

Loosely-Coupled-Resonant Dual-Active-Bridge Converter의 코일 최적 설계

김현섭, 이재홍, 이승환
전자전기컴퓨터공학부, 서울시립대학교

Optimal Coil Design Method for a Loosely-Coupled-Resonant Dual-Active-Bridge Converter

Hyunseob Kim, Jaehong Lee, Seung-Hwan Lee
School of Electrical and Computer Engineering, University of Seoul

ABSTRACT

본 논문에서는 무선 전력 전송(Inductive Power Transfer) 코일을 이용한 Loosely-Coupled-Resonant Dual-Active-Bridge (LCR-DAB) 컨버터의 최대 효율을 갖는 코일 최적화 설계를 제안한다. 일반적으로 강한 자기 결합 계수(k)를 갖는 코일 시스템이 높은 효율을 갖는 것과는 달리, 제한한 시스템은 임피던스 특성과 전류의 고조파로 인해 큰 손실이 발생할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 효율과 k의 연관성을 분석하여, 최대 효율을 갖는 k에서 최적 코일을 설계한다.

1. 서론

무선 전력 전송은 케이블을 사용하지 않아 물리적으로 분리가 가능하기에 패키징이 쉽고, 기존의 고주파 변압기가 달성하기 어려운 중전압(~25 kV)에서의 절연을 해결할 수 있다는 장점이 있다^[1]. 하지만, 물리적으로 분리되어 있는 만큼, 낮은 자기 결합 계수(k)를 갖게 되는데, 이는 무선 전력 전송에 있어 낮은 효율을 갖게 된다. 이를 해결하고자 공진 캐패시터를 사용해 높은 효율을 달성할 수 있다^[2]. 본 논문은 그림 1처럼 무선 전력 전송 코일과 직렬-직렬 공진 회로를 구성한 Loosely-Coupled-Resonant Dual-Active-Bridge (LCR-DAB) 컨버터를 제시한다. 일반적으로 무선 전력 전송 시스템은 강한 자기 결합계수를 갖을 때 높은 효율을 달성할 수 있다. 하지만, 본 논문에서 제시한 LCR-DAB 컨버터에서는 자기 결합 계수와 효율은 비례하지 않는다. 따라서 본 논문에서는 LCR-DAB의 임피던스와 기본파와 고조파 전류를 분석하여 효율과 k와의 관계를 분석하였다. 이를 통해 최대 효율을 갖는 코일 설계를 제시한다.

2. LCR-DAB의 임피던스 분석

그림 2는 LCR-DAB의 등가 회로를 나타낸다. $V_{p1,3,5,7\dots}$ 와 $V_{s1,3,5,7\dots}$ 는 각각 기본파와 고조파가 포함된 1차측과 2차측 전압 전류이다. θ 는 위상 변이 각이다. L_p, L_s 와 M 은 1차측, 2차측의 자기 인덕턴스와 상호 인덕턴스다. C_p, C_s 는 1차측, 2차측의 보상 커패시터이다. R_p, R_s 는 1차측, 2차측 코일의 기생 저항이다. Z_{inp}, Z_{ins} 는 1차측, 2차측 전압원에서 본 입력 임피던스를 의미한다. 본 논문에서 LCR-DAB는 1차측, 2차측이 대칭적인 파라미터를 갖는다 ($V_p = V_s, L_p = L_s$). 튜닝 주파수(f_{ro})는 60 kHz로 설계하였다. 중첩의 원리를 이용해 기본파와 고조파를 고려한 입력 임피던스를 식 (1), (2)와 같이

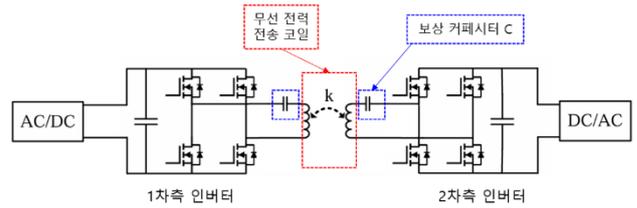


그림1 무선 전력 전송 코일을 이용한 LCR-DAB 컨버터
Fig.1 LCR-DAB converter with loosely coupled coils.

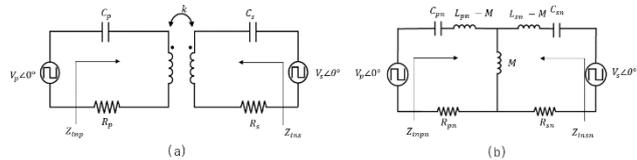


그림2 (a) LCR-DAB 등가 회로
그림2 (b) 기본파와 고조파를 포함한 LCR-DAB의 T등가 모델
Fig.2 (a) Equivalent circuit of LCR-DAB.
(b) T-model with fundamental and harmonics of LCR-DAB.

