

EV 탑재형 충전기용 부하직렬공진형 컨버터의 최적 공진주파수 설계

오창열, 김종수, 이병국
 성균관대학교 정보통신공학부

Optimal Resonant Frequency Design of Series-Loaded Resonant DC-DC Converter for EV On-Board Charger

Chang Yeol Oh, Jong Soo Kim, Byoung Kuk Lee
 School of Information & Communication Engineering, Sungkyunkwan University

ABSTRACT

본 논문에서는 전기자동차 (Electric Vehicles, EVs)에 사용되는 탑재형 충전기 (On Board Charger, OBC)에 적용된 부하직렬공진형 컨버터 (Series Loaded Resonant DC DC Converter, SRC)의 최적 공진주파수를 설계하기 위한 과정을 제시한다. 실제 OBC제품의 입·출력을 토대로 프로세스를 진행하여, 다양한 주파수에 따른 공진 네트워크를 구성한다. 그 결과로 얻어진 파라미터를 이용하여 스위칭 주파수에 따른 자성 소자의 사이즈 변화 및 손실량 변화 추이를 분석하여 최적의 설계점을 찾는다.

1. 서 론

EVs용 OBC의 고효율 및 고 전력밀도 달성을 위하여 SRC와 같은 공진형 컨버터 토폴로지가 주로 고려되고 있다.^{[1],[2]}

공진형 컨버터는 공진주파수와 공진 네트워크 (L_r , C_r)의 설계에 따라 특성이 달라지며, 시스템 사양과 함께 고려하면 적절한 스위칭 주파수의 범위가 결정된다. 스위칭 주파수의 증가는 자성소자와 수동소자의 손실을 저감하고 체적 및 무게를 감소시키지만, 필연적으로 반도체 소자의 스위칭 손실증가로 이어진다. 이와 반대로 스위칭 주파수가 감소하면 반도체 소자의 손실은 감소하지만, 자성소자와 수동소자의 체적 및 무게 증가는 피할 수 없다. 따라서 OBC 설계는 효율과 전력밀도를 동시에 만족하기 위해서는 공진주파수의 최적 선정을 통한 상호 절충점을 찾아 설계하는 것이 요구된다.^[2]

따라서 본 논문에서는 실제 OBC제품의 SRC에 대하여 공진 주파수와 시스템의 부피에 가장 큰 영향을 주는 L_r 을 주파수별로 선정한다. 또한 각각의 값에 따른 자속밀도변화량 및 손실을 고려하여 다양한 사이즈의 적용 가능한 코어 (페라이트 PL7계열, EE320, EE118, EE7066C, EE7066, EE6565, EE80, PQ5050)로 설계하고, 주파수에 따른 코어의 부피 (V_c) 변화와 인덕터 및 반도체 스위치의 손실을 계산하여 최적의 공진주파수 설계 방법을 제시한다.

2. OBC용 SRC 특성

2.1 시스템 파라미터

실제 OBC 제품에 적용된 풀 브릿지형 SRC의 주요 입출력 사양은 표 1과 같다.^[2]

표 1. SRC의 시스템 파라미터

Parameter	Value	Parameter	Value
P_{out}	3.3 [kW]	$I_{out,max}$	12 [A _{dc}]
V_{in}	380 [V _{dc}]	t_{dead}	10 [%]
I_{in}	8.5[A _{dc}]	$N_1:N_2 (N_T)$	19:26 (1.368)
V_{out}	240 400 [V _{dc}]		

2.2 SRC 특성 및 부하 분석

SRC는 공진 네트워크와 교류 등가저항이 직렬로 연결된 구조로 구성된다. 공진 네트워크에 흐르는 전류는 실제 회로에서 변압기로 2차 측에 넘겨져 출력의 부하로 흐르기 때문에, 주파수 응답을 해석한 입·출력관계는 식 (1)과 같이 표현된다.^[3]

$$V_{gain} = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{N_T((t_{on} - t_{dead})/t_{on})}{1 + j \frac{\pi^2}{8} Q \left[\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right]} \quad (1)$$

하지만 부하인 배터리의 경우 물리적 임피던스가 매우 낮고 수많은 변수가 존재하기 때문에 정확한 모델링을 위해서, 정전류 정전압 충전기법을 고려한 출력의 가변 조건을 식 (1)에서 제시한 관계를 통해 그림 1과 같이 부하 영역으로 표현한다.

