

무선전력전송 시스템의 LCCL-S 토폴로지 입력 전류 고조파 분석

변중은, 김민국, 주동명, 이병국[†]
 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과

LCCL-S Topology Input Current Harmonics Analysis of Wireless Power Transfer System

Jongun Byeon, Min-Kook Kim, Dong-Myoung Joo, and Byoung Kuk Lee[†]
 Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University

ABSTRACT

본 논문에서는 LCCL-S 토폴로지를 가지는 무선전력전송 시스템에서 부하 및 결합계수에 따른 입력 전류 고조파를 분석한다. 분석한 입력전류의 고조파를 통하여 스위칭 손실 및 도통 손실을 예측한다. 고조파 해석의 타당성을 검증하기 위해 PSIM 시뮬레이션 및 실험을 수행한다.

1. 서론

무선전력전송 시스템은 효율적인 전력 전달을 위해서 커패시터를 통한 공진 네트워크 구성이 필수적이다. 공진 네트워크는 보상 커패시터의 위치에 따라 SS, SP, PS, PP, LCL 등 다양한 구성이 가능하다^[1]. 특히 LCCL-S 토폴로지는 정전압 출력과 Bifurcation에 강인한 특성을 가지고, Zero phase angle (ZPA) 주파수가 결합 계수 및 부하 변화에 덜 민감해야 하는 어플리케이션에 많이 사용되고 있다^[2]. 하지만 1차측에 LCL 구성을 가지는 공진 네트워크는 입력 인덕턴스 (L_{in})로 인해 입력 전류에 고조파 성분이 포함되어 추가적인 스위칭 손실 및 도통 손실을 초래한다. 따라서 시스템 설계 시 고조파 성분에 의한 영향을 반영하기 위해 입력전류 고조파 분석이 필요하다.

본 논문에서는 푸리에 분석을 통하여 무선전력전송 시스템의 LCCL-S 토폴로지 입력 전류 고조파를 분석한다. 고조파 분석을 통하여 LCCL-S 토폴로지의 입력 전류 파형을 예측하고 스위칭 손실 및 도통 손실을 도출한다. 같은 정전압 특성을 가지는 SP 토폴로지의 스위칭 및 도통 손실과 비교 분석하고, 시뮬레이션 및 실험을 통해 타당성을 검증한다.

2. LCCL-S 토폴로지 입력 전류 고조파 분석

2.1 시스템 구성

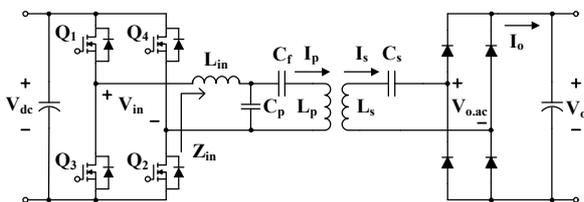


그림 1 LCCL-S 토폴로지 회로도
 Fig. 1 Circuit of LCCL-S Topology.

무선전력전송 시스템의 LCCL-S 토폴로지 구성은 그림 1과 같으며 풀브릿지 컨버터, 공진 네트워크 및 다이오드 정류기로 구성되어 있다.

2.2 고조파 분석

풀브릿지 컨버터로 인하여 보상 네트워크의 입력전압은 구형파로 나타난다. 고조파 해석을 위해 구형파 입력 전압을 푸리에 급수로 나타내면 식 (1)과 같다.

$$v_{in}(t) = \frac{4V_{DC}}{\pi} \sum_{h=1,3,\dots}^{\infty} \frac{1}{h} \sin(h\omega t) \quad (1)$$

이 때 h 는 고조파의 차수를 나타낸다. 입력 전류를 계산하기 위해 LCCL-S 토폴로지의 입력 임피던스를 계산하면 식 (2)와 같다.

$$Z_{in(h)} = \frac{1}{\frac{1}{j\omega_h L_p + \frac{1}{j\omega_h C_f} + Z_r} + j\omega_h L_{in}} \quad (2)$$

