

# 대전력 SCR 초퍼에서 가포화리액터—저항 짝의 효과

## A Effect of Saturable Reactor-Resistor Pair on High Power SCR Chopper

康 珉 九\* · 曹 圭 亨\*\*  
(Min - Goo Kang · Gyu - Hyeong Cho)

### 요 약

가포화리액터—저항 짝을 스너버의 일 부분으로 제시하였고 하프형 초퍼에 적용하였다. 초퍼를 시뮬레이션 하기위해 SCR 턴 오프 과정을 모델링하였다. SCR 턴 오프 모델에 따라 초퍼를 모우드로 나누고 각 모우드에 상태방정식을 세웠다. 실험과 시뮬레이션으로 SCR 턴 오프시 나타나는 역방향 전압 스파이크와  $dv/dt$ 를 최소로 하는 저항이 존재함을 확인하였다.

**Abstract**—Saturable reactor—resistor pair is proposed as a part of snubber and applied to a hard commutation chopper. SCR turn off process is modeled to simulate the hard commutation chopper. State equations are derived for each mode of the chopper and they are solved by Runge-Kutta 4th order method. It is shown that the reverse voltage spike and reverse  $dv/dt$  can be minimized by applying saturable reactor-resistor pair to the chopper which controls peak reverse recovery current and damping factor. Saturable reactor-resistor pair can be used to reduced SCR power loss and value of snubber capacitor and can be applied to high power thyristor devices.

### 1. 서 론

dc 초퍼는 dc-dc 변환기로서 스위치를 온 오프 시켜 출력단에 전달되는 전력을 제어하는 장치이고 스위치를 구성하는 방법에 따라 여러가지 형태로 나눌수 있다. 대전력용 초퍼에서는 스위치로서 신뢰도가 높은 SCR을 사용하고, SCR 초퍼는 SCR을 턴 오프 하기위한 전류 회로(commutation circuit)가 필요하다.

SCR의 역방향 회복(reverse recovery)과 관련된 에너지를 흡수하고 그에따른 역방향 전압 스파이크

와 전압변동율을 제한하기위해 SCR 양단에 스너버를 연결한다. 또한 스너버는 순방향  $dv/dt$ 를 제한하는 역할을 한다.

소자의 역방향 회복전류가 회로의 인덕턴스에 저장되고 SCR이 회복되면 인덕턴스에 저장된 에너지는 소비되어져야 한다.

스너버를 두어 스너버에서 그 에너지를 소모하는 대신 역방향  $dv/dt$ 와 전압 스파이크를 제한한다. 역방향 전압 스파이크와  $dv/dt$  그리고 순방향  $dv/dt$ 는 소자의 스위칭 손실과 관계하고 시스템 동작에 이상이 없도록 제한되어야 한다.<sup>①</sup>

본 논문은 가포화리액터와 저항을 스너버의 일부분으로 제시하고 그것을 초퍼에 적용하여 실험과 시뮬레이션으로 효과를 알아보았다.

가포화리액터-저항 짝을 사용하면 최대 역방향 회복 전류를 제한할 수 있고 그에 따라 턴 오프시

\*正 會 員 : 浦項工科大学 電氣 및 電子工學科 研究員  
 \*\*正 會 員 : 韓國科學技術院 電氣 및 電子科 教授·工博  
 教授日字 : 1987年 4月 23日  
 1次修正 : 1987年 6月 1日  
 2次修正 : 1988年 5月 12日

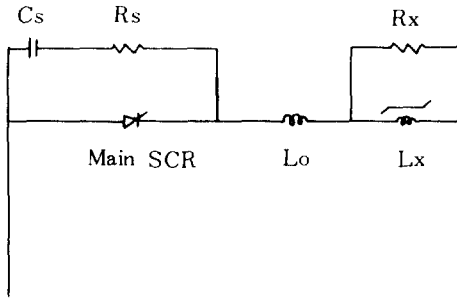


그림 1 제안된 스너버.  
Fig. 1 Proposed snubber.

