

무선전력전송을 위한 고차 토폴로지 공진 설계 연구

강소정, 신창수, 최민영, 김동희

전남대학교 전기공학과

A Study on Design of High-order Topology Resonance for Wireless Power Transfer

So-Jeong Kang, Chang-Su Shin, Min-Yeong Choe, Dong-Hee Kim

Department of Electrical Engineering Chonnam National University

ABSTRACT

본 논문은 무선 충전 시스템 고차 토폴로지의 누설 인덕턴스, 자화 인덕턴스 및 출력 특성을 고려한 공진 방법을 분석한다. 고차 토폴로지는 요구되는 출력 특성을 만족하도록 공진 탱크를 분리한 뒤, 각 공진 탱크가 같은 주파수에 공진하며 ZPA를 만족하도록 설계한다. 일반적인 DS-LCC는 AGV (Automated Guided Vehicle)와 같은 대전류 응용분야에서 송신 패드 전류 스트레스로 인해 설계가 제한되지만, 제안하는 방법은 설계를 통해 송수신 패드의 전류 스트레스를 감소시킬 수 있다. 이는 실제 급 AGV용 무선 파라미터를 적용하여 검증된다.

1. 서론

WPT(Wireless Power Transfer) 시스템은 패드의 물리적 한계에 의해 에너지 전달 효율이 낮고, 결합 계수 변동이 크다는 특징이 있다. 이를 극복하기 위해 다양한 보상 방법이 연구되고 있으며, 일반적으로 VA 보상 토폴로지를 설계하여 VA정격을 감소시킨다. 수동 소자 삽입 위치 및 개수에 따라 토폴로지를 분류하며, 높은 설계 자유도가 필요한 경우 고차 토폴로지를 사용한다. 고차 토폴로지는 상대적으로 많은 소자를 사용하여 파라미터 변동에 따른 변화가 적고, 수동 소자 설계를 통해 원하는 출력을 만들 수 있다는 장점이 있다. 일반적으로 고차 토폴로지는 부하 독립적인 출력 특성과 ZPA(Zero Phase Angle)를 만족하기 위해 T/π 형의 공진 탱크를 바탕으로 설계된다.^[1] 공진 탱크 구조에 따라 동일한 토폴로지도 다양하게 분리하여 설계 가능하며, 패드 전류/전압 비율을 조절할 수 있다.

본 논문은 동일한 DS-LCC (Double Side-LCC) 토폴로지에서 기존 설계 방법보다 낮은 패드 스트레스를 달성하는 설계 방법을 제안하며, 동일한 입·출력 조건에서 기존보다 적은 패드 스트레스로 손실이 저감되는 것을 확인한다.

2. DS-LCC 보상 토폴로지 분석

WPT 방법 중 IPT(Inductive Power Trasfer) 시스템의 보상 토폴로지는 그림 1과 같이 M-type으로 등가화되는 것이 일반적이다. M-type 등가회로는 패드 전류, 전압 산출에 적합하지만 자화 인덕턴스 L_m 이 고려되지 않아 토폴로지의 공진 설계에 한계가 있다. 따라서 본 논문은 그림 2와 같이 T-type 등가회로를 이용하여 공진을 분석하며 M-type 등가회로에서 무선 패드의 코일 흐르는 전류를 확인한다.

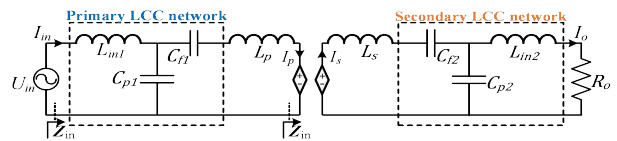


그림 1 DS-LCC 보상 토폴로지의 M-Type 등가회로

Fig. 1 M-Type Equivalent circuits in DS-LCC compensation topology

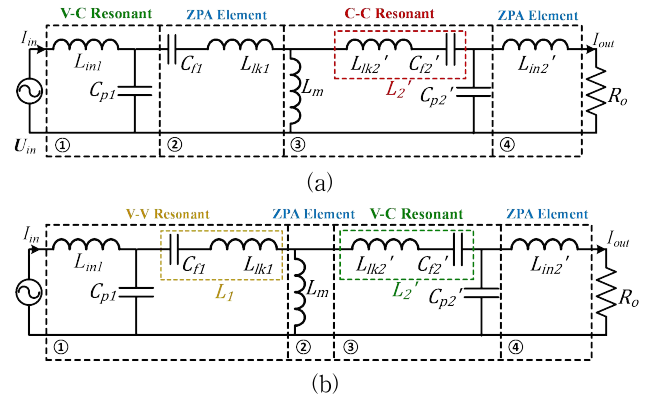


그림 2 DS-LCC 보상 토폴로지의 공진 방법. (a) 기존 방법, (b) 제안하는 방법

Fig. 2 Resonance method of DS-LCC compensation topology (a) Conventional method. (b) Proposed method

