

<https://doi.org/10.7236/JIIBC.2023.23.4.137>
JIIBC 2023-4-21

스너버(Snubber) 회로 분석을 통한 회로의 최적설계

Optimal Circuit Design through Snubber Circuit Analysis

윤용호*

Yongho Yoon*

요 약 SMPS(Switched Mode Power Supply, 전력공급장치) 회로설계 시 특별한 고찰 없이 지나치기 쉬운 부분이 스너버(snubber) 회로이다. 그러나 스너버(snubber) 회로에 따른 SMPS의 성능저하 및 SET 전체에 미치는 영향은 결코 무시할 수 없다. 또한 스위칭시 피크치 전압과 전류로부터 소자를 보호하고 on/off 스위칭시 손실을 줄여주기 위하여 스위치 양단에 스너버(snubber) 회로를 부가해준다. 따라서 본 논문에서는 스너버(snubber) 회로에 대한 충분한 이해를 위해 이론적 해석 및 실제 회로설계 때 설계자가 응용할 수 있는 실험식을 정리하여, 스너버(snubber) 회로의 최적화를 도모하고자 한다.

Abstract When designing a SMPS(Switched Mode Power Supply) circuit, a part that is easily overlooked without special consideration is a snubber circuit. However, the performance degradation of the SMPS due to the snubber circuit and the effect on the entire SET cannot be ignored. In addition, a snubber circuit is added to both ends of the switch to protect the device from peak voltage and current during switching and to reduce loss during on/off switching. Therefore, in this paper, for a sufficient understanding of snubber circuits, theoretical analysis and experimental formulas that can be applied by designers during actual circuit design are arranged to promote optimization of snubber circuits.

Key Words : Snubber Circuit, Switched Mode Power Supply, Leakage Inductance, Switch

1. 서 론

SMPS(Switched Mode Power Supply, 전력공급장치) 회로설계 시 특별한 고찰 없이 지나치기 쉬운 부분이 스너버(snubber) 회로이다. 그러나 스너버(snubber) 회로에 따른 SMPS의 성능저하 및 SET 전체에 미치는 영향은 결코 무시할 수 없다^[1].

또한 스위칭 시 피크치 전압과 전류로부터 소자를 보

호하고 on/off 스위칭 시 손실을 줄여주기 위하여 스위치 양단에 스너버(snubber) 회로를 부가해준다. 따라서 스너버(snubber) 회로를 사용하는 주된 이유를 다음과 같이 정리할 수 있다.

- (1) 스위치가 on에서 off, 또는 off에서 on으로 전이될 때 스위치 양단의 전압 및 흐르는 전류를 그림 1에 나타나 있는 안전동작영역(Safe Operating

*정회원, 광주대학교 전기공학과
접수일자 2023년 6월 8일, 수정완료 2023년 7월 8일
게재확정일자 2023년 8월 4일

Received: 8 June, 2023 / Revised: 8 July, 2023 /
Accepted: 4 August, 2023

*Corresponding Author: yhyoon@gwangju.ac.kr
Department of Electrical Engineering, Gwangju University,
Gwangju, Korea

Area: 이하 SOA)내에서 동작하도록 한다^[2].

- (2) 스위치가 전이될 때 전압 및 전류의 변화율을 어느 정도 작게 하여 신뢰성 있게 동작하도록 한다.
- (3) 스위칭 시의 전력손실을 최소화한다.
(손실이 작아질수록 스위칭 주파수를 높일 수 있다.)

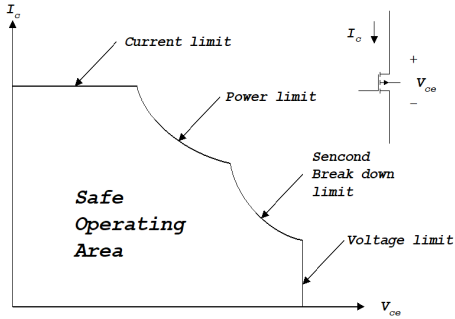


그림 1. 스위칭 소자의 전형적인 안전동작영역
Fig. 1. Typical safe operating area of a switching element

따라서 본 논문에서는 스너버(snubber) 회로에 대한 충분한 이해를 위해 이론적 해석 및 실제 회로설계 때 설계자가 응용할 수 있는 실험식을 정리하여, 스너버(snubber) 회로의 최적화를 도모하고자 한다.

