

지수함수적 스위칭 모델링에 의한 트랜지스터 스너버회로의 손실특성 해석

한 수빈* 정 봉만 최 수현
한국동력자원연구소 전기에너지연구소

Analysis of Switching Losses in a Transistor Snubber Circuit by Exponential Switching Modeling

Han, Soo-Bin Jung, Bong-Man Choi, Soo-Hyun
Electric Energy Lab. Korea Institute of Energy and Resources

I 서론

전력변환장치에서 전력을 트랜지스터는 스위치로서 동작되므로 매우 짧은 수usec~ 수십usec동안 급격히 변화하는 서어지전압과 전류에 의해 안정 동작영역을 벗어나게 되어 소자의 손상을 초래하게 된다. 소자의 손상을 방지하기 위해서 일반적으로 저항, 커패시터, 인덕터, 다이오드등의 수동소자들을 사용한 스너버회로를 이용하여 이러한 스너버설계는 전력변환장치에서 중요한과제가 된다.

반도체소자중 사이리스터 스너버회로의 작용에 대한 해석(1,2) 들은 효과적이어서 실제 전력변환장치에서 스너버설계에 적용하기에 적합하나 트랜지스터의 경우는 소자의 동작특성이 복합적이므로 스위칭시 스너버회로 및 트랜지스터의 정확한 동작해석이 쉽지않다. 따라서 이론적으로 산출된 스너버회로의 소자값과 실제 실험에 의해서 결정되는 소자값과는 큰 편차가 존재하게 된다.

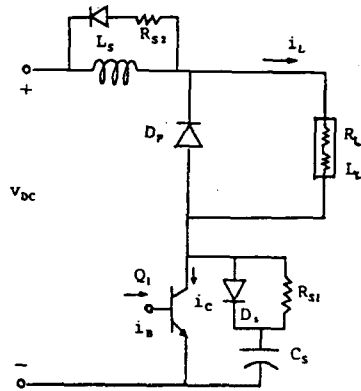
또한 트랜지스터는 전력변환장치내에서 높은 주파수로 동작되기 때문에 스너버 소자값과 관련하여 스위칭 손실의 해석은 중요하다. 트랜지스터의 스위칭시 동작을 선형적으로 모델링하여 스너버회로의 소자값에 따른 스너버 손실을 포함한 총 스위칭 손실의 변화를 분석한 연구(3) 가 있으나 스위칭동작의 선형적 모델은 스위칭시간이 길어질수록 실제 스위칭특성과는 오차가 커지게 되고 Turn-off시의 Overshoot 전압은 고려되지 않으므로 실제 적용하기에는 한계가 있다.

따라서 본 연구는 트랜지스터 스위칭 특성을 지수함수적인 스위칭 특성으로 모델링하고 Turn-off 시 Overvoltage 전압을 고려하여 실용적으로 설계에 실효성이 높도록 손실 특성을 분석하였다.

II 트랜지스터 스위칭특성 모델링

스너버회로는 (그림 1)과 같이 Turn-on 과 Turn-off 스너버로 구성되며 스너버회로의 동작 모델링을 위해 다음을 가정한다.

- i) 부하는 constant current mode 로 동작한다고 본다.
- ii) 스너버에 충전된 에너지는 다음 충전기간이 전까지 완전히 방전한다고 본다.
- iii) turn on시 트랜지스터 전압과 turn off시 트랜지스터 전류는 각각 시정수 t_{on}, t_{off} 로 변화하는 지수함수로 보며 turn on 시 트랜지스터전류는 turn on 스너버에 의해 turn off시 트랜지스터 전압은 turn off 스너버에 의해 변화가 작아진다.



(그림 1) 일반적인 트랜지스터 스너버구조

1. Turn on

Turn on 시에는 (그림 2- a)와 같이 전류가 0에서 부하전류 I_L 까지 증가하는 구간과 그 이후 부하전류 I_L 로 유지되는 구간으로 구분하며 트랜지스터 전류는 (그림 2- b)와 같이 인덕터 L_s 에 의해서 증가하는 i 와 turn off 스너버에서의 방전전류 i_{cs} 의 합으로 구성된다.

