

결합된 자기공명을 통한 무선에너지 전력 전송 시스템의 회로 해석

전상훈, 김용해, 이명래, 강승열

한국전자통신연구원

305-700 대전시 유성구 가정동161

Abstract

Simple equivalent circuit model is developed for wireless energy transfer system via coupled magnetic resonances and practical design method is also provided. Node equations for the resonance system are built with the method expanding transformer's equations and the optimum distances of coils in the system is derived analytically for optimum coupling coefficients for high transfer efficiency. Moreover, to calculate the frequency characteristics for a lossy system the equivalent model is established at an electric design automation tool. The model parameters of the actual system are extracted and the results of modeling are compared with the measurement. Through the developed model, we can understand the principles that the system shows higher efficiency than conventional magnetic coupling systems and impedance matching is important to achieve high efficiency

I. 서론

지난 수년간 무선 전력전송에 대한 관심과 연구가 폭발적으로 증가하여, 자기유도방식의 경우 주목할 만한 연구결과를 보여주고 있다[1] - [5]. 특히 80%의 높은 효율을 보여주고 있는 전기자동차를 [1] [5] 포함한 여러 전자기기에서 그 가능성을 보여 주고 있다. 그러나, 대부분의 연구는 코일크기의 30%보다작은매우가까운 거리에 제한되어 있고, 수 미터 정도의 근거리에서의 결과는 보여 주지 못하고 있다.

최근 들어, MIT에서 강하게 결합된 자기공명현상을 이용한 새로운 방식의 무선 전력전송 방식을 제안하였다[6] [7]. 이 방식은 자기유도 방식과 달리 수 미터의 근거리에서 전송이 가능할 것으로 기대되고 있고, MIT에서는 2m의 거리에서 40%효율을 시연해 보이기도 했다. 기존의 비접촉 무선 전력전송 기술과 비교해볼 때, 자기공명 기술은 몇 가지 근본적으로 다른 점을 가지고 있다. 공명현상은 방향성이 없어, 여러 방향으로의 에너지 전송이 가능하고, 송수신부 간의 결합이 매우 약하다라도 효율적으로 에너지 전송을 할 수 있다. 이러한 특성은 모두 공명현상의 자연적인 특성에 기인한 것이다.

자기공명은 무선전력전송 분야에는 새로운 방식으로, 아직까지 물리적인 해석만이 연구되어 있고 이러한 해석방법은 전기전자 엔지니어에게는 생소한 방법이다[6] [7]. 실제로 전자기기에 사용되기 위해서는 전자적이고 실용적인 해석방법과 도구들이 필요한데 이에 대한 연구는 거의 없거나 매우 부족한 상황이다[8]. 또한 송신부 또는 수신부를 이루는 두 코일의 거리를 어느 정도 떨어 뜨릴 때 전송효율이 증가하는 것에 대한 이해, 기존의 자기유도 방식에 비해 먼 거리에서 높은 효율을 보이는 특성이 물리적 해석으로는 잘 나타나지 않는다.

본 논문에서는 자기공명을 통한 무선전력전송 시스템의 간단한 등가회로를 세우고 이를 검증하였다. 4개의 코일로

이루어진 시스템의 노드 방정식을 무손실의 경우에 대해 해석하였고, 이로부터 앞서 언급한 특성들에 대해 이해 할 수 있었다. 또한 실제 전자기기의 응용을 위해 시뮬레이션 프로그램에 모델을 심고, 모델 파라미터를 측정을 통해 추출하여 시스템 특성과 비교해 보았다.

