

정류단을 포함한 무선전력전송 시스템의 회로해석

김도현, 김진욱, 손현창, 김관호, 박영진  
과학기술연합대학원대학교 & 한국전기연구원

Circuit Analysis of Wireless Power Transfer system with a Rectifier

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

**Abstract** - 본 논문에서는 자기공진형 무선전력전송 시스템에서 정류 회로부를 포함하여 시스템의 특징을 해석하였다. 비선형 소자가 포함된 정류단을 해석하여 등가 저항으로 모델링하는 방법을 제시하고 이를 통해 시스템의 입력 임피던스를 유도하였다. 또한 정류단에 연결된 부하로 전달되는 출력 전류를 계산하여 전체 시스템의 입출력 전력과 전력효율을 쉽게 얻을 수 있었다.

1. 서 론

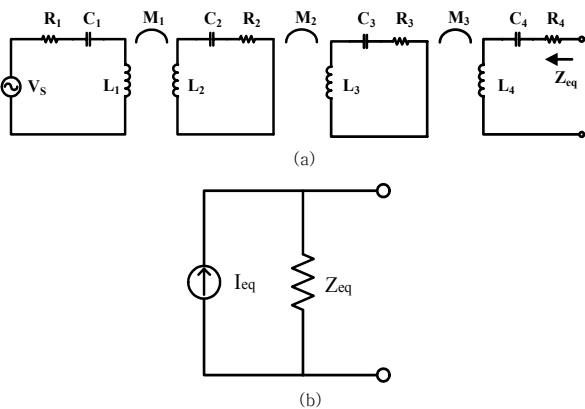
최근 자기공진방식을 활용하여 무선으로 전자기기에 전력을 공급하는 연구가 활발히 진행되고 있다[1]-[4]. 일반적으로 무선전력전송 시스템 수신부의 부하에서는 직류 전원형태로 전원을 입력받게 되므로 정류단이 연결된다. 따라서 정류회로를 고려하여 시스템을 설계해야 하지만 정류단에는 트랜지스터나 다이오드 등 스위치 역할을 하는 비선형 소자가 포함되어 시스템을 분석하기 어렵다.

본 논문에서는 정류단이 연결된 자기공진방식 무선전력전송 시스템을 전류원 회로와 정류부로 구성된 회로로 근사 모델링하여 부하에 전달되는 전력을 계산할 수 있음을 보인다.[5] 또한 정류단을 등가저항으로 변환하여 자기공진방식 무선전력전송 시스템의 입력 임피던스와 전체 시스템 효율을 계산하는 방법을 제시한다.

2. 본 론

2.1 자기공진방식 시스템의 노턴 등가 변환

그림 1은 자기공진방식의 무선전력전송 시스템에 대한 등가회로와 노턴 등가변환 회로를 나타낸다.



〈그림 1〉 자기공진방식 등가회로와 노턴 등가변환 회로

- (a) 부하단을 제외한 자기공진시스템 등가회로
- (b) 자기공진시스템의 노턴 등가변환

$I_{eq}$ ,  $Z_{eq}$ 는 다음과 같이 식 (1), (2)로 나타낼 수 있다..

$$I_{eq} = \frac{\omega^3 M_1 M_2 M_3 V_S}{R_1 R_2 (\omega M_3)^2 + (\omega M_1)^2 (\omega M_3)^2 + A} \quad (1)$$

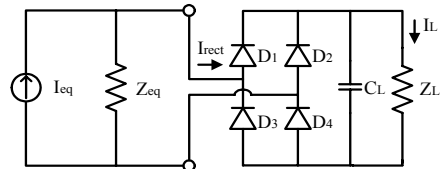
where  $A = R_1 R_2 R_3 R_4 + R_1 R_4 (\omega M_2)^2 + R_3 R_4 (\omega M_1)^2$

$$Z_{eq} = \frac{R_1 R_2 (\omega M_3)^2 + (\omega M_1)^2 (\omega M_3)^2}{R_1 R_2 R_3 + R_1 (\omega M_2)^2 + R_3 (\omega M_1)^2} + R_4 \quad (2)$$

