

통합된 PFC 인덕터와 LLC 공진변압기 적용 PSU

노영재*, 권주일*, 김은수*, 원종섭*, 김동희**, 이영수**
 전주대학교*, LG이노텍(주)**

PSU Using The PFC Inductor and LLC Resonant Transformer with An Integrated Magnetic Core

Y.J Noh*, J.I Kwon*, E.S Kim*, J.S Won*, D.H Kim**, Y.S Lee**
 JeonJu University*, LG Innotek**

1. 서론

최근 평면 디스플레이의 기술이 발전하면서 디스플레이 장치들이 대형화 되어 가고 있다. 컬러 TV의 경우 제품의 크기 및 무게저감, 높은 전력밀도와 효율 특성 등을 요구하고 있으며 해를 거듭할수록 치열한 가격 경쟁으로 인한 저가격화를 가장 중요시 하고 있다.[1] 이러한 추세에 따라서 높은 전력밀도 및 부품 단가를 저감시키기 위한 방안으로 입력 역률 개선을 위한 PFC 컨버터에 적용된 인덕터와 LLC 공진 컨버터에 적용된 변압기를 하나의 코어로 통합한 변압기에 대해 서술하고자 한다. 42인치 LED TV전원회로를 목표로 PFC 인덕터와 LLC 공진 변압기에 적용된 각각의 트랜스포머를 하나의 트랜스포머로 통합함으로써 비용저감과 경량화를 가능하게 하였다. 이때 PFC단과 LLC단이 서로 결합되어 상호 간섭 커플링에 의한 발진문제가 발생할 수 있는데 이러한 문제를 해결하기 위해 Maxwell 3D S/W를 이용한 시뮬레이션을 통해 상호간섭에 의한 자속변화 관찰 결합계수를 추출 하였으며 자기 모델링을 통해 추출된 커플링 값을 비교하여 PFC단과 LLC단의 커플링값을 최소화 시켜 상호분리 되도록 하였으며 이를 통해 제작된 변압기를 42인치용 120W LED TV PSU에 적용하여 실험 결과를 바탕으로 적용가능성을 검증하였다.

2. 제안된 통합변압기 구조 및 형상

그림 1은 제안된 통합변압기의 구조이다. 제안된 통합변압기는 E자형 코어 2개와 I자 코어 1개로 구성되어 있으며 PFC 인덕터단과 LLC 공진변압기단을 하나로 통합한 것이 특징이다. 또한 제안된 통합변압기의 중간자로의 I자형 코어는 PFC 인덕터와 LLC공진변압기에서 생성된 자속이 같이 통과하는 부분으로써 면적을 외각자로의 2배로 하여 자속밀도가 높아져 코어손실이 증가하는 경우를 방지하고자 하였다. PFC단은 그림 1에 나타낸 바와 같이 PFC단의 중간자로면적(A_{e1})을 둘러싸여 권선되며 LLC단은 변압기단의 중간자로(A_{e2})에 권선 된다. 이때 그림2와 같이 공극의 적용방법에 따라 상호간섭으로 인한 결합계수가 커질 수 있으며 서로간의 자기적인 결합에 의해 영향을 받게 되고 이러한 이유로 불안정한 동작 특성을 갖게 된다. PFC 인덕터단과 LLC공진 변압기단의 자기적인 결합은 제안된 통합변압기의 설계 및 동작에 중요한 요소를 갖게 된다.

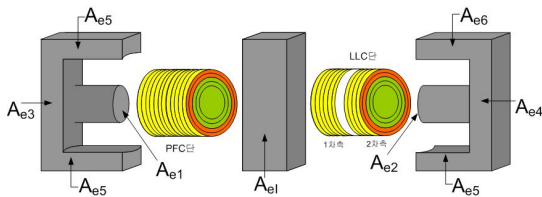
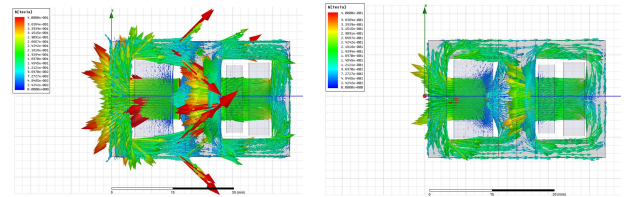


