

유도 결합 가열 시스템의 등가 회로 모델링 방법

김은성*, 오원현**, 전종운**, 박성민*

홍익대학교 전자전기융합공학과*, 제이텍코리아**

Equivalent Circuit Modeling Method For Inductively Coupled Heating System

Eun-Seong Kim*, Won-Hyun Oh**, Jong-Woon Jeon**, Sung-Min Park*

Electronic & Electrical Engineering Hongik University*, JTEK Korea**

ABSTRACT

본 논문에서는 기존의 유도 가열 시스템에서 유도 가열 거리가 멀 때 보상 인덕터를 추가하여 효율을 높이는 유도 결합 가열 시스템의 등가 회로 모델링을 제안한다. 제안하는 부하 모델링은 인덕터 선간 거리, 크기, 용기와 인덕터의 거리, 인덕터 간 거리 등을 고려한 모델링으로 다양한 조건을 부여하여 수행할 수 있다.

1. 서론

유도 가열 시스템(Induction Heating, IH)은 인덕터와 용기간의 거리가 증가하게 되면 역률이 낮아지게 되어 효율 및 출력이 낮아지게 된다. 이를 해결하기 위해 보상 인덕터를 추가하여 효율 및 출력을 개선하는 유도 결합 가열(Inductively Coupled Heating, ICH)에 대한 연구가 진행 중이다. 본 논문에서는 인덕터 선간 거리, 선 크기, 턴 수, 인덕터와 용기 간 거리, 주 인덕터와 보상 인덕터의 거리를 고려한 등가 부하 모델링을 제안한다.

2. 본론

2.1 인덕터 간 상호 인덕턴스 계산

유도 결합 가열 시스템의 보상 인덕터를 사용하였기에 주 인덕터와 보상 인덕터 간 상호 인덕턴스 또한 고려하여 등가회로를 계산하여야 한다. 그림 1은 주 인덕터와 보상 인덕터의 물리적 구조를 나타낸 그림이다. 그림 1과 같이 일반적인 가정용 인덕션 인덕터의 모양은 중앙에서부터 시작하여 원형을 유지하며 옆으로 점차 감겨 있는 모양을 가지고 있다. 주 인덕터와 보상 인덕터의 모양이 위에 언급한 것과 같고 각 인덕터 중앙이 수직으로 정렬되어 있다 가정한다. 주 인덕터와 보상 인덕터간 상호 인덕턴스 식은 아래와 같다.

$$M_{ps} = \sum_{i=1}^{i=n_p} \sum_{j=1}^{j=n_s} \frac{\mu_0 \pi \alpha_p^2 \alpha_s^2}{2(\alpha_p^2 + \alpha_s^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} \left(1 + \frac{15}{32} \gamma_{ps}^2 + \frac{315}{1024} \gamma_{ps}^4\right) \quad (1)$$

$$\alpha_k = r_{out,k} - (n_k - 1)(w_k + s_k) - w_k/2, \quad k = p, s \quad (2)$$

$$\gamma_{ps} = 2\alpha_p \alpha_s / (\alpha_p^2 + \alpha_s^2 + z^2) \quad (3)$$

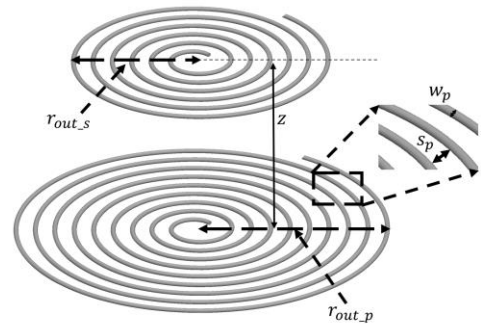


그림 1. 유도 결합 가열 시스템의 물리적 구조

M_{ps} 는 주 인덕터와 보상 인덕터간 상호 인덕턴스이며, $r_{out,p}$, $r_{out,s}$ 는 주 인덕터와 보상 인덕터 마지막 턴의 반지름, n_p , n_s 는 각 인덕터 턴 수, w_p , w_s 는 각 인덕터 선 굵기, s_p , s_s 는 각 인덕터 선간 간격, z 는 주 인덕터와 보상 인덕터 간 거리를 나타낸다.