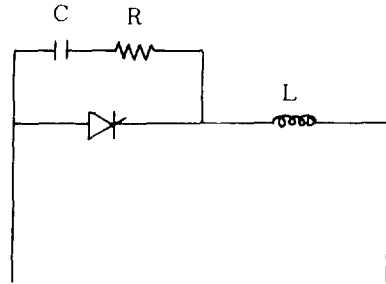


그림 2 R-C 스너버.  
Fig. 2 R-C snubber.

에 나타나는 역방향  $dv/dt$ 와 전압 스파이크를 최소로 하게 할수 있다.

## 2. 제안된 스너버

### 2.1 제안된 스너버와 효과

그림1은 제안된 스너버를 나타낸다. 일반적인 스너버와 다른 점은  $R_x-L_x$  짝을 인덕턴스  $L_o$ 와 직렬로 첨가한 것이다. 가포화리액터  $L_x$ 는 SCR이 턴오프하는 순간에는 비포화 영역에 있도록 설계한다. 따라서 리액터  $L_x$ 의 임피던스는 매우 크므로 SCR 턴오프 순간에는  $R_x-L_x$  짝은  $R_x$ 만 존재한다고 보아도된다. 이 저항에 의해 역방향 회복 전류를 조절할 수 있고 그에 따른 역방향 전압 스파이크와  $dv/dt$ 를 최소화하는 저항을 정할 수 있다. 그 순간 외에는 인덕턴스는 포화되고 단락 상태로 보아도 된다.

그림4의 실험에 사용된 초퍼는 순방향  $dv/dt$ 는 문제가 되지않는다.<sup>1)</sup> 따라서  $R_x-L_x$ 는 SCR의 턴오프시 나타나는 역방향 전압 스파이크와  $dv/dt$ 를 제한하도록 설계한다. 역방향 전압 스파이크와  $dv/dt$ 를 줄이면 SCR 턴오프시의 스위칭 손실을 줄일수 있고 대전력 시스템에 특히 효과가 크다.

### 2.2 다른 스너버 회로와의 비교

그림2는 보통 사용되고 있는 R-C 스너버를 나타낸다. 이것은 역방향 회복 전류를 조절할 수 없어 소자의 스위칭 손실을 줄일 수 없기때문에 대전력 용에 적합하지 않다.

그림3은 무극성 스너버를 나타낸다. 이것은 제안된 스너버에서  $R_x$ 가 무한대인 특수한 경우로 볼 수 있다.  $R_x$ 를 첨가하면  $R_x$ 를 조절하여 역방향 전압 스파이크와  $dv/dt$ 를 최소로 할 수 있다.<sup>5)</sup>

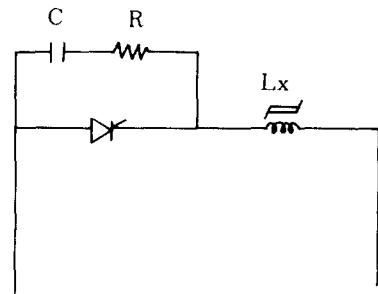


그림 3 무극성 스너버  
Fig. 3 Unpolarized snubber.

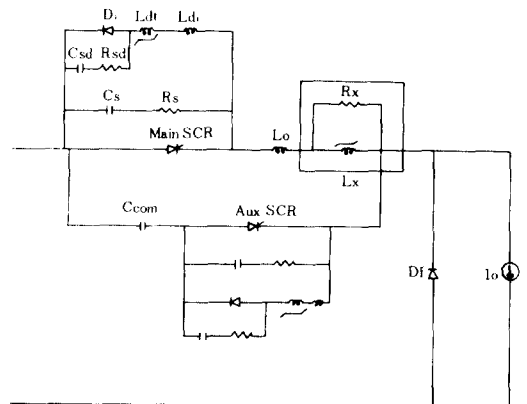


그림 4 하드형 초퍼 주회로  
Fig. 4 Hard commutation chopper main circuit.

