

K 인버터를 이용한 전자기 유도 방식과 자기 공명 방식의 특성 비교

김진욱, 손현창, 김도현, 김관호, 박영진
과학기술연합대학원대학교 (UST) & 한국전기연구원

Comparison of Characteristics between Magnetic Induction and Magnetic Resonance WPT using K Inverter

JinWook Kim, Hyeon-Chang Son, Do-Hyeon Kim, Kwan-Ho Kim, Young-Jin Park
University of Science & Technology (UST) and Korea Electrotechnology Research Institute (KERI)

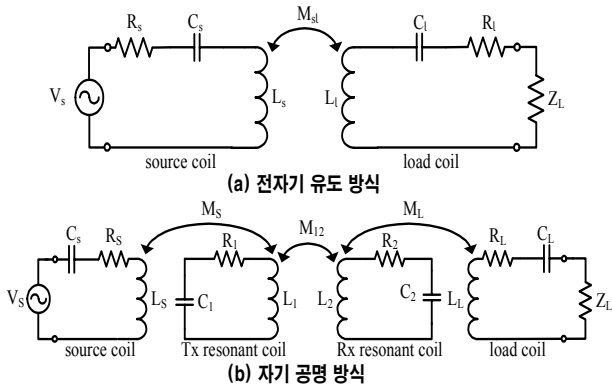
Abstract - 본 논문에서는 자기 공명 방식의 무선전력전송과 기존의 전자기 유도 방식의 특성을 회로 해석에 K 인버터를 적용하여 비교하였다. K 인버터가 적용된 등가회로를 이용하여 시스템 효율과 임피던스 매칭 조건, 입·출력 전력 값을 유도하였다. 그 결과 최대 효율이 되는 임피던스 매칭 조건을 만족시키면 전자기 유도 방식과 자기 공명 방식은 서로 같은 효율로 전력전송이 가능하였다. 하지만 자기 공명 방식이 전자기 유도 방식에 비해 임피던스 매칭을 할 수 있는 자유도가 더 크고, 입·출력 전력 제어에 있어서 더 나은 장점을 가지고 있었다.

1. 서 론

자기 공명 방식은 기존의 전자기 유도 방식에 비해 높은 효율을 가지며 전력 전송 거리가 증가한다고 알려져 있다. 하지만 그 차이가 어느 정도인지 정량적으로 비교한 자료가 없다. 본 논문에서는 그 차이를 회로 해석을 통해 제시하고, 두 방식의 특성을 비교하고자 한다.

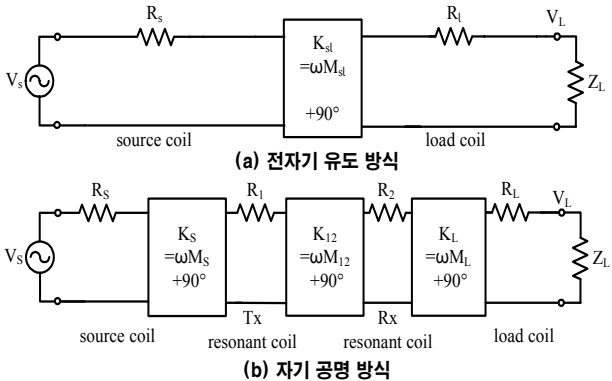
2. 본 론

2.1 회로 해석



<그림 1> 무선전력전송 등가 회로

그림 1은 무선전력전송의 두 가지 방식에 대해서 등가 회로를 나타낸 것이다. 그림 1(a)는 전자기 유도 방식, 그림 1(b)는 자기 공명 방식의 등가회로이다[1]. 자기 공명 방식은 전자기 유도 방식에서 소스코일과 부하 코일 사이에 두 개의 자기 공진 코일이 추가된 형태이다.



<그림 2> K 인버터를 적용한 무선전력전송 등가 회로

그림 1의 등가 회로를 각 루프가 모두 공진이 되었다고 가정하고, K 인버터를 적용시켜 등가화 시키면 그림 2와 같이 간략화 된다[2]. K 인버터 (임피던스 인버터)는 K 인버터 후단에 임의의 임피던스 Z가 있다고 한다면 전단에서 입력 임피던스는 K^2/Z 로 나타난다. 그리고 전단의 전압이 V라고 하면 후단의 전압은 jZV/K 이다. 이처럼 K 인버터를 사용하면 인버터 전·후 단의 임피던스와 전압 관계를 알아보기 쉬운 장점이 있다. 그림 2의 회로 해석 결과를 간단하게 표현하기 위해 대체 변수 $\alpha_{s1} = \omega^2 M_{s1}^2 / [R_s(R_l + Z_L)]$, $\alpha_s = \omega^2 M_s^2 / (R_s R_l)$, $\alpha_{12} = \omega^2 M_{12}^2 / (R_1 R_2)$, $\alpha_L = \omega^2 M_L^2 / [R_2(R_L + Z_L)]$ 을 사용하였다.

