

전력용 반도체 소자의 직렬연결시 밀러효과를 이용한 소호시점 동기화 전략

심은용* 서범석 현동석
한양대학교 전기공학과

Synchronization Strategy of the Points of Turn-Off Time Using the Miller Effect on Connecting the Semiconductor Devices in series

Eun-Yong Sim* Beom-Seok Seo Dong-Seok Hyun
Dept. of Electrical Eng. HanYang Univ.

ABSTRACT

This paper describes a novel switching algorithm of series connected power semiconductors for high voltage applications.

In order to improve the reliability and efficiency of high voltage static power converters, we study on the switching characteristics of series connected power semiconductors and then propose "a servo control of snubber capacitor value" for the dynamic voltage balancing under turn-off state in series connected power semiconductors.

Finally, we illustrate the validity of this algorithm by computer simulation and experimental results.

1. 서론

대형 펌프, 팬동에 사용되는 수 MVA 용량을 갖는 교류전동기 구동시스템의 효율운전 및 고속전철 지하철등의 고성능제어를 위해서는 그 용량과 용도에 부합되는 전력변환장치가 필요하다. 종래의 경우에는 이러한 대형구동시스템을 일정속도로 운전함으로써 많은 에너지의 낭비가 있었을 뿐 아니라, 고성능 제어운전을 요하는 곳에서의 적용에도 한계가 있었다. 따라서 이러한 문제점의 해결방안으로 전력전자공학의 발달로 인한 고압 전력변환장치의 개발이 실현되게 되었고 지금은 성능향상을 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 고압 전력변환장치의 구현을 위해서는 사용되는 소자정격의 대응량화가 선행조건이다. 그러나 소자정격의 제한과 대응량화에 따르는 소자의 성능저하 및 제어의 어려움등을 감안할때 소자의 고유성능을 저하시키지 않으면서도 신뢰성을 보장할 수 있는 직렬연결기술이 필요하다. 직렬연결시 가장 중요하게 고려해야 하는 것은 점호 및 소호시 소자들간에 나타나는 스윗칭특성의 차이에 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 스너버커패시터를 병렬로 연결하여 차단 시간 차이로 인한 문제를 최소화 한다. (3)

위의 방법들 중 용량이 큰 스너버커패시터를 사용하는 방법이 현재 실용화 되고 있으나 커패시터용량의 증가로 스너버손실이 증가하기 때문에 효율을 향상시킬 수 있는 또 다른 직렬연결기술이 절실히 요구되고 있는 실정이다.

따라서 본 논문에서는 신뢰성 및 효율을 고려하여 직렬연결된 각 소자들의 스윗칭특성 차이에도 불구하고 항상 전압분배의 균형을 이룰수 있을 뿐만 아니라 스너버커패시터용량 또한 최소화 시킬수 있는 새로운 turn-off 시점 동기화 알고리즘을 제안하였다. 소자는 전력용 트랜지스터를 대상으로 하였으며 직렬연결과 관련된 문제를 분석함으로써 새로운 방법인 커패시터용량의 SERVO-CONTROL 법을 제시하고 PSpice를 이용한 컴퓨터 시뮬레이션과 실험결과로써 제안한 알고리즘의 타당성을 입증하였다.

2. 전력용 트랜지스터의 직렬연결시 문제점

전력용 트랜지스터의 스윗칭 상태는 on 상태, off 상태, off-on 과도상태, on-off 과도상태의 네 부분으로 나눌수 있다. 직렬연결시 주된 문제점들은 두가지 과도상태 동안 나타나는 스윗칭특성의 차이로 부터 야기된다. 즉, 점호시에는 turn-on 시간이 긴 소자에, 그리고 소호시에는 turn-off 시간이 짧은 소자에 과다한 전압상승이 발생한다는 점이다. 이것은 볼과 1-2 μs 정도의 극히 짧은 스윗칭시간 차이에도 소자정격 이상의 과다한 전압이 걸려 소자가 파괴될 수 있기 때문에 소자들을 직렬연결할 때는 소자의 선택 및 보호 측면에서 매우 신중함을 기해야 한다. 스윗칭 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 스너버커패시터와 di/dt 를 제한하는 회로네의 인덕턴스 성분에 의해 점호시간의 차이로

