 turn-off 시점 동기화 알고리즘을 제안하였다. 소자는 전력용 트랜지스터를 대상으로 하였으며 직렬연결과 관련된 문제를 분석함으로써 새로운 방법인 커패시터 용량의 servo-control 법을 제시하였다. 끝으로, pspice를 이용한 컴퓨터 시뮬레이션과 실험결과로써 제안한 알고리즘의 타당성을 입증하였다.

## 2. 전력용 트랜지스터의 직렬연결시 문제점

전력용 트랜지스터의 스위칭 상태는 on상태, off상태, on-off 과도상태, off-on 과도상태의 네 부분으로 나눌 수 있다. 직렬연결시 주된 문제점들은 두가지 과도상태동안 나타나는 스위칭 특성의 차이로 부터 야기된다. 즉, 점호시에는 turn-on 시간 이긴 소자에, 그리고 소호시에는 tun-off 시간이 짧은 소자에 과도한 전압상승이 발생한다는 점이다.

이것은 불과 1~2 $\mu$ s 정도의 극히 짧은 스위칭시

간 차이에도 소자정격 이상의 과도한 전압이 걸려 소자가 파괴될 수 있기 때문에 소자들을 직렬연결할 때는 소자의 선택 및 보호 측면에서 매우 신중함을 기해야 한다.

스위칭 과도상태 특성이 소자들마다 차이가 나는 것은 점호시에는 베이스 영역을 통하여 과잉소수캐리어가 과포화 상태에 이르는데 소모되는 시간이 각 소자마다 차이가 있으며 또한, 소호시 축적된 과잉소수캐리어가 제거되는 시간에도 각 소자마다 차이가 존재하기 때문이다.

그러나 점호시간은 매우 짧고 스너버 커패시터와  $di/dt$ 를 제한하는 회로내의 인덕턴스 성분에 의해 점호시간의 차이로 인한 전압불균형은 쉽게 흡수될 수 있다.

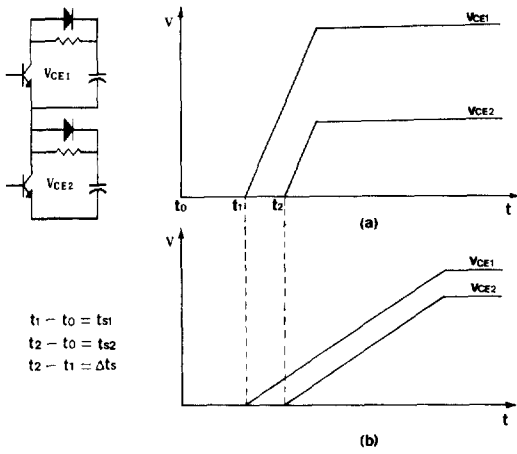
전압불균형에 가장 큰 영향을 주는 것은 소호시에 나타나는 축적시간(storage time)이다. 이 시간은 베이스 영역에 축적되어 있던 과잉소수캐리어가 제거되는데 걸리는 시간으로 정의된다. 이러한 과잉소수캐리어의 제거는 소자내에서의 재결합과 역바이어스 전류에 의해서 이루어진다.

그러나 이 축적시간은 온도에 따라 변화하는 소수캐리어의 수명시간과 부하 전류의 변화에 따른 전류 이득의 변화등으로 인하여 똑같은 종류의 소자라 할지라도 각 소자마다 달라 스위칭 특성에 가장 큰 영향을 끼친다. 만약 스위칭 특성 차이에 의한 과도한 전압이 한 소자의 파괴전압(breakdown voltage)을 초과했을 경우 직렬연결된 소자들이 연쇄적으로 파괴될 수 있다. [2][4]

본 논문에서 제안하고 있는 직렬연결 방법은 소호시 각 소자의 미소한 스위칭특성 차이로 인한 이러한 문제점들의 해결 방안으로, 축적시간이 작은 소자의 전압 상승율을 축적시간이 가장 긴 소자의 축적시간이 끝날때까지 최대한 억제시켜 주는 것이다.

