

중간 결합 계수를 갖는 무선전력전송 시 LCC-S와 LLC 보상 토폴로지 비교 분석

조승진, 신창수, 김동희†
전남대학교 전기공학과

A Comparative Analysis of LCC-S and LLC Compensation Topologies in Wireless Power Transfer Systems with Mid Coupled Coefficient

Seung-Jin Jo, Chang-Su Shin, Dong-Hee Kim†
Department of Electrical Engineering, Chonnam National University

ABSTRACT

본 논문은 간 수준(0.4-0.6)의 결합 계수를 갖는 송수신 패드 사용 시, 정전압출력 특성을 가지는 무선 충전 패드의 공진 네트워크를 구성하기 위한 두 개의 토폴로지를 비교한다. 널리 이용되는 LLC 토폴로지를 LCC-S 토폴로지와 비교 및 분석하고, 실제 1kW급 무선전력전송 장치를 통해 검증한다. LLC 및 LCC-S 토폴로지의 비교 결과, LLC는 제작비용의 감소와 수신 측 소형화 부분에서 이점을 가지는 반면, LCC-S는 효율 부분에서 우위에 있음을 확인한다.

1. 서론

무선전력전송 장치는 기존에 존재하는 플러그인 충전 방식과 달리, 사용자의 직접적인 접촉 없이 충전할 수 있다는 점에서 안전성과 간편성을 가지고 있다. 현재 상용화된 무선전력전송 장치는 주로 자기 유도 방식(IPT : Inductive Power Transfer)을 채택하는데, 유선 충전에 비해 결합 계수가 낮다. 이 문제점을 해결하기 위해, 공진 네트워크를 구성하여 보상하는 방식을 채택하고 있다. IPT 시스템에서 사용되는 다양한 보상 토폴로지 중, LCC-S의 경우 정전압 특성을 갖고, 0.2 미만의 결합 계수를 갖는 충전 패드에서 주로 사용된다. 반면 LLC의 경우 정전압 특성을 가지지만 높은 결합 계수를 갖는 LLC 공진 컨버터에서 주로 사용한다. 무선 충전 패드 중, 드론, AGV 충전기 등의 시스템에서 결합 계수가 중간 수준에 근접하는 사례가 존재한다. 그러나 기존 연구에서 중간 수준의 결합 계수를 갖는 시스템에 적합한 토폴로지에 대한 분석이 미비하다.

본 논문에서는 중간 수준의 결합 계수를 갖는 IPT 시스템에서 정전압 특성을 갖는 보상 토폴로지인 LCC-S와 LLC 토폴로지를 각각 설계 및 비교할 것을 제안한다. 이후 1kW급 무선전력전송 장치에서 실험 및 검증하며, 토폴로지별 장단점을 확인한다.

2. 본론

2.1 송수신 패드 사양

일반적인 EV 용 IPT 시스템은 높은 수직 이격 거리를 갖고

표 1 무선충전 패드 사양

Table 1. Parameters of the WPT system pad

$L_p (\mu H)$	134.18	$L_s (\mu H)$	9.26
$L_{lk1} (\mu H)$	110.40	$L_{lk2} (\mu H)$	7.63
k	0.421	$M (\mu H)$	14.48

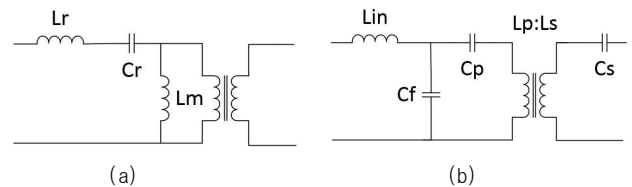


그림 1 (a) LLC 토폴로지, (b) LCC-S 토폴로지
Fig. 1 (a) LLC topology, (b) LCC-S topology

있기 때문에 낮은 결합 계수를 갖는다. 그러나 본 논문에서 제시하는 무선 충전 패드의 경우, 송수신 패드 간의 이격 거리가 가깝기 때문에 EV 용 무선전력전송 장치의 패드보다 결합 계수가 크다. 토폴로지를 설계하기에 앞서서, 설계 기준이 될 무선 충전 패드의 사양을 정할 필요가 있다. 표 1은 실제 제작한 드론용 IPT 송수신 패드의 기본 사양이다.