인한 전압불균형은 쉽게 흡수될 수 있다. 전압불균형에 가장 큰 역할을 하는 것은 소호시에 나타나는 축적시간(storage time)이다. 이 시간은 베이스 영역과 드리프트 영역에 축적되어 있던 과잉소수캐리어가 제거되는데 걸리는 시간으로 정의된다. 이러한 과잉 소수캐리어의 제거는 소자내에서의 재결합과 역바이어스전류에 의한 휨쓸림에 의해서 이루어진다. 그런데 이 축적시간은 온도에 따라 변화하는 소수캐리어의 수명시간과 부하전류의 변화에 따른 전류이득의 변화 등으로 인하여 같은 종류의 소자라 할지라도 각 소자마다 달라 스위칭특성 차이에 가장 큰 영향을 끼친다. 만약 스위칭특성 차이에 의한 과도한 전압이 한 소자의 파괴전압(breakdown voltage)을 초과했을 경우 직렬연결된 소자들이 연쇄적으로 파괴될 수 있다. (2)(4)

본 논문에서 제안하고 있는 직렬연결방법은 소호시 각 소자의 미소한 스위칭특성 차이로 인한 이러한 문제점들의 해결방안으로, 축적시간이 작은 소자의 전압상승율을 축적시간이 가장 긴 소자의 축적시간이 끝날때까지 최대한 억제시켜 주는 것이다.

3. 축적시간차이를 흡수하기 위한 커패시터용량의 SERVO-CONTROL

그림 1(a)는 수동 스너버회로를 갖고 있고 축적시간에 수 μ s 차이가 나는 직렬연결된 두 전력용 트랜지스터의 소호시 V_{CE} 전압파형을 보여준다. 그림에서 볼 수 있는 것처럼 손실을 감소하고 dV/dt 를 제한시키기 위해 설계된 스너버회로는 그런 큰 축적시간의 차이를 흡수하는 데는 별 효과가 없다. 그림 1(b)는 축적시간의 차이(Δt_s)로 인한 영향을 흡수하기 위해 계산된 커패시터를 가진 스너버회로일 경우, 소호시 V_{CE} 의 전압파형을 보여준다. 그러나 여기에서는 커패시터용량이 증가됨에 따라 손실증가 및 소자들의 고유스위칭성능을 저하시키는 문제를 수반하게 된다.

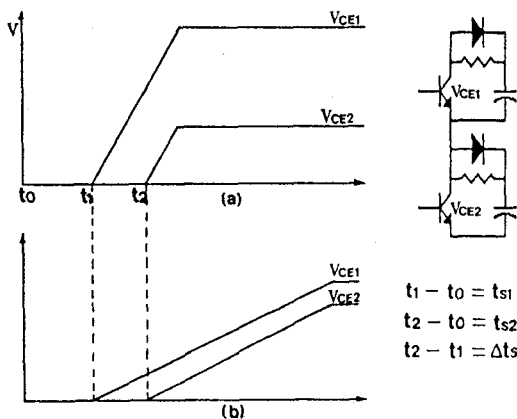


그림 1. 스너버커패시터용량에 따른 전압분배
(a) dV/dt 만을 제한하기 위한 커패시터일 경우
(b) Δt_s 흡수하기 위한 계산된 커패시터일 경우

위의 결과로부터 직렬연결시의 스너버커패시터용량은 축적시간이 가장 긴 소자의 전압이 상승할때 까지는 매우 큰 값으로 있다가 그후에는 dV/dt 만을 제한할 수 있을 정도의 값으로 바뀌는 것이 바람직하다. 이것을 실현하기 위해서는 다음과 같은 두가지 문제가 따른다.

