

論文
3-2-4

# BJT를 이용한 고전압 컨버터

## High Voltage BJT Converter : balancing Problem

李 相 熙\*  
(Sang-Hee Lee)

### 요 약

전력 전자 분야에서 대용량 트랜지스터의 채용은 여러 장점에도 불구하고 무시되어 왔다. 트랜지스터 제작 기술의 어려움으로 여러 개의 트랜지스터를 직, 병렬로 연결하는 방법에 대하여 기술하고 트랜지스터의 직렬 연결시의 문제점을 설명하여 그 해결책을 제시한다.

### Abstract

Advantages of the utilization of high power transistors in power electronics are sometimes neglected. Proposing a series connection of the transistors, we can see some techniques for ON / OFF control of the circuit. Realization of 3-transistor in series is cumbersome but very useful for the equilibrium of voltages.

## 1. 서론

전력 전자 분야에서 전력용 트랜지스터의 채용은 ON/OFF 스위칭이 가능하고 빠른 전류(轉流) 속도 및 전류시의 손실이 적은 장점이 있으며 회로의 단락을 방지할 수 있다.

이러한 장점에도 불구하고 대용량 트랜지스터 제작의 기술적인 어려움으로(현재 제작되고 있는 대용량 트랜지스터의 정격은 대략 10KVA) 그 응용이 제한되어 왔다. 그 결과로 컨버터의 용량을 크게 하기 위해 트랜지스터의 직렬 또는 병렬 연결이 고려되었다. 트랜지스터의 병렬 연결(전류 증가)은 트랜지스터가 포화되거나 전류(轉流)시, 특히 턴

오프시에 전류의 분산 방법이 문제이고 전압을 높이기 위한 직렬 연결의 경우에는 전류 순간과 턴오프 순간의 전압분산과 각 트랜지스터의 베이스 전위가 서로 다른 점이 문제가 된다.

대용량의 전력을 장거리로 송전할 필요성이 있거나(소련이나 북극) 해저 터널로 송전을 하여야 하는 경우(영국-불란서) 또는 전기 철도의 경우 내리막 길에서 전력을 회수하려 할 때는 전력 변환이 요구되고 일반적으로 다이리스터가 많이 쓰였으나 트랜지스터 제작상의 문제가 대용량을 위한 회로를 개발하면 전력 전자 분야에서도 트랜지스터가 각광을 받을 것이다.

이 연구는 트랜지스터 직렬 연결의 문제점을 기술하고 그 개선 방법을 제시하며 3개의 트랜지스터를 직렬 연결하였을 경우를 설명함으로써 직렬

\*正會員: 江原大 工大 電子工學科 助教授

연결의 유용성을 보이는 것을 목적으로 한다.

## 2. 직렬 연결의 문제점

트랜지스터를 직렬로 연결할 때 어떤 순간에도 트랜지스터의 양단에 걸리는 전압이  $V_{CE}$ 의 최대치보다 작아야 한다. 트랜지스터가 저지 상태에 있으면 별 문제가 없지만 전류시에는 트랜지스터의 특성상 턴 온과 턴 오프의 시간적 차이가 존재하여 위험한 상태에 도달할 수 있다. 콘버터는 도통, 저지, 턴 온, 턴 오프의 4가지 상태로 나눌 수 있고 각 상태에 대해 고찰하기로 한다.

### 2.1. 도통 및 저지 상태

트랜지스터가 도통되어 있는 상태에서 양단에 걸리는 전압( $V_{CE, sat}$ )은 각 트랜지스터마다 다르지만 아주 작다. 또한 트랜지스터가 저지 상태에 있을 때는 양단의 전압을  $V_{CEO}$ 를 넘지 않게 분산시키면 된다. 그러나 전류(轉流)시에는 트랜지스터 제조 특성상 턴 온 및 턴 오프 시간이 각 트랜지스터마다 약간의 차이가 난다.

