

500 W 급 전기 차량 충전용 무선전력전송 Series-Parallel 토폴로지의 동작점에 대한 특성 분석

강주빈, 김민아, 정지훈
울산과학기술원 (유니스트)

Analysis of Operating Point for Series-Parallel Topology of Wireless Power Transfer Converter in 500-W Electric Vehicle Charging Applications

Ju bin Kang, Mina Kim, Jee hoon Jung
Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST)

ABSTRACT

본 논문에서는 전기 차량의 고속 충전을 위한 무선전력전송의 S P 토폴로지의 동작점들의 전기적 특성을 분석하고자 한다. 무선전력전송 코일의 셀프 인덕턴스와 누설 인덕턴스에 대한 공진 방법 선택에 따라 네 가지 동작점이 생긴다. 이 때, 각 공진에 대한 입, 출력 전압 이득, 영 전압 스위칭 및 영 전류 스위칭, 단락 부하 조건, 순환 전류크기의 전기적 특성을 임피던스 분석을 통해 분석 후 500 W급 시작품의 시뮬레이션 결과를 통해 검증할 예정이다.

1. 서 론

전기 차량의 무선 충전 장치는 무선 전력 전송 분야에서 널리 연구되고 있다. 차량용 무선 충전 장치는 충전 속도에 따라 저속, 고속 충전 장치로 분류되는데 고속 충전 장치의 경우 높은 순시전력을 전송하기 위하여 높은 출력 전압이 요구된다. 따라서 저속 충전 장치와는 다른 토폴로지, 분석 방법 및 설계 방법이 요구된다.

무선전력전송 시스템은 코일 간의 공극으로 인하여 커플링이 감소한다. 이를 보상하기 위해서 사용하는 방법으로 커패시터를 이용한 공진 보상 방법이 널리 사용된다. 커패시터와 코일 간의 공진 방법에 따라 4가지의 기본 보상 토폴로지가 존재하는데 Series Series (SS), Series Parallel (SP), Parallel Series (PS), Parallel Parallel (PP)가 있다.[1]

S S 토폴로지는 높은 전압이득 달성을 위해서 변압기의 권선 비를 바꿔주어야 하며 이 때 코일 간의 비대칭으로 인해 같은 코일 면적에 비해 커플링 계수가 낮아진다. 또한 높은 자화 전류에 의해 순환전류가 높다는 단점을 가지고 있다. 그에 비해 S P 토폴로지는 전압 이득이 높고 순환전류가 낮은 특징이 있다.

S P 토폴로지는 공진네트워크의 공진구성에 따라 4가지 공진점을 선택할 수 있다. 본 논문에서는 네 가지의 공진점을 임피던스의 측면에서 분석하여 입력과 출력의 전압 이득, 영 전압 스위칭 및 영 전류 스위칭, 단락 부하 조건, 순환 전류크기와 같은 전기적 특성을 비교한다. 본 논문의 분석결과는 500 W급 무선 전력 전송 컨버터의 시작품에 대한 시뮬레이션을 통해 검증할 예정이다.

2. S-P 토폴로지의 최적 동작점

2.1 S-P 토폴로지의 전기적 특성

본 논문에서 사용한 S P 공진 네트워크 토폴로지의 회로도는 그림 1과 같다. 1차 측과 2차 측 커패시터의 공진대상을 자기 인덕턴스와 누설 인덕턴스로 정함에 따라 4가지 공진방식을 각각 Self Self(SS), Self Leakage(SL), Leakage Self(LS), Leakage Leakage(LL) 공진으로 표현한다. 공통적인 사양은 커플링 계수 $k = 0.6$, 셀프 인덕턴스 $L_s = 30 \mu\text{H}$ 이다. 이 때, 1차 측과 2차 측 공진 커패시터의 관계를 표 1에 나타내었다.

