두 개의 탱크로 구성된 LLC 공진 컨버터의 설계 및 구현

김주훈, 이광호, 이승민, 김은수†, 이재삼*, 허동영*
전주대학교, LG 이노텍*

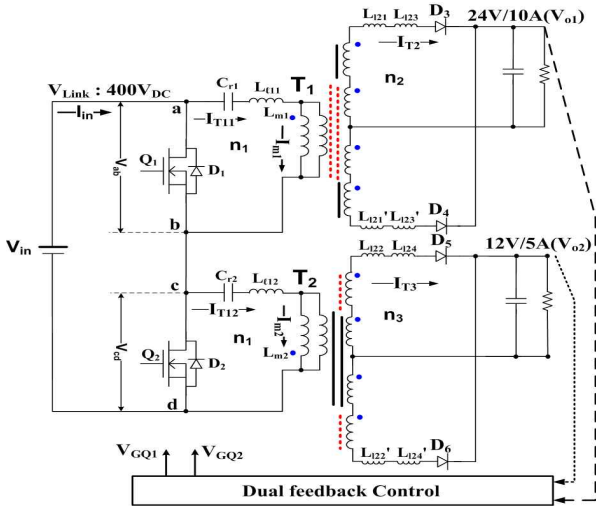
LLC Resonant Converter with Two Resonant Tanks

J. H. Kim, K. H. Lee, S. M Lee, E. S. Kim†, J. S. Lee*, D. Y Huh
JeonJu Univ, LG Innotek*

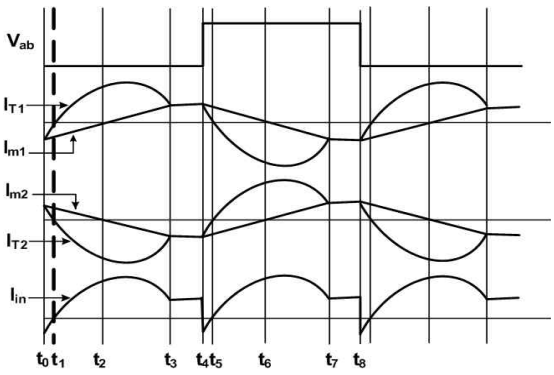
1. 서 론

최근 이슈화 되고 있는 Display 가전기기의 슬림화 추세에 맞춰 이에 대응 할 수 있는 고집적 전원장치개발이 요구되고 있다. 이에 대응하기 위해 본 논문에서는 최근 Display 가전기기의 슬림화 추세에 맞추어 집적화된 전원장치를 위한 회로를 제안하였다. 제안된 컨버터는 고주파 변압기를 두 개로 나누어 집적화에 용이하고, 변압기 간에 독립된 공진 탱크로 구성되어 있으며 두 개의 변압기 2차 측 권선을 각각 교차하여 직렬로 연결하였고, 또한 부하변동에 대해서는 상호 커플링 되어 있어서 24V출력단 전압 및 12V출력단 전압을 큰 차이 없이 용이하게 제어 할 수 있다. 하지만 제안된 컨버터는 결선방법이 1차측은 병렬로 구성되고 2차측은 두 개의 변압기가 상호 교차하여 직렬로 커플링 되어 있기 때문에 정확한 해석방법이 제시하지 않아 정상상태에서의 입출력 이득특성을 이해하기 어렵고, 최적 설계가 쉽지 않은 것이 현실이다.

본 논문에서는 제안된 두 개의 탱크로 구성된 LLC 공진컨버터의 가장 효율적이고 손실을 최소화하여 최적화시키기 위해 제안된 LLC 공진컨버터의 등가 모델을 제시하였고, 변압기 간의 상호 커플링 관계 및 다중 출력부하에 대한 이득특성을 분석하였다. 설계 방법에 따라 24V 출력단 및 12V 출력 단 전압 변동을 최소화 할 수 있는 300W급 시제품을 제작하였으며, 실험결과 24V 출력단과 12V 출력단을 포함하는 다출력 LLC공진 회로의 전압이득특성을 분석하여 본 논문에 서술하였다.