2.2 Topology 설계

본 논문에서 비교하는 토폴로지는 LLC와 LCC-S 토폴로지이다. 정전압 특성을 갖는다는 공통점이 있으나, 서로 다른 범위의 결합 계수에서 사용된다. 그림 1은 각각 LLC, LCC-S 토폴로지 회로도이다.

2.2.1 LCC-S Topology

LCC-S 토폴로지는 기본 무선 충전 패드에 인덕터 1개, 커패시터 3개를 추가로 구성하여 송신 및 수신 측 누설 인덕턴스를 보상하는 토폴로지다. 낮은 결합 계수를 보상해 주고, 공진 주파수에서 부하에 따른 정전압 특성을 갖는다. L_{in} 은 출력전압을 결정해주는 역할을 해주므로, 송수신 패드의 사양에 따라 적절한 값을 선정해 줄 필요가 있다. 따라서, 송신 측에서 공진 네트워크를 구성하는 L_{in} , C_f , C_p 를 적절히 선정해서 목표하는 전압이 출력되도록 조정한다^[1].

회로 송신 측에서 흐르는 전류, 그리고 출력전압의 식은 다음과 같다.

$$I_p = \frac{U_s}{Z_{in} [1 + j\omega C_p (j\omega L_p + 1/j\omega C_f + Z_r)]} = \frac{U_s}{j\omega L_{in}} \quad (1)$$

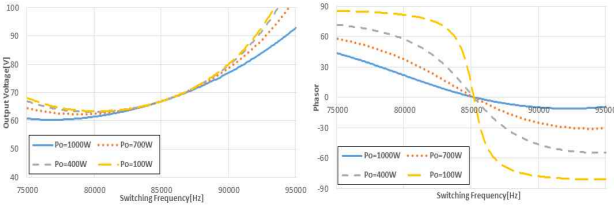


그림 2 LCC-S 토폴로지의 주파수에 따른 출력전압과 페이저도
Fig. 2 LCC-S topology output voltage and phasor by frequency

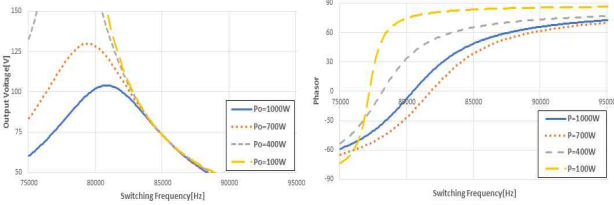


그림 3 LLC 토폴로지의 주파수에 따른 출력전압과 페이저도
Fig. 3 LLC topology output voltage and phasor by frequency

$$U_o = I_s R_{ac} \approx \frac{MU_s}{L_{in}} \quad (2)$$

그림 2의 그래프는 주파수에 따른 LCC-S 토폴로지의 출력 전압과 위상이다. 그래프를 통해, LCC-S는 부하에 따른 출력 전압 변동이 있으나, 그 변동폭이 작고, 주파수에 따라 ZVS와 ZCS 영역이 존재하는 것을 알 수 있다.

2.2.2 LLC Topology

LLC 토폴로지의 경우, 패드에서 발생하는 누설 인덕턴스를 가상의 인덕터로 구성하여 회로 설계가 가능하다. 회로 구성을 위해 필요한 소자는 커패시터 1개이다. LCC-S 토폴로지에 비해 요구되는 소자 수가 적으며 수신 측에서 공진 네트워크를 구성하지 않으므로 제작비 절감 및 수신 측의 소형화가 가능하다. 정전압 특성을 갖고 있지만, 미보상된 수신 측 누설 인덕턴스와 자화 인덕턴스가 있어 무효 전력이 발생한다. LLC 토폴로지의 특성상 송수신 패드에 의해 출력 측 전압비가 결정된다. 출력 전압은 주파수나 인덕터, 또는 커패시터를 변경하여 조절할 수 있다. LLC는 공진점 기준과 출력 전압 조정 과정에서 무효 전력이 발생하기 때문에 LCC-S보다 효율이 낮아질 것으로 예상된다. LLC 회로를 등가화하여 기술한 1차 측 전류는 다음과 같다. 하단의 그래프는 주파수에 따른 LLC 토폴로지의 출력전압과 위상도이다.

