

주파수 해석을 통한 PSFB 컨버터 스너버 저항 최적설계 기법

고재학, 오승민, 김학원⁺, 조관열
한국교통대학교 제어계측공학과

Snubber Resistor Optimization by Frequency Domain Analyze for PSFB Converter

Jae Hak Ko, Seung Min Oh, Hag-Wone Kim⁺, Kwan-Yuhl Cho
Korea National University of Transportaion

ABSTRACT

위상천이 폴-브릿지 컨버터(PSFB converter)는 다양한 전원 장치에 응용되고 있다. 하지만 2차측에 링잉(ringing)현상이 생겨 다이오드에 과도한 전압 스트레스를 유발하는 문제가 있다. 링잉 현상을 억제하기 위해 스너버 회로를 추가하여 사용해야 하지만 저항 값에 대한 주파수응답 해석이 이루어지지 않아 스너버 튜닝에 많은 시간이 소요되었다. 본 논문에서는 저항 값에 따른 스너버 회로의 주파수 응답특성 분석을 통해 링잉으로 인한 전압 스파이크를 최소화 할 수 있는 저항 값 선정 기법을 제안하며 PSIM/Matlab 시뮬레이션으로 검증한다.

1. 서 론

위상천이 폴-브릿지 컨버터(PSFB converter)는 간단한 제어와 낮은 스위칭 손실이라는 장점 때문에 전기 자동차 충전기 등 다양한 전원장치에 응용되고 있다. 하지만 2차 측 다이오드의 역 회복 특성 때문에 링잉(ringing)현상이 생겨 다이오드에 과도한 전압 스트레스를 유발하는 문제가 있다.[1] 이로 인해 내압이 높은 다이오드를 사용해야하기 때문에 가격상승을 초래하고 링잉 현상을 효과적으로 감쇄 하지 못 할 경우 EMI와 같은 문제를 일으킨다. 이러한 문제를 해결하기 위해 스너버(Snubber) 회로를 2차측 출력 인덕터 앞단에 추가하여 사용해야 한다. 스너버로 주로 쓰이는 RC 스너버의 경우 저항 값이 너무 높으면 링잉 전압의 피크값을 효과적으로 억제 할 수 없으며 저항 값이 너무 낮을 경우 스너버 손실이 커지는 문제가 있어 적절한 스너버 저항 을 선정 하는 것이 중요하다.[2] 하지만 기존 설계법은 스너버 저항값 변화에 의한 주파수 응답을 고려하지 않아 적절한 저항값을 찾는 데 많은 시간이 필요하다. 본 논문에서는 저항 값에 따른 스너버 회로의 주파수 응답특성 분석을 통해 링잉으로 인한 전압 스파이크를 최소화 할 수 있는 저항 값 선정 기법을 제안하며 PSIM/Matlab 시뮬레이션으로 검증한다.

2. 본 론

2.1 링잉현상 발생 원인

PSFB의 회로도는 그림 (1)과 같다. 링잉 현상이 발생하는 순간 전류의 파형은 그림 (2)에 나타 내었다. I_o' 은 인덕터 전

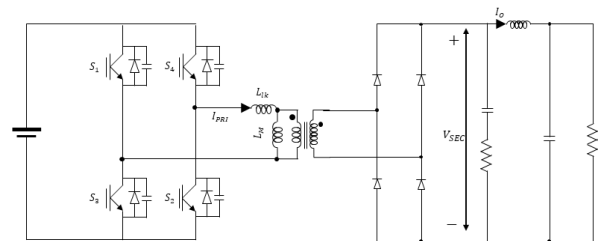


그림1 PSFB 회로도

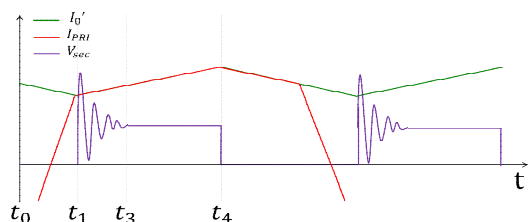


그림2 PSFB 전류 파형

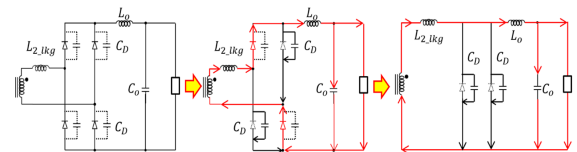


그림3 2차 측 등가회로

류 파형이며 I_{PR1} 는 1차측 전류, V_{sec} 는 2차측 정류단 전압 파형을 나타낸 것 이다. 변압기의 2차 측에는 1차 측의 누설 인덕턴스가 투영되며 다이오드의 기생 커패시터와 LC 공진 회로를 구성한다. 시간에 따른 2차측 회로 동작은 다음과 같다.