식 (1)과 (2)를 통해서 시간에 따른 입력전류는 식 (3)과 같이 도출된다.

$$i_{in}(t) = \frac{4V_{DC}}{\pi} \sum_{h=1,3,\dots}^{\infty} \frac{1}{h |Z_{in(h)}|} \sin(h\omega t - \angle Z_{in(h)}) \quad (3)$$

식 (3)을 3kW급 무선전력전송 시스템에 적용하였을 때 입력전류 파형은 그림 2와 같다. 이때 3kW급 무선전력전송 시스템의 공진네트워크의 각 파라미터 값은 표 1에 나타내었다. 그림 2에서 3 고조파 이상의 전류 성분은 항상 입력 전압과 90도

표 1 LCCL-S 토폴로지 공진 네트워크 파라미터
 Table 1 Parameters of LCCL-S topology resonant network

Parameter	Value	Parameter	Value
V_{dc}	380 V	k	0.149
C_f	9.9 nF	L_{in}	37.38 uH
C_p	94.6 nF	L_p	397 uH
C_s	20.4 nF	L_s	183.27 uH

표 2 부하에 따른 입력전류 고조파 크기 비교

Table 2 Comparison of input current harmonics magnitude depending on loads (단위 : Arms)

Load	기본파	3고조파	5고조파	7고조파	9고조파
1kW	3.79	2.14	0.71	0.36	0.21
2kW	6.18	2.14	0.71	0.36	0.21
3kW	8.87	2.14	0.71	0.36	0.21

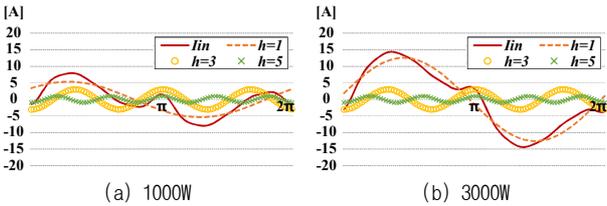


그림 2 부하에 따른 LCCL-S 토폴로지 입력전류 파형
Fig. 2 Input current wave form of LCCL-S according to loads.

위상차를 가지며, 이로 인해 입력전류 파형이 왜곡됨을 알 수 있다. 표 2는 부하에 따른 입력전류의 고조파 크기를 나타내었다. 3 고조파 이상의 크기는 부하에 관계없이 항상 일정한 값을 가지며 이는 입력전류의 고조파 성분이 일정한 스위칭 손실 및 도통 손실을 초래한다. 이때 3 고조파 이상의 전류를 식 (4)와 같이 간략하게 나타낼 수 있다.

$$i_{in(h)}(t) \approx \frac{4V_{DC}}{\pi h \omega_n L_{in}} \sin(h\omega t - \pi/2) \quad (h = 3, 5, 7, \dots) \quad (4)$$

고조파에 의한 손실 비교 분석을 위해 정전압 출력 특성과 정현파 입력전류를 갖는 SP 토폴로지를 선정하여 비교한다. 이때 사용한 스위치는 Infineon社의 IPW65R080CFD이며, 입력전력 3kW 조건에서 비교하였다. ZPA 주파수에서 동작할 때 SP 토폴로지는 이상적으로 소프트 스위칭을 하기 때문에 스위칭 손실은 0이며, 도통 손실만을 고려한다. LCCL-S 토폴로지의 경우 ZVS 턴-온을 하기 때문에 스위칭 손실은 턴-오프 손실만 고려하였다. 그림 3에 SP 토폴로지와 LCCL-S 토폴로지의 개별 스위치 손실을 그래프로 나타내었으며, LCCL-S 토폴로지의 스위치 손실이 2.25W 더 크게 나타났다.