## 3. 스너버 커패시터용량과 전압분배 균형 및 손실과의 관계

먼저, 스너버 커패시터용량과 전압분배의 균형과의 관계를 살펴 보도록 하자. 그림 1(a)는 수동 스너버회로를 갖고 있고 축적시간에 수  $\mu$ s차이가 나는 직렬연결된 두 전력용 트랜지스터의 소호시  $V_{CE}$ 전압파형을 보여준다. 그림에서 볼 수 있는 것처럼 손실을 감소시키고  $dv/dt$ 를 제한시키기 위해 설계된 스너버회로는 그런 큰 축적시간의 차이를 흡수하는데는 별 효과가 없다. 그림 1(b)는 축적시간의 차이( $\Delta t_s$ )로 인한 영향을 흡수하기 위해 아



**그림 1** 스너버 커패시터용량에 따른 전압분배  
 (a)  $dV/dt$ 만을 제한하기 위한 커패시터 일 경우  
 (b)  $\Delta ts$ 를 흡수하기 위해 계산된 커패시터 일 경우

**Fig. 1** Voltage distribution by the value of snubber capacitor  
 (a) In the case of capacitor for limiting  $dV/dt$   
 (b) In the case of capacitor for absorbing the effect of  $\Delta ts$

래의 식[1]에 의해 계산된 커패시터를 가진 스너버 회로일 경우, 소호시  $V_{ce}$ 의 전압파형을 보여준다.

$$C > [(n-1)/(n+1)] \cdot I_{max} \cdot 2 \cdot \Delta t_{offmax} / \Delta v$$

$n$  : 직렬로 연결된 소자의 갯수

$I_{max}$  : 최대충전전류

$\Delta t_{offmax}$  : turn-off시간의 최대차이

$\Delta v$  : 반도체 소자의 허용할 만한 과전압

스너버 커패시터용량이 커짐에 따라 전압 상승 기울기는 완만해지고 정상상태 전압분배는 비교적 양호하다. 전압분배의 균형이라는 측면만 고려한다면 스너버 커패시터용량이 크면 클수록 유리하리라 생각된다. 그러나 여기에서는 커패시터용량이 증가됨에 따라 손실증가 및 소자들의 고유 스위칭 성능을 저하시키는 문제를 수반하게 된다.

전력변환장치의 손실은 크게 스너버 손실과 스위칭 손실로 나눌수 있으며 특히, 대용량기에서는 스너버 손실이 70% 이상을 차지하므로[6] 효율향상을 주목적으로하는 대용량 시스템에서는 이러한 문제가 치명적인 단점으로 대두된다.

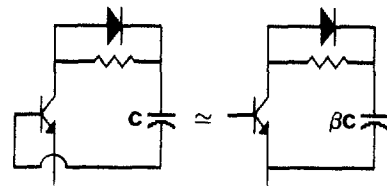
#### 4. 스너버 커패시터용량의 servo-control을 이용한 소호지점 동기화 알고리즘

위의 결과로부터 직렬연결시의 스너버 커패시터 용량은 축적시간이 가장 긴 소자의 전압이 상승할 때 까지는 축적시간의 차이를 흡수할 수 있을 만한 값 이상의 매우 큰 값으로 있다가 그후에는  $dv/dt$  만을 제한할 수 있을 정도의 값으로 바뀌는 것이 바람직하다. 이러한 알고리즘을 스너버 커패시터용량의 servo-control 이라 명명하였다. 이것을 실현하기 위해서는 다음과 같은 두가지 문제가 따른다.

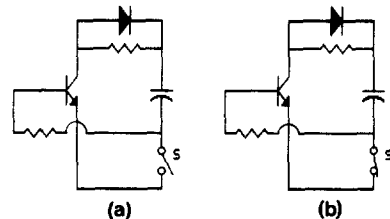
- 트랜지스터의 상태를 어떻게 검출할 것인가?
- 커패시터용량을 어떻게 그 처럼 큰 폭으로 변화시킬 것인가?

트랜지스터에 소호신호를 인가했을때 각 소자에 걸리는 전압은 축적시간이 끝난후부터 상승하기 시작한다. 그러므로 각 소자의  $V_{ce}$ 전압을 검출함으로써 트랜지스터의 상태를 알 수 있다. 또한 스너버 회로의 커패시터를 그림 2에서 처럼 에미터 대신 베이스에 연결하면 콜렉터와 에미터 사이에 연결된 같은 용량의 커패시터에 대해 전류 이득( $\beta$ )배 만큼 더 큰 용량의 커패시터가 있는 것과 같은 효과(Miller effect)를 얻을 수 있다. [5]