식(2)에서 각각의 공진루프의 저항  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ 의 값이 작아 출력 임피던스  $Z_{eq}$ 의 값이 연결되는 부하 임피던스보다 매우 클 경우는 그림 1(b)의 노턴 등가변환 회로는 이상적인 전류원으로 근사화 할 수 있다.[5]

2.2 정류단의 등가 임피던스 변환

그림 2는 그림 1(b)의 노턴 등가변환 회로에 4개의 다이오드로 구성된 정류회로를 연결한 회로도를 나타낸다.  $Z_L$ 은 부하 임피던스를 의미하며  $I_{rect}$ 는 정류회로의 입력전류,  $I_L$ 은 부하에서의 출력 전류를 나타낸다.



〈그림 2〉 노턴 등가회로에 정류단을 연결한 회로

앞에서와 같이  $Z_{eq}$ 가 부하단에 비해 매우 크다고 가정하면, 노턴 등가 변환회로는 이상적인 전류원과 유사하게 동작하므로 정류회로의 등가 임피던스  $Z_{rect}$ 는 정류회로의 입출력 관계에 따라 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Z_{rect} = \frac{8}{\pi^2} Z_L \quad (3)$$

2.3 정류단을 포함한 자기공진방식 시스템의 출력

그림 2에서 정류단을  $Z_{rect}$ 의 등가 임피던스로 변환하면 전류원에서 공급되는 전류  $I_{eq}$ 는 각각  $Z_{eq}$ 와  $Z_{rect}$ 에 분배되며  $Z_{eq}$ 로 흐르는 전류는 정류회로의 입력전류인  $I_{rect}$ 와 같으므로 식(4)로 나타낼 수 있다.

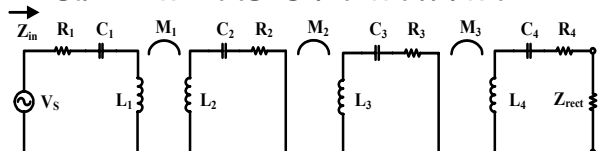
$$I_{rect} = \frac{Z_{eq}}{Z_L + Z_{eq}} I_{eq} \quad (4)$$

부하에 흐르는 출력전류는 정류회로의 동작원리에 따라 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$I_L = I_{eq} \times \frac{Z_{eq}}{Z_{eq} + Z_L} \times \frac{2}{\pi} \quad (5)$$

그림 1(b)는 그림 1 (a)에 대한 등가모델이므로 그림 1(a)의 회로에 정류부를 연결할 경우 부하  $Z_L$ 에서의 출력전류는 식(5)의 결과와 근사한 값을 갖게 된다.

2.4 정류단을 포함한 자기공진방식 시스템의 입력 임피던스



〈그림 3〉 정류단을 등가 임피던스로 변환한 회로

그림 3은 정류단을  $Z_{rect}$ 의 등가 임피던스로 변환한 회로도를 나타낸다. 정류부를  $Z_{rect}$ 로 대체하면 선형 시스템으로 변환되어 쉽게 해석할 수 있다.  $Z_{eq}$ 를 사용하여 입력 임피던스  $Z_{in}$ 을 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Z_{in} = \frac{(\omega M_1)^2 (R_3 R_4 + R_3 Z_{rect} + (\omega M_3)^2)}{R_2 R_3 (R_4 + Z_{rect}) + R_2 (\omega M_3)^2 + (\omega M_2)^2 (R_4 + Z_{rect})} \quad (6)$$

### 2.5 정류단을 포함한 자기공진시스템의 전력효율

식(5)와 식(6)를 통해 정류회로가 포함된 시스템의 전력효율을 근사적으로 계산할 수 있다. 입력되는 전력  $P_s$ 는 식(7)과 같다.

$$P_s = \frac{V_s^2}{2Z_{in}} \quad (7)$$

또한 수신전력  $P_L$ 은 다음의 식(8)과 같다.