$$I_p = \frac{U_s}{Z_{in}} = \frac{U_s(k^2(L_p/L_s) \cdot Z_r \cdot j\omega L_m)}{k^2(L_p/L_s) \cdot Z_r + j\omega L_m} \quad (3)$$

3. 실험 결과

위에서 설계된 공진 네트워크를 제작하여 실험을 진행했다. 1kW 출력 조건에서 85kHz를 공진 주파수로 설계했으나, LCC-S의 경우, ZVS를 만족시키기 위해, LLC의 경우 적절한 출력전압 범위를 충족하기 위해 84.7kHz를 동작 주파수로 잡았다. 이격 거리를 수직으로 5mm로 하였을 때, 요구하는 출력 전압은 설계 기준 50 - 76V를 기준한다. 커패시터는 KEMET사의 C1812C222KDG를 사용했으며 직렬연결은 전압 및 전류 스트레스를 고려했다.

표 2. 실험 전 설계 사항.

Table 2. Parameters before experiments

입력전압	144 V
출력전력범위	100 - 1000 W
동작주파수	84700 Hz
출력전압	50 - 76 V
C_f (LLC)	31.69 nF (2.2nF, 2S * 29P)
L_{rn} (LCC-S)	29.3 μ H
C_p (LCC-S)	119.76 nF (2.2 nF, 2S * 109P)
C_f (LCC-S)	33.6 nF (2.2nF, 2S * 30P)
C_s (LCC-S)	378.6 nF (2.2nF, 1S * 172P)

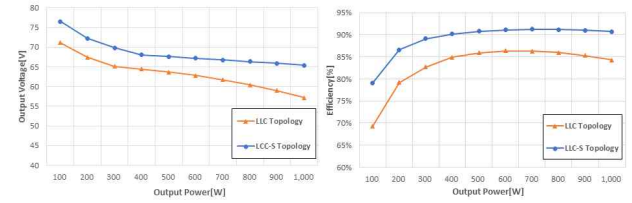


그림 4 출력전력에 따른 출력전압 및 효율 그래프

Fig. 4 Output Voltage and Efficiency Graph by Output Power

커패시터의 정격 전압이 500V(RMS)이며, 2.2nF 기준으로 LCC-S 수신 커패시터를 제외하고 모두 2 Series로 연결했다. 총 커패시터 58개, LCC-S 토폴로지는 총 450개의 커패시터가 사용되었다. 실험 사양과 실험 결과는 표 2와 그림 4와 같다. 실험 결과, LLC와 LCC-S 둘 다 요구하는 출력전압 범위로 출력되었으며, 효율에서는 수신 측 누설 인덕턴스가 보상된 LCC-S가 전반적으로 높은 값을 가졌다. 그러나 LCC-S의 경우 LLC에 비해 400여 개의 커패시터가 추가로 사용되었고, 수신 측에도 설치가 되는 만큼 비용과 부피 측면에서는 LLC 토폴로지가 유리한 것을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 CV 특성을 갖는 보상 토폴로지에서의 출력 전력에 따른 출력전압 및 효율을 비교해보았다. LLC 토폴로지는 필요한 소자가 적기 때문에 제작비용과 소형화 측면에서 유리하며, LCC-S의 경우 안정적인 정전압 특성과 높은 효율 측면에서 유리함을 확인했다. 높은 효율을 고려했을 때, LCC-S가 유리하지만, 제작비용 측면에서는 LLC 토폴로지 사용을 고려할 가치가 있다.

본 연구는 한국전력공사의 2018년 착수 에너지 거점대학 클러스터 사업에 의해 지원되었음 (과제번호:R18XA04)

참고 문헌

[1] Y. Chen, H. Zhang, C. Shin, K. Seo, S. Park and D. Kim, "A Comparative Study of S-S and LCC-S Compensation Topology of Inductive Power Transfer Systems for EV Chargers," 2019 IEEE 10th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), Xi'an, China, 2019, pp. 99-104, doi: 10.1109/PEDG.2019.8807684.