방전전류 i_{cs} 는 다음식에 의해서 결정된다.

$$i_{cs} = \frac{V_{dc}}{R_s} * \frac{(EXP(-t/t_{on}) - EXP(-t/R_s/C))}{(t_{on}/R_s/c - 1)} \quad (1)$$

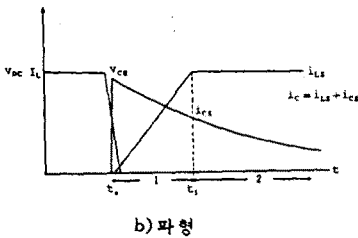
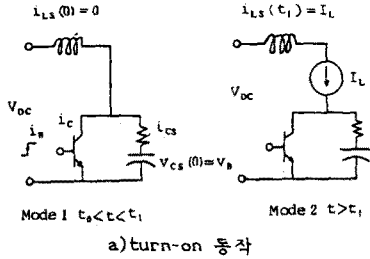
방전초기전류는 작을수록 좋으므로 방전저항값이 가능한 커야하나 방전시간이 길어지므로 트랜

지스터의 최대동작주파수를 기준으로 turn on 시간 내에 방전이 완료되도록 선택하여야 한다.

Turn on 시 전류, 전압은 다음과 같이 모델링 된다.

$$v(t) = V_{dc} \cdot \text{EXP}(-t/\tau_{on}) \quad (2)$$

$$i(t) = V_{dc}/L \cdot (t - \tau_{on} \cdot (1 - \text{EXP}(-t/\tau_{on}))) \quad (3)$$



(그림 2) turn on 시 스위칭 동작 및 파형

2. Turn off

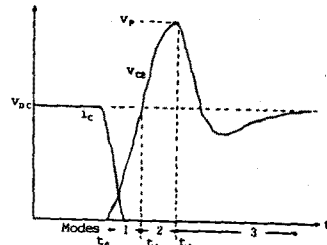
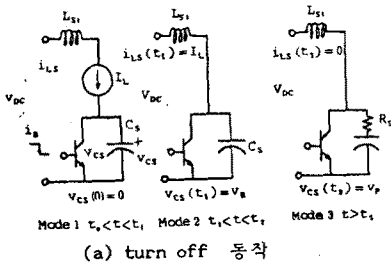
Turn off시에는 (그림 3- a)와 같이 부하전류 I_L 에 의해 turn off 스너버가 직류전원전압까지 충전되는 구간과 그 이후 다이오드 D가 도통되어 부하전류가 freewheeling되고 직렬인덕터 L_s 가 초기전류 I_L 로 방전하여 turn off 캐패시터를 더욱 충전시켜 최대 overshoot 전압 V_p 에 도달하는 구간과 그 이후 다시 turn off 스너버가 직류전원 V_{dc} 까지 방전하는 구간으로 나뉜다.

여기서 overshoot 전압이 트랜지스터의 BV_{ceo} 를 초과하게 되면 트랜지스터가 파괴되므로 회로 loop내에 존재하는 인덕턴스를 가능한 최소화시키는 것이 좋다. 실제 turn on 스너버는 freewheeling 시킴으로써 그 영향이 무시되나 도선에 존재하는 표류인덕턴스(stray inductance)에 의한 방전영향은 제거할 수 없다.