(a) 제안된 컨버터

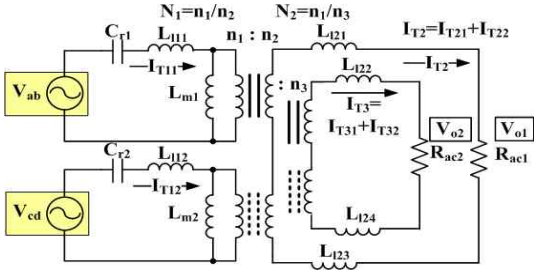


(b) 제안된 컨버터의 각부 파형

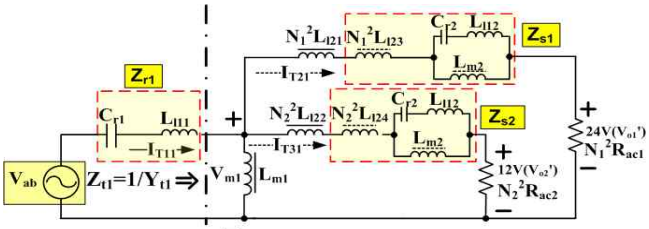
그림. 1 제안된 두 개의 공진회로로 구성된 LLC 공진 컨버터와 각부파형

2. 제안된 LLC 공진 컨버터

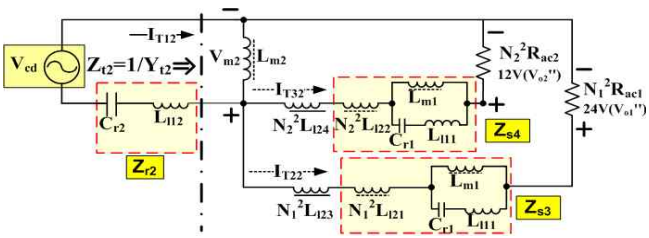
그림 1(a)의 제안된 컨버터는 변압기 T_1과 공진커패시터 C_{r1}로 구성된 공진회로 1과 변압기 T_2와 공진커패시터 C_{r2}로 구성된 공진회로 2로 구성되어 있다. 또한 24V출력단(V_{o1})과 12V 출력단(V_{o2})을 포함하는 다 출력 구조로 되어 있고 결선방법은 1차측은 병렬 구조이고 2차측은 두 개의 변압기가 교차하여 상호 직렬구조로 연결되어 있기 때문에 그림 2(a)와 같이 두 개의 별도의 전압원(V_{ab}, V_{cd})과 24V출력단(V_{o1}), 그리고 12V출력단(V_{o2})을 포함한 회로로 간단하게 나타낼 수 있다. 따라서 그림 2(a)회로를 T형 등가회로로 변환하기 위한 방법으로 중첩의 원리(Superposition Theory)를 적용하였다. 중첩의 원리는 두 개의 별도의 전압원(V_{ab}, V_{cd})을 가지고 있는 제안된 회로를 T형 등가회로로 변환하는 방법으로 전압원1(V_{ab})에 대한 등가회로를 그림 2(b), 전압원2(V_{cd})에 대한 등가회로를 그림 2(c)와 같이 표현할 수 있다.



(a) 제안된 회로의 간단한 등가회로도



(b) 12V 출력단을 포함하는 다출력 구조의 전압원1(V_{ab})에 대한 등가회로



(c) 12V 출력단을 포함하는 다출력 구조의 전압원2(V_{cd})에 대한 등가회로

그림 2. 제안된 컨버터의 등가회로와 중첩의 원리를 적용한 개별 전원 ($V_{ab,}$ V_{cd})에 대한 등가회로

먼저 그림 2(b)의 전압원1(V_{ab})에 대하여 1차측 임피던스 (Z_{r1}) 및 T_1과 T_2의 2차측의 커플링관계 대한 임피던스 관계를 식 (1)과 식 (2)에 나타내었으며, 1차측에서 바라본 출력단의 합성 어드미턴스 성분(Y_{t1})을 식 (3)에 나타내었다. 그리고 각각의 정규화 된 값들을 식 (4)에 나타내었다.

$$Z_{r1} = j\omega L_{m1}\left[A_1 - \frac{1}{\omega^2 L_{m1} C_{r1}}\right] \tag{1}$$

$$Z_{sn} = j\omega L_{m2}\left\{B_{n+2} + \frac{A_2 - \frac{1}{\omega^2 L_{m2} C_{r2}}}{1 + A_2 - \frac{1}{\omega^2 L_{m2} C_{r2}}}\right\} \tag{2}$$

$$Y_{t1} = \frac{1}{Z_{t1}} = \sum_{n=1}^{2}\left\{-j\frac{1}{\omega L_{m1}} + \frac{1}{jN_n^2\omega L_{l2n} + Z_{sn} + N_n^2 R_{acn}}\right\} \tag{3}$$

$$A_n = \frac{L_{l1n}}{L_{mn}}, \quad B_n = \frac{N_n^2 L_{l2n}}{L_{m1}}, \quad B_{n+2} = \frac{N_n^2 L_{l2(n+2)}}{L_{m2}} \tag{4}$$