2.1.1 전자기 유도 방식

그림 2(a)의 등가회로로부터, 전자기 유도 방식에서 입·출력 전력을 구하면 아래 식 (1), (2)와 같다. 그리고 입·출력 전력비에 의해서 부하에 전달되는 효율을 구하면 식 (3)과 같다.

$$P_{in} = \left(\frac{V_s^2}{2R_s} \right) \left(\frac{1}{1 + \alpha_{s1}} \right) \quad (1)$$

$$P_L = \left(\frac{V_s^2}{2R_s} \right) \left(\frac{Z_L}{R_L + Z_L} \right) \frac{\alpha_{s1}}{(1 + \alpha_{s1})^2} \quad (2)$$

$$\eta_{ind} = \left(\frac{Z_L}{R_l + Z_L} \right) \left(\frac{\alpha_{s1}}{1 + \alpha_{s1}} \right) \quad (3)$$

공진 코일이 정해진다면 전자기 유도 방식에서 최대 효율을 위해 변형할 수 있는 것은 부하 저항의 임피던스이다. 식 (3)을 부하 저항 Z_L 에 대해서 미분을 하여 효율이 최대가 되는 Z_L 을 구하면 식 (4)와 같다. 이 때, $\alpha_{s1}' = \omega^2 M_{s1}^2 / (R_s R_l)$ 이고, $\sqrt{\alpha_{s1}'}$ 은 전자기 유도 방식에서의 시스템 효율을 나타내는 성능 지수(Figure of Merit: FoM)이다.

$$Z_L^{opt} = R_l \sqrt{1 + \alpha_{s1}'} \approx R_l \sqrt{\alpha_{s1}'} \quad (4)$$

여기서 $\sqrt{\alpha_{s1}'} \gg 1$ 인 경우, 최적의 부하 저항 값이 $\sqrt{\alpha_{s1}'}$ 에 따라 선형적으로 증가한다. 즉, 효율이 높은 시스템일수록 최적의 부하 저항 값이 큰 값을 가져야 함을 알 수 있다. 그리고 식 (3)에 유도한 식 (4)를 대입하면 임피던스 매칭이 완벽하게 된 전자기 유도 방식에서의 최대 효율 식을 식 (5)와 같이 얻을 수 있다.

$$\eta_{ind}^{opt} = \left(\frac{\sqrt{\alpha_{s1}'}}{1 + \sqrt{1 + \alpha_{s1}'}} \right)^2 \quad (5)$$

2.1.2 자기 공명 방식

그림 2(b)로부터 자기 공명 방식에서 입력과 출력 전력을 구하면 각각 식 (6), 식 (7)과 같다. 그리고 이를 통해 전력 전달 효율은 식 (8)과 같이 나타난다.

$$P_{in} = \left(\frac{V_s^2}{2R_s} \right) \left[\frac{1 + \alpha_{12} + \alpha_L}{1 + \alpha_s + \alpha_{12} + \alpha_L + \alpha_s \alpha_L} \right] \quad (6)$$

$$P_L = \left(\frac{V_s^2}{2R_s} \right) \left(\frac{Z_L}{R_L + Z_L} \right) \left[\frac{\alpha_s \alpha_{12} \alpha_L}{(1 + \alpha_s + \alpha_{12} + \alpha_L + \alpha_s \alpha_L)^2} \right] \quad (7)$$

$$\eta_{res} = \left(\frac{Z_L}{R_L + Z_L} \right) \frac{\alpha_s \alpha_{12} \alpha_L}{(1 + \alpha_{12} + \alpha_L) [(1 + \alpha_s)(1 + \alpha_L) + \alpha_{12}]} \quad (8)$$

자기 공명 방식에서는 최대 효율을 얻기 위해 부하 코일의 인덕턴스, 부하 코일과 수전부 공진 코일 사이의 상호 인덕턴스, 부하 저항 등을 변화시킬 수 있다. 따라서 식 (8)을 변화시킬 수 있는 파라미터가 모두 들어가 있는 α_L 에 대해서 미분하여 최대 효율을 만족시키는 최적의 α_L 을 식 (9)와 같이 구할 수 있다.