### 2.2. 전류(轉流)

#### 1) 턴 온

전류가 환류(環流) 다이오드에 흐르는 동안은 직렬 연결된 트랜지스터 쌍에 걸리는 전압은 거의 E와 같다. 마지막으로 턴 온되는 트랜지스터의 양단에 거의 모든 전압이 걸리게 된다( $V_{CE} = E - n \cdot V_{CE, sat}$ )(그림 1).

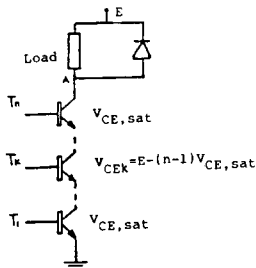


그림 1. 트랜지스터의 턴 온

Fig. 1. Turn-on situation of the transistor

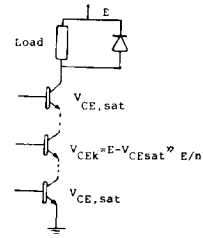


그림 2. 트랜지스터의 턴 오프

Fig. 2 Turn-off situation of the transistor

#### 2) 턴 오프

처음으로 턴 오프되는 트랜지스터의 양단의 전압이 매우 빠르게 증가한다. 만약 다른 트랜지스터들이 포화 상태를 벗어나지 못하면 이 값은 매우 커지게 된다(그림 2).

#### 3) 베이스 명령

트랜지스터 직렬 연결의 또 다른 문제는 베이스 바이어싱 회로의 포텐셜이 서로 다르고 가변적인 것이다. 각 트랜지스터의 베이스와 에미터 사이에 변압기를 설치하는 방법이 있지만 낮은 주파수에서 변압기가 포화되는 문제가 있다.

### 2.3. 전류(轉流) 회로

위의 문제들을 전류 회로를 도입하여 해결하기로 한다. 전류 회로는 전류(轉流)로 생기는 손실을 줄이고 트랜지스터 양단의 전류 캐패시터는 턴 오프시의 전압의 불평형을 줄여준다.

#### 1) 턴 온

트랜지스터  $T_R$ 이 먼저 턴 온 되었다 하면 양단에 전압 강하가 일어나고 다른 트랜지스터 양단의 전압은 대략  $E/n$ 이 된다.  $T_R$  양단의 전압 강하는 전류 회로의 인덕터로 전이(轉移)되는데 이 인덕터가  $dI/dt$ 를 효율적으로 제한할 수 있다면 문제가 발생하지 않는다. 반대로 인덕터를 통하여 흐르는 전류가 무시할 수 있을 정도를 넘는다면 캐패시터는 과충전되어  $V_{CE}$ 값이 증가한다. 즉 전류 회로의 인덕터와 캐패시터의 값이 크면 다른 트랜지스터 양단의 전압 상승을 줄일 수 있다. 결론적으로 전류 회로의 인덕터는 포화 가능하여 정격 전류 이하를 흘릴 수 있어야 한다(그림 3).

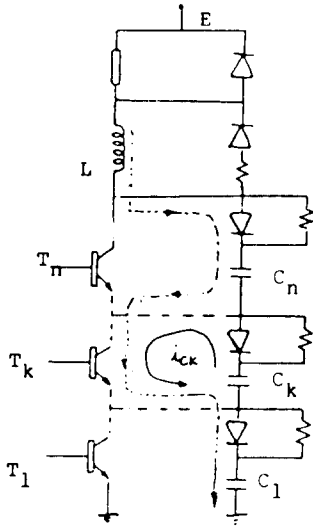


그림 3. 전류 회로에서의 턴 온  
Fig. 3. Turn-on situation with free-wheeling circuit.