II. 무손실 경우의 노드 방정식

4개의 코일로 구성된 자기공명방식의 무선전력전송 시스템은 2개의 코일로 이루어진 트랜스포머의 확장된 형태로 해석할 수 있다. 전력, 송신, 수신, 부하의 4개 코일로 구성된 전체 시스템이 그림1(a)에 나타나 있다. 이 시스템은 각각의 코일이 서로 커플링이 되어 있는 형태로 해석할 수 있고, 커플링이 매우 작은 상호인덕턴스를 무시하고 무손실의 경우로 가정하면 다음과 같은 노드 방정식을 세울 수 있다.

$$i_s = \frac{V_s}{Z_0} + j\omega C_p V_s + i_1, \quad V_s = j\omega L_p i_1 + j\omega M_{ps} i_2 \quad (1)$$

$$0 = j\omega L_s i_2 + j\omega M_{ps} i_1 + j\omega M_{sr} i_3 + \frac{i_2}{j\omega C_s} \quad (2)$$

$$0 = j\omega L_r i_3 + j\omega M_{sr} i_2 + j\omega M_{rd} i_4 + \frac{i_3}{j\omega C_r} \quad (3)$$

$$0 = \frac{V_4}{Z_0} + j\omega C_D V_4 + i_4, \quad V_4 = j\omega L_D i_4 + j\omega M_{rd} i_3 \quad (4)$$

부하에서부터 순차적으로 상호인덕턴스를 계산하면 전력 발생기로부터 본 등가회로와 보상 임피던스 Z_{PM} 를 구할 수 있다. 식 (1)~(4)로부터,

$$Z_{PM} = \frac{\omega^2 \kappa_{ps}^2 L_p L_s}{\frac{\omega^2 \kappa_{sr}^2 L_s L_r}{\frac{\omega^2 \kappa_{rd}^2 L_r L_D}{1} + \frac{1}{j\omega C_r}} + \frac{1}{j\omega C_s} + j\omega L_s} \quad (5)$$

전송코일과 수신코일의 공진주파수가 같다면,

$$\omega_0^2 L_s C_s = \omega_0^2 L_r C_r = 1 \quad (6)$$

$$\frac{1}{j\omega C_s} + j\omega L_s = \frac{1}{j\omega C_r} + j\omega L_r = 0 \quad (7)$$

이고, 공진주파수에서 Z_{PM} 은

$$Z_{PM} = \frac{\omega_0^2 \left(\frac{\kappa_{ps} \kappa_{rd}}{\kappa_{sr}} \right)^2 L_p L_D}{1/Z_0 + j\omega_0 C_D} + j\omega_0 L_D \quad (8)$$

로 간략화된다.