$$\alpha_L^{opt} = \sqrt{\frac{(1+\alpha_{12})(1+\alpha_S+\alpha_{12})}{(1+\alpha_S)}} \quad (9)$$

식 (9)를 다시 식 (8)에 대입하면 임피던스 매칭이 완벽하게 된 자기 공명 방식에서의 최대 효율 식을 식 (10)과 같이 얻을 수 있다.

$$\eta_{res}^{opt} = \left(\frac{Z_L}{R_L + Z_L} \right) \left[\frac{\sqrt{\alpha_S \alpha_{12}}}{\sqrt{(1+\alpha_S)(1+\alpha_{12})} + \sqrt{(1+\alpha_S+\alpha_{12})}} \right]^2 \quad (10)$$

이 때, 효율은 부하 코일 저항과 부하 저항의 비를 제외하면 α_S 와 α_{12} 에 의해서 결정됨을 알 수 있다. 이 때, 소스 코일과 송전부 공진 코일 사이의 α_S 는 클수록 효율이 증가하지만, 수 천 이상이 되면 수렴하여 효율에 큰 영향을 주지 않는다. 따라서 자기 공명 시스템의 효율은 α_{12} 에 의해 주로 결정됨을 알 수 있고, 이 값은 전자기 유도 방식에서의 α_{st}' 과 같은 값이다.

최대 효율 조건 식 (9)를 식 (6)에 대입하면, 최대 효율을 가질 때 입력 전력을 식 (11)과 같이 알 수 있다. 이상적인 전압원 소스가 있을 때 α_S 가 작을수록 입력 전력은 증가하고, 반대로 α_S 가 크면 입력 전력은 감소하게 된다. 따라서 소스 코일의 인덕턴스 또는 소스 코일과 송전부 공진 코일의 상호 인덕턴스를 조절함으로써 입력 전력을 제어할 수 있다.

$$P_{in}^{opt} = \frac{V_S^2}{2R_L} \sqrt{\frac{(1+\alpha_{12})}{(1+\alpha_S)(1+\alpha_S+\alpha_{12})}} \quad (11)$$

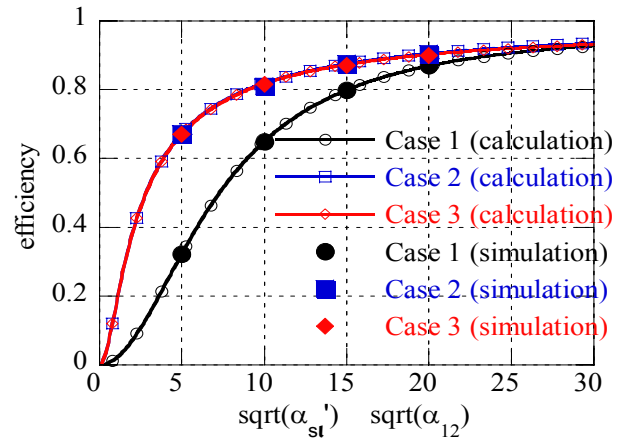
2.2 시뮬레이션

두 방식의 특성을 비교하기 위해서 세 가지 서로 다른 조건을 설정하였다. Case 1은 전자기 유도 방식에서 임피던스 매칭 조건을 만족하지 않았을 때, Case 2는 전자기 유도 방식에서 임피던스 매칭 조건을 만족했을 때, Case 3은 자기 공명 방식에서 임피던스 매칭 조건을 만족했을 때이다. 이 세 가지 경우에 대해서 ADS를 사용하여 유도한 수식을 검증하였다[3]. 이 때, 전자기 유도 방식의 파라미터는 $R_s = R_l = 2\Omega$, $L_s = L_l = 800\mu H$ 이다. 그리고 자기 공명 방식의 파라미터는 $R_s = R_l = 0.1\Omega$, $L_s = L_l = 10\mu H$, $R_1 = R_2 = 2\Omega$, $L_1 = L_2 = 800\mu H$, $M_s = 89.4427\mu H$ 이다. 두 방식 모두 공진 주파수는 250 kHz, $Z_L = 100\Omega$, 입력 전압 $V_s = V_L = 100V$ 이고, 커패시턴스는 각 코일의 인덕턴스에 맞게 완벽하게 공진이 되었다고 가정하였다.