2.2 용기와 인덕터 상호 인덕턴스 계산

용기와 인덕터간 상호 인덕턴스의 경우 인덕터의 각 턴과 용기 간 상호 인덕턴스의 합으로 구할 수 있으며, 각 인덕터 중앙과 용기의 중앙이 수직으로 정렬되어 있다 가정할 때 각 인덕터와 용기간 상호 인덕턴스를 구하는 식은 아래와 같다.

$$M_{kl} = \sum_{k=1}^{k=n_k} \mu_0 \sqrt{\alpha_k r_l} \left[\left(\frac{2}{\beta} - \beta \right) K - \frac{2}{\beta} E \right], \quad k = p, s \quad (4)$$

$$\beta = \frac{2\sqrt{\alpha_k r_l}}{\sqrt{(\alpha_k + r_l)^2 + h_k^2}} \quad (5)$$

$$K = \frac{\pi}{2} \left[1 + \left(\frac{1}{2} \right)^2 \beta^2 + \left(\frac{3}{8} \right)^2 \beta^4 + \dots + \frac{(2n-1)!!}{2^n n!} \beta^{2n} \right] \quad (6)$$

$$E = \frac{\pi}{2} \left[1 - \frac{1}{2^2} \beta^2 - \frac{1^2 \cdot 3}{2^2 \cdot 4^2} \beta^4 - \dots - \frac{(2n-1)!!}{2^n n!} \beta^{2n} \right] \quad (7)$$

M_{pl} 은 주 인덕터와 용기간의 상호 인덕턴스, M_{sl} 은 보상 인덕터와 용기간의 상호 인덕턴스, r_l 은 용기의 반지름, h_p 는 주 인덕터와 용기간의 거리, h_s 는 보상 인덕터와 용기간의 거리, 식 (6)은 제 1종 타원 적분, 식 (7)은 제 2종 타원 적분식을 나타낸다.

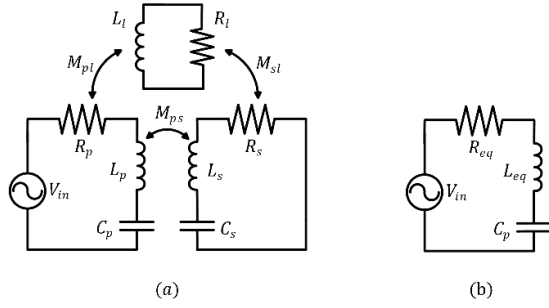


그림 2. (a) 유도 결합 시스템 등가 회로
(b) 전체 등가 회로

2.3 유도 결합 가열 시스템의 등가 회로 분석

유도 결합 가열 시스템의 등가 회로는 그림 2 (a)와 같다. 주 인덕터 측의 임피던스는 보상 인덕터와 부하 측 회로와의 상호 인덕턴스의 영향을 받으며,^[3] 주 인덕터 측에서 바라본 등가 회로는 그림 2 (b) 와 같다. 각 회로의 임피던스 식은 아래와 같다.

$$Z_k = \frac{1}{j\omega C_k} + j\omega L_k + R_k, \quad k = p, s \quad (8)$$

$$Z_l = j\omega L_l + R_l \quad (9)$$

$$Z_{eq} = \frac{1}{j\omega C_p} + j\omega L_{eq} + R_{eq} \quad (10)$$

식 (8)에서 Z_p, Z_s 는 주 인덕터, 보상 인덕터측 회로의 등가 임피던스이며, 식 (9)의 Z_l 은 부하 회로의 등가 임피던스이다. 전체 등가 회로의 전체 임피던스 Z_{eq} 는 식 (10)으로 나타낼 수 있다.

$$L_{eq} = L_p - AM_{sl}^2 L_l - \frac{(\omega M_{ps})^2 (L_p - AM_{pl}^2 L_l)}{(R_s + AM_{sl}^2 R_l)^2 + (\omega(L_s - AM_{sl}^2 L_l) - \frac{1}{\omega C_s})^2} \quad (11)$$

$$R_{eq} = R_p + AM_{sl}^2 R_l + \frac{(\omega M_{ps})^2 (R_p + AM_{pl}^2 R_l)}{(R_s + AM_{sl}^2 R_l)^2 + (\omega(L_s - AM_{sl}^2 L_l) - \frac{1}{\omega C_s})^2} \quad (12)$$

$$A = \frac{\omega^2}{R_l^2 + (\omega L_l)^2} \quad (13)$$

식 (11)은 전체 등가회로의 인덕턴스 값이며 식 (12)는 전체 등가 회로의 저항 값이다. 전체 등가 회로의 임피던스는 각 회로의 자기 임피던스와 상호 인덕턴스를 사용하여 계산할 수 있다.

