

가변 스위치드 커패시터를 이용한 무선전력전송 시스템의 매칭 회로 설계

이정훈, 정세교
경상국립대학교

Design of Matching Circuit of Wireless Power Transfer System using Variable Switched Capacitor

Jeonghun Lee, Se-Kyo Chung
Gyeongsang National University

ABSTRACT

This paper presents the design of a matching circuit for high-frequency wireless power transfer systems using a variable switched capacitor. The principle of the variable switched capacitor are presented and it is applied to the matching circuit which needs a variable capacitor to improve the power transmission efficiency. The validity of the proposed scheme is verified through the simulation.

1. 서론

자기 공진 방식의 고주파 무선전력전송 시스템은 원거리 전력전송에 가능하여 다양한 분야에 대한 적용이 연구되고 있다. 고주파 무선전력전송 시스템에서는 부하 및 결합 계수 등 회로 파라미터의 변동에 무관하게 높은 전력 전송 효율을 얻기 위해 임피던스 매칭 회로가 사용되며, 최대 전력 전송 효율을 얻기 위해서는 파라미터 변화에 따라 매칭 회로 소자 값이 변동되어야 한다^[1].

본 논문에서는 MOSFET 스위치와 커패시터를 사용하는 가변 스위치드 커패시터를 사용하여 부하 변동에도 최대 전력전송 효율을 얻을 수 있는 매칭 회로를 제안하였다. 먼저 가변 스위치드 커패시터의 개념과 동작에 대해 설명하였으며, 이를 무선전력전송 시스템의 매칭 회로에 적용하였다. 그리고 시뮬레이션을 통해 제안된 회로의 타당성을 검증하였다.

2. 가변 스위치드 커패시터

그림 1은 가변 스위치드 커패시터 회로와 동작 원리를 나타내고 있다^[2]. 가변 커패시터는 양방향 MOSFET 스위치, 스위치와 직렬 연결된 C_1 , 병렬연결 된 C_2 로 구성된다. 커패시터의 용량(커패시턴스)은 충전되는 전하량에 비례하며, C_2 에 충전되는 전하량은 양방향 MOSFET 스위치의 듀티 비(D)로 조절할 수 있다. 이때 등가적인 전체 커패시턴스는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_t = C_{eq} + C_2 \quad (1)$$

$$C_{eq} = \frac{Q_{c1}}{Q_{c2}} C_1 = \frac{1 - \cos(2\pi \cdot D)}{2} C_1 \quad (2)$$

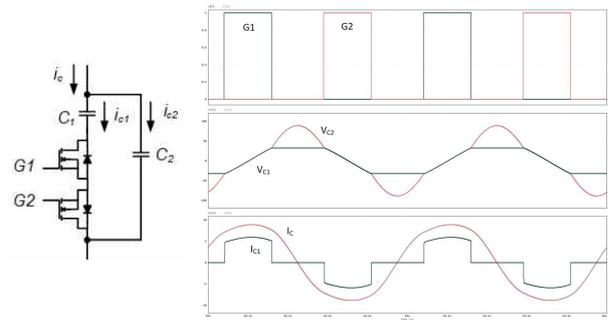


그림 1 가변 스위치드 커패시터의 회로와 동작 개념
Fig. 1 Circuit and operation principle of variable switched capacitor

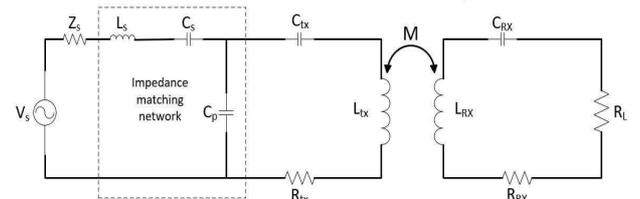


그림 2 무선 전력전송 시스템의 등가 회로
Fig. 2 Equivalent circuit of wireless power transfer system

따라서 MOSFET 스위치의 듀티 비를 조절하여 커패시턴스를 C_2 에서 $C_1 + C_2$ 범위로 조절할 수 있으며, 이러한 스위치드 커패시터를 공진회로 등에 적용할 수 있다.

3. 무선 전력전송 회로에 적용

2.1 직렬-직렬 무선전력전송 시스템의 매칭 회로

자기 공진 방식의 무선 전력전송 회로는 그림 2와 같이 나타낼 수 있으며 전원, 임피던스 매칭회로, 공진 커패시터, 송수신 코일, 부하로 구성된다^[2]. 그림 3은 수신단을 1차 측으로 환산한 등가 회로이며^[3], $X_1 = -1/\omega C_p$, $X_2 = \omega L_s - 1/\omega C_s$, Z_L 은 송수단의 입력 임피던스로 공진주파수에서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Z_L = \frac{\omega_o^2 M^2}{R_L} \quad (3)$$

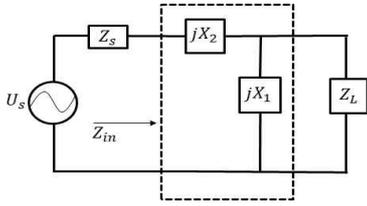


그림 3 수신단을 1차 측으로 환산한 등가 회로
Fig. 3 The equivalent circuit with the secondary side reflected to the primary side