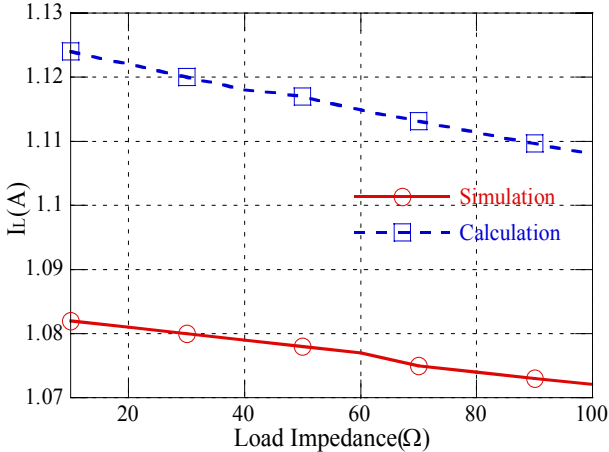
$$P_L = (I_{eq} \times \frac{Z_{eq}}{Z_{eq} + Z_L})^2 \times \frac{Z_{rect}}{2} \quad (8)$$

따라서 전체 시스템의 전력효율  $\eta$ 는 식(7)과 (8)로부터 다음과 같이 유도된다.

$$\eta = \frac{P_L}{P_s} = (\frac{Z_{eq} I_{eq}}{V_s Z_{eq} + V_s Z_L})^2 \times Z_{rect} Z_{in} \quad (9)$$

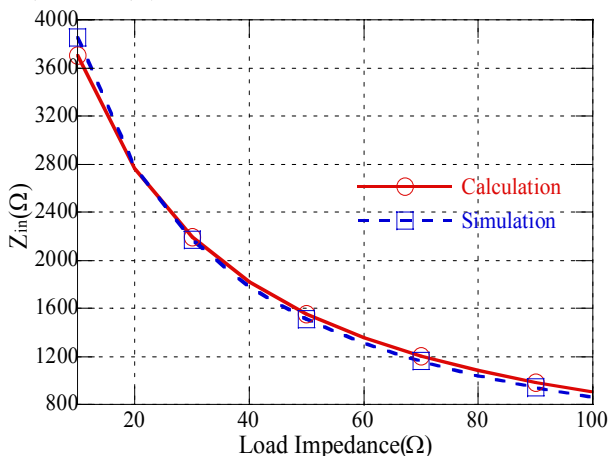
### 2.6 시뮬레이션

ADS 2008을 통한 시뮬레이션으로 제시한 이론을 검증하였다. 시뮬레이션의 파라미터는  $R_1=R_4=2.3 \Omega$ ,  $R_2=R_3=4.6 \Omega$ ,  $L_1=L_4=233.3 \mu\text{H}$ ,  $L_2=L_3=466.6 \mu\text{H}$ ,  $C_1=C_4=1.732 \text{ nF}$ ,  $C_2=C_3=434.3 \text{ pF}$ 이다. 각 루프에서의 L과 C는 250 kHz에서 공진이 일어나도록 정해져있다. 또한  $M_1=M_3=120 \mu\text{H}$ ,  $M_2=80 \mu\text{H}$ 이며 사용한 다이오드는 STTH8R5 spice 모델을 사용하였다. 사용한 전원은 500 V, 주파수 250 kHz의 전압원을 사용하였으며 정류회로에 연결되는  $C_L=500 \mu\text{F}$ , 부하는 저항을 사용하여 10  $\Omega$ 에서 100  $\Omega$ 으로 변화시켰다. 주어진 파라미터로부터 식(1)을 통해  $I_{eq}$ 는 1.767 A임을 계산하였으며 이를 식(5)에 대입하여 얻은 출력전류  $I_L$ 을 계산하였다. 다음의 그림 3의 그래프는 부하 임피던스 변동에 따른 출력전류  $I_L$ 의 계산결과와 시뮬레이션 결과를 비교한 그래프를 나타낸다.