### 2.3 하드 형 초퍼에 적용

그림4는  $R_x-L_x$  짝을 포함한 하드 형 초퍼를 나타낸다. 커패시터  $C_{com}$ 과 보조 SCR은 주 SCR을 온 오프 한다. 주 SCR의 턴오프시 SCR 턴오프 모델을 적용하여 시뮬레이션 하였다. 주 SCR의 터

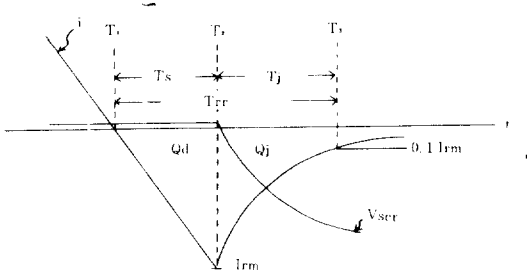


그림 5 SCR의 턴 오프 특성.  
Fig. 5 Turn off characteristic of SCR.

턴 오프 때에는 보조 SCR은 주 SCR을 턴 오프 하기 위해 온 상태이므로 보조 SCR 스너버는 작용을 하지 않는다. 주 SCR이 턴 오프할 때 까지를 모우드1, 그 후를 모우드2로 하고 다이오드 D1으로 공진하다가 D1이 턴 오프 한 이후를 모우드3로 하여 상태방정식을 세웠다.

3. SCR 턴 오프 모델

SCR 턴 오프 과정을 시뮬레이션 하기위해 SCR의 모델링이 필요하다.<sup>6)</sup> SCR 데이터 시트로 부터 역방향 회복 전하(reverse recovery charge) Q<sub>rr</sub>를 계산하고 그것을 이용하여 SCR이 회복하는 순간을 계산한다. 그림5에 SCR 턴 오프 특성을 나타낸다. 시간 T<sub>2</sub> 이후에는 SCR이 역방향으로 차단하는 능력을 가지기 시작하고 SCR 전류는 지수함수로 감소한다. 내부의 SCR에 있어 경험적으로

$$T_s = 0.6 T_{rr} \tag{1}$$

이 된다. 따라서

$$T_j = \frac{T_s}{1.5} \tag{2}$$

시간 T<sub>2</sub>에서

$$\int_0^{\infty} I_m e^{-\frac{t}{\tau}} dt = Q_j \tag{3}$$

그리고 그림5의 T<sub>rr</sub>의 정의로부터

$$I_m \exp\left[-\frac{ts}{1.5} \frac{1}{\tau}\right] = 0.1 I_m \tag{4}$$

따라서

$$\tau = \frac{Q_j}{I_m} \tag{5}$$

$$T_s \left(\frac{I_m}{Q_j}\right) = 3.4545 \tag{6}$$

가 된다. Q<sub>rr</sub>을 데이터 시트로 부터 계산한 다음 (6)식이 만족되면 시간 T<sub>2</sub>에 도달했다고 간주하고 그 이후 SCR은 전류원으로 대치하여 나머지 회로를