L_{in} 은 보상 인덕턴스, L_k 는 누설 인덕턴스를 의미하며 C_p 과 C_s 는 각각 병렬, 직렬 보상 커패시턴스, L_l 과 L_s 는 직렬 보상 커패시터로 보상된 합성 리액턴스 인덕턴스 값을 의미한다. 각 소자의 첨자는 1차 측 소자, 2차 측 소자임을 의미하며 2차 측 수동 소자 값은 실제 값에 턴비를 고려한 값이다.

기존 DS-LCC 토폴로지는 그림 2(a)와 같이 전압원을 입력으로 할 때, CC 출력 특성을 갖도록 공진을 설계한다. 공진 탱크 ①과 ③이 공진하는 조건은 식 (1)과 같고, 식 (1)을 만족하는 조건에서 ZPA를 위해 $Im[Z_{in}]=0$ 를 만족시키는 ②와 ④의 수동소자 조건은 식 (2)와 같다. 위 설계의 경우 송신 패드 코일 전류 I_p , 수신 패드 코일 전류 I_s 식은 (3)과 같이 도출된다. I_p 는 부하와 독립인 반면 출력전류의 크기에 비례해 증가한다. 따라서 고전류 응용 분야에서 송신 패드 스트레스로 인한 손실이 증가하여 송수신 비대칭 디자인의 코일 설계가 필요하다.

$$\omega^2 = \frac{1}{L_{in1}C_{p1}} = \frac{1}{(L_m + L_2)C_{p2}} \quad (1)$$

$$\omega^2 = \frac{1}{(L_p - L_{in1})C_{f1}} = \frac{1}{(L_s - L_{in2})C_{f2}} \quad (2)$$

$$I_s = \frac{j\omega M}{Z_{22}} \times I_p = \frac{j\omega M C_p R_{ac}}{L_{in}} \frac{U_{in}}{j\omega L_{in}} \quad (3)$$

3. 제안하는 공진 설계 방법

그림 2(b)는 제안하는 공진 방법이다. 기존과 다른 공진 네트워크 분리를 통해 CC 출력 특성을 달성하고, L_{in2} 설계를 통해 ZPA를 만족한다. 도출 식은 다음과 같다.

$$\omega^2 = \frac{L_1 + L_{in1}}{L_1 L_{in1} C_{p1}} \quad (4)$$

$$L_{in2} = L_2 + \frac{L_2^2}{kL_s} + \frac{L_p L_2^2}{L_s L_1} + \frac{L_p L_{in1} L_2^2}{L_s L_1^2} \quad (5)$$

위 조건을 충족한다면, 각 공진 탱크의 전압 방정식을 통해 원하는 출력 전류값을 만족하기 위한 L_{in1} 설계 수식을 구할 수 있으며, 이는 식 (6)과 같다.

$$L_{in1} = \frac{L_1}{sL_2} \sqrt{\frac{L_s}{L_p}} \frac{U_{in}}{|I_{out}|} \quad (6)$$

$$I_s = (1 - \omega^2 L_{in2} C_{p2} + j\omega C_{p2} R_0) I_0 \quad (7)$$

$$I_p = \frac{1}{1 - \omega^2 C_{p1} L_2 + j\omega C_{p1} Z_r} I_{in} \quad (8)$$

L_{in1} 과 L_{in2} 의 설계 인자인 L_1 과 L_2 는 식(7), (8)과 같이 전류 스트레스를 결정한다. 즉, 출력전류 크기에 따라 설계된 L_{in} 에 의해 I_p 크기가 증가하는 기존 방법과 달리 제안된 방법은 L_1 과 L_2 설계를 통해 I_p 와 I_s 를 조절할 수 있다.