Turn off시 전류, 전압은 다음식에 의해서 모델링한다.

$$i(t) = I_L \cdot \text{EXP}(-t/\tau_{off}) \quad (4)$$

$$v(t) = I_L / C \cdot (t - \tau_{off} \cdot (1 - \text{EXP}(-t/\tau_{off}))) \quad (5)$$



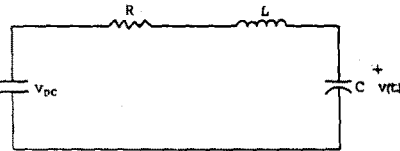
(그림 3) turn off시 스위칭 동작 및 파형

III. Turn-off시 Overvoltage 해석

Overshoot 전압이 발생하는 (그림 3)에서의 구간 II와 III의 동작은 (그림 4)와 같이 모델링할 수 있다. 여기서 L과 R은 Loop내 표류인덕턴스와 등가저항이고 C는 turn off 캐패시터이다. 회로방정식은 다음과 같다.

$$L \frac{di}{dt} + R \cdot i + \frac{1}{C} \int i dt = V_{dc} \quad (6)$$

$t=0$ 에서 $i(t) = I_0$
 $v(t) = V_0$



(그림 4) Overshoot 전압영역에서의 등가회로

대부분 전력변환장치에서 damping factor $\zeta < 1$ 이므로 이 구간에서의 방정식의 해를 구한후 Overshoot 전압이 생기는 영역에서 $I_0 = I_L, V_0 = V_{dc}$ 임을 고려하면 다음과 같다.

$$v(t)/V_{dc} = 1 + \text{EXP}(-\omega_0 t) \cdot X_0 \cdot \text{SIN}(\omega t) \quad (7)$$

여기서 $X_0 = \sqrt{L/C} \cdot I_0 / V_{dc}$: current factor

$\zeta = \sqrt{C/L} \cdot R/2$: damping factor

$\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$

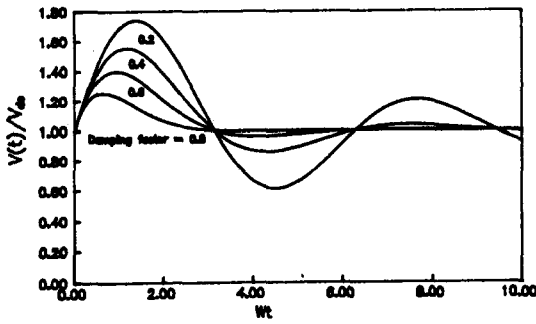
$\omega = \omega_0 \sqrt{1 - \zeta^2}$

이식에 의해 고정된 current factor에서 damping factor의 변화에 대한 overshoot 전압의 변화는 (그림 5)와 같이 damping factor가 작을수록 최대 overshoot 전압은 커진다. 고정된 damping factor에서 current factor의 변화에 대한 overshoot 전압의 변화는 (그림 6)과 같이 X_0 가 클수록 overshoot 전압이 커짐을 알 수 있다.

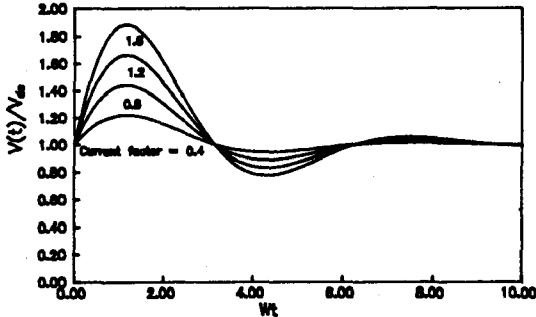
최대 overshoot 전압의 크기는 $d(v(t)/V_{dc})/dt = 0$ 인 시간에서 발생한다.

따라서 최대 overshoot 전압의 크기는 다음과 같다.