표현할 수 있다.

$$Z_{inp}(n\omega_o) = \frac{V_{pn}\angle 0}{\frac{Z_{sn}V_{pn}\angle 0 - Z_{mn}V_{sn}\angle n\theta}{Z_{pn}Z_{sn} - Z_{mn}^2}} \quad (1)$$

$$Z_{ins}(n\omega_o) = \frac{V_{sn}\angle n\theta}{\frac{Z_{pn}V_{sn}\angle n\theta - Z_{mn}V_{pn}\angle 0}{Z_{pn}Z_{sn} - Z_{mn}^2}} \quad (2)$$

$n=1,3,5\dots$ 은 홀수를 나타내고, ω_o 는 동작 지점의 각주파수이다. $Z_{pn} = jn\omega_o L_p + \frac{1}{jn\omega_o C_p} + R_p$, $Z_{sn} = jn\omega_o L_s + \frac{1}{jn\omega_o C_s} + R_s$, $Z_{mn} = jn\omega_o M$ 은 각각 기본파와 n고조파에서의 1차측, 2차측 공진 회로와 상호 인덕턴스의 임피던스를 나타낸다.

2.1 절 LCR-DAB의 전류의 크기와 위상

LCR-DAB의 기본파와 고조파를 고려한 전류의 크기와 위상은 다음과 같이 식, (3)로 나타낼 수 있다.^[3]

$$I_{pn} = \frac{V_p\angle 0}{Z_{inp}(n\omega_o)}, I_{sn} = \frac{V_s\angle n\theta}{Z_{ins}(n\omega_o)} \quad (3)$$

V_{dc} 는 LCR-DAB의 dc-link 전압이다. $\alpha = \frac{f}{f_{ro}}$ 는 동작 주파수와 튜닝 주파수의 비를 나타낸다. ω_{ro} 는 튜닝 각주파수를 나타낸다. 식 (3)에서 나타낸 것처럼 k는 전류 크기와 위상에 관련되어 있다는 것을 알 수 있다.

식 (3)을 이용하여 LCR-DAB의 전류의 기본파와

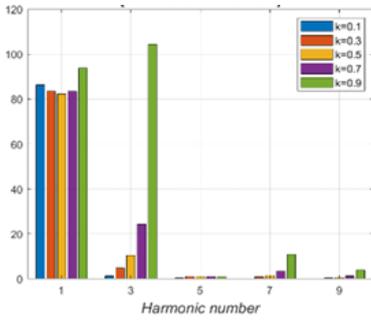


그림 3 LCR-DAB 위상 변이 각이 72° 일 때 k에 대한 전류의 크기
Fig. 3 LCR-DAB current as the phase-shift angle is 72°.

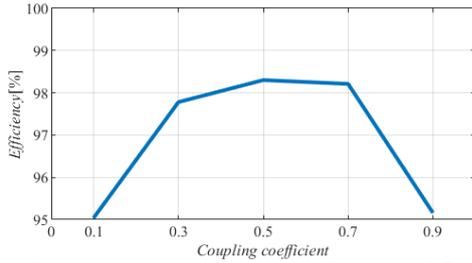


그림 4 LCR-DAB 위상 변이 각이 72°일 때 k에 따른 효율 지점
Fig. 4 Efficiency with different k values as the phase-shift angle is 72.

고조파의 계산 결과가 그림 3에 있다. k가 증가함에 따라 고조파의 비율이 커지는 것을 알 수 있다.

2.2 절 LCR-DAB 효율

LCR-DAB의 효율은 식(5)으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\text{효율} = \frac{P_o}{\text{스위치 손실} + R_p I_n^2 + R_s I_n^2 + P_o} \quad (4)$$

스위치 손실을 스위치가 도통할 때 발생하는 손실(도통 손실)과 스위치를 켜다 켜다 반복할 때 생기는 손실(스위칭 손실)로 나타낼 수 있다. $R_p I_n^2$, $R_s I_n^2$ 는 코일 내에 존재하는 기생 저항에 대한 손실이다. P_o 는 출력 전력이다. 식 (4)을 이용하여 그림 5와 같이 k에 따른 LCR-DAB의 효율을 계산하였다. LCR-DAB는 k = 0.5일 때 최고 효율 98.3%를 달성하게 된다.

표 1 k = 0.5일 때의 LCR-DAB의 파라미터

Table 1 LCR-DAB parameter in k = 0.5

airgap	3 [cm]	Core loss	460 [W]
V_p	900 [V_{rms}]	V_s	900 [V_{rms}]
M	20 [μH]	K	0.5
L_p	40 [μH]	L_s	40 [μH]
C_p	170 [nF]	C_s	170 [nF]
R_p	30 [$m\Omega$]	R_s	30 [$m\Omega$]
Q_p	1000	Q_s	1000
θ	72 [°]	f_o	64 [kHz]

3. IPT 코일 형상 설계

본 논문에서 제시한 LCR-DAB의 최대 효율 지점에서의 파라미터(k = 0.5, η = 98.3%)를 기준으로 코일을 설계하였다.