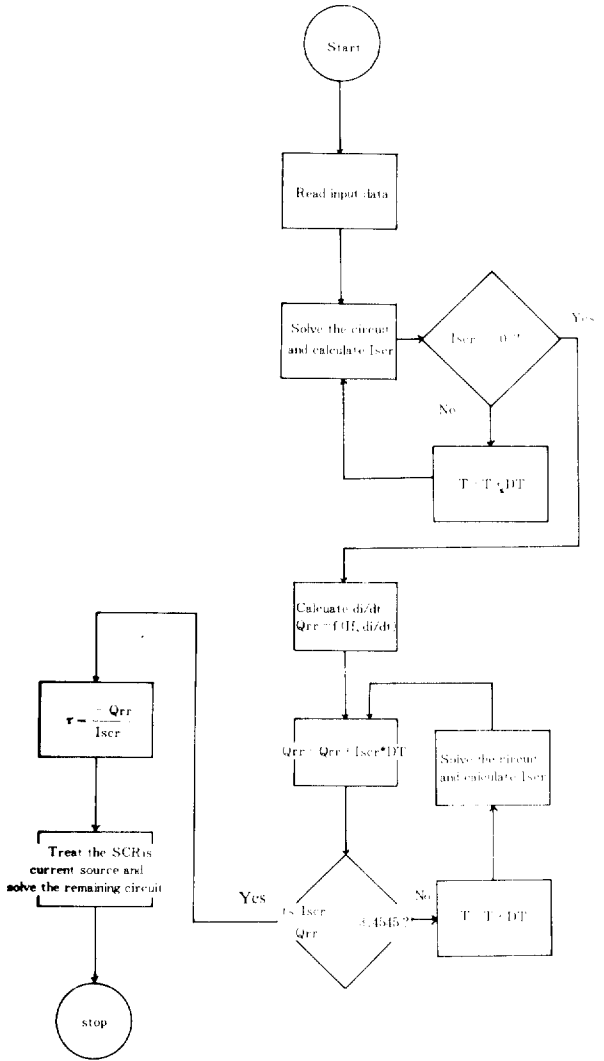


그림 6 SCR 턴 오프 모델의 흐름도.  
Fig. 6 Flow chart for SCR turn off model.

룬다. 그림6에서 SCR 턴 오프 모델을 위한 흐름도를 나타낸다.

4. 시뮬레이션과 실험의 결과 및 검토

그림 7은 R<sub>x</sub>-L<sub>x</sub> 짝이 없을 경우 그림4의 가포화 리액터 Ldt의 전압과 전류를 나타낸다. 전류파형으로부터 리액터의 비포화상태를 잘 구별할 수 있다. 그림8은 R<sub>x</sub>-L<sub>x</sub> 짝이 있을 경우 주 SCR의 턴 오프 시의 전압 파형을 나타낸다. 주 SCR의 턴 오프 순간에 R<sub>x</sub>에 큰 전압이 유기되고 그에따라 SCR

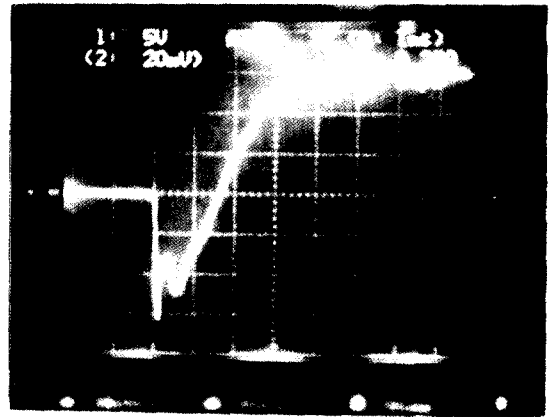
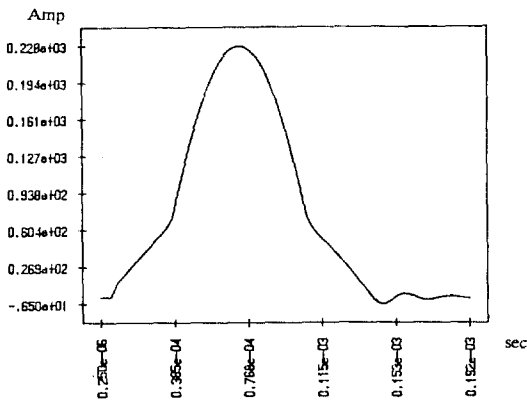
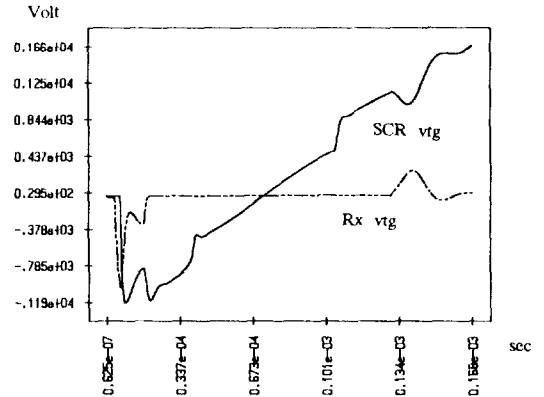
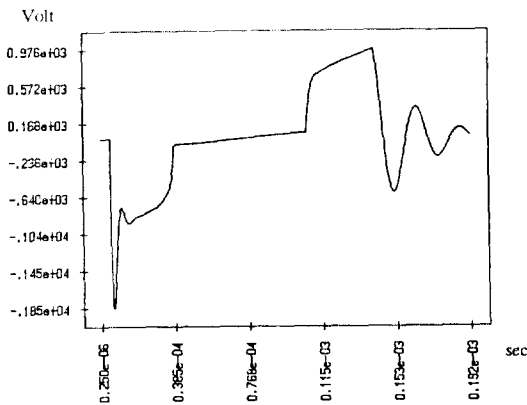


