

다이리스터의 Turn-off 모델을 이용한 최적 Snubber 회로 설계

°김 권 호* 문 영 현* 송 중 호** 최 익** 김 장 배**
* 연세대학교 ** 한국과학기술연구원

Design of an Optimum Thyristor Snubber Circuit with Turn-off Model

Kwon-Ho Kim Yong-Hyun Moon Joong-Ho Song Ick Chy Kwang-Bae Kim
*YONSEI UNIVERSITY ** KOREA INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

Abstract: The thyristor turn-off model plays an important part in the design of thyristor snubber circuit. However, it is difficult to determine the thyristor turn-off characteristics. In this paper two methods to establish the simple thyristor turn-off model are proposed based on the reverse recovery characteristics given in the data sheets. Using the simple thyristor turn-off model, the optimum thyristor snubber circuit design procedures are presented considering maximum voltage spike, maximum reverse dv/dt , and turn-off loss.

1. 서 론

다이리스터를 이용한 전력회로에서 다이리스터가 turn-on 혹은 turn-off 될 때 다이리스터의 손상 및 오동작을 막기 위하여 브로회로를 추가한다. 즉, 다이리스터가 turn-on 될 때 갑작스러운 전류 변화율(di/dt)에 의한 다이리스터의 손상을 막기 위하여 다이리스터와 직렬로 리액터를 연결하며, 또한 turn-off 될 때 다이리스터의 내부에 축적되어 있던 역회복 전하(Reverse Recovery Charge)에 의한 역전압 스파이크(Reverse Voltage Spike)를 제한하고 전압 변화율(dv/dt)에 의한 오동작을 막기 위하여 다이리스터와 병렬로 RC snubber 회로를 사용한다. 이 RC snubber 회로는 다이리스터의 정확한 turn-off 모델을 근거로 하여 설계할 수 있다. 그러나 다이리스터의 정확한 turn-off 모델을 새우기가 곤란하여 일반적으로는 간략화시킨 모델을 사용한다. 본 논문에서는 다이리스터 규격표의 특성곡선을 사용하여 다이리스터의 정확한 turn-off 모델을 비교적 간단하게 구하는 두가지 방법을 제시하였으며 이 모델을 사용하여 역전압 스파이크(V_R), 전압 변화율(dv/dt) 및 turn-off 시의 에너지 손실(P_{av})을 고려한 샘플 다이리스터의 최적 RC snubber 회로의 설계기법을 보였다.

2. 다이리스터의 Turn-off 모델

위에서 언급하였듯이 다이리스터의 snubber 회로를 설계하기 위해서는 먼저 그림 1에 나타난 역회복 전류(i_r) 특성을 알아야 한다. 최대 순방향 전류(I_F)는 외부 회로 정수들에 의해 정해진 일정한 비율 $di_r/dt(=V/L)$ 로 감소한다. 시간이 경과됨에 따라 이 전류는 0까지 감소한 후 그림 1과 같이 최대 역회복 전류(I_{RM} , $t=0$)까지 증가한다. $t=0$ 이후에 다이리스터는 역 저지기능(reverse blocking capability)을 회복하고 전류는 0까지 시정수 τ 로 다시 감소하기 시작한다. 여기서 이 시간 동안의 시정수 τ 를 구할 수 있으면 turn-off시의 역회복특성을 알 수 있어 RC snubber 회로를 설계할 수 있는데 τ 를 구하기가 어렵다. 한편 주어진 다이리스터의 fall time(t_f)에 대한 storage time(t_s)의 비율($T = t_f/t_s$)이 정해지면 시정수 τ 는 계산된다($\tau = t_f/\ln 10 = 0.43 t_f$). 그러나 참고문헌 [1]에 의하면 T는 같은 종류의 다이리스터에서도 0.2 - 0.8까지 광범위하게 분포되어 있다. 따라서 이 방법에 의해 시정수를 구하기 위하여 T를 결정하기란 매우 곤란하다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 참고문헌 [2]에서는 역회복 전하(Q_{rr}) 및 역회복 에너지 손실(P_{av}) 특성을 이용하여 t_s 및 T의 최적 파라미터를 유출해내는 방법을 제시하였다. 이와같은 방법에 의해 계산한 Q_{rr} 및 P_{av} 값과 규격표에 의한 값의 차이를 줄이기 위해서 참고문헌 [2]에서는 DAVID-FLETCHER-POWELL 알고리즘을 사용하여 오차를 8% 이내로 줄이긴 하였지만 RC snubber 회로를 실제로 설계, 응용하기 위하여 이와같은 절차를 밟는 것은 너무 복잡하다. 본 절에서는 이와같은 점을 고려하여 RC snubber 회로를 설계하고자 할 때 필히 알아야 할 다이리스터의 turn-off 모델을 비교적 용이하게 구할 수 있는 두가지 방법을 제시하고자 한다.