II. 스너버(Snubber) 회로

1. 스너버(Snubber) 회로의 필요성

변압기(Transformer)는 1차측과 2차측이 100% 결합을 하는 구조가 아니며 특히, 그림 1과 같이 Fly-back 컨버터 방식에서는 Air-Gap을 두기 때문에 누설 인덕턴스(leakage inductance)가 존재하며 switching 주기마다 $\frac{1}{2}L_{LK} \cdot I_p^2 \cdot f$ 의 에너지가 축적된다. (L_{LK} : 누설 인덕턴스, I_p : 변압기 1차측 전류, f : switching 주파수) 그러나, 이 누설 인덕턴스(leakage inductance)는 다른 권선과 결합하고 있지 않기 때문에 1차측에서 2차측으로 에너지가 방출되지 않는다.

그러므로 그림 2에서 스위치 Q1이 Turn-off 하는 순간에 큰 역기전력이 발생하고, 누설 인덕턴스(leakage inductance)에 의해 축적된 에너지가 스위치 Q1의 Drain 전압에 중첩된다^[3].

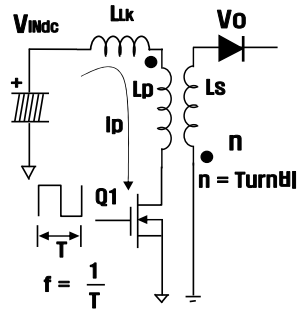


그림 2. Fly-back 컨버터 구조
Fig. 2. Lithium-ion battery charging characteristics

그림 3에서 스위치 Q1의 드레인-소스 전압(V_{ds}) 파형을 보면 VLK로 나타내어진 부분이 누설 인덕턴스(leakage inductance)에 의해서 발생한 spike 전압으로, V_{INdc}와 nV_o에 중첩되어 나타남을 볼 수 있다. 이 전압은 스위치 Q1의 내압을 결정하는 기준이 되기 때문에 스너버(snubber) 회로를 사용하여 clamping 시켜주지 않으면 스위치에 대단히 큰 전압이 걸리게 된다. 따라서 스위치가 파괴되거나, 아니면 큰 내압의 스위치를 사용해야 하므로 경제적인 설계를 할 수 없게 된다.

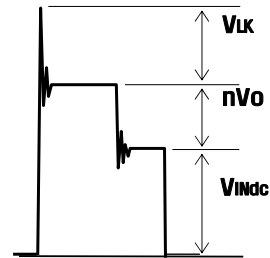


그림 3. 스위치 Q1의 드레인-소스 전압(V_{ds}) 파형
Fig. 3. Drain-source voltage waveform of switch Q1

2. 스너버(Snubber) 회로 해석

그림 4는 스너버(snubber) 회로를 Fly-back 컨버터에 적용한 회로를 보여주고 있다. 회로에서 스위치 Q1이 Turn-off 시에는 L_p에 의해서 축적된 에너지는 2차측 권선으로 방출되기 때문에 “L_p=0”이 된다. 따라서 다이오드(D)는 전류 i_{LK}의 loop으로써 동작하기 때문에 그림 5와 같이 스너버(snubber) 회로를 간소화하여 나타낼 수 있다^[4].