전압원1(V_{ab}) 대 24V출력단($V_{o1}{}'$)의 전압이득특성식 ($G_{V1} = V_{o1}{}'/V_{ab}$)은 등가회로 그림 2(b)와 식 (1) ~ 식 (4)로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다. 식 (5)의 전압이득특성식 (G_{V1})을 분리해보면 수식 (6)은 자화인덕턴스 전압(V_{m1}) 대 24V출력단($V_{o1}{}'$)의 관계로 전압이득($G_{self1} = V_{o1}{}'/V_{m1}$)에 따라 자기 이득(Self gain: G_{self})성분으로 표현할 수 있다. 또한 식 (7)은 전압원1(V_{ab}) 대 자화인덕턴스 전압(V_{m1})의 관계로 전압이득($G_{cross1} = V_{m1}/V_{ab}$)에 따라 크로스 이득(Cross gain: G_{cross})성분으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} G_{V1} &= \frac{V_{o1}{}'}{V_{ab}} = \frac{1}{N_1}\frac{V_{o1}{}'}{V_{m1}}\frac{V_{m1}}{V_{ab}} \\ &= \frac{1}{N_1}\left(\frac{N_1^2 R_{ac1}}{N_1^2 j\omega L_{l21} + Z_{s1} + N_1^2 R_{ac1}}\right)\left(\frac{1}{Z_{r1}Y_{t1}+1}\right) \\ &= \frac{1}{N_1} G_{self1}\, G_{cross1} \end{aligned} \tag{5}$$

$$G_{self1} = \frac{V_{o1}{}'}{V_{m1}} = \frac{N_1^2 R_{ac1}}{N_1^2 j\omega L_{l21} + Z_{s1} + N_1^2 R_{ac1}} \tag{6}$$

$$G_{cross1} = \frac{V_{m1}}{V_{ab}} = \frac{1}{Z_{r1}Y_{t1}+1} \tag{7}$$

그림 2(c)의 전압원1(V_{cd})에 대하여 1차측 임피던스(Z_{r2}) 및 T_1과 T_2의 2차측의 커플링관계 대한 임피던스 관계를 식 (8)과 식 (9)에 나타내었으며, 1차측에서 바라본 출력단의 합성 어드미턴스 성분(Y_{t2})을 식 (10)에 나타내었다.

$$Z_{r2} = j\omega L_{m2}\left[A_2 - \frac{1}{\omega^2 L_{m2} C_r}\right] \tag{8}$$

$$Z_{s(n+2)} = j\omega L_{m1}\left\{B_n + \frac{A_1 - \frac{1}{\omega^2 L_{m1} C_r}}{1 + A_1 - \frac{1}{\omega^2 L_{m1} C_r}}\right\} \tag{9}$$

$$Y_{t2} = \frac{1}{Z_{t2}} = \sum_{n=1}^{2}\left\{-j\frac{1}{\omega L_{m2}} + \frac{1}{jN_n^2\omega L_{l2(n+2)} + Z_{s(n+2)} + N_n^2 R_{acn}}\right\} \tag{10}$$

전압원2(V_{cd})에 대 24V출력단($V_{o1}{}''$)의 전압이득특성식 ($G_{V2} = V_{o1}{}''/V_{cd}$) 또한 등가회로 그림 2(c)와 식 (8) ~ 식 (10)으로부터 식 (11)와 같이 나타낼 수 있고, 전압이득특성식 (G_{V2})을 분리해서 자기 이득(Self gain: G_{self})성분과 크로스 이득(Cross gain: G_{cross})성분으로 각각 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} G_{V2} &= \frac{V_{o1}{}''}{V_{cd}} = \frac{1}{N_1}\frac{V_{o1}{}''}{V_{m2}}\frac{V_{m2}}{V_{cd}} \\ &= \frac{1}{N_1}\left(\frac{N_1^2 R_{ac1}}{N_1^2 j\omega L_{l23} + Z_{s3} + N_1^2 R_{ac1}}\right)\left(\frac{1}{Z_{r2}Y_{t2}+1}\right) \\ &= \frac{1}{N_1} G_{self2}\, G_{cross2} \end{aligned} \tag{11}$$