그림 1. 제안된 통합 변압기



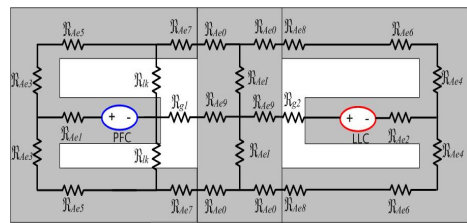
(a)Side Gap적용시 (b)Center Gap적용시
 그림 2. 제안된 통합 변압기 Maxwell 3D 시뮬레이션

3. 제안된 통합변압기 설계

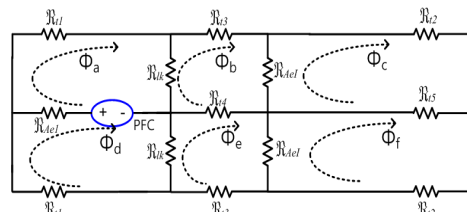
3.1 제안된 통합변압기의 모델링

제안된 통합변압기의 PFC 인덕터단과 LLC공진변압기단의 결합계수를 알기위해 그림 3(a)와 같이 제안된 통합변압기의 등가 릴럭턴스 회로를 나타내었다.[2] 식(1)과 같이 제안된 통합변압기의 등가 릴럭턴스를 적용하였으며 R_{Ae1}~R_{Ae8}는 E자 코어의 자로에 대한 자기 릴럭턴스이며 R_{Ae0}, R_{Ae9}, R_{AeI} I자 코어의 자로에 대한 자기 릴럭턴스, R_{g1},R_{g2}는 인덕터단과 변압기 단 공극에 대한 자기 릴럭턴스이다.

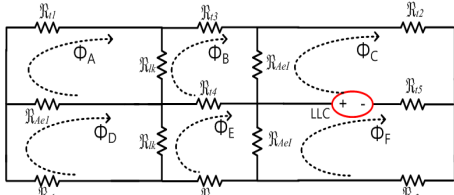
$$\begin{aligned}
 R_{Ae1} &= \frac{l_1}{\mu_r \mu_0 A_1}, R_{Ae2} = \frac{l_2}{\mu_r \mu_0 A_2}, R_{Ae3} = \frac{l_3}{\mu_r \mu_0 A_3}, R_{Ae4} = \frac{l_4}{\mu_r \mu_0 A_4} \\
 R_{Ae5} &= \frac{l_5}{\mu_r \mu_0 A_5}, R_{Ae6} = \frac{l_6}{\mu_r \mu_0 A_6}, R_{Ae7} = \frac{l_7}{\mu_r \mu_0 A_7}, R_{Ae8} = \frac{l_8}{\mu_r \mu_0 A_8} \\
 R_{lk} &= \frac{l_{lk}}{\mu_0 \cdot A_{lk}}, R_{AeI} = \frac{l_I}{\mu_r \mu_0 A_I}, R_{Ae0} = \frac{l_o}{\mu_r \mu_0 A_o}, R_{Ae9} = \frac{l_9}{\mu_r \mu_0 A_9} \\
 R_{g1} &= \frac{l_{g1}}{\mu_0 \cdot A_{g1}}, R_{g2} = \frac{l_{g2}}{\mu_0 \cdot A_{g2}}
 \end{aligned} \quad (1)$$



(a)제안된 통합변압기 등가 릴럭턴스



(b)PFC단 전원만 고려한 간략화된 등가 릴럭턴스



(c) LLC단 전원만 고려한 간략화된 등가 밀력턴스

그림 3. 인덕터단과 변압기단이 결합된 통합변압기 등가회로

그림 3(a)의 등가밀력턴스를 식(2)를 사용하여 그림 3(b),(c)와 같이 간략화하게 표현할 수 있다. 각 루프에서 발생하는 자속을 구하기 위해 망전류방법을 사용하여 식(3)과 (5)와 같이 표현이 가능하며 PFC인덕터단과 LLC공진변압기단의 결합계수는 식(4)와 (6)을 통해 식(7)과 같이 결합계수를 구할 수 있다.