그림 8 Lx-Rx 짝이 있을 경우 SCR 양단의 전압파형

Fig. 8 SCR voltage with Lx-Rx pair.

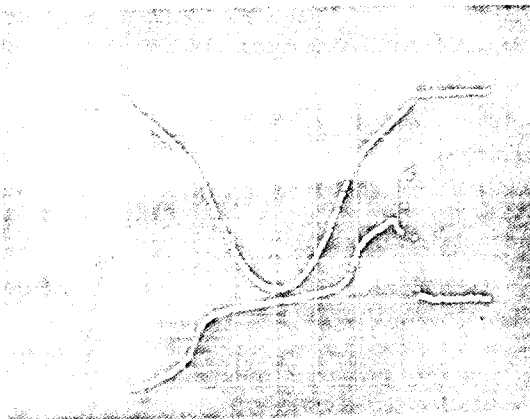


그림 7 가포화 리액터 Ldt 양단의 전압과 전류 (Lx-Rx Pair가 없는 경우)

Fig. 7 The voltage and current waveform across saturable reactor Ldt, (Without Lx-Rx pair)

의 역방향 전압 스파이크가 감소되는 것을 알수있다.

그림9는 Rx-Lx 짝의 저항 Rx를 변화하면서 최대 역방향 회복 전류(Peak Reverse Recovery Current)  $I_{rm}$ , 역방향 전압 스파이크 그리고 역방향  $dv/dt$ 의 변화를 나타낸다. 그림7과 그림8을 비교하면 Rx-Lx 짝이 없는 경우 SCR 턴 오프 때에 역방향 전압 스파이크와  $dv/dt$ 가 크게 나타남을 보여준다.

Rx-Lx 짝이 있는 경우 역방향 전압 스파이크와 역방향  $dv/dt$ 를 최소로 하는 Rx가 존재함을 알수 있다.

5. 결 론

가포화리액터-저항 짝을 첨가하여 SCR 터언 오프시 발생하는 역방향 전압 스파이크와  $dv/dt$ 를 줄일 수 있음을 실험과 시뮬레이션으로 확인하였다. 저항을 조절하여 역방향 전압 스파이크와  $dv/dt$ 를 최소로 할 수 있음을 알 수 있었고 대전력 지하철건인용 초퍼에 적용하면 SCR의 스위칭 손실을 줄이고 수명을 길게 할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- 1) S.R.Kim, "A New Design and Comparative Study on High Power Thyristor Chopper for Subway Traction," KAIST. M.S., 1986.
- 2) Gyugyi, Pally, Static Power Frequency Changers, Wilay-interscience, 1976.
- 3) Wood, "Nonlinear Reactor As Protective Elements for Thyristor circuits," IEEE Trans. Magnetics, vol. mag-3, Sept., 1967.
- 4) I.R, SCR applications handbook, 1974.
- 5) McMurray, "Optimum Sunbbers for Power Semiconductors," IEEE Trans. Ind. Appli, vol, IA-8, No. 5, Sept / Oct 1972.
- 6) G.N Revancar and P.K. Srivastave, "Turn off Model of an SCR," IEEE Trans Ind, Elect, Cont. Ins., vol. IE01-22, No. 4, Nov 1975.
- 7) Westinghouse, SCR designer's handbook, 1970.
- 8) O.A. Desoer, Basic Circuit Theory, Mcgraw. Hill, 1969.
- 9) W.T. Melyman, Transformer and Inductor Design Handbook, New York, Dekker, 1979.