- 트랜지스터의 상태를 어떻게 검출할 것인가?
- 커패시터용량을 어떻게 그렇게 큰 폭으로 변화시킬 것인가?

트랜지스터에 소호신호를 인가했을때 각 소자에 걸리는 전압은 축적시간이 끝난 후부터 상승하기 시작한다. 그러므로 각 소자의 V_{CE} 전압을 검출함으로써 트랜지스터의 상태를 알 수 있다. 또한 스너버회로의 커패시터를 그림 2에서처럼 에미터 대신 베이스에 연결하면 컬렉터와 에미터 사이에 연결된 같은 용량의 커패시터에 대해 전류이득(β)배 만큼 더 큰 용량의 커패시터가 있는 것과 같은 효과(Miller effect)를 얻을 수 있다. (5)

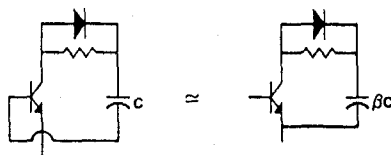


그림 2. 밀러효과를 위한 회로

이런효과를 이용하여 축적시간동안은 밀러효과를 이용할 수 있도록 그림 3(a)와 같이 스위치 S 를 OFF 시키고 축적시간이 끝나면 그림 3(b)와 같이 밀러효과가 더이상 나타나지 못하도록 스위치 S 를 ON 시킨다. 이렇게 하면 커패시터의 용량을 광범위한 폭으로 변화시킬 수 있다.

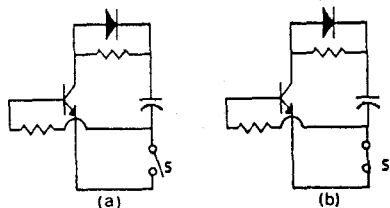


그림 3. 커패시터용량 가변을 위한 스위치 제어

이제, 전력용 트랜지스터를 그림 4(a)처럼 직렬연결했을 경우에 대해 살펴보자. 만약 $t_{s1} < t_{s2}$ 이면 축적시간이 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 β_1 값이 크면 클수록 더 작아진다. 그러므로 달링톤(Darlington)트랜지스터 또는 하이-베타(Hi-

β) 트랜지스터의 사용이 요구된다. 결국 축적시간이 긴 T_2 트랜지스터의 전압이 상승하는 시점에서 스위치 S1 및 S2 를 ON 시켜주면 더이상 밀러효과는 나타나지 않고 단순히 dV/dt 를 제한시키는 스너버의 기능만을 수행하며 다음의 기율기를 가지고 전압상승이 이루어 진다.

$$\frac{dV_{CE1}}{dt} = \frac{I}{C_1} \quad \frac{dV_{CE2}}{dt} = \frac{I}{C_2}$$

스위치 S1, S2 를 ON 시켜주는 그 시점에서의 작은 전압차를 유지하며 전압상승이 이루어지므로 전압분배의 균형을 이룰 수 있다. 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-CONTROL 법에 의한 전압분배의 동적균형을 보여 준다. 이것은 $t_{s1} < t_{s2}$ 의 경우이며 두 트랜지스터는 Δt_s 만큼의 축적시간에 차이가 있음을 볼 수 있다. V_{CE1} 은 T_1 의 축적시간후 매우 느리게 상승한다. 스위치 S1 및 S2 는 T_2 의 축적시간이 끝난후 전압이 감지되는 t_3 시점에서 ON 시켜주었다. t_3 이후에는 전압이 빠르게 상승하고 정상상태의 전압분배 불균형은 거의 없다. 밀러효과는 Δt_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.