그림 4는 위에서 설정한 세 가지 경우에 대해서 계산 값과 시뮬레이션한 결과를 비교한 것이다. 시뮬레이션은 성능 지수가 5, 10, 15, 20인 경우에 대해 실행하였다. 유도된 수식으로 계산한 값과 시뮬레이션 결과가 거의 일치함을 알 수 있다. Case 2와 Case 3의 결과를 보면 두 방식의 효율 차이가 없다. 즉, 최대 효율이 되는 임피던스 매칭 조건을 충족시키면 두 방식 모두 거의 동일한 효율을 얻을 수 있다. 또한 임피던스 매칭이 되지 않으면 같은 시스템이라도 높은 효율을 얻을 수 없기 때문에 임피던스 매칭이 아주 중요한 역할을 함을 확인할 수 있다.

〈표 1〉 시뮬레이션 결과

$\sqrt{\alpha_{st}'}, \sqrt{\alpha_{12}}$	Case 1 (전자기 유도 방식)			Case 2 (전자기 유도 방식)				Case 3 (자기 공명 방식)			
	P_{in} (W)	P_L (W)	η_{ind} (%)	Z_L^{opt}	P_{in} (W)	P_L (W)	η_{ind}^{opt}	k_L^{opt}	P_{in} (W)	P_L (W)	η_{res}^{opt}
5	1678	541.03	32.25%	10.20 Ω	490.35	329.56	67.21%	0.2277696	64.36	43.16	67.05%
10	844.37	548.22	64.93%	20.10 Ω	248.76	203.73	81.90%	0.3212645	125.67	102.56	81.61%
15	461.96	369.21	79.92%	30.07 Ω	166.31	145.57	87.53%	0.3959231	185.15	161.29	87.11%
20	282.71	245.82	86.95%	40.05 Ω	124.84	112.97	90.49%	0.4616674	241.61	217.33	89.95%



〈그림 3〉 Case에 따른 효율 비교

표 1은 그림 3에 표시된 각 Case에서 성능 지수가 5, 10, 15, 20인 경우에 대한 시뮬레이션 결과이다. Case 2를 보면 최대 효율이 되는 부하 임피던스가 성능 지수가 커짐에 따라 10.20 Ω ~ 40.05 Ω 로 거의 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다. Case 3에서 k_L^{opt} 은 α_L^{opt} 을 통해 수전부 공진 코일과 부하 코일 사이의 커플링 상수를 표시한 것이다. Case 2의 Z_L^{opt} 와 마찬가지로 k_L^{opt} 값도 성능 지수가 커짐에 따라 증가하였다. 그리고 Case 1과 Case 2의 전자기 유도 방식에서는 성능 지수가 커짐에 따라 입력 전력이 감소하였으나, Case 3의 자기 공명 방식에서는 증가함을 확인할 수 있었다. Case 3의 효율이 Case 2보다 약간 작은 이유는 시뮬레이션 시에 설정한 α_S 값 (3948)과 소스/부하 코일의 저항으로 인해 생기는 감소 때문이다.

3. 결론

전자기 유도 방식과 자기 공명 방식의 등가 회로에 K 인버터를 적용하여 비교한 결과, 임피던스 매칭 조건을 만족시키는 경우 전자기 유도 방식과 자기 공명 방식의 효율이 거의 동일하였다. 하지만 전자기 유도 방식이 부하의 임피던스 이외에 임피던스 매칭을 위해 조절할 파라미터가 없는 것에 비해 자기 공명 방식은 임피던스 매칭을 실현시킬 수 있는 자유도 (부하 저항, 상호 인덕턴스, 부하 코일의 인덕턴스)가 더 큰 시스템을 알 수 있었다. 자기 공명 방식은 입력 전력 또한 α_S 를 변화시킴으로써 자유롭게 제어할 수 있다. 결국 자기 공명 방식은 전자기 유도 방식에 제어의 자유도를 높임으로써 임피던스 매칭, 입-출력 전력 등을 쉽게 조절할 수 있도록 한 시스템이라고 할 수 있다.

[참고 문헌]

- [1] A. P. Sample, D. T. Meyer, and J. R. Smith, "Analysis, Experimental Results, and Range Adaptation of Magnetically Coupled Resonators for Wireless Power Transfer", *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 2010.
- [2] Ikuo Arai, "Design Theory of Wireless Power Transfer System Based on Magnetically Coupled Resonators", ICWITS 2010, pp. 1-4, August 2010.
- [3] ADS2008, Agilent.