2) 턴 오프

트랜지스터에 턴 오프 신호가 보내지면 트랜지스터의 저장 시간(ts) 동안은 아무 일도 일어나지 않는다. 지금  $T_R$ 가 포화상태를 벗어나려 한다면 각 트랜지스터마다 저장 시간이 차이가 있어 얼마간의 지연 후에 다른 트랜지스터가 턴 오프가 된다. 이때 이미 충전되어 있던 캐패시터  $C_R$ 가 양단 전압에 영향을 미친다. 이러한 위험을 없애기 위해서는  $V_{CEK}$ 가  $V_{CEO}$ 보다 작아야 하고 이것은 캐패시터  $C_R$  값을 충분히 크게하면 만족될 수 있다. 그러나 캐패시터의 값이 커지면 손실이 증가하고 settling time 또한 길어지게 된다. 이 방법은 주파수가 낮은 경우에는 합당하지만 트랜지스터 사용의 장점인 높은 주파수에서의 이용에 배치된다(그림4). 이 문제는 다음 두 가지 경우를 만족하는 가변 캐패시터를 가장하면 해결할 수 있다.

- 저장 시간 동안에 값이 매우 큰 캐패시터
- 전류 끝 부분에서는 정상 값

즉 전류 회로의 채용은 턴 언시의 문제를 해결할 수 있지만 턴 오프시에는 가변 캐패시터가 필요하다.

3) 베이스 전류의 문제

직렬로 연결된 트랜지스터의 하부로 내려갈 수

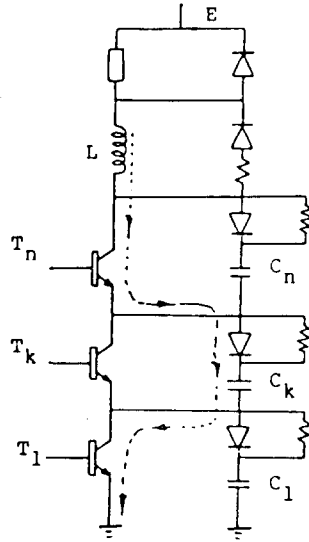


그림 4. 전류회로에서의 턴 오프  
Fig. 4. Turn-off situation with free-wheeling circuit.

록 콜렉터에 흐르는 전류가 증가한다. 즉 각 트랜지스터의 콜렉터-에미터에는 부하 전류와 바로 상단에 위치한 트랜지스터의 베이스 전류의 합이 되는 값이 흐른다. 하단에 위치한 트랜지스터에는 원래 필요한 정격보다 큰 전류가 흐르게 되어 트랜지스터의 수를 임의로 늘일 수는 없다. 이것은 다알링톤 회로를 구성하여 베이스 전류의 영향을 줄일 수 있다.

3. 턴 오프의 최적화

턴 언시의 문제는 전류 회로를 이용하여 해결할 수 있으나 턴 오프시에는 일반적인 전류 회로의 채용으로 만족되지 않는다. 특히 트랜지스터의 저장 시간이 길면 길수록 문제는 더욱 심각해진다. 트랜지스터의 양단 전압의 평형과 턴 오프 시간에 대해 다시 정리하면

- 각 트랜지스터 양단의 전압을 평형으로 만들기 위해서는 캐패시터의 용량을 크게하면 되지만 이것은  $V_{CE}$ 의 변화를 느리게 하고 모든 트랜지스터가 포화상태를 벗어나는 것을 보장하려면 턴 오프 시간이 길어진다.
- 각 트랜지스터의 턴 오프 시간을 가능하면 짧

계한다.

- 저장 시간 동안 가장 느리게 변하는 트랜지스터에 맞추어  $V_{CE}$  를 조정한다.

이를 위해 턴 오프를 두 단계로 시행한다. 즉 처음 단계에서는 모든 트랜지스터를 포화 상태에서 벗어나게 하고 다음에 실질적인 턴 오프를 행한다.

1) 턴 오프의 가속

턴 오프를 가속시키기 위해서는 트랜지스터의 저장 시간을 줄여 각 트랜지스터 간의 저장 시간의 차이를 줄이면 된다. 트랜지스터의 저장 시간은 베이스의 역전류를 의존하므로 이 값을 크게하여 저장 시간을 줄일 수 있다.