$$G_{self2} = \frac{V_{o1}{}''}{V_{m2}} = \frac{N_1^2 R_{ac1}}{N_1^2 j\omega L_{l23} + Z_{s3} + N_1^2 R_{ac1}} \tag{12}$$

$$G_{cross2} = \frac{V_{m2}}{V_{cd}} = \frac{1}{Z_{r2}Y_{t2}+1} \tag{13}$$

따라서 중첩의 원리를 적용한 제안된 컨버터의 최종적인 전압이득특성식은 식 (5)과 식 (11)의 합으로 식 (14)과 같이 나타낼 수 있다.

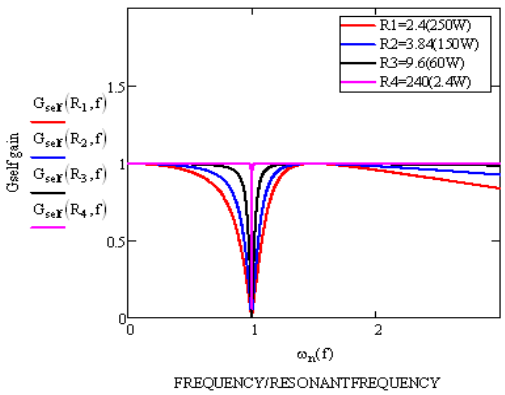
$$G_V = G_{V1} + G_{V2} \tag{14}$$

3. 이득 특성

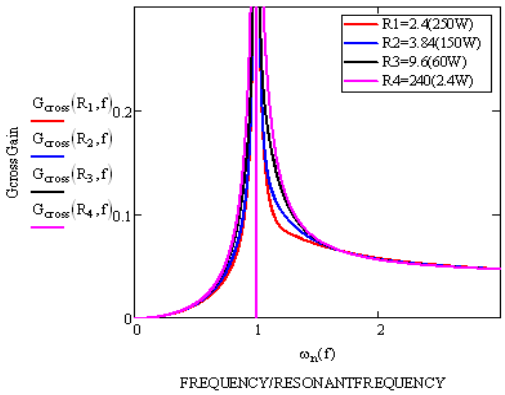
최종적인 전압이득특성식인 식 (14)로부터 공진커패시터(C_{r1}, C_{r2})와 두 개의 변압기(T_1, T_2)가 동일한 조건일 때의 전압이득식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$G_V = 2G_{V1} = 2G_{V2}$$

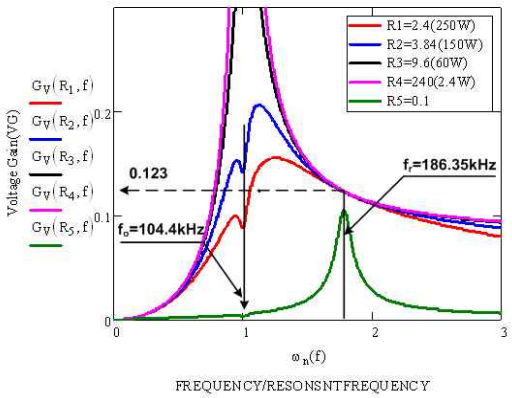
$$G_V = \frac{2}{N_1} G_{self1} G_{cross1} = \frac{2}{N_1} G_{self2} G_{cross2} \quad (15)$$



(a)자기이득특성(Self gain: G_{self})



(b)크로스 이득특성(Cross gain: G_{Cross})



(c) 총 전압 이득특성(G_V)

그림 3. 각 이득 성분에 대한 특성

식 (15)로부터 이득특성을 분석하기 위하여 보조 출력부하인 12V 출력단(V_{o2}) 부하($N_1^2 R_{ac1}$)를 중부하(5A:2.4Ω)로 고정시키고 자기이득(Self gain: G_{self})성분과 크로스 이득(Cross gain: G_{cross})성분으로 그림 3(a)와 그림 3(b)에 나타내었다.