$$R_1 = R_{Ae3} + R_{Ae5}, R_2 = R_{Ae4} + R_{Ae6} + R_{Ae0}$$

$$R_3 = R_{Ae7} + R_{Ae0}, R_4 = R_{y1} + R_{Ae8}$$

$$R_5 = R_{Ae8} + R_{y2} + R_{Ae2} \quad (2)$$

$$\begin{pmatrix} \phi_A \\ \phi_B \\ \phi_C \\ \phi_D \\ \phi_E \\ \phi_F \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R_1 + R_2 + R_{L1} & -R_2 & 0 & -R_{L1} & 0 & 0 \\ -R_2 & R_2 + R_3 + R_{L1} + R_4 & -R_{L1} & 0 & -R_4 & 0 \\ 0 & -R_{L1} & R_2 + R_3 + R_5 & 0 & 0 & -R_5 \\ -R_{L1} & 0 & 0 & R_{L1} + R_2 + R_4 & -R_2 & 0 \\ 0 & -R_4 & 0 & -R_2 & R_2 + R_3 + R_{L1} + R_4 & -R_{L1} \\ 0 & 0 & -R_5 & 0 & -R_{L1} & R_5 + R_{L1} + R_2 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} N_1 I_1 \\ 0 \\ 0 \\ -N_1 I_1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

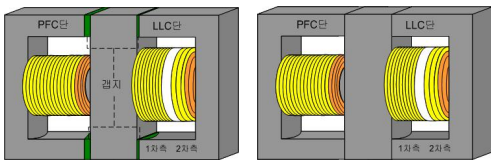
$$k_1 = \frac{\phi_c - \phi_f}{\phi_a - \phi_d} \quad (4)$$

$$\begin{pmatrix} \phi_A \\ \phi_B \\ \phi_C \\ \phi_D \\ \phi_E \\ \phi_F \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R_1 + R_2 + R_{L1} & -R_2 & 0 & -R_{L1} & 0 & 0 \\ -R_2 & R_2 + R_3 + R_{L1} + R_4 & -R_{L1} & 0 & -R_4 & 0 \\ 0 & -R_{L1} & R_2 + R_3 + R_5 & 0 & 0 & -R_5 \\ -R_{L1} & 0 & 0 & R_{L1} + R_2 + R_4 & -R_2 & 0 \\ 0 & -R_4 & 0 & -R_2 & R_2 + R_3 + R_{L1} + R_4 & -R_{L1} \\ 0 & 0 & -R_5 & 0 & -R_{L1} & R_5 + R_{L1} + R_2 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ N_2 I_2 \\ 0 \\ 0 \\ -N_2 I_2 \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$k_2 = \frac{\phi_A - \phi_D}{\phi_C - \phi_F} \quad (6)$$

$$k = \sqrt{k_1 \cdot k_2} \quad (7)$$

표 1은 Maxwell3D 시뮬레이션과 임피던스분석기(PSMI735), 자기모델링을 통해 결합계수(k)를 추출한 값이다. 세 가지 방법을 통해 결합계수(k)를 추출하여 공극을 적용하는 방법에 따른 PFC 인덕터단과 LLC공진변압기단의 상호 커플링관계를 알아보고자 했으며 그림 4(a)와 같이 Side Gap을 적용하여 통합변압기 제작시의 결합계수가 그림 4(b)와 같이 Center Gap을 적용하여 통합변압기를 제작할 경우보다 더 높게 나타난다는 것을 알 수 있다. 그러므로 상호간섭을 최소화 시키기 위해서는 그림 4(b)와 같이 Center Gap을 적용하여 통합 변압기를 제작함으로써 안정된 동작특성을 갖도록 하여야한다.



