

비대칭 직렬 보상형 자계결합 무선전력전송의 도식적인 에너지링크 분석 및 설계 방법

정채호, 최희수, 최성진
울산대학교 전기공학부

Graphical Analysis and Design for Asymmetric Energy Link in Series-Series Configuration of Inductive Power Transfer

Chae Ho Jeong, Hee Su Choi, Sung Jin Choi
School of Electrical Engineering, University of Ulsan

ABSTRACT

무선전력전송 시스템의 전력 수신부는 많은 경우 송신부에 비해 크기가 작으므로 자계결합 에너지링크 코일의 권선을 비대칭으로 설계할 필요가 있다. 본 논문은 직렬 공진 보상 구조의 자계결합 무선전력전송에서 에너지링크 전압이득과 전력전송효율을 동시에 고려해 전력변환회로 관점에서의 비대칭 코일의 도식적인 분석 및 설계 방법을 제안한다. 제안하는 설계 평면을 통해 에너지링크 코일의 정렬이 어긋날 때 혹은 부하 요구가 변할 때 에너지링크의 전압이득과 전력전송효율 변화를 직관적으로 예측할 수 있으며 주어진 설계조건에 따라 에너지링크를 간단히 설계할 수 있다. 본 제안방법은 회로 시뮬레이션을 통해 검증 되었다.

1. 서론

자계결합 무선전력전송 기술은 전력전송을 위한 금속 단자를 제거하여 사용편의성, 제품의 내구성과 방수성을 높이는 장점으로 인해 휴대폰, 가전제품 및 전기자동차 등에 다양하게 확대 적용되고 있다. 특히 전력 송수신에 사용하는 마그네틱 코일에 직렬 혹은 병렬 커패시터를 추가하여 공진주파수에서 에너지를 전송하는 공진에너지링크 구조는 에너지 전송효율을 더욱 높일 수 있는 방법으로 알려져 있다. 이러한 공진구조는 크게 직렬 직렬, 직렬 병렬, 병렬 직렬, 병렬 병렬 구조로 나누어지며, 각각의 특성은 문헌 [1] [2]에 제시되어있다.

이러한 공진에너지링크 구조의 설계는 무선전력전송 시스템의 성능을 직접적으로 결정하기 때문에 매우 중요하지만 공진기의 성능을 결정하는 설계 변수들이 많아, 전력변환회로 관점에서의 분석 및 설계 방법에 대한 연구가 적었다. 본 논문에서 제안하는 방법은 직렬 직렬 보상구조에서 송수신부의 에너지링크 코일의 권선수가 비대칭일 때, 에너지링크의 성능지수 뿐만 아니라 에너지링크 내부저항과 등가부하저항 비를 함께 고려하여 이를 도식화해서 분석 및 설계하는 방법을 제시한다.

2. 제안하는 분석 및 설계 평면

그림 1은 직렬 보상형 자계결합 무선전력전송 시스템을 간략화 한 교류등가 회로이다. 이 때 회로의 연립방정식은 다음 식 (1)과 같다. 그림 1의 V_i , I_1 , I_2 는 각각 입력 전압, 송신부 전류, 수신부 전류의 페이저이다. L_1 과 L_2 는 각각 송수신부의 공

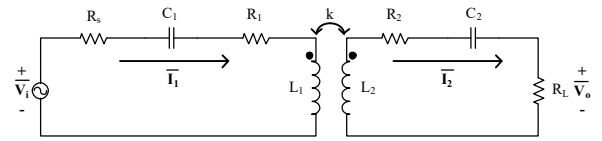


그림 1 자계결합 무선전력전송 교류등가회로 모델
Fig. 1 Equivalent AC circuit model of IPT

진에너지링크의 자기인덕턴스이고 k 는 송수신부 각각의 결합계수의 기하 평균이다. C_1 과 C_2 는 직렬보상 커패시터이다. R_s 는 입력 전압원의 내부저항이며 R_1 과 R_2 는 에너지링크의 등가직렬저항의 합이고 R_L 은 등가부하저항이다.

$$\begin{bmatrix} V_i/(R_s + R_1) \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -j \frac{Q_1}{1 + R_s/R_1} (\omega_N^{-1} - \omega_N) + 1 & j \omega_N k_1 \frac{Q_1}{1 + R_s/R_1} \\ j \omega_N k_2 \frac{Q_2}{1 + R_s/R_1} & -j \frac{Q_2}{1 + R_1/R_2} (\omega_N^{-1} - \omega_N) + 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