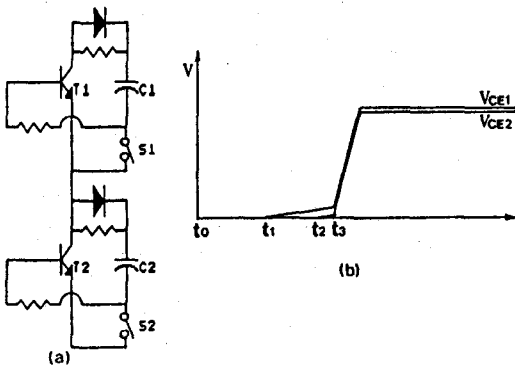
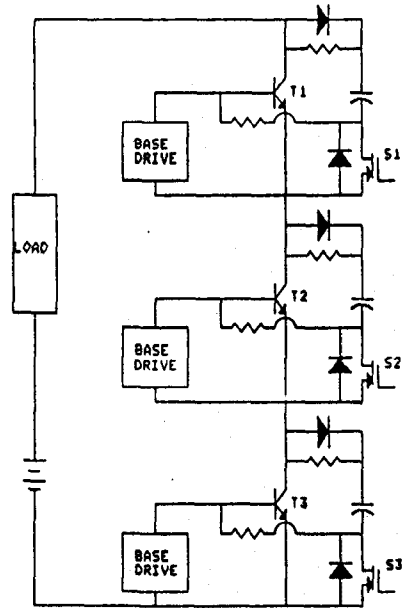


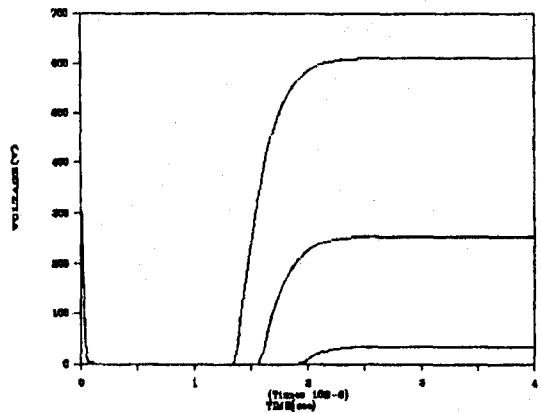
그림 4. SERVO CONTROL 을 적용한 경우
(a) 커패시터용량의 SERVO CONTROL 회로
(b) 소호시 전압파형

4. 컴퓨터 시뮬레이션 및 실험결과

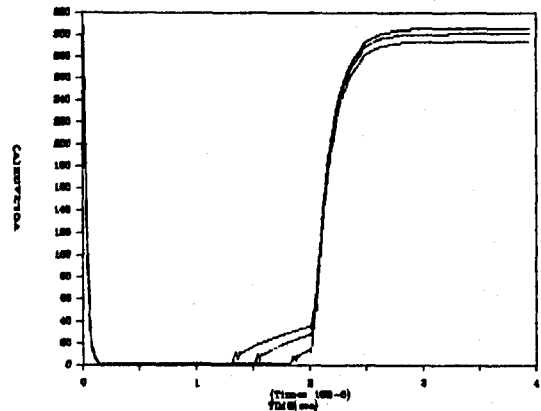
전력용 트랜지스터 SUT40305 소자를 대상으로 PSpice 를 이용하여 시뮬레이션 하였다. 기본원리의 타당성을 증명하기 위해 그림 5(a)처럼 3개의 트랜지스터를 직렬연결한 chopper 장치를 구성하였다. 그림 5(b)는 제안된 원리를 적용하지 않은 경우 2-5 μ s 정도의 축적시간 차이로 인한 전압분배의 현저한 불균형을 보여주고 있다. 그림 5(c)는 본 논문에서 제안한 원