$[t_0 \sim t_1]$

2차 측 출력 인덕터에 의해 전류가 환류 하면서 다이오드 4개가 모두 도통 되어 있는 상태이다. 이때 1차 측에선 전류가 상승하기 시작한다.

$[t_1 \sim t_2]$

1차 측으로부터 에너지가 전달되기 시작하면서 역방향 바이어스 다이오드 2개가 꺼지며 역 회복 전류가 흐르게 된다. 이때 다이오드의 기생 커패시터와 2차 측으로 투영된 1차 측 누설 인덕터가 공진하며 링잉 현상이 발생한다. 이때 회로의 기생 저항 성분에 의해 링잉 성분은 서서히 감쇄 된다.

$[t_2 \sim t_3]$

회로의 기생 저항성분에 의해 링잉 신호가 감쇠 되고 난 후 정상상태 전압이 나타나는 구간이다.

그림 (3)은 2차 측 정류단의 등가회로를 나타낸 것이다. L_{2-lkg} 는 2차 측으로 투영된 1차 측 누설 인덕턴스 이며 C_D 는 다이오드의 기생 커패시턴스 이다. 링잉이 발생 할 때 전류의 흐름에 따라 변압기에 기생 커패시터 2개가 병렬로 연결된 것처럼 보이므로 이때 다이오드의 총 기생 커패시턴스는 식 (1) 과 같다. 이때 누설 인덕터와 기생 커패시터의 공진주파수는 식(2) 와 같이 표현 할 수 있다.

$$C_p = 2 * C_D \quad (1)$$

$$f_o = \frac{1}{2 * \pi * \sqrt{L_{lkg} * C_p}} \quad (2)$$

2.2 스너버 회로 주파수 응답

그림 (4)는 일반적인 RC 스너버 회로를 나타낸 것이다. C_{sn} 은 스너버 커패시턴스 이며 R_{sn} 은 스너버 저항 값이다 식(5)는 RC 직렬 스너버의 전달함수이다. $L = L_{2-lkg}$, $C_t = C_p + C_{sn}$ 으로 표현하였다. 본 논문에서는 C_p , C_{sn} , L_{2-lkg} 값을 선정 한 상태에서 R_{sn} 에 따른 스너버의 주파수 응답을 해석한다. C_p , L_{2-lkg} , C_{sn} 값이 정해졌을 때 R_{sn} 의 값에 따라 스너버의 공진 전압 피크값과 공진 주파수가 달라질 것이다. R_{sn} 의 값이 매우 작을 경우, 그림 (5)와 같이 C_{sn} 만 보이는 형태가 될 것이며 이때 스너버의 전달함수를 식(4)로 정의한다. 반대로 R_{sn} 의 값이 매우 클 경우 그림 (6)과 같이 R_{sn} 만 보이게 될 것이며 이때 스너버의 전달함수를 식(5)로 정의한다.

2.3 제안하는 스너버 저항 선정 기법

그림(7)은 R_{sn} 의 크기에 따른 $G_{sn}(s)$ 의 주파수 응답을 나타낸다. $G_{sn}(s)$ 은 R_{sn} 에 따라 공진 주파수와 최대값이 결

$$G_{sn}(s) = \frac{1 + sR_{sn}C_{sn}}{s^3LC_pC_{sn}R_{sn} + s^2LC_t + sR_{sn}C_{sn} + 1} \quad (3)$$