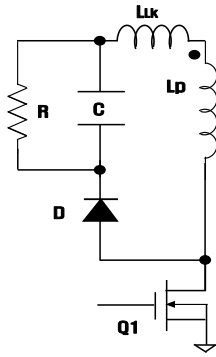


그림 4. 스너버(snubber) 회로를 적용한 Fly-back 컨버터
 Fig. 4. Fly-back converter with snubber circuit

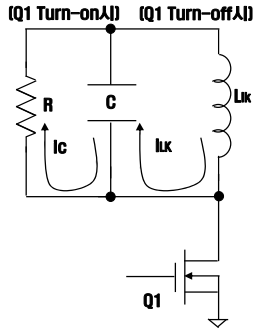


그림 5. 간소화한 스너버(snubber) 회로
 Fig. 5. Simplified snubber circuit

가. 스위치 Q1 off 시의 해석

그림 6은 그림 5 간소화한 스너버(snubber) 회로에서 스위치 Q1 off 시 전류 모드(mode)로 다음의 내용들로 수식을 정리할 수 있다.

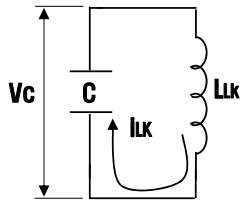


그림 6. 스위치 Q1 off 시 전류모드
 Fig. 6. Current mode when switch Q1 is off

$$L_{LK} \frac{d i_{LK}}{dt} = -V_c \quad (1)$$

$$C \frac{d V_c}{dt} = i_{LK} \quad (2)$$

식 (1)을 식 (2)에 대입하면

$$V_c(0) = 0 \quad \text{: 초기전압} \quad (3)$$

$$-L_{LK} \cdot C \frac{d^2 i_{LK}}{dt^2} = i_{LK} \quad (4)$$

$$i_{LK}(0) = I_P = \frac{V_{INdc}}{L_{LK}} \quad (5)$$

$$\frac{d^2 i_{LK}}{dt^2} = -\frac{i_{LK}}{L_{LK} \cdot C} \quad (6)$$

가 된다.

따라서 식 (6)을 간소화하기 위해 Laplace 변환하면

$$S^2 I_{LK}(S) - S I_{LK}(0) - I_{LK}(0) \quad (7)$$

$$= -\frac{1}{L_{LK}} I_{LK}(S)$$

$$(S^2 + \frac{1}{\sqrt{L_{LK} \cdot C}}) I_{LK}(S) = S I_{LK}(0), \quad (8)$$

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{L_{LK} C}}$$

이라고 하면

$$I_{LK}(S) = \frac{S I_{LK}(0)}{S^2 + \omega_n^2} \quad (9)$$

가 된다.

따라서 식 (9)를 식 (2)에 대입하면

$$C \frac{d V_c}{dt} = I_{LK}(0) \cos \omega_n t \quad (10)$$

$$V_c = \frac{1}{C} \int I_{LK}(0) \cos \omega_n t dt \quad (11)$$

$$= \frac{I_{LK}(0)}{C} \left[\frac{\sin \omega_n t}{\omega_n} \right]_0^t$$

$$= \frac{I_{LK}(0)}{C} \left(\frac{\sin \omega_n t}{\omega_n} \right)$$

식 (11)에서

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{L_{LK} C}}, \quad I_{LK}(0) = \frac{V_{INdc}}{L_{LK}} \quad \text{이므로}$$

$$V_c = \frac{1}{C} \int I_{LK}(0) \cos \omega_n t dt \quad (12)$$

$$= \frac{V_{INdc}}{L_{LK} \cdot C} \cdot \frac{1}{\omega_n} \cdot \sin \omega_n t$$

그러므로

$$V_c(t) = \frac{V_{INdc}}{L_{LK} \cdot C \cdot \sqrt{L_{LK}}} \sin \omega_n t \quad (13)$$

된다. 따라서 식 (13)을 통해 구한 $V_c(t)$ 의 전압방정식은 그림 7과 같이 스위치 Q1 off 시의 그래프로 표현할 수 있다.