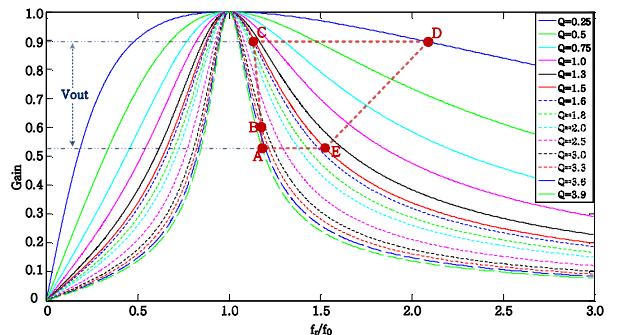


그림 1. 충전 전력의 범위 (공진이득 곡선)

3. 공진주파수에 따른 주요소자 손실계산

3.1 공진 네트워크 설계 및 인덕터 선정

공진주파수가 선정되지 않은 상태에서 SRC의 손실을 계산하기 위해서는 많은 변수가 존재하기 때문에, 모든 조건을 만

측하는 정확한 손실을 구하기는 어려움이 따른다. 그러므로 공진주파수의 최적 범위를 구하기 위해, 손실이 최대가 되는 지점 (그림 1 점A)에서의 $Q=3.89$ 와 $R_L=20\Omega$ 으로 가정한 상태에서 분석을 수행한다. 주파수 영역을 10kHz에서 200kHz까지 가변되는 주파수 범위에서 다양한 조합의 공진 네트워크를 구성할 수 있다. 구성된 L_r 및 C_r 의 조합을 이용하여 계산되어지는 각각의 주파수별 Z_C 와 Q 의 값에서, 가정한 Q 에 가장 근접한 L_r , C_r 의 변화는 그림 2와 같이 나타난다.

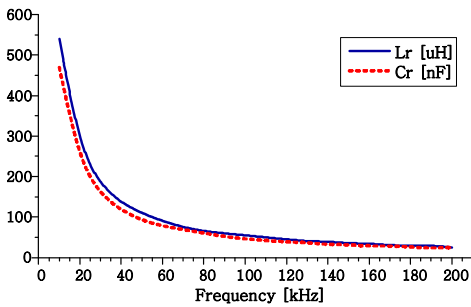


그림 2. 주파수별 공진 네트워크의 파라미터 변화

공진 인덕터는 PM7계열의 페라이트 코어로 설계한다. 각각의 주파수에 가용 가능한 코어는 식 (2)로 표현되는 $\Delta B/2$ 의 값이 포화되는 자속밀도범위 $\Delta B_{sat} = 0.4T$ 에서 마진을 감안한 $0.3T$ 이하가 되도록 선정하고, 그 때 인덕터의 손실을 계산하여 적합한 코어를 결정하면 그림 3과 같이 나타난다.

$$\frac{\Delta B}{2} = \frac{V_L(t_{on} - t_{dead}/t_{on})}{2A_e N} \quad (2)$$

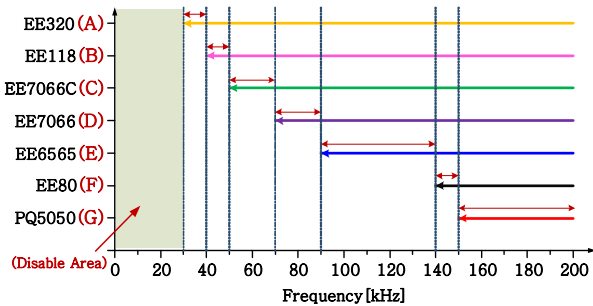


그림 3. 주파수별 공진 인덕터 코어선정

3.2 손실 계산 및 공진주파수 선정

SRC에 사용된 반도체 스위치들의 손실을 계산하면 주파수 증가에 비례하는 것을 알 수 있다.