식(8)은 코일 두개로 이루어진 트랜스포머의 식과 같은 형태를

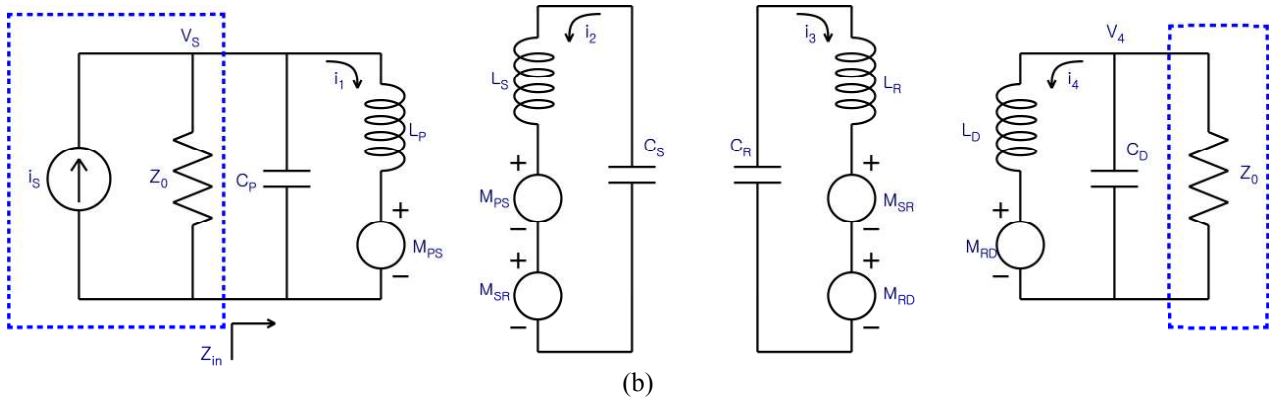
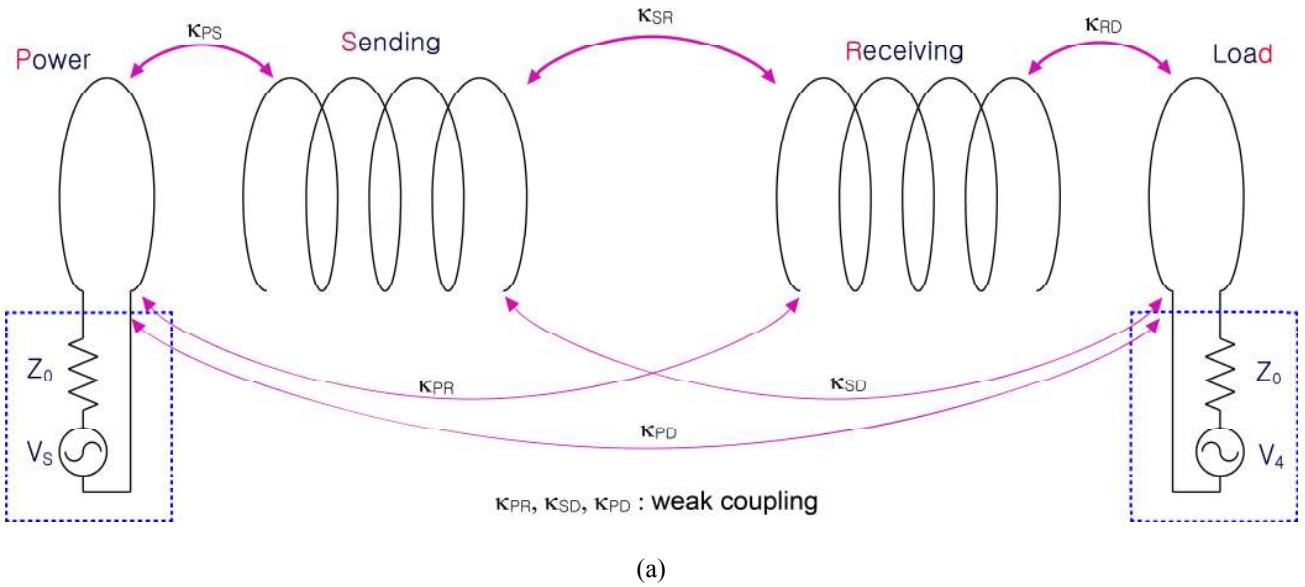


Fig. 1. (a) Schematic of wireless energy transfer system using coupled magnetic resonances. (b) Circuit of (a) with compensation sources

플링계수가 $\kappa_{PS}\kappa_{RD}/\kappa_{SR}$ 바뀐것만 다르다. 결국전체시스템은공진 주파수에서그림3과같은등가회로로바뀔수있다. L_p 가 L_D 와같고, 전력코일의공진주파수가전송코일의공진주파수와같다면 다음의관계가성립하고,

$$\omega_0^2 L_p C_p = \omega_0^2 L_D C_D = \omega_0^2 L_p C_D = 1 \quad (9)$$

Z_{PM} 은아래와같이되고, 또한 $\kappa_{PS}\kappa_{RD}/\kappa_{SR} = 1$ 이라면

$$Z_{PM} = \frac{\omega_0^2 \left(\frac{\kappa_{PS}\kappa_{RD}}{\kappa_{SR}} \right)^2 L_p L_D}{1/Z_0 + j\omega_0 C_D + j\omega_0 L_D} = -j\omega_0 L_p + Z_0 \quad (10)$$

마지막으로전력발생기에서보는입력임피던스 Z_{in} 은

$$Z_{in} = 1/j\omega_0 C_p \parallel (j\omega_0 L_p + Z_{PM}) = 1/j\omega_0 C_p \parallel Z_0 \quad (11)$$

C_p 은매우작은값으로무시할만하므로, Z_{in} 은부하저항인 Z_0 와완벽히정합을이루게된다. 즉이론적으로커플링효율은100%가되는것이다.