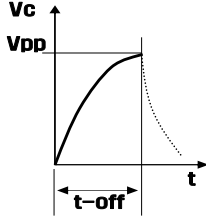


그림 7. 스위치 Q1 off 시 그래프
Fig. 7. Graph when switch Q1 is off

나. 스위치 Q1 on 시의 해석

그림 8은 그림 5 간소화한 스너버(snubber) 회로에서 스위치 Q1 on 시 전류 모드(mode)로 다음의 내용들로 수식을 정리할 수 있다.

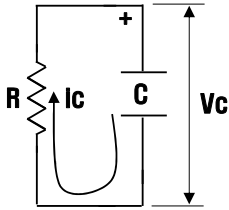


그림 8. 스위치 Q1 on 시 전류모드
Fig. 8. Current mode when switch Q1 is on

$$C \frac{dV_c}{dt} = -i_C \quad (14)$$

$$V_c = R \cdot i_C \quad (15)$$

식 (14)를 식 (15)에 대입하면

$$RC \frac{di_C}{dt} = -i_C \quad (16)$$

$$\frac{di_C}{dt} = -\frac{i_C}{RC} \quad (17)$$

따라서 식 (17)을 간소화하기 위해 Laplace 변환하면

$$SI(S) - I(0) = -\frac{I(S)}{RC} \quad (18)$$

식(18)에서 $I(0) = \frac{V_{PP}}{R}$ 라고 하면

$$(S + \frac{1}{RC}) \cdot I(S) = I(0) \quad (19)$$

$$I(S) = \frac{I(0)}{(S + \frac{1}{RC})} \quad (20)$$

$$I_C(t) = I(0)e^{-\frac{t}{RC}} \quad (21)$$

이므로 $I(0)$ 를 대입하면,

$$I_C(t) = \frac{V_{PP}}{R} e^{-\frac{t}{RC}} \quad (22)$$

식 (14)에서

$$V_c = -\int_0^t i_C dt \quad (23)$$

로 계산되며 식 (22)를 식 (23)에 대입하면

$$\begin{aligned} V_C &= -\frac{1}{C} \int_0^t \frac{V_{PP}}{R} e^{-\frac{t}{RC}} dt \quad (24) \\ &= -\frac{V_{PP}}{RC} [-RC e^{-\frac{t}{RC}}]_0^t \\ &= -V_{PP} (1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \end{aligned}$$

가 된다. 따라서 식 (24)를 통해 구한 $V_c(t)$ 의 전압방정식은 그림 9와 같이 switch(Q1) on 시의 그래프로 표현할 수 있다.

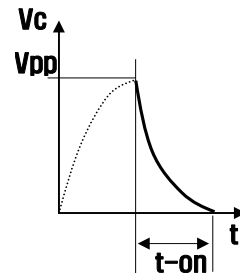


그림 9. 스위치 Q1 on 시 그래프
Fig. 9. Graph when switch Q1 is on

III. 실용적인 스너버(Snubber)회로 설계

1. 커패시터(C) 용량 계산

변압기의 누설 인덕턴스(leakage inductance)는 스위치 Q1에 높은 전압으로 인가되기 때문에 switching 소자는 아주 큰 전압에 대한 내압이 요구된다. 따라서 스위치 Q1이 Turn-off 하는 동안에 누설 인덕턴스(leakage inductance)에 의해 발생하는 over-shoot를 clamping 하기 위해 그림 10 회로와 같은 RCD 스너버(snubber) 회로를 사용한다⁵⁾.

커패시터(C)의 용량값은 입력전압과 주기마다 2차측으로부터 Fly-back되는 전압(V_{fb})에 의한 energy에 누설 인덕턴스(leakage inductance)에 의한 energy의 합에 의해서 결정되어 진다. 따라서 식 (25)를 이용하여 사용할 수 있는 커패시터(C)의 최소값을 결정할 수 있다.