이런 효과를 이용하여 축적시간 동안은 밀러효



**그림 2** 밀러효과를 이용하기 위한 회로  
**Fig. 2** Circuit for using Miller effect



**그림 3** 스너버 커패시터용량의 가변을 위한 스위치 제어  
**Fig. 3** Switch control for varying a value of snubber capacitor

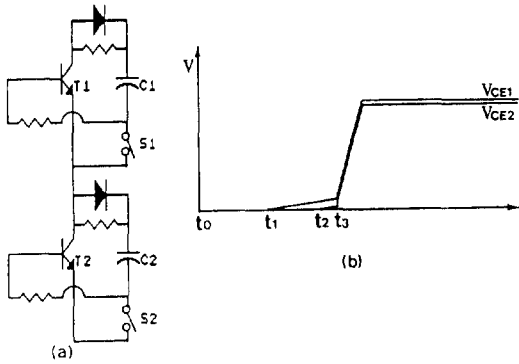


그림 4 전력용 트랜지스터의 직렬연결시 스너버 커패시터용량의 servo control을 적용한 경우

(a) 회로도 (b) 소호시 전압파형

Fig. 4 In the case of applying servo control of a value of snubber capacitor on series-connection os power transistor

(a) circuit (b) voltage waveform on turn-off

과를 이용할 수 있도록 그림3(a)와 같이 보조 스위치 S를 off 시키고 축적시간이 끝나면 그림3(b)와 같이 밀러효과가 더이상 나타나지 못하도록 보조 스위치 S를 on 시킨다. 이와 같은 결선과 스위치제어에 의해 커패시터의 용량을 광범위한 폭으로 변화시킬 수 있다.

이제, 전력용 트랜지스터를 그림 4(a)처럼 직렬 연결했을 경우에 대해 살펴보자. 소호신호를 인가하기 직전의 보조 스위치 S1 과 S2 의 상태는 둘다 off 상태이다. 만약  $t_{s1} < t_{s2}$ 이면 축적 시간이 짧은  $T_1$ 의 양단전압  $V_{ce1}$ 이 다음의 기울기를 가지고 먼저 상승하기 시작한다.

$$\frac{dv_{ce1}}{dt} = \frac{I}{\beta_1 C_1}$$

전압이 상승하는 기울기는 트랜지스터의 전류이득  $\beta$ 값이 크면 클수록 더 작아진다. 그러므로 달링톤(Darlington)트랜지스터 또는 하이-베타(Hi- $\beta$ )트랜지스터를 사용하는 것이 유리하다. 결국, 축적 시간이 긴  $T_2$ 트랜지스터의 전압이 상승하는 시점에서 보조스위치 S1 및 S2 를 on시켜 주면 더 이상 밀러효과는 나타나지 않고 단순히  $dv/dt$ 를 제한시키는 스너버의 기능만을 수행하며 다음의 기울기를 가지고 전압 상승이 이루어진다.

$$\frac{dv_{ce1}}{dt} = \frac{I}{C_1}, \quad \frac{dv_{ce2}}{dt} = \frac{I}{C_2}$$

보조 스위치 S1, S2를 on시켜 주는 그 시점에서의 작은 전압차를 유지하며 전압상승이 이루어지므로 전압분배의 균형을 이룰 수 있다. 보조 스위치로 사용하는 소자는 용량이 작아도 되므로 저용량의 고속 스위치를 사용한다.

$t_{s1} > t_{s2}$ 일 경우에도 위의 원리는 그대로 적용될 수 있다.

그림 4(b)는 커패시터용량의 servo-control법에 의한 전압분배의 동적균형을 보여준다. 이것은  $t_{s1} < t_{s2}$ 의 경우이며 두 트랜지스터는  $\Delta t_s$ 만큼의 축적 시간에 차이가 있음을 볼 수 있다.  $V_{ce1}$ 은  $T_1$ 의 축적시간 후 매우 느리게 상승한다. 스위치 S1 및 S2는  $T_2$ 의 축적시간이 끝난후 전압이 감지되는  $t_3$  시점에서 on 시켜 주었다.  $t_3$  이후에는 전압이 빠르게 상승하고 정상상태의 전압분배 불균형은 거의 없다. 밀러효과는  $\Delta t_s$ 동안에만 일어나고, 실제로 사용하는 커패시터는 단지  $dv/dt$ 를 제한하기 위한 값의 것이기 때문에 소자의 스위칭 성능저하 및 스너버 손실의 증가로 인한 효율의 감소는 최소화 될 수 있다.