표 2. 주파수별 손실 및 코어부피 변화

Freq[kHz]	30kHz	40kHz	50kHz	60kHz	70kHz	80kHz	90kHz	100kHz	110kHz
$P_{sw}[W]$	67.8	69.6	71.4	73.2	75.0	76.8	78.6	80.4	82.2
$P_{Lr}[W]$	1269	470.7	127.9	111.8	77.7	67.8	44.4	39.4	35.2
$\Delta B[T]$	0.267	0.296	0.292	0.269	0.299	0.281	0.298	0.281	0.267
vol[cm ³]	1154	464.5	147.1	147.1	104.7	104.7	78.7	78.7	78.7
Freq[kHz]	120kHz	130kHz	140kHz	150kHz	160kHz	170kHz	180kHz	190kHz	200kHz
$P_{sw}[W]$	84.0	85.8	87.6	89.4	91.2	93.0	94.8	96.6	98.4
$P_{Lr}[W]$	30.9	26.7	25.8	13.5	12.8	11.6	8.5	6.9	4.9
$\Delta B[T]$	0.258	0.253	0.282	0.282	0.281	0.275	0.269	0.265	0.255
vol[cm ³]	78.7	78.7	68.3	37.2	37.2	37.2	37.2	37.2	37.2

이와 반대로 인덕터 코어의 부피는 주파수별로 단계적으로 감소하고, 이는 그림 3에서 보인바와 같이 자성체 포화 현상을 고려하여 가용 코어 중 적합한 부피 및 손실을 가진 것으로 선정하여 설계한다. 또한 표 2에서 볼 수 있듯이 인덕터의 손실은 지속적으로 감소하는데, 특히 50kHz미만의 주파수 영역에서는 그 변화가 급격하게 발생한다. 손실계산 결과와 인덕터 부피의 상호 절충점을 고려하면 약 70kHz 부근이 손실이 최소화됨을 알 수 있다. 또한 OBC의 충전 전력의 범위를 만족하기 위해 주파수 가변이 필요하고, 이때 그림 4에서 보인 것처럼 코어의 포화가 발생하지 않는 범위에 만족하여야 한다. 그러므로 손실을 최소화 할 수 있으며 제시한 영역을 만족하는 ZVS가 가능한 공진 주파수는 70kHz 부근이고, 가정한 Q 와 R_L 을 이용하면, 약 75 μ H와 66nF으로 구성된 공진탱크를 설계할 수 있다. 또한 이때 스위칭 주파수는 약 85kHz에서 130kHz의 가변범위를 가질 수 있게 설계가 가능하다.

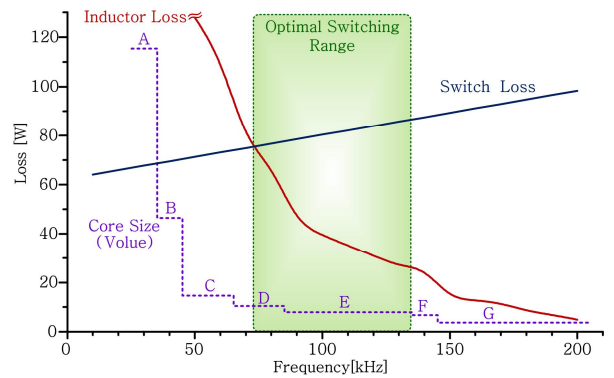


그림 4. 주파수 대비 손실 및 자성소자 부피 변화

4. 결론

본 논문에서는 EVs 내 탑재되어 사용되는 OBC에 적용된 SRC의 최적 공진주파수 설계과정을 보였다. 또한 임의의 주파수 범위에서 손실을 계산하고, 자성소자 사이즈 변화를 분석하여 설계의 타당성을 제시하였다. 제시한 과정에 의한 공진주파수 설계는 기존의 경험에 의존하던 프로세스를 수식적 기반을 가진 수치로 보이는 것이 가능하였다. 또한 설계 시 고려해야 할 사항을 제시하고, 설계과정 및 손실 분석을 통한 검증으로 시스템을 제작함에 있어 최적화된 설계가 가능하다.

참고 문헌

- [1] Y. C. Chuang, Y. L. Ke, "Implementation and Analysis of an Improved Series Loaded Resonant DC DC Converter Operating Above Resonance for Battery Chargers", IEEE Trans. Industry Applications, Vol.45, pp. 1052 1059, 2009, May June.
- [2] 김종수, 최규영, 정혜만, 이병국, 조영진, "전기자동차용 3.3kW 탑재형 배터리 충전기 설계 및 제작", 전력전자학회 논문지, Vol. 15, No. 5, pp. 369 375, 2010.
- [3] R. L. Steigerwald, "A comparison of half bridge resonant converter topologies", IEEE Trans. Power. Electron., Vol. 3, No. 2, pp. 174 182, 1988, April.