2) 두 단계의 턴 오프

우선 모든 베이스에 역전류를 흘린다.  $T_R$ 가 먼저 포화 상태를 벗어나 다른 트랜지스터들이 포화 상태를 벗어날 때까지 그 상태를 유지한다. 트랜지스터가 포화 상태를 벗어나면 턴 오프 신호를 보내는 순간 턴 오프가 이루어진다.  $T_R$ 이 포화 상태를 벗어나는 순간부터 각 트랜지스터의  $V_{CE}$ 를 관찰하여 모든 트랜지스터가 포화상태를 벗어난 것을 확인한 후에 두 번째의 턴 오프 신호를  $T_R$ 에게 보낸다.  $T_R$ 는 마치 master로 작동하여 다른 트랜지스터(slaves)를 턴 오프하게 된다. 이때 모든 트랜지스터가 포화 상태를 벗어나지 못했다면 전압 분산이 비대칭이 되어 위험한 상태에 이르게 된다.

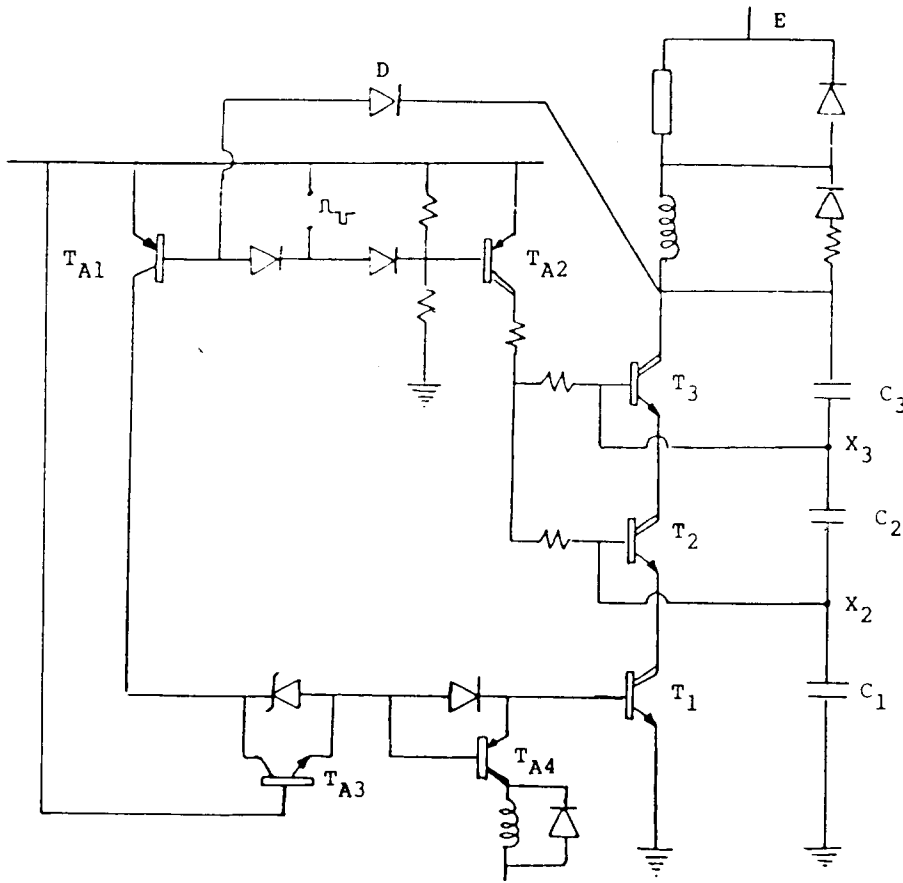


그림 5. 트랜지스터 3개의 직렬 연결

Fig. 5. Basic circuit of 3-transistor in series.

### 4. 트랜지스터 3개의 직렬 연결에 대한 고찰

위에서 기술한 내용을 이용하여 3개의 트랜지스터 직렬 회로에 대해 고찰한다(그림5). 여기서 베이스 전류의 영향을 줄이기 위하여 다알링톤 회로를 구성하였다.