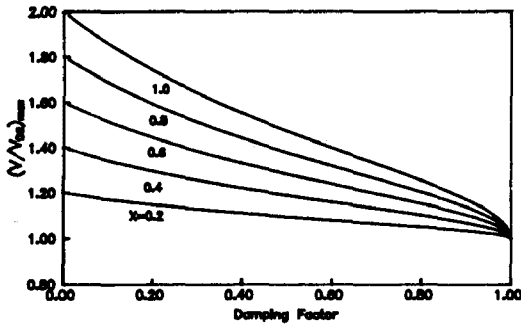
$$(v(t)/V_{dc})_{\max} = 1 + \text{EXP}(-\zeta/\sqrt{1-\zeta^2} \cdot \tan^{-1}(\sqrt{1-\zeta^2}/\zeta)) \cdot (X_0 \sqrt{1-\zeta^2}) \quad (8)$$



(그림 5) Damping factor의 변화에 따른 overshoot 전압의 변화 ($X_0=1$)



(그림 6) Current factor의 변화에 따른 overshoot 전압의 변화 ($\zeta=1$)



(그림 7) ζ 와 X_0 의 변화에 따른 최대 overshoot 전압의 변화

(그림 7)은 최대 overshoot 전압과 current factor, damping factor의 관계로서 $\zeta > 0.8$ 이상에서는 current factor의 값에 거의 영향받지 않을 확 알 수 있다.

IV. 스위칭손실 분석

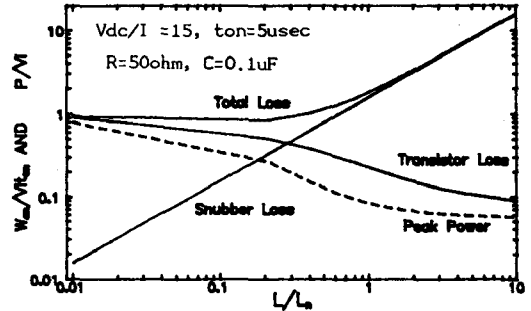
1. turn-on 시 스위칭손실

Turn-on 시 트랜지스터의 소비전력 W_{on} 은 다음과 같다.

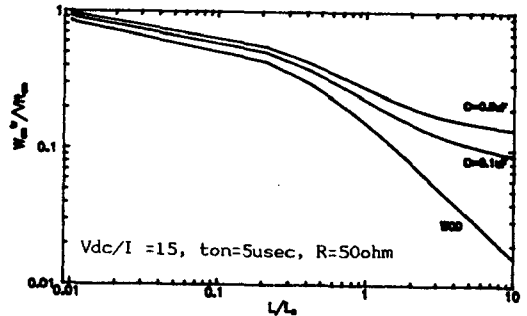
$$W_{on} / V I_{ton} = 0.95/6 * \ln/L * (1 - \text{EXP}(-2*t_1/\text{ton}) - 2t_1/\text{ton} * \text{EXP}(-t_1/\text{ton}) + \text{EXP}(-t_1/\text{ton}) + V_{dc}/I_L / 2 * c / (RC/\text{ton}) \quad (9)$$

식에서 $\ln = V_{dc} * 3 * \text{ton} / I_L / 0.9$, t_1 은 전류가 I_L 에 도달하는 시간이고 첫재항은 트랜지스터 전류가 I_L 이 될때까지 구간에서의 손실이고 둘째항은 그 이후의 손실이며 세재항은 turn-off 스너버 방전에 의한 트랜지스터 손실이다.

(그림 8)은 각종 손실과 트랜지스터의 최대순시전력의 스너버용량에 따른 변화를 계산한 것이며 (그림 9)는 turn-off 스너버가 트랜지스터의 turn-on 스위칭시 방전전류에 의하여 turn-off 스너버용량이 줄어들수록 트랜지스터의 손실을 증가시키고 있음을 보여준다.