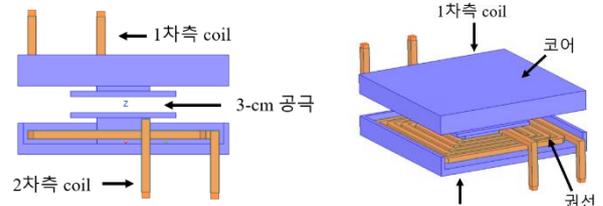


그림 5 LCR-DAB 컨버터의 I-core type IPT 코일
(a) 정면 (b) 측면
Fig 5 I-core type IPT coils for LCR-DAB converter
(a) front view (b) side view

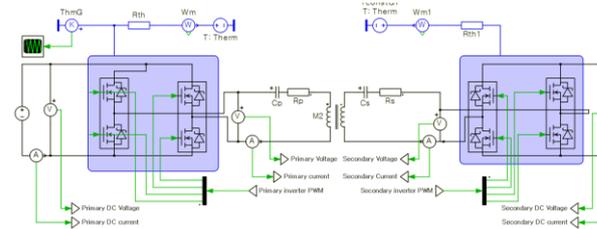


그림 6 LCR-DAB의 Plecs 시뮬레이션 모델
Fig. 6 Plecs simulation model of LCR-DAB

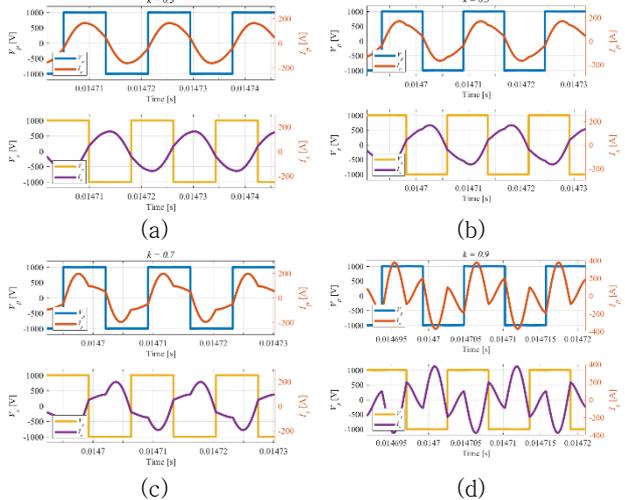


그림 7 k값에 따른 LCR-DAB의 1차측 2차측 전압 전류 파형
(a) k=0.3, (b) k=0.5, (c) k=0.7, (d) k=0.9.

Fig. 7 Voltages and currents of the primary- and secondary-sides of the LCR-DAB with different coupling coefficient.

(a) k=0.3, (b) k=0.5, (c) k=0.7, (d) k=0.9.

코어의 형상은 finite-element analysis (FEA) software로 ANSYS HFSS와 MAXWELL로 그림 5과 같이 구성하였다. 증전압에서의 높은 절연 성능을 위해 코일간 공극(airgap)은 30 mm로 설계하였고, 코어는 ferrite core를 이용한 I-core type으로 선택하였다. 코일은 Litz wire로 코어의 중단 부분에 spiral 방식으로 감았다. 설계한 IPT coil을 ANSYS 시뮬레이션을 통해 얻은 파라미터를 표1에 나타냈다.^[2]

4. 시뮬레이션

그림 7에는 LCR-DAB의 Plecs 시뮬레이션 모델이 있다. 그림 8에는 k에 대한 LCR-DAB의 1, 2 차측 전압 전류가 있다. k가 증가함에 따라 고조파가 증가하는 것을 알 수 있다. 고조파가 증가하면, 도통 및 스위칭 손실이 증가하기 때문에 코일 설계에 있어 적절한 k 선정이 중요하다.

5. 결 론

본 논문에서는 LCR-DAB에서 효율과 k 의 관계를 보였다. 일반적으로 자기 결합 계수와 효율은 비례관계를 갖는 것과는 달리 LCR-DAB의 고조파 특성을 고려하여 코일을 설계해야 한다. LCR-DAB 컨버터는 $k = 0.5$ 일 때 최대 효율(98.3%)를 달성하였다.

이 논문은 2024년도 산업통상자원부 및 한국산업기술진흥원의 “차세대시스템반도체설계전문인력양성사업”으로 지원 받아 수행된 연구 결과임(P0017011, 차세대 시스템반도체 설계 전문인력양성사업)

참 고 문 헌

- [1] H. Fan and H. Li, "High-Frequency Transformer Isolated Bidirectional DC-DC Converter Modules With High Efficiency Over Wide Load Range for 20 kVA Solid-State Transformer," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 26, no. 12, pp. 3599-3608, Dec. 2011
- [2] J. Lee, J. Roh, M. Y. Kim, S. -H. Baek, S. Kim and S. -H. Lee, "A Novel Solid-State Transformer With Loosely Coupled Resonant Dual-Active-Bridge Converters," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 58, no. 1, pp. 709-719, Jan.-Feb. 2022
- [3] J. Lee, H. Kim, D. Kim, K. Cui, S. Kim and S. -H. Lee, "Efficient and Parameter Robust Phase-Shift-Modulation Strategy for LCR-DAB Converter," *2023 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Nashville, TN, USA, 2023, pp. 899-904