일반적으로 다이리스터의 규격표에는 Q_{rr} 및 I_{RM} 특성을 제시하거나 P_{av} 및 I_{RM} 특성을 제시하는데, 각각의 경우 주어진 특성을 이용하여 다음과 같이 다이리스터의 turn-off 모델을 수립한 후 최적 RC snubber 회로를 설계할 수 있다.

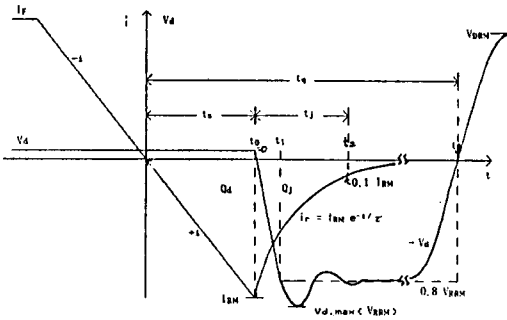


그림 1. 다이리스터의 turn-off 특성

2.1 Q_{rr} 및 I_{RM} 특성을 이용한 다이리스터의 turn-off 특성

그림 1 과 같이 다이리스터가 turn-off 될 때에 많은 역전류가 흐르며 이 전류의 시간에 대한 적분값을 역회복 전하 (Q_{rr})라고 한다. 이 전하는 storage time(t_s) 동안의 역회복 전하 Q_s 와 fall time(t_r) 동안의 역회복 전하 Q_f 로 나누어 생각할 수 있다 [2].

$$Q_{rr} = Q_s + Q_f \quad (1)$$

Storage time 동안의 역회복 전하는

$$Q_s = \frac{1}{2} I_{RM} \cdot t_s \quad (2)$$

이며 fall time 동안의 역회복 전하는

$$Q_f = \int_0^{t_r} I_{RM} \cdot \exp(-t/\tau) dt \quad (3)$$

$$= \tau \cdot I_{RM}$$

과 같으며 위 식으로부터 다음과 같은 관계식이 성립됨을 알 수 있다.

$$Q_{rr} = \frac{1}{2} I_{RM} \cdot t_s + \tau \cdot I_{RM} \quad (4)$$

$$= I_{RM} \left(\frac{t_s}{2} + \tau \right)$$

식(4)로부터

$$\tau = \frac{Q_{rr}}{I_{RM}} - \frac{t_s}{2} \quad (5)$$

한편, 그림 1로부터

$$I_{RM} = \frac{di_r}{dt} \cdot t_s \quad (6)$$

따라서

$$t_s = \frac{I_{RM}}{di_r/dt} \quad (7)$$

식(7)의 t_s 를 식(5)에 대입하면 fall time 동안의 시정수 τ 를 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\tau = \frac{Q_{rr}}{I_{RM}} - \frac{I_{RM}}{2 di_r/dt} \quad (8)$$

위 식에서 Q_{rr} 과 I_{RM} 은 di_r/dt 의 함수이다.

식(8)로부터 di_r/dt 가 주어졌을 때 규격표 상의 Q_{rr} 와 I_{RM} 의 특성을 이용하여 τ 를 구할 수 있다.

예제 1 :

표 1 은 샘플 다이리스터의 정격을 나타낸다 (C431-2 PM, POWEREX). [3] 그림 2 는 이 다이리스터의 역회복 시간 (reverse recovery time) 동안의 역회복 전하 및 최대 역회복 전류특성을 di_r/dt 의 함수로 나타낸다. [3][4] 역전류의 변화율(di_r/dt)을 10 A/ μ s 로 선택하였다면 (= V/L : V = 2,300 V , L = 230 μ H) 이 경우의 최대 역회복 전하(Q_{rr}) 및 최대 역전류(I_{RM})은 그림 2로부터 330 μ As 및 60 A 임을 알 수 있다. 이 Q_{rr} 및 I_{RM} 의 값을 식(8)에 대입하면 시정수를 구할 수 있다.

$$\tau = 2.5 \mu s \quad (9)$$

따라서 역회복 전류는 다음과 같이 표현된다.

$$i_r = I_{RM} \cdot \exp(-t/\tau) \quad (10)$$

$$= 60 \exp(-t/2.5)$$

표 1. 샘플 다이리스터의 정격 (C431-2 PM, POWEREX)