(그림 8) Turn-on시 스너버용량에 따른 각 손실특성



(그림 9) Turn-on 시 turn-off 스너버방전에 의한 손실영향

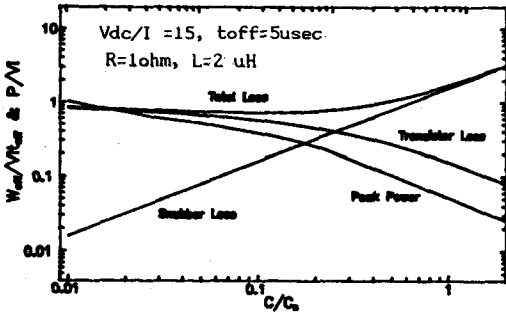
2. Turn-off시 스위칭손실

Turn-off시 트랜지스터의 손실은 다음과 같다

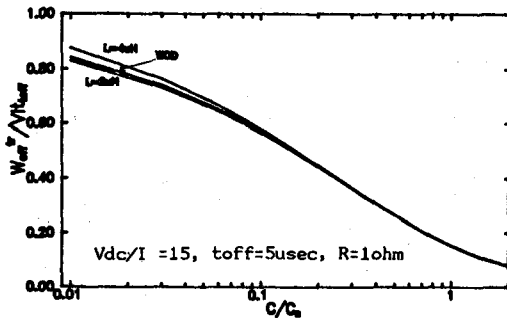
$$W_{off} / V I_{toff} = 0.95/6 * C_n / c * (1 - \text{EXP}(-2*t/\text{toff}) - 2t/\text{toff} * \text{EXP}(-t/\text{toff}) + \text{EXP}(-t/\text{toff}) + X/\text{toff} / (a + w) * (\text{asin}(wt_1) - w \cos(wt_1)) \quad (10)$$

식에서 C_n 은 $I_L * 3 * \text{toff} / V_{dc} / 0.95$, t_1 은 전압이 V_{dc} 가 되는 시간이며 첫재항은 트랜지스터 전압이 V_{dc} 가 될때까지의 구간에서의 손실, 둘째항은 그 이후에서의 손실, 세재항은 overshoot 전압에 의한 손실이다.

(그림 10)은 각종 손실과 트랜지스터 순시최대전력의 스너버 용량에 따른 변화이며 (그림 11)은 트랜지스터의 turn-off스위칭시 표류 인덕턴스에 의한 손실변화로 스너버규모가 작을수록 영향을 받음을 보여준다.



(그림 10) Turn-off시 스너버용량에 따른 각 손실특성



(그림 11) Turn-off시 표류인덕턴스에 의한 손실영향

V 결론 및 고찰

1. 트랜지스터의 스위칭 특성을 지수함수적 특성으로 모델링하고 turn-off시 overvoltage 현상을 고려하여 RLC스너버를 갖는 트랜지스터에서의 손실 특성을 해석하였다. 즉 스너버 용량에 따른 overshoot 전압 변화, turn-on 및 turn-off시 각 손실변화, turn-on 시 turn-off스너버 방전에 의한 영향 및 turn-off시 표류인덕턴스에 의한 영향에 대하여 해석하였으며 그 밖에 여러 회로파라미터의 변화에 따른 손실특성도 (그림 8~11) 과 유사한 형태로 분석된다.

2. 스너버회로설계에서 turn off시 과전압과 스위칭손실을 한계치 이하로 억제시키는 것이 가장 중요하다. 이것은 (그림 5~11)의 결과에 의해 여러조합의 스너버소자값을 선택할수가 있으나 과전압억제에 치중하면 손실이 비례해서 증가하는 등의 상관관계가 있으므로 절충이 필요하다. 현재보다 체계적인 스너버설계방법을 제시하고 이를 검증하기 위한 실험이 수행되고 있으며 추후 보고 될 예정이다.

- 참고 문헌 -

1. W. McMurray, "Optimum Snubber for Power Semiconductors," IEEE trans, Ind. Appl., Vol IA-8, no 5, pp 593-600, Sept./ Oct.1972
2. H. OHASHI, "Snubber Circuit for High Power Gate Turn-off thyristors," IEEE trans, Ind. Appl., Vol IA-19, no 4, pp655-664, Jul.1983
3. W. McMurray, "Selection of Snubber & Clamps to Optimize the Design of transistor Switching Converters," IEEE Trans, Ind. Appl., Vol IA-16, no4, pp513-523, Jul. 1980