A. 부 록

그림4의 초퍼에 SCR 터언 오프 모델을 적용하여 상태방정식을 구하면

A. 1 모드 1

보조 SCR이 켜지고 주 SCR이 터언 오프 할 때 까지의 시간이다. 그림10에 모드 1의 경우를 나타내었다. 상태방정식은

$$\frac{dv_{com}}{dt} = \frac{1}{C_{com}} (i_{L\alpha} - I_o)$$

$$\frac{di_{L\alpha}}{dt} = \frac{Rx}{Lx} (i_{L\alpha} - i_{Lx})$$

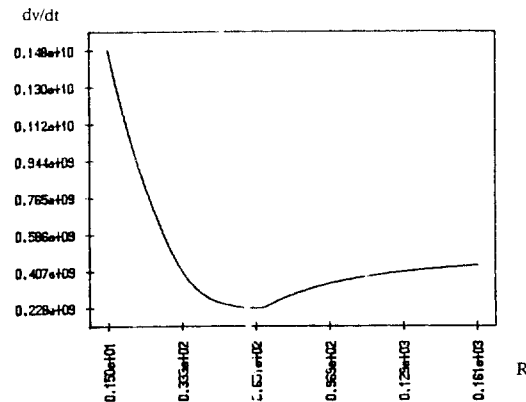
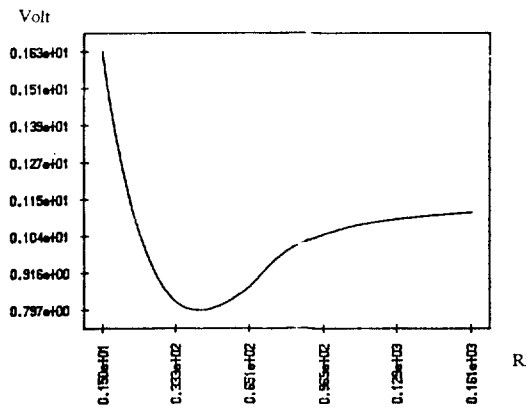
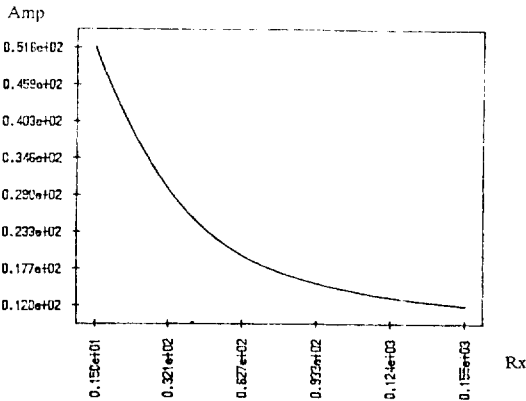


그림 9 Lx-Rx 짝이 있을 있을 경우 Rx의 변화에 따른 역방향 전압 스파이크 그리고 역방향 dv/dt의 변화

Fig. 9 The Change of irm, reverse voltage spike and reverse dv/dt as a function of parameter Rx.

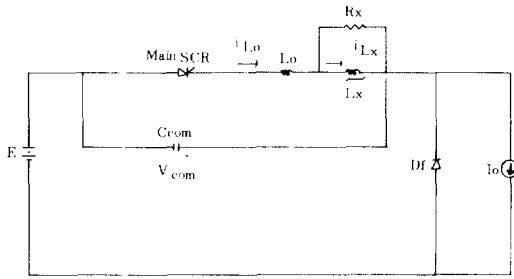


그림 10 모드1  
Fig. 10 Model.

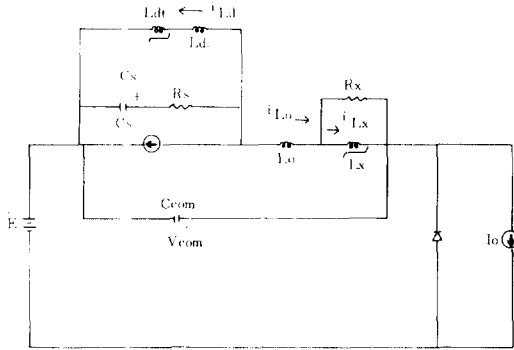


그림 11 모드2  
Fig. 11 Mode2.