자기이득($G_{self1} = V_{o1}' / V_{m1}$)성분은 주 24V출력단($V_{o1}'$)만을 포함하는 2차측 임피던스($N_1^2 j\omega L_{l21} + Z_{s1}$)와 부하($N_1^2 R_{ac1}$)관계로 나타낼 수 있으며, 2차측 누설인덕턴스($N_1^2 L_{l21}$)와 부하증가에 따라 DC이득에 영향을 미치게 된다. 또한 다른 변압기(T_2)의 커플링관계에 대한 임피던스 관계식(Z_{s1})에 따라 공진점보다 낮은 주파수 지점에서 이득이 감소하는 특성을 보여준다. 크로스 이득($G_{cross1} = V_{m1} / V_{ab}$)성분은 전체 임피던스($Z_{r1} + Z_{t1}$) 대 1차측에서 바라보는 2차측 총 임피던스(Z_{t1})의 관계로 1차측 임피던스(Z_{r1})와 2차측 총 임피던스(Z_{t1})영향에 따라 공진특성이 변화하게 된다.

그림 3(c)는 두 개의 변압기(T_1, T_2)가 동일한 조건일 때의 식 (15)로부터 전압이득특성(G_V)은 자기이득(Self gain: G_{self})과 크로스 이득(Cross gain: G_{cross})의 곱으로 나타낼 수 있다.

표 1 측정된 변압기 파라미터

	제안된 컨버터의 파라미터(24V출력단)			
	변압기 T_1		변압기 T_2	
1차측누설인덕턴스	L_{l11}	55.41uH	L_{l12}	57.71uH
2차측누설인덕턴스	L_{l21}	0.32uH	L_{l22}	0.32uH
자화인덕턴스	L_{m1}	472.4uH	L_{m2}	469.5uH
등가누설인덕턴스	L_{eq1}	166.28uH	L_{eq2}	168.3uH
$N_1(n_1/n_2)$		43/2		43/2
적용코아	코아: EFD3244H, 계열: PM12 높이: 5.1mm, 길이: 44mm, 폭: 31.8mm			

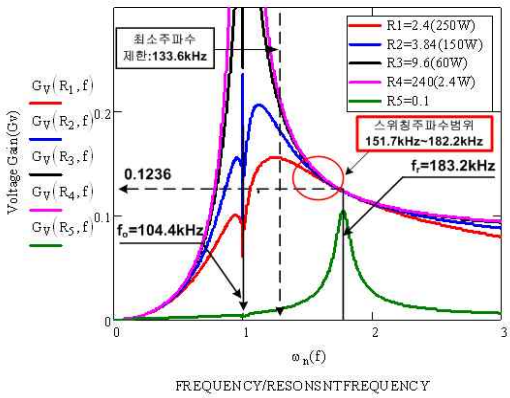


그림 4. 최종적인 전압이득특성(G_V)

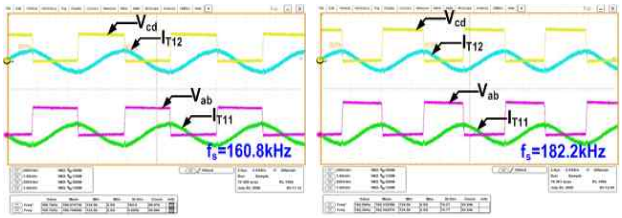
표 1의 측정된 두 개의 변압기(T_1, T_2) 파라미터를 적용하여 보조 출력부하인 12V출력단(V_{o2}) 부하($N_2^2 R_{ac2}$)를 중부하(5A:2.4Ω)로 고정시키고 주 24V 출력단(V_{o1}) 부하변화에 대하여 최종적인 전압이득특성(G_V) 성분을 그림 4에 나타내었다. 이득특성곡선에 따라 전압이득특성(G_V)에서 발생되는 Peaking은 두 개의 변압기(T_1, T_2)파라미터가 동일한 조건일 때보다 다른 조건일 때 증가되는 것을 확인 할 수 있었다.

4. 실험 결과

본 논문에서는 300W 정격출력용량을 갖는 제안된 LLC 공진 컨버터에 8mm슬림화된 변압기를 적용하여 입력전압 340V~400V조건에서 최대정격출력용량 12V/5A, 24V/10A 에 대해 각각 실험 하였다. 그리고 적용된 그림 2(a)의 제안된 컨버터의 실험 조건과 주요 정격에 대해 표 2에 나타내었다.