식 (1)의 Q_1 과 Q_2 는 각각 송신부 공진기의 양호도이며 각각의 특성임피던스를 R_1 과 R_2 로 나눈 값과 같다. ω_N 은 동작 각주파수를 공진기의 공진주파수로 나눈 정규화 된 값이다. 식 (1)을 간단히 하기 위해 두 가지 가정을 한다. 송신부 입력 전압원의 내부 저항은 무시할 수 있을 정도로 작고, 시스템의 동작 주파수는 회로의 공진주파수와 같다. 그러면 식 (1)의 매개 변수들 중 R_s 와 ω_N 은 각각 0과 1로 대체된다. 그리고 설계 편의성을 위한 다음 두 가지 변수를 정의한다. 공진기의 성능을 나타내는 공진기 성능지수 (Figure of Merit, FOM)와 수신부 부하저항(R_L)과 수신부 공진기 내부저항 (R_2)의 비를 식 (2)와 같이 정한다. Q 는 송수신부 각각 공진 양호도의 기하 평균이다.

$$FOM = kQ, \quad r_d = \frac{R_L}{R_2} \quad (2)$$

식 (1)로부터 송수신부 전류를 구한 후 식 (2)를 이용해서 설계식을 유도한다. 전압이득과 전력전송효율은 각각 식 (3), 식 (4)와 같다.

$$M_{V,AC} = \frac{R_2}{R_1} \frac{kQr_d}{k^2Q^2 + (1+r_d)} \quad (3)$$

$$\eta = \frac{k^2Q^2r_d}{R_1(1+r_d)^2 + k^2Q^2(1+r_d)} \quad (4)$$

이 때, 설계식의 매개 변수 R_1 과 R_2 의 비율을 권선비의 함수로 나타내기 위해 다음의 가정을 한다. 송신부와 수신부 공진기 코일의 권선 비는 $n:1$ 과 같고 송수신부 코일의 형태는 원형

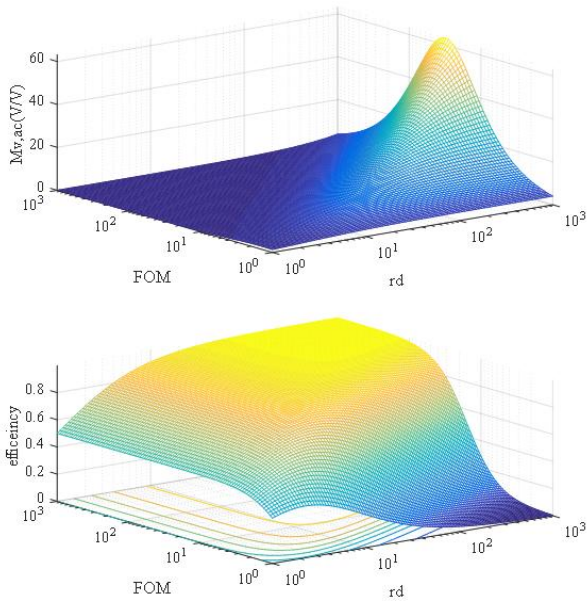


그림 2 FOM-r_d 특성 곡선
Fig. 2 FOM-r_d characteristic curve

평면 나선형의 단층이며 외경과 내경은 각각 설계 변수이다. 그리고 두 공진에너지링크의 커패시터의 등가직렬저항은 무시하고 두 공진기 코일의 도선은 같으며 표피효과와 근접효과에 의한 교류 저항은 무시한다. 코일 형태의 가정에 의해 공진기 내부저항 R₁과 R₂의 비율은 다음 식 (5)와 같으며 AD₁과 AD₂는 각각 공진기 코일의 평균 지름이다.

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{AD_2}{AD_1} \frac{1}{n} \quad (5)$$

식 (5)의 공진기 내부저항의 비가 1이 되도록 하는 평균 지름과 권선비의 공진기 코일을 이용해 전압이득과 전력전송효율식을 다시 유도하면 다음 식 (6, 7)과 같다.

$$M_{V,AC} = \frac{FOM r_d}{FOM^2 + (1+r_d)} = f(r_d, FOM) \quad (6)$$

$$\eta = \frac{FOM^2 r_d}{(1+r_d)^2 + FOM^2(1+r_d)} = g(r_d, FOM) \quad (7)$$

식 (6, 7)은 모두 FOM과 rd 함수이므로 FOM과 rd축에 의한 전압이득과 전력전송효율을 그린 삼차원면은 그림 2와 같다. 그림 2의 전압이득과 전력전송효율 표면을 분석 및 설계 평면으로 활용하기 위해 각각 등고선을 함께 표시하면 다음 그림 3의 도식적인 FOM r_d 평면과 같으며 그림 3의 빨간색 선은 전압이득, 파란색 선은 전력전송효율의 등고선이다.