#### 1) 턴 온

트랜지스터를 턴 온 시키기 위해  $T_{A1}$ 과  $T_{A3}$ (auxiliary) 에 펄스를 보낸다. 턴 온 바로 직전에  $X_2$  ( $T_2$ 의 베이스)의 포텐셜은  $E/3$ 이고  $T_1$ 이 턴 온되면  $V_{BE2}$ 는 0보다 커져  $T_2$ 가 턴 온된다. 턴 온 된 트랜지스터의 전압 강하는 바로 위에 있는 트랜지스터를 턴 온 시킨다. 여기서 다이오드 D가  $T_{A1}$ 과  $T_{A3}$ 의 도통 상태를 유지시킨다.

#### 2) 턴 오프

$T_{A2}$ 와  $T_{A3}$ 를 턴 오프할 펄스 신호를 보내면  $T_2$ 와  $T_3$ 의 전원 공급이 끊어지고  $T_{A4}$ 를 통하여 베이스 역전류를 흐르게 한다.  $T_2$ 가 먼저 포화 상태를 벗어나면  $V_{CE2}$ 는 증가한다. 이 전압은 커패시터  $C_2$ 에 나타나고 이 커패시터에 전류가 흐르게 된다. 다른 트랜지스터는 아직 포화 상태에서 벗어나지 못했으므로 전류는  $C_2$ 에만 흐른다. 이 전류는  $T_2$ 의 베이스에 흐르고 도통 상태를 연장하게 된다. 이것은  $T_2$  바로 위에 위치한  $T_3$ 의 베이스로부터 흐르게 되는데 이 전류는  $T_3$ 가 포화 상태에서 벗어나는

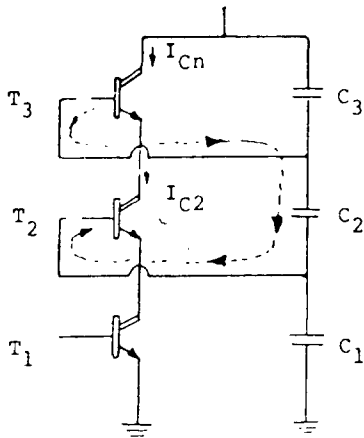


그림 6. 베이스 전류의 영향  
Fig. 6. Influence of the base current

것을 가속시키고  $T_3$ 는 기다리는 상태가 된다(그림 6).

모든 트랜지스터가 포화 상태를 벗어나면 다음 단계의 턴 오프 신호를 보낸다. 이때  $T_3$ 의 콜렉터 전압이 증가하고 이것이 어떤 값에 도달하면 도통 상태에 있던 다이오드 D가 턴 오프되어 실질적인 턴 오프 신호가 master 트랜지스터  $T_1$ 에 보내진다 ( $T_{A1}$  턴 오프,  $T_{A4}$  턴 온). 이때 트랜지스터가 포화 상태를 벗어나는 시간과  $T_1$ 의 베이스에 역전류를 흘리는 시간 사이의 지연이 일어나게 된다. 이 지연 시간 동안  $V_{CE}$ 는 전압분산의 불평형을 막는 방향으로 매우 느리게 변하게 되어 턴 오프 시간을 연장시키는 결과가 된다. 이 문제는 커패시터와 트랜지스터 사이에 제너 다이오드를 끼워 넣음으로써 해결할 수 있다(그림7). 제너 다이오드에  $V_Z$ 의 전압이 걸리고 즉시 트랜지스터의 상태를 검사하게 된다.  $T_2$ 가 포화상태를 벗어나면 콜렉터 단자의 포텐셜이 에미터 단자보다 올라가게 되고 콜렉터 전류는 부하 전류이므로  $T_2$ 의 베이스에 역전류가 흘러야 한다. 이 전류는  $X_2$ 의 전압이 제너 다이오드를 턴 온시킬 수 있을 때까지  $C_1$ 과  $C_2$ 를 충전시킨다.  $Z_2$ 가 도통하면  $C_2$ 의 전압 증가가 지연되고 따라서  $V_{CE2}$ 의 증가도 지연되어 턴 오프 지연을 감소시킨다.