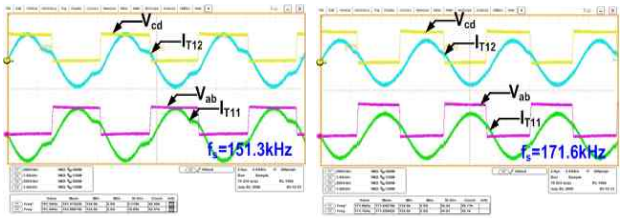
표 2 제안된 LLC 공진 컨버터 주요 정격

	제안된 컨버터
입력 전압(V_{in})	340~400V
출력전압 및 전류	12V/5A, 24V/10A
출력 용량(P_o)	300W
스위칭주파수(f_s)	151.3kHz~183.2kHz
공진 커패시터(C_r)	4.4nF
입력/출력 커패시터(C_{in}/C_f)	68uFx2(450V), 1000uF(35V)
스위칭 소자(Q_1, Q_2)	P9NK50ZFP 500V, 7.2A
출력전류 다이오드(D_3~D_6)	FCQ20B06 60V, 20A



(a) V_{in}=340V일 때 (b) V_{in}=400V일 때

그림 5 12V/0.05A, 24V/0.8A일 때 입력전압(V_{in}:340, 400V)변화에 대한 1차측 단자전압/전류 측정파형(200V/Div.,1A/Div., 2us/Div.)



(a) V_{in}=340V일 때 (b) V_{in}=400V일 때

그림 6 12V/5A, 24V/10A일 때 입력전압(V_{in}:340, 400V)변화에 대한 1차측 단자전압/전류 측정파형(200V/Div.,1A/Div., 2us/Div.)

그림 5와 그림 6는 그림 2(a)의 제안된 컨버터의 실험파형으로 입력전압(V_{in}:340, 400V) 변화에 대하여 12V 출력단과 24V 출력단이 서로 경부하(12V/0.05A, 24V0.8A)일 때와 최대정격부하(12V/5A, 24V/10A)일 때의 각각의 1차측 단자 전압(V_{ab}, V_{cd})과 전류(I_{T11}, I_{T12})를 측정한 파형이다. 실험결과 그림 4의 전압이득특성(G_V)과 비교하여 입력전압(V_{in}:340, 400V) 변화 및 부하변화에 대해 이득특성이 일치하는 것을 확인 하였다. 또한 공진회로1의 T_1과 공진회로2의 T_2의 변압기의 2차 측 권선을 교차하여 상호 직렬로 결선함으로써 전류 불평형문제가 나타나지 않음을 알 수 있었고, 모든 부하조건에서 단자 전류(I_{T11}, I_{T12})는 단자전압(V_{ab}, V_{cd})에 대해 항상 지상전류가 흐르기 때문에 스위칭 소자는 최대정격부하(12V/5A, 24V/10A)에서도 항상 ZVS (Zero Voltage Switching)동작됨을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

본 논문에서는 제안된 두 개의 탱크로 구성된 LLC 공진컨버터의 가장 효율적이고 손실을 최소화하여 최적화시키기 위해 제안된 LLC 공진컨버터의 등가 모델을 제시하였고, 두 개의 변압기간의 상호 커플링 관계 및 다중 출력부하에 대한 이득특성을 분석하였다. 설계 방법에 따라 12V 출력단 및 24V 출력단 전압변동을 최소화 할 수 있는 300W급 시제품을 제작하였으며, 실험결과 제안된 컨버터에 대한 전압이득특성식의 시뮬레이션을 비교 분석을 통해 실험과 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

이 논문은 LG 이노텍(주)와 전주대 산학협력 연구과제의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

[1] 김주훈, 강성인, 김은수, 전용석, 이재삼, 허동영, “두 개의 변압기와 공진탱크로 구성된 LLC 공진 컨버터,” 전력전자학회 논문지 제 14권 제 5호, 2009. 10, pp. 406-414.

[2] 이재삼, 박준호, 허동영, 강성인, 김주훈, 김은수, “ 다중 출력 LLC 직렬 공진 컨버터의 이득 특성 연구,” 전력전자학회 논문지 제 14권 제 3호, 2009. 6, pp 177-187.

[3] B.Yang, F. C. Lee, A. J. Zhang and G. Huang, "LLC resonant converter for front end DC/DC conversion," IEEE APEC'02, Vol.2, pp. 1108-1112, 2002.

[4] Y. Gu, L. Hang, U. Chen, Z. Lu, Z. Qiann and J. Li, "A simple structure of LLC resonant DC-DC converter for multi-output applications," IEEE APEC'05, Vol. 3, pp. 1485-1490, 2005.