그러나 실제 SP 토폴로지의 경우 결합계수와 부하 변화에 따라 ZPA 주파수가 달라지며, ZCS 동작으로 인한 스위치 소손을 막기 위해 ZVS 영역에서 동작해야하기 때문에 복잡한 가변 주파수 제어가 필요하다. 이로 인해 SP 토폴로지 또한 추가적인 스위칭 손실 및 도통 손실이 발생한다. 반면 LCCL-S 토폴로지는 스위칭 시점에서 고조파에 의해 항상 ZVS 턴-온이 가능하다. 또한 식 (4)에 따라 설계 시 L_{in} 의 크기를 이용하여

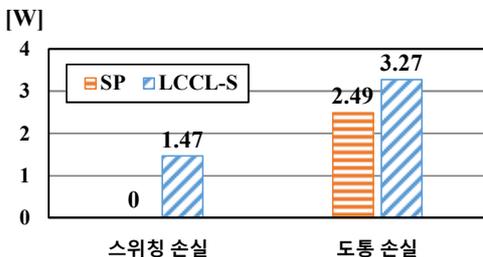


그림 3 토폴로지 별 스위칭 손실 및 도통 손실 비교
Fig. 3 Comparison of switching and conduction loss.

표 4 이론값 및 측정값 비교

Table 4 Comparison theoretical values with experimental values (단위 : Arms)

	3고조파	5고조파	7고조파	9고조파
이론값	2.14	0.71	0.36	0.21
측정값	2.01	0.64	0.31	0.18

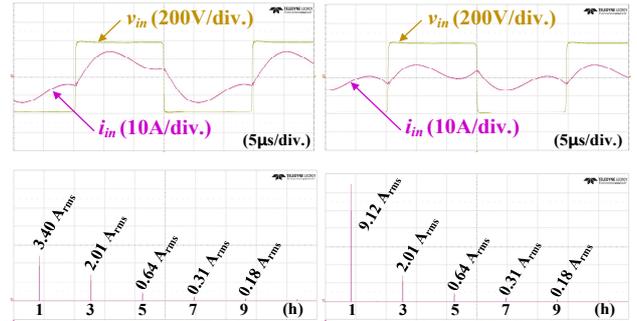


그림 4 부하에 따른 실험 결과 파형
Fig. 4 Experiment wave forms according to loads.

고조파의 크기를 조절한다면, 시스템을 전 동작 영역에서 고정주파수로 제어 할 수 있다.

2.3 검증

고조파 분석의 타당성을 검증하기 위해서 3kW급 프로토타입을 이용하여 실험을 수행하였으며, 스위칭 주파수는 85kHz로 고정하였다. 그림 4는 1kW, 3kW 입력전력 조건 실험에서 입력 전류 파형 및 FFT 분석 파형을 나타내며, 표 4에 실험에서 나타난 입력전류의 각 고조파 성분의 크기를 이론값과 비교하여 나타내었다. 실험 결과 이론값과 실험값이 큰 차이를 보이지 않았으며 부하에 따라 고조파 값의 변화도 나타나지 않는 것으로 보아 고조파 분석의 타당성을 확인할 수 있다.

3. 결론

본 논문에서는 푸리에 해석을 통하여 LCCL-S 토폴로지를 가지는 무선전력전송 시스템의 입력전류 고조파를 분석하였다. 고조파 분석을 통해 LCCL-S 토폴로지의 입력전류의 파형 및 스위치에서 나타나는 추가적인 손실을 예측하였다. LCCL-S 토폴로지의 입력전류는 L_{in} 에 의하여 항상 고조파 전류를 포함한다. 이로 인해 부하에 상관없이 항상 일정한 스위칭 손실 및 도통 손실을 초래하지만 L_{in} 을 통해 고조파 크기를 조절한다면 복잡한 가변 주파수 제어 없이 고정주파수 제어가 가능하다. 고조파 분석의 타당성을 입증하기 위하여 실험을 통해 확인하였다.

참고 문헌

[1] O. H. Stielau, G. A. Covic, "Design of loosely coupled inductive power transfer systems", in *Proc. IEEE PowerCon*, vol. 1, pp. 85-90, Dec. 2000.
[2] HaoHao, Grant Anthony Covic and John Talbot Boys, "An approximate dynamic model of LCL-T-based inductive power transfer power supplies," *IEEE Trans. on Power Electron.*, vol. 29, no. 10, pp. 5554-5566, 2014.