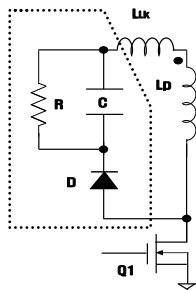


그림 10. 실용 RCD 스너버(snubber) 회로
 Fig. 10. Practical RCD snubber circuit

$$C = \frac{L_{LK} \cdot I_p^2}{\Delta V_C \cdot (\Delta V_C + 2V_{fb})} [F] \quad (25)$$

식 (25)에서

ΔV : C에 충전전되는 전압 (보통 40~60V 정도 사용)

$V_{fb} : n(V_O + V_D)$ $n : 1, 2$ 차간 권수비

V_O : 출력전압 V_D : 출력 다이오드의 순방향 전압

L_{LK} : 누설인덕턴스(Leakage Inductance)

I_p : 스위치 Q1 Turn-off 시 peak 전류

2. 저항(R) 계산

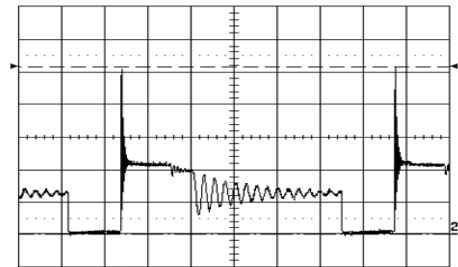
저항은 누설인덕턴스(leakage inductance)에 의해 축적된 energy와 커패시터(C)에 인가된 DC Bias(V_{fb})에 의한 Energy를 소비하게 된다. 저항값은 RC 시정수가

switching 주기보다 충분히 큰 값이 되도록 결정한다.

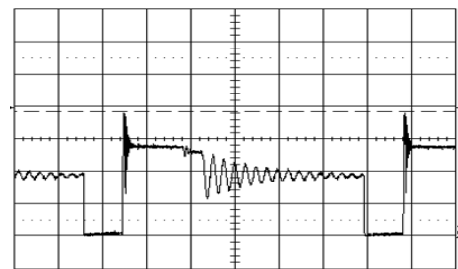
RC 회로의 시정수는 $\tau = RC[S]$ 로 커패시터(C)에서 자연응답이 $e^{-1}(0.368)$ 배만큼 감소하는 데 필요한 시간이다. 시정수(τ)가 switching 주기(T)보다 충분히 크지 않으면, 필요한 energy는 저항(R)에 의해 소모되므로 저항(R)은 수십 와트[W]의 용량이 필요하다. 이것은 현실적으로 적용할 수 없는 값이 되기 때문에 비용 문제 등을 고려하여 적당한 저항값을 선정하여 사용해야 한다⁶⁾.

IV. 실험결과

그림 11은 스너버(snubber) 회로 유무에 따른 스위치 Q1의 드레인-소스 전압(V_{ds}) 파형에 관한 결과를 보여 주고 있다. 그림 11(a)와 같이 스너버(snubber)회로가 적용되지 않을 때 스위치 Q1의 스위칭으로 인한 피크전류는 515V로 스위치 Q1 양단에 대단히 큰 전압이 걸리는 현상을 볼 수 있다.



(a) 스너버(snubber)회로 적용 전 드레인-소스 전압(V_{ds})



(b) 스너버(snubber) 회로 적용 후 드레인-소스 전압(V_{ds})

그림 11. 스너버(snubber)회로 유무에 따른 스위치 Q1의 드레인-소스 전압 파형(100V, 5us/div.)

Fig. 11. Drain-source voltage waveform of switch Q1 with and without snubber circuit

반면에 그림 11(b)에서는 47k Ω , 1W용 저항과 0.01uF 커패시터를 사용하여 스너버(snubber) 회로를 적용한 결과로 피크전류값이 대략 380V로 측정되었다. 따라서

저항과 커패시터로 구성된 스너버(snubber)회로를 이용하여 스위칭 소자의 피크전류가 clamp 되고 있음을 알 수 있다.

그림 12는 저항값에 따라 스너버(snubber) 회로에서 clamp 되는 정도를 실제 파형으로 살펴보면 많은 차이가 있음을 알 수 있다. Clamp 되는 정도를 늘리기 위해 무리하게 낮은 저항을 사용하면 저항에서 소비되는 소비전력이 매우 커지게 된다. 따라서 switch(Q1)와 저항의 경제성을 고려하여 적당한 값을 결정해야 한다.