V_{RRM}	1,600	V
I_{RMS}	700	A
t_q	75	μ s
di/dt	150	A/ μ s
dv/dt	200	V/ μ s

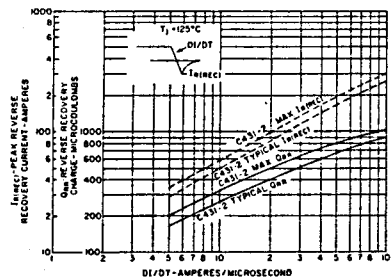


그림 2. 샘플 다이리스터의 역회복 특성 (C431-2 PM, POWEREX)

2.2 P_{av} 및 I_{RM} 특성을 이용한 다이리스터의 간단한 turn-off 모델

전력회로에서 다이리스터의 에너지 손실은 주로 순방향

전류(on-state)에 의한 것이다. 그러나 turn-off 시의 전압 변화율(dv/dt)이 클 경우 역회복 에너지손실(Pav)은 매우 커진다. [4] 그림 1로부터 Pav는 역전류가 최대(I_{RM})로 된 후부터 발생함을 알 수 있다. 이 Pav는 다이리스터에 유기되는 역전압이 0.8 V_{RRM}에 이를 때 (t₁)의 P_{av1}과 역전류가 완전히 0으로 되어 다이리스터에 순방향 전압이 유기되는 때(t₂)의 P_{av2}로 구분할 수 있다. [5]

$$P_{av} = P_{av1} + P_{av2} \quad (11)$$

t₀에서부터 t₁ 동안의 역회복 에너지손실은 다음과 같다.

$$P_{av1} = \int_{t_0}^{t_1} I_{RM} \cdot \exp(-t/\tau) \cdot \frac{dv}{dt} \cdot t \, dt \quad (12)$$

또한 t₁에서부터 t₃ 동안의 역회복 에너지손실은 다음과 같다.

$$P_{av2} = \int_{t_1}^{t_3} I_{RM} \cdot \exp(-t/\tau) \cdot 0.8 V_{RRM} \, dt \quad (13)$$

따라서

$$P_{av} = \int_{t_0}^{t_1} I_{RM} \cdot \exp(-t/\tau) \cdot \frac{dv}{dt} \cdot t \, dt + \int_{t_1}^{t_3} I_{RM} \cdot \exp(-t/\tau) \cdot 0.8 V_{RRM} \, dt = I_{RM} \cdot \frac{dv}{dt} \cdot \tau^2 \left[1 - \exp\left(-\frac{0.8 V_{RRM}}{\tau \cdot dv/dt}\right) \right] \quad (14)$$

여기서

$$t_1 = 0.8 \frac{V_{RRM}}{dv/dt} \quad (15)$$

따라서 di_r/dt가 주어졌을 때 다이리스터의 규격표에 나타난 dv/dt에 따른 Pav의 특성을 알면 식(14)로부터 시정수를 구할 수 있다.

3. RC Snubber 회로의 해석 및 최적 설계

다이리스터가 turn-off 될 동안에는 역전류의 특성을 갖는 전류원으로 대체할 수 있으므로 snubber 회로의 등가회로는 그림 3과 같이 나타낼 수 있다. [5]

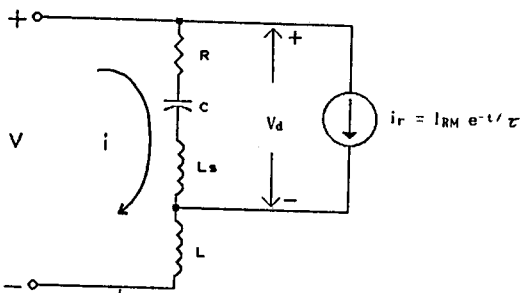


그림 3. turn-off 동안의 다이리스터의 등가회로

참고문헌 [5]에서는 역전압 스파이크를 그림 3의 등가회로로부터 R, C, I_{RM} 및 τ의 함수로 아래와 같이 유도하였다.

$$V_d = V - L \cdot \frac{di_r}{dt} = V + L \cdot k/\tau \cdot \exp(-t/\tau) +$$

$$\left[(\zeta \cdot A_1 - \omega_r \cdot A_2) \cos \omega_d t + (\omega_r \cdot A_1 + \zeta \cdot A_2) \sin \omega_d t \right] \cdot \exp(-\zeta t) \cdot L \quad (\text{Underdamped Case: } \zeta < \omega_0) \quad (16)$$

식(16)의 시간에 대한 도함수는 아래와 같다.