(a) Side Gap 적용 통합변압기 (b) Center Gap 적용 통합변압기
그림 4. 공극에 따른 통합변압기

표. 1 결합계수(k) 추출

	Side gap 적용 통합변압기	Center gap 적용 통합변압기
측정값	0.053187	0.001992
시뮬레이션 값	0.039548	0.001501
자기모델링	0.007026	0.003202

3. 실험결과

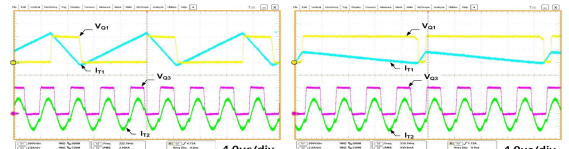
본 논문에서 120W 정격출력용량을 갖는 PFC 인덕터와 LLC 공진변압기를 하나의 코어로 통합한 변압기를 제작하여 입력전

압 90V_{AC}~264V_{AC} 조건에서 최대 정격 출력용량 24V/4A, 12V/2A (120W)에 대해 각각 실험 하였다. 표 2는 측정된 변압기 파라미터이다.

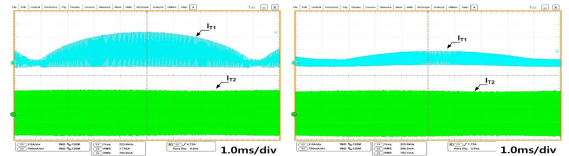
표. 2 측정된 변압기 파라미터

LLC 공진 컨버터	1차측자기인덕턴스	L_p	467.7uH	467.7uH
	2차측자기인덕턴스	L_s	6.623uH	1.762uH
	등가누설인덕턴스	L_{eq}	59.59uH	87.70uH
PFC	$N(N_1/N_2)$		9(36/4)	18(36/2)
	인덕턴스	L	245.4uH	
	턴수	N	53T	
적용된 공극 방법		Center Gap		
적용코어		EER28L-Z (PC47계열)		

그림 5는 입력전압 90V_{AC}, 120V_{AC} 출력용량 120W 조건에서 제안된 통합변압기를 사용하여 실험한 파형이다. 실험결과 제안된 통합 변압기 사용시 PFC단과 LLC단과의 상호 간섭 없는 안정된 동작특성을 볼 수 있다.

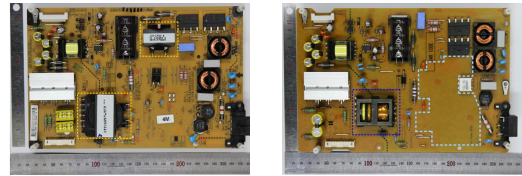


(a) 입력 90V_{AC}, 출력용량 120W (b) 입력 264V_{AC}, 출력용량 120W
(Ch1:200V/div., Ch2:2A/div., Ch3:200V/div., Ch4:1A/div.)



(c) 입력 90V_{AC}, 출력용량 120W (d) 입력 264V_{AC}, 출력용량 120W
(Ch2:2A/div., Ch4:700mA/div.)

그림 5. 하나의 코어로 통합된 변압기 적용시 주요파형



(a) 기존의 변압기가 적용된 보드 (b) 통합 변압기가 적용된 보드
그림 6. 42인치 LED TV PSU 보드 비교 사진

4. 결론

본 논문에서는 파라미터 측정, Maxwell 3D 시뮬레이션, 자기모델링을 통해 통합변압기의 결합계수를 추출하여 비교하였으며, Center gap 공극을 적용함으로써 상호커플링이 최소화된 안정된 동작이 가능한 통합변압기를 제작 및 실험을 통해 120W LED TV PSU에 적용 가능함을 보였다. PFC 인덕터와 LLC 공진 변압기를 하나의 코어로 집적화함으로써 PSU 경량화 및 20%의 전력밀도 (Power density) 향상, 단가(Cost) 측면에서 저감효과를 가졌다.

이 논문은 LG이노텍(주) 산학협력연구과제의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

참고문헌

- [1] Siyang Zhao, Junming Zhang, Yang Shi, "A Low Cost Low Power Flyback Converter With a Simple Transformer" IPCEC 2012 7th International, vol2, pp.1336 1342, 2012
- [2] Robert W. Erickson, Dragan Maksimovic, "Fundamentals of power electronics," pp.498 505 University of Colorado Boulder, Colorado