3. MATLAB 시뮬레이션

제안하는 유도 결합 가열 시스템의 등가 회로 모델링을 MATLAB/Simulink를 통해서 검증하였다. 시뮬레이션에서 사용한 파라미터 값은 표 1과 같으며, 그림 3은 일반적인 유도 가열 시스템과 유도 결합 가열 시스템에서의 임피던스 곡선을 나타낸 그림이다. 유도 결합 가열 시스템의 공진 주파수 이상의 주파수에서 유도 결합 가열 시스템의 임피던스 값은 기존의 유도 가열 시스템의 임피던스와 비교하였을 때 낮은 것을 확인하였으며, 각 시스템의 주 인덕터가 동일한 공극을 가질 때 유도 결합 가열 시스템이 기존의 유도 가열 시스템에서 보다 역률이 개선된 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 인덕터와 부하간 거리가 증가하였을 때 유도 결합 가열 시스템을 사용하여 역률을 개선하여 출력을 높일 수 있음을 확인할 수 있었다.

Parameter	Value	Parameter	Value
L_p	55.4 [μH]	r_l	3.5 [cm]
R_p	32 [$m\Omega$]	h_p	3 [cm]
C_p	1 [μF]	h_s	0.6 [cm]
L_s	38.8 [μH]	z	2.4 [cm]
R_s	25 [$m\Omega$]	w_p, w_s	4[mm]
C_s	1.43 [μF]	s_p, s_s	0[mm]
r_{out_p}	9.9 [cm]	n_p	18
r_{out_s}	9.1 [cm]	n_s	16

표 1. 시뮬레이션 파라미터

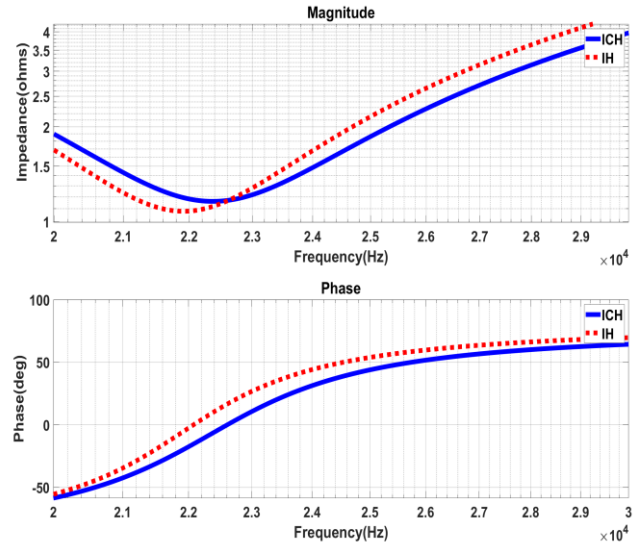


그림 3. 유도 가열 시스템과 유도 결합 가열 시스템의 임피던스 곡선

4. 결론

본 논문에서는 보상 인덕터를 사용한 유도 결합 가열 모델링을 제안하였으며, 각 인덕터의 선간 거리, 선 굵기, 턴 수, 인덕터 간 거리, 용기와 인덕터와의 거리를 통하여 전체 등가 회로를 계산할 수 있음을 확인하였다. 또한 인덕터와 용기간의 거리가 멀 때 유도 결합 가열 시스템이 기존 유도 가열 시스템과 비교하였을 때 역률이 개선되어 출력을 향상시킬 수 있음을 확인하였다. 향후 계획으로는 실제 유도 결합 가열 시스템을 구현하여 비교, 분석할 예정이다.

참고 문헌

- [1] M. Wesolowski and A. Czaplicki, "Modeling of Flat Inductor -Workpiece Heating Systems for Design of Induction Heaters," 2018 Progress in Applied Electrical Engineering (PAEE), Koscielisko, Poland, 2018, pp. 1-5,
- [2] S. Raju, R. Wu, M. Chan and C. P. Yue, "Modeling of Mutual Coupling Between Planar Inductors in Wireless Power Applications," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 29, no. 1, pp. 481-490, Jan. 2014.
- [3] W. Han, K. T. Chau, C. Jiang and W. Liu, "All-Metal Domestic Induction Heating Using Single-Frequency Double-Layer Coils," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 54, no. 11, pp. 1-5, Nov. 2018