송신부와수신부의거리가멀어서 κ_{SR} 이작게되더라도송신부를이루는두코일그리고수신부를이루는두코일의간격을조절함으로써 $\kappa_{PS}\kappa_{RD}/\kappa_{SR}$ 을 1로만들수있다. 그결과로매우높은결합효율을얻을수있게되는것이다.

III. 손실이 있는 경우

실제로는손실이존재하고되고, 손실을고려할경우노드방적식을푸는것은쉽지가않다. 또한주파수에따른특성을확인하고, 낮은커플링계수도고려하기위해서는시뮬레이션프로그램을사용하는것이필요하게된다. 무선전력전송시스템에서의손실은측정과식(12)와(13)을통해추출할수있다.

$$Loss = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2 \text{ for 2-port measurement} \quad (12)$$

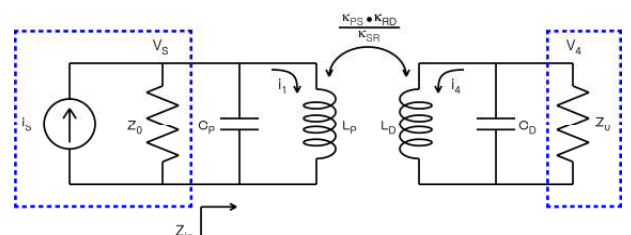


Fig. 3. Simplified circuit schematic at a resonance frequency

$$Loss = 1 - |S11|^2 \text{ for 1-port measurement (13)}$$

네개의코일에대해서는여섯개의커플링계수가존재하고, 이를포함하여총22개의파라미터를가진등가회로모델을ADS의SDD를이용하여구현하였다. 송신부와수신부의거리가3cm, 15cm, 23cm떨어진거리에대해추출된파라미터가표1과2에나타나있다. 그리고15cm의경우에대해서물레이션된모델의특성과측정된특성이그림4에나타나있다.

IV. 결론

본논문에서는자기공명방식을통한무선전력전송시스템의등가회로를세우고, 이를범용RF시물레이터인ADS에구현하였다. 모델파라미터를추출하여이를시스템전송시스템과비교해모델의유용성을확인하였다. 본문을통해확립된등가모델을통해자기공명방식의무선전력전송특성에대한이해를높일수있었고, 나아가시스템의설계에도사용할수있었다

TABLE I

EXTRACTED COIL PARAMETERS AND VALUES AFTER OPTIMIZATION

Coil	Parameter	Raw	opt.	ETC
Power	Lp	0.475	0.475	uH (Inductance)
	Cp	3.70	3.70	pF (Capacitance)
	Rp	1.0E-09	1.0E-09	Ohm (Resistance)
	fp	120	120	MHz (Res. frequency)
Load	Ld	0.475	0.475	
	Cd	3.70	3.70	
	Rd	1.0E-09	1.0E-09	
	fd	120	120	
Sending	Ls	14.9	14.9	
	Cs	7.98	6.99	
	Rs	15.3	15.3	
Receiving	Lr	14.9	14.9	
	Cr	7.98	6.99	
	Rr	15.3	15.3	
	fr	14.6	15.6	

TABLE II

EXTRACTED COUPLING COEFFICIENT AND VALUES AFTER OPTIMIZATION

	Distance					
	3.0 cm		15.0 cm		23.0 cm	
	Raw	Opt.	Raw	Opt.	Raw	Opt.
Kps	0.370	0.343	0.229	0.217	0.162	0.176
Ksr	0.220	0.157	0.031	0.023	0.012	0.008
Krd	0.370	0.343	0.229	0.217	0.162	0.176
Kpr	0.090	0.090	0.013	0.014	0.005	0.005
Kpd	0.041	0.038	0.006	0.005	0.002	0.002
Ksd	0.090	0.090	0.013	0.014	0.005	0.005

Acknowledgment

본 연구는 지식경제부, 방송통신위원회 및 한국산업기술평가관리원의 산업원천기술개발사업(정보통신)의 일환으로 수행하였음. [10035181, 100W 이하 RF 에너지 전송 및 재생기술 개발]

REFERENCES

[1] Z. N. Low, R. A. Chinga, R. Tseng, and J. Lin, "Design and test of a high-power high-efficiency loosely coupled planar wireless power

transfer system,"*IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, No. 6, pp. 1801-1812, May 2009.