### 5. 컴퓨터 시뮬레이션결과 및 실험결과

전력용 트랜지스터 SDT13305 소자를 대상으로 pspice를 이용하여 시뮬레이션 하였다. 기본원리의 타당성을 증명하기 위해 그림 5(a)처럼 2개의 트랜지스터를 직렬연결한 chopper 장치를 구성하였다.

그림 5(b)는 제안된 원리를 적용하지 않은 경우  $5\mu s$  정도의 축적시간 차이로 인한 전압분배의 현저한 불균형이 나타남을 보여 주고 있다. 그림 5(c)는 본 논문에서 제안한 원리를 적용한 경우의 전압파형을 보여 주고 있으며, 정상상태에서 전압분배의 불균형은 예상한 대로 거의 없음을 알 수 있다.

그림 6은 전력용 트랜지스터 QCB50A60을 사용하여 실험한 전체 회로의 간략도이다. 전압검출을 위해 clamping 회로를 사용하여 전압이 5V 상승하면 검출되도록 하였고, 축적시간이 가장 긴소자의 전압이 검출되는 시점에서 보조 스위치 S1과 S2가 on 되도록 논리회로를 사용하여 구성하였다. 실험에서 사용한 스너버 커패시터는  $0.01\mu F$ 이다. 이는 허용 가능한 전압차를 20V로 했을 때의 계산치 ( $C > 0.5\mu F$ )와 비교할때 50배 이상 작은 값이다.

그림 7은 실험파형이다.

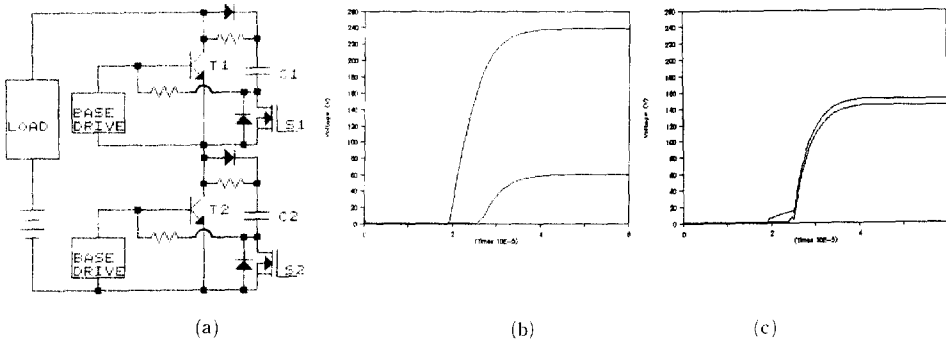
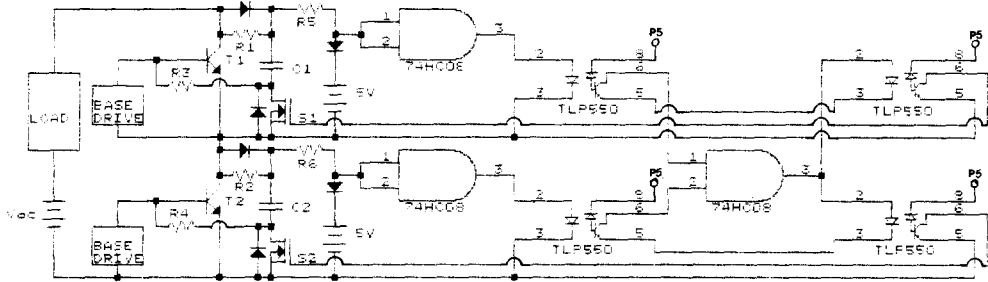


그림 5 2개의 트랜지스터( $\Delta t_s = 5\mu s$ )를 직렬연결한 초퍼에 대한 시뮬레이션 결과  
 (a) 초퍼에 대한 회로도  
 (b) servo-control을 적용하지 않은 경우 전압분배파형  
 (c) servo-control을 적용한 경우 전압분배파형

Fig. 5 Simulation results to chopper using two series-connected power transistors ( $\Delta t_s = 5\mu s$ )  
 (a) circuit for chopper  
 (b) voltage distribution before applying servo-control  
 (c) voltage distribution after applying servo-control



$V_{dc} = 280V$     $I_c = 3A$   
 $R1 = 3\Omega$     $R2 = 3\Omega$     $R3 = 500\Omega$     $R4 = 500\Omega$     $R5 = 2M\Omega$     $R6 = 2M\Omega$   
 $C1 = 0.01\mu F$     $C2 = 0.01\mu F$