제안하는 평면을 에너지링크 분석에 활용하기 위해서 그림 3의 준비된 공진기의 초록색 동작 점을 표시한다. 시스템의 등가부하가 감소해 동작점이 오른쪽으로 움직인다면 전압이득은 증가하고 전력전송효율은 감소할 것이다. 혹은 송신부와 수신부 코일의 거리가 약간 멀어진다면 결합 계수가 작아지기 때문에 동작 점은 아래쪽으로 움직인다. 이 경우 전압이득은 결합 계수 감소 정도에 따라 증가 후 다시 감소하며 전력전송효율은 감소하게 된다. 이처럼 제작된 공진기의 동적인 성능을 예측할 수 있다. 반대로 특정한 동작 점을 구현할 때는 정해진 전압이득과 효율에서 설계 평면의 FOM, r_d값을 통해 역으로 L_{1,2}, C_{1,2}, R_{1,2}, k의 매개 변수를 계산해 공진기를 설계할 수 있다.

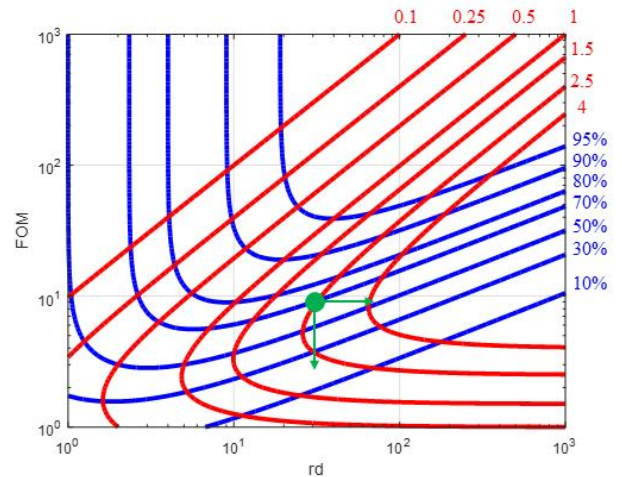


그림 3 FOM-r_d 분석 및 설계 평면
Fig. 3 FOM-r_d analysis and design plane

3. 설계평면 시뮬레이션 검증

그림 3의 동작점(rd=17.5, FOM=9)을 만족하는 임의의 공진기 조합을 통한 회로 시뮬레이션을 시행한다. 공진기 코일은 유한요소해석법을 통해 해석한 원형 평면 나선 형태이며 시스템의 동작 주파수는 100kHz이다. 공진기 코일들은 송신부 외경 30cm, 내경 27cm, 권선 수 3, 수신부 외경 15cm, 내경 1cm, 권선 수 14이고 각각 자기인덕턴스, 코일 등가직렬저항, 결합계수는 L₁=5.62uH, R₁=46m, L₂=10.72uH, R₂=60m, k=0.1043을 만족한다. 동작 점과 동작 주파수를 만족하는 나머지 회로 변수는 C₁=450.72nF, C₂=236.29nF, R_L=1이다. 이를 LTSpice 회로 시뮬레이션 계산 결과 전압 이득 1.7, 전력전송효율 79%이다. 이는 R₂/R₁=1.3일 때의 설계 평면 결과와 일치한다.

4. 결론

본 논문은 송수신부 비대칭 자계결합 무선전력전송 시스템의 에너지링크 분석 및 설계를 직관적으로 할 수 있는 FOM r_d 평면을 제시하였다. 이를 이용하면 전력변환 관점에서 전압이득과 효율을 함께 분석 및 설계할 수 있다. 또한, 송수신부의 에너지링크 사이 결합 계수가 변하는 경우, 부하저항이 변하는 경우에 전압이득과 효율의 경향성을 쉽게 예측할 수 있다. 본 방법은 회로 시뮬레이션을 통해서 계산 검증 되었다.

참고 문헌

- [1] Chwei Sen Wang, G. A. Covic and O. H. Stielau, "Power transfer capability and bifurcation phenomena of loosely coupled inductive power transfer systems," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 51, no. 1, pp. 148-157, Feb. 2004.
- [2] J. Sallan, J. L. Villa, A. Llombart and J. F. Sanz, "Optimal Design of ICPT Systems Applied to Electric Vehicle Battery Charge," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 6, pp. 2140-2149, June 2009.