$$G_{LR}(s) = \frac{1}{LC_t} \quad (4)$$

$$sL + \frac{1}{LC_t}$$

$$G_{HR}(s) = \frac{1}{LC_p} \quad (5)$$

$$s^2 + \frac{s}{C_pR_{sn}} + \frac{1}{LC_p}$$

정 되며, 모든 파형이 공통된 한 점을 지나게 되는 것을 알 수 있다. 이 때 주파수를 w_{opt} 로 표현한다. w_{opt} 에서 모든

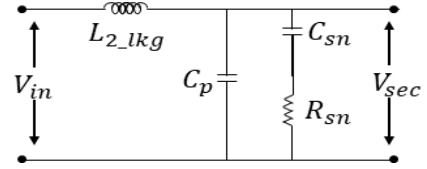


그림4 RC스너버 회로

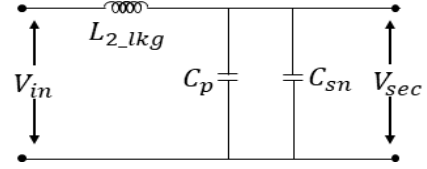


그림5 낮은 R값을 갖는 스너버

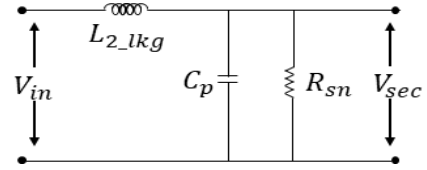


그림6 높은 R값을 갖는 스너버

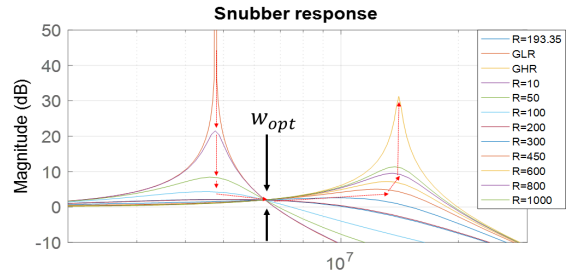


그림7 Rsn에 따른 스너버의 주파수 응답

$G_{sn}(s)$ 의 이득 크기는 $G_{LR}(s)$, $G_{HR}(s)$ 과 동일한 것을 알 수 있다. 즉 w_{opt} 에서

$$|G_{HR}(jw_{opt})| = |G_{LR}(jw_{opt})| = |G_{sn}(jw_{opt})| \quad (6)$$

이며 공진주파수가 w_{opt} 일 때 공진 전압의 크기가 최소화 된다는 것을 알 수 있다. 스너버는 입력 신호에 관계없이 고유의 공진 주파수를 가지므로 스너버 회로의 공진 주파수를 w_{opt} 로 맞추게 될 경우 링잉 현상을 최소화 할 수 있다. 식(6) 을 통해 w_{opt} 에서 모든 전달함수의 이득이 같으므로 식(7)을 다음과 같이 정의한다.

$$|G_{HR}(jw_{opt})| = |G_{LR}(jw_{opt})| \quad (7)$$

$$\sqrt{\frac{(\frac{1}{LC_t})^2}{(\frac{1}{LC_t} - w^2)^2}} = \sqrt{\frac{(\frac{1}{LC_p})^2}{(\frac{1}{LC_p} - w^2)^2 + (\frac{w}{C_pR_{sn}})^2}} \quad (8)$$

w_{opt} 에 대해 정리 하면

$$w_{opt} = \sqrt{\frac{(C_pC_t)^2[(\frac{1}{C_pC_tR_{sn}})^2 + \frac{2}{L}(\frac{1}{C_p^2C_t} - \frac{1}{C_pC_t^2})]}{C_t^2 - C_p^2}} \quad (9)$$

이때 R_{sn} 은 매우 큰 값을 가지므로

$$\frac{1}{C_p C_t R_{sn}} = 0 \quad (10)$$

$$w_{opt} = \sqrt{\frac{(C_p C_t)^2 \frac{2}{L} (\frac{1}{C_p^2 C_t} - \frac{1}{C_p C_t^2})}{C_t^2 - C_p^2}} \quad (11)$$

식 (8)에 식(11)을 대입하면

$$Ag = \frac{(\frac{1}{LC_t})^2}{(\frac{1}{LC_t} - w_{opt}^2)^2} = \frac{(\frac{1}{LC_p})^2}{(\frac{1}{LC_p} - w_{opt}^2)^2 + (\frac{w_{opt}}{C_p R_{sn}})^2} \quad (12)$$

R_{sn} 에 대해 정리하면

$$R_{sn} = \sqrt{\frac{Ag \frac{w_{opt}^2}{C_p^2}}{[(\frac{1}{LC_p})^2 - Ag(\frac{1}{LC_p} - w_{opt}^2)^2]}} \quad (13)$$

2.4 시뮬레이션

시뮬레이션 파라미터 값은 다음과 같다

표1 스너버 모의해석 파라미터 값

값	C_p	C_{sn}	$L_2 - lkG$	f_s
값	260[pF]	2[uF]	19.44[uH]	50[kHz]