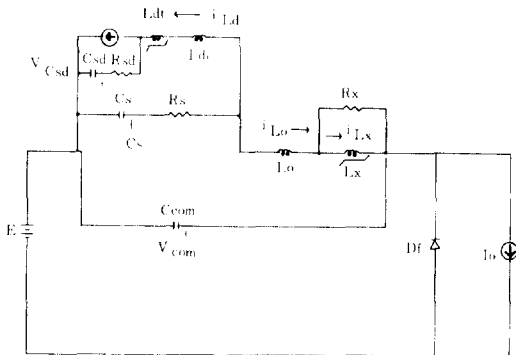


그림 12 모드3  
Fig. 12 Mode3.

$$\frac{di_{Lo}}{dt} = -\frac{1}{L_o} [v_{com} + Rx(i_{Lo} - i_{Lx})] \quad (7)$$

A. 2 모드 2

주 SCR이 턴오프되고 난 후부터 주 SCR은 전류원으로 두고 해석하며, 다이오드 DI이 턴오프

프 할 때까지의 시간이다. 그림11에 모드 2의 경우를 나타내었다. 상태방정식은

$$\begin{aligned} \frac{dv_{com}}{dt} &= \frac{1}{C_{com}} (i_{Lo} - I_o) \\ \frac{di_{Lx}}{dt} &= \frac{Rx}{Lx} (i_{Lo} - i_{Lx} + i_{Ld}) \\ \frac{di_{Lo}}{dt} &= \frac{1}{L_o} [-v_{com} + v_{cs} - Rs(i_{Lo} + i_{Ld} + I_{rm} e^{-\frac{t}{\tau}}) \\ &\quad - Rx(i_{Lo} - i_{Lx})] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{di_{Ld}}{dt} &= -\frac{Rs}{Ldt + Ld1} (i_{Lo} + i_{Ld} + I_{rm} e^{-\frac{t}{\tau}}) + \frac{v_{cs}}{Ldt + Ld1} \\ \frac{dv_{cs}}{dt} &= -\frac{1}{Cs} (i_{Lo} + i_{Ld} + I_{rm} e^{-\frac{t}{\tau}}) \end{aligned} \quad (8)$$

A. 3 모드 3

다이오드 DI이 턴오프하고난 후부터 다이오드 DI을 전류원으로 놓고 해석한다. 그림12에 모드 3의 경우를 나타내었다. 상태방정식은

$$\begin{aligned} \frac{dv_{com}}{dt} &= \frac{1}{C_{com}} (i_{Lo} - I_o) \\ \frac{di_{Lx}}{dt} &= \frac{Rx}{Lx} (i_{Lo} - i_{Lx} + i_{Ld}) \\ \frac{di_{Lo}}{dt} &= \frac{1}{L_o} [Rx(i_{Lo} - i_{Lx}) - v_{com} + v_{cs} + Rs i_s] \\ \frac{di_{Ld}}{dt} &= \frac{1}{Ldt + Ld1} [-Rsd i_{Csd} - v_{Csd} - v_{Cs} + Rs i_s] \\ \frac{dv_{cs}}{dt} &= -\frac{1}{Cs} (i_{Ld} + i_{Lo}) \\ \frac{dv_{Csd}}{dt} &= \frac{1}{Csd} (i_{Ld} - I_{rmd} e^{-\frac{t}{\tau d}}) \end{aligned}$$

여기서

$$\begin{aligned} i_s &= -(i_{Ld} + i_{Lo}) \\ i_{Csd} &= i_{Ld} - I_{rmd} e^{-\frac{t}{\tau d}} \end{aligned} \quad (9)$$

$\tau d$ 는 다이오드를 SCR과 같은 방법으로 모델링 하였을 경우의 시정수