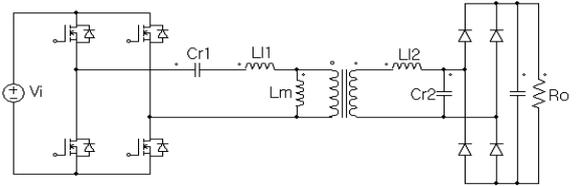


그림 1 SP 토폴로지 회로도

Fig. 1 A schematic of SP Topology

표 1 각 공진에 따른 Cr1과 Cr2의 관계식

Table 1 Equation between Cr1 and Cr2 depending on resonance

	SS	SL	LS	LL
Cr2	Cr1	$\frac{C_{r1}}{1-k^2}$	$C_{r1}(1-k^2)$	Cr1

2.1.1 전압 이득 곡선

그림 2는 네 가지 공진에 따른 전압이득 곡선을 나타낸다. 각 구역에 대해 소프트 스위칭 가능 여부를 색으로 표시했다. 붉은색은 불가능, 초록색은 영 전압 스위칭, 노란색은 영 전류 스위칭, 푸른색은 둘 다 가능함을 뜻한다. 공진 주파수에 대한 동작 주파수의 비를 $\frac{\omega_s}{\omega_r} = \omega$, 첨예도를 $\frac{\omega_r L_s}{R_o}$ 라고 정의할 때, 각 공진에 따라 임피던스 분석을 통해 SS, SL, LS, LL의 전압 이득을 식 (1) (4)로 나타낼 수 있다.

$$|G_V| = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\omega_s}{k}(1-k^2 - \frac{2}{\omega_s^2} + \frac{1}{\omega_s^4})\right)^2 + \left(Q \frac{\omega_s}{k}(1-k^2 - \frac{1}{\omega_s^2})\right)^2}} \quad (1)$$

$$|G_V| = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\omega_s^2}{k(1-k)}(1-k^2 - \frac{2-k^2}{\omega_s^2} + \frac{1-k^2}{\omega_s^4})\right)^2 + \left(Q \frac{\omega_s}{k}(1-k^2 - \frac{1}{\omega_s^2})\right)^2}} \quad (2)$$

$$|G_V| = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1-k^2 \omega_s^2}{k(1-k)}(1-k^2 - \frac{1-k}{\omega_s^2} + \frac{1-k^2}{\omega_s^4})\right)^2 + \left(Q \frac{\omega_s}{k}(1-k^2 - \frac{1-k}{\omega_s^2})\right)^2}} \quad (3)$$

$$|G_V| = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{w_s^2}{k(1-k)}(1-k^2 - \frac{2-2k^2}{w_s^2} + \frac{(1-k)^2}{w_s^4})\right)^2 + \left(Q\frac{w_s}{k}(1-k^2 - \frac{1-k}{w_s^2})\right)^2}} \quad (4)$$

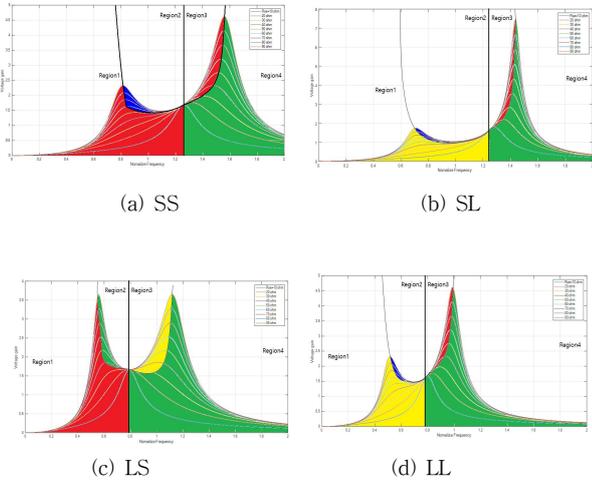


그림 2 각 공진에 따른 전압이득 곡선
Fig. 2 Voltage gain graph depending on each resonance point

각 공진 방식의 전압 이득에 따르면 회로의 침예도에 무관하게 전압 이득이 일정한 동작 주파수를 확인할 수 있으며, 이를 표 2에 나타내었다. 네 공진 모두 인덕티브한 공진 주파수 영역에서 부하에 따라 전압 이득이 변동함을 볼 수 있다.