제안된 공진 방법은 L_1 과 L_2 가 인덕터로 동작한다는 가정에 공진 되었기 때문에 해당 인자는 누설 인덕턴스 값보다 작은 값으로 설계되어야 한다. 해당 범위 내에서 L_1 , L_2 는 자유롭게 설계 가능하므로 전류 스트레스를 비교하여 전류 스트레스가 가장 작은 값을 선정해야 한다. 그림 3은 L_1 , L_2 크기에 따른 전류 스트레스를 비교한 그래프이며, 그림 4는 전압 스트레

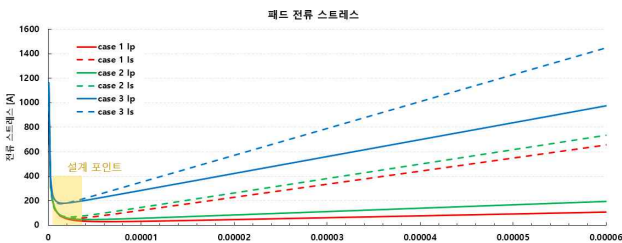


그림 3 L_1 , L_2 값에 따른 패드 전류 스트레스 비교
Fig. 3 Pad current stress comparison based on L_1 and L_2 value

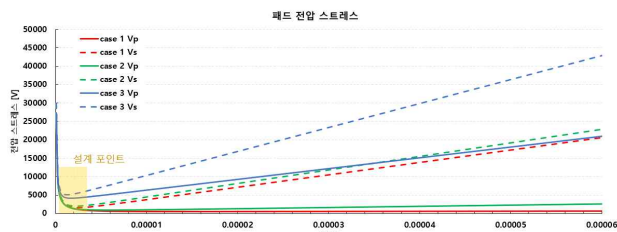


그림 4 L_1 , L_2 값에 따른 패드 전압 스트레스 비교
Fig. 4 Pad voltage stress comparison based on L_1 and L_2 value

표 1 토폴로지를 적용한 AGV 응용분야

Table. 1 Topology-applied AGV application

출력 전력	3.3kW
DC 입력 전압	380V
DC 출력 전류	60A
L_p	50uH
L_s	60uH
k	0.05-0.12

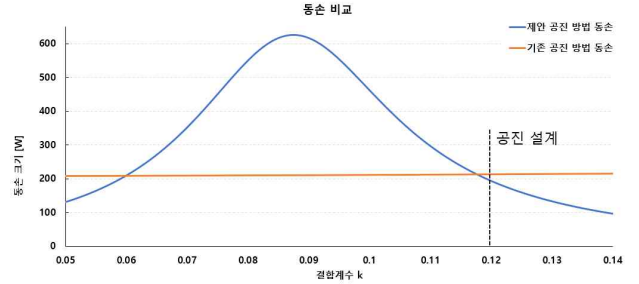


그림 5 기존 공진 방법과 제안하는 공진 방법의 동손 비교

Table. 5 Comparison of copper losses between existing resonance method and proposed resonance method

스를 비교한 그래프이다. 각각의 case는 순서대로 L_1 의 최대값의 1배, 0.5배 0.1배 수의 L_1 값으로 설계한 경우이다. L_1 이 클수록 패드의 스트레스가 저감되지만 DS-LCC 회로 구성을 유지하기 위해 L_1 는 최대값의 0.9배로 설계한다. L_2 와 패드 스트레스의 관계는 비선형적이므로 위의 L_1 설계 기준 가장 적은 패드 스트레스를 갖는 값으로 설계한다.

4. 실제 토폴로지 설계 및 손실 비교

기존 공진 방법과 손실을 비교하고자 제안한 토폴로지 설계 방식을 송수신 패드 디자인이 대칭인 AGV 응용 분야에 적용했다. 시스템의 설계값은 표 1에 나타나있으며, 표 1의 값을 기반으로 수동 소자 값을 선정할 수 있다. 표 1의 시스템에 토폴로지를 적용한 뒤, 수식을 통해 기존 공진 설계 방법과 위 설계 방법의 동손을 도출했으며 축 오정렬로 발생하는 k의 변동에 따른 동손 크기 변화는 그림 5에서 비교할 수 있다. k=0.12를 기준으로 공진 설계 시 동손 크기가 기존 공진 방식보다 작은 것을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 논문은 DS-LCC 공진 네트워크가 입력 ZPA와 출력 특성을 달성할 수 있는 또 다른 공진 설계 방법을 제안하였다. 해당 방법은 결합계수가 낮은 AGV 시스템에서 기존 설계 대비 손실이 적은 것을 확인했다. 향후 실험을 통해 제안 설계 방법의 타당성 검증할 계획이며 사례 연구를 통해 우수한 특성으로 운전 가능한 동작 조건을 도출할 예정이다.

본 연구는 2023년도 한국산업기술평가관리원의 자동차산업기술개발사업의 지원에 의한 연구임. [20018829] This work was supported by the Technology development Program(20018829) funded by the Korea Evaluation Institute of Industrial Technology(KEIT, Korea)

참고 문헌

- [1] Wei Zhang, "Compensation Topologies of High-Power, Wireless Power Transfer Systems", Proceedings of the IEEE, VOL. 65, NO. 6, JUNE 2016.