〈그림 3〉 부하 임피던스 변동에 따른 출력전류  $I_L$

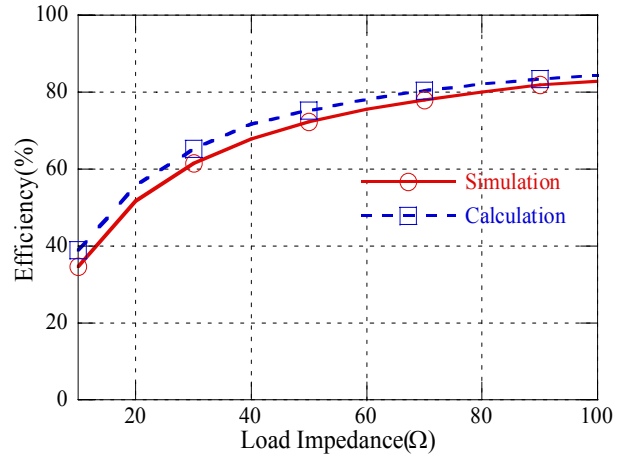
계산에 비해 시뮬레이션 결과가 작게 나오는데 이는 다이오드로 인한 손실을 고려하지 않았기 때문이다. 그림 4의 그래프는 식(6)을 통해 계산한 시스템의 입력 임피던스와 시뮬레이션 결과를 비교한 것이다.



〈그림 4〉 부하 임피던스 변동에 따른 입력 임피던스  $Z_{in}$

그림 4의 그래프에서 볼 수 있듯이 시뮬레이션과 계산 결과 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 식(9)를 통해 계산한 전력효율과 정류부를 연결한 회로의 시뮬레이션 결과를 비교하면 그림 5

의 그래프와 같다.



〈그림 5〉 부하 임피던스 변동에 따른 효율 비교

그림 5의 그래프에서 알 수 있듯이 정류부를 연결한 시스템의 시뮬레이션 결과와  $Z_{rect}$ 를 사용하여 계산한 전력효율이 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 계산 결과에 비하여 시뮬레이션 결과가 낮은 효율을 보이는 것은 앞에서와 마찬가지로 다이오드의 전력 소모를 고려하지 않은 것에 기인한다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 자기공진방식의 무선전력전송 시스템을 전류원으로 등가 모델링하여 연결되는 정류부의 입출력 특성을 파악하고 정류부를 등가 임피던스로 변환하였다. 정류부의 등가 임피던스 변환을 통하여 정류부에서의 출력 전류 및 전력, 전체 시스템의 입력 임피던스 계산방법을 제시하였다. 제시된 방법을 통해 정류부를 포함한 전체 시스템의 전력효율을 유도하였으며 계산을 통해 얻은 결과는 다이오드로 인한 손실을 제외하면 시뮬레이션 결과와 거의 일치하는 것을 확인하였다. 본 논문에서는 자기공진방식에 한하여 해석방법을 제시하였지만, 자기공진방식과 같이 전류원으로 모델링되는 전자기 유도방식에서도 유사한 해석방법이 적용할 수 있다.

### [참 고 문 헌]

- [1] A. Kurs, 외 'Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances', Science, vol.317, pp.83-86, 2007.
- [2] A. P. Sample 외 'Analysis, experimental results, and range adaptation of magnetically coupled resonators for wireless power transfer', IEEE Trans. Industrial Electronics, vol.58, no. 2, pp.544-554, 2010.
- [3] 대한전기학회 기획시리즈, "무선전력전송 기술의 동향 및 현황", 대한전기학회, 제 59권 제 1호, 2010년 1월.
- [4] 전력전자학회지 특집호, "무선전력전송 기술", 전력전자학회, vol. 15, no. 6, 2010.
- [5] 김도현 외, "무선전력전송 시스템의 회로해석 및 등가회로 모델링", 2011년 춘계 마이크로파 및 전자전파 학술대회 논문집, 제34권 제1호, p191, 2011