$$\frac{dV_d}{dt} = L \left[(\omega_r^2 - \zeta^2) A_1 + 2 \omega_r \cdot \zeta \cdot A_2 \right] \cos \omega_d t + \left[(\omega_r^2 - \zeta^2) A_2 - 2 \omega_r \cdot \zeta \cdot A_1 \right] \sin \omega_d t \exp(-\zeta t) - L \cdot k/\tau^2 \cdot \exp(-t/\tau) \quad (17)$$

$$\left(\frac{dV_d}{dt} \right)_{\max} = \left(\frac{dV_d}{dt} \right)_{t=0}$$

$$= R \left[V/L + \frac{I_{RM}}{\tau} \left(1 - \frac{K_L}{2 \tau \cdot \zeta} \right) \right] \quad (18)$$

$$R_{\max} = (dv/dt) \left[V/L + \frac{I_{RM}}{\tau} \left(1 - \frac{K_L}{2 \tau \cdot \zeta} \right) \right]^{-1} \quad (19)$$

3.1 최적 RC Snubber 회로 설계

예제 2 : (예제 1 계속)

그림 4는 식(19)에 의해서 dv/dt에 따른 R_{max}의 변화를 나타내고 있다.

$$\left(\frac{dv}{dt} \right)_{\max} [V/\mu\text{sec}]$$

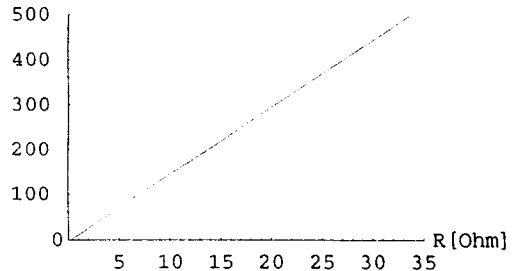


그림 4. 샘플 다이리스터의 dv/dt에 따른 R_{max} 특성 (C431-2 PM, POWEREX : 예제 1과 동일)

앞에서 언급한 바와 같이 식(16)은 R, C, I_{RM} 및 τ의 함수이다. 따라서 I_{RM}과 τ를 알고 있을 경우 다이리스터가 turn-off 될 때 역전압 스파이크 V_d의 특성은 식(16)으로부터 C를 파라메타로 하여 R의 함수로 표현할 수 있다. [6] 이 역전압 스파이크는 식(17)의 dV_d/dt가 0이 될 때 최대 (V_{d,max})가 된다. 그림 5는 저항변화에 따른 최대 역전압 스파이크(V_{d,max})를 C를 파라메타로 하여 나타내었다. 이 때 샘플 다이리스터의 정격은 표 1과 같으며(예제 1과 동일) 회로 정수는 표 2와 같다.

표 2 : 회로 정수

V	2,300	V
L	230	μH
L _s	7	μH

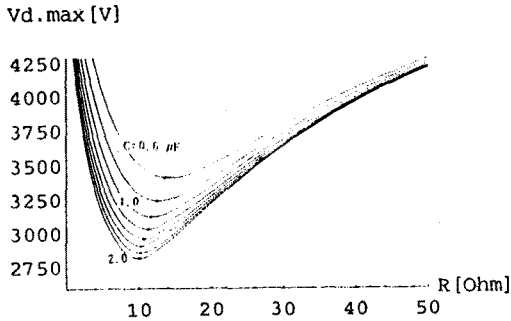


그림 5. C 를 파라미터로 하였을 때 저항변화에 따른 샘플 다이리스터의 최대 역전압 특성 ($\tau = 2.5 \mu s$)

그림 5로부터 역전압 스파이크를 최소로 하는 최적저항 R^* 가 존재함을 알 수 있다. (* 점)

그림 4로부터 $di_r/dt = 10 A/\mu s$, $dv/dt = 200 V/\mu s$, $I_{RM} = 60 A$ 일 경우 RC snubber 회로에 사용할 수 있는 최대저항 R_{MAX} 는 약 14Ω 임을 알 수 있다. 따라서 그림 5로부터 최적저항 R^* 를 10Ω 으로 선택할 수 있다. 이때 예상되는 최대 역전압 스파이크의 변화율은 식(18)로부터 $124 V/\mu s$ 가 된다. 이것은 최대 허용 역전압 변화율 $200 V/\mu s$ 의 62% 에 불과하다. 그림 5에서 알 수 있듯이 최적 R^* 를 선택할 경우 C가 증가함에 따라 역전압 스파이크는 감소한다. 그런데 RC snubber의 저항 R에서 발생하는 손실 W는 다음과 같다.[7]

$$W = \frac{1}{2} CV^2 + \frac{1}{2} L I_F^2 \quad (20)$$

그림 6에서 알 수 있듯이 역전압 스파이크의 감소를 위하여 C를 $2.5 \mu F$ 이상으로 크게 선택하면 역전압 스파이크의 감소 효과는 둔화되고 손실만 커질뿐이다. 따라서 본 연구에서는 다음과 같이 R, C 값을 선택하였다.