여기서 R_L 과 M 은 각각 부하저항과 상호인덕턴스이며 ω_o 은 공진주파수이다. 그림 3에서 임피던스 매칭 조건 $Z_s^* = Z_{in}$ 일 경우 최대 전력이 전송된다. 여기서 Z_s 는 전원 임피던스, Z_{in} 는 매칭 회로 입력단의 입력 임피던스이다. 전원과 부하의 임피던스가 순 저항일 경우, 매칭 회로의 인덕턴스와 커패시턴스는 다음과 같이 구할 수 있다^[4].

$$X_1 = -\frac{1}{\omega_o C_p} = -\frac{\omega_o^2 M^2}{R_L Q} \quad (4)$$

$$X_2 = \omega_o L_s - \frac{1}{\omega_o C_s} = R_s Q \quad (5)$$

$$Q = \sqrt{\frac{\omega_o^2 M^2}{R_s R_L} - 1} \quad (6)$$

식 (4)~(6)으로부터 공진 주파수에서 매칭 회로의 커패시턴스 값은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$C_p = -\frac{R_L Q}{\omega_o^2 M^2} \quad (7)$$

$$C_s = \frac{1}{\omega_o(\omega_o L_s - R_s Q)} \quad (8)$$

4. 시뮬레이션

제안된 매칭 회로 검증을 위해서 시뮬레이션을 수행하였으며 사용된 파라미터는 표 1과 같다.

표 1 무선전력전송 시스템 파라미터
Table 1 Wireless power transmission system parameter

Item	Values	Item	Values
L_{TX}, L_{RX}	25[uH]	f	6.78[MHz]
C_{TX}, C_{RX}	22[pF]	M	2.4[uH]
R_{TX}, R_{RX}	0.05[Ω]	R_L	70[Ω]
V_{peak}	80[V_{peak}]	L_S	1.5[uH]

그림 4는 제안된 매칭 회로를 가지는 무선전력전송 시스템에 대한 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 부하저항은 70Ω 으로 설정하였으며, 이때 입력 임피던스는 149Ω 이었다. 매칭 회로에서 직렬 인덕턴스 값이 $L_s=1.5\mu\text{H}$ 경우 $Q=75$, $C_s=5.8\text{nF}$ 와 $C_p=113\text{pF}$ 로 계산된다. 매칭 회로의 직렬 및 병렬 커패시터에 그림 1의 스위치드 커패시터 회로를 적용하였으며, 직렬 및 병렬 커패시터에서 C_1 과 C_2 의 값은 각각 2.2nF , 4.7nF 및 100pF , 82pF 이다.

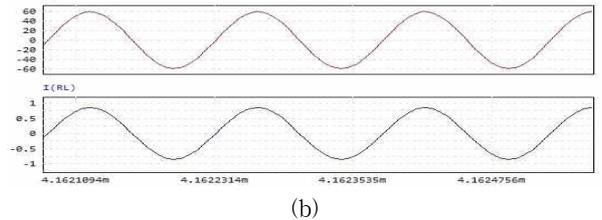
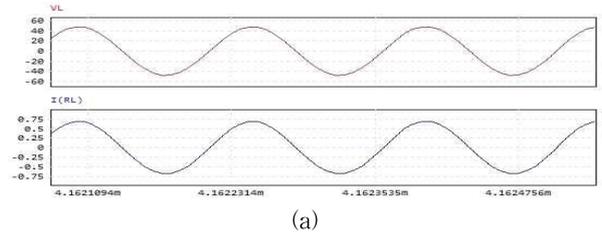


그림 4 시뮬레이션 결과 파형 ($R_L=70\Omega$) (a) 매칭 회로 미 적용 시 (b) 매칭 회로 적용 시
Fig. 4 (a) Simulation results ($R_L=70\Omega$) (a) With matching circuit (b) without matching circuit.

그림 4(a)와 (b)는 각각 매칭 회로 미적용 시와 적용 시 출력 전압과 전류를 나타낸다. 매칭 회로가 없을 경우 전력은 $16.3[\text{W}]$ 였으나, 제안된 매칭 회로를 적용한 경우 출력 전력은 $25.3[\text{W}]$ 로 증가하여 제안된 회로가 잘 동작함을 볼 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 가변 스위치드 커패시터를 사용한 무선전력 전송 시스템의 매칭 회로 설계에 대하여 다루었다. 제안된 스위치드 커패시터 회로를 매칭 회로에 적용하여 시뮬레이션을 통해 동작을 검증하였다. 추후 과제로 실험을 진행할 예정이다.

본 결과물은 2024년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업의 결과입니다.(재단 과제관리번호: 2021RIS-003)

참고 문헌

- [1] T. C. Beh, M. Kato, T. Imura, S. Oh, Y. Hori, "Automated impedance matching system for robust wireless power transfer via magnetic resonance coupling." IEEE Trans. on Power Electron, pp. 1-10.
- [2] S. K. Chung, B. G. Kang and M. S. Kim, "Constant frequency control of LLC resonant converter using switched capacitor." Electronics Letters, vol. 49, no. 24, pp. 1556-1558, 2013.
- [3] M. Ishihara, K. Umetani, and E. Hiraki, "Strategy of topology selection based on quasi-duality between series-series and series-parallel topologies of resonant inductive coupling wireless power transfer systems," IEEE Trans. Power Electron., vol. 35, no. 7, pp. 6785-6798, 2020.
- [4] S. J. Orfanidis, Electromagnetic Waves and Antennas, Rutgers University, pp 647-650, 2016.