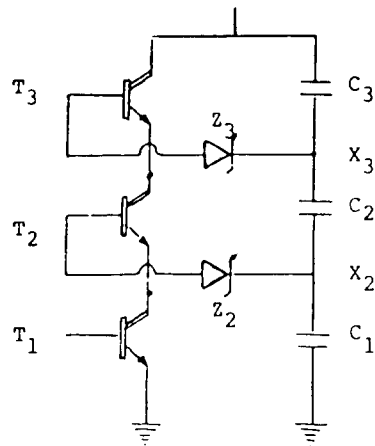


그림 7. 제너 다이오드에 의한 트랜지스터의 상태 검사  
Fig. 7. Detection of the transistor state by zenor diode.

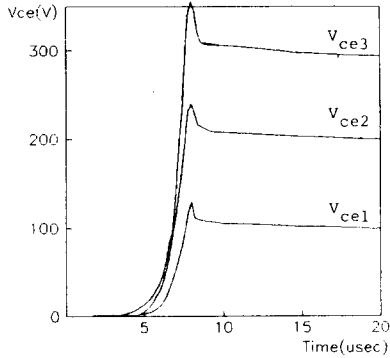


그림 8. 턴 오프시의 전압 균형  
 Fig. 8. Voltage balancing at the instant of turn-off ( $V_L = 300\text{ V}$ ,  $I_L = 10\text{ A}$ )

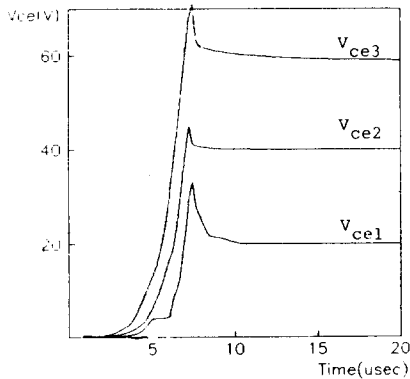


그림 9. 턴 오프시의 전압 균형  
 Fig. 9. Voltage balance at the instant of turn-off ( $V_L = 60\text{ V}$ ,  $I_L = 2\text{ A}$ )

3) 실험 결과

위에서 고찰한 이론을 증명하기 위해 트랜지스터 3개를 이용한 초퍼 회로를 만든다.

정격 전압 : 300 V

정격 전류 : 10 A

또한 사용된 트랜지스터의 정격은 다음과 같다

(Motorola MJE 10015).

정격 전압 : 200 V

정격 전류 : 50 A

실험은 부하 전류 10 A ( $V_L = 300\text{ V}$ )와 2A ( $V_L = 60\text{ V}$ )에 대하여 행하고 턴 오프시의 전압 분산을 관찰하였다(사진 1,2,3,4).

5. 결론

본 연구에서는 대용량 전력 전자 분야에서 트랜지스터의 채용 가능성을 제시하였다. 트랜지스터 3개를 직렬 연결한 결과 원하던 전압 분산이 잘 되어짐을 볼 수 있다. 그러나 트랜지스터의 수가 증가할수록 전체에 대한 해석은 매우 복잡하여 회로를 바꾸지 않고서는 실현 불가능할 것이다. 대용량 트랜지스터 제조기술의 향상과 더불어 산업 현장에서 광범위하게 응용될 것이 기대된다.

참고 문헌

- 1) Foch, Arches, Roux and Hsu, "A new technique for series connction of power transistors in high voltage", Proceeding PCI, 1981.
- 2) W. Hettershceid, "Base circuit design for high voltage switching transistors in power converters", Power Conversion International(PCI), Sept/Oct, 1980.
- 3) K. Rischmueller, "High voltage transistor chopping:", Technical information n 13 Thomson CSF.
- 4) Arches, Foch and Escaut, "Un convertisseur continu-continu basse tension a transistor destine a etre alimente par les reseaux 380 V redresses", EAI n246, pp13-18, jan, 1978
- 5) Foch and Roux, "Realisation d'un hacheur a CC pour reseaux 380 V redresses", EAI, Dec, 1977