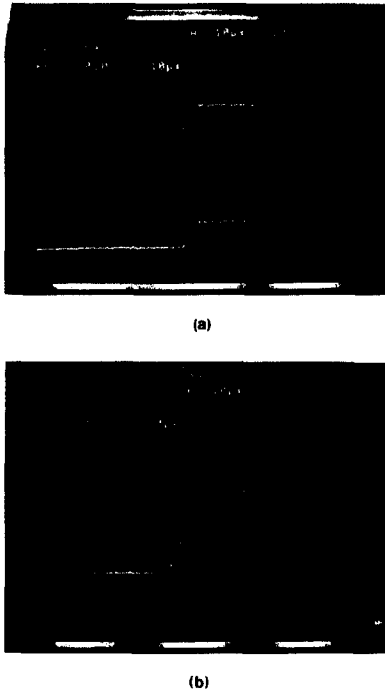
그림 6 실험 회로도  
 Fig. 6 Experimental circuit diagram

이 원리를 적용하면 각 소자의 전압 상승순서 및 직렬연결하는 소자의 갯수에 관계없이 항상 전압분배의 균형을 이룰 수 있으며, 스위칭 시간은 축적시간이 가장 긴 소자에 의해 결정된다.

### 6. 결론

전력용 반도체 소자의 직렬연결을 사용한 고압

전력변환장치의 신뢰성 및 효율 향상을 위하여 전력용 반도체 소자의 스위칭 특성을 고려한 새로운 직렬연결 방법인 커패시터용량의 servo control 방법을 제안하여 시뮬레이션 및 실험을 하였다. 스너버커패시터의 용량을 동적으로 가변시킬 수 있는 본 연구방법으로는 전력용 반도체 소자를 직렬연결할 경우 기존의 방법[3][5]에 비하여 다음과 같은 잇점이 있다.



**그림 7** 실험결과 ( $\Delta t_s = 5\mu s$ )  
 (a) servo-control을 적용하지 않은 경우의 전압분배파형  
 (b) servo-control을 적용한 경우의 전압분배파형

**Fig. 7** Experimental results ( $\Delta t_s = 5\mu s$ )  
 (a) voltage distribution before applying servo-control  
 (b) voltage distribution after applying servo-control

- 스너버 커패시터용량을 최소화 함으로써 스너버 손실 및 스위칭 시간을 줄일 수 있다.
  - 연결하는 소자의 갯수에 제한이 없다.
  - 직결연결된 소자의 turn-off 순서에 무관하다.
  - 회로구성이 비교적 용이하다.
- 커패시터용량의 광범위한 변화를 위해 본 논문

에서 이용한 밀러효과는 전력용 트랜지스터 뿐만 아니라 MOSFET 에서도 나타나며, 커패시터용량의 servo-control 법은 모든 전력용 반도체 소자에 적용될 수 있어서 추후에는 더욱 더 용량이 큰 소자(GTO, Thyistor)에 관한 연구가 진행되어야 할 것으로 생각된다.

**참 고 문 헌**

- [1] Andrejak Jean-Marie, Les Cure Marc, "High Voltage Converters Promising Technological Developments," European Conference on Power Electronics and Application (EPE), pp. 159~162, 1987
- [2] Beom-Seok Seo, Dong-Seok Hyun, "Switching Characteristics of Series-Connected Power Semiconductors for High Voltage Converters," European Conference on Power Electronics and Application (EPE), pp. 4·345~4·349, 1991
- [3] S. Saadate, R.Le. Doeuff, "High Voltage Chopper For Electrical Traction Application Using Series Connection of Large GTO Thyristers," 15th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, Nov, pp. 177~185, 1989
- [4] Ned Mohan, Tore M. Undeland, William P. Robbins, "Power Electronics: Converters, Application, And Design," John Wiley, Sons, pp.480~534, 1989.
- [5] H. Foch, J.P.R. Arches, J. Roux and T.S. Hsu, "A New Techniqe For Series-Connection of Power-Transistors in High Voltage," PCI '81 Proceedings, pp. 519~528, 1981
- [6] 加賀重夫, 池田春男, 堤和哉, 田中實, "LSM 驅動用インバータの開発," 電氣學會研究會資料, LD-90-44, pp. 41~48, 1990