(a) 회로도



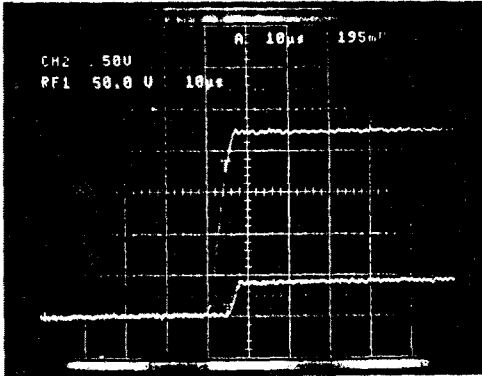
(b) SERVO CONTROL 을 적용하지 않은 경우 전압파형



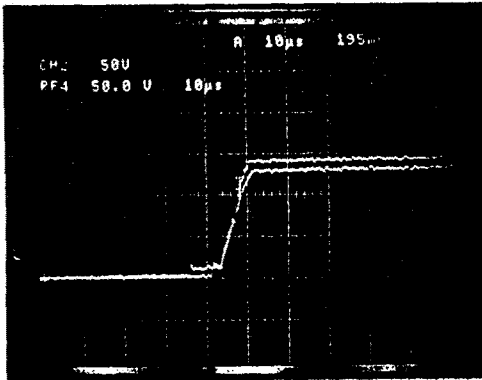
(c) SERVO CONTROL 을 적용한 경우 전압파형

그림 5. 3개의 트랜지스터를 직렬연결한 chopper 의 경우

리를 적용한 경우의 전압파형을 보여주고 있으며, 정상상태에서 전압분배의 불균형은 예상한 대로 거의 없음을 알 수 있다.



(a)SERVO CONTROL 을 적용하지 않은 경우



(b)SERVO CONTROL 을 적용한 경우

그림 6. 실험파형

그림 6은 전력용 트랜지스터 QCB50A60 을 사용하여 실험한 경우의 전압파형이다. 여러개의 소자를 직렬연결했을때 스위칭 시간은 축적시간이 가장 긴 소자에 의해 결정된다.

이 원리를 적용하면 각 소자의 전압상승순서 및 직렬연결하는 소자의 갯수에 관계없이 항상 전압분배의 균형을 이룰 수 있다

5. 결론

소자의 직렬연결을 사용한 고압 전력변환장치의 신뢰성 및 효율향상을 위하여 전력용 반도체 소자의 스위칭특성을 고려한 새로운 직렬연결방법인 커패시터용량의 SERVO CONTROL 법을 적용하여 시뮬레이션 및 실험을 하였다. 스너버커패시터의 용량을 동적으로 가변시킬 수 있는 본 연구방법으로 전력용 반도체 소자를 직렬연결할 경우 기존의 방법⁽³⁾⁽⁵⁾에 비하여

다음과 같은 잇점이 있다.

- 스너버커패시터용량을 최소화함으로써 손실을 줄일 수 있다.
- 연결하는 소자의 갯수에 제한이 없다.
- 직렬연결된 소자의 turn-off 순서에 무관하다.
- 회로구성이 용이하다.

커패시터용량의 광범위한 변화를 위해 본 논문에서 이용한 밀러효과는 전력용 트랜지스터 뿐만 아니라 MOSFET, IGBT 등에서도 나타나며, 커패시터용량의 SERVO CONTROL 법은 모든 전력용 반도체 소자에 적용될 수 있어서 추후에는 더욱 더 용량이 큰 소자(GTO, Thyristor)에 관한 연구가 진행되어야 할 것으로 생각된다.

참고문헌

- 1)ANDREJAK JEAN-MARIE, LES CURE MARC "HIGH VOLTAGE CONVERTERS PROMISING TECHNOLOGICAL DEVELOPMENTS" EPE 1987
- 2)현동석, 서범석, "고압전력변환장치 구현을 위한 전력용 반도체소자의 직렬연결시 스위칭특성" EPE,1991
- 3)S.SAADATE, R.L.DOEUFF, "HIGH VOLTAGE CHOPPER FOR ELECTRICAL TRACTION APPLICATION USING SERIES CONNECTION OF LARGE GTO THYRISTERS" IEEE, 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 TECHNIQUE FOR SERIES-CONNECTION OF POWER-TRANSISTORS IN HIGH VOLTAGE" PCI '81 PROCEEDINGS PP.519-528