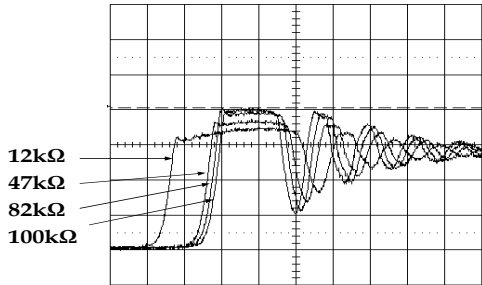


그림 12. 저항값에 따른 스너버(snubber) 회로에서의 clamp 정도
Fig. 12. Degree of clamp in snubber circuit according to resistance value

V. 결 론

전력변환장치에서 스위칭 소자의 온/오프에 의한 스위칭 시 피크치 전압과 전류로부터 소자를 보호하고 스위칭 손실을 줄여주기 위하여 스위치 양단에 스너버(snubber) 회로를 추가한다. 따라서 설계자는 이론적 배경을 습득하고 최적화된 스너버(snubber) 회로를 설계하여 전력변환장치의 성능 및 효율을 향상시킬 수 있다. 또한 피크전류로 인한 소자 파괴 및 전력변환장치의 사고에 따른 발생 요인을 사전에 방지와 과 설계(over design)에 따른 비용상승 요인을 제거하는 효과를 기대할 수 있다.

References

- [1] A. Elasser and D. A. Torrey, "Soft switching active snubbers for DC/DC converters," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 11, no. 5, pp. 710-722, 1996.
- [2] J. D. Kim, S. P. Mun and H. S. Park, "Characteristic Analysis of Flyback Type ZVS PWM DC-DC Converter Using Passive Resonant Snubber," Trans. on KIEE., vol. 65P, no. 3, pp. 158~164, 2016.
DOI: <https://doi.org/10.5370/KIEEP.2016.65.3.158>
- [3] C. H. Sung, Y. H. Heo, S. P. Mun and H. S. Park, "Characteristic of Three-Phase Voltage Type Soft-Switching Inverter using the Novel Active Auxiliary Resonant DC Link Snubber," Trans. on KIEE., vol. 65P, no. 2, pp. 114~121, 2016.
DOI: <https://doi.org/10.5370/KIEEP.2016.65.2.114>
- [4] Hai N. Tran, Adhistira M. Naradhipa., Sun-Ju Kim, and Se-Wan Choi, "Zero-Voltage-Transition PWM DC-DC Converter Using A New Active-Snubber-Cell," Trans. on KIPE., vol. 23, no. 4, pp. 273~280, 2018.
DOI: <https://doi.org/10.6113/TKPE.2018.23.4.273>
- [5] J. M. Shin, C. W. Park and S. K. Han, "Non-Dissipative Snubber for High Switching Frequency and High Power Density Step-Down Converters," Trans. on KIPE., vol. 22, no. 4, pp. 345~352, 2017.
DOI: <https://doi.org/10.6113/TKPE.2017.22.4.345>
- [6] J. Y. Shin, J. M. Lee, S. W. Choi, and J. Y. Lee, "Development of Converter for High Frequency Welding Machines using Active Snubber," Trans. on KIPE., vol. 21, no. 4, pp. 351~355, 2016.
DOI: <https://doi.org/10.6113/TKPE.2016.21.4.351>

저 자 소 개

윤 용 호(정회원)



- 성균관대학교 메카트로닉스공학과 (공학박사)
- 삼성탈레스 종합연구소 전문연구원
- 현재 : 광주대학교 전기전자공학부 교수
- 주관심분야 : 전동기 제어 및 신재생에너지

※ 이 연구는 2023년도 광주대학교 대학 연구비의 지원을 받아 수행되었음.