[2] A. Esser and H. -C. Skudelny, "A new approach to power supplies for robots,"*IEEE Trans. Industry Appl.*, vol. 27, No. 5, pp.872-875, Sept. 1991.

[3] J. J. Casanova, Z. N. Low, and J. Lin, "A loosely coupled planar wireless power system for multiple receiver,"*IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, No. 8, pp. 3060-3068, August2009.

[4] J. Hirai, T.-W. Kim, and A. Kawamura, "Wireless transmission of power and information for cableless linear motor drive,"*IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 15, No. 1, Jan. 2000.

[5] J. Sallan, J. L. Villa, A. Llombart, and J. F. Sanz, "Optimal design of ICPT systems applied to electric vehicle battery charge,"*IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, No. 6, pp. 3060-3068, June2009.

[6] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljacic, "Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances,"*Science*, vol. 317, pp. 83-86, July2007.

[7] A. Karalis, J. D. Joannopoulos, and M. Soljacic, "Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer,"*Annal of Physics*, vol. 323, pp. 34-48, 2007.

[8] C. Zhu, K. Liu, C. Yu, R. Ma, and H. Cheng, "Simulation and experimental analysis on wireless energy transfer based on magnetic resonances,"*Vehicle Power and Propulsion Conference*, pp. 1-4, September 3-5 2008, Harbin China.

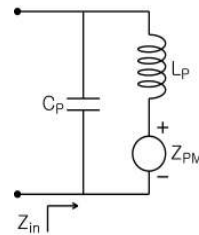


Fig. 2. Circuit with compensation sources for mutual inductance induced by sending, receiving and load coils

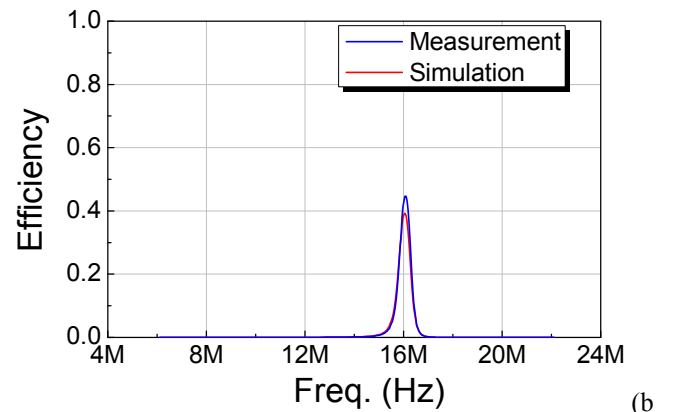
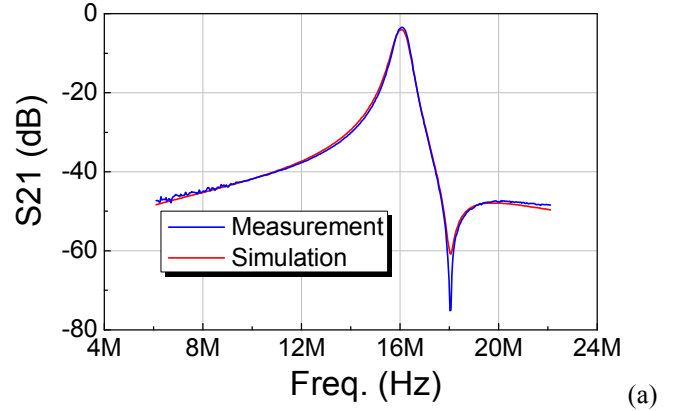


Fig. 4. Measured and simulated results for the system having distance of 15.0cm between sending and receiving coils. (a) S21. Transferred power (b) Transfer efficiency.