표 2 각 공진에서 침예도와 무관한 동작점
Table 2 The operating point independent of Q factor at each resonance point

	SS	SL	LS	LL
ω	$\frac{1}{\sqrt{1-k^2}}$			$\sqrt{\frac{1-k}{1-k^2}}$

2.1.2 열린 부하 조건

표 3은 네 가지 공진 방법의 열린 부하 조건 모의시험 결과를 나타낸다. 표 3의 결과에 따르면 열린 부하 조건에서 LL 공진을 제외한 세 가지의 공진 방법은 일정 전압 및 전류값에 수렴하지만 LL 공진은 발산함을 알 수 있다. 따라서 LL 공진 방법은 매우 낮은 부하 상황 및 열린 부하 조건에서 안전을 보장할 수 없다.

표 3 열린 부하조건에서 각 공진들의 전류 및 전압
Table 3 Voltage and current of each resonant under open load condition

	SS	SL	LS	LL
I_{primary}	3.48A	8.25A	4.7A	85A
V_o	298V	131V	328V	1.64kV

2.1.3 순환전류

각 공진에서 순환 전류의 양을 비교하기 위해 저부하(100 W)와 정격부하(500 W) 두 조건에서의 출력 전류에 대한 순환 전류의 비를 분석하였다. 1차 측 및 2차 측의 순환 전류와 출력 전류에 대한 순환 전류의 비는 식 (5) (8)에 나타내었다.

$$I_{cc} = I_{pc} + I_{sc} \quad (5)$$

$$I_{pc} = \frac{I_o R_o (1 - \sqrt{(1-k)^2 Q^2 + \omega_s^4 C_{r2}^2 L_{l2}^2})}{\omega_s L_m} \quad (6)$$

$$I_{sc} = I_o R_o \omega_s C_{r2} \quad (7)$$

$$\frac{I_{cc}}{I_o} = R_o (\omega_s C_{r2} + \frac{1 - \sqrt{(1-k)^2 Q^2 + \omega_s^4 C_{r2}^2 L_{l2}^2}}{\omega_s L_m}) \quad (8)$$

이때, I_{pc} 는 1차 측 순환전류, I_{sc} 는 2차 측 순환전류, I_{cc} 는 1차 및 2차 순환전류의 합을 나타낸다. 식 (8)을 사용해 각 공진에서 구한 출력 전류와 순환 전류의 비율은 표 4와 같다. 경부하 및 정격 부하 조건 모두 SS와 LL 공진의 경우가 SL과 LS 공진의 경우보다 순환전류가 낮음을 보인다.

표 4 출력전류와 순환전류의 비율
Table 4 Ratio of output current to circulating current

	SS	SL	LS	LL
100 W	74.43	84.40	85.07	74.18
500 W	14.85	16.86	16.98	14.81

2.1.4 전기적 특성 비교 결과

제한하는 고속 전기차량 충전장치용 최적 동작점은 LS공진이다. 고속 전기차량 충전장치는 안전상의 문제로 스위칭 손실이 전도 손실보다 치명적이므로 순환전류의 비율보다 소프트 스위칭이 중요하다. 이에 따라, 침예도와 독립적인 동작점 주위에서 동작 시킬 시 소프트 스위칭이 가능한 LS 공진이 최적 동작점이다.

3. 시뮬레이션 결과

모의시험을 통해 각 공진의 효율성 및 분석의 결과는 그림 3과 같다.

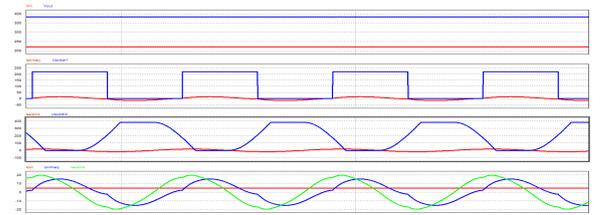


그림 3 모의시험을 통한 LS 공진의 파형
Fig. 3 Simulation result of LS resonant

3. 결론

본 논문에서는 S P 토폴로지의 각 동작점들을 전기적 특성에 따라 비교 분석하였다. 제안하는 최적 동작점인 LS 공진은 높은 전압이득을 가진다. 그러나 순환전류가 다른 공진에 비해 높은 점은 개선이 필요하다.

이 논문은 2016년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 중견연구사업임 (NRF2016R1A2B4011934)

참고 문헌

[1] Li, Siqi, "Wireless Power Transfer for Electric Vehicle Applications", IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, Vol. 3, No. 1, pp. 4 17, 2015, March.