값	V_{DC}	V_{out}	N (turn ratio)
값	350V	300V	1.8

Matlab으로 계산한 $w_{opt} = 6.79e+06$ rad/s

Matlab으로 계산한 $R_{sn} = 193.3$

Vin=350V, Vo=300V, Pmax=6.25kW

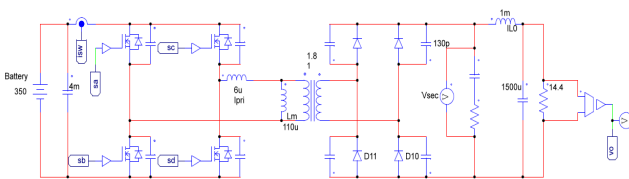


그림8 PSIM 시뮬레이션 회로도

스너버 저항 최적설계를 입증하기 위해 6.25KW급 PSFB 컨버터를 설계하여 시뮬레이션 하였다. 1차 측의 누설인덕턴스, 입력전압, 출력전압 및 기생 커패시턴스 파라미터는 표(1)에 나타내었다. 그림 (8)은 PSIM 시뮬레이션 회로도이며 그림 (9)는 Matlab을 이용한 최적 저항 값 선정 시뮬레이션 결과이다. 그림 (10)은 각각 80Ω, 450Ω을 적용 했을 때 PSIM 시뮬레이션결과 이다. 두 경우 모두 전압 최대값이 약 840V 이상 상승하는 것으로 나타났다. 그림 (11)은 최적 값으로 제시된 193 Ω을 적용 했을 때 시뮬레이션 결과이며 전압 최대값은 724V 이다. 시뮬레이션 결과를 통해 제안된 방법으로 계산한 스너버 저항 값이 링잉을 가장 효과적으로 억제할 수 있는 최적화 된

저항 값이라는 것을 입증하였다.

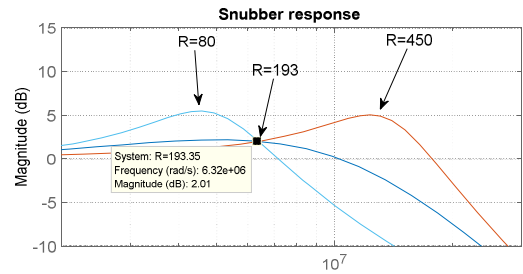


그림9 Matlab 시뮬레이션 결과

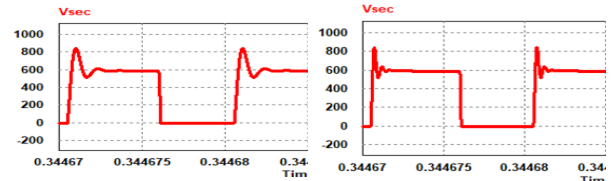


그림 10-1 PSIM 시뮬레이션

그림 10-2 PSIM 시뮬레이션

R=80, Vpeak = 842 V

R=450, Vpeak = 847 V

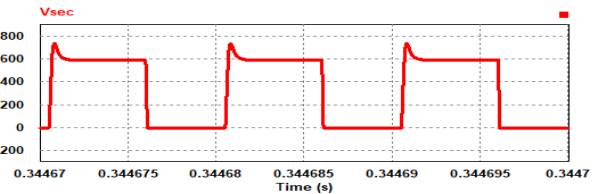


그림 11 PSIM 시뮬레이션 R=193, Vpeak = 724 V

3. 결론

기존의 스너버 설계방식은 최적화를 위한 저항값을 선정하기 어렵고 많은 시간이 필요하다. 최적의 스너버 저항값을 선정하기 위해 주파수 응답 특성을 분석 하여 링잉 현상을 효과적으로 억제 할 수 있는 저항값 선정 기법을 제안 하였고 시뮬레이션을 통해 입증하였다. 제안하는 방법은 전압 스파이크를 최소화 할 수 있는 공진 주파수를 계산하여 스너버 저항값을 최적화 한다.

이 논문(저서)은 2016년도 에너지인력양성사업의 재원으로 한국 에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (No.20164030201100)

이 연구는 2018년도 제이앤디전자(J&D Electronics)의 연구비 지원에 의한 연구임(201800270001)

참고 문헌

- [1] Koji Orikawa, Jun-ichi Itoh, "Analysis and Optimization Design of Snubber Circuit for Isolated DC-DC Converters in DC Power Grid," 2012 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), Nagasaki, 2012,
- [2] Y. Zhang, C. Liu and L. Zhang, "The loss calculation of RCD snubber with forward and reverse recovery effects considerations," 8th International Conference on Power Electronics(ICPE), Jeju, 2011, pp. 3005-3012.