$$R = 10 \Omega \quad (21)$$

$$C = 2 \mu F \quad (22)$$

그림 7은 이 때의 역전압 스파이크 특성을 나타내며 그림 5에서 예상하였듯이 $V_{d,max}$ 는 $2,800 V$ 이다. (표 1에서 V_{RM} 이 $1,600 V$ 이므로 이 경우 두개의 다이리스터를 직렬로 사용하여야 한다.)

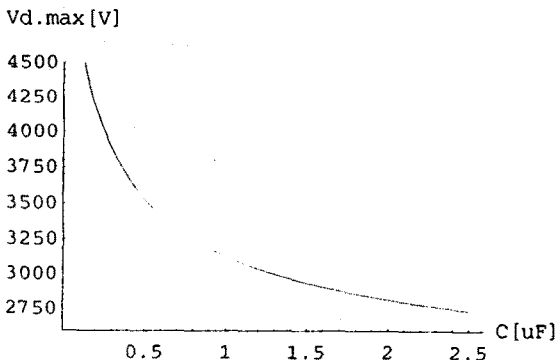


그림 6. C의 변화에 따른 역전압 스파이크(V_d) 특성 ($R = R^*$)

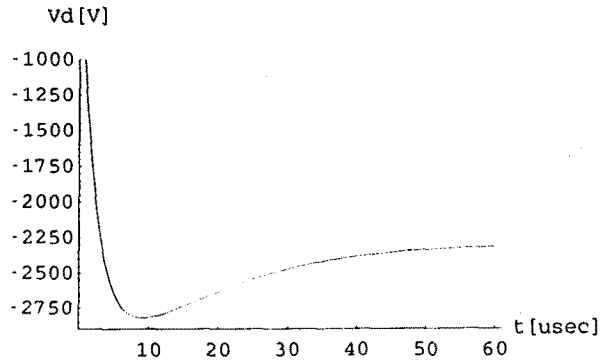


그림 7. 역전압 스파이크(V_d) 특성

4. 결 론

본 논문에서는 다이리스터 정격표의 특성곡선을 사용하여 turn-off 모델을 구하는 간단한 방법 2가지를 제시하였으며 샘플 다이리스터를 대상으로 turn-off 모델을 사용한 최적 snubber 회로를 설계하는 방법을 제시하였다. 본 논문에서 제시한 방법에 의하면 snubber 회로 설계의 기본이 되는 정확한 turn-off 모델을 구하기가 용이할 뿐만 아니라 turn-off 시에 발생하는 전압 스파이크(V_d), 전압 변화율(dv/dt) 및 에너지 손실을 최소로 하는 최적 설계가 가능하다.

참고 문헌

- [1] FREDERICK M. MATTESON, HAROLD J. RUHL, JR., PETER O. SHAFER, and E. DUANE WOLLEY, "The Recovered Charge Characteristics of High Power Thyristors", IEEE Trans. on Ind. Appl., vol. IA-12, No.3, pp 305-311, MAY/JUNE, 1976.
- [2] Chang-Woo Lee, and Song-Bai Park, "Determination of thyristor reverse recovery current parameters", IEE Pro.135, Pt.B, No.2, March 1988.
- [3] Power Semiconductor Data Book, vol. 4, Powerex, 1988
- [4] Electric Data Library (Thyristor-Rectifiers), General Electric, 1982.
- [5] Chang-Woo Lee, and Song-Bai Park, "An Optimum Parameter Determination for the SCR Turn off Model", IEEE Inter. Sym. on Circuit and System, pp 1018 - 1021, May, 1987.
- [6] Chang-Woo Lee, and Song-Bai Park, "Design of a Thyristor Snubber Circuit by Considering the Reverse Recovery Process", IEEE Trans. on Power Electronics, vol.3, No.4, pp.440-446, Oct. 1988.
- [7] William McMurray, "Optimum Snubber for Power Semiconductors", IEEE Trans. Ind. Appl., vol. IA-8, No.5, pp. 593-600, Sep./Oct. 1972.
- [8] G.N REVANKAR and PRADEEP K. SRIVASTAVA, "Turnoff Model of an SCR", IEEE Trans. on Ind. Appl., vol. IECE-22, No 4, pp 507-510, Nov. 1975.